

航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2013年第1期 总第107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
主办单位 中国航空规划建设发展有限公司

内部资料 免费交流

新起点

Y20首飞，J15成功着舰，一件件抓人眼球，令国人无比自豪的航空盛举在2012年的中国完美上演。中国航空工业在砥砺半个多世纪之后，终于以一飞冲天的英姿展现在世界的面前，告诉世界，中航工业开始了新的征程。在我们欢欣鼓舞的时刻，伴随着共和国航空工业飞跃发展的航空建设也发生了巨大的变化。先进的装配生产线、数字化的仿真手段、大空间精密空调空间、大跨度的钢结构厂房、绿色低碳的智能建筑等，都为飞速发展的中国航空工业提供了强实的基础条件。一个个充满航空文化的产业园区，一幢幢装满先进装备的生产厂房和试验室都凝聚着航空建设者们的智慧和汗水。建设先进的航空工业，打造体系完善的航空产业是广大航空工程规划、设计和建设者们孜孜追求的梦想。

我们正站在新的历史起点，以《航空工程建设》的新面孔展示在航空人面前。我们起步于《设计与科研》，把航空工程建设中设计领域的专业知识、工程案例和成功经验展示出来，为航空工业建设打下了基础，新技术、新设计方法等都能在其中寻到踪迹。我们发展于《咨询·设计·研究》，伴随航空工业的发展，我们更加注重前期咨询，诸如行业动态研究、产业发展规划研究、生产效率研究、体系化建设研究等高端咨询内容都在此显现，绿色低碳的技术应用也能在此找到案例。今天，我们延承了航空的腾飞，我们赶上了航空的开放与辉煌。同时，我们也在适应着航空建设模式的转变，以更加国际化、更加科学化的模式推进航空工业的建设与发展，以设计为龙头，以一体化的工程咨询和建造为核心，已成为我国航空工业建设发展的新模式，在这历史的新起点上，《航空工程建设》将以更加开放的姿态，更加务实的作风，围绕科技航空、绿色航空、人文航空的理念去规划、设计和建设航空工业。

《航空工程建设》是广大工程设计咨询和建设领域科技人员展示学识，传播知识和交流认识的家园，不仅为五十万航空人提供平台，也为全国各有志于航空发展的人士提供了交流平台。在新的征程上，我们将秉承传播知识、打造平台、成就人才的办刊宗旨，为建设大航空、强航空，实现“航空报国，强军富民”的崇高目标而努力。

总工程师
编委会主任



航空民品市场信息

我国首款大运机鲲鹏展翅

1月26日,我国自主发展的运-20大型运输机首次试飞取得圆满成功。运-20代号“鲲鹏”,由西飞集团主要研制,该型飞机首飞后将按计划继续开展相关试验和试飞工作。

运-20是我国依靠自己力量研制的一种大型、多用途运输机,可在复杂气象条件下执行各种物资和人员的长距离航空运输任务。运-20大型运输机的首飞成功,对于推进我国经济和国防现代化建设,应对抢险救灾、人道主义援助等紧急情况,具有重要意义。

C919大型客机项目冲压空气涡轮系统工作包协议签署

中国商飞公司与美国联合技术航空航天系统公司(UTAS)近期签署了C919大型客机项目冲压空气涡轮(RAT)系统工作包协议。C919项目电力系统共有电源系统和RAT系统两个工作包,电源系统工作包已于2012年8月完成签署,此次签署标志着C919项目电力系统的工作包签署全部完成。

国内首个无人机研发平台在镇江启动

近日,国内首个无人机先进技术研发平台在江苏省镇江市新区航空航天产业园全面启动。这标志着镇江市在加速发展航空产业,尤其是强化研发能力、提升产业竞争力方面又迈出了坚实一步。据了解,该平台在为镇江及周边地区提供无人机研发、设计、检测等服务的同时,也将对民用无人飞机的共性技术、关键性技术进行研究开发,最终形成具有自主知识产权的民用无人机设计、制造和作业能力。

民航通航市场信息

促进民航业建设 推动航空经济发展

国务院办公厅近日印发《促进民航业发展重点工作分工方案》,将《国务院关于促进民航业发展的若干意见》的各项目和任务进行了细化和分解。其中主要内容有:加强机场规划和建设,着力把北京、上海、广州机场建成功能完善、辐射全球的大型国际航空枢纽,培育昆明、乌鲁木齐等门户机场,增强

沈阳等大型机场的区域性枢纽功能;努力增强国际航空竞争力,统筹研究国际航空运输开放政策;鼓励国内有实力的客、货运航空企业增强国际竞争力;完善国际航线设置,积极参与国际民航标准的制定;持续提升运输服务质量,努力提高航班正常率,完善大面积航班延误预警和应急机制,规范航班延误后的服务工作;着力提高航空安全水平,严格落实生产运营单位安全主体责任,推行安全隐患挂牌督办制度和问责制度;切实打造绿色低碳航空,重点实行航路航线截弯取直,提高临时航线使用效率;积极支持国产民机制造,鼓励国内支线飞机、通用飞机的研发和应用;引导飞机、发动机和机载设备等国产化。

低空空域划分管理办法有望年内出台

目前,低空空域划分和管理办法已拟定完毕,正在相关部门走审批程序,有望年内出台。此外,通用航空机场建设管理办法也已拟定完成,正在审批当中,今年出台的可能性也很大。

四川民营矿企亿元收购法国丽夏飞机

2月18日,一家名为黑马矿业的四川民营企业以1500万欧元,约合1.25亿元人民币在法国设立独资企业后,成功收购了法国飞机制造商丽夏飞机(Lisa Airplanes)70%的股份和核心资产。

新疆机场集团2013年计划迁建、改扩建9个机场

1月24日,新疆机场集团召开了2013年工作会议。在本次会议上,有关人员表示,在机场建设方面,乌鲁木齐新机场选址工作已经启动,今年计划迁建、改扩建的机场一共9个。二季度将开工建设富蕴、且末机场迁建工程。此外,莎车、楼兰、塔中机场新建工程以及库尔勒、和田、哈密机场改扩建工程正处于报批阶段。

山东省潍坊机场迁建列入2013年潍坊市重点项目工程

2月18日,2013年潍坊市十大工程百个重点项目确定,其中,潍坊市机场迁建列入今年十大重点工程。潍坊新机场计划在潍坊北部建设,占地6000-8000亩,计划总投资60亿元。

民用建筑市场信息

国务院通过重大科技基础设施建设中长期规划

原国务院总理温家宝1月16日主持召开国务院常务会议，讨论通过《国家重大科技基础设施建设中长期规划2012—2030年》。《国家重大科技基础设施建设中长期规划》明确了未来20年我国重大科技基础设施发展方向和“十二五”时期建设重点。此外，会议还要求健全协同创新和开放共享机制，加大投入力度，完善管理制度，全面提升重大科技基础设施建设水平和运行效率。

《绿色建筑行动方案》出台

国家发改委、住建部两部委近日出台《绿色建筑行动方案》。《方案》的主要目标包括新建建筑和既有建筑节能改造两部分。国家发改委有关负责人表示，《方案》将从八个方面保证绿色建筑行动防范的落实：一是强化目标责任，把贯彻落实方案的情况纳入政府和领导干部考核体系；二是加大政策激励，研究制定有利于绿色建筑发展的财政、税收、金融、土地转让、容积率奖励等方面的政策；三是完善标准体系，对绿色建筑评价标准等的制修订工作提出具体时间要求；四是深化城镇供热体制改革，推行按热量计量收费，出台价格和收费办法，推进供热企业市场化运营；五是严格建设全过程监督管理，在建筑设计方案、施工图设计审查中增加绿色建筑，并与工程规划许可证、施工许可证发放挂钩，强化施工过程的监管；六是强化能力建设，加强绿色建筑评价标识体系建设，以及绿色建筑规划、设计、施工、评价、运行等人才队伍建设；七是加强监督检查，开展绿色建筑专项督查；八是开展宣传教育，提高公众对绿色建筑的认知度，倡导绿色消费理念。

两部门力推绿色建筑 建材行业迎来调整契机

2月21日，工信部与住建部相关司局联合行动，对北京和天津等地部分企业就促进混凝土和水泥产品结构调整、加快绿色建材发展、推进建材工业和建筑业节能减排等开展现场调研。调研意见认为，落实《绿色建筑行动方

案》在当前的重点就是引导高性能混凝土及高强钢筋的发展利用。

南沙新区城市规划纲要发布

1月29日，广州市规划局公布了《广州南沙新区城市总体规划（2011—2030）》纲要中期成果，对南沙城市蓝图进行了初步勾勒。规划纲要确定了南沙新区近期重点发展项目将主要集中于产业项目、交通市政设施和公共设施三个领域。

民用工业市场信息

生物医药将进入快速发展通道

国务院日前颁布了《生物产业发展规划》。《规划》指出，从2013—2015年，生物医药产业产值年均增速将达到20%以上，要推动一批拥有自主知识产权的新药投放市场，形成一批年产值超百亿元的企业，提高生物医药产业集中度和在国际市场中的份额，大力开展生物技术药物创制和产业化。《规划》还指出，到2015年，生物医学工程产业年产值将达到4000亿元，要突破一批核心技术，培育一批高端化发展的生物医学工程制造企业。

能源环境市场信息

国务院正式印发能源发展“十二五”规划

1月1日，国务院正式印发《能源发展“十二五”规划》。《规划》提出的2015年能源发展的主要目标包括：实施能源消费强度和消费总量双控制；适度超前部署能源生产与供应能力建设；优化能源结构；加快建设山西、鄂尔多斯盆地、内蒙古东部地区、西南地区、新疆五大国家综合能源基地；加强生态环境保护；全面实施新一轮农村电网改造升级，实现城乡各类用电同网同价；推进能源体制机制改革。主要任务方面，《规划》称，要加强国内资源勘探开发；推进能源高效清洁转化；推动能源供应方式变革；加快能源储运设施建设；实施能源民生工程；控制能源消费总量；深化能源体制改革；提升能源科技和装备水平；深化能源国际合作。规划还提出了健全财税金融政策，改进能源投资管理，强化能源行业管理等保障措施。

• 中标项目展示



中航规划建设长沙设计研究院有限公司：湖南博泰航空材料厂房项目
 建筑面积：6万m² 投资：5亿



中航规划建设长沙设计研究院有限公司：
 长沙经济开发区长龙湾安置保障房（咨询设计）
 规划面积：56亩 建筑面积：17.5万m²



中国航空国际建设有限公司：
 杭州西溪深国投商业中心
 建筑面积：17万m² 投资：9亿



中国航空国际建设有限公司：
 北京某部队工程项目（咨询设计）
 建筑面积：4.8万m² 投资：1.4亿



中国航空国际建设有限公司：
 深圳公安局警犬基地
 建筑面积：2万m² 投资：1.2亿



民用建筑设计研究院：
唐山金融中心
建筑面积：13.1万m² 投资：8亿



民用建筑设计研究院：
大连钻石港湾房地产项目（咨询设计）
建筑面积：72.6万m² 投资：40亿



飞机工程设计研究院：
江苏南京某厂航电大楼
建筑面积：4万m²



飞机工程设计研究院：
山西青云通用航空基地
规划面积：4000亩 一期建设项目：7万m²



航空动力工程设计研究院：
贵州凯阳航空发动机修理厂房项目
建筑面积：2万m² 投资：0.88亿

• 中标项目展示



航空动力工程设计研究院：
北京钢研高纳涿州工业园项目（咨询设计）
建筑面积：3.4万m² 投资：1.7亿



航空机载系统工程设计研究院：
长春生物制品研究所生物医药产业化基地（一期）建设项目
建筑面积：7.7万m² 投资：10亿



航空机载系统工程设计研究院：
北京同仁堂亳州药材前处理及物流项目
建筑面积：5.8万m² 投资：1.5亿



航空机载系统工程设计研究院：
航天五院超大型航天器建设项目
建筑面积：10万m² 投资：14.2亿



航空机载系统工程设计研究院：
北京嘉林药业工业厂房及配套设施建设项目（咨询设计）
建筑面积：4.3万m² 投资：7.5亿



能源与环境工程设计研究院：
山东陵县城城区集中供热项目（咨询设计）
投资：3.2亿元



民航工程设计研究院：
白俄罗斯明斯克国家机场改扩建项目(总承包)
投资：6亿美元



民航工程设计研究院：
海航海口2号飞机机库
建筑面积：2.8万m² 投资：2亿



民航工程设计研究院：
厦航福州基地飞机维修库
建筑面积：3.7万m² 投资：2亿



规划咨询研究院：
大兴生物医药产业基地永旺公园景观设计
规划面积：28万m²



规划咨询研究院：
中关村自主创新示范区永丰新材料产业基地城市设计
规划面积：496万m²



规划咨询研究院：
中国工程物理研究院某所区建设（规划）
建筑面积：8.3万m² 投资：9亿

岩土工程专业

“北京地铁大兴线工程测量” 获得2012年全国优秀测绘工程奖金奖

由中航工业勘察院历时3年完成的“北京地铁大兴线工程测量”获得全国优秀测绘工程金奖。此奖项是由国家测绘地理信息局和中国测绘学会共同颁发的，是全国测绘行业的最高奖项。

大兴地铁工程测量涉及控制网测设及复测、施工测量检测、贯通误差测量、辅轨基标测量、竣工验收测量、设备安装及装修辅助测量以及委托方要求的与本工程有关的其他测量等工作，与常规测量项目相比，具有时间紧、数据量大、工程现场情况复杂、作业条件差、工作强度高、测量精度高、实时性强等特点。勘察院全体测绘专业人员在项目经理李维功同志的带领下，开拓创新，克服各种技术难题，用3年时间圆满完成了原定5年的测量工作。因此，这次获奖是对全体测绘人员的最好奖励。



工艺专业

工艺专业召开2012年度总结及技术交流年会



1月10日，以“强化研发，促进咨询能力提升”为主题的2012年度工艺专业总结及技术交流年会在公司召开。在本次年会上，执行总工艺师郭志海代表工艺专业委员会从总体情况、技术质量管理、技术科研管理和团队建设四个方面总结了工艺专业2012年度的工作。总体来说，在2012年度，工艺专业较好的完成了公司重大（A类）项目、型号工程可研、初设及施工图设计任务，完成研发课题12项、业务建设16项。随后，来自工程技术研究院的张宇飞院长做了《公司技术创新工作的思考》的专题报告，来自实体院的几位员工也围绕年会主题，并结合研发课题及本单位核心技术和研发思路，代表各院做了主题演讲。最后，本次年会还表彰了2012年度业绩优秀、进步较快、积极参加工艺专业各项活动的12名“青年才俊”。

规划专业

规划专业召开2012年度总结及技术交流年会

1月29日，规划专业召开了2012年度总结暨技术交流会。本次学术交流年会按不同交流内容划分为五个板块，分别从前沿技术与创新探索、关键技术与总结提升、优秀规划与工程设计、全价值链技术与应用推广、知识普及与技术交流五个方面展开交流，展示了规划专业一年来最新的研究成果及设计体会。在年会上，公司首席专家、总规划师李守旭指出，国家的总体经济形势及城镇化发展态势为公司的规划总图业务发展创造了良好的外部环境，规划总图专业应抓住发展机遇，切实提升专业水平、扩大业务增长。总规划师徐晓东针对交流汇报的专题特点、个人临场发挥对每个发言做了精彩、专业的点评。他认为通过年底的总结交流活动，增进了不同单位之间学术、业务方面的交流，对规划总图专业的总体业务水平提升大有裨益。

