

# 航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2016年第5期 总第127期



主管单位 中国航空工业集团公司  
业务指导 中国航空工业建设协会  
编印单位 中国航空规划设计研究总院有限公司

内部资料 免费交流  
准印证号：京内资准字9914-L0337号

## 成都博物馆新馆

**建设地点：**四川 成都

**设计单位：**中航规划建筑院

**建设情况：**建成

**用地面积：**1.1万m<sup>2</sup>

**建筑面积：**6.5万m<sup>2</sup>

### 项目简介：

成都博物馆新馆位于历史文化名城——成都市核心区域，位于天府广场的西侧，与省图书馆、省美术馆、省科技馆、锦城艺术宫等建筑共同围合天府广场。成都博物馆新馆的建设目标是“世界一流、国内领先”和“建筑安全、文物安全”，并将成为四川省的标志性建筑。

成都博物馆新馆是展示成都文化，体现成都和谐、包容的城市特色的重要场所。博物馆的设计汲取了中国哲学理念的精华——“埏埴以为器，当其无，有器之用。凿户牖以为室，当其无，有室之用”，以阴阳平衡、虚实相对、和谐之道为设计原则，强调建筑生成于内在因素和外在环境的共同影响。

成都博物馆新馆建筑功能及构造复杂、难度高，设计与施工的技术含量与难度为国内顶级水平。尤其是2008年汶川地震对成都地区地震设防要求的提高，以及重要博物馆建筑对于藏品安防、文物隔震、观展流线、消防安全等条件的苛刻需要，都给各专业设计带来了极大的挑战。

成都博物馆新馆的设计开创了多个第一、采用了多项创新技术。

- 国内最大规模采用隔震措施的博物馆建筑、我司第一个隔震建筑。
- 国内最大的室外建筑用铜的建筑。
- 国内第一个进行文物安全性能化研究与设计的博物馆建筑。
- 地下永久性围护结构的应用。

合作设计单位：英国萨则兰·弗赛规划建筑事务所

泛道（北京）国际设计咨询有限公司



## 国务院决定大力发展装配式建筑 推动产业结构调整升级

国务院总理李克强9月14日主持召开国务院常务会议，部署加快推进“互联网+政务服务”，以深化政府自身改革更大程度利企便民；决定大力发展装配式建筑，推动产业结构调整升级。

会议认为，按照推进供给侧结构性改革和新型城镇化发展的要求，大力发展钢结构、混凝土等装配式建筑，具有发展节能环保新产业、提高建筑安全水平、推动化解过剩产能等一举多得之效。（摘自《建筑时报》）

## 国务院推出重大建设项目三年滚动投资计划

国务院总理李克强9月5日主持召开国务院常务会议，部署在关键领域和薄弱环节加大补短板工作力度，依靠改革开放推动发展升级和民生改善。会议指出，适当扩大内需，可以为供给侧结构性改革营造良好环境，关键要通过加大补短板工作力度，既带动扩大合理有效投资，又增加有效供给，对稳增长、增后劲、促就业、惠民生具有重要作用。要抓住当前原材料等大宗商品价格较低等有利时机，加大积极财政政策实施力度，聚焦脱贫攻坚、灾后重建和中小水利治理加固、重大软硬基础设施建设、新产业新动能培育等重点领域，注重体制机制改革创新，优化政策“配方”打好组合拳。（摘自“新华社”）

## 国防科工局召开“十三五”军工固定资产投资指导意见和管理制度宣贯会

10月13日，国防科工局召开“十三五”军工固定资产投资指导意见和管理制度首次宣贯会议。会议强调，“十三五”期间，要把转变建设模式作为国防科技工业供给侧结构性改革的重要举措，以建设中国特色先进国防科技工业体系为根本方向，大力推进体系效能型建设，在立足国民经济的基础上，推动能力协同发展，优化资源配置，着力提高投资的效率、效益和效果，实现能力建设的系统化、专业化、集约化和社会化。坚持政府主导与市场作用相结合，推动建设理念、建设思路、

建设重点、投资方式转变，推行“两个缩小”“两个统筹”，提高能力建设精准度、开放度、集中度和体系贡献度。（摘自“国家国防科工局网”）

## 工信部等四部委联合发布制造业创新中心等5个工程实施指南

为贯彻落实《中国制造2025》，推进制造强国建设，工业和信息化部、发展改革委、科技部、财政部组织编制了制造业创新中心建设、工业强基、智能制造、绿色制造和高端装备创新5大工程实施指南，通过政府引导，形成行业共识，汇聚社会资源，突破制造业发展的瓶颈和短板，抢占未来竞争制高点。

此次发布的5个工程实施指南，明确了未来五到十年制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造、高端装备创新等领域的发展方向和重点工作。

制造业创新中心建设工程以突破重点领域前沿技术和关键共性技术为方向，建立从技术开发、转移扩散到首次商业化应用的创新链条；工业强基工程主要解决核心基础零部件、关键基础材料、先进基础工艺的工程和产业化瓶颈问题，构建产业技术基础服务。这两个工程主要解决基础能力问题。绿色制造工程通过推动制造业各行业、各环节的绿色改造升级，加快构建绿色制造体系；智能制造工程推动制造业智能转型，推进产业迈向中高端；高端装备创新工程以突破一批重大装备的产业化应用为重点，为各行业升级提供先进的生产工具。（摘自“新华网”）

## 住建部发布2015年全国工程勘察设计统计公报

8月30日，住建部发布2015年全国工程勘察设计统计公报，对2015年全国具有资质的工程勘察设计企业的总体情况从业人员情况业务完成情况财务情况等基本数据进行了统计根据公报，2015年全国工程勘察设计企业营业收入总计27089.0亿元，同比增加8.6%；工程勘察设计企业全年利润总额1623.9亿元，同比增加9.4%；企业净利润1320.5亿元，同比增加8.6%。（摘自《建筑时报》）

## 住房和城乡建设部印发《2016-2020年建筑业信息化发展纲要》

住房和城乡建设部9月19日在官网公布其印发的《2016-2020年建筑业信息化发展纲要》，旨在增强建筑业信息化发展能力，优化建筑业信息化发展环境，加快推动信息技术与建筑业发展深度融合，充分发挥信息化的引领和支撑作用，塑造建筑业新业态。

纲要提出的发展目标：“十三五”时期，全面提高建筑业信息化水平，着力增强BIM、大数据、智能化、移动通讯、云计算、物联网等信息技术集成应用能力，建筑业数字化、网络化、智能化取得突破性进展，初步建成一体化行业监管和服务平台，数据资源利用水平和信息服务能力明显提升，形成一批具有较强信息技术创新能力和信息化应用达到国际先进水平的建筑企业及具有关键自主知识产权的建筑业信息技术企业。（摘自《建筑时报》）

## 中航工业位于中国企业对外投资存量百强第25位

9月22日，在国务院新闻办举行的新闻发布会上，由商务部、国家统计局、国家外汇管理局共同编辑出版的《2015年度中国对外直接投资统计公报》正式发布。根据公报，按2015年末对外直接投资存量排序，在中国非金融类跨国公司100强里，中国航空工业集团公司位列25位，中国移动排名第一。按2015年末境外企业资产总额排序，中国航空工业集团公司位列24位；按2015年末境外企业销售收入排序，中国航空工业集团公司位列25位。

公报显示，2015年中国对外直接投资创下1456.7亿美元的历史新高，首次位列世界第二。到2015年底，我国对外投资已遍布全球188个国家和地区，境外企业资产总额超过4万亿美元，投资存量排名也由第25位上升至全球第8位。目前，中国对外投资覆盖了所有行业类别，2015年流向制造业的投资同比增长108.5%，其中一半左右流向了装备制造业，并购成为我国对外投资的重要方式，其中，信息技术、制造业领域的并购已超过资源和矿产类。（摘自《中国航空报》）

## 住建部对安全生产违法违规行为坚持“零容忍”和重处罚

“要严查、重罚建筑施工生产安全事故，对每起建筑施工生产安全责任事故都要一查到底、绝不姑息。”住建部28日约谈部分地区建筑施工安全生产负责人，住建部副部长易军提出，对安全生产违法违规行为包括转包挂靠、出借资质资格等，要坚持“零容忍”和重处罚。

为进一步抓好建筑施工安全生产工作，易军强调，要着力落实企业安全生产责任制，企业主要负责人、项目经理、专职安全管理人员、一线特种作业人员等必须持证上岗，严格依法履行安全职责；要着力提升建筑施工安全监管执法能力，推进监管执法规范化和信息化；要着力抓好建筑施工安全生产标准化工作，全面深入开展建筑施工企业和项目安全生产标准化考评；要着力推进建筑施工安全生产诚信体系建设，加快建立健全建筑施工安全生产不良信用记录、安全生产诚信“黑名单”、企业安全生产诚信评价等制度，并完善相应奖惩机制。（摘自“中国政府网”）

## 2016通用航空产业发展高端峰会开幕

为促进我国通用航空产业快速发展，深入实施“一带一路”、“京津冀协同发展”、“军民融合”等国家战略，9月13日，“2016石家庄通用航空产业发展高端峰会”在石家庄栾城通用航空基地举行。

据了解，通用航空业是近年来国家重点发展的战略性新兴产业。国务院2015年发布的《关于积极发挥新消费引领作用加快培育形成新供给新动力的指导意见》提出，要加快推进低空空域开放，并将通用航空与铁路民航等其他产业并列，通航产业有望成为新的经济增长点。2016年5月，国务院办公厅印发《关于促进通用航空业发展的指导意见》，这是建国以来国务院出台的第一个促进通用航空业发展的政策性文件，明确了未来五年我国通用航空业发展的总体思路和主要任务，也是“十三五”时期指导我国通用航空改革发展的纲领性文件，更进一步为河北省大力发展通用航空产业提供了根本遵循。（摘自“中国网”）

## 中国航空发动机集团公司成立大会在京举行

8月28日，中国航空发动机集团公司成立大会在北京举行。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平作出重要指示强调，加快实现航空发动机及燃气轮机自主研发和制造生产，为把我国建设成为航空强国而不懈奋斗。中共中央政治局常委、国务院总理李克强作出批示指出，航空发动机是国之重器，是装备制造业的尖端，尽快在这一领域实现突破，对于增强我国经济和国防实力、提升综合国力具有重大意义。中共中央政治局委员、国务院副总理马凯出席大会并讲话指出，要实现航空发动机从测绘仿制到自主创新战略转变，实现我国由航空大国向航空强国的战略转变。（摘自“新华社”）

## 我国成全球第二大航空运输系统

2015年，中国国际客运量和新开国际航线数量增速均在30%以上，创下历史新高，已成为全球第二大航空运输系统。

这是中国民用航空局副局长董志毅昨天在四川成都召开的第22届世界航线发展大会上透露的。该大会由英国博闻集团主办，成都双流国际机场承办，来自全球350多家航空公司、1200多家机场、200多家政府机构和国际组织的约3500位代表参会。自1995年创办以来，先后在伦敦、阿姆斯特丹、哥本哈根、迪拜、温哥华、芝加哥等城市举办过，成都是继2009年北京之后、中国第二个举办该大会的城市。

截至去年底，我国已与118个国家签订了双边运输协定；20家中国航企从中国飞往全球53个国家138座城市，129家境外航企从126座城市飞往中国57座城市。（摘自“新华社”）

## 中国航空研究院与美国国家航空航天局签合作协议

9月27日，中国航空研究院（CAE）与美国国家航空航天局（NASA）在第30届ICAS大会和第7届IFAR峰会期间签署了关于民用航空空中交通管理领域的科技合作

协议。NASA博尔登局长和CAE张新国院长分别在协议文本上签字。这是中美两国国立航空科研机构之间在近20多年来首次签署的双边合作协议。张新国院长指出，此次合作协议的签署具有重要的历史意义，期待中美双方的研究机构能通力合作，共同推进两国乃至全球空管技术的进步。NASA博尔登局长表示，预期中国的航空旅行在不远的将来会经历本质性的增长，我们双方的紧密合作将有助于改善对地面延误的可预见性，因此航空公司可以更好地进行航班离港规划从而改善运营效率。同时也对在中国运行的美国航空公司以及整个航空运输业产生积极的影响。（摘自“中国航空新闻网”）

## 2016年度工程总承包企业完成合同额排行榜

按照《关于2016年开展从事工程项目管理和工程总承包企业完成合同额百名排序工作的通知》（中设协字[2016]9号）的有关精神，中国勘察设计协会建设项目管理和工程总承包分会（以下简称分会）在全国勘察设计行业组织开展了从事工程项目管理和工程总承包企业完成合同额百名排序工作。

在各地地方、各部门勘察设计同业协会支持与配合下，相关企业完成了工程总承包排序数据的自主申报工作，各部门勘察设计同业协会和分会秘书处按照规定对企业的申报数据进行了审核、汇总和复核。经中国勘察设计协会批准，现将工程总承包完成合同额2016年度排序名单予以公布。（摘自微信公众号“中国勘察设计杂志”）

工程总承包完成合同额二〇一六年排名

序号	单位名称	完成合同金额
1	中国中材国际工程股份有限公司	1,694,891
2	中国电力工程顾问集团有限公司	1,510,477
3	中石化洛阳工程有限公司	1,393,453
4	中国寰球工程公司	1,340,458
5	中国核电工程有限公司	1,274,039
6	中国石化工程建设有限公司	1,274,039
7	中国天辰工程有限公司	1,098,426
8	中国石油工程建设公司	996,382
9	中国建材国际工程集团有限公司	795,400
10	中国航空规划设计研究总院有限公司	777,299

## 住房城乡建设部关于印发2016—2020年建筑业信息化发展纲要的通知

各省、自治区住房城乡建设厅，直辖市建委（规委），新疆生产建设兵团建设局：

为贯彻落实《中共中央 国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》及《国家信息化发展战略纲要》，进一步提升建筑业信息化水平，我部组织编制了《2016—2020年建筑业信息化发展纲要》。现印发给你们，请结合实际贯彻执行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2016年8月23日

### 2016—2020年建筑业信息化发展纲要

建筑业信息化是建筑业发展战略的重要组成部分，也是建筑业转变发展方式、提质增效、节能减排的必然要求，对建筑业绿色发展、提高人民生活品质具有重要意义。

#### 一、指导思想

贯彻党的十八大以来、国务院推进信息化发展相关精神，落实创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念及国家大数据战略、“互联网+”行动等相关要求，实施《国家信息化发展战略纲要》，增强建筑业信息化发展能力，优化建筑业信息化发展环境，加快推动信息技术与建筑业发展深度融合，充分发挥信息化的引领和支撑作用，塑造建筑业新业态。

#### 二、发展目标

“十三五”时期，全面提高建筑业信息化水平，着力增强BIM、大数据、智能化、移动通讯、云计算、物联网等信息技术集成应用能力，建筑业数字化、网络化、智能化取得突破性进展，初步建成一体化行业监管和服务平台，数据资源利用水平和信息服务能力明显提升，形成一批具有较强信息技术创新能力和信息化应用达到国际先进水平的建筑企业及具有自主知识产权的建筑业信息技术企业。

#### 三、主要任务

##### （一）企业信息化。

建筑企业应积极探索“互联网+”形势下管理、生产的新模式，深入研究BIM、物联网等技术的创新应用，创新商业模式，增强核心竞争力，实现跨越式发展。

##### 1. 勘察设计类企业。

###### （1）推进信息技术与企业管理深度融合。

进一步完善并集成企业运营管理信息系统、生产经营管理信息系统，实现企业管理信息系统的升级换代。深度融合BIM、大数据、智能化、移动通讯、云计算等信息技术，实现BIM与企业管理信息系统的一体化应用，促进企业设计水平和管理水平的提高。

###### （2）加快BIM普及应用，实现勘察设计技术升级。

在工程项目勘察中，推进基于BIM进行数值模拟、空间分析和可视化表达，研究构建支持异构数据和多种采集方式的工程勘察信息数据库，实现工程勘察信息的有效传递和共享。在工程项目策划、规划及监测中，集成应用BIM、GIS、物联网等技术，对相关方案及结果进行模拟分析及可视化展示。在工程项目设计中，普及应用BIM进行设计方案的性能和功能模拟分析、优化、绘图、审查，以及成果交付和可视化沟通，提高设计质量。

推广基于BIM的协同设计，开展多专业间的数据共享和协同，优化设计流程，提高设计质量和效率。研究开发基于BIM的集成设计系统及协同工作系统，实现建筑、结构、水暖电等专业的信息集成与共享。

### (3) 强化企业知识管理，支撑智慧企业建设。

研究改进勘察设计信息资源的获取和表达方式，探索知识管理和发展模式，建立勘察设计知识管理信息系统。不断开发勘察设计信息资源，完善知识库，实现知识的共享，充分挖掘和利用知识的价值，支撑智慧企业建设。

## 2. 施工类企业。

### (1) 加强信息化基础设施建设。

建立满足企业多层级管理需求的数据中心，可采用私有云、公有云或混合云等方式。在施工现场建设互联网基础设施，广泛使用无线网络及移动终端，实现项目现场与企业管理的互联互通强化信息安全，完善信息化运维管理体系，保障设施及系统稳定可靠运行。

### (2) 推进管理信息系统升级换代。

普及项目管理信息系统，开展施工阶段的BIM基础应用。有条件的企业应研究BIM应用条件下的施工管理模式和协同工作机制，建立基于BIM的项目管理信息系统。

推进企业管理信息系统建设。完善并集成项目管理、人力资源管理、财务资金管理、劳务管理、物资材料管理等信息系统，实现企业管理与主营业务的信息化。有条件的企业应推进企业管理信息系统中项目业务管理和财务管理的深度集成，实现业务财务管理一体化。推动基于移动通讯、互联网的施工阶段多参与方协同工作系统的应用，实现企业与项目其他参与方的信息沟通和数据共享。注重推进企业知识管理信息系统、商业智能和决策支持系统的应用，有条件的企业应探索大数据技术的集成应用，支撑智慧企业建设。

### (3) 拓展管理信息系统新功能。

研究建立风险管理信息系统，提高企业风险管控能力。建立并完善电子商务系统，或利用第三方电子商务系统，开展物资设备采购和劳务分包，降低成本。开展BIM与物联网、云计算、3S等技术在施工过程中的集成应用研究，建立施工现场管理信息系统，创新施工管理模式和手段。

## 3. 工程总承包类企业。

### (1) 优化工程总承包项目信息化管理，提升集成应用水平。

进一步优化工程总承包项目管理组织架构、工作流程及信息流，持续完善项目资源分解结构和编码体系。深化应用估算、投标报价、费用控制及计划进度控制等信息系统，逐步建立适应国际工程的估算、报价、费用及进度管控体系。继续完善商务管理、资金管理、财务管理、风险管理及电子商务等信息系统，提升成本管理和风险管控水平。利用新技术提升并深化应用项目管理信息系统，实现设计管理、采购管理、施工管理、企业管理等信息系统的集成及应用。

探索PPP等工程总承包项目的信息化管理模式，研究建立相应的管理信息系统。

### (2) 推进“互联网+”协同工作模式，实现全过程信息化。

研究“互联网+”环境下的工程总承包项目多参与方协同工作模式，建立并应用基于互联网的协同工作系统，实现工程项目多参与方之间的高效协同与信息共享。研究制定工程总承包项目基于BIM的多参与方成果交付标准，实现从设计、施工到运行维护阶段的数字化交付和全生命周期信息共享。

## (二) 行业监管与服务信息化。

积极探索“互联网+”形势下建筑行业格局和资源整合的新模式，促进建筑业行业新业态，支持“互联网+”形势下企业创新发展。

### 1. 建筑市场监管。

#### (1) 深化行业诚信管理信息化。

研究建立基于互联网的建筑企业、从业人员基本信息及诚信信息的共享模式与方法。完善行业诚信管理信息系统，实现企业、从业人员诚信信息和项目信息的集成化信息服务。

#### (2) 加强电子招投标的应用。

应用大数据技术识别围标、串标等不规范行为，保障招投标过程的公正、公平。

(3) 推进信息技术在劳务实名制管理中应用。

应用物联网、大数据和基于位置的服务(LBS)等技术建立全国建筑工人信息管理平台,并与诚信管理信息系统进行对接,实现深层次的劳务人员信息共享。推进人脸识别、指纹识别、虹膜识别等技术在工程现场劳务人员管理中的应用,与工程现场劳务人员安全、职业健康、培训等信息联动。

## 2. 工程建设监管。

(1) 建立完善数字化成果交付体系。

建立设计成果数字化交付、审查及存档系统,推进基于二维图的、探索基于BIM的数字化成果交付、审查和存档管理。开展白图代蓝图和数字化审图试点、示范工作。完善工程竣工备案管理信息系统,探索基于BIM的工程竣工备案模式。

(2) 加强信息技术在工程质量安全管理中的应用。

构建基于BIM、大数据、智能化、移动通讯、云计算等技术的工程质量、安全监管模式与机制。建立完善工程项目质量监管信息系统,对工程实体质量和工程建设、勘察、设计、施工、监理和质量检测单位的质量行为监管信息进行采集,实现工程竣工验收备案、建筑工程五方责任主体项目负责人等信息共享,保障数据可追溯,提高工程质量监管水平。建立完善建筑施工安全监管信息系统,对工程现场人员、机械设备、临时设施等安全信息进行采集和汇总分析,实现施工企业、人员、项目等安全监管信息互联共享,提高施工安全监管水平。

(3) 推进信息技术在工程现场环境、能耗监测和建筑垃圾管理中的应用。

研究探索基于物联网、大数据等技术的环境、能耗监测模式,探索建立环境、能耗分析的动态监控系统,实现对工程现场空气、粉尘、用水、用电等的实时监测。建立建筑垃圾综合管理信息系统,实现项目建筑垃圾的申报、识别、计量、跟踪、结算等数据的实时监控,提升绿色建造水平。

## 3. 重点工程信息化。

大力推进BIM、GIS等技术在综合管廊建设中的应用,建立综合管廊集成管理信息系统,逐步形成智能化城市综合管廊运营服务能力。在海绵城市建设中积极应用BIM、虚拟现实等技术开展规划、设计,探索基于云计算、大数据等的运营管理,并示范应用。加快BIM技术在城市轨道交通工程设计、施工中的应用,推动各参建方共享多维建筑信息模型进行工程管理。在“一带一路”重点工程中应用BIM进行建设,探索云计算、大数据、GIS等技术的应用。

## 4. 建筑产业现代化。

加强信息技术在装配式建筑中的应用,推进基于BIM的建筑工程设计、生产、运输、装配及全生命周期管理,促进工业化建造。建立基于BIM、物联网等技术的云服务平台,实现产业链各参与方之间在各阶段、各环节的协同工作。

## 5. 行业信息共享与服务。

研究建立工程建设信息公开系统,为行业和公众提供地质勘察、环境及能耗监测等信息服务,提高行业公共信息利用水平。建立完善工程项目数字化档案管理信息系统,转变档案管理服务模式,推进可公开的档案信息共享。

(三) 专项信息技术应用。

### 1. 大数据技术。

研究建立建筑业大数据应用框架,统筹政务数据资源和社会数据资源,建设大数据应用系统,推进公共数据资源向社会开放。汇聚整合和分析建筑企业、项目、从业人员和信用信息等相关大数据,探索大数据在建筑业创新应用,推进数据资产管理,充分利用大数据价值。建立安全保障体系,规范大数据采集、传输、存储、应用等各环节安全保障措施。

### 2. 云计算技术。



积极利用云计算技术改造提升现有电子政务信息系统、企业信息系统及软硬件资源，降低信息化成本。挖掘云计算技术在工程建设管理及设施运行监控等方面应用潜力。

### 3. 物联网技术。

结合建筑业发展需求，加强低成本、低功耗、智能化传感器及相关设备的研发，实现物联网核心芯片、仪器仪表、配套软件等在建筑业的集成应用。开展传感器、高速移动通讯、无线射频、近场通讯及二维码识别等物联网技术与工程项目管理信息系统的集成应用研究，开展示范应用。

### 4. 3D打印技术。

积极开展建筑业3D打印设备及材料的研究。结合BIM技术应用，探索3D打印技术运用于建筑部品、构件生产，开展示范应用。

### 5. 智能化技术。

开展智能机器人、智能穿戴设备、手持智能终端设备、智能监测设备、3D扫描等设备在施工过程中的应用研究，提升施工质量和效率，降低安全风险。探索智能化技术与大数据、移动通讯、云计算、物联网等信息技术在建筑业中的集成应用，促进智慧建造和智慧企业发展。

#### （四）信息化标准。

强化建筑行业信息化标准顶层设计，继续完善建筑业行业与企业信息化标准体系，结合BIM等新技术应用，重点完善建筑工程勘察设计、施工、运维全生命期的信息化标准体系，为信息资源共享和深度挖掘奠定基础。

加快相关信息化标准的编制，重点编制和完善建筑行业及企业信息化相关的编码、数据交换、文档及图档交付等基础数据和通用标准。继续推进BIM技术应用标准的编制工作，结合物联网、云计算、大数据等新技术在建筑行业的应用，研究制定相关标准。

## 四、保障措施

### （一）加强组织领导，完善配套政策，加快推进建筑业信息化。

各级城乡建设行政主管部门要制定本地区“十三五”建筑业信息化发展目标和措施，加快完善相关配套政策措施，形成信息化推进工作机制，落实信息化建设专项经费保障。探索建立信息化条件下的电子招投标、数字化交付和电子签章等相关制度。

建立信息化专家委员会及专家库，充分发挥专家作用，建立产学研用相结合的建筑业信息化创新体系，加强信息技术与建筑业结合的专项应用研究、建筑业信息化软科学研究。开展建筑业信息化示范工程，根据国家“双创”工程，开展基于“互联网+”的建筑业信息化创新创业示范。

### （二）大力增强建筑企业信息化能力。

企业应制定企业信息化发展目标及配套管理制度，加强信息化在企业标准化管理中的带动作用。鼓励企业建立首席信息官（CIO）制度，按营业收入一定比例投入信息化建设，开辟投融资渠道，保证建设和运行的资金投入。注重引进BIM等信息技术专业人才，培育精通信息技术和业务的复合型人才，强化各类人员信息技术应用培训，提高全员信息化应用能力。大型企业要积极探索开发自有平台，瞄准国际前沿，加强信息化关键技术应用攻关，推动行业信息化发展。

### （三）强化信息化安全建设。

各级城乡建设行政主管部门和广大企业要提高信息安全意识，建立健全信息安全保障体系，重视数据资产管理，积极开展信息系统安全等级保护工作，提高信息安全水平。

该项目设计理念从自然、历史、文化、科技几个方面提炼了驻马店深厚的地方文化。寓意盘古开天地的建筑形体屋面犹如漂浮的星空，流畅的曲线犹如点缀繁星的星河，隐喻驻马店城市的由来；建筑基座寓意大地，蕴含着城市的文明和科技瑰宝。基座与屋面之间的穹幕影院犹如初升的太阳，寓意青少年朝气蓬勃，是未来的希望。描绘驻马店焕然一新的城市图景。

设计将游园景观、建筑进行整体设计。湖面、绿化景观、广场、台阶与建筑自然过渡，形成整体的城市公共空间景观格局。建筑布局呈九宫格方正平面，科技馆和青少年宫分置于中庭两侧，两馆功能分区各成体系并有效沟通，在保证各馆

## 驻马店市青少年宫科技馆综合体建设项目

建设地点：河南驻马店

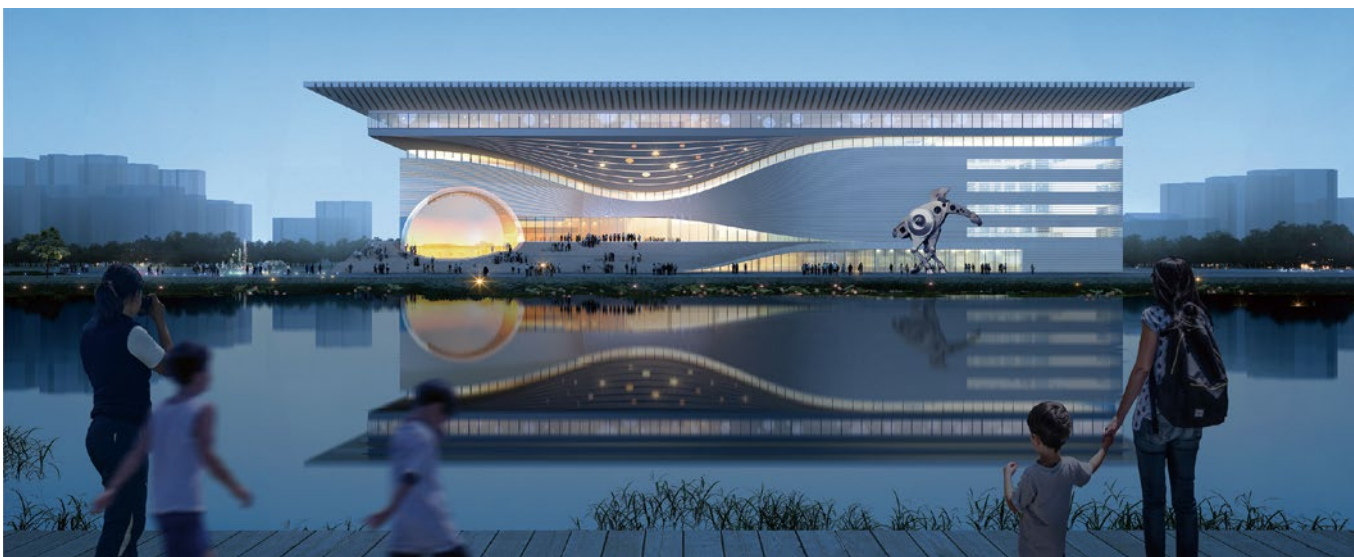
设计单位：中航规划建筑院

建设情况：设计中

用地面积：1.9万 $m^2$

建筑面积：8.9万 $m^2$

独立管理运营的同时通过观景廊连通。位于主入口上部悬挑屋面中的“星河讲坛”成为建筑公共空间的亮点，公众可在此聆听、交流、游走、眺望。





深入把握现代医院建筑的使用功能，着力体现功能的合理性、设施的先进性和设计理念的超前性，为人们提供优质、高效、周到的医疗服务。为全力打造一所集医疗、教学、科研、保健和康复为一体的三级综合医院，我们在规划设计中，提出以下设计理念：

#### （1）水平生长的有机医院

根据规划要求及地形环境特点，总体布局通过点、线、面不同形体的组合，突出贯穿建筑形体的水平向医疗轴线，将医院建筑沿水平延伸，合理布局门诊、医技、病房楼的工艺流程，沿纵深方向构成建筑发展主轴，合理规划医疗功能结构，做到合理分期建设、持续良性发展。

#### （2）组合灵活的模块化体系

突出“大综合、强专科”的医疗功能结构。根据医院发展的需要，医院能够在保持基本医疗结构的基础上灵活转换诊疗模式，开展新兴专科，提高多种医疗模式的可行性。

#### （3）以病人为中心的人性化医疗空间

在设计中贯彻“以病人为中心”的服务理念，营造愉快舒适的就医环境。以“人”为主体，为“人”服务，追求自然、生态的空间意境，在可能的条件下，尽量做到自然采光和自然通风，改变传统医院建筑的阴暗、不通风状况，创造令人愉悦的健康就医环境。

## 通辽市医院新院区建设项目

建设地点：内蒙古通辽

设计单位：中航规划建筑院

建设情况：设计中

用地面积：16.3万 $m^2$

总建筑面积：26万 $m^2$

#### （4）流线设计清晰、高效、可靠

合理组织医疗空间，人车分流、医患分流、洁污分流，尽可能缩短患者就医流线，为患者创造交通便捷、环境优美的就医环境，同时也为医护人员创造便捷、高效、舒适的工作环境。

#### （5）创建现代化与地域气候适宜性相结合的新型医院

考虑到通辽地域性的气候特点，设计布局充分利用场地自身特点，合理规划医疗结构，建筑形象突出区域医疗中心的标志性，既体现医院自身的功能定位，又形成全新的城市景观。

通辽市医院新院区建设项目是公司成立以来设计的规模最大、功能最全、等级最高的医疗建筑项目。

## 总体规划

项目规划从周边城市空间格局入手，综合考虑主干道交通、人行车行流线等因素，使得建筑群形成完整的室内外空间形态及景观环境，并与西侧公共服务区建筑群室内外空间形成良好的衔接。档案中心位于用地中央，建筑形体呈两个方形体量的组合。用地西侧和北侧结合现有城市绿地设计城市公共景观绿地公园，沿金鸡大道和成大线分别设置礼仪入口广场和公众步行出入口；用地在东侧规划路设置机动车出入口。考虑到馆藏档案的持续发展，在用地东侧结合景观预留二期发展用地。

## 设计理念

建筑设计概念以“城市之印”和“文化之礁”体现该建筑的地方性和文化性，突出滨海新城建

## 威海市档案中心

建设地点：山东威海

设计单位：中航规划建筑院

建设情况：在建

用地面积：2.8万 $m^2$

建筑面积：3.1万 $m^2$

设特点和档案文化的内涵。清雅的建筑色调和庄重大气的建筑形体与层叠有致的景观布局形成浑然一体的环境空间。建筑形体、台地绿化、室外艺术沙龙和树池以方形母题进行组合并由城市道路逐层巧妙拼接升起，抽象出水墨印章以及海水冲刷礁石的意向。同时建筑主体两个方形相叠落的体量也隐喻砚台开启的动势。

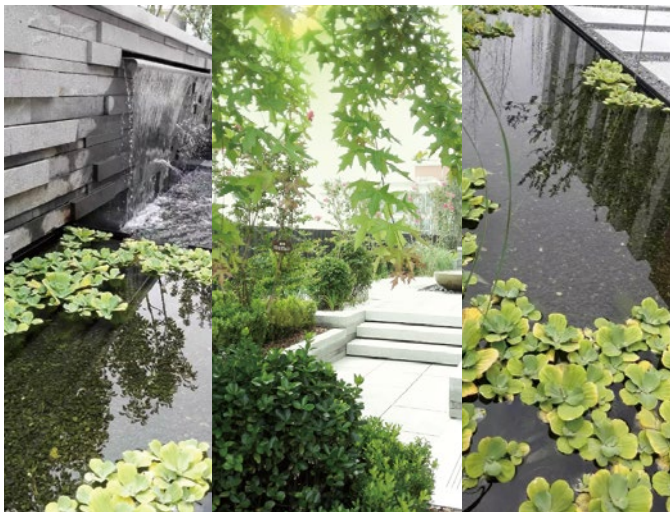




武汉新港华中贸易服务区包含高端商务写字楼、五星级酒店、会展中心、会议中心、配套商业设施等五大功能。本项目设计通过对上海、南京、天津等航运服务区进行调研分析，确定合理的业态及面积比例划分；空间上采用开放式体验型立体步行街将整个地块不同功能建筑串联起来。在后续的深化设计中，利用BIM技术建立三维模型，进行室内外管线排布和结构构件尺寸设计计算，以期达到快速施工、缩短工期的目的。本项目作为中航规划建筑设计院在武汉民用市场上竞得的第一个项目，对于新市场的开拓和当地设计经验的积累都具有重大意义。

## 武汉新港华中贸易服务区

建设地点：湖北武汉  
 设计单位：中航规划建筑院  
 建设情况：设计中  
 用地面积：6.9万 $m^2$   
 总建筑面积：25.3万 $m^2$



公司科研办公楼景观设计项目设计内容包括：大树移栽；绿地改造设计；屋顶花园设计；东北入口设计。

#### (1) 大树移栽

由于项目建设用地的各种复杂的限制条件，建筑设计在平面布局时已明确有部分大乔木与建筑地下一层、二层有重叠。景观设计专业先期进入该项，通过对现有交叉乔木的现场踏探和专家咨询，院内移栽虽具有可行性，却对树木的损伤极大，死亡风险高。本次选择具有大树移栽专项资质的施工单位进行移栽，制定了全套的施工措施技术以保证大乔木的成活率。现状大乔木在整个施工过程中的保护贯穿始终。

#### (2) 绿地改造设计

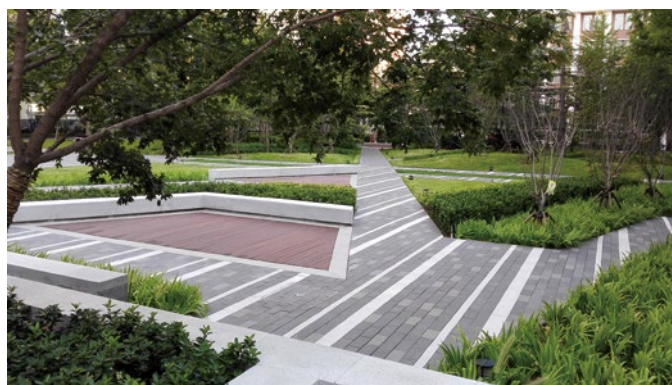
场地内存在景观元素过于单一、景观空间格局单一、无广场空间、绿地形式过于呆板、绿地无室外休息的设施等问题。本次设计提出的解决策略为：集成了礼仪广场空间、绿化礼仪空间、开阔草地空间、林下交流空间、绿化休憩空间，且多种功能在空间上组合布置，既没有明确界限又相互融合，形成一个完整的内院。

#### (3) 屋顶花园设计

屋顶花园设计遵循低影响开发原则，设置绿色雨水基础设施。十五层空中花园设计有三组互相连通的水景，包括镜面水池、流水景墙、石钵涌泉。花园水景的水景为十七层屋面的雨水，通过管道收集存储在收集箱中，雨水收集箱的出水口和景观吐水槽相连，从吐水槽跌落而出的水进入镜面水池，通过重力跌落两次后进入流水景墙前的水池，通过泵循环给流水景墙和石钵涌泉，并形成自循环系统。

#### (4) 东北入口设计

现代简约的设计手法与理念，营造简约大气的入口设计，合理的规划组织人行、车行流线。提供更加高效的办公空间。简洁现代的LOGO景墙，直观的体现企业文化。



## 公司科研办公楼景观设计项目

建设地点：北京

设计单位：中航规划建筑院

建设情况：建成

规划用地总面积：1.6万<sup>2</sup>

建筑总占地面积：0.8万<sup>2</sup>

景观设计总面积：1.0万<sup>2</sup>

该项目为中国电子产业信息集团总部办公楼装修改造工程，项目设计风格定位庄重、科技、时尚、简约，既表明了作为IT业国家队的中国电子的企业性质，又凸显了公司的活力、高成长性及国际化的品牌形象；围绕绿色、蓝筹、科技的整体设计理念，营造节能、舒适，亲近自然的办公环境；打造高品质、高品位、高成长性的精神及艺术追求；方案旨在凸显中国电子的科技情怀，整体色调主打黑白灰辅以亮色点缀。通过寻找与IT业相关的抽象元素，从中提取科技图像进行艺术化再创造，光源采用具有科技感的白光和蓝光，力求表达出科技企业的无限创造力。