建筑专业

建筑专业召开2012年度总结及技术交流年会

1月22日，建筑专业召开了2012年度工作总结暨业务交流会。在本次年会上，公司执行总建筑师陈海风代表技术委员会作了2012年度工作总结。在2012年度，建筑专业共完成施工图项目百余项、重大项目单体约30余项、全价值链项目共20余项、研发课题4项、业务建设7项。2013年，建筑专业给自己制订的目标是：把研发课题、业务建设与实际工程的BIM应用结合起来，针对初设、施工图中间图、施工安装详图的建模深度及质量控制流程作进一步的规定，真正发挥BIM提高效率、增加价值的作用；力争实现绿色设计的三个突破：从绿色设计认证到绿色运营认证的突破，建筑类型的突破，从单体到群体、民用工业、公建到住宅、示范工程到全面推动，部分省市、地域的绿色建筑“零”的突破。

给排水专业

给排水专业召开2012年度总结及技术交流年会

1月23日,给排水专业召开了2012年度总结暨业务交流会。在会上,给排水专业总师王锋首先对2012年第三季度的施工图审查意见、设计回访等发现的问题进行了质量剖析,讲解了2013年施工图外审年度目标,并总结了2012年的工作。本次交流会的内容主要包括四个方面:一是讨论了全价值链项目服务过程中应注意的问题;二是推广介绍了2012年结题的研发课题;三是介绍了信息化技术在一些项目中应用;四是介绍了一些重大项目。本次会议还表彰了2012年度给排水专业在研发课题、业务建设、论文发表、专业交流等方面作出突出贡献的人员,公布了在建筑学会获得一、二等奖的项目组成员名单。



暖通专业

暖通专业召开2012年度总结及技术交流年会



1月15日,暖通专业召开了2012年度总结及技术交流年会。会议将暖通专业2012年主要工作成果归纳为业务建设、研发课题、BIM应用、现场经验、发表论文以及设计项目六个部分,分别由19位有突出成绩的主讲人进行展示交流。专业总师肖武代表暖通技术委员会总结了2012年度暖通专业的工作,对在研发及业务建设、培训及对外交流、设计回访及外审意见分析、项目技术管理、职称评定以及技术委员会工作六个方面取得的成绩给予了充分的肯定,并明确2013年为加强研发工作的开展,围绕全价值链推动业务建设工作、推进BIM工作的暖通部分、制定专业人才梯队框架建设和培养计划、细化统一技术措施和提高设计水平等五个方面的工作重点。

动力专业

动力专业召开2012年度总结及技术交流年会

1月16日,动力专业召开了2012年度工作总结及技术交流会。原动力专业总师杨杰对2012年度动力专业技术管理工作进行了回顾和总结,对评选出的研发及业务建设优秀项目、BIM工作先进小组、施工现场服务先进团队等进行了表彰。新任动力专业总师李纲从动力专业人力资源、发展方向等方面进行了分析,并对2013年专业工作做了初步部署,他希望动力专业继续加强专业队伍建设,加大专业培训力度,夯实基础,提高施工图设计质量,助力公司EPC及全价值链项目腾飞。

电气专业

电气专业召开2012年度总结及技术交流年会

1月15-16日,电气专业召开了2012年度技术交流总结年会,本次年会主题为“关注绿色节能,做好电气设计”。在本次年会上,电气专业总师丁杰代表电气专业技术委员会从电气专业总体情况、技术质量管理、现场反馈等几个方面总结了2012年电气专业的工作。总的来看,电气专业在2012年度较好地完成了公司重大项目可研、初设、施工图设计以及后期现场配合任务,研发课题本年度完成2项,业务建设完成11项。最后,丁总希望电气专业全体员工在2013年继续努力工作,不断地克服困难,紧抓安全、质量、节能问题不放松,做好每一个项目,使之成为精品,同时要注意交流学习,不断提高专业技术水平,并根据项目实际和现场反馈,细化设计,发现问题、解决问题,进一步提高效率,提升水平。本次大会还颁发了电气专业2012年度业务建设奖、优秀论文奖及研发课题奖。

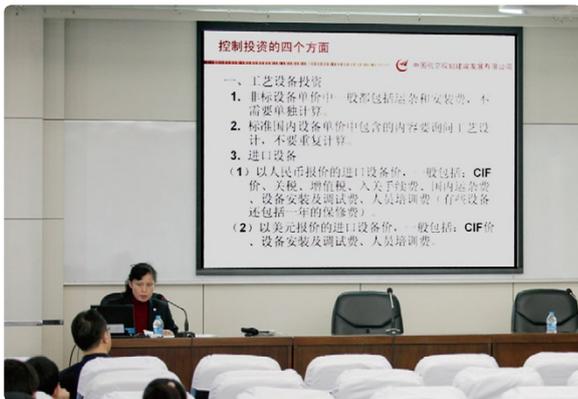
电气专业

公司电气专业人员参编的国家规范获工程设计一等奖

中国机械工业勘察设计协会日前颁发了2012年度机械工业优秀工程勘察设计奖,由我公司高凤荣、丁杰参编的国家设计规范《供电系统设计规范》,获得工程设计一等奖。

工程造价专业

工程造价专业召开2012年度总结及技术交流年会



1月24-25日,工程造价专业召开了2012年度技术交流评比暨总结年会。在会上,专业总师王玉平代表专业技术委员会从课题和业务建设、论文发表、重大项目投资管理、团队发展、存在的不足及2013年的重点工作六个方面做了总结,重点对《航空建设项目投资估算和设计概算编制办法》与原航标的差异作了进一步的讲解,同时王总还针对专业现状进行分析,提出了本专业目前存在的六个方面的不足。他针对团队发展及存在的不足,提出技术委员会2013年的几项重点工作:全价值链项目动态投资控制、专业数据库建设、专业OA平台建设和对外调研交流等。

在本次会上,来自一院、二院、三院、四院、六院的专业副总师及技术骨干分别结合2012年度完成的课题、业务建设、重大项目或自身项目管理经验总结等进行了讲解和分析。

工程管理专业

工程管理专业召开2012年度业务培训及技术交流年会

1月21日,由公司航空业务部与工程管理专业委员会主办的全价值链工程总承包业务培训及交流会在公司举行,与项目管理相关的120余人参加了本次年会。在本次会议上,公司副总经理沈顺高围绕“如何做好工程总承包转型、提高项目收益”的主题,结合目前工程总承包项目运作中存在的问题,对做好管理工作,强调项目经理核心位置,加强工程前期策划,抓好技术质量和安全管理,正确处理与业主的关系,严格控制工程变更,控制好合同、招投标、竣工交付、结算、项目部成本等方面提出了要求。公司总工程师陆国杰也讲解了打造公司工程总承包业务核心能力的思路和要求。工程管理专业总师米敬明总结了2012年本专业技术管理情况,针对项目部技术质量管理问题进行了剖析,并提出了解决对策。来自中建政研的李君和王荣年两位专家分别对“EPC项目质量管理”和“落实《条例》规范招标投标操作”的内容进行了讲解。部分项目经理就《建设工程常见典型质量问题与防治范例》、《项目部规章制度汇编》、《项目管理工程档案资料收集整理归档要点》、《飞机强度试验承力地板、承力柱施工工法》等业务建设进行了交流。



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
主办单位 中国航空规划建设发展
有限公司

顾问委员会

主 任 陈元先
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 姜 力
胡海银 常洪亮 梁相文

编辑委员会

主 任 陆国杰
副 主 任 刘子彦
委 员 (按姓氏笔画排序)
丁 杰 卜国磊 马培贤
王玉平 王 坚 王笃礼
王 锋 朱 丹 向立学
米敬明 陈丹湖 李守旭
李 纲 肖 武 杨 杰
陈海风 张海飞 金来建
周 桂 贺宏斌 唐永堃
郭志海 徐晓东 黄春晖
傅绍辉 葛家琪 魏 旗

总 编 陆国杰
主 编 陈海风
执行主编 王 蕊
责任编辑 冯志军
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 cmc_z@avic-apc.com
印 刷 北京盛世双龙印刷有限公司
电 话 (010)62038276 62038235
传 真 (010)62038235
封 面 成都飞机设计研究所新区
科研楼

CONTENTS

目 录 2013年第1期 总第107期

岩土工程

- 02 锚杆施工过程中常遇到的问题及对策 马永琪
06 北京地区暴雨工况下土钉墙破坏模式分析 李建光

研究与探讨

- 10 基于Plant Simulation的航空综合机加厂房布局仿真研究
张 超 李 慧 田 恺
18 民用机场航空业务量预测的探讨 王锋刚 王勇传
23 高大洁净厂房分层净化CFD模拟与节能性分析
董秀芳 肖 武 赵 彬

新兴产业咨询

- 30 中外航空发动机产业合作的制约因素与对策研究 张 波
36 基于成本的飞机总装模式选择模型研究 曹珺雯 王明珠
41 北京市新机场与航空都市区未来发展规划研究
——以北京新航城为例
胡赵征 李守旭 郭璟琮

工程设计

- 49 索穹顶整体张拉成型模型试验研究
葛家琪 张国军 王 树 张曼生 张奇铭 黄季阳 刘鑫刚
58 卢旺达基加利会展中心大跨度单层网壳结构设计
裴永忠 林 涛 汤红军 李 晶 朱 丹

锚杆施工过程中常遇到的问题及对策

■ 马永琪 「岩土工程」

摘要: 本文简单叙述了锚杆在工程中的作用机理,重点阐述质量控制要点,对常见的问题给出正确的解决思路和办法。

关键词: 锚杆; 成孔; 注浆; 张拉锁定

1 概述

锚杆主要应用于高边坡支护、深基坑支护,锚杆施加预应力是对边坡、基坑坡体的主动支护。锚杆施工质量直接决定了支护结构的稳定性,在多数发生事故的桩锚支护体系中,锚杆拉力不足是重要因素。

2 锚杆作用的机理

岩土锚固技术是通过埋设在岩土体中的锚杆,将支护结构与岩土体紧紧地联锁在一起,依赖锚杆与岩土体的抗剪强度传递支护结构的拉力或使岩土体自身得到加固,以保持支护结构和岩土体的稳定。

锚杆锚固段的传力机理是岩土锚固工程设计中的关键问题。现行有关设计规范和 standards 均采用剪应力均匀分布假设进行设计,但这种设计假设与锚杆受力的实际情况不相符合。国内外学者对锚杆锚固段传力机理的大量研究表明,锚杆

锚固段的剪应力分布是与岩土体的性质以及锚杆所受拉力的大小密切相关的。就普通拉力型有粘锚杆而言,在同一种岩土体介质中,当荷载相对较小时,剪应力的最大值在锚固段的顶端。随着荷载的增大,锚固段顶端的剪应力超过锚杆与岩土体的界面抗剪强度,剪应力的峰值向锚杆深处转移,以渐进方式发生滑动并改变粘结剪应力的分布。

3 关于锚杆的自由段

土层锚杆是一种埋入土层深处的受拉构件,它一端与工程构筑物相连、另一端锚固在土层中,整根锚杆长度分为自由段和锚固段。自由段是指将锚头处的拉力传至锚固体的区段,其功能是对锚杆施加预应力并保证锚杆体在滑移面内土体中无剪应力分布;锚固段是指水泥浆体将预应力筋与土层粘结的区段,其功能是通过锚固体与土层的粘结摩阻作用或锚固体的承压作用,将自由段的拉力传至土层深部。一般来说,锚杆自由段 L_f 是根据基坑土体滑裂面计算出来的,如图1所示。

施加锚杆预应力必须要有自由段,没有自由张拉段就不能被称作预应力锚杆。自由段长度的

作者简介:马永琪,男,研究员,1984年毕业于长春地质学院水工系工程地质专业,现就职于中航勘察设计研究院有限公司。

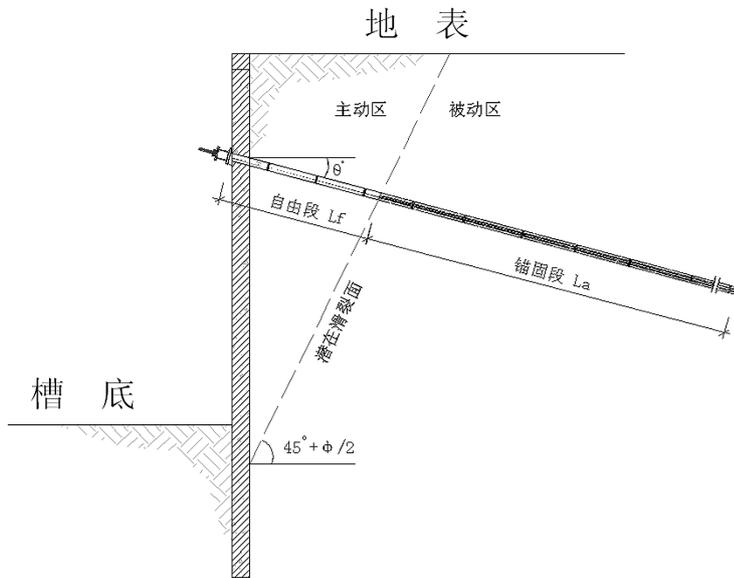


图1 土层锚杆计算简图

确定对锚杆预应力的大小是非常关键的。考虑到基坑壁的总稳定及深部滑裂面稳定，自由段实际长度稍大于计算值，规范要求自由段不宜小于5m，且须超过滑裂面1~1.5m。如自由段设计过短，使得一部分锚固段处于滑裂面内主动区，在基坑开挖过程中，当坑壁在主动土压力作用下出现变形时，主动区内的锚固段将产生向基坑内方向的摩阻力，即负摩阻力，削弱了锚固效果，从而使预应力受到损失，引起松弛。

4 影响锚固段质量的因素

锚固段长度 L_a 一般根据锚固承载力来估算：

$$L_a = \frac{r_s \times N_u}{D \times \pi \times q_{sik}}$$

式中： q_{sik} 为锚固段与土体的粘结强度，与钻孔方法、土质性质（内摩擦角、抗剪强度、固结强度）、锚杆上覆土厚度、灌浆压力等有关，一般由试验确定，也可按规范取值； r_s 为分项系数， N_u 为锚杆设计承载力， L_a 为

锚固段长度， D 为锚固段直径。

通过上式明显看出，要提高锚杆承载力，可加大 D 值或增大 q_{sik} 值；据工程实践及大量实验表明，锚固长度 L_a 并不与 N_u 成线性关系，以粘性土为例，当 L_a 大于10m后， N_u 值的增幅就很小。

目前，提高锚固力主要靠在锚固端头扩体和二次灌浆技术。通过扩体，不仅增加了锚固段表面积，从而达到增加系载力的目的，更重要的是扩大头前端土体所给予的阻力及端承载力，这时计算锚固力，往往端承载力占主要部分。另外可用二次、三次高压灌浆法提高锚固力。灌浆可通过渗透挤压作用增加锚固体周围土体的抗剪强度，增加了锚固段的表面积，一般可提高锚固力二倍以上。

施工工艺是影响锚固段抗拉承载力的另一个重要因素，当干成孔质量无法保证时，优先考虑跟管钻进工艺，而注水泥浆钻孔、二次高压劈裂注浆则有其适用条件，应谨慎采用。

5 如何保证锚杆张拉的锁定值

锚杆预应力损失使主动作用力减少，增加支护结构的变形。预应力变化的原因很多，型钢腰梁变形、锚具松动、钢绞线松弛、土层蠕变、

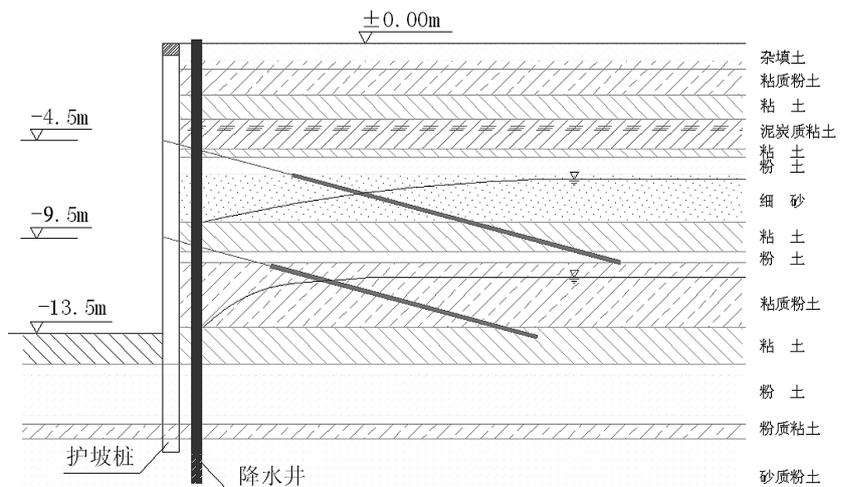


图2 基槽支护及地层剖面示意图

表1 基槽东侧不合格锚杆拉力统计(Nu=350kN)

序号	极限拉力值(kN)	与设计值比(%)	序号	极限拉力值(kN)	与设计值比(%)
1	262	74.9	11	250	71.4
2	169	48.3	12	250	71.4
3	180	51.4	13	250	71.4
4	250	71.4	14	250	71.4
5	250	71.4	15	272	77.7
6	263	75.1	16	190	54.3
7	250	71.4	17	241	68.9
8	250	71.4	18	231	66.0
9	250	71.4	19	210	60.0
10	250	71.4	20	272	77.7

表2 基槽西侧不合格锚杆拉力统计(Nu=350kN)

序号	极限拉力值(kN)	与设计值比(%)	序号	极限拉力值(kN)	与设计值比(%)
1	76	21.7	34	107	30.6
2	283	80.9	35	231	66.0
3	252	72.0	36	211	60.3
4	334	95.4	37	345	98.6
5	324	92.6	38	334	95.4
6	334	95.4	39	211	60.3
7	314	89.7	40	314	89.7
8	334	95.4	41	334	95.4
9	345	98.6	42	345	98.6
10	324	92.6	43	252	72.0
11	334	95.4	44	272	77.7
12	314	89.7	45	345	98.6
13	334	95.4	46	324	92.6
14	334	95.4	47	211	60.3
15	345	98.6	48	241	68.9
16	91	26.0	49	138	39.4
17	91	26.0	50	231	66.0
18	200	57.1	51	272	77.7
19	18	5.1	52	293	83.7
20	190	54.3	53	262	74.9
21	180	51.4	54	252	72.0
22	180	51.4	55	283	80.9
23	149	42.6	56	241	68.9
24	190	54.3	57	314	89.7
25	169	48.3	58	272	77.7
26	190	54.3	59	211	60.3
27	128	36.6	60	314	89.7
28	169	48.3	61	169	48.3
29	345	98.6	62	211	60.3
30	334	95.4	63	272	77.7
31	169	48.3	64	252	72.0
32	334	95.4	65	283	80.9
33	97	27.7	66	211	60.3

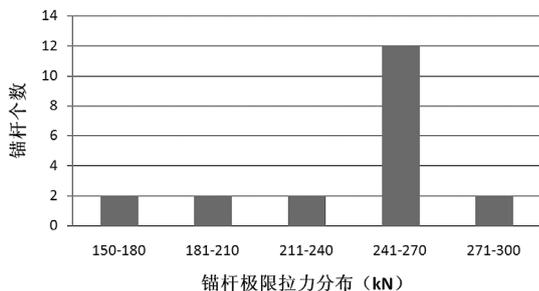


图3 基槽东侧不合格锚杆拉力分布图

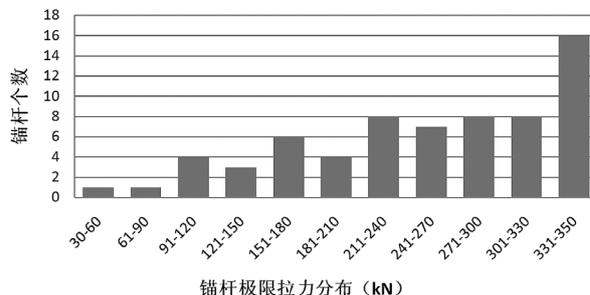


图4 基槽西侧不合格锚杆拉力分布图

基坑开挖卸荷、温度影响等均可引起预应力的变化。型钢腰梁变形的主要原因是安装方法不恰当、不牢固，锚具松动主要是由于锚具质量不合格、挖土机械碰撞等原因造成。

土层的蠕变对预应力的损失是比较重要的。经大量试验研究表明：蠕变随荷载的增加、拉力的增加而变大，拉力小时，蠕变较快趋于稳定，拉力很大时，不能收敛，其值可增大到2倍以上。因此许多学者提出当塑性指数 $I_p > 8$ 时，地层必须进行锚杆蠕变试验。预应力损失的控制方法，首先是适当提高锁定荷载，另一有效方法是对锚杆进行二次张拉。试验表明，二次张拉对锚杆预应力损失有较好的补偿作用。

6 工程实例

北京某道路的电力方沟项目，南北走向，长162m，槽深13.50m，地层分为填土、新近沉积地层、一般第四纪地层，影响基坑开挖的有两层地下水；基槽采用管井降水，桩锚支护体系，如图2所示。

锚杆施工采用了注浆钻进的螺旋钻杆钻机，施工7天后进行了锚杆张拉。基槽东侧不合格锚杆为20根，占东侧锚杆综述的20%(见表1，图3为基槽东侧不合格锚杆拉力分布柱状图)；西侧不合格锚杆为66根，占西侧锚杆综述的66%(见表2，图4为基槽西侧不合格锚杆拉力分布柱状图)。

如此众多的不合格锚杆，将直接导致支护结构失效，通过分析，主要原因是施工设备选用不当，如用跟管钻进工艺就可避免；次要原因是地下水径流大，径流方向为西向东，这也是西侧不合格锚杆较多的原因。含水层下有粘土隔水层，造成降水效果不理想，导致无法干成孔，而注水泥浆工法采用的不得当，可导致钻孔后护壁效果差，塌孔严

重，无法发挥土层的抗剪强度。对于拉力接近设计值的锚杆，增加养护时间后拉力会有所提高，但锁定后蠕变也将变大，故锚杆全部作废。

7 结束语

锚杆施工作为一种方便、高效、经济的支护方式，越来越多为广大工程人员所采用，在整个支护技术中占有重要地位。本文仅对锚杆部分重要技术问题进行了分析，随着今后大量的工程实践和技术人员不断努力探索，特别是信息化施工的不断发 展，大量试验数据的收集，相信锚杆设计、施工技术将越来越成熟，越来越完善，在基坑支护工程中也会发挥更大的作用。

审稿：张建青



图3 基坑侧壁为填土的土钉墙破坏



图4 基坑侧壁为粉土和砂土的土钉墙破坏



图5 基坑侧壁为黏性土的土钉墙破坏



图6 基坑侧壁局部粉土部位土钉墙破坏

稳定；魏海涛等人^[5]根据渗流力学和土力学的基本原理，推导出计算渗流边坡的水土合算公式。但上述研究均建立在图2的计算模型基础之上。

本文仅就北京市平原区经历2012年7月21日暴雨之后土钉墙破坏模式进行分析和总结。

1 暴雨工况下土钉墙破坏形式

通过现场调查，经历2012年7月21日暴雨之后，土钉墙破坏主要与基坑侧壁土层性质和基坑排水条件有关。

1.1 按基坑侧壁地层分类

按基坑侧壁土层性质，可将土钉墙破坏分为以下四类，详见图3~6。

- (1) 基坑侧壁为填土；
- (2) 基坑侧壁为粉土（或砂土）；
- (3) 基坑侧壁为黏性土；
- (4) 基坑侧壁为黏性土与粉土互层。

1.2 按排水条件分类

按基坑排水条件，可将土钉墙破坏分为三类，详见图7~9。

- (1) 基坑侧壁原有污水或雨水管道未进行封堵或导流；
- (2) 坡脚被基坑内雨水浸泡；
- (3) 坡顶截水效果不好，雨水易进入面层内。

2 概化模型

通过上述暴雨工况后土钉墙破坏形式的分析，根据基坑侧壁土层性质将破坏形式概化成如下四种模型，见图10~13。

2.1 存在填土情况

基坑侧壁存在厚层填土时，暴雨工况下土钉墙支护破坏面为从坡脚至坡顶填土边缘的一个平面。该破坏面角度(α_1)可能大于理论破坏角(α)，也可能小于理论破坏角(α)，其中 $\alpha = (\beta + \phi_k) / 2$ 。



图7 基坑侧壁原管道进水造成的土钉墙破坏



图8 坡脚被基坑内雨水浸泡造成的土钉墙破坏



图9 雨水由坡顶进入面层内造成的土钉墙破坏

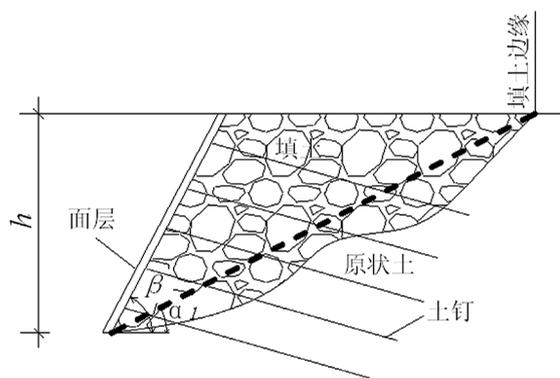


图10 存在填土计算简图

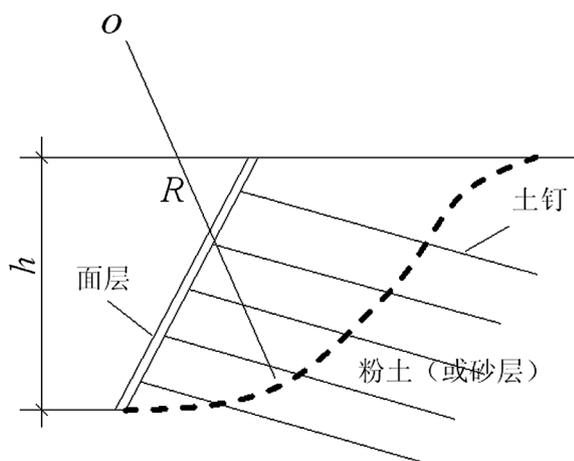


图11 全部为粉土(或砂土)计算简图

填土结构松散, 抗剪强度低, 孔隙大, 孔隙贯通, 短时间内雨水可以很容易地进入到孔隙中, 在动水压力下填土直接被带走, 破裂面成一平面。

2.2 全部为粉土(或砂土)情况

基坑侧壁全部为粉土(或砂土)时, 暴雨工况下土钉墙支护破坏面为近似圆弧的滑裂面。

粉土(或砂土)黏聚力(c)较小、内摩擦角(ϕ)较大, 孔隙较大, 孔隙贯通, 短时间内雨水较容易进入到孔隙中, 粉土(或砂土)内摩擦角(ϕ)迅速降低, 抗剪强度, 破裂面成近似成圆弧面。

2.3 全部为黏性土情况

基坑侧壁全部为黏性土时, 暴雨工况下水流沿面层与坡面之间空隙从坡顶向坡脚流动, 面层与坡面脱开, 严重时, 面层下坠。

黏性土黏聚力(c)较大, 内摩擦角(ϕ)较小, 孔隙贯通性差, 短时间内雨水不能全面进入到孔隙中, 黏性土抗剪强度没有明显降低, 土体不会发生明显的整体破坏。

2.4 黏性土与粉土(或砂土)互层情况

基坑侧壁为黏性土与粉土(或砂土)互层

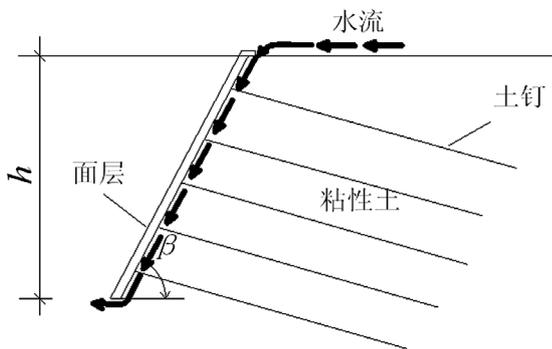


图12 全部为黏性土计算简图

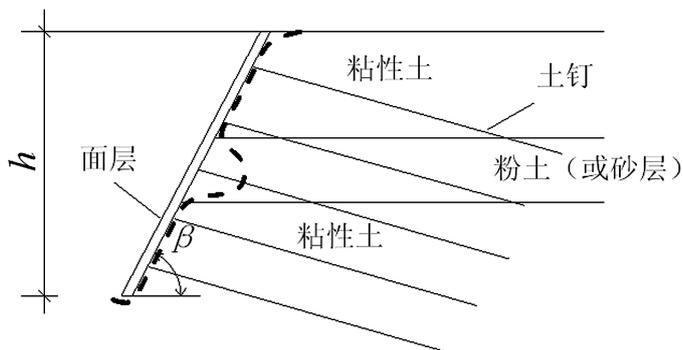


图13 黏性土与粉土(或砂土)互层计算简图

时,暴雨工况下水流沿面层与坡面之间空隙从坡顶向坡脚流动,粉土(或砂层)局部被水流带走,出现空洞,面层与坡面脱开,严重时,面层将会下挫。

根据以上分析,暴雨工况情况下,根据基坑侧壁土层性质和组合的不同,表现出的破坏形式明显不同于规范中所采用的破坏模式,因此规范^[1, 2]中计算土钉抗拉承载力和整体稳定性验算不适应暴雨工况下的土钉墙计算。

在涉及暴雨工况的土钉墙支护设计时,应根据根据基坑侧壁土层性质和组合的不同,根据图10~13计算分析,并考虑暴雨对土层物理力学参数的影响,对土钉抗拉承载力和整体稳定性进行验算。

由于排水问题造成的土钉墙破坏,破坏形式复杂,但只要在基坑排水设计和施工时做到对原有管道进行封堵或导流、坡顶截水不进入面层、基坑内及时排水,就可以避免诸如图7~9土钉墙破坏形式的发生。

3 结论及建议

(1)暴雨工况下,根据基坑侧壁土层性质和组合的不同,表现出的破坏形式明显不同于规范^[1, 2]中所采用的破坏模式。规范中计算土钉抗拉承载力和整体稳定性验算不适应暴雨工况下的土钉墙计算;

(2)在涉及暴雨工况的土钉墙支护设计时,建议依据基坑侧壁土层性质和组合的不同,合理选择计算简图,并考虑暴雨对土层物理力学参数的影响,对土钉抗拉承载力和整体稳定性进行验算;

(3)本文是以北京地区经历2012年7月21日暴雨

之后土钉墙破坏形象分析基础上得出的,其结论是否适宜经历长时间暴雨或其他地区地层还有待研究。

参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ120-99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [2] 中国土木工程学会等. DB11/489-2007 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:北京城建科技促进会,2007.
- [3] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004:33-36.
- [4] 刘神恩,李志平. 吉-茶高速公路某边坡整治防护分析[J]. 西部探矿工程,2010,22(6):44-47.
- [5] 魏海涛,李远. 渗流边坡安全系数计算中的水土分算与水土合算误差分析[J]. 建筑科学,2011,27(9):41-43.