## 中国电子长城大厦 装修工程（设计）

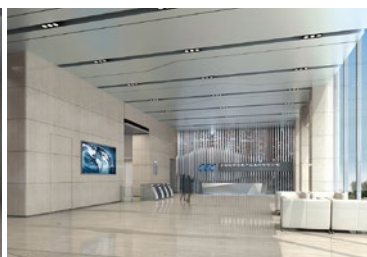
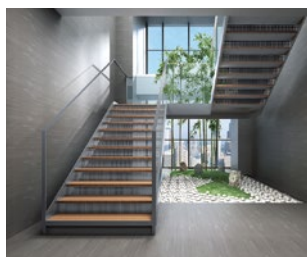
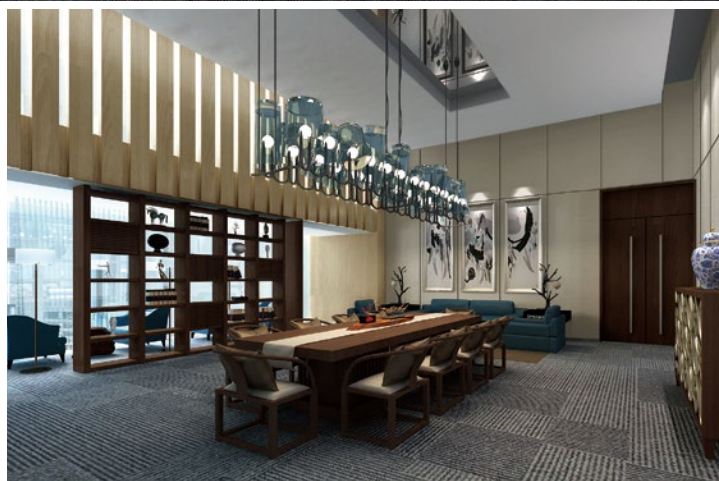
建设地点：北京

设计单位：中航规划建筑院

建设情况：在建

改造面积：1.7万m<sup>2</sup>

总用地面积：3.1hm<sup>2</sup>



## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《绿色饭店建筑评价标准》的公告

现批准《绿色饭店建筑评价标准》为国家标准，编号为GB/T51165-2016，自2016年12月1日起实施。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《城市工程管线综合规划规范》的公告

现批准《城市工程管线综合规划规范》为国家标准，编号为GB50289-2016，自2016年12月1日起实施。其中，第4.1.8、5.0.6、5.0.8、5.0.9条为强制性条文，必须严格执行。原国家标准《城市工程管线综合规划规范》GB50289-98同时废止。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《物流建筑设计规范》的公告

现批准《物流建筑设计规范》为国家标准，编号为GB51157-2016，自2016年12月1日起实施。其中，第5.1.8、6.1.5、9.8.26、11.3.3、11.3.5、15.3.11条为强制性条文，必须严格执行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《托儿所、幼儿园建筑设计规范》的公告

现批准《托儿所、幼儿园建筑设计规范》为行业标准，编号为JGJ39-2016，自2016年11月1日起实施。其中，第3.2.8、4.1.3、4.1.9、4.1.12、6.3.3条为强制性条文，必须严格执行。原《托儿所、幼儿园建筑设计规范》JGJ39-87同时废止。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《防灾避难场所设计规范》的公告

现批准《防灾避难场所设计规范》为国家标准，编号为GB51143-2015，自2016年8月1日起实施。其中，第3.2.2、3.2.3、3.2.4、5.2.4、5.5.1、5.5.2、5.5.3、7.2.6、7.3.1、7.3.2、7.3.3、7.3.4、8.2.5、8.3.3条为强制性条文，必须严格执行。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《既有建筑绿色改造评价标准》的公告

现批准《既有建筑绿色改造评价标准》为国家标准，编号为GB/T51141-2015，自2016年8月1日起实施。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》的公告

现批准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》为国家标准，编号为GB51022-2015，自2016年8月1日起实施。其中，第14.2.5条为强制性条文，必须严格执行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》的公告

现批准《高层民用建筑钢结构技术规程》为行业标准，编号为JGJ99-2015，自2016年5月1日起实施。其中，第3.6.1、3.7.1、3.7.3、5.2.4、5.3.1、5.4.5、6.1.5、6.4.1、6.4.2、6.4.3、6.4.4、7.5.2、7.5.3、8.8.1条为强制性条文，必须严格执行。原《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99-98同时废止。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《供热站房噪声与振动控制技术规程》的公告

现批准《供热站房噪声与振动控制技术规程》为行业标准，编号为CJJ/T247-2016，自2017年2月1日起实施。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《城市给水工程规划规范》的公告

现批准《城市给水工程规划规范》为国家标准，编号为GB50282-2016，自2017年4月1日起实施。其中，第5.2.3、8.1.6条为强制性条文，必须严格执行。原国家标准《城市给水工程规划规范》GB50282-98同时废止。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑与工业给水排水系统安全评价标准》的公告

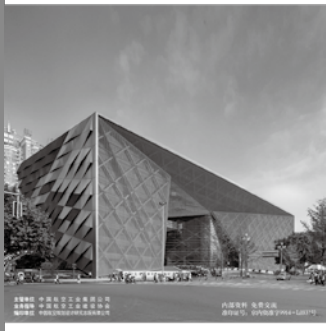
现批准《建筑与工业给水排水系统安全评价标准》为国家标准，编号为GB/T51188-2016，自2017年4月1日起实施。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑工程施工质量评价标准》的公告

现批准《建筑工程施工质量评价标准》为国家标准，编号为GB/T50375-2016，自2017年4月1日起实施。原国家标准《建筑工程施工质量评价标准》GB/T50375-2006同时废止。

(来源“国家工程建设标准化信息网”)





主管单位 中国航空工业集团公司  
业务指导 中国航空工业建设协会  
编印单位 中国航空规划设计研究总院有限公司

## 顾问委员会

主 任 李 平  
副 主 任 廉大为  
委 员 (按姓氏笔画排序)  
王 伟 刘晋忠 李世民  
陈远明 张忠良 杨 锐  
周训文 周 凯 贺 沂  
张继超 常洪亮 梁相文

## 编辑委员会

主 任 陆国杰  
副 主 任 米敬明 刘子彦  
委 员 (按姓氏笔画排序)  
丁 杰 卜国磊 马培贤  
王 玮 王玉平 王 锋  
王笃礼 刘国新 刘晓评  
李 纲 李守旭 李中强  
肖 武 张卫才 张立峰  
陈 阳 陈丹瑚 金来建  
黄春晖 贺宏斌 黄 滨  
傅绍辉 葛家琪

总 编 陆国杰  
主 编 陈海风  
执行主编 王 蕊  
责任编辑 李 楠  
出 版 《航空工程建设》编辑部  
地 址 北京德外大街12号  
邮 编 100120  
E-mail hkgcjs@avic-apc.com  
印刷单位 北京奇麟麟印刷有限责任公司分公司  
发送对象 公司内部及本系统内部  
印刷日期 2016年10月  
印 数 1500册  
电 话 (010)62038276 62038235  
传 真 (010)62038297  
封 面 成都博物馆新馆

# CONTENTS

## 目 录 2016年第5期 总第127期

### 航空能力建设

- 02 航空工业计量实验室平面布置研究 李 凯 余振中  
07 求解第二类装配线平衡问题的改进粒子群算法 张 超 孙元亮  
13 某挂架脉冲移动式装配线设计研究 侯康伟 张 超 戴恩雄

### 研究与探讨

- 18 非最终灭菌产品分装车间工艺布局分析 张媛媛  
22 设备完好状况评估研究 崔 晶 张 波  
27 成都博物馆基础隔震结构隔震层抗拉性能设计指标研究  
葛家琪 张 玲 张国军 刘鑫刚 马伯涛 管志忠  
37 成都博物馆基础隔震不规则结构扭转效应控制研究  
刘鑫刚 张 玲 马伯涛 管志忠 王明珠 葛家琪  
43 对“成都市发展走廊控制规划”规划实践的批判性认识 孙佳历  
49 变频调速供水技术在工业循环冷却水系统中的应用探讨  
张舰艇 刘 芳 孔庆波 李 丹  
53 复合式地源热泵运行控制策略比较 乔卫来 陈九法  
59 国内总承包项目投标报价测算研究 孙家超

### 工程设计

- 62 置换通风空调系统在某油箱工段车间中的应用 付晓晨 刘银萍

# 航空工业计量实验室平面布置研究

■ 李凯 余振中 「工艺」

**摘要:** 计量实验室平面布置是关乎航空工业计量检定系统测试数据采集准确性与可靠性的一大因素。结合实际工作,本文总结归纳了航空工业计量实验室平面布置的原则、常用布局形式,通过引入“标准实验室单元”设计理念和介绍国外计量实验室柔性化设计方法,解决了计量楼改扩建困难的难题。

**关键词:** 计量实验室;航空工业;平面布置;标准实验室单元

## 0 引言

计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动,它是测量的科学,是所有科学赖以发展的支柱。在经济社会中,追求经济效益是许多工作的出发点,根据统计,在工业化国家,计量对国民生产总值的贡献占4%~6%,计量的投入/效益比达到1/(5~37)<sup>[1]</sup>。特别在高技术、高科技行业,计量表现出的投效比更高。航空工业为高技术、高科技行业,航空工业计量作为行业内基础性、保障型科学,其发展成果,直接作用于航空工业,体现社会经济价值。

测量数据是航空工业计量检定系统建设的核心,不同的检定系统需求合适的测量数据。通常航空工业计量测试数据的获取分为采集、统计、传递、平衡分析和使用反馈4个过程,而对于计量检测数据可信度的确认,主要是第一个过程,即测量数据的采集过程。数据采集过程中,如设备

使用状态、数据质量保证制度、检测实施程序、计量器具选型、操作人员素质和设备安装环境条件六大因素都将对检测数据的准确性以及可靠度产生直接或者间接的影响。六大因素中设备安装环境条件也即实验室的平面设计是计量检定系统建设过程中通常容易被人忽视的因素,本文结合实际的工作经验,谈谈在航空计量技术实验室平面设计的一些体会。

## 1 计量室平面设计

### 1.1 基本原则

航空工业计量主要涉及几何量、力学、热学、电磁学、无线电等几大专业,专业不同,计量实验室的平面布置方式不尽相同,但是总体来说,实验室平面设计过程中需要遵循高效性原则、灵活性原则以及人性化原则。

#### 1.1.1 高效性原则

航空工业计量检定机构,不论其级别如何或者规模大小,就其所需要的建筑物种类来说,一般包括计量操作室、辅助实验室、办公室、行

作者简介:李凯,男,研究员,2000年7月于西北工业大学机械工程及自动化专业,现就职于中航规划动力工程设计研究院。

政管理室、情报资料室、生活服务间等。现代计量科学发展的特点是学科之间相互渗透,新的计量手段和方法不断涌现,以计量操作室为活动中心的检测人员,每天都要往返于计量操作室和辅助实验室、办公室、情报资料室、生活服务间与行政管理室之间。因此在计量室的平面设计过程中,我们需要关注检测人员工作期间往返与各类房间之间的距离,尽量缩短其工作路径,满足高效工作的需求。

### 1.1.2 灵活性原则

现代科学的发展日新月异,科研工作对实验室环境条件的需求也在不断变化。据有关统计,全球实验室类建筑其房间布局每年的重组率为35%<sup>[2]</sup>,计量实验室也包含在其中,这就要求计量实验室在设计阶段既要满足当前需要,又要尽可能适应未来调整的需求,从多个方面实现实验室布局的灵活性。

### 1.1.3 人性化原则

计量实验室是脑力劳动者密集的场所。大部分实验室的室内环境条件(如 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、暗室、电磁屏蔽等),主要是为了满足计量工作本身或者实验仪器自身正常工作的要求,计量检测人员长期处于这种单一环境的空间中,影响身心健康。另外计量相对其他学科来说,应该来说是一个科技水准相对较高的行业,工作人员素质一般较高,计量实验室平面布局过程中,需要创造一个和谐、融洽的环境让这些人能够相互交流、激发出思想碰撞的火花。

平面设计过程中,高效性原则、灵活性原则、人性化原则三大原则应该是一个相互包容、相互促进的关系,一个好的平面设计应该是三方面原则达到平衡后的产物。

## 1.2 常用的平面布置类型

计量工艺需求、计量检定机构规模不同,计量实验室的平面布置类型选择也不完全一致,目前常见的几种平面布置类型有单走廊型平面、双走廊型平面、多走廊型平面等。

### 1.2.1 单走廊型平面

单走廊平面布置中,走廊只有一条,有中间走廊(见图1)、单侧走廊(见图2)和偏心走廊(见图3)等,在走廊一侧或者两侧布置计量实验室或者辅助实验室、办公室等。

### 1.2.2 双走廊型平面

双走廊平面布置中,走廊通常为两条,在走



图1 中间走廊（单走廊形式）

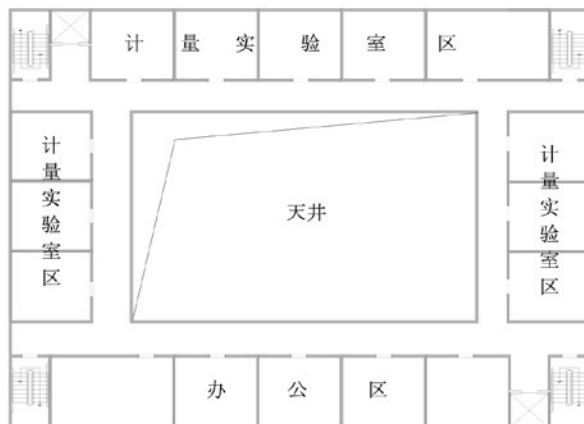


图2 单侧走廊（单走廊形式）



图3 偏心走廊（单走廊形式）

廊两侧布置计量实验室或者辅助实验室、办公室等,中间区布置有特殊要求的计量实验室,如要求 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 等高精度温度要求的实验室以及无光照需求的计量实验室等。双走廊型平面布置常用“回”型走廊(见图4)和“井”型走廊(见图5)。

### 1.2.3 多走廊型平面

多走廊型平面布置形式在国内计量实验室并不常见,它将单走廊、双走廊形式中走廊内的公



图4 “回”型走廊（双走廊形式）



图5 “井”型走廊（双走廊形式）

用管线（空调风管、强弱电管线、压缩空气等公用工程管线）集中布置在一条公用设施走廊内，与人物流走廊形成多走廊计量实验室布局，实现人物流与能源流的分别管理。多走廊平面布置中常“三”型走廊（见图6）或者“川”型布局（见图7）。



图6 “三”型走廊（多走廊形式）

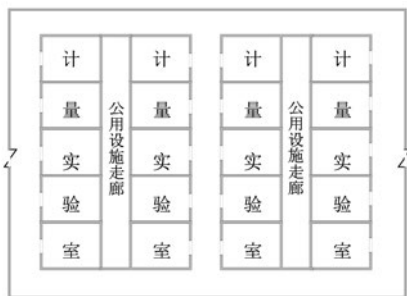


图7 “川”型走廊（多走廊形式）

表1 三种平面布置形式优劣势及适应性比较

平面布置形式	优势	劣势	适应性
单走廊平面	形式体型简洁；施工简单；造价低；自然通风、采光好。	不利于空调精度要求高、洁净度要求较高的计量室；扩展性弱。	典型平面布置形式，适用于有简单要求的计量实验室布置。
双走廊平面	中间部位房间内温度波动小；各实验室间交通距离短、高效；公用设施管线集中，节能。	形式体型相对复杂；中间部位自然通风、采光差；交通指示性不高；扩展性弱。	适用于空调面积需求较大，空调精度要求高、洁净度要求高、防尘、防自然光照射、用地限制较大的计量实验室的布置。
多走廊平面	中间部位房间内温度波动小；各实验室间交通距离短、高效；公用设施管线集中，节能。	形式体型复杂；中间部位自然通风、采光差；交通指示性差；扩展性弱。	适用于大型计量检定机构计量室的布置。

单走廊、双走廊、多走廊三种平面布置方式各有各的优缺点和适应性，如下表1所示。

### 3 计量实验室平面设计灵活性解决方法与思路

单走廊、双走廊、多走廊是我们平时进行计量楼施工图平面设计过程中经常运用的手法，3种方法各有各的特点，但是三者之间简单的排列组合，目前根本无法适应现代日新月异的计量技术对实验室平面布置灵活性的需求。

根据统计，全球实验室类型的建筑，包括计量楼其房间布局每年的重组率都在35%，而目前国内航空工业计量楼在完成一次设计后，后期的修改、第二次设计等几乎是100%发生率，此外部分

计量楼设计完成后还存在扩建的需求。这些实际需求，都要求在平面设计过程中注重灵活性的设计原则。

计量实验室平面设计中房间的工艺条件需求与专业设计是一个一对一的映射关系，计量楼内通常每个房间的温湿度要求都不一样，空调设计的风量每个房间也就不一样，实际工作中计量楼一次设计完成后后期不好调整的矛盾主要在空调等动力设施的设计上，难度也出现在空调等专业

的设计上。为了应对这种状况，解决计量实验室后期调整困难的难题，需要采用一种柔性好、扩展性强的新型设计理念——标准计量实验室单元（或称为计量实验室模块化设计）。

标准计量实验室单元将计量楼按照“好调整与不好调整”的原则，将矛盾源区分开来，一分为二，分为包括电梯、卫生间、管井、空调机房等不好调整的公共单元（“交通能源核”或者“能源核”），和一个纯粹以计量实验室为主的

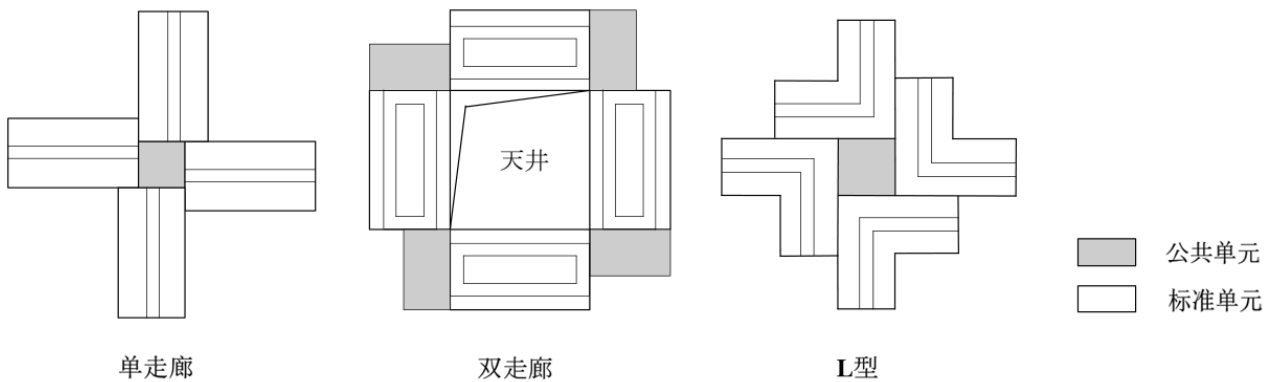


图8 公共单元和标准单元贴建示意图

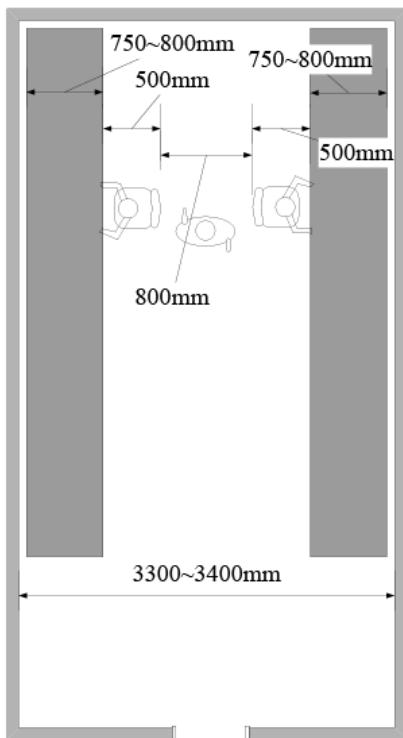


图9 矩形标准单元

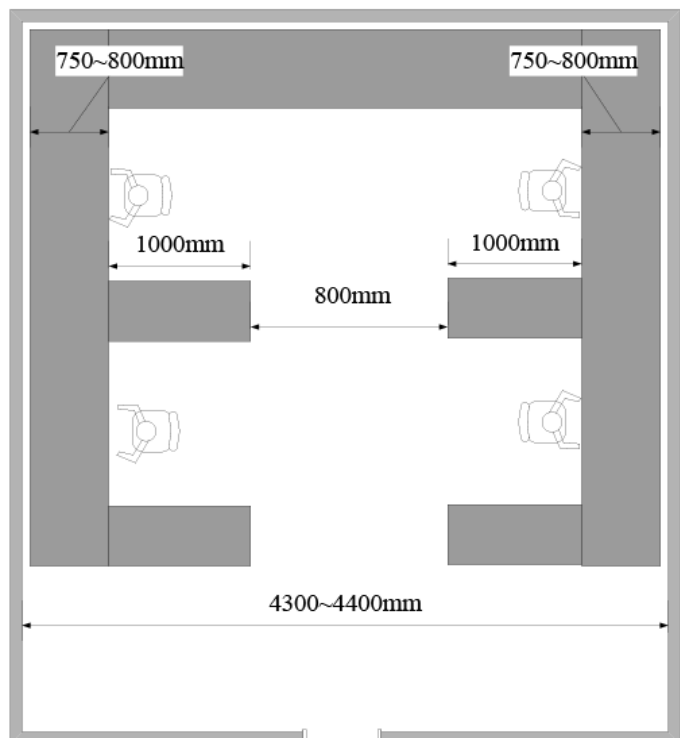


图10 方形标准单元

标准单元，两个单元从总图布局、平面布局入手，在设计之初按照图8所示方案进行贴建，进而解决扩建困难的难题。

标准单元由各个计量室组成，按照航空工厂、研究所的习惯，分为矩形标准单元和方形标准单元两种布置形式。

矩形标准单元，一人多机，属于效益型布局方式，一般工厂里头设的二级站比较常用；方形标准单元，一个人一个坑，互不影响，基本上是一人一机，属于研究型布局方式，一般研究所性质的计量站常用。矩形标准单元布局宽度方向上净尺寸要求在3.3~3.4m，方形标准单元布局宽度方向上净尺寸要求在4.3~4.4m。见图9、10所示。

航空工业计量检定机构大部分设立在工厂，因此采用的基本都是矩形标准单元样式，计量室宽度方向尺寸基本在3.2~4m。而这些计量楼通常和办公性质的房间搅在一起，为协调办公用房的使用需求，房间宽度方向上基本都设计在4m，长度方向上为配合办公用房一般较长，这是这些年设计中常遇到的问题，为满足计量室的使用需求，房间长宽比最好控制在1.5倍左右。

采用标准实验室单元的设计思想模块化设计，一定程度上可以有效解决计量楼后期扩建难的问题，但是计量楼一旦设计施工完，如何方便改建和调整，也是需要进行深入探讨的。目前，航空工业计量楼调整设计上，基本上都是在原有设计上大范围的修改，消耗大量人力和财力，往往代价非常高。根据资料显示，国外发达国家在计量实验室的设计过程中，通常采用以下几种方法或者手段，来满足未来计量实验室调整的灵活性需求。

(1) 所有设备尽可能不设计独立基础，有基础的设备全部采用厚钢板固定。

(2) 房间之间的分隔采用活动式隔墙，如双面铁皮墙，中间用轻钢龙骨固定，内填保温材料，同时将各种插座、信息孔集成在了铁皮墙中，墙的底部设计有支撑用、可调节高度的铁腿，然后用木质踢脚封严两面。所有的管线走在吊顶上方，强弱电线通过吊顶上方和两面铁皮之间的空间和插座末端相连。

(3) 房间采用自控变风量空调，自适应控制。

(4) 管线布置采用前面提到的管廊带式设计。管廊带预留出未来增加管线的空间。

(5) 空调风管材料选择保温性能好的软塑料透明薄膜管，薄膜管内设计有一根很细的螺旋弹簧钢丝作支撑，风管不用时压缩为很短的一段管线，用的时候撑开可以拉得很长<sup>[3]</sup>。

## 4 结论

计量实验室是计量设备、计量技术得以发挥作用的载体，计量实验室的平面设计在计量检定系统建设过程中经常容易被人忽视，文章结合实际的工作经验，归纳了计量实验室平面设计的基本原则、常见的平面布置类型，为解决计量检测实验室后期调整困难的“顽疾”，引入了“标准实验室单元”的平面设计理念，同时概括了目前国外此类建筑柔性化设计过程中所采用的方法与手段。

## 参考文献

- [1] 王南光.世界计量日：诞生与辉煌.中国计量, 2003: 15.
- [2] 赵霞.现代科研实验室建筑的设计实践—几个科研实验建筑的设计比较.工业建筑, 2006, 36 (3): 9.
- [3] 戴治欧.谈谈实验室的设计.油田地面工程(OSE), 1986, 5 (4): 46~47.

# 求解第二类装配线平衡问题的改进粒子群算法

■ 张超 孙元亮 「工艺」

**摘要:** 针对第二类装配线平衡问题,提出一种混合粒子群算法,采用一种面向作业优先图的随机权重排列编码方法来间接表征问题的解,采用基于权重的零入度排序算法进行解码使任意编码映射为可行解。为克服标准PSO恋食行为,引入了差分变异算子作为粒子速度更新机制,联合应用随机权重法以及作业时间最长、后续作业最多任务优先法来初始化种群,在迭代过程中执行种群进化停滞判断及变异扰动策略。通过对基准问题进行测试,验证了本算法的有效性和优势。

**关键词:** 装配线平衡; 粒子群算法; 可行作业序列; 零入度排序

## 0 引言

装配线平衡问题(Assembly Line Balance Problem)是生产制造领域的一个重要问题,直接关系到设施利用率和生产效率。尤其对于飞机总装作业这类工艺特别复杂、作业量大,特定约束多的产品,移动装配线对提高飞机生产效率效果显著,但其实现需要确定合理的装配线平衡方案,以实现各站位工作时间的均衡,保证移动生产的连续。因此,提高装配线的站位工作平衡能直接提高生产效率,对企业经济效益产生直接影响。

装配线平衡是指在工序先后关系等约束下,将作业集合分配到一定数量的工作站中,使得每个工作站的作业时间满足一定的节拍要求,减少工作站的闲置和过载时间,最小化平滑指标<sup>[1]</sup>。装配线平衡问题可分为三类<sup>[2]</sup>: ①给定装配线节拍,求最小工作站数目,记为ALB-I; ②给定装配线的工作站数目,求节拍时间最小,以寻求最大

的生产率,记为ALB-II; ③给定工作站数目的范围、目标为最小化装配线的总空余时间,即最优化装配线的效率,记为ALB-III。

由于ALB问题是一个典型的NP型组合优化难题,解决问题的复杂度随作业数目的增加呈指数级数爆炸增长。因此,研究能在合理时间内求解大规模问题的算法尤为重要<sup>[3]</sup>。

相对于第I类单一确定装配线平衡问题的研究,第II类装配线平衡问题的研究相对较少。多数是以节拍最小、总空闲时间最少、负荷均衡为目标建立数学模型,然后采用遗传算法<sup>[4]</sup>、蚁群算法<sup>[5]</sup>、混合粒子群算法<sup>[6]</sup>和禁忌搜索<sup>[7]</sup>等算法进行求解。其中,文献<sup>[8]</sup>针对ALB-I问题提出了一种离散粒子群优化算法,并采用了基于位置交叉的粒子位置更新机制,属于将遗传交叉算子嵌入粒子群算法,处理方式独特。文献<sup>[9]</sup>尝试了混合粒子群算法、模拟退火算法求解ALB-II问题,获得了优于标准粒子群算法的结果,但对模拟退火算法的初始温度、Markov链长度的选取等问题还需要进一步探讨。综合来看,将粒子群算法应用于ALB-II的求解尚不多见。本文针对ALB-II问题的特点,

作者简介:张超,男,高级工程师,2008年毕业于清华大学水利工程专业,现就职于中航规划技术研究院。

采用了一种面向作业优先图的随机权重排列编码方法来间接表征问题的解,使得任意粒子解码后均满足装配作业顺序约束,并且引入了差分变异算子作为粒子速度更新机制。此外,为克服标准PSO恋食行为,联合应用随机权重法以及作业时间最长、后续作业最多任务优先法来初始化种群、种群停滞判断及变异扰动策略,从而导出一种混合粒子群算法(Hybrid PSO, HPSO)。将文中算法以典型ALB-II基准问题测试,并通过与现有方法的计算结果进行对比,验证了本文算法的有效性和优势

## 1 装配线平衡问题的定义

### 1.1 问题定义

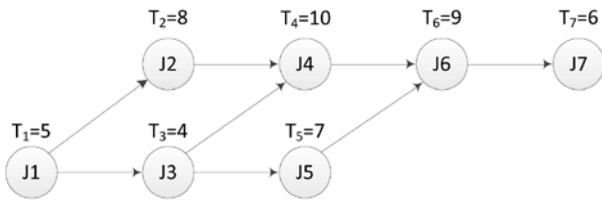


图1 作业优先图

装配作业的先后顺序约束通常采用优先图(Precedence Graph, PG)来表征。PG从计算机数据结构上也称为有向无环图,记为 $G(N, A)$ ,其中 $N$ 表示作业节点集合, $A$ 表示有向弧集合。在优先图上(图1),如果存在从节点 $i$ 到节点 $j$ 的有向弧,则节点 $j$ 代表的作业必须后于节点 $i$ 代表的作业进行操作。可行作业序列(Feasible Operation Sequence, FOS)<sup>[10]</sup>是沿产品流动方向分配到各个站位的作业序列缀合,其本质是作业优先图的一种拓扑排序。如图1中有7个工作节点,设J1-J2-J3-J5-J4-J6-J7是拓扑排序后的FOS,观察该序列的任意两个作业可知,其先后顺序始终符合优先图中的约束关系。下文中粒子编码方法就利用了FOS和优先图的关系,利用零入度拓扑排序算法将作业优先图解析为一个FOS。

### 1.2 目标函数

对于第II类ALB问题,由于给定装配线站位数量,装配线的负荷平衡性是首要的优化目标,即各站位的工时负荷均方差最小,站位指数也列为优化目标。同时,本文所研究的问题基于以下假设:①

所有作业都必须满足优先顺序关系;②装配线只生产单一种类的产品;③忽略各零部件在装配线上的传输时间。设定目标函数<sup>[1]</sup>如下:

平衡指数(Smooth Index)为:

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (c - T_k)^2}{m}} \quad (1)$$

站位指数(Machine Index)为:

$$MI = \frac{\sum_{k=1}^m (c_{\max} - T_k)}{m} \quad (2)$$

则目标函数可表达为:

$$F = \alpha \cdot SI + \beta \cdot MI \quad (3)$$

$$S_x \cap S_y = \emptyset \quad x \neq y, x \in [1, m], y \in [1, m] \quad (4)$$

$$\bigcup_{k=1}^m S_k = J \quad (5)$$

$$\forall i \in S_x, j \in S_y, \text{ if } p_{ij} = 1, x \leq y \quad (6)$$

其中: $m$ 为装配线工作站数量; $n$ 为装配线作业数量; $J$ 为所有装配线的作业集合, $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ ;  $t_i$ 为完成作业 $i$ 所需的时间; $c$ 为理想装配线生产节拍, $c_{\max}$ 为最大节拍(实际生产节拍); $\eta$ 为装配线的效率,装配作业总时间与 $m \cdot c$ 之比; $S_k$ 为分配到第 $k$ 个工作站的作业集合; $T_k$ 为第 $k$ 个工作站的总作业时间; $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为平衡指数与站位指数的目标权重,鉴于ALB-II问题的复杂性,两个目标不一定能同时达到最优,本研究中取 $\alpha = 0.8$ ,  $\beta = 0.2$ ;  $P = (p_{ij})_{n \times n}$ 为装配作业优先关系矩阵,当作业 $i$ 为作业 $j$ 的紧前工序时 $p_{ij} = 1$ ,否则 $p_{ij} = 0$ 。

式(4)表示任何作业都只能一次分配到唯一站位上;式(5)表示所有作业都必须分配;式(6)约束了作业先后约束关系。

## 2 装配线平衡问题粒子群算法

### 2.1 标准粒子群算法

Kennedy等<sup>[11]</sup>受鸟类和鱼群的觅食行为中发展出来的一种群体智能算法。在粒子群算法



中,  $P_n$  个粒子对应着  $n$  维解空间中的可行解, 某个粒子的位置为  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T$ , 速度为  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}]^T$ 。粒子在解空间中的飞行即受到自身历史最优位置  $p_i$  的影响和全体粒子群最优个体位置  $P_g$  的影响。粒子在解空间中主动搜索、相互影响, 向全局最优解逼近。对于第  $t+1$  次迭代, 粒子根据式及式更新速度与位置值:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (p_g - x_i^t) \quad (7)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (8)$$

$$-v_{\max} \leq v_i^{t+1} \leq v_{\max} \quad (9)$$

其中:  $\omega$  为惯性权重;  $c_1$  为自学习系数,  $c_2$  为社会学习系数, 通常取值为  $2.0^{[12]}$ ;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0,1]$  之间的随机数。

PSO算法的优势在于算法的简洁、易于实现, 且具有调整参数较少的优点, 是解决非线性连续优化问题的有效工具。通过观察速度更新公式(7)可知, 某粒子发现较优值后将吸引其他所有粒子向其聚集, 对于单调函数、严格凸和单峰函数, 这种恋食效应能使粒子群在初始时很快向最优值行进, 在最优值附近收敛缓慢。但对于多峰函数, 则容易陷入局部收敛, 不论迭代多少步都无法跳出局部最优陷阱<sup>[3]</sup>。因此, 避免PSO算法的局部收敛对求解装配线平衡问题尤为重要, 下文将介绍本HPSO算法采用的多种改进策略。

## 2.2 粒子的编码与解码

对于ALB问题, 现有编码方法有直接编码和间接编码两类。直接编码方法置入了作业的编号及分配的站位号, 但保证编码后的解符合作业顺序困难且计算开销大; 相对而言, 间接编码方法, 尤其是面向装配作业序列的编码方法优势尤为明显, 很容易保证解的可行性且适用于各类ALB问题<sup>[14]</sup>。因此, 本文采用间接编码方法求解ALB-II型问题。

对于  $n$  个装配作业, 将装配作业序列编码为以  $n$  个浮点数构成的权重序列, 粒子的第  $i$  维对应着第  $i$  个作业的选择优先权值, 权值越大则该作业的优先级越高。基于该编码方式, 采用带权重的零入度拓扑排序算法 (Priority based Zero in-degree Topological Sorting, PZTS)<sup>[15]</sup> 可将关联优先图映射为一个拓扑排序。采用该编码方式结合PZTS算法的显著优点是任意编码都可解析为可行作业序列, 同时也将一个离散优化问题映射为

一个连续空间的优化问题, 使得粒子群算法能得以运用。

PZTS算法每次从优先图中选择入度为0且优先权值最大的一个顶点, 随后删除所选择顶点的出弧, 重复该过程直到所有顶点均被选出。结合图1的7个作业优先图为例, 假设某粒子编码为:

维度	1	2	3	4	5	6	7
位置值	0.69	0.74	0.92	0.86	0.35	0.44	0.90

由图1可知, 初始入度为0的顶点为  $J_1$ , 故  $J_1$  在序列中排首位; 删除以  $J_1$  为紧前工序的弧, 此时  $J_2$  和  $J_3$  的入度为0, 比较其对应的权重值0.74、0.92, 则第2步应选择  $J_3$ ; 此时  $J_2$  与  $J_5$  的入度为0, 比较其对应的权重值0.74、0.35, 则第3步应选择  $J_2$ ; 以此类推, 最终可将编码解译为拓扑排序  $J_1-J_3-J_2-J_5-J_4-J_6-J_7$ 。

为获得ALB-II型问题的解, 还需要将拓扑排序后的作业分配到工作站中。对于ALB-II型问题, 工作站的数量是固定的, 因此用节拍时间来控制工作站作业分配, 算法如下:

步骤(1): 对于拓扑后序列的每一个作业  $i$ , 将其分配到当前工作站  $k$ , 站内的  $s$  个作业满足  $\sum_{i=1}^s t_{J_i} \leq \theta \cdot c$ , 即工作站的总工时不超过节拍时间  $\theta \cdot c$ ;  $\theta$  为调节系数, 控制站位工时允许超出理想节拍的程度, 本文取  $\theta = 1.1$ ;

步骤(2): 如果超过了节拍时间, 则分配到工作站  $k+1$ ;

步骤(3): 重复以上过程直至所有作业被分配完成。

各作业分配完成后, 即可通过式(1-3)获得目标函数值。采用这样的编码和解码方式, 使ALB问题由离散空间转换到连续空间, 既发挥了粒子群算法求解连续函数的优势, 也可以通过解码计算目标函数, 便于问题求解及最佳方案的选取。

## 3 改进的粒子群算法

### 3.1 初始种群

初始种群中的粒子性能对粒子群算法的性能有很大影响, 仅采用普通的随机权重初始化方法不利于加快PSO算法的收敛。根据装配线平衡问题的一般经验, 倾向于优先分配作业时间最长和后续作业最多的任务<sup>[16]</sup>, 因此本文在采用随机位

置权重启发规则时协同考虑了这一原则。以图1为例, 根据优先分配作业时间最长和后续作业最多的任务原则, 拓扑排序后的结果应为 $J_1-J_2-J_3-J_4-J_5-J_6-J_7$ 。种群中的其余粒子采用基于随机权重的零入度有向无环图排序法生成。

### 3.2 差分变异算子

迭代过程中出现粒子聚集时, 一般利用变异算子来对粒子进行随机扰动。众多研究者已经设计了很多的变异算子, 如均匀性变异、自适应变异、多级变异、混沌扰动<sup>[17]</sup>、正态变异<sup>[18]</sup>、差分变异<sup>[19][20][21]</sup>等。Hendtclass<sup>[19]</sup>提出的群差分进化算法使用差分变异算子帮助粒子跳出局部最优。文献<sup>[20]</sup>提出的二阶震荡算子更新粒子速度, 利用了粒子在前次迭代的速度信息, 本质上也是一种差分格式。文献<sup>[22]</sup>利用差分算子作为改进PSO算法中的速度更新策略。文献<sup>[23]</sup>采用了类似Hendtclass提出的差分变异算子, 但采用的是与标准PSO混合更新的策略。鉴于差分变异算子对PSO算法的收敛性有较大改进, 本文采用差分变异格式来设计波动算子, 粒子速度更新如式(10)所示。