审稿:黎良杰

基于Plant Simulation的航空综合机加厂房布局仿真研究

■ 张超 李慧 田恺 「工艺」

摘要: 以某民用航空发动机传动系统的齿轮和机匣综合加工厂房的规划设计为例,根据厂房设施布置的一般原则,以齿轮和机匣的年产量目标、产品加工工艺、单工艺加工面积需求为设计输入,并考虑各加工区的加工特点而具有的约束性,结合混合遗传算法给出了优化方案,并以Plant Simulation为仿真平台,建立了该综合机加厂房的仿真模型,从产量满足率、设备利用率、在制品库存和生产线健壮性等多个指标进行了设施布局的仿真评价。结果表明,优化后的系统能够很好的满足生产纲领,各关键设备负载比较均衡,同时维持低水平的在制品库存量,且生产线健壮性较好。因此,综合运用混合遗传算法与Plant Simulation仿真可以为生产设施布局问题给出一种有效、直观的解决方案。

关键词: 生产系统; 设施布局; 混合遗传算法; Plant Simulation

0 引言

高质量的产品、低成本、准确的交货期是企业应对激烈的市场竞争的基础。企业的设施布局是否合理,物流是否顺畅有序直接影响着企业的生产效率和生产成本。伴随着系统仿真技术的出现与迅速发展,将仿真技术应用于企业的设施规划与设计、分析和验证,可以动态模拟产品的生产制造流程,不消耗任何真实制造资源,预测制造系统状态,从而可以做出前瞻性的决策和优化实施方案。因而被广泛应用于复杂制造系统的设计、调度和规划中,对于提高设施布置水平、生产线效率具有重要的意义。已经有众多研究者利用仿真工具研究设施规划问题,主要研究聚焦在设施布置仿真和生产节拍控制仿真上。肖吉军^[1]讨

论了在生产物流系统规划中利用Witness软件进行仿真的方法,进行方案优选,并通过设置参数达到优化生产过程的目的。何智春^[2]采用Flexsim对机加工车间布置的基本布局形式、物流路径以及搬运系统作了整体的建模与仿真,并结合AHP法对多方案进行了综合评价,获得了改善后的最优方案。李晓峰等^[3]以某厂搅拌机车间为研究对象,利用Delmia/Quest,对车间物流的建模和仿真进行了分析,为工厂的前期规划提供了优化建议。谢磊^[4]利用eM-Plant对船舶建造流程进行了建模与仿真,对提高造船效率、提高资源平衡进行了具有一定意义的研究。张如杰等^[5]应用eM-Plant对机车预组装生产线进行了物流仿真,并在保证设备利用率的基础上,通过压缩节拍,达到了生产线均衡的效果。肖超^[6]以汽车变速器装配线为研究对象,用SLP理论和eM-Plant仿真相结合的方法进行变速器装配线规划。

就众多生产设施规划问题研究而论,多数

作者简介:张超,男,高工,2008年毕业于清华大学水利工程专业,现就职于工程技术研究院。

研究对象的规模相对较小、产品种类相对较少，而航空制造业以多品种、小批量为主要特点，对设施布置方案进行多指标仿真评价的相关仿真研究尚不多见。本文以某航空发动机传动系统的齿轮与机匣综合加工厂房的规划设计为例，结合混合遗传算法给出了基础优化方案，并以Plant Simulation为仿真平台，建立了该综合机加厂房的仿真模型，从产量满足率、设备利用率、在制品库存和生产线健壮性等多个指标进行了设施布置的仿真评价，为生产设施布局问题给出一种有效、直观的解决方案。

1 厂房设施布置一般原则

厂房设施布置是根据企业的经营目标和生产纲领，在已确定的空间场所内，按照从材料的接收、零件和产品的制造、装配，到成品的包装、发运的全过程，将人员、设备、物料等形成的经济活动单元所需要的空间作最适当的分配和最有效的组合，以便获得最大的生产经济效益。

设施布置有三种基本类型：工艺原则布局、产品原则布局和固定位置布局，另外还有一种混合形式（成组技术或单元布置）的布局。不论采取何种布局形式，合理的生产线应尽量减少迂回、停顿和搬运，并有效利用人力资源和厂房面积，这不仅能使物流更加畅通，而且能有效提高生产效率。厂房设施布置应遵循以下原则。

1.1 流动有序，移动距离最短

航空制造业的最显著特点是“多品种、小批量”，对生产设施适应性要求较高。综合机加厂房里的主要流动可分为物料流动和人员流动。合理的物流可以减少在物流上所花费的人力、物力，达到降低成本和改善质量的效果。生产线布置设计要与相应产品的机加、装配工艺流程统一协调，保证物料流设计的合理性，即尽可能保证主产品的机械加工、装配过程连续、流畅，尽可能的避免或减少中间停顿、物流交叉和长距离运输，尽可能缩短主流程的移动距离。

1.2 合理有效利用面积

厂房面积应合理有效地利用，当需要对未来生产面积预留时，应留出整块的面积。设备之间的间隔设计除防止工作面干涉外，还应在保证一定维修空间的条件下尽量减小。这样不仅可以提高面积利用率，也减少了人员的步行距离。通道

宽度的设计需根据人员的流量、物流量来考虑，并考虑可能出现的大体积物料发生干涉。

1.3 弹性原则

弹性是指设施设计要具有灵活性，能够适应扩建和一定程度的变更，即在最小化花费的条件下，对生产线布置进行调整。在生产线设计阶段，必须对易于移动设备和固定设备加以分析，尤其对酸洗等工艺设备应仔细斟酌布置位置，否则一旦建成后再要移动将造成巨大的成本支出；对易于移动的设备则应留有余地，以适应可能的变化。此外，还应将如何防止加工设备之间的相互干扰纳入考虑，如振动光饰等振动较强的设备宜远离精密机床。

1.4 现场可视化管理

生产现场的可视化管理能显著提高管理效率、生产效率、产品质量，提高生产现场问题的快速响应能力，这就要求将现场办公区置于厂房中间区域，周边没有遮挡视线的设施，如立体库等。

1.5 安全和简单化

安全生产任何生产厂的基本目标之一。保证工人工作安全、身心健康是生产线设计的基本要求，必须遵循一系列相应的设计规范和强制条件。此外，生产线的布置力求简洁，各功能单元职能清晰，使管理简便，避免复杂化。

2 设施布置设计实例及仿真建模

2.1 基本设计输入

某航空综合加工厂房主要承担直升机传动系统的产品生产，主要产品为航空发动机传动系统的齿轮与机匣，具体包括传动系统的齿轮、机匣、变速箱壳、转接座的机械加工，并包括了振动光饰、酸洗、荧光检验、喷漆、试验、装配、包装等生产工艺。

作为该综合加工厂房的重要设计输入，其主产品的生产纲领为：①小齿轮（ $\Phi \leq 180\text{mm}$ ）38,000件；②中齿轮（ $180\text{mm} < \Phi \leq 500\text{mm}$ ）4,500件；③大齿轮（ $\Phi > 500\text{mm}$ ）200件；④机匣280件，其中40件为装配成品（由机匣壳、大齿轮、中齿轮、小齿轮和转接座装配而成）；⑤变速箱壳1,650件；⑥转接座10,000件。

由于该厂房属于综合机加厂房，产品加工所依赖的设备以机械加工设备为主，毛坯件经过

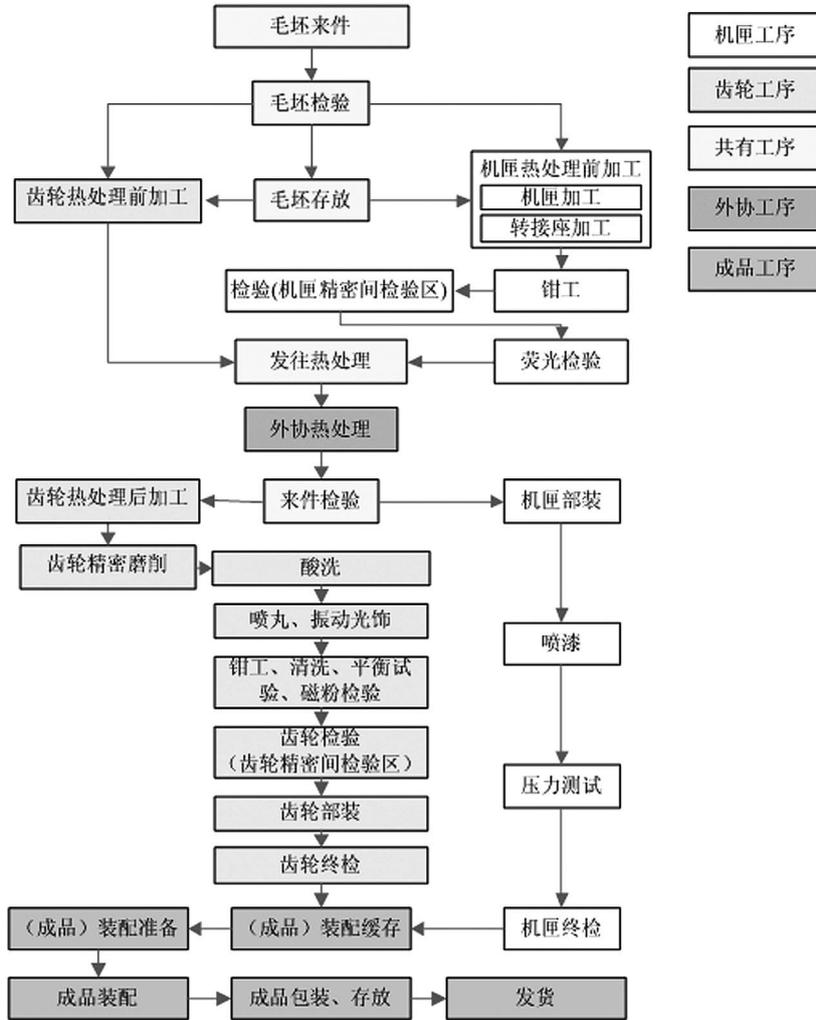


图1 综合机加厂房主工艺流程

检验后，运往粗加工区进行粗加工，如车床、钻床、数控加工中心等，随后的热处理工艺通过厂房外部的热处理中心进行，然后进行精加工、精密磨削，接着进行酸洗、检测、部装、总装等工艺，直至最终成品。齿轮和机匣的主体工艺流程见图1。

2.2 设施布置方案

2.2.1 物流量从至表

由前述的齿轮、机匣、转接座类产品的生产工艺可知，这些产品的工艺流程尽管繁多但基本不存在往复，顺序化特征明显。齿轮产品序列中，小齿轮的产量需求高达3.8万件，因此齿轮的生产布置成流水线生产，且按照齿轮的直径分为小齿轮、中齿轮、大齿轮进行分线生产。机匣产品序列中，不同类型产品在独立的生产区加

工，而且机匣的热处理前加工依靠单台数控加工中心即可完成，因此机匣和变速箱壳分成两个独立的加工区，且设备按照成组式单元布局。

综合机加厂房内的物流搬运发生于23个区域之间：毛坯检验区、毛坯存放区、热处理前机加区、机匣机加区、机匣钳工区、机匣检验区、荧光检验区、综合存放区、热处理后机加区、酸洗间、齿轮钳工区、振动光饰间、齿轮检验间、齿轮终检间、机匣部装区、机匣压力试验区、机匣喷漆区、机匣清洗区、机匣测量区、齿轮测量区、装配准备区、机匣装配区、复检包装区。各功能区的加工设备台套数决定了其面积需求。将生产纲领输入后经简化可形成矩阵规模为23×23的物流量从至表。

2.2.2 目标函数

设施布置的目标函数有多种形式，常用的有

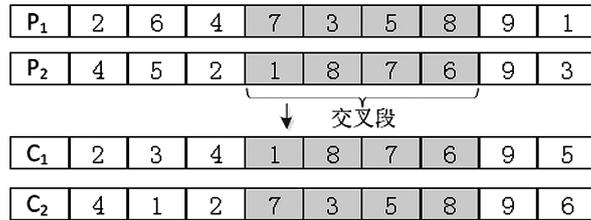


图2 部分映射交叉算子

物流运输成本最小化和综合指标最优化,其约束条件包括:车间面积及形状、生产单元面积及形状要求、位置有特殊要求的生产单元限制等^[7]。本文采用物流运输成本最小化为目标函数:

设物料从至矩阵为 Q ,物料的运输单位成本矩阵为 C ,优化目标函数为:

$$F = \min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m q_{ij} c_{ij} a_{ik} a_{jl} \right)$$

其中: n 为设备总数; m 为位置总数; q_{ij} 表示设备 i 到设备 j 的物料流量,该流量可以用质量或运输频次表示; c_{ij} 表示单位流量物料从设备 i 到设备 j 的单位运输成本,与两设备之间的运输距离成正比;设 d_{ij} 表示设备 i 到设备 j 的物料运输距离,成本系数为 λ ,且 $c_{ij} = \lambda d_{ij}$; $a_{ik} \in \{0, 1\}$,当设备 i 在位置 k 时, $a_{ik} = 1$,否则 $a_{ik} = 0$; $a_{jl} \in \{0, 1\}$,当设备 j 在位置 l 时, $a_{jl} = 1$,否则 $a_{jl} = 0$ 。

本研究简化了各生产单元的面积约束,将其视为点,其位置约束通过基因模板,即将特定的功能区固化在基因串特定的位置上强制实现。通过这种设定能大幅减少搜索空间,实现对现有条件的考虑,使优化后的结果更贴合实际需求。

2.2.3 混合遗传算法

GASA混合优化算法既包含了遗传算法的选择、复制、交叉、变异等操作,又包含拟退火算法的状态产生函数等不同的邻域搜索结构。

对于遗传因子的编码,本文参考文献^[9]采用设备排列顺序形成正整数编码方式,即用一个整数串代表一个染色体,一个染色体对应着一种布局方案。其中染色体中基因位中的正整数代表相应的待布置设备号,正整数的顺序对应于位置的顺序,当染色体某个基因位上编码为0时,则表示该位置不布置设备。例如有5台设备布置到6个已知坐标的位置上,形成了染色体“2-1-0-3-

5-4”,表示:2号设备布置在1号位置;第3位为0说明这种布局方案中该位置上不布置任何设备。该编码方法的染色体长度由位置个数确定,正整数的个数则由设备个数确定。

距离矩阵由任意两个位置点之间的搬运距离构成,本文对位置点构建通路关系,形成有向图,利用Floyd-Warshall算法,求解出任意两点间的最短距离,能考虑通路的方向性,真实反映位置点之间搬运距离。