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1^t (p_i - x_i^t) + c_2 r_2^t (p_g - x_i^t) + \theta (x_m^t - x_n^t) \quad (10)$$

其中,  $\theta$  为波动系数, 此处取值 $0.5^{[21]}$ ;  $m$  和  $n$  是随机的粒子下标,  $m | n \in [0, P_n]$ , 且  $m \neq n \neq i$ 。

### 3.3 种群停滞判断

过早收敛是由种群多样性的匮乏所导致的。为避免种群早熟, 通常采用平均适应度方差 $\delta^2$ 或平均粒距 $D$ 判断进化是否停滞:

$$\delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2 / f' \quad (11)$$

$$D = \frac{1}{N \cdot \ell} \sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{j=1}^{\ell} (p_{ij} - \bar{p}_j)^2} \quad (12)$$

其中,  $N$  为粒子个数;  $\ell$  为搜索空间的最大对角线长度;  $f_i$  为个体适应度值;  $\bar{f}$  为平均适应度值;  $f' = \max[1, \max |f_i - \bar{f}|]$ , 为归一化因子;  $p_{ij}$  为粒子 $i$ 第 $j$ 维位置值;  $\bar{p}_j$  为所有粒子第 $j$ 维位置的平均值。

粒子群平均适应度方差是从目标函数值的方向反映粒子分布情况。 $D$  是从空间角度反映各

个个体相互之间的分布离散程度, 独立于种群规模大小、解空间的维数以及每维搜索范围。 $D$  越小, 表示种群越集中, 反之表示种群越分散。当粒子群陷入早熟时, 粒子将在搜索空间形成聚集。本文综合采用 $\delta^2$ 和 $D$ 对种群聚集现象进行判断: 每经过 $1/10$ 迭代时刻, 判断平均粒距、平均适应度方差是否触发阈值条件, 触发了则采用随机生成的新粒子替换掉部分原有劣势粒子, 数量可控制在 $1/10^{[2]}$ 。

### 3.4 算法流程

改进的PSO算法流程如图2所示。以下对流程中的关键部分进行说明。

初始种群的生成采用3.1节所述方法, 其中采用最长加工时间优先法产生的初始粒子个数可取为 $\lambda \cdot N$ 。随着问题复杂程度的提高,  $\lambda$  的取值可相应增多, 本文取 $\lambda = 0.2$ 。在用该方法时应注意从初始粒子群中排除编码相同的粒子。初始粒子速度分量 $v_i$ 为浮点数, 由均匀分布随机函数在 $(0,1)$ 区间生成。

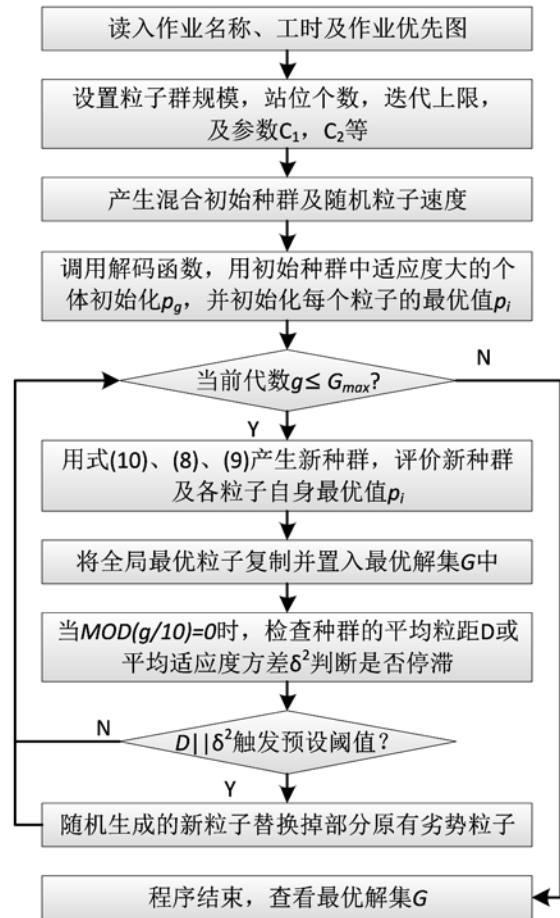


图2 改进的PSO算法流程

此外，由于各粒子  $x_i$  的相对大小决定了解码后的FOS，多个FOS最终解译得到的目标函数值可能相同，显然仅记录单一的最优解不利于算法收敛。因此，将最优解集的规模设置为  $N_G$ ，存储迭代过程中选出的最优个体。该集合中的个体按适应度值排列，新的优势粒子逐步淘汰其中的较弱粒子，维持  $N_G$  不变。在用式 (10) 更新速度时， $p_g$  从最优解集中随机选取，从而维持种群的多样性并避免陷入局部最优。

### 4 算例分析

本文用Visual C#开发了HPSO算法对著名的Buxey (图3) 基准问题进行ALB-II求解，并将计算结果与已知最优值进行了对比。经反复测试，算法参数配置为： $N = 60$ ， $G_{max} = 800$ ，其余参数同前文所述。

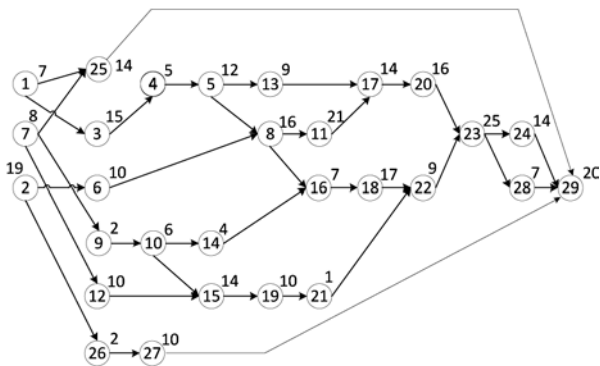


图3 Buxey-P29作业优先图

站位数依次指定为7~14，各运行HPSO算法10次，算法均能达到收敛，获得的最优结果如表1所示。

表1 Buxey问题测试结果对比

站位数	HPSO计算的站位工时	节拍	文献 <sup>[25]</sup> 负荷标准差	文献 <sup>[4]</sup> 负荷标准差	HPSO负荷标准差
7	47, 47, 47, 44, 47, 46, 46	47	1.169	1.113	1.113
8	40, 41, 41, 40, 40, 40, 41, 41	41	1.414	0.534	0.534
9	37, 37, 37, 37, 37, 36, 36, 33, 34	37	1.803	1.803	1.716
10	31, 32, 32, 32, 33, 32, 33, 33, 34, 32	34	2.271	1.075	0.843
11	29, 29, 28, 29, 30, 30, 28, 30, 32, 29, 30	32	3.357	1.128	1.128
12	27, 28, 27, 28, 28, 27, 27, 26, 26, 25, 28, 27	28	1.279	1.044	0.954
13	26, 25, 27, 26, 24, 24, 25, 23, 23, 25, 25, 24, 27	27	2.691	1.320	1.320
14	22, 24, 22, 24, 22, 24, 22, 24, 23, 25, 25, 23, 24, 20	25	2.598	1.512	1.406

表2 Buxey问题8站位作业分配

工作站序号	站内作业编号	站位工时	空闲时间
1	7, 9, 10, 12, 15	40	1
2	19, 1, 3, 4, 14	41	0
3	5, 2, 6	41	0
4	8, 16, 25, 21, 26	40	1
5	13, 27, 11	40	1
6	17, 18, 22	40	1
7	20, 23	41	0
8	24, 28, 29	41	0

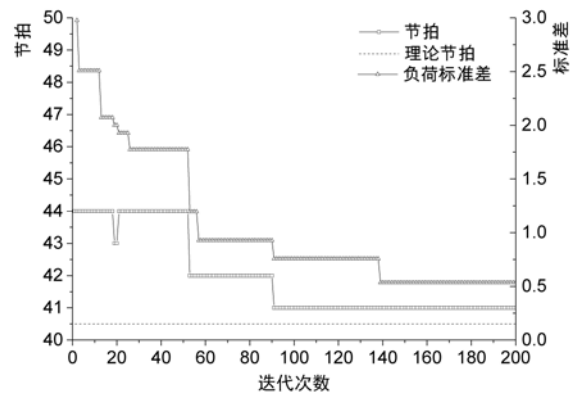


图4  $K = 8$  求解Buxey-P29计算过程

图4所示为站位数  $K = 8$  时某次求解Buxey问题的运行过程，算法初始迭代时的节拍为44，在139次迭代时找到全局最优解，此时的负荷标准差为0.534，此时的作业分配方式见表2。

表1、表2所示的测试结果表明，改进的粒子群算法求解的最优节拍与文献<sup>[24]</sup>给出的目前已知最优节拍相同，但部分工作站的作业分配方案不同，本文获得的工作站负荷标准差明显优于文献<sup>[24]</sup>，且较文献<sup>[4]</sup>能使站位负荷更加均衡，且最优节拍相同明显优于标准粒子群算法。测试结果表明本文设计的改进粒子群

算法所采用的改进措施加强了自身搜索能力，具有优于标准粒子群算法和传统启发式算法的求解能力，防早熟策略有效防止种群坠入局部最优陷阱，更有利于得到全局最优解。

## 5 结束语

本文针对ALB-II问题的特点,提出一种改进的粒子群算法,采用了一种面向装配作业序列的权重排列编码方法来间接表征问题的解,使得任意粒子解码后均满足装配作业顺序约束,并且引入了差分变异作为粒子速度更新机制。此外,为克服标准PSO恋食行为的不足,联合运用随机权重法和作业时间最长、后续作业最多任务优先法来初始化种群,综合利用平均适应度方差及平均粒距最为种群停滞判断指标,并采用随机变异算子作为扰动策略。本文用该算法对Buxey基准问题进行了多站点数的验证,并与基准值进行比较,取得较为满意的结果。

### 参考文献

- [1] 周金平. 生产系统仿真[M]. 北京: 电子工业出版社. 2011: 109—110.
- [2] 胡俊逸, 张则强, 张宇等. 求解第 I 类装配线平衡问题的一种改进粒子群算法[J]. 现代制造工程, 2012, (3): 1—5.
- [3] OZCAN K. A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2 [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(1—4): 329—338.
- [4] 皮兴忠, 范秀敏, 严隽琪. 基于可行作业序列的遗传算法求解第二类装配线平衡问题[J]. 上海交通大学学报, . 2005, Vol.39(7): 1123—1127
- [5] 张则强, 程文明, 钟斌, 等. 求解装配线平衡问题的一种改进蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(8): 1632—1638.
- [6] 鲁建厦, 蒋玲玲, 李修琳. 基于混合粒子群算法求解装配线第二类平衡问题[J]. 中国机械工程, 2010, Vol.21(4): 420—424
- [7] PASTOR R, ANDRES C, DURAN A. Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem with reduction of the task dispersion[J]. Journal of the Operational Research Society, 2002, Vol.53(12): 1317—1323.
- [8] 窦建平, 苏春, 李俊. 求解第 I 类装配线平衡问题的离散粒子群优化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, Vol.18(5): 1022—1030.
- [9] 鲁建厦, 蒋玲玲, 李修琳. 基于混合粒子群算法求解装配线第二类平衡问题[J]. 中国机械工程, 2010, Vol.21(4): 420—424.
- [10] DOU Jianping, DAI Xiangzhong, MENG Zhengda. A GA based approach to optimize single-product flow-line configurations of RMS[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, N.J., USA: IEEE Press, 2008: 654—659.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization. IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 1942—1948.
- [12] Kennedy J, Mendes R. Population structure and particle swarm performance[C]. Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Honolulu, 2002: 1671—1676.
- [13] 罗辞勇, 陈民铀. 克服恋食行为的PSO算法改进研究[J]. 控制与决策, 2008, Vol.23(7): 776—780.
- [14]. TASAN S, TUNALI S. A review of the current applications of genetic algorithms in assembly line balancing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2008, Vol.19(1): 49—69.
- [15] DOU Jianping, DAI Xiangzhong, MENG Zhengda. A GA based approach to optimize single-product flow-line configurations of RMS[C]// Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, N.J., USA: IEEE Press, 2008: 654—659.

(以下从略)

# 某挂架脉冲移动式装配线设计研究

■ 侯康伟 张超 戴恩雄 「工艺」

**摘要:** 脉冲移动式(简称脉动式)装配线是介于传统固定站式与连续移动式之间的一种装配形式,其先进的生产模式是未来航空制造企业装配生产的大趋势。站位负荷平衡问题是脉动式装配生产线设计中的关键问题之一,其优劣程度直接影响到脉动线能否高效运转。本文利用基于改进逆向差分进化算法的装配线平衡程序,以某型挂架装配生产线为对象,研究了该脉动生产线的站位划分、作业分配以及站位负荷平衡的问题。通过对程序计算结果的分析,本文确定了装配线的站位个数和作业分配情况,在保证各站位负荷平衡性最大化的同时,缩短了装配生产的节拍。

**关键词:** 脉动装配; 站位划分; 作业分配; 负荷平衡

## 0 引言

基于精益思想的移动式装配线,以其先进的生产组织方式,已经被各大航空制造企业广泛采纳。按照生产过程的连续程度,移动式装配线可以分为连续移动式和脉冲移动式。在连续移动式装配线中,制品从投入到产出在工序之间是连续进行的,没有等待和间隔时间,它是以产品工艺成熟稳定为必要条件,且要求所有的工序的加工时间与节拍时间相等或是节拍时间的整数倍,生产组织难度大。脉冲移动式(简称脉动式)装配线是介于固定站式与连续移动式装配之间的一种装配生产形式,与连续移动式不同的是,当产品装配作业进行时,产品不发生移动,产品的移动是按照一定节拍人为地产生移动。对于国内航空制造企业多品种、小批量的装配生产特点,显然研究脉冲移动式装配生产模式在航空制造企业的应用更具有实用意义。

脉冲移动式装配线有以下优点:①可以有效地缩短装配工时,每个节拍时间内完成一件成品的装配工作;②可以合理安排工装夹具摆放位置,减少工装夹具的占用面积,改善现场环境,减少生产投入;③各站位工序固定,使装配作业标准化,专业化,减少人为因素对装配质量的影

响,提高质量稳定性;④规范和拉动整个生产供应链的协同工作;⑤促进新的工艺方法和新的装配技术发展<sup>[1]</sup>。

然而,各站位的工序作业经过细化之后,各工序的作业时间在理论上、实际上都不能完全相同,这样势必存在工序间作业负荷不平衡的现象。据有关资料统计,在装配生产中,平均有5%~10%的时间是浪费在负荷不平衡产生的生产等待中,即使是美国这样的工业发达国家也不例外。不合理的站位工序分配除了造成工时浪费之外,还可能造成大量的工序堆积,严重时会造成整条生产线停摆<sup>[2]</sup>。研究解决脉动式移动装配线的平衡问题,是实现生产线高效运转,发挥脉动式装配线优势的前提。

本文以某型挂架的装配生产为对象,通过分析其装配工序工时,并结合后下节所述的脉冲移动式装配线负荷平衡程序,研究并设计其脉冲移动式装配线的站位划分、作业分配以及负荷平衡问题。

## 1 脉动线负荷平衡程序

### 1.1 目标函数

装配线站位负荷平衡问题是第二类生产线平衡问题,简称ALB-II问题,其优化目标是在给定站位数量 $m$ 和优先关系约束的条件下,寻求最小的

作者简介:侯康伟,男,助理工程师,2015年毕业于北京航空航天大学固体力学专业,现就职于中航规划技术院。

节拍C, 并使装配线的负荷尽可能均衡, 即各站位的工时负荷标准差最小。设定目标函数<sup>[3]</sup>如下:

装配线节拍最小化:

$$Obj1: \min c = \text{Max}(T_k), k \in (1, m) \quad (1)$$

站点负荷标准差最小化:

$$Obj2: \min S_t = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (T_k - \bar{c})^2}{m-1}} \quad (2)$$

约束条件为:

$$S_x \cap S_y = \emptyset, x \neq y, x \in [1, m], y \in [1, m] \quad (3)$$

$$\bigcup_{k=1}^m S_k = J, \quad (4)$$

$$\forall i \in S_x, j \in S_y, iFr_{ij} = 1, x \leq y \quad (5)$$

其中:

n 为装配线作业元素数量;

J 为所有装配线的作业元素集合,  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ ;

C 为装配线生产节拍;

$\bar{c}$  为装配线上各工作站负荷的算术平均值;

$S_K$  为分配到第k个工作站的作业元素集合;

$T_K = \sum_{i \in K} t_i$  为第k个工作站的总作业时间;

$t_i$  为完成作业i所需的时间, 即作业元素时间;

$R = (rij)_{n \times n}$  为装配作业优先关系矩阵, 当作业i为作业j的紧前工序时  $r_{ij} = 1$ , 否则  $r_{ij} = 0$ ; 式(3)约束任何作业只能分配到唯一站位置上, 且只能分配一次;

式(4)使所有作业都分配出去;

式(5)表示作业顺序必须满足先后约束。

### 1.2 改进的逆向差分进化算法

装配平衡问题通常采用粒子群算法计算, 初始种群中的粒子优劣情况对粒子群算法的性能有较大影响, 仅采用普通的随机初始化方法不利于加快进化算法的收敛, 该程序采用逆向学习方法初始化粒子群<sup>[4]</sup>, 其中逆向位置定义为:

设一个n维空间中有粒子i, 其位置向量为

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}], x_{in} \in R \text{ 且 } x_i \in [a_i, b_i] \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}, \text{ 则其逆向位置为:}$$

$$\check{x}_i = a_i + b_i - x_i \quad (6)$$

通过利用逆向点, 即使没有先验知识也能获

得好的初始解。本研究中初始种群的生成步骤为:

步骤1: 随机生成初始种群  $S(P_n)$ , 种群规模为  $P_n$ ;

步骤2: 根据初始种群生成逆向种群:

$$os_{i,j} = a_j b_j - p_{ij};$$

步骤3: 从  $\{S \cup OS\}$  集合中优选  $P_n$  个粒子作为初始种群。

标准粒子群算法中, 粒子自身历史最优位置和种群最优个体位置影响着粒子速度的更新以及位置的更新。众多研究者设计了各种种群进化算子, 如混沌扰动、差分变异等, 该程序采用逆向差分进化算法<sup>[5]</sup>使种群迭代进化, 它是一种简单有效的全局优化算法<sup>[6]</sup>, 完全摒弃粒子速度概念, 算子直接对粒子位置发生作用。经典差分算法包括变异、交叉和选择算子, 如下介绍。

### 1.3 算法流程

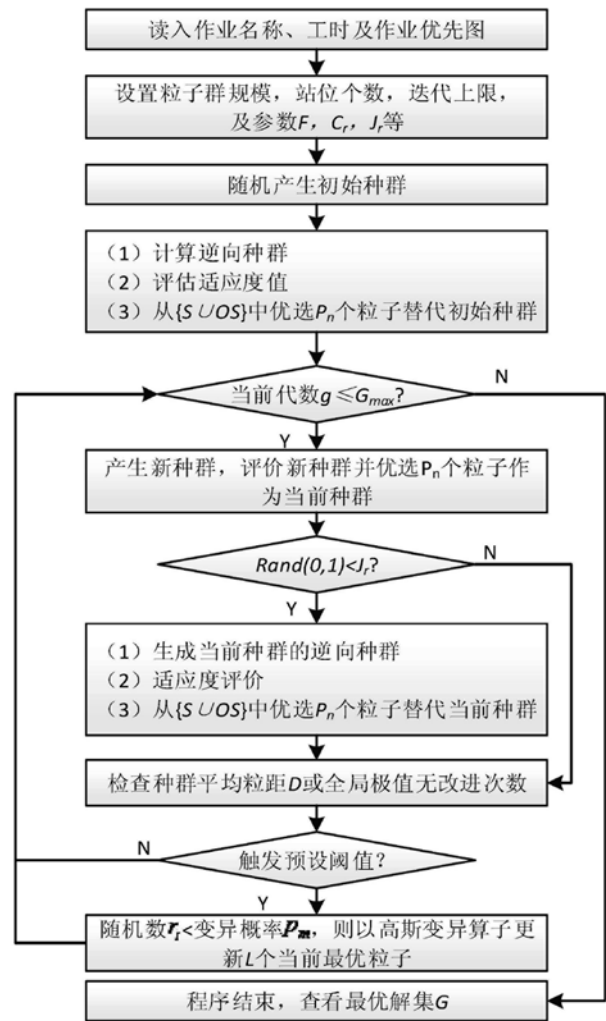


图1 算法流程

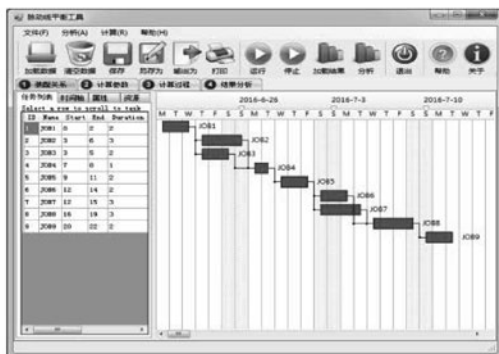
该逆向差分进化算法流程如图1所示,在一次进化中,通过变异、交叉、选择算子后,由逆向种群生成拓展搜索范围,通过定期的观察种群进化情况对种群施加高斯变异扰动,增强了种群的全局寻优能力。

#### 1.4 程序实现

该程序是由中国航空规划设计研究总院设计并开发,用于研究脉冲移动式装配线的站位负荷平衡问题。程序是基于改进逆向差分进化算法的装配线平衡程序,可以实现载入问题描述数据后的甘特图自动绘制,在用户设定站位数量及计算参数后,即可点击运行按钮。程序计算完成后,程序界面上将给出站位应分配的作业元素,如图2所示。

使用该程序计算Buxey问题和Scholl问题集<sup>[7]</sup>,测试结果表明,该程序可以比较有效地解决ALB-II问题。

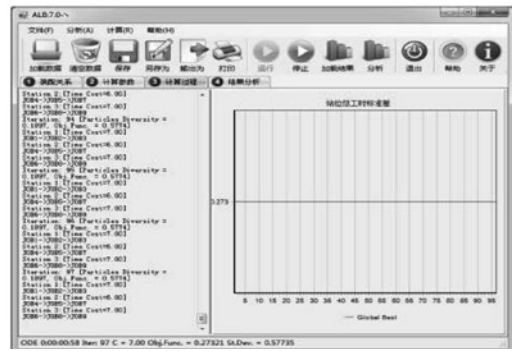
对于设施规划领域而言,研究ALB-II问题更为贴近实际需求:根据需求方提供的生产纲领及产品的装配优先图和各作业元素工时,通过装配线平衡设计,分析得出合理的工作站数量和工作站作业元素分配,从而确定后续的工艺设计和其他专业设计奠定基础。



(a)甘特图绘制



(b)计算参数设置



(c)计算过程

图2 装配线负荷平衡程序

## 2 脉动线设计

### 2.1 生产现状

通过对某型挂架装配生产线的调研了解,该装配生产线目前采用传统固定式装配生产线。其主要缺点有:①产品在固定的工位完成所有装配工作,装配项目和过程繁杂,需要配备多套生产工装,占用较多的生产区域;②由单人或同一班组完成所有工序的装配工作,对装配人员要求较高,由于不同操作人员对产品装配过程的理解存在差异,操作技能水平参差不齐,导致产品装配质量不稳定;③自动化水平低,装配过度依赖于操作人员的经验技能,致使工艺管理水平无法提升;④装配生产周期长。

### 2.2 工时数据

该挂架的装配可以分解为36道工序,具体见表1,通过分析各工序的优先关系以及工序时间,可以找到该装配流程的关键路径上的各工序,如表2所示。整个过程的作业优先关系如图3所示。

### 2.3 站位划分

本文对该关键路径进行脉动式生产线站位划分分析,获得不同站位个数下的生产节拍,以及工序分配情况。根据关键路径的定义可知,该路径上工序的总时长即该挂架装配的总工时,由表2可知,该挂架的装配总工时为  $\sum t_i = 748 \text{ min}$ , 平均工时时为  $\bar{t} = 35.6 \text{ min}$ 。同时,观察表2可得该关键路径的瓶颈工序为JOB7,工时为75min,可以得知,装配线中无论设置多少个站位,生产节拍都一定大于75min,反过来说,站位个数的设置不能超过10个。

### 2.4 计算分析

本文中设置站位个数为2~9个,将关键路径

表1 装配工时表

编号	名称	时间(min)	紧前工序
1	JOB1	30	-
2	JOB2	100	-
3	JOB3	100	-
4	JOB4	230	-
5	JOB5	30	-
6	JOB6	120	-
7	JOB7	10	-
8	JOB8	40	7
9	JOB9	10	1、8
10	JOB10	15	9
11	JOB11	40	10
12	JOB12	15	2、11
13	JOB13	45	12
14	JOB14	50	13
15	JOB15	43	5、6、14
16	JOB16	15	15
17	JOB17	60	4、16
18	JOB18	40	17
19	JOB19	25	18
20	JOB20	30	3、19
21	JOB21	50	20
22	JOB22	45	21
23	JOB23	75	22
24	JOB24	10	-
25	JOB25	70	24
26	JOB26	80	25
27	JOB27	60	26
28	JOB28	40	27
29	JOB29	50	28
30	JOB30	110	29
31	JOB31	20	30
32	JOB32	10	-
33	JOB33	30	23、31、32
34	JOB34	45	33
35	JOB35	50	34
36	JOB36	15	35

表2 关键路径工时表

编号	名称	时间(min)	编号	名称	时间(min)
1	JOB7	10	12	JOB18	40
2	JOB8	40	13	JOB19	25
3	JOB9	10	14	JOB20	30
4	JOB10	15	15	JOB21	50
5	JOB11	40	16	JOB22	45
6	JOB12	15	17	JOB23	75
7	JOB13	45	18	JOB33	30
8	JOB14	50	19	JOB34	45
9	JOB15	43	20	JOB35	50
10	JOB16	15	21	JOB36	15
11	JOB17	60			

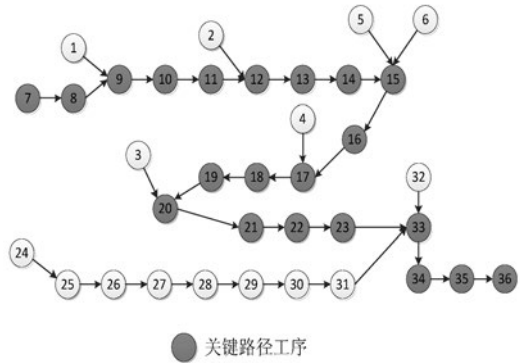


图3 装配优先关系图

中的工序工时、以及优先关系数据整理成输入文档，导入前文所述的程序中，通过计算，记录不同工作站位数量下工序的分配方式，以及站位负荷标准方差，记录结果如表3所示。

表3 不同站位数的计算结果

站位个数	各站位工时数 (min)	实际节拍 (min)	站位负荷标准差
2	383, 365	383	12.7
3	225, 263, 260	263	21.12
4	175, 208, 150, 215	215	30.21
5	130, 153, 155, 170, 140	170	15.27
6	130, 138, 115, 105, 120, 140	140	13.7
7	115, 110, 118, 95, 95, 105, 110	118	9.1
8	75, 100, 108, 100, 105, 45, 105, 110	110	22.4
9	75, 100, 93, 75, 95, 95, 75, 75, 65	100	12.5

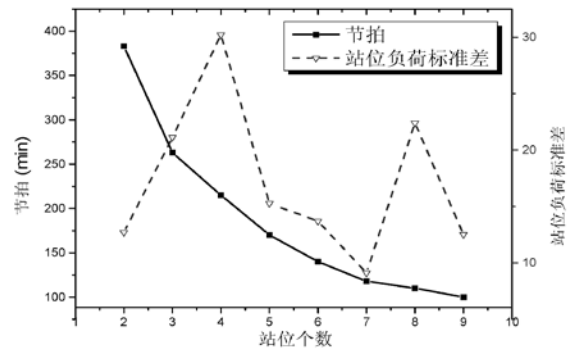


图4 节拍与负荷标准差随站位个数变化趋势

站位负荷标准差可以体现出各站位之间负荷平衡情况，标准差越小则站位负荷平衡性越高。观察表3中的结果，以站位个数为横坐标，生产节拍和站位负荷标准差为纵坐标绘制折线图，如图





# 非最终灭菌产品分装车间 工艺布局分析

■ 张媛媛 「工艺」

**摘要:** 本文以2010版GMP要求为依据,探讨了非最终灭菌产品分装车间的设计要点;以非最终灭菌小容量水针注射剂产品和冻干粉针注射剂产品为例,对不同形式分装车间的平面布局进行对比、分析。

**关键词:** 非最终灭菌; GMP; 分装; 工艺布局

## 0 引言

无菌药品按生产工艺的不同分为最终灭菌产品和非最终灭菌产品,后者由于半成品不能采用任何形式的最终灭菌工艺以去除微生物,需要采用无菌生产工艺进行生产。常规非最终灭菌小容量注射剂分装车间流程如下:原辅料分别经过浓配、过滤、稀配、除菌过滤等工序,等待分装。检验合格的包装材料(西林瓶或安瓿瓶)经理瓶、洗瓶、烘瓶(灭菌)传至灌装间,灌装操作在A级层流保护下进行。对于冻干粉针产品,灌装完成后先进行半加塞,再冷冻干燥,产品在A级层流下进出冻干机,以保证产品质量,冻干后进行全压塞轧盖,轧盖工序完成后,即完成整个分装过程。对于小容量水针注射剂产品,灌装完成后无需冻干,直接进行轧盖或封口操作,完成整个

分装过程。

灌装工序是分装车间核心工序,目前多采用洗、烘、灌联动线进行超声波洗瓶,隧道烘箱灭菌后,A级层流下自动灌装,整个生产传输过程均在密闭环境下进行,以减少污染,保证产品质量。分装车间是诸多制药企业重要生产车间之一,科学、合理的车间设计是避免生产质量风险的基本前提,是产出合格产品的重要保障。

## 1 2010版GMP对非最终灭菌产品生产环境的相关要求

2010版GMP对非最终灭菌产品的生产环境洁净度级别要求如下:

(1) B级背景下的A级:处于未完全密封状态下产品的操作和转运,如产品灌装(或灌封)、分装、压塞、轧盖等;灌装前无法除菌过滤的药液或产品的配制;直接接触药品的包装材

作者简介:张媛媛,女,高级工程师,2009年毕业于北京航空航天大学材料物理与化学专业,现就职于中航规划医药工程设计研究院。

料、器具灭菌后的装配以及处于未完全密封状态下的转运和存放；无菌原料药的粉碎、过筛、混合、分装。

(2) B级：处于未完全密封状态下的产品置于完全密封容器内的转运；直接接触药品的包装材料、器具灭菌后处于密闭容器内转运和存放。

(3) C级：灌装前可除菌过滤的药液或产品的配制；产品的过滤。

(4) D级：直接接触药品的包装材料、器具的最终清洗、装配或包装、灭菌。

在非最终灭菌生产工艺中，可进行除菌过滤的液体产品通常经过无菌过滤以去除微生物，容器具、密封件等分别经过灭菌后分别进行灌装、封口。对于非最终灭菌产品，由于产品分装后不再做进一步灭菌处理，因此必须对整个生产过程及其操作环境条件进行严格控制，以保证产品不被微生物所污染。

## 2 非最终灭菌产品分装车间的工艺布局设计要点

### 2.1 无菌生产核心区的设计

非最终灭菌小容量注射剂分装车间的核心区主要包括产品灌装区域、产品或容器在无菌区内暴露的区域、灭菌后容器传出、组装区域等，对核心区的设计应注意以下方面：

#### (1) 对污染源的控制

分装车间生产核心区的污染源主要来自工艺设备、进入无菌区的器具、人员及其操作过程等，污染源的主要类型分为尘埃粒子污染及微生物污染。人员作为最大污染源之一，需经穿无菌服、气锁后进入无菌环境；核心区域宜单独设置回更，使人员进、出通道分开；充分考虑人员生产、清洁方式和日常维护等因素，进行合适的空间设计，同时也要考虑对操作人员及环境的保护；设置门禁系统等措施，限制非灌装区人员进、出，在硬件上保证对核心生产区的污染风险的控制。

#### (2) 对气流方向、压差的控制

2010版GMP要求，无菌生产核心区的空气洁净度等级为A级，背景为B级，A级单向流的空气速度必须在0.36~0.54m/s范围内。良好的气流方向有助于满足环境的温湿度要求和洁净度要求，保证有效地净化能力。由于灌装区域送、回风风

量大，设计时应留有足够的回风面积，合理布置送风口、回风口位置。洁净区内相同洁净度级别的不同功能房间之间应保持适当的压差梯度，对相邻洁净房间进行压差控制，以保证合理的气流组织，保证其无菌生产环境。

### 2.2 轧盖操作区的设计

传统轧盖操作通常会产生铝屑及一些非活性金属颗粒，可能带来污染产品及环境的风险，轧盖区的设计应保证轧盖过程不会对环境及产品造成污染，一是通过改进工艺设备减少风险，二是对轧盖区的设计加以优化。

2010版GMP规定，轧盖应在B级背景下的A级进行；根据已压塞产品的密封性、轧盖设备的设计、铝盖的特性等因素，轧盖操作可选择在C级或D级背景下的A级送风环境中进行。

按照要求，轧盖应作为无菌工艺使用无菌铝盖，即轧盖操作在B+A环境下进行，保证轧盖前空气的无菌性；或作为洁净工艺在无菌区域外进行，并同时保证西林瓶从灌装至轧盖全程处于A级空气保护中，降低污染风险。

除此之外，还需注意如下几点：轧盖操作区与灌装操作区应分开，设置单独的轧盖操作室；轧盖操作区宜设置独立的人员进出通道；轧盖操作区应采用独立排风装置，相对负压，确保轧盖操作不会对洁净区其他区域产生不利影响。

### 2.3 密闭操作系统的采用

由于手动操作会造成许多风险和不确定性，采用吹灌封设备、限制进出隔离系统及隔离操作器实现密闭自动化的生产已成为一种发展趋势。2010版GMP提出，高污染风险的操作宜在隔离操作器中完成。借助隔离屏障系统，将操作人员和产品分隔开来，一方面提高产品生产过程的无菌性保证，另一方面实现对操作人员的保护。

冻干半成品的转移宜考虑采用自动装载进、卸料系统，该系统通常分为固定式、移动式 and 混合式三种方式，采用该系统可使核心区全部实现自动化操作，减少A级区内操作人员的干预，降低药品受到污染的概率，更好保证无菌要求。

### 2.4 其他方面的设计

分装区作为高风险区及耗能较大的生产区，在满足生产操作及日常维护的前提下，尽量将B级区、A级区最小化；配液罐尽量靠近灌装设备，使物料管线最短；合理设置人员更衣路径，满足规范要求，不宜过于复杂；合理设计物流通道，防

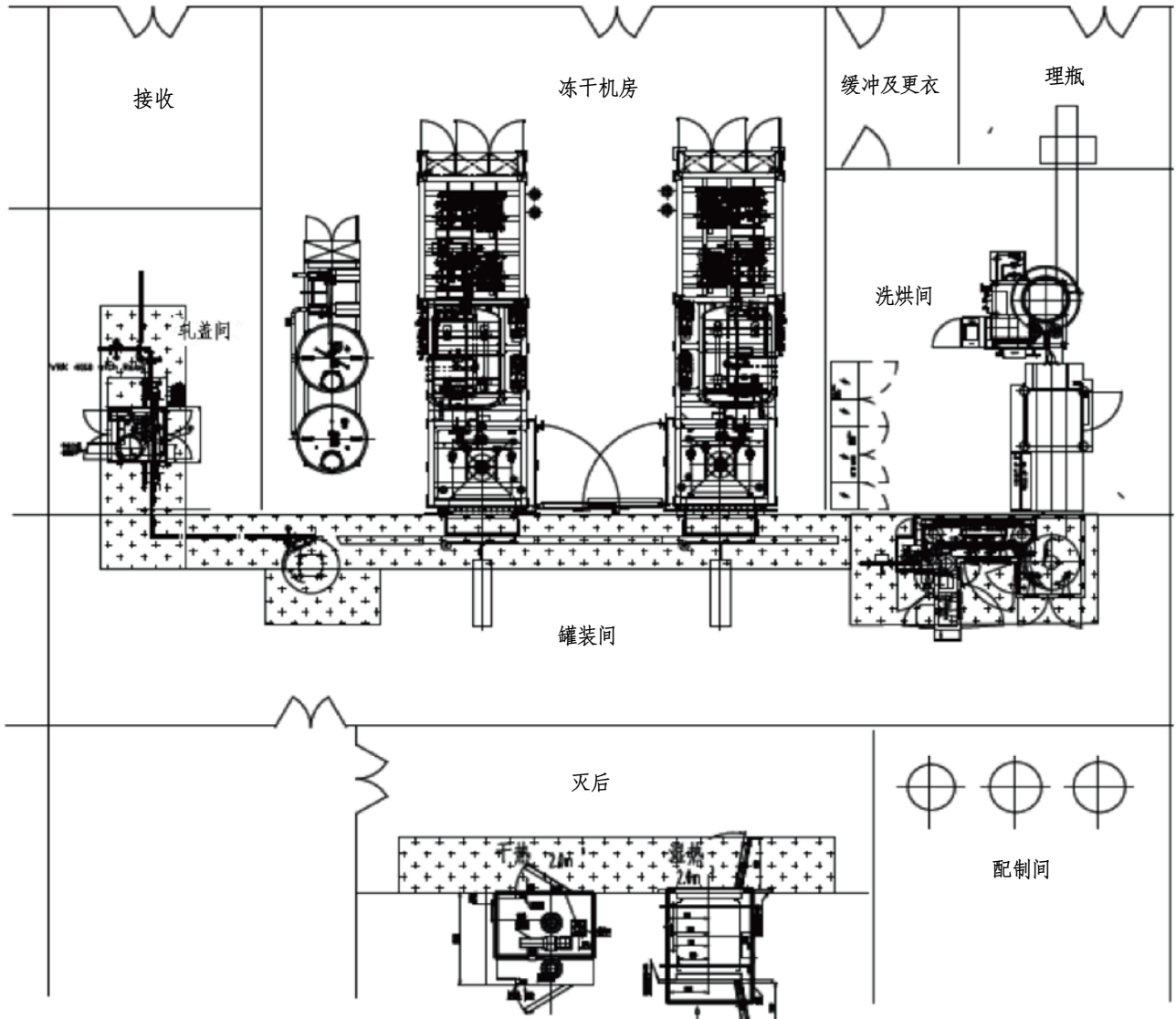


图1 冻干粉针车间U字型布局示意图

止产品/物料交叉；单独设置废弃物出口，防止干净物料与废气物料交叉。

### 3 非最终灭菌产品分装车间布局模式的对比应用分析

(以注射用水针及冻干粉针产品为例)