GASA算法中的个体更新方式包括选择、交叉、变异以及SA的突变操作。父体的选择采用锦标赛算子^[10],交叉算子选用部分映射交叉算子(见图2),首先随机生成两个交叉点,交换父代个体交叉点之间的片段,对于交叉点外的基因,若它不与交换过来的片段冲突则保留;若冲突则通过部分映射来确定,直到没有冲突的基因为止,从而获得后代个体。新个体产生后强制其满足基因模板。

变异算子采用随机生成2个变异基因位,并交换基因位基因形成新个体。对某个个体,当满足变异概率时,随机生成一对整数 (r_1, r_2) 作为变异基因位, $r_1, r_2 \in \{0, m\}$, m 为待布置的位置数;交换染色体中第 r_1 位、第 r_2 位的基因,得到新个体,此时应注意防止两个基因位均为空的无效变异发生。模拟退火算法的突变操作也由变异算子完成。SA操作时,当前状态变量最终能否迁移到新的状态变量取决于接受概率。为进一步防止早熟,采取小部分精英个体直接进入下一代的进化策略。

在每一代的模拟退火计算过程中,抽样稳定准则用来确定SA操作的循环次数^[11],本文设定循环上限及连续检查若干次目标函数值的变化,如果达到循环上限或者个体适应度函数变化小于某个给定的小的正实数,则进入下一代的计算,并执行温度下降函数。GASA算法终止准则采用搜索

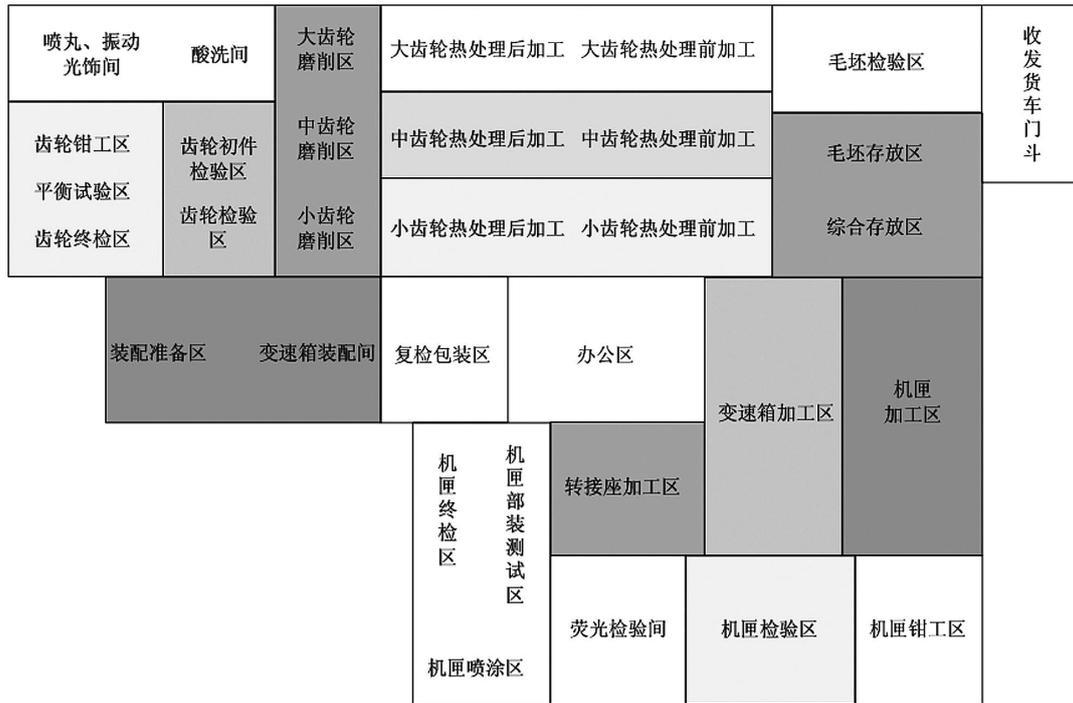


图3 设施功能区布局

到的最优个体对应的适应度函数连续若干代不变化时终止。

2.2.4 方案计算

本厂房内的物料流动可以分为齿轮流和机匣流，尽量缩小这两条价值流的流动距离，可以使全部的物流量为最小或接近最小值。另外考虑以下约束条件：①本综合加工厂房的热处理工艺需要外协，而热处理厂房位于本地块的东侧，在要求距离越短越好的条件下，这就确定了收发货车门斗位于本厂房的东墙；②喷漆间根据国家建筑防爆规范要求必须贴近外墙；③酸洗间因为本身存在污染，也宜布置在贴近外墙的部位；④振动光饰间因设备存在振动，应将其布置到远离高精度机加、检测等设备的位置，从而避免影响质量；⑤现场办公室布置在加工区中间区域，可以有效减少人员的步行距离，也有利于生产现场的协调。

将建设用地边界、各功能区面积需求、从至表数据输入到自研的混合遗传算法程序^[8]，将约束条件设定为多套基因模板，经多轮计算和调整，最终得到优化后的布置方案见图3。

本设施布局中，物料由收发货车门斗进入，经过毛坯检验区后，有的进入毛坯存放区，有的则去往齿轮热处理前加工区，还有的去往机匣加

工区。齿轮热处理前及热处理后加工区按小、中、大三条加工线呈线状布置，同一条生产线的在制品转运通过上部运输系统进行，热处理后加工区完成后，小、中、大齿轮均进入齿轮精密加工区用磨齿机进行轮齿精加工，该区域内的在制品转运同样通过上部运输系统进行。

机匣热处理工艺前的加工由成组式单元布局的数控加工中心进行，上部运输系统用于将机匣、加工中心与叉车之间的在制品运输。然后在制品进入机匣钳工区、荧光检验区，随后依次进入部装区、喷漆区和终检区。需要进行装配的则进入装配准备区。工艺方案的中心区域是生产班组的办公区，这种布局方式非常有利于生产现场的可视化管理，并可以减少人员的步行距离。

2.3 仿真模型建立

根据主产产品各工序的工时数据及生产纲领，可以得出各功能区内的关键工艺设备的台套数和相应配套辅助设备的台套数。以吊车行程最大范围为边界划分仿真模型的最小功能区，并酌情考虑防止功能区划分过细，最终形成功能区14个。各个子区域内添加Plant Simulation库元件代表工艺设备，通过连接线或吊车进行逻辑连接，并用SimTalk语句按照图1所示的工艺流程进

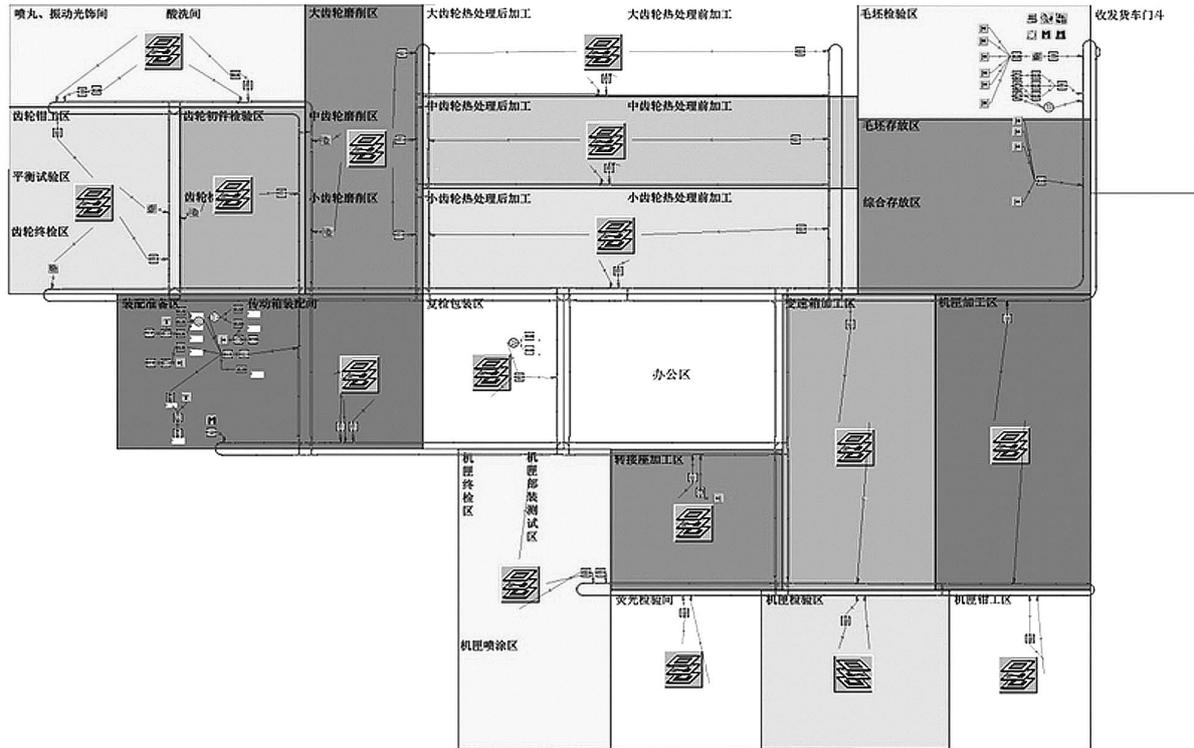


图4 综合机加厂房模型图

表1 年产量及在制品库存仿真值

	小齿轮	中齿轮	大齿轮	变速箱	装配件	机匣	转接座
仿真均值	38050	4507	179	1651	40	240	10000
置信区间	38050 ± 12	4507 ± 3	179 ± 1	1651 ± 2	40 ± 0	240 ± 0	10000 ± 0
计划值	38000	4500	180	1650	40	24	10000
满足率(%)	100	100	99.4	100	100	100	100
在制品库存	384 ± 4	86 ± 1	18 ± 1	45 ± 2	5 ± 0	8 ± 0	104 ± 0

表2 利用率80%以上的设备

加工区	瓶颈设备	设备数量	平均利用率%
小齿轮热处理前	数控机床	4	83.11
小齿轮热处理后	外圆磨床	4	87.13
小齿轮磨削	数控磨齿机	3	85.68
中齿轮热处理前	车铣复合加工中心	3	90.45
大齿轮热处理前	五轴加工中心	1	86.94
转接座加工区	五轴加工中心	5	92.84
主机匣区	电火花成型机	1	87.85
变速箱加工区	五轴加工中心	1	85.87
机匣部装区	装配台	6	85.47
机匣部装区	喷涂烘箱	1	83.38

表3 关键设备80%可用性

设备	小齿轮	中齿轮	大齿轮	转接座	变速箱	装配件	主机匣
100%可用 (在制品)	38050 ± 12 222	4507 ± 3 60	179 ± 1 11	10000 ± 0 290	1651 ± 2 27	40 ± 0 4	240 ± 0 4
小齿轮热处理后设备	33332 ± 33	4503 ± 3	180 ± 1	10000 ± 0	1649 ± 2	40 ± 0	240 ± 0
中齿轮热处理前设备	38064 ± 9	3832 ± 6	179 ± 1	10000 ± 0	1649 ± 2	40 ± 0	240 ± 0
大齿轮热处理前设备	38068 ± 28	4505 ± 4	162 ± 2	10000 ± 0	1650 ± 2	40 ± 0	240 ± 0
转接座加工设备	38054 ± 15	4504 ± 5	180 ± 1	8340 ± 15	1492 ± 3	36 ± 0	240 ± 0
变速箱加工设备	38048 ± 10	4509 ± 2	180 ± 0	10000 ± 0	1649 ± 2	40 ± 0	240 ± 0
主机匣加工设备	38048 ± 14	4507 ± 3	180 ± 0	10000 ± 0	1650 ± 3	36 ± 0	216 ± 0
在制品库存	5994 ± 31	861 ± 3	36 ± 0	2083 ± 6	45 ± 1	9 ± 0	34 ± 0

行运输逻辑设定后,即进行单模块的运行测试。其中,对于多合同型设备的任务分配按等概率进行;机匣装配区中,设置了拉动式生产系统,由函数监视当前对应的小齿轮、中齿轮、大齿轮、转接座的需求量及准备区的缓存量,并适时触发运输函数将零件搬运到装配区。对机械类设备,其加工工时设定为符合均匀分布的经验统计值;对于钳工、装配等人工参与的加工,其加工工时设定为符合伽马分布的经验统计值。

经过测试无误后,通过interface元件连接这14个子模块,并布设AGV运输系统连接这些子模块(见图4)。为实时观察各模块的运行情况,监视在制品库存和自动统计最终产量和生产过程线,另外建立了生产监视看板模块,绘制各产品生产过程线,展示各模块的在制品数量、缓存区空间情况。

本研究中的仿真模型设计中,主要存在以下基本假定:①全年工作日按250天计算,生产按照2班制(16h/天)进行;②生产线的运转考虑瓶颈设备、关键设备发生故障和维修保养时间,通过设定设备的可用率来实现;③在本综合加工厂房仿真模型中,对7类产品没有具体的交付日期规定,仅有7类产品的具体年交付量需求。生产节拍按照全年的工作小时数与各类产品的目标产量的比值确定。用物料源的供应间隔来控制生产节拍;④小齿轮热处理前加工的在制品转运通过人工搬运的方式实现,中齿轮及大齿轮的在制品转运通过吊车进行上部运输;⑤假设外协热处理功能区的能力充分大,即任何时间都可以满足该综合加工厂房的热处理需求,热处理工时按照设定

的时长进行。

3 设施布置仿真分析

由于离散事件的随机性,不能仅由1次仿真结果而得出评价结论。本文利用Plant Simulation提供的Experiment Manager元件进行仿真试验,设定每次试验观察次数为10次,置信率为95%。本文的生产系统是一个连续型生产系统,旨在研究该生产系统连续长期运行时系统的各项性能指标,即当系统达到稳态后系统的绩效指标。具体措施为:先运行50天后认为模型运行基本稳定,记录下50天时段末的各产品的产量;再继续运行至300天后停止运行,记录下300天时段末的各产品产量,最终两者求差值得到仿真模型运行250天后的产量。最终得到仿真结果如下。

3.1 产量满足率及在制品库存

在假设机器无故障运行的条件下,得出生产线运行结果和在制品库存如表1。

由表1可知,当前设施布置方案能够达到生产纲领要求,且在制品库存量维持在较低水平。

3.2 设备利用率

本仿真模型中的关键处理设备元件近110台,此处仅选取利用率在80%以上的设备进行分析,由表2可知,小齿轮的各机加区的关键设备利用率都较高,平均在85%左右,而对于中齿轮热处理前区域的车铣复合加工中心和转接座加工区的五轴加工中心,其利用率达到了90%以上,可能构成实际生产线的瓶颈。

3.3 生产线健壮性

为了对生产线的健壮性进行评价,研究中设置了较为极端的条件:将小齿轮热处理后设备、中齿轮热处理前设备、大齿轮热处理前设备、转接座机加设备、变速箱加工设备和主机匣机加设备分别设置为80%的可用性,逐次试验并据此观察生产线产量和在制品库存,具体见表3。

从表3中可以看出,仅变速箱加工区在设备故障达到20%时仍然能够完成生产计划;齿轮区单一区域关键设备故障,不会影响到其他产品的产量;小齿轮热处理后故障使产出减少约12%;中齿轮或大齿轮热处理前故障使产出分别减少约15%或10%;主机匣加工区设备故障使主机匣减产约10%,并且由于参与装配机匣产量相应降低,将影响到装配产品的产量;而转接座加工区设备故障造成转接座产量17%的大幅下降,进而影响到主机匣和装配件产品的产量。