#### 3.1 U字型布局

冻干粉针产品分装车间主要由洗烘、灌装、冻干、轧盖4个生产单元构成，各生产单元洁净级别各不相同，每个生产区相对独立，将各生产单元按工艺流程布置成U字型，如图1所示，以灌装

和冻干为中心，灌装冻干室布置在车间的物料廊侧，便于大设备安装和参观。灌装冻干室、灭后间等百级区域设置在车间中心位置，符合GMP对洁净分区位置的要求。

冻干车间U字型布局方式越来越普遍，这种布局的优点在于：①洗、烘、灌设备呈L型布置，一是相对减少洁净区面积，二是便于设备检修，设备检修时不用进入高级别洁净区，有效降低了污染风险；②可以更好满足人员对于先进、自动化生产设备的参观需求；③适合模块化设计，一个模块即一个独立冻干车间，适合多品种产品生产，根据产能需求在一个厂房内复制多个生产模

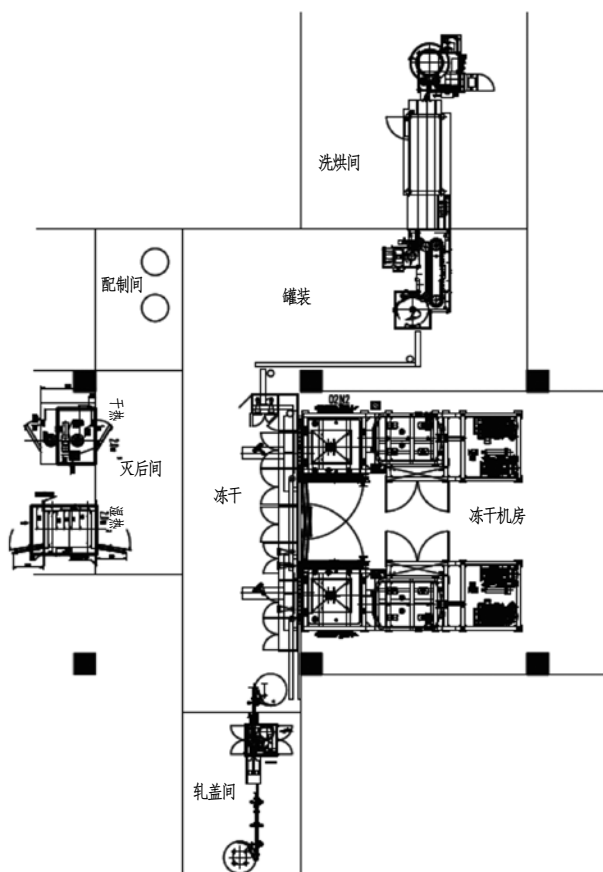


图2 冻干粉针车间I字型布局示意图

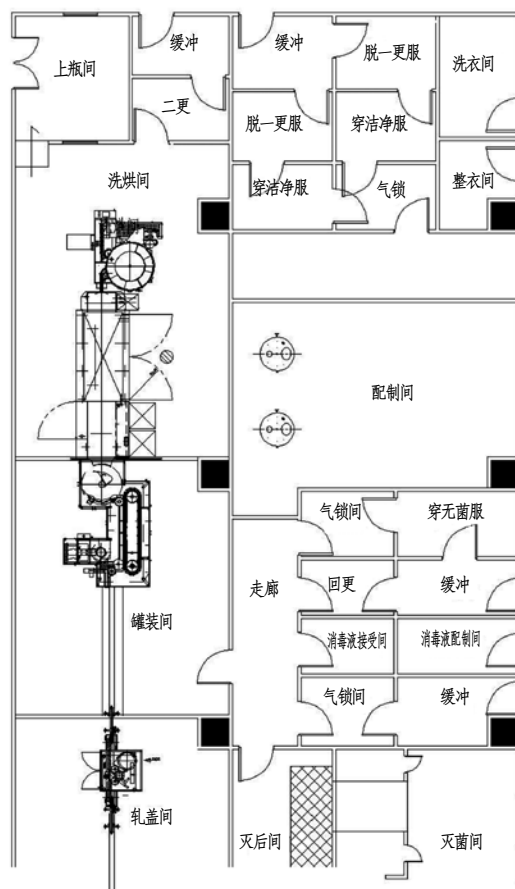


图3 水针车间I字型布局示意图

块；④主人、物流走廊分开设置，主人流从南侧进、出，主物流从北侧进、出，避免人、物交叉。

### 3.2 字型布局模式

如图2所示为冻干车间I字型布局，这种布局模式将整条生产线拉长，一定程度增大了洁净区的使用面积；物流流向分南北两侧进、出，人员流向主要从西侧进、出，人、物流交叉可以避免；整个模块呈不规则形状，浪费生产面积，不利于同层进行多个模块复制。

相比而言，小容量水针注射剂分装车间更适合这种布局方式，如图3所示，I字型模式布局紧凑，节省空间，最大限度减少洁净区面积，节约车间运行成本；人员入口集中在北侧，物料走廊设置在西侧，内包材从西北侧入，产品从西南侧出，整体人、物无交叉；洗、烘、灌联动设备呈直线型，房间靠近K走廊，便于参观；此布局适合同层内布置两个独立生产模块。

## 4 结束语

非最终灭菌产品对无菌生产工艺、环境控制的无菌保证水平要求很高，分装作为高风险操作，对分装车间的设计应严格按照规范要求进行，最大限度降低产品污染风险。本文结合以往项目设计经验，以2010版GMP规范为依据，对非最终灭菌产品分装车间的设计发表了一些观点，与大家探讨。

### 参考文献

- [1] 《药品生产质量管理规范》（2010年修订）。
- [2] 《医药工业洁净厂房设计规范》GB50457-2008。
- [3] 药品GMP指南——无菌药品。

# 设备完好状况评估研究

■ 崔晶 张波 「工艺」

**摘要:** 准确和可信的设备完好状况评估将帮助组织优化其使用资源,有效应对预算资金减少的局面,合理制定战略计划。本文对美国政府、NASA、美国国防部、美国联邦航空管理局等机构使用的设备完好状况评估指标和方法进行系统研究、分析和对比,并提出企业进行设备完好状况评估的相关建议。

**关键词:** 设备完好状况;累积维修量;设备完好状况指数;评估方法

## 0 背景

通过评估基础设施的完好程度来定义其缺陷并且提供基础数据用以估计所需维修费用,通常称之为设备完好状况评估(Facility Condition Assessment, FCA)。这一过程经常被应用在物理基础设施中,如建筑、道路、土地、公共设施等,这是由于基础设施具有类似的设计和特性,FCA在不同的组织间应用时过程也是类似的。然而,对于像研发设备和空间地面测试设备,他们具有独特的设计、运行条件和维护要求,创建一个统一的评估方法比较困难。<sup>[1]</sup>

20世纪以来,设备健康状况越来越受到如美国政府、NASA<sup>[4]</sup>、美国国防部、美国阿诺德工程发展中心(The Arnold Engineering Development Center, AEDC)<sup>[1]</sup>、美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)<sup>[5]</sup>等机构的关注。由于这些机构拥有的设备设施数量繁多,设备的完好状况成为支持机构任务完成、目标实现的重要制约因素。加之机构运营支持资金的限制,需要

清晰的指标和准确的方法来评估设备健康状况,有针对性地进行设备维护。美国联邦政府在世界范围内拥有大约50万台设备设施和相关基础设施。经过长时间的使用,设备系统和组件的磨碎开裂等情况发生,设备性能不可避免会下降。在1996年,美国联邦会计准则咨询委员会(Federal Accounting Standards Advisory Board, FASAB)颁布了第六号标准,对设备、装备设立账目,第一次从政府角度提出要求联邦机构每年汇报累积维修量所需花费,关注设备完好状况<sup>[2]</sup>。

## 1 设备完好状况评估指标、评估方法及应用

不同组织机构针对设备完好状况提出了很多评估指标,虽然各机构拥有的设备设施种类和特点不尽相同,但设备完好状况评估指标具有共通性。组织机构确定设备的完好状况评估指标后,需要使用准确有效的评估方法,设备所在的运营环境是衡量评估方法实用性的重要影响因素。

### 1.1 累积维修量(DM)及其评估方法

#### 1.1.1 设备累积维修量(DM)

累积维修量(Deferred Maintenance, DM)也被称作维护和修理工作的积压量(BMAR),美

作者简介:崔晶,女,工程师,2013年毕业于北京航空航天大学管理科学与工程专业,现就职于中航规划技术研究院。

国联邦会计标准咨询委员会给出了累积维修量的定义：累积维修量即没有按照应有计划执行，并且在未来一段时间也被推迟的维修<sup>[2]</sup>。NASA在关注其设备完好状况时，也使用了累积维修量指标，并提出了评估设备累积维修量的DM方法<sup>[6]</sup>，同时NASA也曾采用国防局的设施维持模型（Facility Sustainment Model, FSM）<sup>[11]</sup>评估设施累积维修量。

### 1.1.2 设备累积维修量的评估方法

2001年，NASA基于学者Charles B. Pittinge的研究结果和研究机构编制的《对联邦设备累积维修量的报告》，提出了评估设备累积维修量的DM方法。DM方法提供了一个有效、实用的方式来估计联邦机构设备的累积维修量，该方法获得了美国知名注册咨询公司和经济学家的认可<sup>[6]</sup>。

DM方法将一个机构划分为3个层级，第一层为研究中心，指多种设施的组合；第二层为设备设施，指具有独立功能的建筑；第三层为系统，指构成设施的基本功能体，分为：结构、屋顶、外墙、内饰、暖通、电力、管路、传输、设备等9类。

DM方法首先对NASA的固定资产设备设施进行梳理、确定设备类型，详细定义9大组成系统包含的内容。

第二步，对设备设施9大组成系统的当前替换价值占比进行划分（加和为1），设备当前替换价值（Current Replace Value, CRV）是指从设备购买起，到现在所有投资的折现值。每个设备设施的9大系统CRV分布与设备设施类型有关，比如，在一个复杂的实验室和测试设备设施中，电力系统在整栋大楼花费的占比较大；而对于一个相对不复杂的存储设施，电力系统在CRV中的占比相对较小。

第三步，基于实地评估和研究中心拥有的相关数据对设备设施的9大组成系统进行完好状况评估，评估结果分5个等级（0-5分），NASA给出针对九大系统的5级状况评估详细标准详见参考文献<sup>[6]</sup>。

第四步，基于各系统的

完好状况评估得分得到系统完好状况CRV百分比，这是DM估计的一个重要组成部分。系统完好状况CRV百分比随着系统完好状况得分降低而升高，如图1所示，比如结构评分若为1，表明结构出现了严重的问题，需要重新建设，而结构的重新施工需要先拆除原先的基础，所以会导致CRV百分比大于100%。

最后，根据设备设施的CRV值，设备设施的组成百分比，以及设备设施的完好状况CRV百分比，相乘得到设施各组成的DM价值，加和得到整个设备设施的DM。

$$DM = \sum (\text{设备设施的CRV} \times \text{各系统CRV所占百分比} \times \text{各系统完好状况CRV百分比})$$

NASA在2005年的报告中，使用DM方法对其已有的各种设施累积维修量进行了量化评估，并定性地评估各种设施的完好状况。同时，该报告也提出DM方法的累积维修量没有考虑到对环境污染/补救所产生的花费，如安全规章改变等<sup>[9]</sup>。

## 1.2 设备完好状况指数（FCI）及其评估方法

### 1.2.1 设备完好状况指数指标

设备完好状况指数是很多组织机构经常使用的评估设备完好状况的指标，如NASA针对其研究中心和设备设施，提出了中心完好状况指数（Center Condition Index, CCI）和设施完好状况指数（Facility Condition Index, FCI）。而阿诺德工程研究中心（AEDC）也使用设备完好状况指数（Asset Condition Index）来综合描述其设备完好状况水平，其相关学者建立了SLEP方法对AEDC的航天地面测试设备进行完好状况评估，并将评估方法开发成了软件。联邦航空管理局同样使用了设备完好状况指数（Facility Condition Index/Asset

系统 \ 得分	5	4	3	2	1
结构	0	1	10	25	150
外墙	0	1	10	50	101
屋顶	0	9	38	75	150
暖通	0	2	13	63	133
电力	0	2	13	63	133
管路	0	2	10	57	121
传输	0	2	13	50	100
内饰	0	1	10	50	101
设备	0	2	13	50	100

图1 NASA设备设施9大组成系统完好状况评估对应CRV百分比

Condition Index, FCI/ACI) 作为其评估设备投资组合现在及未来绩效的指标, 并定义设备完好状况指数为: 设备基于前期建设、统计标准衡量设备的当前完好状况。

### 1.2.2 设备完好状况指数的评估方法及其应用

不同的机构使用不同的评估方法对设备完好状况指数进行评估, 本文研究了AEDC、NASA、FAA等机构使用的评估方法。

#### (1) AEDC的评估方法

AEDC于2007年开始了一项服务寿命延长计划(Service Life Extension Program, SLEP) 来评估主要测试设备的完好状况, 从而决定所需维持设备运营至2020年的支持资金。AEDC及相关研究人员建立了SLEP方法来评估设备的完好程度, 此外方法提供了在有限的剩余寿命里对设备替换或维修的成本预估。相关学者使用SLEP方法对阿诺德研究中心空间传感器、超音速/高超音速测试设备等300多个航天地面测试设备完好状况进行了评估<sup>[12]</sup>。该方法在评估设备设施的完好状况时从10个指标进行考察<sup>[1]</sup>, 包括设备剩余寿命、外观、可用性、能力、监控、文件、有效性、可维护性、可靠性、安全等(指标说明详见文献<sup>[1]</sup>), 最终给出现在和未来5年内的设备完好状况评分, 分数分布在0-10之间, 之后采用了综合的方式给出综合完好状况得分<sup>[12]</sup>, 为管理者确定设备维修/维护项目的优先级提供支持。

SLEP方法在评估设备完好状况时, 针对10个指标从当前完好状况和未来5年完好状况两个方面进行描述, 当前和未来需要评估问题不同, 但是衡量标准是一致的, 评估问题详见文献<sup>[1]</sup>。

AEDC对衡量设备完好状况指标的10个要素表现分为11个等级, 并设定了详细的评分细则。细则给出了0, 2, 4, 8, 10分确定的评分原则和设备状况描述, 1, 3, 5, 7, 9分位于这些分数之间使评估得分可以尽可能接近设备实际状况。设备当前完好状况和未来5年完好状况使用的评分细则相同, 详见文献<sup>[1]</sup>。

SLEP方法从10个要素衡量了设备完好状况, 但AEDC希望能给出一个综合的结果来描述设备完好状况, 即设备完好状况指数(Asset Condition Index)。因此, SLEP方法基于指标对设备完好状况的影响程度, 给出了各个指标的权重。将10个指标分为2组, 1组对完好状况的影响稍大, 占权重相对较大; 另一组对完好状况的影响稍小, 占权重相

对较小; 同组间指标分配的权重相同。各指标的评估得分乘以对应权重加总, 即得到该设施的设备完好状况指数。

#### (2) NASA的评估方法

NASA 2003年提出的评估设备累积维修量的方法, 该方法在评估设备累积维修量的同时, 对NASA研究完好状况指数(CCI) 和设备完好状况指数(FCI), 也给出了评估方法。

设备完好状况指数由组成该设备的9大系统完好状况评估得分计算得出, 计算方法为将9大系统的完好状况评估得分乘以其对应的CRV百分比加权值(System CRV Percentage), 然后求和。

研究中心的完好状况指数(CCI) 可以在设备设施的完好状况指数(FCI) 基础上计算得到, 计算方式为先计算各中心设备设施的FCI加权值(Weighted FCI), 再对各设备设施的FCI加权值求和。其中各设备设施的FCI加权值=(设备设施CRV÷中心CRV)×设备设施FCI。

#### (3) FAA的评估方法

联邦航空管理局(FAA) 于2012开展自有设备完好状况调查, 数据来源于FAA、劳工部、联邦服务机构(general services administration)、受访相关机构官员等。FAA使用回归模型来评估终端设施的完好状况, 该方法使用通过物理检查过的设备相关数据来估计未检查过的设备的完好状况。主要评估两个指标, 设备完好状况指数(Facility Condition Index, FCI) 和累积维修量(Deferred Maintenance, DM)。

FAA初期使用的回归模型认为设备完好状况指数(Facility Condition Index, FCI) 和累积维修量(deferred maintenance) 都是设备年龄的回归函数。模型假定设备*i*的完好状况为

$$y_i = E(y_i | age_i) = \alpha + \beta age_i$$

评估设备完好状况指数(Facility Condition Index, FCI) 时,  $\alpha$  为固定值100。评估累积维修量(deferred maintenance) 时, 为固定值0。FAA使用其过去6年直接检查的设备设施相关数据来进行回归建模。为了评估FAA模型的准确性, 美国国家审计局(United States Government Accountability Office, GAO) 通过样本研究和模型评估的方式进行了研究。GAO选取了8个具有相同设备完好状况和累计维修量的评估得分的设备设施进行了实地检查。这些设备设施位于不同的地理位置, 有着不同的运营成本和模式、设备设施结



发生的可能性	非常高	5			× × × ×				
	高	4			× × × × × × × ×	× ×	× × × ×		
	中等	3	×			× × × × × × × ×	× × × ×	× × × × × × × ×	
	低	2		×			×		
	非常低	1	×		×			×	
			1	2	3	4	5		
			非常低	低	中等	高	非常高		
			事件的严重程度						

图2 设备维修项目的风险矩阵

构、占地面积等，因此这些设施的实际完好状况水平很可能是不同的。该研究对模型2年的评估结果进行了分析，研究结果发现该模型的预测误差较大<sup>[5]</sup>，因此只使用设备年龄来估计设备的完好状况存在一定的问题。

GAO对设备完好状况的评估模型进行了进一步的改进，建立了3种评估方法，增加了衡量指标，包括设备设施的规格（占地面积等）、物理位置、建筑设计结构、设备功能分类等。

评估方法1是采用线性回归模型，基于FAA模型增加了评估变量。

$$E(DM|x_i) = \beta_1 age_i + \beta_2 value_i + \beta_3 age \cdot value_i + design_i \delta + class_i \theta + owner_i \gamma$$

评估方法2使用递归分割法/决策树方式来评估设备完好状况。该方法通过样本学习，建立决策树，对未知设备的完好状况进行估计。

$$E(FCI_i|x_i) = \beta_0 + \beta_1 I(9.5 \leq age_i < 24.5) + \beta_2 I(24.5 \leq age_i < 47.5, latitude \geq 30.46) + \beta_3 I(24.5 \leq age_i < 24.5, latitude < 30.46) + \beta_4 I(age_i > 47.5)$$

评估方法3，通过简单调整FAA模型来评估设备完好状况，该模型增加了设备价值（设备替换成本）的指标。

$$E(DM_i|x_i) = \beta_1 age_i + \beta_2 value_i + \beta_3 age_i \cdot value_i$$

通过进行对模型预测结果的评估，GAO的三种模型的误差相对于原评估模型都有一定程度的

降低<sup>[5]</sup>。

### 1.4 其他评估方法

美国联邦机构等也使用了一些其他方法评估设备完好状况，主要有现场调查法、风险矩阵分析方法、平衡计分卡模型等，本文对现场调查法和风险矩阵分析方法进行详细说明。

#### (1) 现场调查法

为了准确表明设备完好状况，很多联邦机构都使用现场调查的方法来评估他们的设备完好状况。由经过培训的人员检查设备，考虑设备的物理状况条件和表现做出评估，确定设备维护和修理量<sup>[8]</sup>。

#### (2) 风险矩阵分析方法

在NASA 2008年的“固定资产重要计划”中，确定各个设施建设/维修项目的优先级时采用了风险矩阵的分析方法。该方法从维修的角度反映设备的完好状况。

图2中每一个“X”表明一个设备维修/建设项目，X轴表示风险发生的后果，Y轴表示风险发生的可能性。对X、Y轴的不同等级的衡量标准，NASA也给出了详细的规则。设备维修项目建设时优先考虑红区的项目，其次是黄区、绿区。NASA在2011年沿用了风险矩阵分析方法对纳入NASA航空测试计划（Aeronautics Test Program, ATP）的试验设施进行完好状况评估，并将评估结果更新入数据库<sup>[10]</sup>。

## 2 设备完好状况评估参考建议

设备设施是支持组织机构完成其战略目标、正常运转的重要固定资产，准确和可信的设备完好状况评估将帮助组织优化其使用资源，有效对预算资金减少的局面，合理制定战略计划。为了有效评估设备完好状况，提高组织机构对设备设施的管理、投资的决策能力，总结出以下建议。

(1) 设备管理及完好状况评估，其目标要与组织目标相一致

设备设施的管理、应用是为组织任务和目标服务的，设备完好状况评估的目标和导向不能背离组织的战略方向和任务目标。

## (2) 正确选取反映设备完好状况的评估指标

在选取反应设备完好状况的评估指标时, 需要考虑和研究评估目的、指标如何达到评估目的、需要搜集什么样的数据、评估过程所需的资源, 当前的管理信息系统是否可以提供数据源等。

设备完好状况指标通过估量设备当前使用情况来确定有多少必需的维修量, 运营环境会影响指标的选取。私有性质的组织通常以盈利作为企业的目标, 联邦政府的目标是为公众提供货物和服务, 不同的组织对评估指标的选取可能不同, 对什么是设备可接受的完好状况, 也会有不同的理解。

## (3) 使用适合的评估方法, 提高评估的准确度

组织机构应基于自身能提供的数据、资源, 考虑评估所需的时间、人力、资金等成本, 选取实用的评估方法。

## (4) 持续跟踪设备完好状况评估结果

对设备完好状况进行评估产生的效果会随着时间推移会逐步显现。为了深入挖掘设备投资的效果和产出, 需要长时间追踪一系列的评估指标, 并且与基准情景相比状况是否有提高或者恶化<sup>[8]</sup>。

(5) 建立完善设备信息数据库的计划, 坚持数据的收集, 保证数据的完整性、准确性以及与设备状况的同步性。

如果要机构要建立一个有效的设备完好状况评估, 那么必需搜集各类型设备具有各自特点的准确、全面的数据信息。如NASA关于设备累积维修量评估的基础是设备累积维修量数据库。该数据库包括NASA固定资产投资相关数据, 包括设备数量、设备描述、CRV、设备能力等等。这些固定资产数据每年都被录入数据库, 以保证可获得较为准确的数据和评估结果。同时, 数据库还包含: 对于9大系统的系统运行情况得分、系统CRV百分比、设备的DM估计量、设备完好状况指数 (FCI) 等<sup>[6]</sup>。

美国诸多组织机构近十几年来持续关注设备设施的完好状况, 并提出了诸多衡量指标和评估方法, 而国内对设备设施的关注程度和评估相对欠缺。本文对美国诸多组织机构的设备完好状况评估指标进行梳理, 希望对我国机构和企业的设备评估提供参考。

## 参考文献

[1] Davis, Larry Michael. A Condition Assessment Process for Aerospace Ground Test Systems [D].

Knoxville: University of Tennessee, 2009.

[2] Federal Facilities Council Standing Committee on Operations and Maintenance. Deferred Maintenance Reporting for Federal Facilities[R], 2001.

[3] National Aeronautics and Space Administration. NASA Real Property Facility Capital Plan[R], 2008.

[4] Woodrow Whitlow, Jr. NASA Facility Strategy[R], 2011.

[5] United States Government Accountability Office. FAA Facilities — Improved Condition Assessment Methods, 2013.

[6] National Aeronautics and Space Administration. The NASA Deferred Maintenance Parametric Estimating Guide[R], 2003.

[7] National Aeronautics and Space Administration. Reliability-Centered Maintenance Guide[R], 2008.

[8] John H. Cable, Jocelyn S. Davis. Key Performance Indicators for Federal Facilities Portfolios[R], 2005.

[9] National Aeronautics and Space Administration. Fiscal Year 2005 NASA Wide Facilities Condition Assessment and Deferred Maintenance Estimate[R], 2005.

[10] National Aeronautics and Space Administration. FY11 Facility Assessment Study for Aeronautics Test Program[R], 2012.

[11] National Aeronautics and Space Administration. FY08 Facility Sustainment Model[R], 2008.

[12] William B. Baker Jr., Frank M. Jackson. Service Life Extension Program (SLEP) for Arnold Engineering Development Center (AEDC) Aerodynamic, Propulsion, Rocket, and Space Testing Capabilities [R], 2010.

# 成都博物馆基础隔震结构隔震层抗拉性能设计指标研究

■ 葛家琪 张玲 张国军 刘鑫刚 马伯涛 管志忠 「结构」

**摘要:** 不规则结构基础隔震时, 在地震作用下会在隔震层局部产生较大拉力, 橡胶隔震支座易受拉破坏并进而影响结构安全性。采用抗拉限位装置可有效解决隔震层抗拉问题, 但国家相关规范对此没有提出相应设计方法及安全性能设计指标。结合已成功实施的成都博物馆基础隔震工程, 本文通过橡胶隔震支座竖向拉伸及剪拉试验, 提出橡胶隔震支座抗拉性能设计指标: 8度抗震设防时装置不参与工作或保持弹性工作状态; 9度抗震设防时装置处于不屈服状态, 并配套开发提升橡胶隔震层抗拉性能的新型抗拉限位装置; 通过对整体结构模型不同强度地震作用时程分析, 提出了该不规则结构基础隔震时隔震层抗拉性能的设计方法及设计指标, 大震下局部橡胶隔震支座出现塑性, 但仍具有很高的继续拉伸承载能力, 为后续相似工程参考。

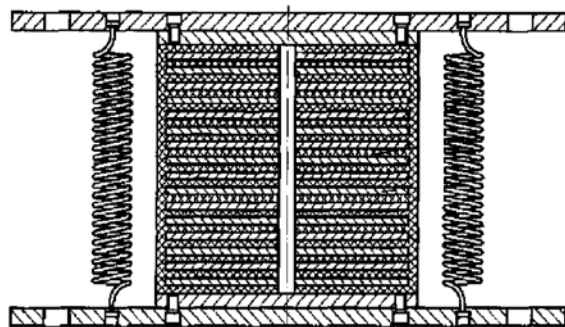
**关键词:** 基础隔震结构; 橡胶隔震支座; 抗拉限位装置; 抗拉性能; 设计指标

## 0 引言

采用基础隔震技术可有效减小整体结构水平地震效应, 同时可有效控制不规则结构体系的地震作用扭转效应, 但在地震作用下, 结构角部及核心筒下的橡胶隔震支座会出现拉应力。叠层橡胶隔震支座(简称橡胶隔震支座或橡胶支座)具有水平刚度低、竖向抗压刚度及抗压承载力高的特性, 但其抗拉刚度及抗拉承载力明显不足。橡胶隔震支座抗拉性能差的特性制约了隔震结构的广泛应用。

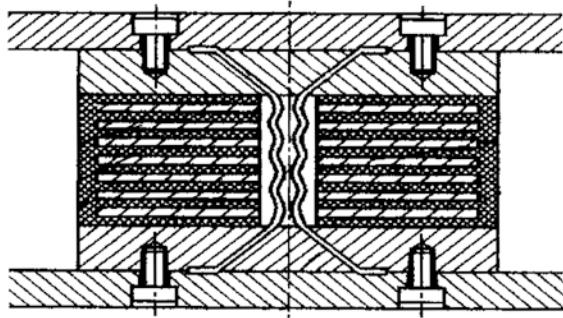
文献<sup>[1]</sup>中对直径500mm天然橡胶支座施加200%的剪切变形后进行单调拉伸加载时的滞回特性, 橡胶材料的剪切模量为0.44MPa, 拉应变(竖向变形/橡胶总厚度)在5%~100%间变化; 在拉应变达到10%、拉应力达到1.5MPa之前表现为线性特征; 而之后的变形, 刚度急剧下降, 表现出非线性特性。为解决叠层橡胶隔震支座抗拉

性能不足问题, 可采用抗拉限位装置。抗拉限位装置主要有两类: 一类是将抗拉限位装置与隔震支座设置为一体<sup>[2-3]</sup>, 如图1a、1b所示; 这种类型的抗拉隔震支座能充分地起到限制隔震支座拉伸变形的作用, 但支座构造复杂, 实施难度大, 同时增加了支座的水平刚度, 减震效果有所降低。另一类抗拉限位装置是单独设置在隔震支座附近, 并通过优化其刚度和连接间隙值, 限制隔震支座在地震作用下的拉伸变形<sup>[4]</sup>, 如图1c所示, 这类抗拉限位装置不影响隔震支座的水平性能。

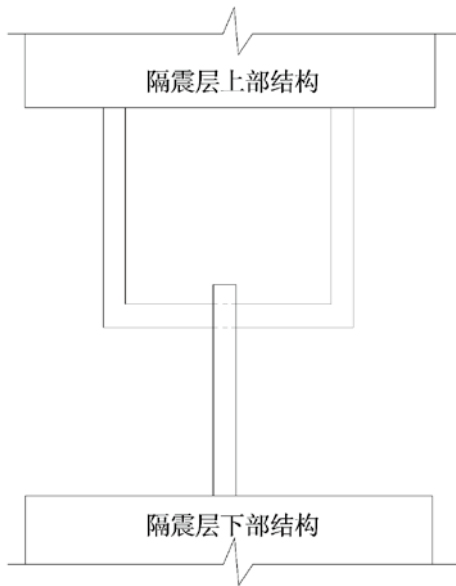


(a)弹簧抗拉隔震支座

作者简介: 葛家琪, 男, 研究员, 1987年毕业于同济大学建筑工程专业, 现就职于中航规划技术院。



(b) 钢筋抗拉隔震支座



(c) “门”形梁式抗拉装置

图1 抗拉限位装置示意图

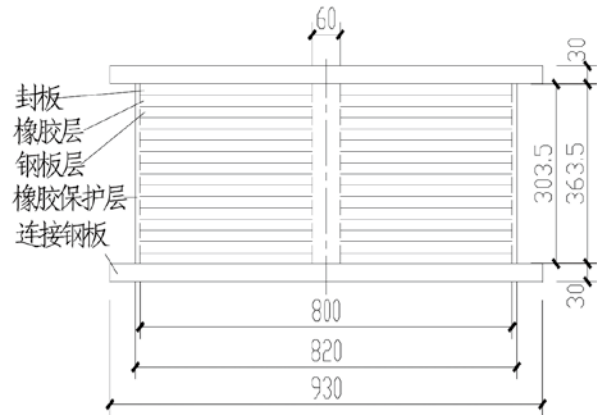
国内外已有隔震结构抗拉限位装置的工程应用研究<sup>[2]</sup>,但成果主要着重于构造方面,通过在大拉力的支座处设置抗拉装置减缓橡胶隔震支座的拉力。我国现行相关规范对隔震层抗拉限位装置的安全性能设计尚缺少完善规定。以成都博物馆<sup>[5-6]</sup>不规则结构隔震体系为实例,本文作者通过试验得到隔震支座抗拉性能,研究抗拉限位装置布置及构造对隔震支座抗拉性能的影响,同步实现橡胶隔震支座及抗拉限位装置在地震作用下抗拉安全性,提出不规则结构隔震层量化的抗震性能设计方法与安全控制指标。

## 1 隔震支座抗拉性能试验

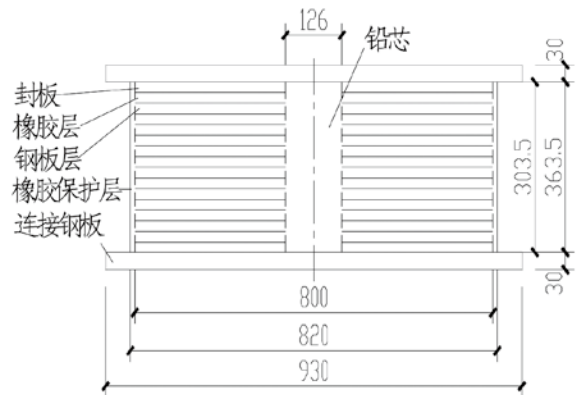
### 1.1 试验概况

选取橡胶支座试件:LNR800(天然橡胶支

座,橡胶硬度 $10^{\circ}$ ,竖向刚度 $3650.77\text{kN/mm}$ ,水平刚度 $1.45\text{kN/mm}$ )3个、LRB800(铅芯橡胶支座,橡胶硬度 $10^{\circ}$ ,竖向刚度 $3944.43\text{kN/mm}$ ,水平屈服力 $103.44\text{kN}$ ,屈服后刚度 $1.48\text{kN/mm}$ )3个,支座结构基本参数见图2。为确定工程隔震支座抗拉性能,在竖向 $2000\text{kN}$ 、水平 $2000\text{kN}$ 级作动器试验架上开展直径 $\Phi 800\text{mm}$ 橡胶支座在剪切变形 $50\%$ 、 $100\%$ 下的竖向拉伸性能试验,试验照片见图3。



(a) LNR800



(b) LRB800

图2 橡胶支座构造及尺寸

试验工况主要有:

工况1:零剪切应变拉伸试验,拉伸直至破坏;

工况2:剪切应变 $50\%$ 、 $100\%$ 、 $150\%$ 、 $200\%$ 、 $250\%$ 时,进行竖向拉伸 $10\%$ (拉伸率,下同)滞回加载,随后进行原点零剪切拉伸试验直至破坏;

工况3:剪切应变至 $50\%$ 时进行竖向拉伸 $10\%$ 滞回和竖向拉伸 $15\%$ 滞回,随后剪切应变至 $100\%$ 时进行竖向拉伸 $10\%$ 、 $15\%$ 、 $20\%$ 递增直至竖向拉伸

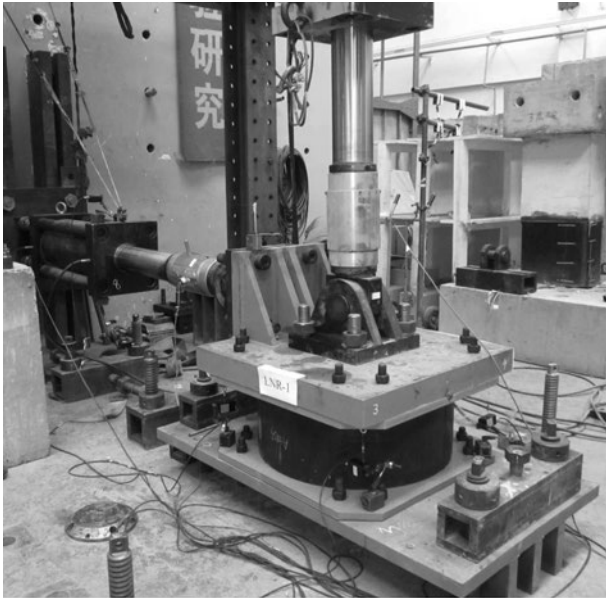


图3 隔震支座加载现场

破坏。注：工况2和工况3中，将工况1的上下盖板厚度30mm改为50mm，并且增加了沉孔螺栓长度。

### 1.2 破坏形态

工况1，LNR1支座在保持拉伸率50%加载时，支座突然断裂，破坏面在下封板与橡胶层之间，加载期间没有明显撕裂响声。LRB支座在保持拉伸率30%加载时，有明显撕裂响声，连接面突然断裂，破坏面在下封板与橡胶层之间。典型破坏形态见图4。



图4 隔震支座破坏形态 (试件LNR1)

工况2，LNR2支座剪切应变达到250%时，有明显的橡胶逐步撕裂的响声，此时停止剪切，水平卸载完毕、橡胶支座恢复原位后，进行竖向纯拉伸试验，当竖向纯拉伸至16%左右时，支座被拉断破坏，破坏面在下封板和橡胶层之间。LRB支座剪切达250%时，有明显的橡胶逐步撕裂的响

声，随后停止水平剪切，水平卸载完毕、橡胶支座恢复原位后，进行竖向拉伸试验，拉伸28.65%时出现部分拉伸断裂破坏，破坏面在上封板和橡胶层之间。隔震支座破坏形态见图5。



图5 隔震支座破坏形态 (试件LNR2)

工况3，LNR3支座在剪切应变为100%时继续竖向拉伸加载，第4个竖向拉伸15%滞回时，出现撕裂响声随后出现拉伸断裂破坏，破坏面为下封板与橡胶层之间断裂。LRB3支座在剪切应变为100%时继续竖向拉伸加载，其中在20%、25%拉伸循环时出现局部较小撕裂响声，没有破坏征兆；30%时出现均匀连续的橡胶撕裂响声；在拉向35%过程中，出现很大撕裂响声随后停止继续加载，橡胶层被撕裂但没有断裂。隔震支座破坏形态见图6。

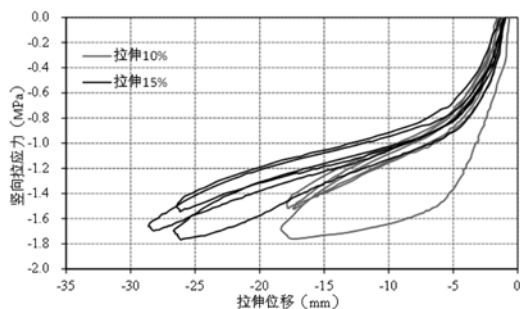


图6 隔震支座破坏形态 (试件LNR3)

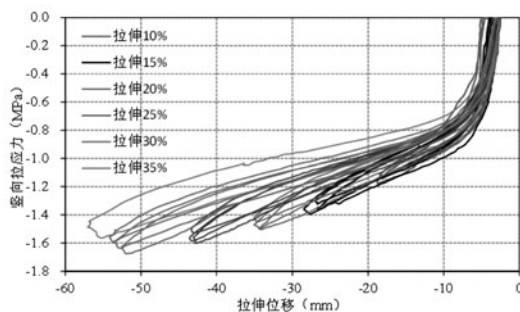
### 1.3 试验结果及分析

试验结果可知，100%剪切应变时极限拉伸变形为55.09mm，极限拉应力为1.567MPa，极限拉应变为35%。橡胶隔震支座拉伸应变2%之前，滞回曲线非线性不明显，基本保持线弹性状态，拉应力约0.6MPa。橡胶隔震支座拉伸应变为5%~10%时，滞回曲线曲率最大，拉伸应变为7%，即极限变形的1/5时，此状态下拉应力约为0.85MPa，为极限拉应力的1/1.84，尽管拉伸滞回曲线呈现出非线性，但滞回环面积很小，并可