通过仿真分析可以看出,本综合机加厂房的设计方案基本能够满足生产纲领要求,且在较极端条件下,各产品线之间的相互干扰较少。但应注意到,转接座加工能力刚刚能够满足生产需求,可能构成整个机匣、变速箱生产的瓶颈,应考虑增加相应加工设备。从本设计实例也可以看出,用Plant Simulation对规划中的生产线进行建模,能够简单真实地识别系统存在的问题,为评估、优化起到很好的辅助作用。

4 结语

利用Plant Simulation对规划的生产系统进行建模,建模的过程较为简单快捷,模块化程度高,层次化的模型树结构非常便于建模工作开展,而且能有效地分析出生产系统可能存在的问题,对提高生产线设计的效率和质量都有重要的意义。通过前文研究,可得出以下结论:

(1)本文根据生产纲领、工时参数、加工工艺等实际数据由混合遗传算法得到优化后设计方案,并用Plant Simulation建立系统的仿真模型;

(2)通过多次仿真模型试验,对生产绩效评价指标进行了分析,验证了方案的合理性并识别出应注意的关键工位;

(3)研究表明,采用离散事件仿真软件对生产设施布局的生产物流进行仿真模拟,具有直观、方便、经济、快捷,及结合实际程度较高等优

点,是指导设施布局并辅助决策的一种有效方法。

参考文献

- [1] 王核成,罗文,蔡敏等. 信息化与管理创新:2006年全国第十届企业信息化与工业工程学术年会论文集[C]. 北京:电子工业出版社,2006:116-118.
- [2] 何智春. 基于Flexsim的机加工车间设施布置建模与仿真[D]. 武汉:武汉理工大学机电工程学院,2009:29-56.
- [3] 李晓峰,王晓枫. 基于Quest的车间物流建模和仿真[J]. 物流科技,2011,(11):85-89.
- [4] 谢磊. 基于Em-Plant的船舶建造流程建模与仿真[D]. 上海:上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,2009:46-80.
- [5] 张如杰,杨自建,王伟等. eM-Plant在机车预组装生产线建模与物流仿真中的应用[J]. 装备制造技术,2012,(5):140-143.
- [6] 肖超,陈书宏. 基于SLP和Em-plant的变速器装配线规划研究[J]. 工程设计学报,2010,17(6):430-434.
- [7] 张毕西,周艳,刘鑫. 离散生产系统车间设施布置优化[J]. 工业工程,2004,7(2):8-11.
- [8] 张超,常秀娟,冯焯. 基于混合遗传算法的设备布局设计[J]. 组合机床与自动化加工技术. 2010,(9):104-111.
- [9] D.Barral,J-P.Perrin,E Dombre and A.Liegeois. Simulated annealing combined with a constructive algorithm for optimizing assembly workcell layout. The international journal of advanced manufacturing technology[J],2001,17:593-602.
- [10] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:33-34.
- [11] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:17-18.

审稿:郭志海

民用机场航空业务量预测的探讨

■ 王锋刚 王勇传 「规划」

摘要: 机场航空业务量预测是机场总体规划的基础性工作,是确定机场建设规模和投资的依据,科学合理的预测是机场规划建设能否顺利实施的关键。本文结合笔者实际工作经历和体会,对机场航空业务量预测原则、预测方法、预测模型、预测中需解决的关键问题等进行了研究和探讨,以供参考。

关键词: 民用机场; 航空业务量预测; 机场规划

0 引言

机场是航空运输的枢纽,是地面交通与空中交通转换的接口,是客货进入民航系统的通道,机场的规模、建设和发展对民航事业的发展具有重要的意义^[1]。决定机场基础设施规模的主要因素是机场航空业务量规模,包括旅客吞吐量、货邮吞吐量及飞机起降架次等。

在机场规划建设前期工作中,主要包括区域机场布局规划、项目建议书、机场选址、预可行性研究、机场总体规划、可行性研究、方案设计、初步设计等阶段,而各阶段工作均以机场航空业务量预测指标作为确定机场飞行区跑道滑行道系统、旅客航站楼、站坪机位、综合交通换乘枢纽、陆侧进离场道路、停车场、货运库等主要设施规模、等级和项目投资的主要依据。因此,航空业务量预测是机场规划建设前期工作的基础,预测的准确性对于机场规划的合理性和建设项目决策的科学性具有十分重要的作用。

经过多年民航机场规划设计的经验,笔者已参与完成大量的国内外机场航空业务量预测工作,其中包括区域机场体系、综合性枢纽机场、区域性枢纽机场、国家干线机场、支线机场、通

用航空机场等不同类型的新建或改扩建机场的预测,本文结合笔者实际工作经历和体会,就机场航空业务量预测问题进行了探讨,以供参考。

1 民航机场航空业务量预测应遵循的原则

航空业务量预测是以机场发展的历史和现状为出发点,以航空市场调查研究和统计资料为依据,以科学的定性分析和定量计算为手段,对航空运输的发展规律进行分析,进而对航空运输的发展趋势作出科学的推测,它是机场总体规划的基础,是确定机场各阶段建设规模和标准的依据。在进行航空业务量预测过程中,需遵循以下原则。

1.1 遵循民航机场发展规律原则

对于民航机场,其发展过程主要经历市场培育发展阶段、快速发展阶段、高速增长阶段、发展成熟阶段等,在不同的发展阶段航空业务量增长水平各不相同,具有一定的规律性。在预测过程中应遵循机场的发展规律,为机场制定各阶段的发展目标提供科学合理的依据。

1.2 适应机场的定位和发展愿景原则

机场定位和发展愿景是进行总体规划的前提条件,是机场未来发展的目标,也是进行机场航空业务量预测的依据。因此,航空业务量预测应充分考虑机场各阶段发展目标,使预测指标应能

作者简介:王锋刚,男,工程师,2007年毕业于中国民航大学交通运输规划与管理专业,现就职于民航工程设计研究院。

表1 机场航空业务量主要预测指标表

序号	类型		主要内容
1	市场需求预测		年旅客吞吐量
			年货邮吞吐量
			年客/货机起降架次
2	参数指标预测	业务量参数指标	典型高峰日客机起降架次
			典型高峰日旅客吞吐量
			典型高峰小时起降架次
			典型高峰小时旅客吞吐量
			客座率
			中转过境比例
	设施规模参数指标		航站楼面积
			站坪机位数
			货机位数
			停车场面积
			货运库面积

够适应机场的定位和发展愿景。

1.3 具体问题具体分析原则

由于各机场的性质、定位、运营模式、发展目标、机场所在地经济社会发展状况、相关行业政策、区域综合交通发展水平、客货构成等诸多条件的不同,在进行机场航空业务量预测时,需根据机场的实际情况有针对性的进行深入分析和研究,做到具体问题具体分析。

1.4 客观公正原则

机场航空业务量预测,应从有利于民航可持续发展、遵循机场发展的客观规律以及机场在国家或区域航空运输体系中的地位 and 作用等方面,从机场自身和机场所处外界环境两个角度进行综合分析论证,确保所得的预测指标能够客观的反映民航运输的市场需求。避免因个人的主观判断或其他人为因素的影响而使机场预测结果缺乏可靠性,导致预测结果过于乐观或过于保守,造成机场规划建设的重大失误。

2 航空业务量预测的主要内容及方法

2.1 航空业务量预测的主要内容

机场航空业务量预测内容比较丰富,航空业务量预测主要包括两方面内容:市场需求预测和参数指标预测(见表1)。

2.1.1 市场需求预测

市场需求预测包括旅客吞吐量、货邮吞吐量及飞机起降架次等的预测。并根据机场的运营情

况按国际/国内、定期航班和非定期航班、始发/终到及中转过境进行分类。

2.1.2 参数指标预测

参数指标预测是确定机场等级和主要设施规模的依据。又可分为两部分:业务量参数指标和设施规模参数指标。前者包括适用机型、客座率、机型组合、高峰集中度、陆侧交通量等指标;后者包括航站楼面积、站坪机位数量、停车场面积、货库面积等指标。

2.2 机场航空业务量预测方法

2.2.1 预测思路

预测是对未来所发生的事情进行合理的估计,即利用历史发展情况预测未来的发展趋势,根据事物发展规律建立模型,进而推测将来的发展情况。它根据历史和现状资料,推测在一定条件下会出现何种现象或产生何种结果,即在研究事物发生、发展所呈现的规律性以及分析现状条件、环境因素制约和影响的基础上,推测事物未来演变的状态和发展趋势。

一个地区航空业务量的增长与该地区社会经济的发展 and 航空市场需求密不可分,因此,要科学合理的预测机场航空业务量,必须从地区社会经济发展情况和航空市场需求分析入手,研究影响当地航空业务量增长的诸多因素,找寻其中的关键影响因素,找出这些影响因素与航空业务量之间的相互关系,采用多种预测方法进行预测。

2.2.2 预测方法

预测过程是广泛地搜集统计数据和有关信

表2 机场航空业务量预测方法分类表

序号	预测类型	预测方法	备注
1	定性预测法	德尔菲法	注重机场发展质的变化,适用于中长期趋势的判断
		主观概率法	
		专家判断预测法	
2	计量经济法	回归分析预测法	反映航空运输与经济社会发展具有一定的相关性
		弹性系数法	
		人均出行次数法	
3	时间序列预测法	移动平均法	以时间为自变量,适用于短期预测
		指数平滑法	
		趋势外推法	
		波布加门公式法	
		灰色预测法	
4	类推比较法	梯减法	适用于航空业务量发展稳定或原始数据较少的机场
		定性与定量综合预测法	
		纵向与横向综合比较法	
5	其他预测法	典型分析法	适用于新建机场
		综合交通客源分流法	
		旅游人数比例法	

息(包括运输量和经济、旅游、人口、贸易、地理、社会等方面),分析各项影响因素过去对运输量变化的相对影响,估计它们在未来可能有的变化及其对运输量增长的影响,在此基础上对运输量的发展做出预测。

航空业务量预测的基本方法可分为如下五个类型:定性预测法、计量经济法和回归分析预测法、时间序列预测法及其他相关方法(见表2)。定性预测法是指根据认知能力、经验和学术水平进行定性判断,如德尔菲法(专家预测法);计量经济法和回归分析预测法是根据客观事物之间存在相互联系、依赖制约关系,找出内在的联系及变化规律,依据规律做出预测,如多元回归预测法、非线性回归预测法等;时间序列预测法是根据预测对象的数据所呈现出的规律性作预测,认识数据的模式是关键,以时间作为自变量,去拟合数据所呈现的规律,如移动平均法、指数平滑法、趋势外推法、波布加门公式法等^[1]。

2.2.3 典型预测方法

限于篇幅,本文结合实际工作中的创新思想和经验,对其中的弹性系数法、时间序列法、人均出行次数法及综合交通客源分流法等典型预测方法进行简要的介绍。

1) 弹性系数法

弹性系数法是根据航空业务量与其发展变

化相关性较强的影响因素之间的相互关系,运用计量经济法原理所做的航空业务量预测。该方法主要是基于航空业务量与其相关的经济发展指标增长率的相关性来建立预测模型,计算出弹性系数,根据相关经济指标的发展趋势来预测航空业务量。弹性系数计算模型如下:

$$e = \frac{\Delta y}{y} \bigg/ \frac{\Delta x}{x} = \frac{x}{y} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

其中:e—弹性系数;

Δy —航空业务量增长量;

y—基年航空业务量;

Δx —相关经济发展指标增长量;

x—基年相关经济发展指标。

2) 时间序列法

时间序列预测是指利用预测变量的历史时间序列,运用相应的统计技术与方法,从变量的时间序列中找出演变模式,建立数学模型,对预测变量的未来发展趋势作出定量估计。时间序列预测的自变量只有一个,就是时间,变量的时间序列是变量受各种因素作用后产生的综合结果。利用变量的时间序列,分析出内在演变规律,并建立数学模型,这个数学模型本身是各种因素影响综合作用的结果。所得的时间序列模型因不同的数据特点而各不相同,有移动平均模型、指数平

滑模型、波布加门公式模型、灰色预测模型等。

利用机场民航客运量的历年统计资料来研究其变化的时间过程是一种简单而常用的方法。这种方法的基础在于：假定历史上对客运量变化的影响因素的变化规律在未来预测年份中不发生大的变化。这对经济发展相对平稳、政策较为稳定的年份来说是可靠的。在航空运输管理预测中，时间序列预测应用十分广泛，尤其是在短期预测中，其预测精度相当高。

3) 人均出行次数法

航空活动与一个地区经济发达程度、收入水平和产业结构密切相关，通常一个地区经济实力越强、收入水平越高、第二、三产业越发达尤其是服务业越发达，人们利用航空运输出行的机会越多，人均航空出行次数越多，反之则越少。我国改革开放以来，随着国民经济的发展，人民生活水平的提高，航空运输逐渐成为大众化的出行方式，越来越具有普遍意义。因此，人均航空出行的概念也逐渐被采用，并作为一项重要指标来衡量民航业发展水平。

运用人均航空出行次数进行航空业务量预测，是近年来提出的新的预测思路，可结合国家民航整体发展情况和经济社会发展趋势进行综合分析研究，具有预测过程客观合理、预测结果可信度高的特点，适用于中长期的业务量预测。

4) 综合交通客源分流法

综合交通客源分流法，主要适用于新建机场或综合交通比较发达的地区机场建设，以机场所在地城市与其他几个主要方向的城市组成的城市对间的公路客运量和铁路客运量为基础数据进行推算，按照公路客源和铁路客源的预计乘机比例来确定潜在乘机人数，预测出基准年的旅客吞吐量，需要一定的实地调查研究并收集相关数据，必要时需进行问卷调查，以取得第一手实际数据。

3 预测需解决的关键问题

3.1 国内外机场航空业务量预测存在的问题

自上世纪90年代初至今的近20年时间内，我国的机场建设迎来了重要的战略发展阶段。在这一阶段的机场建设高潮中，航空业务量预测发挥了重要的引导作用。我们对航空业务量预测结果所关注的不仅仅是其准确性，更重要的是预测结果所反映的民航行业发展趋势和规划愿景。然

而，在实际过程中，预测往往与实际运营情况出现偏差，或者偏于乐观，或者偏于保守，真正能够符合实际的情况较少。在实际工作中出现以下一些问题：

3.1.1 原始数据的可靠性不足

原始数据是机场航空业务量预测的基础，由于不同类型机场的特点不同，因此，原始数据必须根据机场的类型有针对性的采用相应的方法进行搜集与分析，以保证预测原始数据的科学性、系统性、有效性和可操作性。然而，在实际预测中，原始数据的收集往往存在统计数据资料不齐全、统计口径不一致、调查统计样本量少、部分数据的来源不可靠、所得数据难以统计分析等诸多问题，导致业务量预测缺乏可靠的原始数据支持，降低了预测结论的可信度。

如部分机场提供的货运量统计数据中包含了货物、邮件及旅客行李量，而民航官方数据所公布的货运量一般只涉及货物和邮件吞吐量，不包含行李量，因此若不加辨别的直接使用机场的数据将导致货运吞吐量预测结果的明显偏大；另有相当多的国外机场，由于其前期没有实行规范的运营数据统计，且数据更新滞后，如2011年进行改扩建时机场仅能提供2007年之前的数据，根据这些数据进行数据分析可能导致趋势判断的重大偏差。

3.1.2 预测方法及预测模型选择不合理，预测结论受主观因素影响大

由于机场发展的情况各不相同，在预测过程中，应针对具体的机场，依据原始数据资料分析结果，选择最佳预测方法，建立相应的预测模型，从而得出合理的预测结果，这是机场航空业务量的基本预测思路。但从国内外机场业务量预测案例中发现，存在不同类型机场预测方法雷同、简单套用数学模型、缺乏合理的定性分析与定量分析，其中主观因素和领导意志的决定性更大，出现了预测结果决定预测过程的现象。

如国内西部某大型机场的总体规划，在预测过程中，未完全结合实际统计数据趋势拟合，运用趋势模型所得的预测结果偏离值较大，严重降低了预测结果的可信度，最后依据主观定性判断将预测值修正，这一做法未能体现预测过程的严谨性、模型选择的科学性和预测结论的可靠性，受主观因素影响大。再如西南某旅游支线机场，开航当年客运量就超过目标年预测指标，开航第二年增长率就达到80%，远远超过机场容

量，需进行改扩建，这充分反映了在前期预测时对于机场业务量潜在需求估计不足，各相关比例及增长率取值偏低，没有能够反映当地实际情况，预测过程中主观成分较多。

3.1.3 参数取值随意性大

机场业务量参数指标和设施规模参数指标是基于航空业务量需求预测得出的，与机场的类型、等级、运营模式、服务水平等因素密切相关，是指导机场总体规划和确定项目建设规模与工程投资的主要依据。然而，在实际研究过程中，这些参数的取值随意性较大，相关行业规范的指导力弱，往往受项目建设条件、资金的不同而不同，参数的取值和计算往往受专家个人的经验确定，出现了以人为主观判断为主导的现象。此外，部分机场业务量预测过程中，在确定机场高峰小时集中率、中转过境比例、机型组合、陆侧交通车型比例、轨道交通分担比例、航班客座率、航站楼面积指标等参数时，缺乏科学的依据，不能完全满足该机场的特点和需求。

如西北地区某大型机场，未能充分结合实际运营情况，在确定机型比例时，对于区域内以B类小机型开展短途运输的实际考虑较少或基本不考虑，不符合机场定位和发展要求。此外，在实际工作中还出现以下情况，参数的取值往往受上述航空业务量需求预测的关联影响，导致在预测过程中对于指标参数的确定受到预测者、专家或其他人员主观意志的影响，若业务量需求判断偏于保守，则参数易取低值，若业务量需求判断偏于乐观，则参数易取高值。

3.2 预测需解决的关键问题

对于预测中出现的问题，在机场航空业务量预测过程各环节中需加以解决，确保预测结果科学性和可靠性。重点做好以下几个方面的工作。

3.2.1 注重原始数据资料的收集

机场航空业务量的预测需要考虑影响机场发展的各方面的因素，预测的原始数据资料收集包括了国民经济发展指标、社会发展指标、旅游业发展指标、综合交通运输发展指标、政策支持指标、国家及区域民航发展指标及机场现状发展指标等，所涉及的行业多、范围广、数据量大。因此，在预测初期应注重原始数据的收集整理，重点分析研究与航空运输密切相关的数据，为预测方法的确定和预测模型的建立提供系统、完整、可靠的数据支持。

3.2.2 明确预测思路

机场航空业务量预测是一项系统性工作，预测方法的确定、模型的建立、参数的计算、结论的验证等各环节都有极强的逻辑关系。因此，必须明确整个预测的思路，避免因思路混乱导致预测结果出现重大偏差，影响后续工作的顺利开展。

3.2.3 建立合理的预测模型

预测模型的建立是预测工作的关键环节。针对不同类型的机场，根据原始数据资料的分析结果，选择合理的预测方法并建立相应的模型，避免不加分析论证而直接套用其他机场的预测方法和预测模型，应做到具体问题具体分析，确保预测过程的科学性和合理性。

3.2.4 合理确定预测参数

机场业务量参数指标和设施规模参数指标的确定，是预测工作的主要内容之一，其数据指标与机场各阶段的规划布局和建设规模直接相关，是确定机场飞行区跑道滑行道系统构形、停机坪机位数量、航站楼建设规模、停车场车位数、进离场道路系统等级规模、货运库规模、航油设施及其他机场专项设施的主要依据。参数的确定需综合考虑机场的类型、等级、航空运输规模、运营模式、服务水平等因素，使预测结果科学、可靠、合理，避免受主观的判断和专家个人的经验而定。

4 结语

预测是决策的基础，只有正确的预测，才有科学的决策。机场航空业务量预测是机场总体规划的基础性工作，是确定机场建设规模和投资的依据，因此，预测的科学性和合理性是机场规划建设能否顺利实施的关键，而掌握高水平的机场航空业务量预测技术，是机场规划师必须具备的专业能力。本文结合机场规划实际经验，提出了民航机场航空业务量预测应遵循的原则，对业务量预测的主要内容及预测方法进行了总结和 research，在此基础上对国内外机场预测工作中出现的问题进行了分析，并提出了预测中关键问题的解决途径，以供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 都业富. 航空运输管理预测[M]. 北京: 中国民航出版社, 2001.

审稿: 李守旭

高大洁净厂房分层净化CFD模拟与节能性分析

■ 董秀芳 肖武 赵彬 「暖通」

摘要: 分析高大洁净厂房的特点,提出了在高度上分层的净化空调方案,采用CFD数值模拟高大洁净厂房气流组织,对模拟结果的浓度场、温度场进行分析,提出了更为节能的方案。

关键词: 高大空间; 分层净化; CFD模拟; 节能

0 引言

随着我国航天技术的高速发展,航天产品的装配测试对环境保障提出了更高的要求,其环境参数要求恒温、恒湿和8级洁净度。航天设备是一种大型产品,要求从总装配起的一系列生产、测试工作都要在高大的净化空调环境中进行,航天装配测试厂房具有典型高大洁净厂房的特点。对空调专业洁净系统的设计提出了新的课题。

由于产品的组装、竖向起吊及不同区域检测的需求,通常航天装配测试厂房的体量大、空间高,吊顶下高度多为15~30m。一般净化空调的换气次数远大于普通空调,因此,高大洁净厂房具有风量大、机房面积大、投资大、运行耗能和费用高的特点。现行的国家洁净厂房规范对层高小于4m的洁净厂房的空调换气次数做了明确规定,但对于层高大于4m的高大厂房的气流组织及换气次数暂无规定,且无依据可循。航天装配测试厂

房空间大,并配有大吨位吊车,而产品静置测试时的高度一般不超过5m,相对于整个厂房空间而言,体积较小且尘源集中,因此探讨一种适合这类高大厂房的净化方案具有重要意义。

根据航天装配测试厂房的特征,从节能角度分析空调系统的特点,打破传统洁净厂房顶送、侧下回风的气流组织形式,提出了在空间高度上分层的空调系统方案。通过对高大洁净厂房洁净度、温湿度进行CFD数据模拟,通过理论分析及模拟计算,验证了设计方案的合理性,同时也挖掘了更为节能的潜力,对以后类似工程的设计具有一定指导意义和参考价值。

1 项目概况及其空调系统构成

1.1 项目概况

某航天装配测试厂房,其建筑面积2,016m²,是一长63m、宽32m、高22m的长方体,并有大吨位吊车。根据工艺要求,⑤~⑧轴洁净范围为16m以下,①~⑤轴洁净范围为厂房8m以下,洁净等级为8级。设计参数:温度20~25℃;相对湿度为

作者简介:董秀芳,女,研究员,1988年毕业于哈尔滨建筑工程学院供热通风专业,现就职于航空机载系统工程设计研究院。

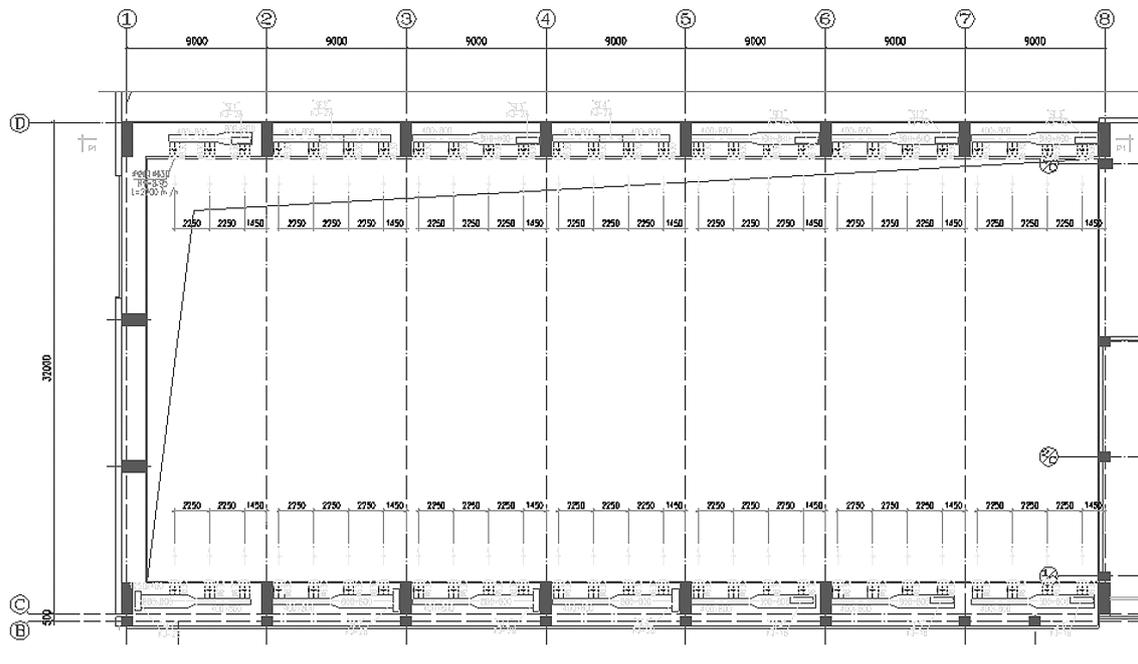


图1 厂房平面图

45%~70%。

厂房采用钢筋混凝土双支柱，屋顶钢网架结构形式，双支柱间距为2m，且两柱之间设斜拉杆作为柱间支撑。墙壁及顶板采用100mm厚的金属夹芯净化壁板，地面为防静电自流平地面。厂房平面图见图1。

1.2 厂房的特征

1.2.1 厂房空间特征

航天产品的装配、测试工作都要在高大的净化空调环境中进行，产品所占有效空间相对较小，对于这类型的高大空间往往不需要全室净化。

1.2.2 使用时间的特征

从此类厂房的使用时间上来看，常常表现出明显的周期性及不均衡性。在工作班次上所占用的时间周期比非工作（如闲置时间、产品的存放时间以及各项准备工作）所占用的时间周期短，而且相对集中。

1.2.3 净化负荷特征

对洁净工程而言，其负荷指的是悬浮于空气中的粒径不同的颗粒物，这些颗粒物分别来自以下几个方面：

其一，由室外新风携带进来。

其二，生产过程中，工序周转时由产品及使

用工具、仪器、设备带入或生产过程中产品自身产生；

其三，是操作人员在操作过程中散发出来的。厂房内除吊车尘源来自于上部外，其他尘源则主要产生于厂房的下部空间，其中尤以人体散发居多，影响程度也较大。总装及测试工作多属于轻体力劳动，产尘量按 2.98×10^6 粒/人/min^[3]（0.5 μ m）计算，这样每班48人总的产尘量为 1.43×10^8 粒/人/min。如果这些颗粒物均匀散布在整个厂房空间，这一增值对8级净化厂房来说是微不足道的。但如上述人体散发的灰尘集中在产品周围，假定集中于一个柱网间距空间内，则此空间含尘浓度会迅速增加，从而直接影响到厂房的洁净度。

其四，地面产尘量。地面产尘量一般按 1.4×10^4 个/m²/min^[3]（0.5 μ m）计算。

综上所述，净化负荷来自于上、下两部分，来自厂房上部的颗粒物通过沉降或被气流携带到达下部。下部空间负荷主要来自人体、设备、地面。并相对集中于设备产品周围，可能产生局部空气含尘浓度较高的现象，同时设备产品区域也是净化要求严格的区域。这些净化负荷特点为局部净化提供了新的设计思路。

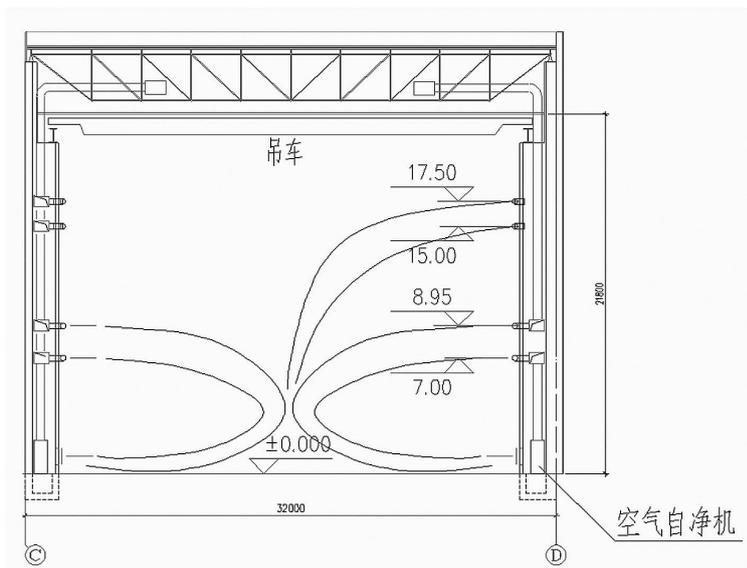


图2 送回风气流流型图

1.3 空调系统构成

1.3.1 空调系统形式

对于净化工程而言,节省建设资金和节约运行费用,其出路主要是最大限度地减少系统总循环风量。要做到这一点,最有效的途径就是最大限度地压缩净化空间。所采取的措施是将空间在高度上分层,即产品所处的下部净化区,上部为非净化区。

与分层空调不同,净化空调对上层非净化区做密封处理,不设排风系统。以中央空调机组为主体,组成大循环系统,送风气流由净化区上部的喷口送出,这部分气流与来自上部的颗粒物相遇,将携带高浓度尘粒的那部分空气冲淡,从而减轻了来自上部的灰尘对下部区域的影响程度。这部分送风兼有净化及冷热湿两种负荷。净化区的下层处在送风的回流区,在该区内设有以自净机为主体组成的局部小循环。

设计采用喷口侧送风、双侧夹墙下部侧回风的分层空调方式,利用气流覆盖效果来满足洁净度及温湿度的要求。洁净处理机组与局部净化器相结合,洁净处理机组保证室内的温、湿度,高余压自净器满足洁净级别的要求。

1.3.2 设计风量的确定

根据《洁净厂房设计规范(GB 50073-2001)》^[4]的要求,8级洁净度的换气次数为15次/h,同时参考国内外类似工程的成功经验,本次设计风量

按照洁净区域空间内的15次/h考虑,即相当于整个厂房空间的换气次数为7.8次/h。洁净处理空调机组总循环风量为171,000m³/h。空气处理机组设置在空调机房内。空气经过洁净处理空调机组内初、中效过滤及表冷、加热、加湿处理,再经过高效过滤器过滤后送至空调房间。另外,选用40台洁净自净机组(单台风量为4,400m³/h/台,功率3.5KW/台,配中、高效过滤器),自净机组总的循环风量为176,000m³/h。自净器布置在厂房两侧2m宽的双支柱空间内,同时双支柱空间亦作为空调系统的回风夹道,所有的空调送、回风支管及专业的管线亦均在此空间敷设。