恢复到起始点，橡胶隔震支座实际处于弹性工作状态，相对极限变形和拉应力仍有很大的继续承载能力空间。因此，取7%拉应变及其对应的拉应力0.85MPa为工程用隔震支座的弹性拉应变及拉应力设计指标。拉伸应变为10%~35%时，处于滞回曲线第二段的上升阶段，拉伸应变为15%，即是极限变形的1/2.3，拉应力约为1.1MPa，是极限拉应力的1/1.42，出现明显非线性特征，说明隔震支座产生一定损伤，但滞回环面积很小，且基本可以回到初始点，可见天然橡胶支座虽出现较大非线性，且没有出现较大损伤。文中取15%拉应变及其对应的拉应力1.1MPa为工程用隔震支座的屈服拉应变及屈服拉应力设计指标。试验中典型抗拉滞回曲线见图7。



(a) 剪切应变50%



(b) 剪切应变100%

图7 LRB3支座竖向拉伸滞回曲线

本工程所用隔震支座的抗拉性能参数均低于文献[1]支座的性能，这与隔震支座材料、直径、制作工艺、质量等相关，建议实际工程设计时，应按国家相关规范标准要求，通过试验确定隔震支座抗拉性能。

## 2 隔震层抗拉性能设计指标

我国(GB 50011-2010)《建筑抗震设计

规范》等相关规范(规程)规定：在罕遇地震作用下，隔震支座不宜出现拉应力；当隔震支座不可避免处于受拉状态时，其拉应力不应大于1.0MPa。对于几何不规则或高层建筑的隔震结构，其隔震支座难以达到该项指标。另一方面，国内外历次大地震灾害的实际情况表明，建筑场地发生超设防烈度地震的情况时有发生。2008年我国汶川“5.12”大地震，震中烈度达到了11度，而(GB 50011-2010)《建筑抗震设计规范》中给出的抗震设计烈度是7度。因此，作为隔震结构整体安全的关键部位，应适当提高隔震层抗拉性能目标，具体设计指标如下：

(1) 按照本工程<sup>[5-6]</sup>抗震设计选取的8度(0.2g)抗震设防烈度(简称设计烈度)罕遇地震作用下，允许部分橡胶隔震支座出现一定的竖向拉伸变形，但应处于抗拉弹性状态；抗拉限位装置不参与工作或保持弹性工作状态；

(2) 在9度(0.4g)(简称超设计烈度)罕遇地震作用下，抗拉限位装置分担部分橡胶隔震支座的拉应力，橡胶隔震支座应处于抗拉不屈服状态；同时要求抗拉限位装置处于不屈服状态。

本工程所用隔震支座7%、15%拉应变对应的竖向变形值见表1。

表1 橡胶隔震支座不同拉应变对应拉伸变形值

支座型号	橡胶层总厚度tr/mm	竖向拉伸变形Δ/mm	
		7%拉应变	15%拉应变
LRB800	156	10.9	23.4
LNR800	156	10.9	23.4
LRB900	180	12.6	27
LNR900	180	12.6	27.0
LRB1000	198	13.9	29.7
LNR1000	196	13.7	29.4

注：LNR表示橡胶隔震支座，LRB表示铅芯橡胶隔震支座。

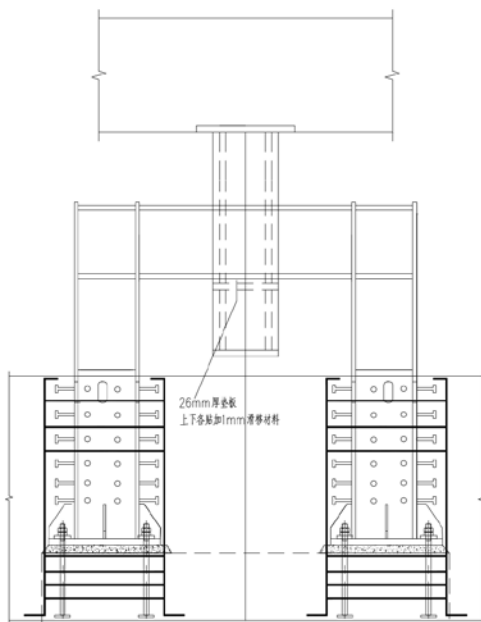
## 3 隔震层抗拉性能分析

### 3.1 抗拉限位装置的布置

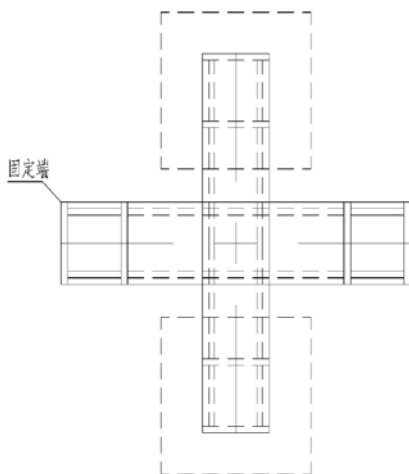
抗拉限位装置的布置原则是在不影响隔震支座水平变形性能的前提下，对隔震支座竖向拉伸变形起到限制作用。工程在设计烈度罕遇地震作用下，结构核心筒角部及结构四角部位出现竖向拉伸变形(即出现拉应力)，该区域即为橡胶隔

震支座本身及隔震层安全性能控制的关键部位，应设置抗拉限位装置。

设计采用的抗拉限位装置包括固定端、可动端两个“门”形钢架，见图8。不动端与基础筏板相连，可动端与隔震层顶混凝土梁相连。固定端与可动端“十”字相扣，中间设可调节间隙尺寸的垫板及滑动材料，同时满足超烈度地震作用下竖向抗拉承载力及水平自由变形的要求。根据出现拉应力分布区域和大小，设置的抗拉限位装置1~3设计抗拉承载力为6500kN，抗拉限位装置4设计抗拉承载力为2500kN，抗拉限位装置5设计抗拉承载力为4500kN，详见图9。



(a) 立面示意图



(b) 平面示意图

图8 抗拉限位装置构造示意图

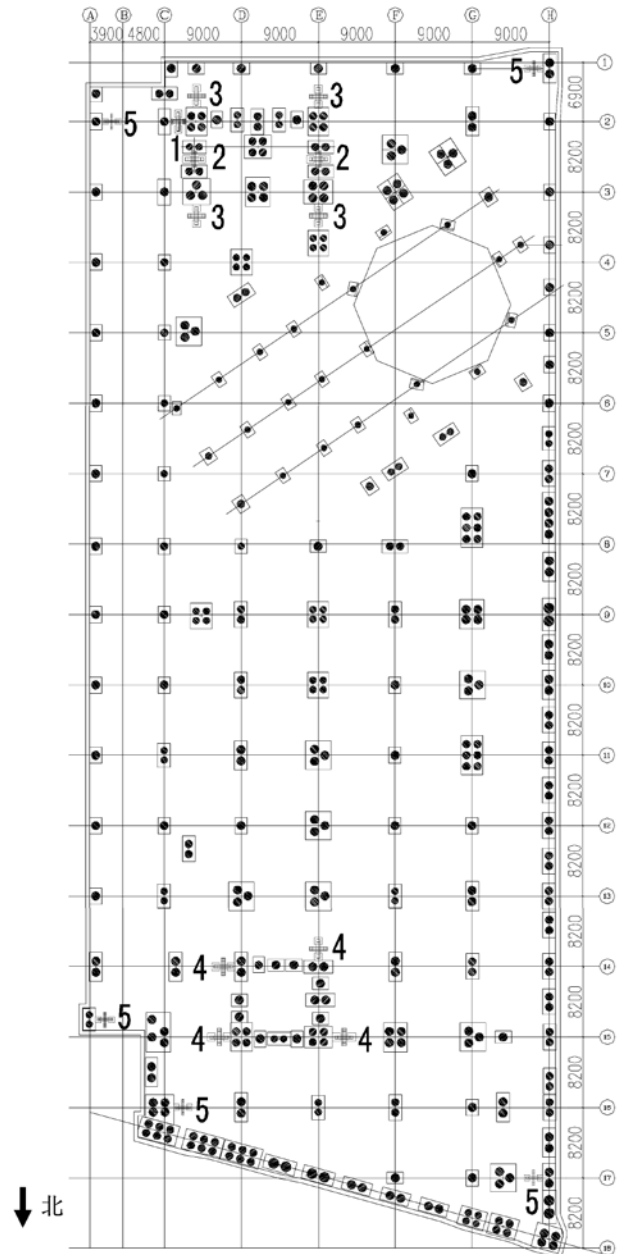


图9 隔震层抗拉限位装置布置

注：图中●表示隔震支座。

## 3.2 计算分析模型

### 3.2.1 整体模型

本文算例在ANSYS和SAP2000中进行，橡胶支座布置见图7，结构模型参数见文献<sup>[5-6]</sup>。设计针对隔震层有、无抗拉限位装置及是否考虑橡胶支座自身抗拉刚度的情况，进行汶川波8度罕遇地震和9度（超烈度）地震作用下的整体结构弹塑性时程分析。荷载工况组合取为：先施加重力荷载代表值（1.0恒+0.5活），再计算0.85X向水平地震+Y向水平地震+0.65Z向地震作用。具体分析内容

如下：

(1) 8度 (0.2g) 罕遇地震作用下，分别进行有无抗拉限位装置、是否考虑橡胶隔震支座抗拉刚度的整体结构计算，分析橡胶隔震支座的抗拉性能；优化确定上下装置间隙值，分析抗拉限位装置的抗拉性能；

(2) 超设计烈度9度 (0.4g) 罕遇地震作用下，分别进行有、无抗拉限位装置的整体结构计算，分析隔震支座、抗拉限位装置的抗拉性能。

### 3.2.2 隔震层模型

隔震层模拟主要考虑橡胶隔震支座和抗拉限位装置，采用如下模型：

(1) 不考虑橡胶隔震支座的竖向抗拉刚度时，采用压缩弹簧加初始间隙值为零的缝单元模拟隔震支座只承受压应力状态 (图10)：

$$f_1 = \begin{cases} k_1(d+l) & d+l < 0 \\ 0 & d+l \geq 0 \end{cases}$$

其中 $f_1$ 为隔震支座所承受压力， $k_1$ 为橡胶隔震支座竖向压缩刚度， $l$ 为初始间隙值，取为零， $d$ 为竖向变形值， $i$ 、 $j$ 远离为正值。

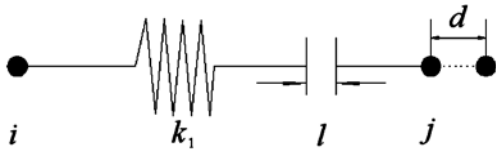


图10 缝单元示意图

(2) 考虑橡胶隔震支座的竖向抗拉刚度时，根据试验结果，采用多折线刚度弹簧模拟隔震层竖向抗拉刚度 (图11)。

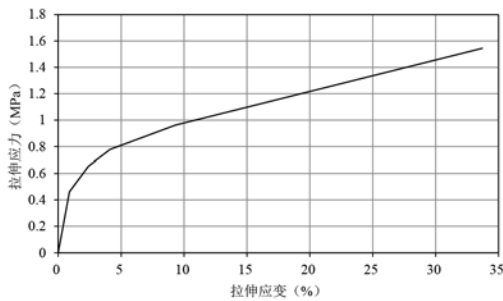


图11 隔震支座拉伸应力应变曲线

(3) 抗拉限位装置的两个“门”形钢架之间，采用钩单元模拟抗拉限位装置在地震作用下

相互作用 (图12)；

$$f_2 = \begin{cases} k_2(d+l) & d > l \\ 0 & d \leq l \end{cases}$$

其中 $f_2$ 为抗拉限位装置所受拉力， $k_2$ 为抗拉限位装置门架固定端、可动端接触后刚度，且 $l$ 为初始间隙值，其必须为非负， $d$ 为变形值。

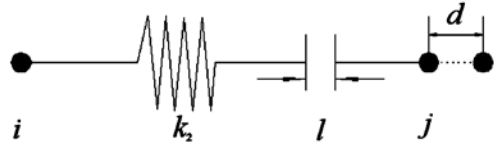


图12 钩单元示意图

### 3.3 设计烈度下隔震层抗拉性能

#### 3.3.1 未设置抗拉限位装置

隔震支座节点编号见图13。8度 (0.2g) 罕遇地震 (汶川波) 作用下，隔震层无抗拉限位装置、考虑隔震支座抗拉刚度与不考虑隔震支座抗拉刚度时，各类隔震支座最大竖向拉伸变形及拉应力分析结果见表2、图14、图15。

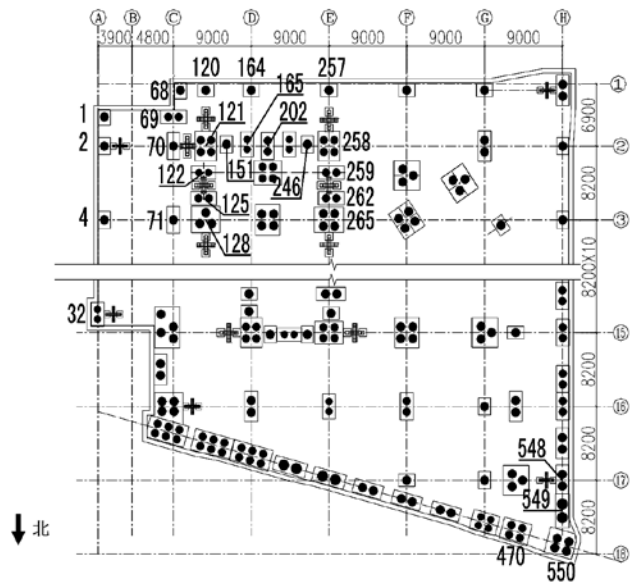


图13 隔震支座节点编号

由图14、图15、表2分析可知：

(1) 不考虑隔震支座的抗拉刚度 (即认为其失效) 时，在角部的橡胶隔震支座的拉伸变形达到了26mm，已超过橡胶隔震支座15%的拉伸应变，会造成隔震支座拉伸破坏。

(2) 考虑隔震支座抗拉刚度情况下，隔震支



表2 支座最大竖向变形及拉应力

节点编号	支座类型	考虑支座抗拉刚度		不考虑 支座抗拉 刚度
		拉伸变形 $\Delta k/mm$	拉应力 $\sigma/MPa$	拉伸变形 $\Delta/mm$
1	LRB1000	14.2	0.89	26.3
2	LRB1000	11.7	0.84	22.1
4	LRB1000	11.3	0.84	13.4
68	4*LNR900+	9.7	0.82	22.3
69	2*LRB900	9.4	0.82	19.1
70	LRB1000	9.1	0.80	17.8
71	LNR1000	1.7	0.84	8.3
120	2*LNR800	8.3	0.82	19.4
121	2*LNR900	7.7	0.78	16.6
122	LNR1000	7.6	0.76	14.7
125	2*LNR900	7.6	0.78	14.0
128	2*LNR900	7.5	0.78	12.0
151	LRB1000	7.0	0.74	13.1
164	4*LNR900	7.0	0.76	15.1
165	2*LNR900	4.6	0.67	9.0
246	LNR1000	4.9	0.66	6.5
257	LRB1000	2.8	0.53	8.3
258	2*LNR1000	6.6	0.72	9.0
259	LRB1000	6.0	0.70	9.9
262	3*LNR1000	5.9	0.70	10.0
265	2*LRB800	5.3	0.73	8.3
550	4*LRB1000	5.1	0.67	7.2

注：+4\*LNR900表示4个直径为900mm的橡胶隔震支座组合。

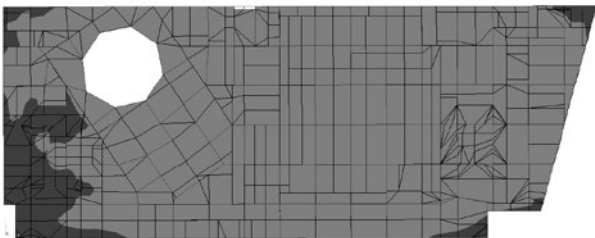


图14 考虑隔震支座抗拉刚度隔震层顶板竖向变形云图

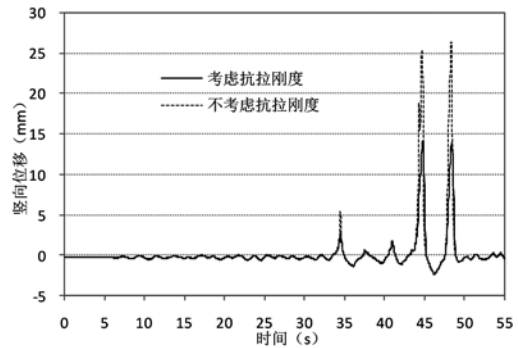


图15 角部支座最大竖向变形时程曲线

座受拉区域主要分布在①~③轴的混凝土筒、建筑角部和悬挑端所在位置的基底角部，其拉应力超过0.85MPa，竖向拉应变超过了7%的性能设计目标。

### 3.3.2 设置抗拉限位装置

在8度(0.2g)罕遇地震(汶川波)作用下，在隔震层设置抗拉限位装置且考虑隔震支座抗拉刚度，通过调整抗拉限位装置两个“门”形钢架之间的间隙值，优化抗拉限位装置起作用的程度，实现隔震支座和抗拉限位装置的性能设计目标。最大竖向拉伸变形及应力结果见表3、图16。

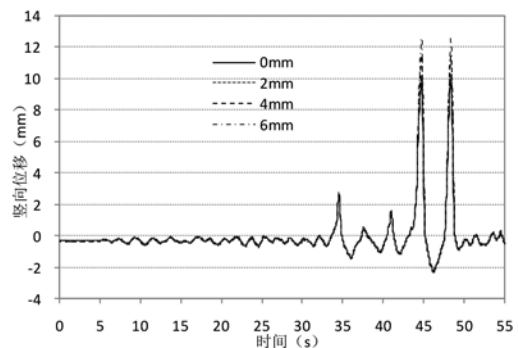


图16 角部隔震支座竖向变形时程曲线

抗拉限位装置缝隙值 $l$ 为0、2、4、6mm时承受的轴拉力结果见表4、间隙为4mm时抗拉限位装置竖向最大变形时程见图17。

由图16、图17、表3、表4分析可知：

(1) 橡胶隔震支座的竖向拉伸变形及拉应力随抗拉限位装置缝隙的减小而减小。在抗拉限位装置间隙为4mm时，即可满足橡胶隔震支座最大竖向拉伸应变小于7%，拉应力小于0.85MPa的，隔震层抗拉性能设计目标。

(2) 在设计烈度罕遇地震作用下，抗拉限

表3 抗拉限位装置支座最大竖向变形及拉应力

节点编号	支座类型	竖向变形 $\Delta t_d/\text{mm}$				拉应力 $\sigma_{td}/\text{MPa}$			
		$l=0\text{mm}$	$l=2\text{mm}$	$l=4\text{mm}$	$l=6\text{mm}$	$l=0\text{mm}$	$l=2\text{mm}$	$l=4\text{mm}$	$l=6\text{mm}$
1	LRB1000	10.1	10.3	11.7	12.6	0.81	0.82	0.84	0.86
2	LRB1000	7.3	7.5	8.7	9.7	0.75	0.76	0.79	0.81
68	LRB1000	8.3	8.4	9.4	10.3	0.78	0.78	0.80	0.82
69	2*LRB900	5.8	5.9	6.9	7.9	0.71	0.72	0.76	0.79
70	LRB1000	4.8	4.8	6.0	7.3	0.66	0.66	0.70	0.75
120	LRB1000	6.7	6.7	7.7	8.5	0.73	0.73	0.76	0.78
121	4*LNR900	6.9	6.8	7.8	8.7	0.76	0.75	0.79	0.80
122	2*LNR800	5.6	5.6	6.5	7.4	0.74	0.74	0.78	0.80
125	2*LNR900	5.0	5.1	6.0	6.8	0.68	0.68	0.72	0.75
151	LNR1000	5.8	5.8	6.4	7.0	0.69	0.69	0.72	0.74
164	LRB1000	4.6	4.7	5.4	6.0	0.65	0.65	0.68	0.70
258	4*LNR900	5.8	5.9	6.5	6.8	0.71	0.72	0.74	0.75
259	2*LNR900	5.8	5.9	6.5	7.2	0.71	0.72	0.74	0.77
262	2*LNR900	6.0	6.1	6.7	7.3	0.72	0.72	0.75	0.78
265	2*LNR1000	5.3	5.5	6.0	6.4	0.68	0.68	0.70	0.72
550	4*LRB1000	5.0	5.1	5.1	5.1	0.66	0.67	0.67	0.66

注:  $l$ 表示抗拉限位装置的间隙。

表4 抗拉限位装置承受拉力

抗拉装置编号	轴拉力 $N/\text{kN}$				抗拉承载力 $N_t/\text{kN}$
	$l=0\text{mm}$	$l=2\text{mm}$	$l=4\text{mm}$	$l=6\text{mm}$	
1	5925.6	4731.0	3899.5	2714.2	6500
2	7687.0	6192.9	4100.5	1945.5	6500
3	6511.1	5266.5	4398.2	3114.5	6500
4	306.2	0	0	0	2500
5	3238.9	2621.4	2281.2	1623.8	4500

注: 抗拉装置编号见图7示。

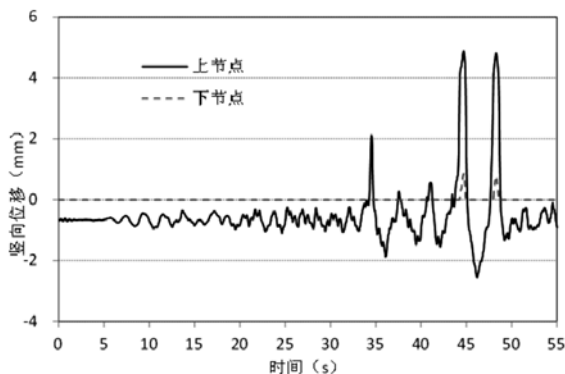


图17 抗拉限位装置竖向变形时程曲线

位装置设置缝隙为4mm, 各抗拉限位装置承受的最大拉力值小于抗拉承载力设计值, 处于弹性状态。抗拉限位装置4在设计烈度罕遇地震作用下未起作用, 为防止在超烈度地震作用下混凝土筒底部橡胶隔震支座出现拉应力, 仍在北侧混凝土筒周围设置了抗拉限位装置。

(3) 从抗拉限位装置竖向变形曲线可以看出, 在设计烈度罕遇地震作用下, 起到了一定的作用, 但并不明显, 这也符合抗拉限位装置应在超烈度罕遇地震作用下起主要作用的设计原则。

### 3.4 超设计烈度下隔震层抗拉性能

在超设计烈度一度(9度)罕遇地震(汶川波)作用下, 分别考虑橡胶隔震支座的抗拉刚度、无抗拉限位装置和有抗拉限位装置且其间隙值为4mm, 对橡胶隔震支座的竖向拉伸变形、应力及抗拉限位装置的受力状态进行分析, 计算结果见表5、图18。

超烈度地震作用下, 间隙值为4mm时抗拉限位装置竖向变形时程曲线结果见图17。

由图18、图19、表5分析可知:

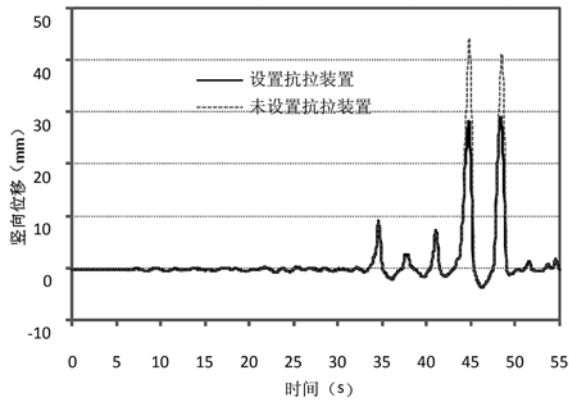


图18 角部隔震支座竖向变形时程曲线

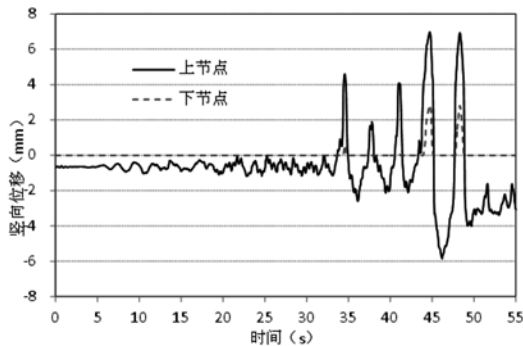


图19 抗拉限位装置竖向变形时程曲线

(1) 在超烈度罕遇地震作用下, 未设置抗拉限位装置, 隔震支座的最大拉伸变形为44.3mm, 拉伸应变达到22.4%, 拉应力达到1.27MPa, 隔震支座将严重损坏。

(2) 在超烈度罕遇地震作用下, 设置抗拉限位装置后最大竖向拉伸变形为29.1mm, 拉伸应变为14.7%, 最大拉应力为1.09MPa。局部橡胶隔震支座出现塑性, 但仍具有很高的继续拉伸承载能力, 可以保证橡胶隔震支座在超烈度罕遇地震作用下的安全。

(3) 在北侧核心筒下及北侧角部抗拉限位装置自身的变形在2~4mm。抗拉限位装置在超设计烈度情况下自身安全, 同时有效减小隔震支座的拉伸变形, 发挥了其应有的作用, 实现了隔震层抗拉安全性能化设计目标。

## 4 结论

结合成都博物馆工程实践, 针对隔震层隔震支座及抗拉限位装置得出如下结论和建议:

(1) 针对橡胶隔震支座, 在设计烈度8度(0.2g)罕遇地震作用下, 对于不规则基础隔

表5 支座最大竖向变形及拉应力

节点编号	支座类型	$\Delta t/\text{mm} / \Delta t, n/\text{mm}$	$\sigma t/\text{MPa} / \sigma t, n/\text{MPa}$
1	LRB1000	29.1 / 44.3	1.09 / 1.27
2	LRB1000	22.8 / 38.2	1.01 / 1.2
32	2*LRB800	12.4 / 13.6	0.91 / 0.94
68	LRB1000	25.3 / 36.9	1.04 / 1.18
69	2*LRB900	19.5 / 32.3	1 / 1.17
70	LRB1000	15.4 / 31	0.91 / 1.11
71	LNR1000	7.1 / 17.3	0.74 / 0.94
120	LRB1000	21.3 / 32.2	1 / 1.13
121	4*LNR900	16.2 / 27.3	0.95 / 1.1
122	2*LNR800	13.6 / 24.6	0.94 / 1.11
125	2*LNR900	13 / 23.7	0.89 / 1.05
128	3*LNR1000	12 / 21.4	0.85 / 1
151	LNR1000	14 / 21.8	0.89 / 1
164	LRB1000	16.7 / 25.4	0.93 / 1.05
165	2*LNR900	9.8 / 15.6	0.83 / 0.94
202	4*LNR900	6.2 / 10.9	0.73 / 0.85
246	LNR1000	10.3 / 11.5	0.82 / 0.84
257	LRB1000	8.9 / 14.7	0.79 / 0.9
258	4*LNR900	13.4 / 15.1	0.9 / 0.93
259	2*LNR900	13.2 / 16	0.89 / 0.95
262	2*LNR900	13.4 / 16.1	0.9 / 0.95
265	2*LNR1000	12.3 / 14.2	0.85 / 0.89
470	4*LRB900	10.6 / 10.6	0.84 / 0.84
548	2*LRB1000	12 / 12.9	0.85 / 0.86
549	2*LRB1200	16.8 / 17	0.88 / 0.89
550	4*LRB1000	20.7 / 20.4	0.99 / 0.98

注:  $\Delta t$ 和 $\Delta t, n$ 分别为设置及未设置抗拉限位装置的隔震支座的最大竖向变形;  $\sigma t$ 和 $\sigma t, n$ 分别为设置及未设置抗拉限位装置的隔震支座的最大拉应力。

震结构, 允许局部橡胶隔震支座出现拉应力, 隔震支座应处于抗拉弹性工作状态, 即在大剪切变形状态下, 拉伸应变不大于7%, 拉应力不超过0.85MPa; 在超烈度9度(0.4g)罕遇地震作用下, 隔震支座的拉伸变形可控即拉应变不大于

15%，支座可以进入非线性，但应具有足够变形能力，拉应力不超过1.1MPa。

(2) 针对拉应力区域的抗拉限位装置，依据橡胶隔震支座的性能设计目标，优化确定抗拉限位装置的间隙值；且抗拉限位装置在设计烈度罕遇地震作用下，应处于弹性工作状态，在超设计烈度（一度）罕遇地震作用下，可以局部出现轻微损坏阶段，但整体处于不屈服工作状态。

(3) 由于橡胶隔震支座抗拉性能受材质、支座工艺、试验设计资料不足等因素制约，建议工程应选取典型隔震支座进行试验确定抗拉性能设计指标。

### 参考文献

- [1] 颜学渊, 张永山, 王焕定. 三类三维隔震抗倾覆支座力学性能试验研究[J]. 振动与冲击. 2009,28(10): 49-53. (YAN Xueyuan, ZHANG Yongshan, WANG Huanding. Experimental study on mechanical properties of three kind three-dimensional base isolation and overturn resistance devices[J]. Journal of Vibration and Shock. 2009,28(10): 49-53. (In Chinese) )
- [2] 日本建筑学会. 隔震结构设计[M]. 刘文光译. 北京: 地震出版社, 2006: 217-218. (Architectural institute of Japan. Recommendation for the Design of Base Isolated Buildings[M]. LIU Wenguang. Beijing: Seismological Press, 2006: 217-218. (In Chinese) )
- [3] 苏键, 温留汉, 黑沙, 周福霖. 新型叠层橡胶隔震支座抗拉机构研究[J]. 工业建筑. 2010, 40(12): 43-47. (SU Jian, WENLIUHAN. Heisha, ZHOU Fulin. Study on an innovation tensile-resistant device for laminated rubber bearing[J]. Industrial Construction. 2010, 40(12): 43-47.) (In Chinese)
- [4] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 一种不规则结构体系中隔震层的抗拉控制方法[P]. 中国: 201410043112.5, 2015.9.23. (China Aviation Planning and Design Institute Co., Ltd. One tensile control method of isolation layer in a irregular base isolation structure[P]. China: 201410043112.5, 2015.9.23. (In Chinese) )
- [5] 葛家琪, 王毅, 张玲, 等. 地铁所致成都博物馆振动全过程性能化研究[J]. 建筑结构学报. 2015,36(2): 27-34. (GE Jiaqi, WANG Yi, ZHANG Ling, et. al. Performance-based study on whole process of metro induced vibration of the Chengdu Museum[J]. Journal of Building Structures. 2015, 36(2): 27-34.) (In Chinese)
- [6] GUAN Zhizhong, GE Jiaqi, MA Botao, et. al. Performance -based design and table test study on hybrid structure combined with outside steel grid and inner reinforced concrete tube. Applied Mechanics and Materials[J]. 2014(579): 106-110.

# 成都博物馆基础隔震不规则结构扭转效应控制研究

■ 刘鑫刚 张玲 马伯涛 管志忠 王明珠 葛家琪 「结构」

**摘要:** 针对成都博物馆不规则基础隔震结构,分别建立隔震模型及降半度固接模型,在多遇地震作用下,对结构体系的基本振型扭平分量比、扭转位移比、扭转加速度比、扭转剪力比以及结构构件扭矩比进行了对比分析。研究表明,基础隔震措施有效地控制了不规则结构的扭转效应,研究进一步对基础隔震不规则结构设计时的扭转效应控制指标提出了具体建议:采用前三阶周期的扭平分量比小于0.15、扭转位移比小于1.2、扭转加速度比小于0.2及扭转剪力比小于0.2为控制指标来控制结构的扭转效应。当上述四个指标其中一项不满足时,应复核验算构件的扭转效应组合应力;当两项或两项以上不满足时,应对结构方案及隔震支座进行一定调整以满足隔震后体系的扭转规则性。

**关键词:** 基础隔震;不规则结构;时程分析;扭转效应;扭转剪力比

## 0 引言

不规则结构的质量中心与刚度中心不重合,在地震作用下会产生与平动效应耦联的扭转效应,加速结构破坏。因此,在建筑结构抗震设计中,扭转效应控制是十分必要的。目前各国规范采用的扭转控制指标不尽相同,主要有扭转位移比(层端部最大位移/层平均位移)和相对偏心距<sup>[1]</sup>。而我国《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[2]</sup>JGJ 3-2010(简称《高规》)还对扭转周期比(即结构扭转为主的第1自振周期和平动为主的第1自振周期之比)进行控制。目前国内外对不规则结构扭转效应控制指标的研究较多<sup>[3-5]</sup>,对隔震结构扭转效应的研究主要集中在控制结构隔震层偏心和扭平周转比上,但对于工程设计没有给出相应的

控制指标<sup>[6-8]</sup>。本文作者结合成都博物馆基础隔震结构进行分析,研究基础隔震措施对结构不规则扭转效应的影响,并为工程设计提出相应的控制指标。

## 1 概念设计

由于建筑造型复杂、功能多样、地铁下穿等因素,成都博物馆成为集多塔、连体、多层悬挑、空间外网格于一体的特别不规则结构体系,主要结构参数见文献<sup>[9-10]</sup>,建筑效果及结构模型见图1、2。为充分降低特别不规则结构扭转效应,结合成都博物馆基础隔震工程,提出了多指标控制的基础隔震不规则结构扭转控制设计方法。

隔震层的选型与布置首先要满足竖向性能和水平性能两方面的要求。隔震层竖向性能选型主要考虑承担上部结构的竖向荷载,可按下式进行计算:

作者简介:刘鑫刚,男,工程师,2011年毕业于中国航空规划建设发展有限公司,现就职于中航规划技术院。

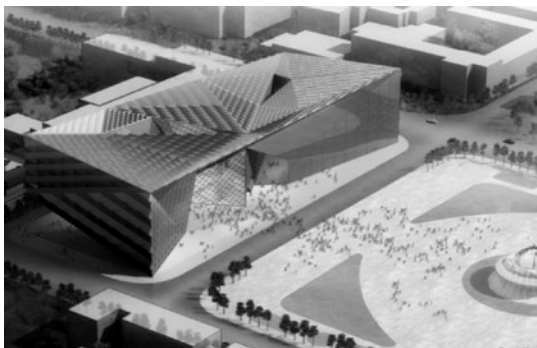


图1 建筑效果图

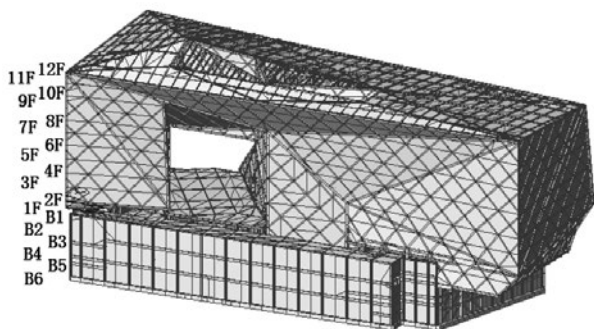


图2 结构模型

$$\sigma_i = N_{gi} / A_i \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中， $N_{gi}$ 为重力荷载代表值作用下的第*i*个支座竖向压力， $\sigma_i$ 为第*i*个支座竖向压应力， $[\sigma]$ 为支座竖向压应力限值， $A_i$ 为理论计算的第*i*个支座截面有效面积。

隔震层水平性能选型应根据预期的水平减震系数和隔震层允许水平位移这两个性能指标来进行，而以上性能主要取决于隔震层水平刚度 $K_{eq}$ ：

$$K_{eq} = \sum K_{eqi} \quad (2)$$

$$K_{eqi} = GA_i / ntR \quad (3)$$

式中， $K_{eqi}$ 为隔震支座*i*的水平刚度， $G$ 为橡胶剪切模量， $A_i$ 为隔震支座*i*的有效面积， $n$ 为隔震支座橡胶层数， $tR$ 为每层橡胶厚度。

由式(4)可以看出，隔震支座水平刚度与隔震支座的有效面积 $A_i$ 成正比，而不是与截面惯性矩成正比，这是叠层橡胶隔震支座与传统结构完全不同的特征，该特征决定了隔震层水平刚度中心与隔震支座总面积中心相同；另一方面，式(1)表明隔震支座有效面积与隔震支座承受的总重力荷载代表值为线性关系。因此，理论上隔震层的水平刚度中心与整体结构重心基本一致。

成都博物馆上部结构的总水平刚度与隔震层总水平刚度的比值：X向为155、Y向为84，而

上部结构总水平刚度与隔震层水平刚度为串联关系，因此隔震层加上部结构体系的整体水平刚度基本等于隔震层的水平刚度。该特征决定了总质量中心与上部结构水平刚度中心严重偏心的特别不规则结构，其隔震结构体系的整体水平刚度中心基本与隔震层的水平刚度中心一致。

结构质量中心与水平刚度中心不重合是不规则结构产生扭转效应的根源，隔震层的上述两个特征，决定了隔震层可以有效控制不规则结构、特别不规则结构的地震扭转效应。

## 2 扭转效应分析

### 2.1 隔震层选型设计

由于产品型号种类限制，实际工程不可能完全按照理论计算面积选择隔震支座；另外，由于同一隔震层的水平变形能力基本由小直径规格的隔震支座确定，支座型号相差过大可能会造成大直径规格支座水平变形能力得不到充分发挥，或小直径支座变形能力不满足要求，实际工程会依据变形能力要求调整隔震支座型号。由表1可见，铅芯橡胶支座一方面为隔震支座提供较大阻尼，另一方面其水平刚度约为普通支座的1.5倍。以上因素会造成实际隔震工程中隔震层质量中心与刚度中心不重合。

隔震层偏心率是不规则隔震结构安全控制的一个重要指标，隔震层的偏心率一般不得大于3%。工程设计时，依据结构重力作用及支座实际可选规格确定隔震支座面积后，对橡胶支座加铅芯橡胶支座组合隔震模型、非隔震模型，计算结构隔震层刚度中心（非隔震模型取结构底层刚度中心）、上部结构质量中心。在偏心率过大时，通过铅芯橡胶支座的选择及布置调整优化隔震层的刚度中心。工程设计方案即为通过铅芯橡胶支座优化调整后的方案见图3（粗线框内为铅芯橡胶支座），结构偏心距及偏心率计算结果见表2。

选定隔震层后，采用结构分析软件Midas建立成都博物馆杆系模型，针对隔震模型与降半度非隔震模型，进行振型分解法、动力时程分析法地震作用分析，从结构体系基本振型扭平分量比、扭转位移比及扭转加速度，以及构件扭矩及扭转剪力比方面进行了对比分析，研究基础隔震对不规则结构地震作用扭转效应的控制效果。

### 2.2 结构扭平分量比

表1 橡胶隔震支座水平性能参数

型号	橡胶厚度/mm	支座高度/mm	第一形状系数	第二形状系数	水平等效刚度/kN/mm	等效阻尼比/%
LNR700	140	309	40.0	5.0	1.39	4.7
LRB800	156	303.5	28.1	5.1	2.09	17.9
LNR800	156	303.5	30.8	5.1	1.45	4.8
LRB900	180	341.5	31.4	5.0	2.35	19.0
LNR900	179.8	344.8	36.2	5.0	1.59	4.8
LRB1000	198	380	33.6	5.1	3.14	22.8
LNR1000	196	385	41.1	5.1	2.16	4.9
LRB1200	238	427	36.8	5.0	3.16	23.3

注：表中LNR表示普通橡胶隔震支座，LRB表示铅芯橡胶隔震支座。

表2 隔震后刚度中心与上部结构质量中心偏心距

模型	刚度中心坐标		结构质心坐标		偏心距离		偏心率	
	IX/m	IY/m	Xc/m	Yc/m	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	X向	Y向
非隔震模型	64.80	42.76	72.96	30.55	8.16	-12.21	12.6%	28.6%
普通+铅芯支座隔震	74.88	31.25	72.96	30.55	-1.92	-0.70	2.56%	2.24%
工程设计方案	74.28	30.29	72.96	30.55	-1.32	0.26	1.78%	0.86%

非隔震结构与隔震结构前3阶模态见表3。隔震结构的前3阶周期分别为2.701s、2.568s、2.562s，是非隔震结构第1周期的2倍以上，水平地震影响系数减小了约43%，隔震层使整个体系的自振周期远离场地及地震动的卓越周期0.45s，

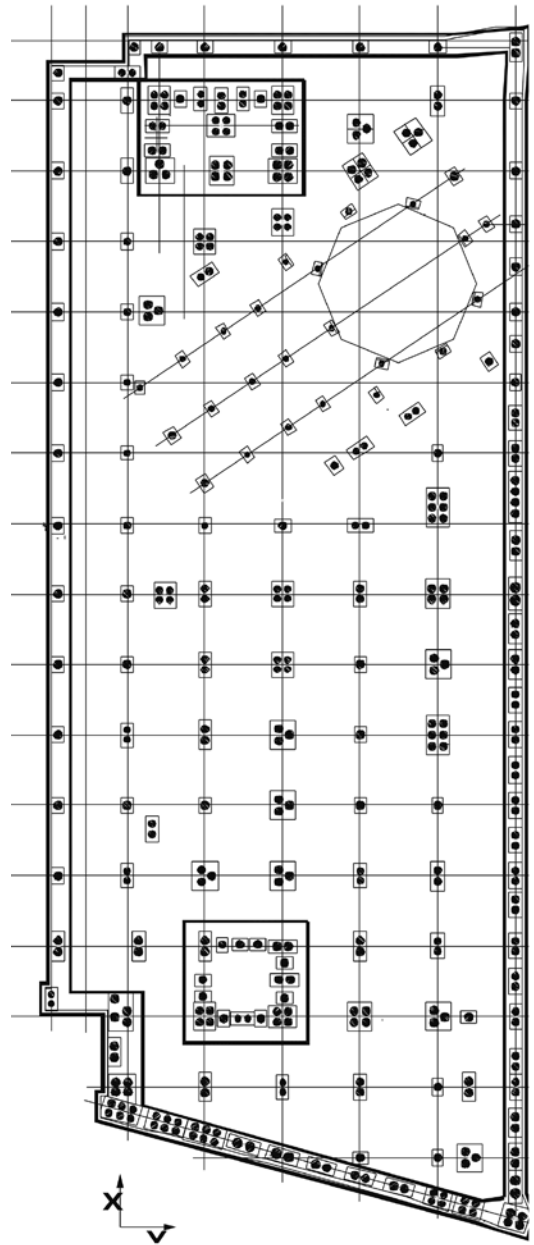


图3 橡胶支座布置图

有效减小上部结构总地震作用及扭转效应峰值。非隔震结构第1阶振型以地上结构Y向平动为主，第2、3阶振型为平动-扭转耦联振动，第1扭转周期与第1平动周期的比值为 $0.862/1.269=0.679$ ，前3阶绕Z轴的扭转分量分别为4.21%、32.42%、57.67%，第3阶振型扭转更为显著；非隔震时X向及Y向振型参与质量到第44阶时达到90%。非隔震不规则结构的振动受到高阶振型的影响显著，且不管是低阶还是高阶振型均含有一定比例的扭转成分。而隔震结构的前两阶振型分别为Y、X向平动，其中平动分量比分别为98.94%、99.71%，第

表3 非隔震与隔震结构前3阶模态

模态编号		周期/s	振型参与质量/%-主方向	平动分量 (X+Y+Z) /%	扭转分量 (RX+RY+RZ) /%
非隔震	1	1.269	53.85(Y)	64.21	35.79
	2	0.862	31.58(X)	49.18	50.82
	3	0.746	37.70(RZ)	32.92	67.08
隔震	1	2.701	98.34(Y)	98.94	1.16
	2	2.568	99.71(X)	99.92	0.08
	3	2.562	99.64(RZ)	0.01	99.99

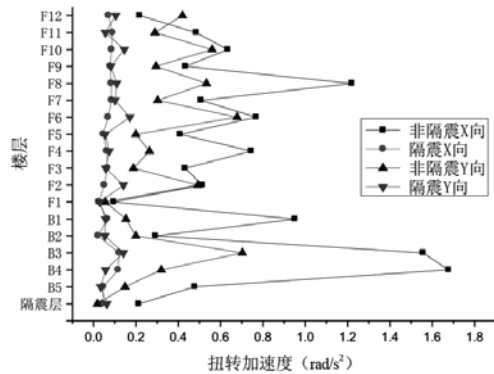
3阶振型为绕Z轴扭转振型，扭转分量比99.99%，第1扭转周期与第1平动周期比值为0.95，隔震结构第5阶以后X向及Y向振型参与质量均可达到99.95%。

隔震层使不规则结构的振动形态发生了本质变化，由于隔震层的水平刚度和上部结构相比很小且隔震层的抗扭转刚度很小，结构振动由频域很广的复杂扭转振型改变为以低阶平动振型为主，同时还导致结构体系的平动周期与扭转周期很接近，结构扭转周期比参数控制对于隔震结构意义不大。

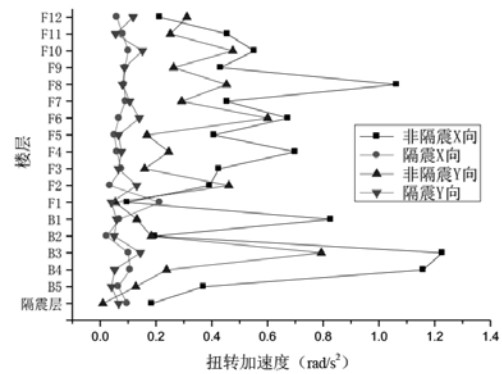
### 2.3 结构扭转加速度

博物馆展柜、馆藏文物及宿舍相互之间处于浮置关系，馆藏文物防震安全基本与地震作用下宿舍结构力学效应无关，只对加速度敏感，因此，控制地震作用下结构加速度对于馆藏文物防震安全具有重要意义。在某一方向水平地震作用下，当结构刚度中心与质量中心不重合时，结构除了在该方向产生水平加速度，还将在水平面上该方向的垂直方向产生一定加速度，将该层质心加速度分量定义为结构扭转加速度。尽管所有质点（构件）的扭转加速度分量总和为零，但不规则结构扭转效应造成局部质点（构件）加速度量值增加。为保证馆藏文物防震安全，分别对El Centro波、Taft波及人工波输入8度多遇地震作用（加速度峰值 $70\text{cm/s}^2$ ）结构楼层扭转加速度进行计算分析，层扭转加速度最大值沿楼层分布如图4所示。

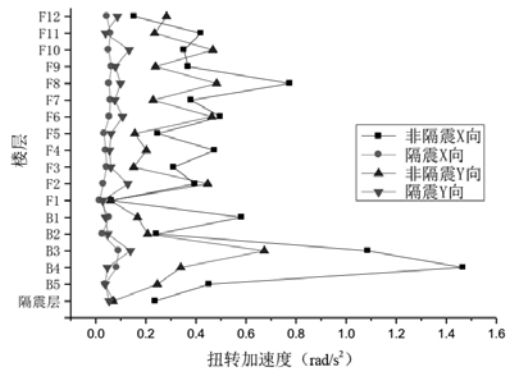
分析可知：非隔震结构楼层扭转加速度分布很不均匀，大悬挑转换桁架所在B3、B4层（楼层编号见图2），外钢网格与地下相接的转换楼层（B1）、楼板大开洞楼层（F4、F6）及竖向构件不连续的连体楼层（F8、F10），扭转加速度均出现突变，相邻楼层的刚度突变是放大楼层扭转



(a) El Centro波作用



(b) Taft波作用



(c) 人工波作用

图4 楼层扭转加速度最大值



加速度效应的主要因素。隔震后楼层扭转加速度明显降低,与非隔震模型相比较,隔震后X向扭转加速度最大降低93.1%,扭转加速度平均降低89.5%,Y向扭转加速度最大降低81.9%,扭转加速度平均降低70.7%;另一方面,隔震后扭转加速度值沿竖向楼层的分布趋于平均,基础隔震措施有效控制了上部结构楼层的扭转加速度。

## 2.4 结构扭转位移比

采用时程分析法计算非隔震模型与隔震模型结构体系的扭转位移比,主要楼层时程分析最大扭转位移比如图5所示。

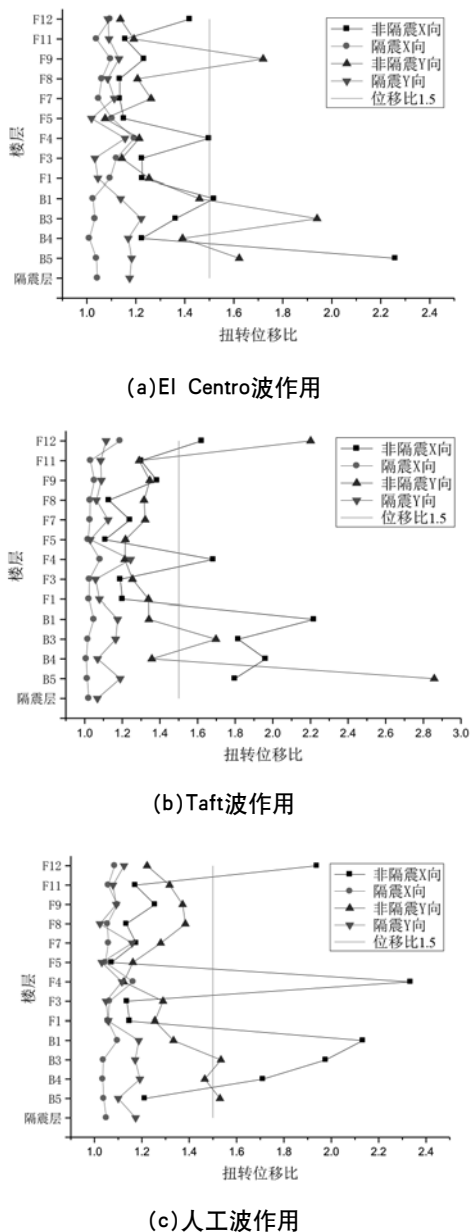


图5 隔震结构与非隔震结构扭转位移比对照

3条地震波输入下,非隔震结构X向及Y向各层扭转位移比基本都在1.2以上,主要楼层的扭转位移比相差很大,尤其当相邻楼层的刚度相差较大时地震作用下结构的扭转响应明显放大,如结构体系转换的楼层(如B1-F1层)达到2.1、立面大开洞的起始楼层(如F4)达到2.3、结构顶层(F12)达到2.2等,非隔震时主体结构扭转效应严重;采用隔震措施后无论X向还是Y向,主体结构各层的扭转位移比均未超过1.2,其中B1层降低为1.1,F4层降低为1.1,F2层降低为1.05,特别不规则结构在采取隔震技术后,其扭转位移效应得到了有效控制。

## 2.5 结构扭转剪力比

构件受到扭矩作用时,杆件横截面分布着由于扭转变形产生的剪应力,离杆件刚度中心越远,扭矩产生的剪应力越大。结构体系质量中心与刚度中心不重合、上下层质心或刚心因错动而产生扭转效应时,结构竖向构件除产生局部扭矩外,还将同时产生扭转剪力,离结构刚度中心越远的竖向构件产生的扭转剪力越大。与扭转加速度效应同理,在地震作用方向上的剪力效应包括垂直于地震作用方向的扭转剪力。将单向地震作用下,垂直于地震输入方向的构件扭转剪力分量之和与地震输入方向构件剪力之和的比值定义为结构扭转剪力比。

取典型的El Centro波及人工波分析(加速度峰值 $70\text{cm/s}^2$ ),地震输入下隔震模型计算结果见图6,分析可知:结构扭转剪力比均在刚度突变的楼层或相邻楼层产生突变,结构设计中应对刚度突变楼层及相邻楼层抗侧力构件的抗剪能力予以加强。X向地震作用下,结构扭转剪力比由非隔震时0.92降低至隔震时0.16;外网格与地下室剪力墙在转换层B1的上层F1层,立面大开洞起始F4至F6的中间层F5层由非隔震时0.65降低至隔震时0.14。且隔震后,结构扭转剪力趋于均匀,采用基础隔震后,结构的扭转剪力得到了有效控制。

## 2.6 构件扭矩效应

为研究隔震层对不规则结构在地震作用下扭转效应的控制效果,分别对隔震结构、降半度非隔震结构以及非隔震结构关键部位构件扭矩进行了统计分析。不管是隔震还是非隔震结构,当相邻楼层刚度相差较大时,相邻楼层的相对扭转变形较大,其中,B1层处于地下室剪力墙与上部结构的体系转换处,同时结构从F1层开始立面上存

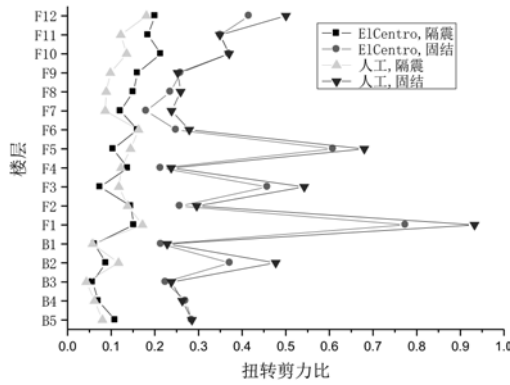


图6 X向地震楼层扭转剪力比

在大开洞,使得B1层与相邻的B2、F1层刚度相差最大,结构构件的扭矩最大值出现在B1层。以响应最明显的Taft波沿结构X向地震作用下,选取B4层、B1层、及F6层结构柱扭矩值较大的构件,所在位置见图7。

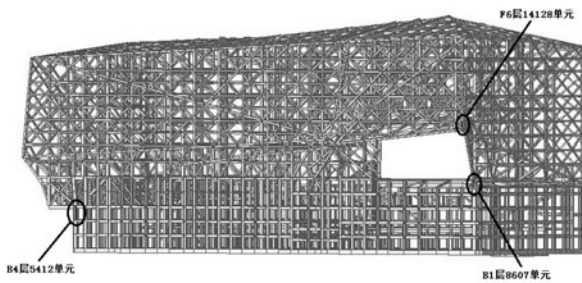


图7 B4、B1、F6层扭矩最大构件位置

分析得出的扭矩值如表4所示。结果表明,按照降低半度考虑隔震效率的固结模型的构件扭矩可以完全包络隔震模型的构件扭矩值,隔震模型的构件扭矩低于按照降低半度输入下的固结模型的构件相应值,两者比值约为0.6~0.8;表明上部结构按照降低半度设计,从结构构件扭转效应的角度来讲是安全的,同时也表明,地震作用下按照降低半度输入的固结模型并不能真实反应隔

表4 构件扭矩值及应力水平

关键部位	层号	单元号	扭矩值(kN*m)		$M_1/M_2$
			隔震 $M_1$	非隔震(降半度) $M_2$	
大悬挑根部	B4	5412	271.6	406.8	0.67
外网格转换层	B1	8607	801.0	1379.9	0.58
连体桁架根部	F6	14128	332.1	406.9	0.82

震措施对特别不规则扭转效应的高效率控制,工程设计时可依据隔震分析结果进行适当优化。

### 3 结论

以成都博物馆工程为例,探讨了基础隔震技术对于特别不规则体系扭转效应控制效果,得出如下结论:

(1) 隔震支座的合理布置可以使不规则结构体系的刚度中心接近于质量中心,整体结构动力特性趋于规则。采取隔震措施可使特别不规则结构的扭转位移比、扭转加速度比、扭转剪力比均大幅度降低,降幅超过70%。我国现行规范,按照考虑隔震效率后的固结模型进行隔震结构的设计方法,隔震体系对于上部结构扭转效应的控制作用体现不充分,实际工程可根据实际情况适当进行优化设计。

(2) 对于基础隔震不规则结构,建议采用前三阶周期的扭平分量比小于0.15、扭转位移比小于1.2、扭转加速度比小于0.2及扭转剪力比小于0.2为控制指标来控制结构的扭转效应,鉴于隔震结构隔震层的水平刚度和上部结构相比很小,可以放宽对于隔震后结构扭转周期比的要求。当上述四个指标其中一项不满足时,应复核算构件的扭转效应组合应力,尤其是楼板角部构件、楼板洞口边缘构件及竖向刚度突变处的竖向构件;当两项或两项以上不满足时,应对结构方案及隔震支座进行一定调整以满足隔震后体系的扭转规则性。

### 参考文献

[1] 韩军,李英民.抗震结构扭转控制及设计方法的国内外规范对比分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(1):25-32.  
(Han Jun, Li Yingmin. A comparison and analysis of terms

on torsional control and seismic design from different codes[J]. Journal of Xi'an University of Architecture Technology: Natural Science, 2008, 40(1): 25-32. (in Chinese))

(以下从略)

# 对“成都市发展走廊控制规划” 规划实践的批判性认识

■ 孙佳历 「规划」

**摘要:** 在跳出原有规划思路,探索成都终极发展模式的背景下,成都市编制了“成都市发展走廊控制规划”。本文以该规划为基础,通过对规划内容、走廊发展形式、多中心布局结构、各走廊用地控制及编制要点的回顾,从转变圈层扩散模式、整合周边城镇一体化发展、建设超前基础设施、区域协调和治理模式及对下层次规划编制几个方面及进行了批判性的分析和认识,并提出了规划建议。

**关键词:** 成都市;发展走廊;控制规划

## 1 规划背景

2005年,成都市按照“三规统一”的要求,编制完成了新一轮“城市总体规划”,“土地利用总体规划”和“产业布局规划”。这三项规划都是根据人口和土地行政区自我平衡的基本原则而编制的,存在一定的局限性,并不能适应人口、资本、产业跨区域流动,加速向优势区域聚集的发展趋势。同时城市规划始终滞后于经济社会发展需求,始终处于“面多了加水、水多了加面”的被动局面没有改变,不能有效引导和调控城市与区域地持续、健康发展。

基于以上背景,成都市希望打破原有规划思路,由此成都市发展走廊控制规划应运而生,并于2006年开始编制,同成都市市域城乡体系规划、成都市中心城城市形态分区控制规划,三项战略规划研究共同构成成都市城乡空间发展战略规划研究内容。与原来的规划类型相比较,这些规划在空间尺度和规划内容上全面超越了原城市总体规划、土地利用规划和产业布局规划,规划控制的范围更大,规划时限更长,更强调“合理规划,合法用地”的规划原则。这些规划研究大

多是远景战略层面的规划,不是法定规划,主要用于指导编制和完善下一层次的系列法定规划。

## 2 规划编制内容

### 2.1 走廊式发展形态

随着城市化的快速推进,当前正处于城市发展形态的重要抉择时期,如不加控制任其自然发展,将来成都的城市形态将可能兼具“圈层式”和“分散式”的所有缺点。而规划选择的“走廊式城市形态,紧凑型发展模式”,既能体现集中、集约的发展理念,又可确保城市的生态环境,符合成都城市发展实际,符合人均资源高度紧张的客观条件,将兼具“走廊式”和“组团式”形态的优点,促进资源节约、环境友好的城市可持续发展。成都市发展走廊空间布局图见图1。

### 2.2 走廊式用地控制

通过走廊规划,将全市域划定为适宜建设区(2500km<sup>2</sup>,约占总面积20%)、限制建设区(约占55%)和禁止建设区(约占25%)三类进行宏观控制。规划6条发展走廊和中心城集中了全市“适建区”80%以上的用地。

为确保各走廊持续健康发展,必须对支撑各走廊发展的“4环33放射”基础设施用地和重要中心区域用地进行控制预留。每条走廊包括:3~6

作者简介:孙佳历,男,高级工程师,2004年毕业于西南科技大学城市规划专业,现就职于中航规划综合规划院。



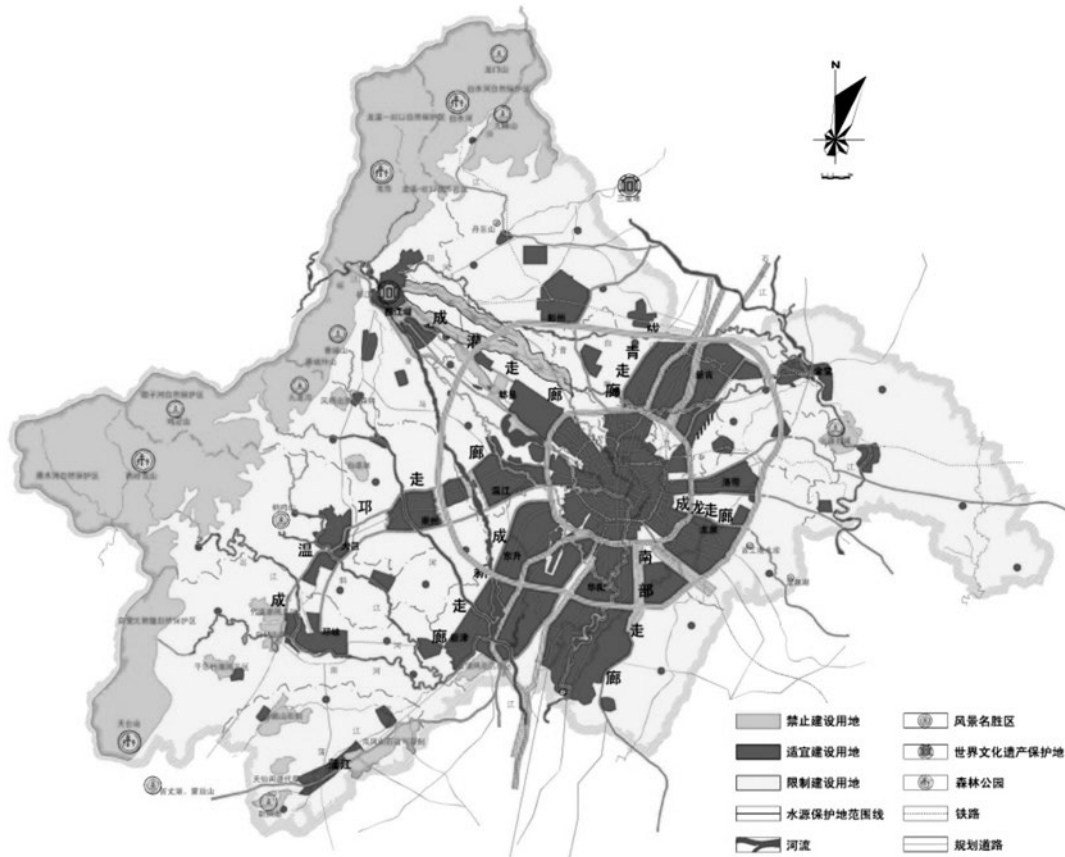


图2 成都市发展走廊用地分类控制图

表1 各走廊规划编制要点表

走廊名称	控制范围	走廊控制规模	走廊定位
南部走廊	自四环路至黄龙溪，用地边界西至成昆铁路、东至规划成渝城际铁路和规划成仁快速路。	总用地规模约400km <sup>2</sup> ，走廊长度30km，平均宽度15km。	规划形成一湖七区“南部新城”，功能以高新技术，现代制造，精密机械制造，现代商务软件、创意，文化旅游等产业为主，并且在正兴以南形成副中心。
成温邛走廊	自四环路至邛崃南河，用地边界西北至成温邛高速公路、东南至规划快速路。	总用地面积约170km <sup>2</sup> ，走廊长度62km，平均宽度6.7km。	规划形成“一湖四区三城”，功能以商贸居住、旅游休闲为主，在羊马、金马之间利用金马河和羊马湿地形成“西湖”。
成灌走廊	自四环路至都江堰，用地边界西南至清水河、东北至规划主干路。	总用地面积约140km <sup>2</sup> ，走廊长度43km，平均宽度8km。	规划形成“三区一城”，功能以旅游休闲、商贸居住、电子与食品工业为主。
成龙走廊	自四环路至龙泉山，用地边界北至成南高速路、南至成渝城际铁路。	总用地面积约120km <sup>2</sup> ，走廊长度12km，西河—黄土—洛带方向走廊平均宽度5km，龙泉方向走廊平均宽度10km。	规划形成四个功能区格局，以机械、汽车等现代制造业，商贸流通产业，文化休闲产业为主，在龙泉形成副中心，在成南高速和成洛路之间形成“绿心”。
成青走廊	自四环路至青白江，用地边界西至人民北路北延线、东至成达铁路。	总用地面积约330km <sup>2</sup> ，走廊长度18km，平均宽度20km。	规划形成三个功能区，以发展冶金建材、商贸物流为主，在青白江、新都交界处形成副中心。
成新走廊	自四环路至新津，用地边界西至规划快速路、东至成昆铁路。	总用地面积约230km <sup>2</sup> ，走廊长度33km，平均宽度10km。	规划形成“一港四区”，功能以现代制造业、物流商贸、旅游休闲为主。

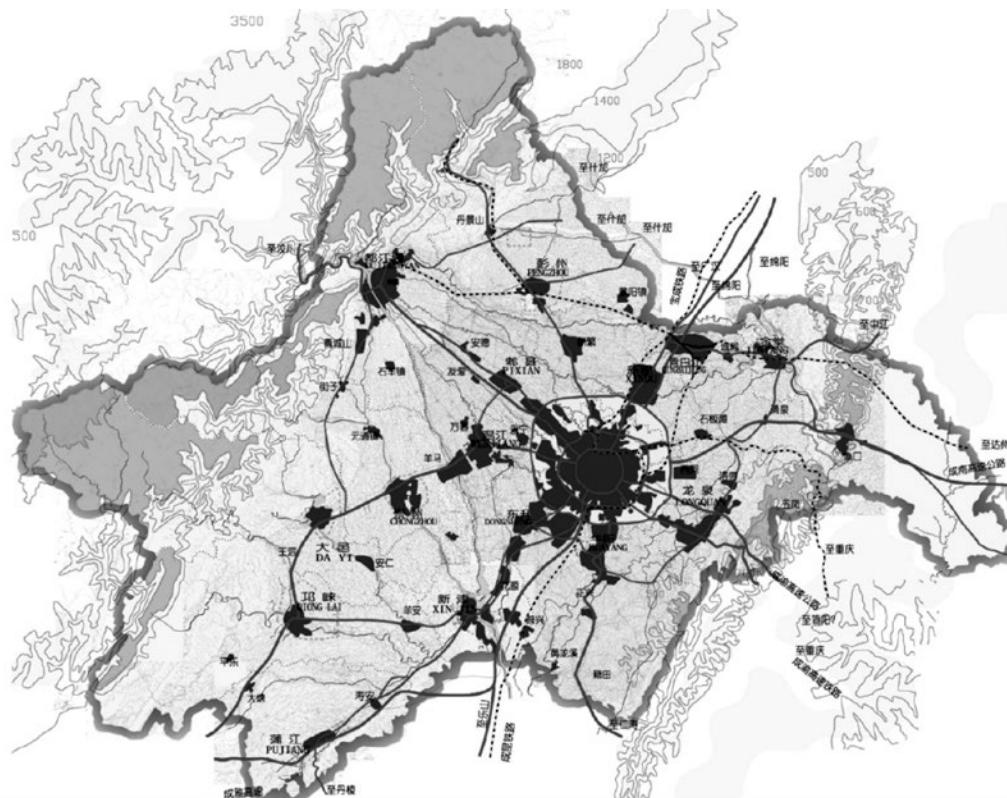


图3 成都市市域建设现状图（2006年）

### 3.3 规划力图配置超前基础设施系统

#### 3.3.1 完善的基础设施体系

在无地形约束的平原地区，走廊式的城市不会自然而然的产生，必然是由于某种外力的影响而产生的。如果人为地引导城市形成走廊，必然需要采取一定的措施，而最有效的方法就是通过基础设施的配置来引导走廊的形成。通过超前建设的高等级道路，配置强有力的市政基础设施，来引导人口向走廊聚集而形成城市连绵区。成都市发展走廊支撑系统规划图见图5。

单从道路系统规划来说，对于每条发展走廊需配置1条以上的高速路，2或3条快速通道，至少1条轨道交通线路以及主干路若干，这样巨大的建设工程资金投入是浩大的，这对于经济实力不强的成都市来说，困难重重，规划远远脱离了实际的可能。成都市发展走廊市政基础设施规划图见图6。

市政基础设施也要求区域统筹，包括给排水、电力电信等，统筹的优势在于区域联动，提高效率减少污染，但劣势也是相当明显的，首先是建设投入过于巨大，再是政治体制致使城镇间统筹的难度加大。

#### 3.3.2 公交导向的发展模式（TOD模式）

走廊式发展使城市建设区呈带状分布，与公

共交通运营的线形特点相吻合。走廊的长度使公共交通的服务距离和服务范围达到最大化，而走廊宽度使每条公交线路最大化的覆盖建设区，使公交服务效率最大化。而公共交通沿走廊布线，加强了走廊用地与中心城的联系，使大量人口能往来走廊与中心城之间，使走廊上聚集更多的人口，从而促进走廊的形成。

同时为满足不同距离的走廊发展，需要建设大中型运量的轨道交通线路，并对线路、站点设置和站点间距做全面考虑，这些也需要大量的资金投入。

#### 3.4 规划缺少区域协同与治理

要保持走廊形态，一方面需要强大的基础设施建设来支撑和引导。另一方面需要强有力的行政控制来限制走廊向外蚕食绿地，从而保持走廊格局。

规划中缺失了对区域协调和治理的研究，首先没有针对走廊控制规划提出实质性的发展设想或给出行政、政策方面的优惠政策；其次是没有加强次区域层面的跨境合作，没有借助积极的区域协作和治理途径，整合区域的人力、物力、信息等资源来推动地区转型，实现区域面貌的改善和竞争力的提升；再次是没有加强城市内部自愿合作，这些自愿发起的正式或非正式、问题导向型的内部合作，将会极大程度上推进一定区域内

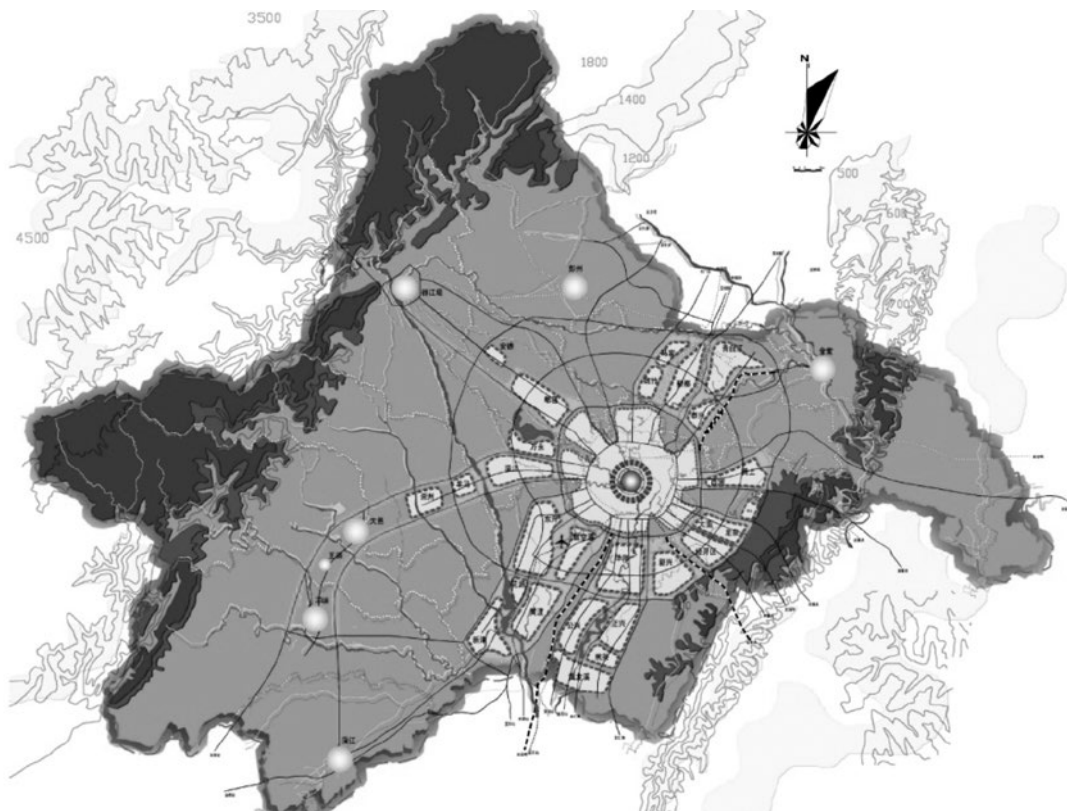


图4 成都市发展走廊规划结构图

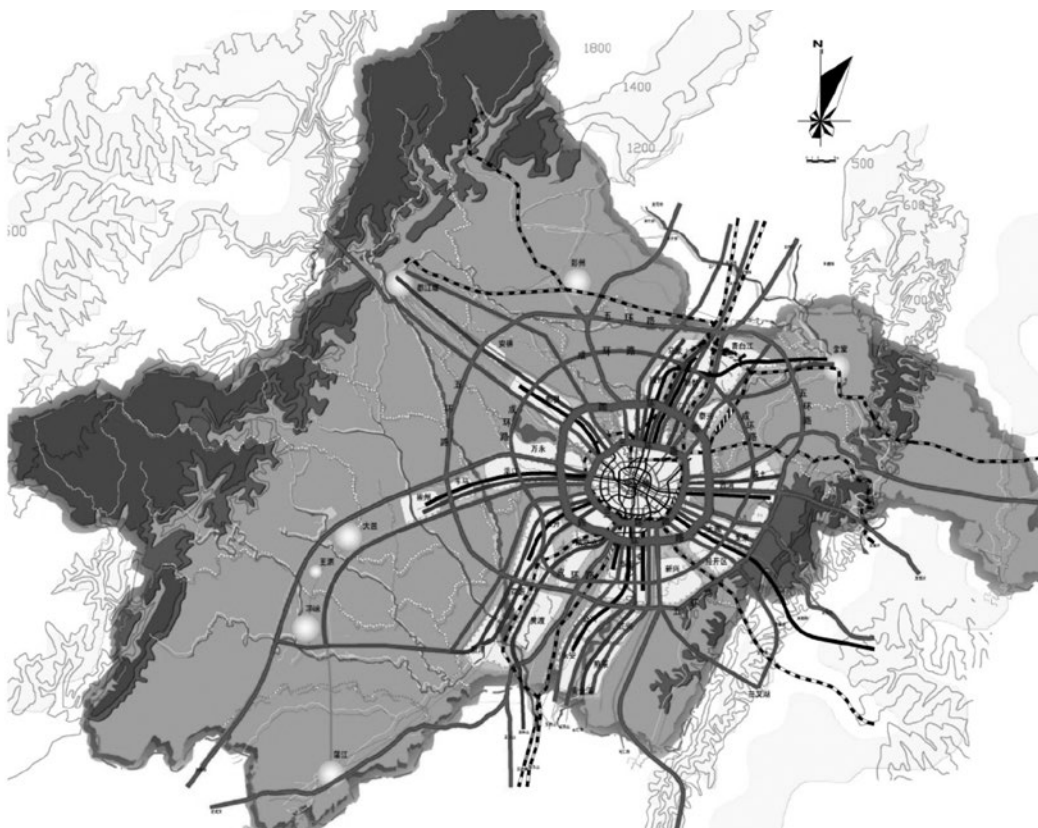


图5 成都市发展走廊支撑系统规划图

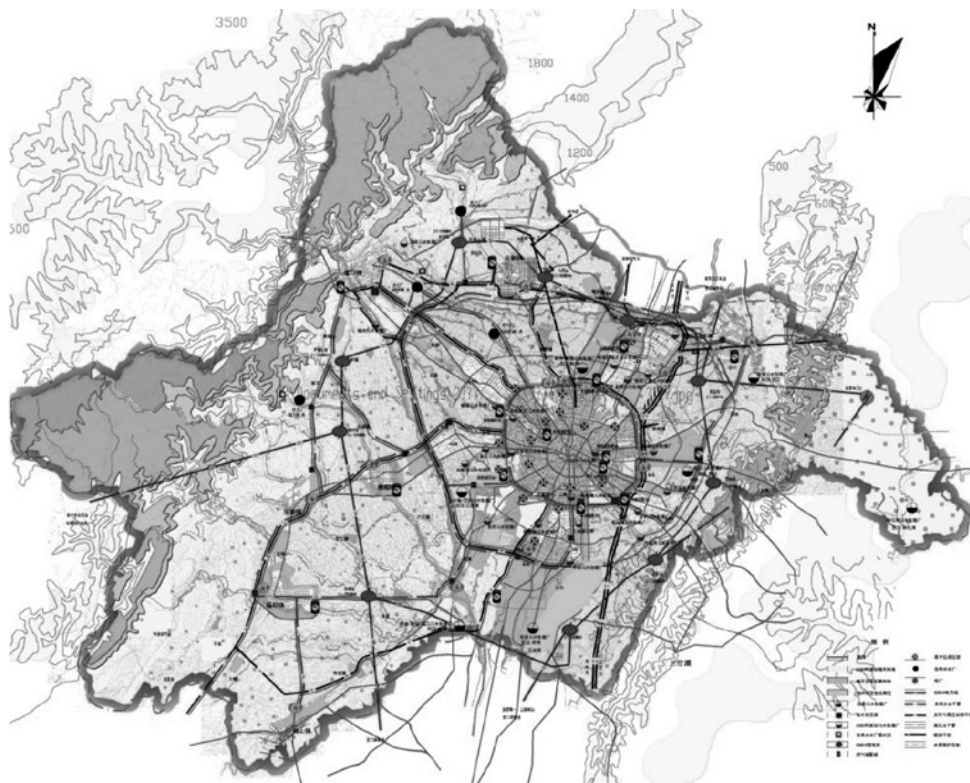


图6 成都市发展走廊市政基础设施规划图

部的规划协作。这样的结果很容易又走向城市规划“纸上画画，墙上挂挂”的老路。

### 3.5 规划缺少对下层次规划指导

该规划完成后，没有进行相应的专题及相应的政策研究，特别是给排水、电力、电信等重要专项没有编制规划。规划成果没有落实到具体管理部门，没有制定专项技术措施或规划实施办法等。因规划过于宏观，对各个城市的总体规划，专项规划及区县总规编制指导性不强，下层次规划修编时也没有将该规划作为上位规划依据，导致本规划的控制力严重不足。

## 4 结论

成都市发展走廊控制规划是针对城市区域发展、城乡统筹的一次尝试，是跳出以城市论城市，用区域的眼光来研究城市发展、物质空间形态、产业布局、人口疏解的一次方法论，规划提出的一些新思路、新方法在当时的背景下，有很强的创新性和先进性。

十年的时间过去了，随着汶川大地震、天府新区的成立，二机场的批复，成绵乐城际铁路的运行及地铁的初步网络化运营等等，这些外部条件的

变化，对成都市域及区域的城市影响是巨大的，除南部走廊（天府新区建设、住宅开发）、北部成青走廊（城际铁路、重大产业建设）两条走廊发展迅速，特别是南部走廊已经突破了走廊规划的控制，向东部急剧拓展，形成了连片扇形发展态势，其余走廊发展则相对稳定。从中心城区来看，人口还在进一步集聚，组团间楔形绿地还在被大量蚕食，圈层扩展（摊大饼）的城市发展模式没有得到有效改变。这些都是在以后的规划中需要反思的，在拓展思路的同时，如何应对城市发展的变化，如何对规划政策制定和实施提出合理的运行方案，做真正有意义能实施的规划。

### 参考文献

- [1] 刘健.《20世纪巴黎城市规划实践评介讲义》.清华大学,2013.
- [2] 《成都市发展走廊控制规划》.成都市规划设计研究院,2006.
- [3] Michel Micheau,张杰,邹欢.法国城市规划40年,社会科学文献出版社,2007.
- [4] 唐燕.德国大都市地区的区域治理与协作.中国建筑工业出版社,2011.



# 变频调速供水技术在工业循环冷却水系统中的应用探讨

■ 张舰艇 刘芳 孔庆波 李丹 「给排水」

**摘要:** 通过变频调速供水技术在工业循环冷却水系统中的工程实例,探讨了循环泵组中水泵的台数、变频泵与工频泵合理的配置比例及配置原则,为工业循环冷却水系统中并联水泵的经济、高效运行,提供了参考。

**关键词:** 变频调速; 高效段阈值频率

## 0 前言

目前,循环冷却水系统在工业生产中的应用非常广泛,该系统通过水的重复使用以达到节约水资源的目的,但在生产过程中该系统的能耗仍然相对较高,如何在满足生产设备安全、稳定运行的前提下,使循环冷却水系统更经济地运行便成为人们关注的焦点问题。

工业生产中,循环冷却水系统最基本的组成部分由冷却塔、循环泵、生产设备及管道组成。其原理为:冷水流过需要降温的生产设备后,温度上升;升温后的水流入冷却塔,温度下降;降温后的水由循环泵加压再次流入生产设备,如此不断循环,以达到给生产设备降温的目的。此外,系统中还会加入水处理设备,以保证系统中水质的稳定。

在上述流程中,除生产设备外,冷却塔和循环泵属于主要耗电设备。冷却塔为成套设备,在实际设计中,冷却塔开启的台数一般与循环泵设

置成连锁启/停,即开/关一台循环泵的同时就开/关一台冷却塔;或在冷却塔出水母管上通过设置温控器,来控制冷却塔风机的开/关,以达到节能的目的,其控制相对简单。为了保证循环冷却水系统更节能、高效地运行,如何确定循环泵的台数,以及如何更合理地配置变频泵与工频泵的比例,就显得尤为重要,而且在实际工程设计中,这的确是一个难点。

## 1 变频供水技术

对一个特定的管路系统,并联水泵工况的调节方式一般有变速调节(调速运行)、变径调节(换轮运行)等,随着变频技术的出现,由于变频调速是无级调速,调速范围很宽,节能效果显著,而逐渐成为工业生产中应用最多的一种调节方式。实际设计时,为满足设备入口压力稳定,一般采用恒压变频调速的运行方式。通过在循环泵出水管上或管网最不利点设置压力传感器,可以实时采集管网压力信号,压力变送器将该信号传送给控制器,控制器根据压力比较,通过变频器调节频率,改变电动机及水泵的转速,使供水量与用

作者简介:张舰艇,男,高级工程师,2008年毕业于北京工业大学市政工程专业,现就职于中航规划飞机工程设计研究院。

水量达到平衡, 维持水泵出口压力基本恒定。

变速调节的理论基础是比例律:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (3)$$

式中 $Q_1, Q_2$ ——流量 $m^3/h$ ;

$n_1, n_2$ ——转速 $r/min$ ;

$H_1, H_2$ ——扬程 $m$ ;

$N_1, N_2$ ——功率 $Kw$ 。

联立公式(1), 公式(2), 可得

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^2, \text{ 即 } \frac{H_1}{Q_1^2} = \frac{H_2}{Q_2^2} = k, \text{ 由此可得}$$

$$H = k \cdot Q^2 \quad (4)$$

公式(4)称为相似工况抛物线, 也称作等效率曲线。

变频泵通常由异步电动机驱动, 根据异步电动机的转速公式:

$$n = 60f \frac{1-s}{p} \quad (5)$$

式中 $n$ ——电动机转速 $r/min$ ;

$f$ ——交流电源的频率 $Hz$ ;

$p$ ——电动机极对数(无单位);

$s$ ——电动机运行的转差率(无单位); 对同一电动机,  $s, p$ 为常数。

由(1)式、(5)式, 可得:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad (6)$$

即变频泵在同一等效率曲线上的任意两个工况点, 其流量与电动机的频率成正比。理论上变频器设置得越多越好, 但实际上变频器价格较贵, 变频泵与工频泵配置台数的比例, 应以充分发挥每台变频泵的调整范围, 以及经过调整后, 能体现出较高的节能效果为原则<sup>[1]</sup>。根据《全国民用建筑工程设计技术措施节能专篇给水排水》中3.1.7条规定, 水泵调整范围宜在0.7~1.0的范围内, 即电机频率变化范围为35Hz~50Hz,

而在实际选泵时还应尽量保证变频泵在高效段内运行。

## 2 工程实例

### 2.1 变频调速供水系统的设计

#### 2.1.1 生产设备的工况

某工业厂房生产设备所需循环冷却水工况见表1。

表1 生产设备循环冷却水用水工况

设备名称	单台冷却水量	数量	总冷却水量	入口最小压力	压力损失	入口温度	温升
单位	$m^3/h$	台	$m^3/h$	MPa	MPa	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
液压泵	10	17	170	0.4	0.1	32	10
液压泵	30	1	30	0.4	0.2	32	5
液压泵	40	1	40	0.4	0.1	32	10
真空泵	60	1	60	0.4	0.2	32	5
合计			300				

#### 2.1.2 变频调速供水系统的选择

从表1中可以看出, 生产设备用水工况相近, 可以设置一套循环冷却水系统。该系统中, 生产设备多达20台, 开启台数不定, 最小用水量为 $10m^3/h$ , 最大用水量为 $240m^3/h$ (设备同时使用系数为0.80, 以下用 $Q$ 表示最大时用水量)。在实际工程设计中, 主泵通常采用2~4台<sup>[1][2]</sup>。考虑到本项目的生产设备需水量变化幅度较大, 设计采用4台主泵, 3用1备, 则每台主泵额定流量 $80m^3/h$ (以下用 $1/3Q$ 表示)。

根据笔者经验, 在对循环泵组进行初始配置时, 单台变频泵的流量变化范围可按50%~100%设计, 即一台变频主泵的流量变化范围为 $40m^3/h \sim 80m^3/h$ 。因此, 当流量降低至 $40m^3/h$ (以下用 $1/6Q$ 表示)以下时, 还需再设计2台副泵, 每台副泵额定流量为 $20m^3/h$ (以下用 $1/12Q$ 表示), 单台副泵的流量变化范围为 $10m^3/h \sim 20m^3/h$ 。如此设计, 正好可满足生产设备 $10m^3/h \sim 240m^3/h$ 的流量变化需求。但还应注意, 根据笔者经验, 一套变频控制柜中的控制单元, 控制的循环泵总台

数不能超过6台，否则电气控制的投资将加大。本项目中，主泵4台，副泵2台，可满足这一要求。

另外，工业循环冷却水系统一般夜间不会使用，即便使用，其最小流量也是已知的（如本项目为 $10\text{m}^3/\text{h}$ ）。笔者认为，在工业循环冷却水供水系统中，如果设置了副泵且能满足系统的最小流量需求，可不设置气压罐；如果未设置副泵且主泵不能满足系统的最小流量需求，则需要设置气压罐。因此，本系统中不设置气压罐。

### 2.1.3 变频泵与工频泵的配置比例

在本系统中，主、副泵不同时工作，变频泵与工频泵的运行组合方式，见方案1的表2和表3，及方案2的表4和表5。

表2方案1：主泵工作时，2台工频，1台变频，1台备用

运行组合	1台工频	2台工频	1台变频	1台工频、1台变频	2台工频、1台变频
泵组流量	1/3Q	2/3Q	1/6Q~1/3Q	1/2Q~2/3Q	5/6Q~Q

表3 方案1：副泵工作时，1台工频，1台变频

运行组合	1台工频	1台变频	1台工频、1台变频
泵组流量	1/12Q	1/24Q~1/12Q	1/8Q~1/6Q

表4方案2：主泵工作时，1台工频，2台变频，1台备用

运行组合	1台工频	1台变频	2台变频	1台工频、2台变频
泵组流量	1/3Q	1/6Q~1/3Q	1/3Q~2/3Q	2/3Q~Q

表5方案2：副泵工作时，2台均变频

运行组合	1台变频	2台变频
泵组流量	1/24Q~1/12Q	1/12Q~1/6Q

从方案1的表2和表3中可以看出，在主、副泵各配1台变频器的情况下，出现了 $(1/12\sim 1/8)Q$ 、 $(1/3\sim 1/2)Q$ 、 $(2/3\sim 5/6)Q$ 供水间断区，在这些间断区内，水泵将在非高效段内运行。而方案2（主、副泵分别工作时，均为2台变频）在 $(1/24\sim 1)Q$ ，即 $10\text{m}^3/\text{h}\sim 240\text{m}^3/\text{h}$ 的供水范围内没有间断区。因此，变频泵与工频泵的配置比例，按方案2进行设计。

## 2.2 主、副泵的切换及副泵的选择

恒压变频调速供水系统主泵切换至副泵的控制方式为：首先设定恒压值及阈值频率，随着管网所需流量的减少，运行频率也不断减小，运行频率降至阈值频率时，主泵自动切换至副泵运行<sup>[3]</sup>。笔者认为，在未配置气压罐的恒压变频供水系统中，阈值流量即为副泵额定工作时对应的流量，系统设定的恒压值即为副泵额定工作时对应的扬程。

根据《建筑给水排水设计规范》(GB 50015-2003 (2009年版)) 3.8节相关规定，应根据管网水力计算进行选泵，水泵应在其高效区内运行；变频泵在额定转速时的工作点，应位于水泵高效区的末端。根据水力计算，当供水系统达到最大流量

时，系统的扬程约为60m，则管网的恒压值设定为60m（此值可在系统调试时根据实际情况进行设定）。

为了验证主、副泵的配置比例是否合理，本案例首先对主泵进行了选型，其性能曲线及效率曲线见图1。由图1可知，水泵高效区前端对应的值为A（ $40.0\text{m}^3/\text{h}$ ，72.5m），根

据等效方程（k为相似系数）得 $k=0.0453$ ，即等效方程为 $H=0.0453Q^2$ 。等效率曲线与恒压线相交于B（ $36.4\text{m}^3/\text{h}$ ，60m），B点既是主泵切换至副泵的临界点，也是副泵的额定工况点，此时主泵刚刚离开高效段。由于A、B点为相似工况点，利用公式（6）可得水泵变频工作至B点时的频率为45.5Hz，此频率即为主泵切换至副泵工作时的阈值频率。

由于本案例的副泵为2台，因此1台副泵的额定工况即为（ $18.2\text{m}^3/\text{h}$ ，60m）。据此，即可选择副泵，其性能曲线及频率曲线见图2。由图2可知，当单台副泵在变频状态下工作时，当其流量（C~D）之间，即（ $10\text{m}^3/\text{h}\sim 18.2\text{m}^3/\text{h}$ ）间变化时，其对应的效率区间（E~F）均在（60%~75%）的高效段内运行。

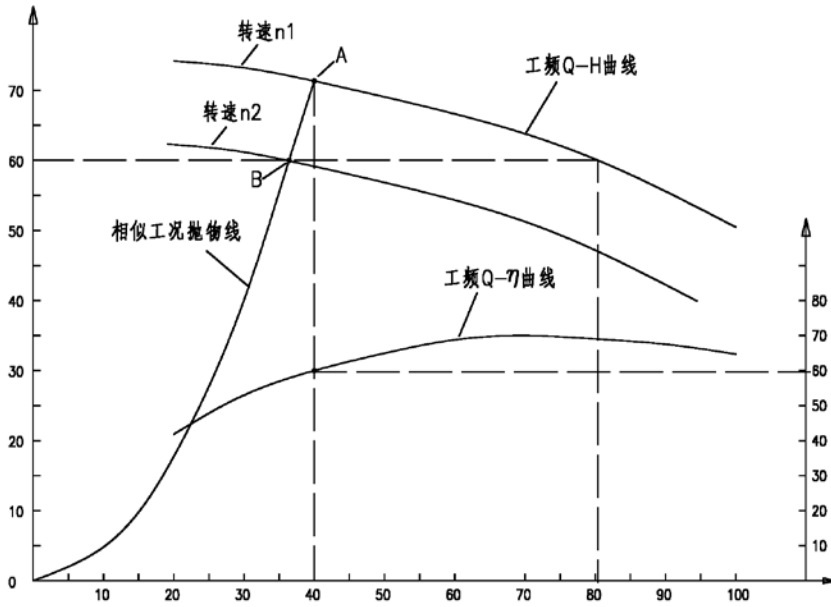


图1 主泵性能曲线及其效率曲线

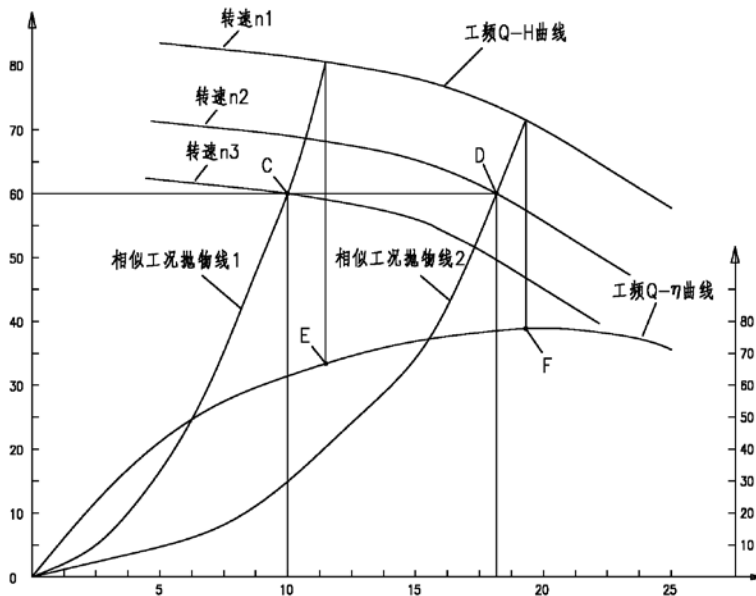


图2 副泵性能曲线及其效率曲线

### 3 结语

对变频恒压供水系统,在实际工程设计中,主泵通常采用2~4台。在对循环泵组进行初始配置时,为充分发挥每台变频泵的调整范围,以达到节能的目的,应合理配置变频泵与工频泵的比

例,单台变频泵的流量变化范围可按50%~100%设计,但在实际选泵时还应保证该泵尽量在高效段内运行。同时还应注意,为节约投资,一套变频控制柜中的控制单元,控制的循环泵总台数一般不要超过6台,否则电气控制的投资将加大。

在设置主、副泵的恒压变频供水系统中,选定主泵的型号及规格后,可根据主泵高效段前端对应的工作点及系统设定的恒压值,来确定副泵的额定工况及阈值频率,以避免主、副泵无法正常切换。在未配置气压罐的恒压变频供水系统中,阈值流量即为副泵额定工作时的流量,系统设定的恒压值即为副泵额定工作时的扬程。

### 参考文献

- [1] 李亚峰,李清雪,吴永强.水泵及水泵站.第1版.北京:机械工业出版社,2012.
- [2] 杨俊槐.变频恒压供水系统中辅助泵和小气压水罐的设计探讨.给水排水.2010,36(增刊):356~359.
- [3] 许江华.浅谈变频调速系统的主副泵切换.给水排水.2005,31(10):90~92.

# 复合式地源热泵运行控制策略比较

■ 乔卫来 陈九法 「暖通」

**摘要:** 以南京某复合式地源热泵系统为研究对象,通过能耗模拟软件Energyplus分析其天棚辐射空调系统的能耗,计算出埋管侧全年累计散热量与取热量之比为3.97:1。该项目采用复合式的地源热泵系统,本文分析辅助散热设备运行控制策略以保证地源热泵系统可持续高效运行。比较三种控制策略得出:温差控制不适合散热量与取热量严重失衡的系统,因其控制温差不易确定,辅助散热设备启停频繁,且难以保证系统多年运行地下热平衡;热泵进口水温控制是保证地下热平衡的有效措施,但是需要选择合理的控制参数值,辅助散热设备启动较频繁;定时开启控制不仅能够保证系统持续高效运行,而且控制策略易于实施。

**关键词:** 地源热泵;控制策略;数值模拟;热平衡

## 1 工程介绍

地源热泵系统能否持续、有效的运行,主要取决于埋管换热器与周围土壤的累计换热量是否处于平衡状态<sup>[1]</sup>。

以南京某住宅建筑为例,项目建筑面积10304m<sup>2</sup>,空调面积9530m<sup>2</sup>,建筑体形系数0.192。空调系统形式为天棚辐射加新风系统,采用1700组地下换热器为空调系统冷热源。

本文基于建筑逐时冷热负荷、热泵机组及泵与风机的功率<sup>[2]</sup>,通过能耗模拟软件Energyplus<sup>[3]</sup>计算该建筑能耗,计算得出埋管侧换热量:夏季峰值散热量274.45kW,冬季极值取热量

84.66kW。全年累计总散热量554,641kWh,总取热量139,563kWh,埋管侧全年累计散热取热比值3.97:1。

使用用户自定义函数法将埋管侧逐时换热量导入Fluent管群模型,从而对埋管群模拟<sup>[4]</sup>。将模拟的地下温度及埋管出水温度与监测数据比较,确保模型参数及边界条件设定合理可靠。同时对埋管群模拟,研究埋管换热器的优化设计与系统的运行控制策略,使埋管换热器与周围土壤换热处于基本平衡状态,达到地源热泵持续有效运行。

## 2 埋管群数值模拟

由热响应实验分析得:岩土的热导系数为1.84W/(m·K),密度为1800kg/m<sup>3</sup>,比热容

作者简介:乔卫来,男,工程师,2011年毕业于东南大学暖通专业,现就职于中航规划建筑设计研究院。

为 $1400\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；回填材料导热系数为 $1.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，密度为 $1350\text{kg}/\text{m}^3$ ，比热容为 $1400\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；高密度聚乙烯管导热系数为 $0.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，密度为 $950\text{kg}/\text{m}^3$ ，比热容为 $1600\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；地埋管采用高密度聚乙烯管，管外径均为 $32\text{mm}$ ，内径 $26\text{mm}$ ，地埋管有效埋深均为 $55\text{m}$ 。

采用Fluent软件对该地源热泵系统垂直地埋管全年运行进行数值模拟并作如下假定：

(1) 不考虑岩土下面的渗流影响，地下岩土为均匀介质，初始平均温度为 $17.2^\circ\text{C}$ 。

(2) 采用三维非稳态模拟，计算地下温度变化趋势时，设定时间步长为 $1\text{h}$ 。

(3) 运行时管内流速恒定为 $0.5\text{m}/\text{s}$ 。

实际工程上，总共埋设地埋管换热器 $1700$ 组，钻孔成正方形排列，管间距均为 $5\text{m}$ 。基于假定条件，从地埋管群中取出其中正四边形内 $4\times 4$ 地埋管，则四边的竖直边界条件为绝热面，如图1。

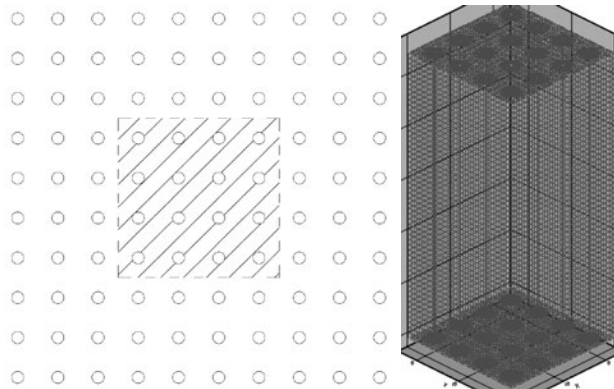
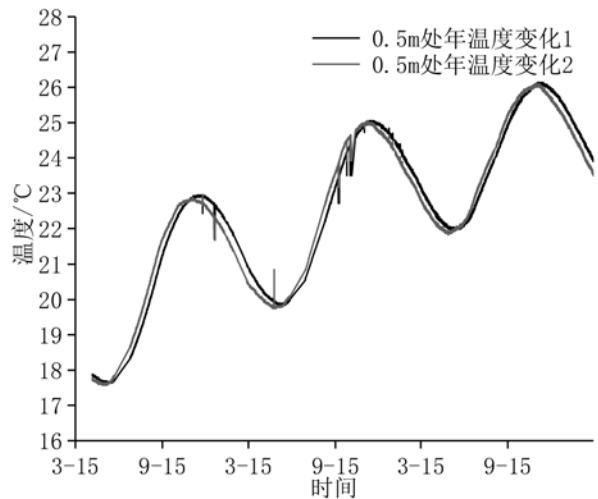


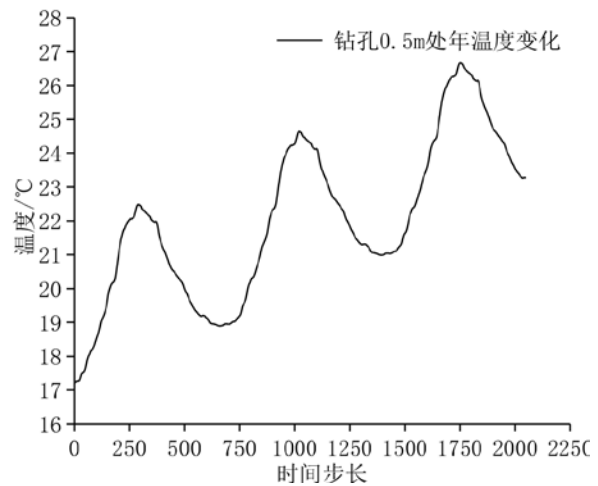
图1 大面积地埋管模型及地埋管群三维模型

为验证上述假定的可取性，首先将地埋管群的数值模拟结果与该地源热泵系统运行近3年土壤实测温度对比，如图2。模拟值与实测值温度波动趋势、以年为周期的波幅基本一致，差别在于波峰值（实测的波峰值约高于模拟值 $0.5^\circ\text{C}$ ），因此数值模型的假定是合理的。从实测土壤温度都可以看出，土壤温度随着地源热泵的连续运行，温度越来越高，这是由于地源热泵夏季向土壤中的散热量大于冬季从土壤中吸收的热量，造成热堆积所致。因此地源热泵系统想长期有效的运行，采用复合式地源热泵系统。

为分析地埋管周围温度逐年变化，在地埋管周围不同距离设置温度监测点，各监测点的具体位置如图3。模拟地源热泵连续运行8年，地下 $25\text{m}$



(a)系统采集值 (时间: 月-日)



(b)数值模拟值 (单位: h)

图2 某地源热泵三年运行地下温度监测值与模拟值

处各监测点温度逐年变化趋势，如图4。从模拟的结果可以看出距离钻孔 $0.5\text{m}$ 位置处年平均温度总共升高 $12.4^\circ\text{C}$ ，夏季运行时该位置地下温度为 $34.5^\circ\text{C}$ ，模拟得到地埋管出水温度达到 $44.0^\circ\text{C}$ 。地下岩土年平均温度逐年上升，升高幅度约为 $1.9^\circ\text{C}/\text{年}$ 。地下岩土温度的年平均温度升高，会导致机组在夏季制冷运行时冷凝温度升高，降低其制冷运行的性能系数。整个地埋孔间土壤的温度场如图5所示。

分析可知，地埋管侧与周围土壤的换热量对土壤的温度、地源热泵能否持续运行影响很大。因此，在地源热泵系统设计时，需要对建筑进行全年逐时负荷计算，根据地埋管热响应测试结果，设计合理的地埋管形式、数量及间距等，根

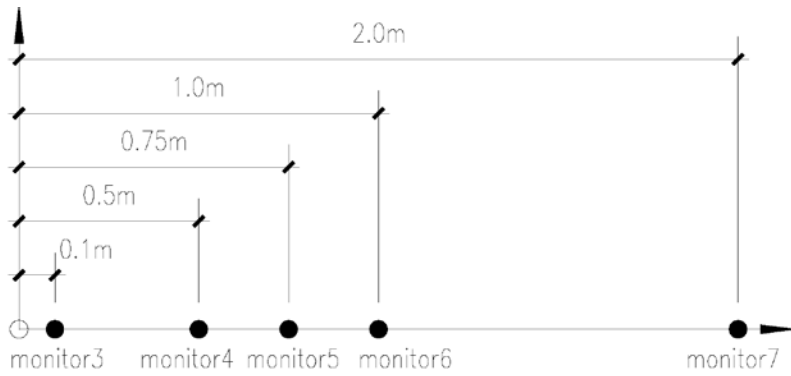


图3 监测点位置示意图

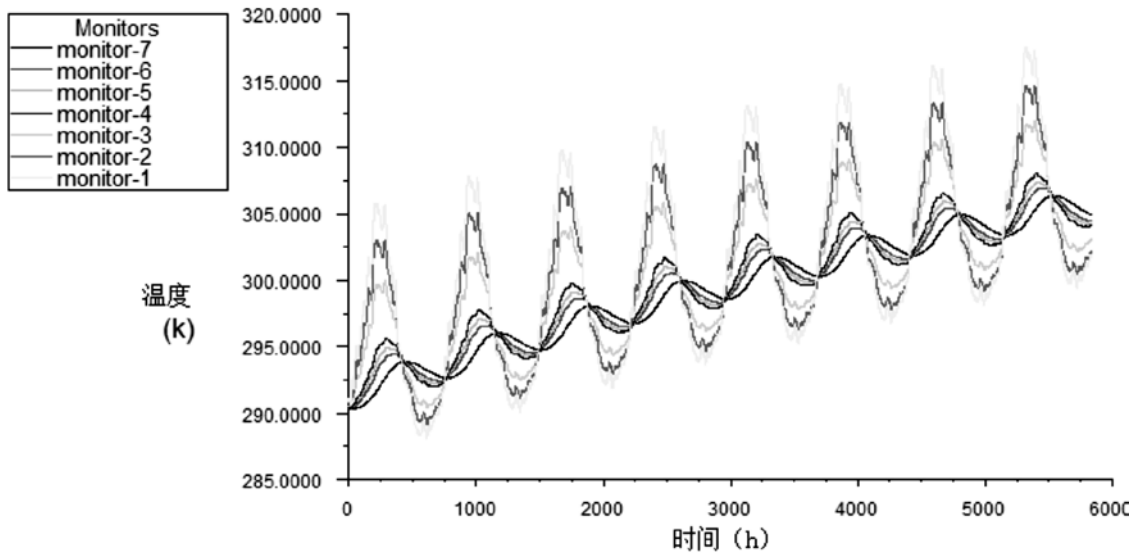


图4 地埋管群运行八年各监测点温度变化趋势 (时间步长12h)

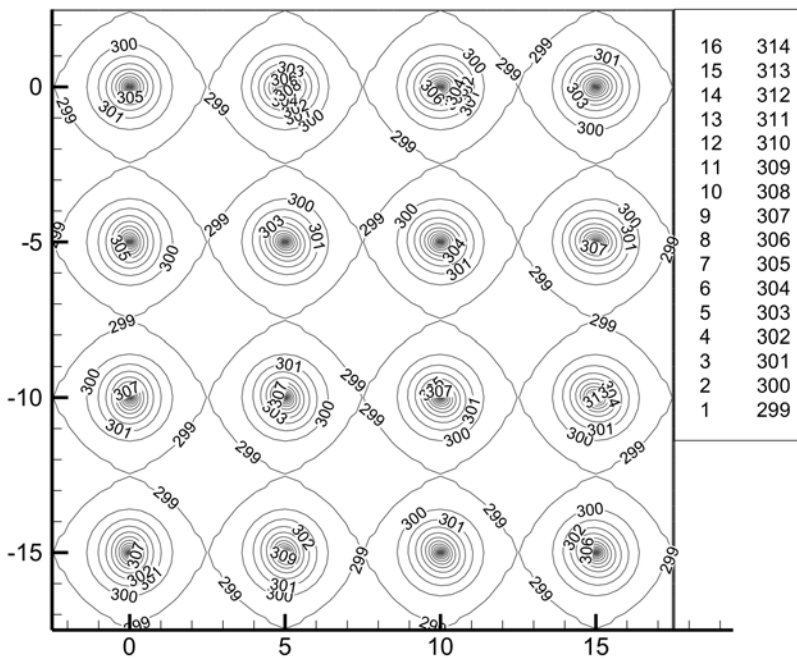


图5 地埋管运行八年地下温度场 (长度单位: m)

据地下换热量的情况,合理采用冷热源系统(如带辅助散热设备的复合式地源热泵系统或纯地源热泵系统),以及优化的控制策略。

### 3 运行控制策略比较

本文采用数值模拟的方法研究动态负荷下,温差控制、热泵进水温度控制以及冷却塔开启时间控制<sup>[5]</sup>这三类常用的控制方式对

复合式地源热泵系统运行的效率影响。

温差控制是根据热泵进口流体温度与环境空气干球温度之差进行控制,当其差值超过设定值时,启动冷却塔进行辅助散热。本文假定,每年6月1日至10月1日,当热泵机组的进水温度高于环境干球温度2℃时,开启冷却塔,使得冷却出水比环境干球温差降到1.5℃。

如图6,采用温差控制对地埋管群进行数值模拟,模拟系统运行4年,各监测点的位置详见图4。分析图6可知,地埋管进水温度逐年最高值分别为33.71℃、34.45℃、34.98℃和35.35℃,逐年升高0.5℃左右;距钻孔0.5m

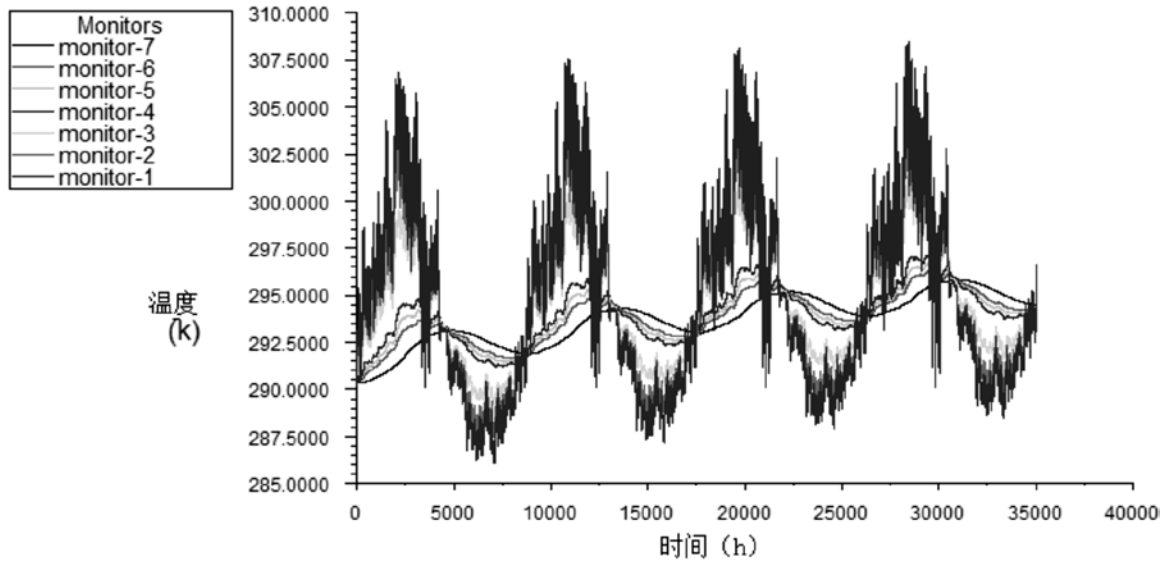


图6 温差控制 (时间步长1h)

处地下岩土逐年温度最高值分别为 $21.65^{\circ}\text{C}$ 、 $22.69^{\circ}\text{C}$ 、 $23.45^{\circ}\text{C}$ 和 $24.00^{\circ}\text{C}$ ；相邻埋管中心处地下岩土逐年温度最高值分别为 $19.99^{\circ}\text{C}$ 、 $21.18^{\circ}\text{C}$ 、 $22.05^{\circ}\text{C}$ 和 $22.68^{\circ}\text{C}$ 。因此采用温差控制，无论是地下岩土年平均温度还是埋管进出水温度均逐年上升，并且需要根据特定的地源热泵系统，选择合适的控制温差。

Yavuzturk和Spitler研究<sup>[5]</sup>表明，按照热泵机组进口温度高于 $35.8^{\circ}\text{C}$ 开启冷却塔。但是对于散热与取热不平衡工程，温度设定过高，使得辅助散热设备第一年的运行时间比短，随着地下热

堆积的加剧，后一年总比前一年运行时间长。另外，冷却塔承担最大制冷量逐年升高。因此从系统可持续性运行的角度上看，应该根据具体系统设定合理的冷却塔启动温度。在此设定热泵机组进水温度高于 $32^{\circ}\text{C}$ 即开启冷却塔。

图7为控制热泵机组最高进口流体温度小于 $32^{\circ}\text{C}$ 时，运行四年模拟结果，各监测点的位置详见图4。分析图7可知，埋管进水温度逐年最高值分别为 $34.65^{\circ}\text{C}$ 、 $35.70^{\circ}\text{C}$ 、 $35.76^{\circ}\text{C}$ 和 $35.31^{\circ}\text{C}$ ；距钻孔 $0.5\text{m}$ 处地下岩土逐年温度最高值分别为 $22.69^{\circ}\text{C}$ 、 $24.58^{\circ}\text{C}$ 、 $26.09^{\circ}\text{C}$ 和 $27.26^{\circ}\text{C}$ ；

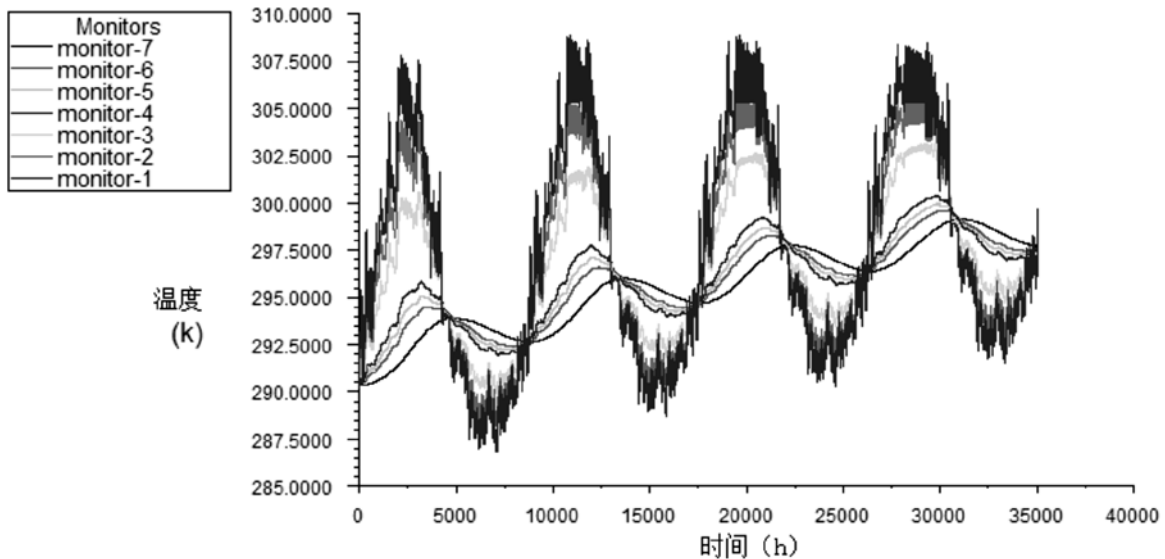


图7 热泵进水温度控制 (时间步长1h)



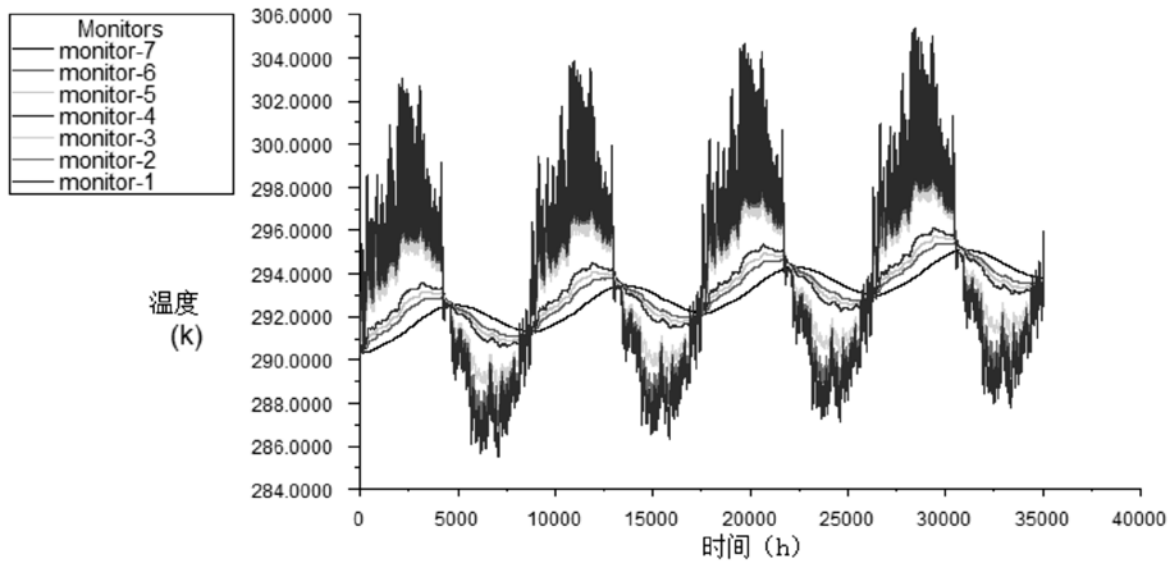


图8 定时开启控制策略1 (时间步长1h)

相邻埋管中心处地下岩土逐年温度最高值分别为 $20.76^{\circ}\text{C}$ 、 $22.88^{\circ}\text{C}$ 、 $24.64^{\circ}\text{C}$ 和 $26.01^{\circ}\text{C}$ 。

与控制温差策略相比,热泵进水温度控制策略虽然前3年系统运行效率略低,但在运行几年之后能达到平衡状态,不会出现地下年平均温度持续上升现象以及热堆积使得系统无法运行的状况。因此,该控制策略能够保证地源热泵可持续性运行,但是要保证系统高效运行必须选择合适的热泵进水温度控制值。

定时开启控制是考虑到埋管群间歇运行,有利于抵消土壤因长期运行所产生的热积累而造

成的温升。考虑到夜间室外气温比较低,该控制策略在夜间开启冷却塔。由于本工程埋管侧全年累计散热取热量严重不平衡,因此可以延长冷却塔的运行时间。本文比较了两种开启时间控制效果,分别设定冷却塔开启时间为6月1日~10月1日每天 $22:00\sim 10:00$ 和 $0:00\sim 12:00$ 。

如图8,冷却塔开启时间为 $22:00\sim 10:00$ ,采用非稳态模拟的方法研究系统运行4年各个监测点的温度变化。埋管进水温度逐年最高值分别为 $29.88^{\circ}\text{C}$ 、 $30.73^{\circ}\text{C}$ 、 $31.52^{\circ}\text{C}$ 和 $32.25^{\circ}\text{C}$ ,相对于前面研究的两种控制策略,出水温度降低约

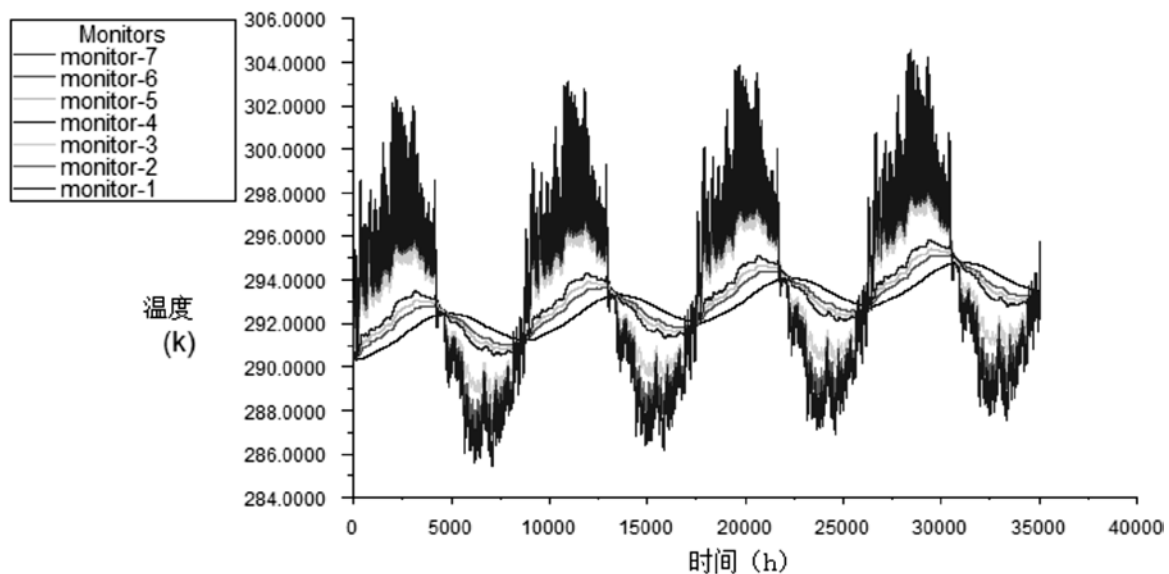


图9 定时开启控制策略2 (时间步长1h)

2~3℃；距钻孔0.5m处地下岩土逐年温度最高值分别为20.45℃、21.36℃、22.20℃和22.99℃；相邻埋管中心处地下岩土逐年温度最高值分别为19.40℃、20.32℃、21.16℃和21.95℃。相对于温差控制，地下年平均温度升高减缓约13%，并且辅助散热设备不会出现频繁开启情况。因此，合理的定时开启控制是保证系统可持续性运行的有效措施，同样地，开启时间段及时长的选择是关键。

另外比较定时开启控制策略2，即开启时间为凌晨0:00~上午12:00。图9为采用非稳态模拟的方法研究系统运行4年各个监测点的温度变化，时间步长为1h。由图12可知，地埋管进水温度逐年最高值分别为29.23℃、30.01℃、30.74℃和31.42℃；距钻孔0.5m处地下岩土逐年温度最高值分别为20.33℃、21.17℃、21.95℃和22.67℃；相邻埋管中心处地下岩土逐年温度最高值分别为19.33℃、20.18℃、20.96℃和21.69℃。相对于定时开启控制策略1，策略2防止地下热堆积效果更为显著。

## 4 结论

以南京某复合式地源热泵系统为研究对象，根据空调系统的能耗特性，采用数值模拟的方法，比较了辅助散热设备三种运行控制策略对热泵系统的影响。

(1) 地源热泵系统设计要考虑土壤的累计冷热量的平衡，否则会产生冷堆积或热堆积，使地源热泵系统无法连续运行。

(2) 针对复合式地源热泵系统，不同的控制策略对地埋管侧全年散热与取热平衡、系统运行效率和辅助散热设备开启频率等影响很大。采用地源热泵进水温度控制前3年热泵机组制冷效率不如温差控制，但在运行一定时间后能达到平衡状态，而不会出现热堆积。

(3) 对于散热与取热比较大的系统，应采用定时开启控制策略，相对于温差控制及热泵进口温度控制对防止地下热堆积更有效，并且地埋管群间歇运行下，地埋管换热量相对较大。

(4) 根据不同项目负荷特点，辅助散热设备运行控制方式应相应的调整，如采用定时开启控制方式时，为避免白天运行热泵进水温度过高，可以辅助以温度控制，降低进水温度。

## 参考文献

- [1] 马宏权, 龙惟定. 地埋管地源热泵系统的热平衡[J]. 暖通空调, 2009, 39(1):102-106.
- [2] 陆亚俊, 马最良, 邹平华. 暖通空调[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] EnergyPlus Support Team. EnergyPlus Engineering Reference. Version3.1.
- [4] 舒海文, 端木琳, 谷彦新等. 地源热泵竖直地埋管系统设计的简明算法模型研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(12): 74-77.
- [5] Cenk Yavuzturk, Jeffrey D. Spitler. Comparative study of operating and control strategies for Hybrid Ground-Source Heat Pump Systems using a short time step simulation model. ASHRAE Transactions, 2000, 106: 192-195.

# 国内总承包项目投标报价测算研究

■ 孙家超 「工程造价」

**摘要:** 当前,国内采用总承包模式的项目逐渐增多,但国家尚未出台对总承包项目造价管理的相关规定,投标报价作为总承包企业能否中标及盈利的重要内容,迫切需要深入研究。本文通过分析国内总承包项目投标报价测算中存在的问题,提出符合我国总承包项目投标报价测算模式,提出建立项目投标报价测算工作组,从准备、测算、结束三个阶段进行分工协作,确定合理报价,为后续研究提供借鉴。

**关键词:** 总承包项目;投标报价;测算;模式

## 0 引言

近年来,国内采用总承包模式的项目逐渐增多,较好地推动了我国工程建设的发展。这种承包模式有利于发挥工程总承包企业的技术优势和项目管理优势,实现设计、采购、施工等各阶段工作的深度融合,提高工程建设效率和水平,有效控制投资,合理控制工程建设周期。EPC总承包项目的投资控制,包含投标报价;施工图限额设计;施工总包、分包采购控制;项目实施阶段费用控制;工程结算等。投标报价测算合理与否决定总承包项目能否中标,直接影响项目各项目标的实现和项目收益,对项目成功至关重要。

截至目前,我国仅在2003年发布了《关于培育发展工程总承包和工程项目管理企业的指导意见》(建市[2003]30号)、2015年发布了《关于进一步推进工程总承包发展的若干意见(征求意见稿)》征求意见的函>(建市设函[2015]10号),从总体上提出指导意见,但尚无成熟的工程总承包项目投标报价测算模式,因此有必要深入研究一套符合我国国情的总承包项目投标报价测算模式。投标报价包含建筑安装工程费、设计费等相关费用,本文仅对建安工程费用的测算进行研究。

## 1 国内总承包项目投标报价测算中存在的问题

总承包项目投标报价是决定项目能否盈利的关键,我国总承包模式实施时间较短,目前投标报价的测算还存在一些问题。

### 1.1 总承包企业人员、文化融合难,影响报价

我国推行的设计施工总承包企业多由设计院和施工企业(或项目管理公司)改造或合并而成,由于成立时间短,不同公司的文化、思维方式和工作方法不同,完全融合还做不到。一方面,部分设计人员还停留在以往的设计思维,保守设计或对项目所在地常用材料设备缺乏调研,造成选用的产品在当地不适用或运费较高,项目全生命周期成本增加,或因相关专业之间沟通不及时造成丢项漏项;另一方面,部分项目现场管理人员也经常持他们的工作只是按设计图纸施工的态度,认为图纸是设计该负责的事情,报价是造价人员负责的事情,至于投标报价阶段设计方案和图纸是否合理与己无关,不能在报价阶段结合项目所在地的现状提出合理化建议,轻则项目利润降低或亏损,重则由于报价不经济无法中标。

### 1.2 建安工程费用偏离实际

建安工程费用不是设计阶段的估算、概算,也不简单指施工图预算,而是项目全生命周期产生的工程费用。设计院造价人员通常对项目前期投资估算和设计概算比较熟悉,但对于施工图预

作者简介:孙家超,男,工程师,2010年毕业于西安建筑科技大学管理科学与工程专业,现就职于中航规划动力工程设计研究院。

算和结算接触不多；施工企业或项目管理单位的造价人员对项目后期施工图预算和结算了解较多，但对前期造价涵盖内容和计算方法比较陌生。总承包项目投标价的工程费用是指项目设计、施工全生命周期产生的工程费用，单一项目前期和后期的造价人员都不能完全胜任，完全掌握前后期造价还需要更多项目造价经验的积累和各专业人员的协同配合，当前建安工程费用测算还存在偏离实际情况。

### 1.3 风险费用估计不足

风险费用类似于预备费，包含内容是招标文件中约定由投标人承担的风险，过高不能中标，过低可能亏损，这些都需要总承包企业逐步积累实践经验，提高风险测算水平。如设计图纸的风险，部分设计人员缺乏总承包造价控制理念，投标方案图纸中预留很多需二次深化及厂家深化的内容，造价人员因无法准确理解设计意图给后期投资控制带来了极大风险。

## 2 投标报价测算模式

为有效解决当前总承包项目投标报价测算中存在的问题，笔者认为可以采用以下模式：

### 2.1 准备阶段

在项目前期，市场开发部门获得总承包项目招标信息后，公司应组建此项目投标报价测算工作组，具体负责项目投标报价测算过程中全部工作的协调和解决。工作组组长由项目总监（或项目经理）担任，组员由造价负责人、设计负责人、采购负责人、施工负责人及合同法务等相关部门人员组成。

工作组成立后召开项目投标报价测算首次会：系统研究招标范围，质量、工期、报价要求，合同条款等核心内容，分析制定拟采用的设

计、采购和施工方案。

造价人员根据设计方案，结合公司已完类似项目工程造价实际分析拟采用各方案的造价指标；设计负责人根据造价指标结合项目特点及要求优化方案；拟担任施工阶段项目经理的人员根据招标文件要求编制施工组织设计，并根据定额计算工期和招标文件要求工期之间的差值，确定是否需制定赶工措施，如需造价人员按照施工方案计算赶工费用；采购负责人按照招标文件要求的材料设备品牌进行询价。总之，为了能测算出最有利的投标报价，工作组成员应摒弃以往单一的设计、造价、施工阶段相对独立控制的思维，集思广益，抱团研究，制定投标最佳方案，并在实施过程中严格执行。

造价部门作为投标报价测算的主体，在准备阶段首先应选择前后期经验丰富的人员作为造价负责人，根据项目重要和难易程度选择编校审人员，老中青搭配，测算前要根据项目实际详细讨论制定测算方案。造价部门在准备阶段重点做好如下工作：

(1) 搜集类似项目资料。搜集公司内外类似的项目资料，包括项目的造价指标、规模、结构形式、建设时间等。

(2) 熟悉方案。造价部门测算报价前首先应熟悉设计方案，对方案中存在的问题或表达不清楚的内容整理一份设计交底清单，与设计人员沟通确认，保存设计交底记录。

(3) 搜集项目造价编制依据。包括项目所在地采用清单计价规范、工程计价定额、建筑材料的信息价、各类取费文件、人工费调整文件、特殊费用计取文件等。

(4) 整理项目可能产生的特殊费用，列出清单，逐一与项目投标报价测算工作组相关人员落实解决方案和产生的费用。如项目地质条件较

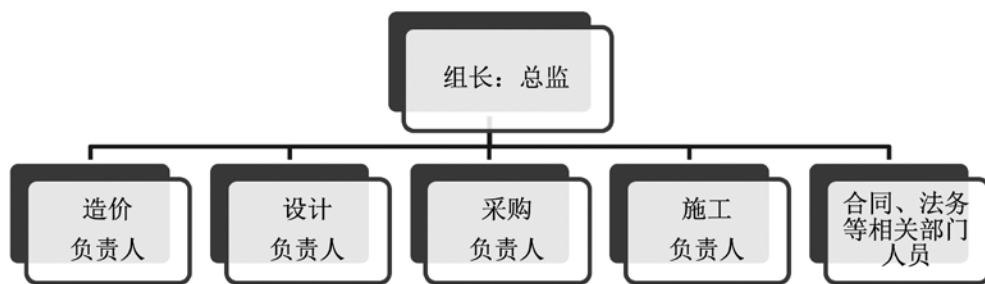


图1 总承包项目投标报价测算工作组

差, 基坑支护可能增加的费用; 场地狭小、工期不足等可能增加的费用, 以及其他不可预料的费用。当采用新材料和新技术时, 造价负责人应与采购负责人、施工负责人提前沟通, 了解新材料是否可采购, 是否需替换材料, 新技术是否可实施, 是否有更经济的替代方案等。

## 2.2 报价测算阶段

### 2.2.1 建安工程费测算

造价部门是报价测算阶段建安工程费测算的主体, 测算过程中要做好工程费部分计量和计价, 遇到问题及时与相关人员沟通解决。投标报价测算工作组其他成员应做好协调配合工作。

(1) 计量。设计人员根据设计方案配合造价人员估算工程量, 对于需进一步计算的工程量, 如设计人员对混凝土结构工程只计算混凝土的工程量, 造价人员需进一步计算模板和钢筋的工程量, 尽量考虑全面, 不丢项、不落项; 对于造型奇特、方案特殊的分部分项工程, 应与设计人员和施工管理人员共同商讨确定相应计量规则和计量范围, 如实准确计算工程量。计量完成后形成工程量清单, 应确保工程量清单中已包含全部工作内容, 计量依据充分, 符合实际。

(2) 计价。造价人员对已完成的工程量清单, 按照概(预)算定额或企业定额估算成本价格, 对于招标文件约定的可调价材料按照相关规定计算, 如钢材、混凝土等材料为可调价材料, 则报价时按项目所在地主管部门发布的造价信息价格计入投标报价, 其余材料设备由采购人员按照招标文件给定的品牌进行询价, 询价时需了解报价有效期, 付款要求, 因询价与实际采购有时间差异, 还需了解该材料设备价格的波动情况。总承包企业应建立采购平台, 考察一些优良企业, 签订框架协议, 编制适合企业及项目特点的合格供应商名录, 将项目信息及需采购的材料设备在网上公示, 由各供应商公开公平竞价, 确保价格的准确。对于存在特殊地质条件、采用特殊工艺和特殊施工方案的情形, 造价人员应同投标报价测算工作组中相关人员共同商定, 必要时组织专家论证会, 由专家确定可行方案, 再由投标报价测算工作组共同确定报价。造价人员计价过程中发现可降低造价的方案时应及时提出, 由投标报价测算工作组讨论决定优化方案。初步价格确定后可参考类似项目的单价和经验指标, 考虑差异系数, 进行成本分析, 确定成本价。

### 2.2.2 风险费测算

风险费应根据招标文件要求承包人承担的风险内容进行测算, 如项目周期过短引起的赶工, 总价合同中由承包人承担的涨价风险、场地狭小引起的二次搬运、降效等费用, 该部分由投标报价测算工作组成员根据项目具体情况共同讨论确定, 各成员可采用头脑风暴法, 分析可能产生的风险, 结合项目实际和拟采取的方案确定合理风险费。按照招标文件要求单独列项或在报价中考虑。

造价部门在成本价基础上, 综合项目管理费、企业利润、风险费等内容后确定投标报价初稿, 向投标报价测算工作组汇报, 由工作组确认投标报价初稿。

## 2.3 结束阶段

经投标报价测算工作组确定的投标报价初稿应报送公司投标报价评审委员会审议, 对委员提出的审议建议各成员应分工落实, 修改投标报价初稿, 经最终审议通过后方可进行投标。

总承包项目投标报价的完成并不是造价控制的结束, 而恰恰是一个项目造价控制的开始。所有项目成员都应该时刻保持造价意识, 在总承包项目投标报价的目标下进行全过程造价控制。项目结束后, 投标报价测算工作组应系统总结造价控制经验, 为后续项目投标报价积累宝贵依据。

## 3 展望

随着我国城镇化和“一带一路”发展战略的逐步落实, 总承包模式将更大规模地被采用, 投标报价作为项目中标和盈利的重要因素, 其重要性毋庸置疑, 本文探讨了总承包项目投标报价测算模式, 希望能对工程总承包企业提供借鉴和帮助。

### 参考文献

- [1] 建设部. 关于培育发展工程总承包和工程项目管理企业的指导意见[Z]. 2003.
- [2] 住房和城乡建设部. 关于进一步推进工程总承包发展的若干意见(征求意见稿)征求意见的函[Z]. 2015.
- [3] 徐妥夫, 王培见, 彭志军. EPC总承包项目实施阶段费用控制措施[J]. 建筑经济, 2015(09): 76-78.

# 置换通风空调系统 在某油箱工段车间中的应用

■ 付晓晨 刘银萍 「暖通」

**摘要:** 本文简要介绍了置换通风的原理与特性,阐述了某油箱工段车间空调系统的设计,将置换通风与传统混合通风相比较,提出了置换通风是一种既能保证室内空气品质又节能的方法,值得在工业厂房通风系统中大力推广。

**关键词:** 置换通风;混合通风;室内空气品质;热力分层

## 0 引言

在现代社会,人们对室内工作环境的要求逐步提高,对空调的要求也不再只停留在室内温湿度的层面,而是在此基础上,向更高层次的创造良好的舒适环境、提高室内空气品质和节约能源的方向发展。然而,要改善室内的空气品质通常的做法是加大新风量,此举必然会消耗能源,这又与国家提倡的节能减排方针相悖,因此本文提出了一种既能保证室内空气品质又节能的方法,即置换通风。

## 1 置换通风的原理与特性

### 1.1 置换通风的原理

置换通风是室内通风或送、排风气流分布的一种特定形式。它以低风速、低紊流度、小温差(约3~4℃)的方式,将经过热湿处理或未经处理的新鲜空气通过空气分布器直接送入室内人员活动区的下部。较冷的空气在重力作用下先下沉,随后沿着地面慢慢扩散,从而形成一层较薄的空气湖。当遇到热源时,被加热,以自然对流的形式慢慢升起。室内热污染源产生的热浊气流在浮升力的作用下上升,并不断卷吸周围空气,在热浊气流上升过程中的“卷吸”作用和后续新风的“推动”作用以及排风口的“抽吸”作用

下,覆盖在地板上方的新鲜空气随之缓慢向上移动,形成类似向上的活塞流,工作区的污浊空气被后续新风所取代。同时污染物也被携带向房间的上部或侧上部移动,最后将污染物由排风口直接排出。置换通风很好地利用了气体热轻冷重的自然特性和污染物气体自身的浮升特性,通过自然对流达到空气调节的目的。

### 1.2 置换通风的特性

置换通风的特性便是热力分层。当达到稳定状态时,室内空气在温度、浓度上便形成了两个区域:上部混合区和下部单向流动的清洁区(见图1)。上区(滞留区)存在气流回返混合,温度与污染物浓度较高;下区(人员活动区)为单向流,空气温度低而清洁。置换通风的送风速度通常为0.25m/s左右,如此低动量的送风对室内主导气流无任何实际的影响。热源引起的热对流气流将污染物和热量带到房间上部,使室内产生垂直的温度梯度和浓度梯度;排风温度高于室内活动区温度,排风中的污染物浓度高于室内活动区的浓度。上下两区内部温度梯度和浓度梯度变化均很小,内部气流平和均匀。两个区域分层界面的高度取决于送风量、热源特性及其在室内的分布情况。在设计置换通风系统时,该分层界面应控制在人员活动区以上,以确保人员活动区内空气质量及热舒适性。人员活动区以上的区域则不需控制,从而达到节能的目的。

### 1.3 置换通风与传统的混合通风相比较

传统的混合通风是以稀释原理为基础的,而置换通风以浮力控制为目的。这两种通风方式在

作者简介:付晓晨,女,助理工程师,2015年毕业于沈阳建筑大学建筑与土木工程专业,现就职于中航规划飞机工程设计研究院。

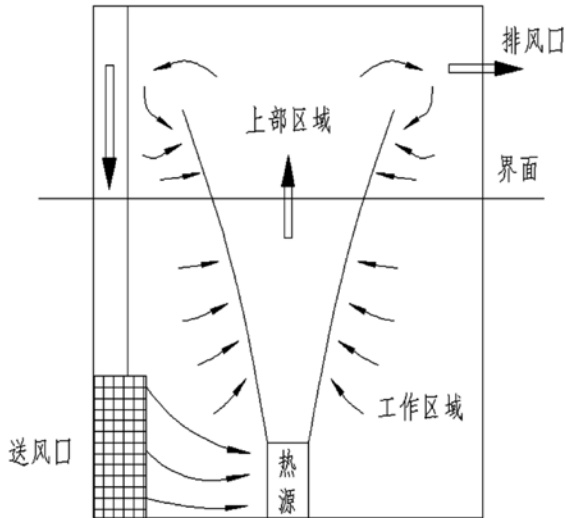


图1 置换通风热力分层图

设计目标上存在着本质的区别。前者是以建筑为本而后者是以人为本，因此在通风动力源、通风技术措施、气流分布等方面以及最终的通风效果方面等存在着一系列的差别，二者具体比较如表所示。

表1 置换通风混合通风比较表

内容	置换通风	混合通风
目标	工作区无污染，舒适性高	全室污染物稀释均匀并被排除，温湿度均匀
动力	浮力控制	流体动力控制
机理	气流扩散浮力提升	气流强烈掺混
流态	送风区为层流区	回流区为紊流区
分布	温度/浓度分层	温度/浓度上下均匀
措施	(1)下侧送上回 (2)小温差低风速 (3)送风紊流小 (4)风口扩散性好	(1)上送下回 (2)大温差高风速 (3)风口紊流系数大 (4)风口掺混性好
效果	消除工作区污染物 空气品质接近于送风	消除全室污染物 空气品质接近于回风
经济	采用自然通风冷却 时间可以更长， 可大幅度降低能耗	利用自然通风冷却时间 短，能耗大

综上所述，置换通风是一种通风效率高，既可带来较高空气品质又节能的有效通风方式，在厂

房及高大公共建筑通风空调方面值得大力推广。

## 2 置换通风空调系统应用实例

置换通风技术在国际上已普遍采用，它优先用在工业厂房以解决室内的污染物控制问题。在既有温湿度要求，又需大量排除污染物的高大工业厂房尤为适合。

### 2.1 厂房基本情况介绍

该油箱工段车间位于东北某装配厂房内，建筑面积 $34 \times 30.5$  (m)，屋架结构，下弦高度11.5m。该车间的功能主要是对飞机机翼的油箱进行涂胶处理，生产过程中采用的密封胶、丙酮、酒精、汽油等会产生刺鼻的气味。油箱高度小于2m，故一般的工作区域高度就在2m以下。车间内余热主要是工作人员、灯光及机械设备产生的。工艺要求房间温度为 $18 \sim 28^\circ\text{C}$ ，湿度为 $30 \sim 80\%$ 。所以本专业既需要保证油箱工段车间的温湿度，又需要很好地排除室内的刺激性气味。

### 2.2 置换通风空调方案

油箱工段空调系统采用全空气一次回风空调系统，空调末端采用一台组合式空气处理机组，由一台单独的风冷螺杆式冷水机组提供冷源，热源由厂区动力站提供。

由于该车间工作高度即人员活动区为2m以下区域，只需满足此高度内空间的温湿度要求，并将污染区内的刺激性气体排除即可满足舒适性空调要求，达到节能与人体舒适的双重目的。故此对本车间设计了置换通风空调系统，下部侧送风上部回风。房间空调系统布置如图2所示：布置在房间两侧的送风总管各沿柱子下拉6根送风管，将处理过的新鲜空气送至安装在地面上的圆柱形置换送风口，回风口均匀布置在房间顶部。

### 2.3 置换送风口的设计

如果仅从室内舒适性出发，排风量只需考虑人员活动区（2m以下）的高度范围。但由于油箱工段车间有刺激性气味产生，必须保证一定的风量才能起到带走室内污浊空气的作用，故本设计换气次数5次/h是按房间的整体高度计算的。此举表面看来似乎削弱了置换通风节能的初衷，但由于传统的混合通风中送风温差很大（舒适性空调 $\leq 15^\circ\text{C}$ ），而置换通风的送风温差一般取 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 即可，所以同等送风量的基础上，置换通风所需要的冷热量大大减小。无论从送风末端还是冷热

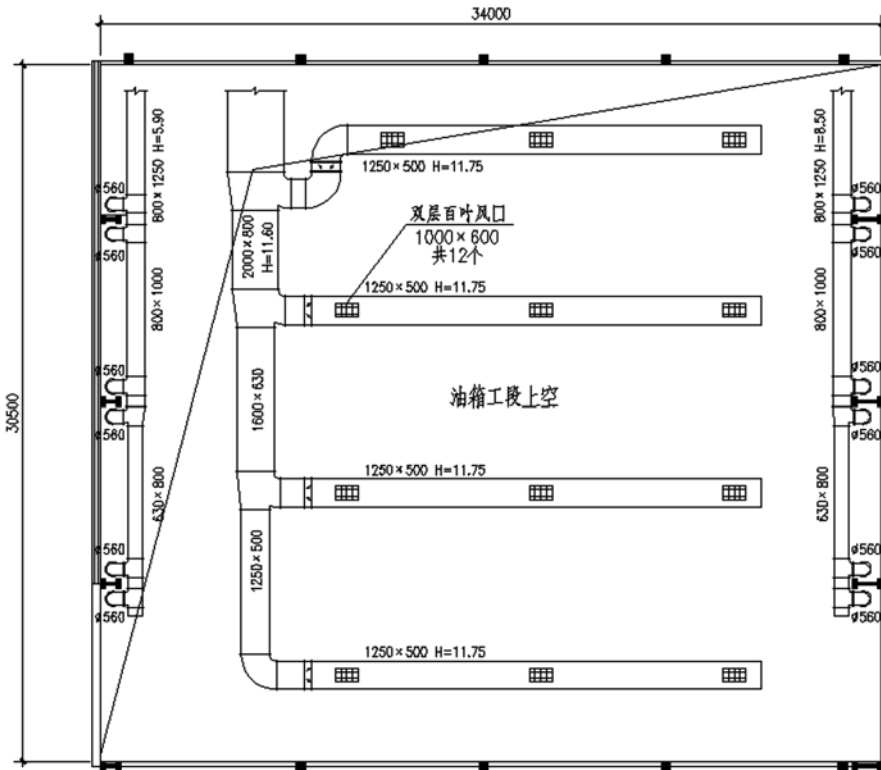


图2 油箱工段上空空调平面图

量大，送风温度低，存在严重的能源浪费。置换通风以人员活动区为控制对象，为了避免冷风感送风温度通常 $\geq 18^{\circ}\text{C}$ ，大幅度减小了风量及冷量的投入，节能效果显著，在工业厂房通风空调中值得大力推广。

参考文献

[1] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 第二版(上册). 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
 [2] 李强民. 置换通风的原理、设计及应用 [J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 43-48.  
 [3] 韩海涛, 张吉光. 置换通风与室内空气质量 [J]. 制冷与空调, 2004, 22(4): 32-35, 47.

源来说都起到了不小的节能作用。

如图3所示，油箱工段车间可以在左右两侧的柱边布置12个圆柱形置换送风口，每个送风口送风量为 $5000\text{m}^3/\text{h}$ ，最大送风与室内温差为 $5^{\circ}\text{C}$ 的情况下，最大送风穿透深度为17m（供热模式），可以完整地覆盖整个房间的空调区域。

圆柱形置换送风口高约1.1m，安装在地面以上300mm处。送风口1/2高度处设有手动调节阀，可通过阀板的启闭来完成供冷、供热模式的转换。

3 结语

工业厂房普遍具有面积大，高度高的特性，传统的空调设计采用混合通风，风

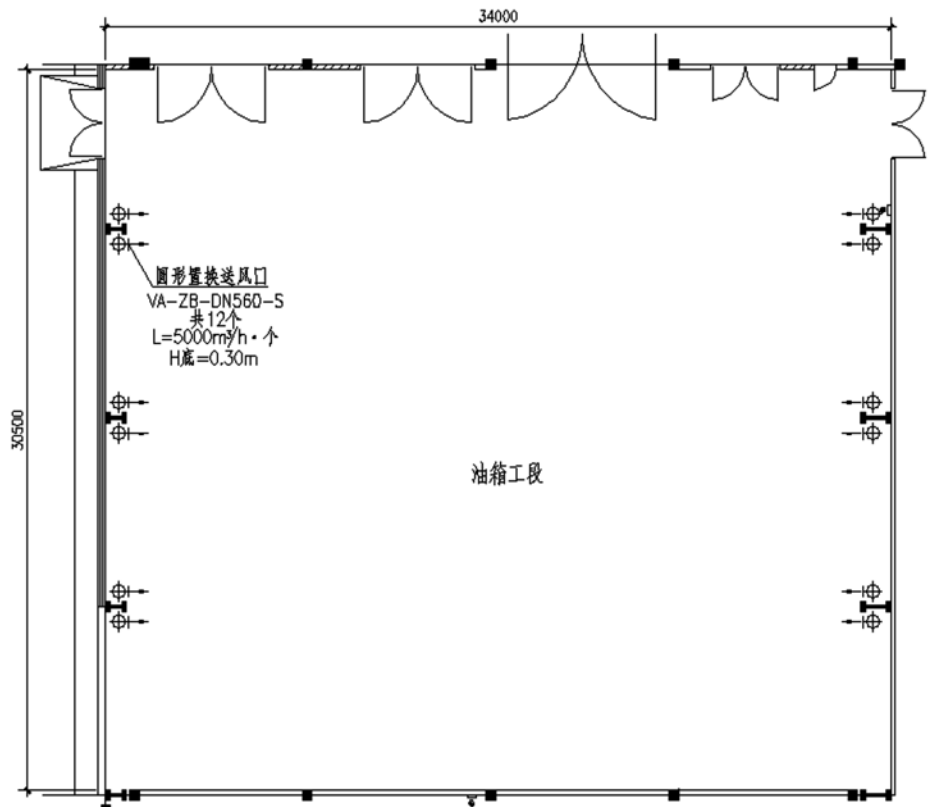


图3 油箱工段置换送风口布置图



# 中国航空规划设计研究总院有限公司 建筑设计研究院

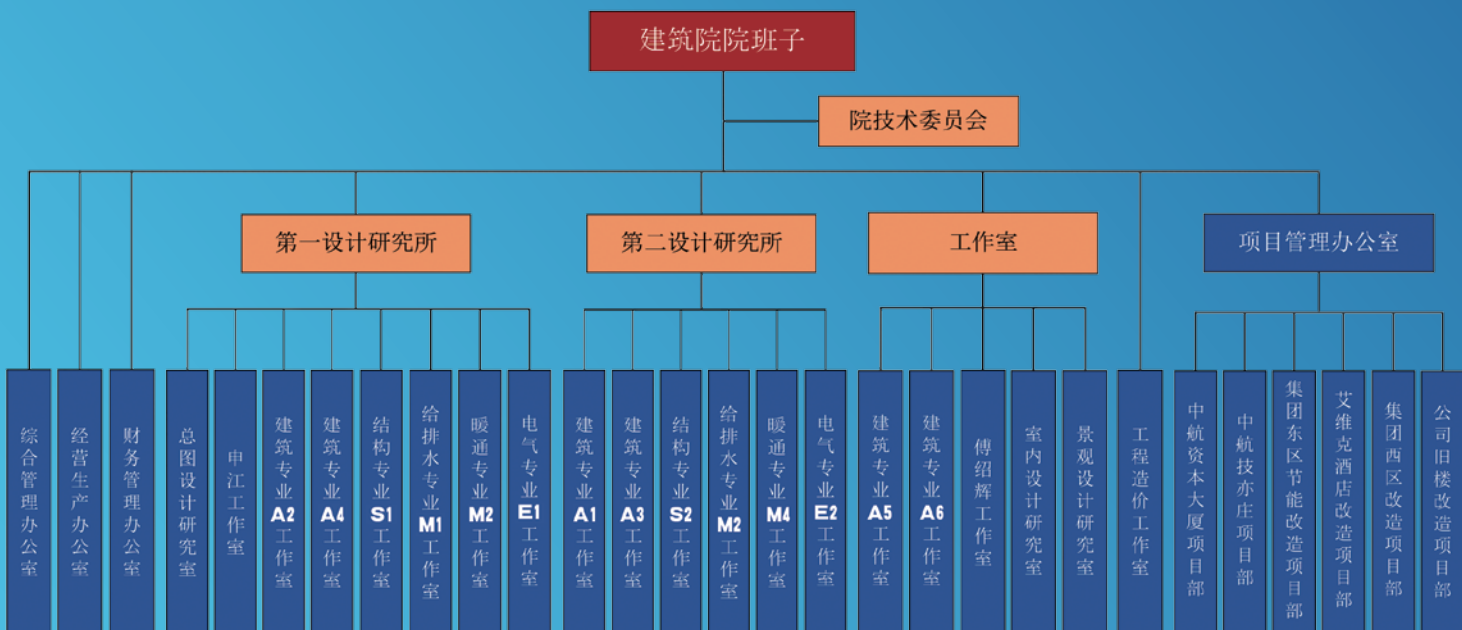
中航规划建筑设计研究院（简称“中航规划建筑院”）隶属于中国航空规划设计研究总院有限公司（简称“中航规划”），是公司在民用建筑领域的专业团队，一直以来秉承公司的“创新成就梦想 实干铸就辉煌”核心价值观，通过精细化设计和专业化管理，为社会和客户奉献了众多的建筑精品。

中航规划拥有国家最高等级、最广领域的行业资质，1986年首批成为国家甲级设计院，2007年首家获得建设部颁发的工程设计综合甲级资质，1996年通过ISO9001质量体系认证，2006年通过建设工程总承包的质量、环境和职业健康安全管理体系认证，拥有城乡规划甲级资质、工程咨询甲级资质、工程造价咨询甲级资质、施工总承包资质、对外承包工程资格等，拥有硕士学位授予权、博士后科研工作站。

中航规划建筑院多年来培养了大批优秀咨询设计和项目管理人员，技术力量雄厚、人才梯队完善，现有技术人员200余人，涵盖11个专业，即总图、建筑、景观、室内、结构、给排水、暖通、强电、弱电、技术经济及项目管理专业，其中：国家一级注册建筑师23名，一级注册结构师13名，注册公共设备工程师6名，注册电气工程师3名，注册造价工程师6名，一级注册建造师3名，中级职称以上人员比例达到了65%。

中航规划建筑院承接的民用建筑项目主要涵盖五大业务领域，包括：科技博览建筑、文化教育建筑、酒店办公建筑、体育健身建筑、地产人居建筑等，已建成的如：河南艺术中心、中国杭州低碳科技馆、中国国家话剧院、内蒙古科技馆新馆及演艺中心、贵阳奥林匹克体育中心、绍兴奥林匹克体育中心、中关村国家自主创新示范区展示中心等，这些建筑精品作为标志性建筑已经成为凝固的艺术在当地熠熠生辉。随着一个个民用建筑项目的设计完成到建成使用，中航规划建筑院已经从单纯的工程咨询设计单位转变成成为工程建设领域的价值集成商，工程总承包业务持续稳定发展。

中航规划建筑院将持续以“提供客户满意的产品和服务”为己任，用实力和智慧为客户创造更高的价值，为社会奉献更多的建筑精品。



2016年第5期（总第127期）  
2016年10月出版



成都博物馆新馆