1.3.3 气流组织形式

与分层空调气流组织一样,分层净化空调气流亦采用侧上送、侧下回方式,但二者有所不同。一般分层空调系统是以温度调节为目的,在上部的非空调区仍有较大的负荷,通常在该区设有以排除余热为目的的排风系统。而净化空调是以净化为目的时,净化负荷主要集中在下部,上部通常可不设排风,这样也利于对上部空间密封,以减少灰尘的侵入。净化空调系统可以在不同高度上布置两层送风口,利用喷口侧送风形成的气流来覆盖净化区域。

厂房①~⑤轴区域工艺要求的洁净范围为8m以下,喷口布置高度为H1=7.00m和H2=8.95m,其中H2=8.95高度处的喷口是以中央空调机组为主体组成大循环系统,这部分送风兼有净化及冷热湿两种负荷;H1=7.00m高度处的喷口是以自净机为主体组成的局部小循环。这部分送风仅为了满足净化要求而设置。

厂房⑤~⑧轴区域工艺要求的洁净范围为16m以下,喷口分布按上、下两部分设置。8m以下区域的布置同上,8m以上、16m以下区域则另行布置一组喷口。同样的原则,H2=17.50高度处的喷口是以中央空调机组为主体组成大循环系统,这部分送风兼有净化及冷热湿两种负荷;H1=15.00m高度处的喷口是以自净机为主体组成的局部小循环。喷口布置详见图2。

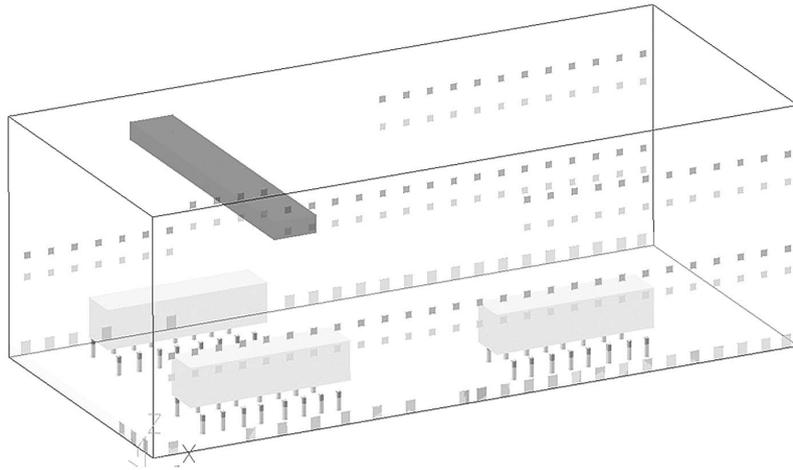


图3 厂房模型示意图

表1 室内源强度及分布 (产热、产湿、产尘量)

	类型	单位产量	单位数	空间均匀分布
产热	人员负荷	0.117kW/人 ^[2]	48人	2m以下
	工艺设备负荷	48kW/台	3台	10m以下
	自净机组负荷	3.5kW/台	40台	考虑在自净机组送风温升中
产湿	人员负荷	175g/h/人 ^[2]	48人	2m以下
产尘	人员负荷	2980000个/人/min ^[3]	48人	2m以下
	地表面负荷	42375个/m ² /min ^[3]	1689.12m ²	2m以下
	工艺表面负荷	42375个/m ² /min ^[3]	228m ²	10m以下
	吊车表面负荷	42375个/m ² /min ^[3]	332m ²	18m以上

表2 空调、自净机组送风参数

	风口个数	风口风量 (m ³ /h)	送风参数	送风浓度
空调风口	78	2200	夏:16℃ 75%	0
			冬:22℃ 40%	
自净器风口	78	2256.4	夏:20.28℃	0
			冬:24.68℃	

2 CFD 模型的建立

2.1 模型的几何图形

某航天装配测试厂房为长63m、宽32m、高22m的长方体,最不利情况尘源考虑3台设备同时检测组装,每台设备外形尺寸为 4.5×15 m,每台设备周围考虑16人,设备是由钢架支撑,中心距地面可以按4m。另外每台设备的发热

量均按48KW考虑(共 $48 \times 3 = 144$ KW)。吊车位置在两台设备的上方。其中,将人员简化为 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 1.7\text{m}$ 的长方体,每个设备两侧各有8人。模型示意如图3。

2.2 模拟计算边界条件设定

2.2.1 室内源强度及分布

装配测试厂房操作人员工作多属于轻体力劳动,每班人数约48人,实际工作时人员往往集中在产品周围,则此空间含尘浓度的会急剧增加,人员负荷对区域洁净度的影响较为明显。工艺设备发热负荷也集中在设备周围,工艺设备区域的温度场也会发生变化,这一点需特别关注。CFD数值模拟在局部尘源、热源方面会更具优势。模拟计算室内源强度及分布见表1。

2.2.2 送风参数设定

空调机组送风参数为经空气处理机组处理后

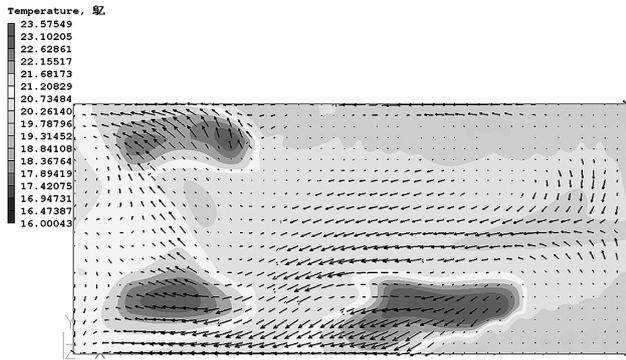


图4 H=4m水平面温度场示意图

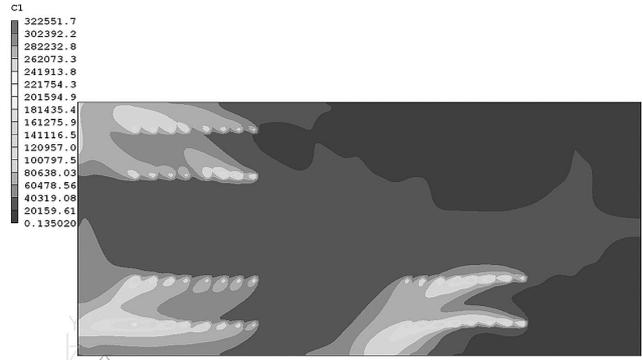


图5 L=37.9m横截面温度场示意图

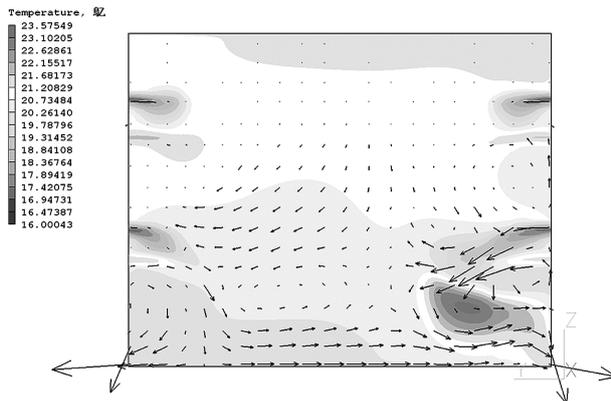


图6 H=0.5m水平面粒子浓度场示意图



图7 L=14.125m横截面粒子浓度场示意图

的出风口参数, 详见表2;

自净器送风参数为回风参数并考虑自净器的风机温升, 自净机组 $N=3.5\text{KW}/\text{台}$ 。(自净器风机功率的70%转换成热能, 根据 $Q=c \cdot p \cdot T \cdot L/3600$ 公式, 可计算风机温升 $T=3.5\text{kW} \times 3600 \times 0.7/(1.2\text{kg}/\text{m}^3 \times 1.005\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K} \times 4400\text{m}^3/\text{h})=1.68^\circ\text{C}$)

计算温升为 1.68°C 。根据热平衡得到室温夏季为 18.6°C , 冬季为 23°C , 则自净器送风参数夏季为 20.28°C , 冬季为 24.68°C 。因空调机组和自净器机组均装有高效H13($>99.95\%$), 认为送风浓度为 $0(>0.5 \mu\text{m})$ 。

2.3 PHOENICS设定

厂房内介质按设计要求采用 20°C , 1atm 下空气的物性参数进行计算, 室内湍流模型采用了 $k-\varepsilon$ 模型, 计算厂房内颗粒分布考虑其重力的影响, 颗粒源的粒径全部设定为 $0.5\mu\text{m}(0.5 \sim 10\mu\text{m})$, 采用boussinesq浮升力模型。根据以上模型假设和边界条件, 本研究利用PHOENICS进行数值试验, 为优化网格, 对风口位置进行了细微的调整, 调整后的网格总数约为86万。

3 CFD模拟结果与分析

3.1 温度场模拟结果分析

从图4中发现, 由于设备热源及人员集中, 操作区平均温度整体高于其他无集中热源区域 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 。最高温度 $<24^\circ\text{C}$, 满足设计参数要求(设计温度为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$)。

从图5可以看出($L=37.9\text{m}$ 横截面为图1厂房平面图中距离①轴 37.9m 处的垂直截面), 流动从北侧射流向南延伸逐渐变为南侧射流向北延伸。设备作为主要的热源, 其热浮升力对流场有着明显的影响, 造成了局部的涡流, 是形成目前流场的主要原因。

3.2 粒子浓度场模拟结果分析

从图6和图7中可以看出, 由于设备及人员集中, 操作区粒子浓度明显高于其他区域, 最高浓度 $22\text{万个}/\text{m}^3$, 但整体上厂房粒子浓度在 $10\text{万个}/\text{m}^3$ 以下, 洁净度可达到7级(万级)(7级的粒子浓度为 $35\text{万个}/\text{m}^3$)。由于目前最不利的工况下浓度极值依然远小于设计上限, 因此, 在

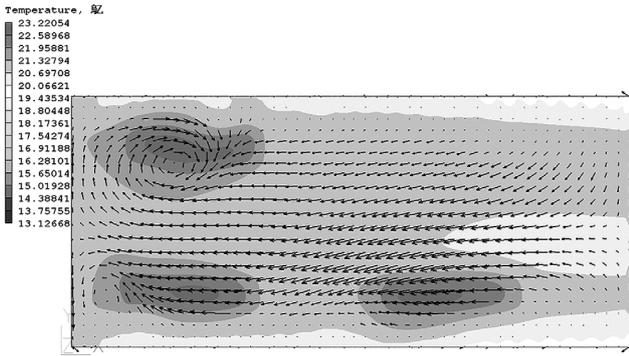


图8 H=4m水平面温度场示意图



图9 L=37.9m横截面温度场示意图

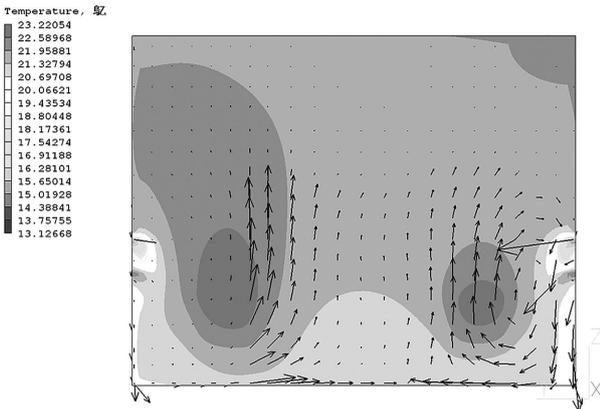


图10 H=0.5m水平面粒子浓度场示意图



图11 L=14.125m横截面粒子浓度场示意图

厂房平时的工作中其洁净度是完全符合设计要求的，同时存在减小洁净风量的可能性。

3.3 模拟结果分析

通过对模型夏季工况的模拟分析，可以得出以下结论：

- (1) 厂房的温度、洁净度完全可以达到设计参数的要求，设计方案是合理可行的；
- (2) 在高大空间内采用净化区喷口送风与常规的整个厂房空间顶部下送方案相比，减少了一半的送风量，可达到风机节能近50%的效果；
- (3) 乱流洁净室利用喷口侧送风可以获得与顶送风等同的净化效果。

4 降低系统风量，挖掘节能潜力

4.1 节能性分析

通过上述对设计工况的模拟分析，可以得到结论：设计方案完全满足设计参数的要求，且洁净度远高于8级（即可达到7级、甚至到6级），也就是说，现有的设计方案仍有巨大的节能潜力，

寻求满足参数要求的经济设计工况，对以后的工程设计具有重要的指导意义。

研究方向是将送风量由原来洁净区域空间内的换气次数15次/h降低到9次/h，即相当于整个厂房空间的换气次数为4.68次/h。同样按照上述模拟思路对9次/时工况进行CFD模拟。

4.2 送风参数设定

在送风参数及风口数量不变化的前提下，将系统的总送风量调整为9次/h后，即每个风口风量相应减少，具体送风参数见表3。

4.3 边界条件设定

室内发热量、产尘量设定、PHOENICS设定

表3 空调、自净机组送风参数

	风口个数	风口风量 (m ³ /h)	送风参数	送风浓度
空调风口	78	1320	夏:16℃ 75%	0
			冬:22℃ 40%	
自净器风口	78	1353.8	夏:20.28℃	0
			冬:24.68℃	

及模型空间位置均与设计工况（15次/h）相同。

4.4 温度场模拟结果分析

从图8和图9中可以看出，换气次数减小到9次/h后，厂房整体温度明显升高，但最高温度仍 $<24^{\circ}\text{C}$ ，满足设计参数要求。另外流场则更为均匀，流动较弱。这在另一方面减小了东西侧的温差。西侧的涡流依然存在且更为明显。南北侧射流的交汇由于送风风速的减小而减弱，呈现出较好的对称性。

4.5 粒子浓度场模拟结果分析

从图10和图11中可以看出，尽管最高的浓度达到了 $50\text{万个}/\text{m}^3$ ，但厂房绝大部分的浓度不到 $30\text{万个}/\text{m}^3$ ，依然远小于设计要求的浓度上限（8级约 $320\text{万个}/\text{m}^3$ ）。由于人员是主要的粒子浓度的影响因素，可以预见的是，当人员处于走动中时，其产生会在更大的范围内分布，因此集中的浓度更小。这说明通过减小洁净送风量来减小运行能耗是完全可行的。

5 结论与展望

通过对高大洁净厂房工程实例进行CFD数据模拟，可以得出以下结论：

(1)空间高度上分层的喷口侧送风系统方案适用于高大洁净厂房；

(2)CFD模拟的设计工况（15次/h）及节能运行工况（9次/h）不同换气次数下的洁净工作区温度、粒子浓度均满足设计要求，完全有可能通过减小系统风量来降低运行能耗和费用，但需实测数据进行验证；

(3)尽管9次/h下厂房的洁净度仍远高于设计要求，但送风量却不能无限减少，送风量的降低会带来厂房的温度超标准，合理的送风量是满足洁净度和温度的综合数值，同时根据使用时间周期性和不均衡性，及人体尘源相对集中等特点，设计洁净度通常比工艺要求高一个等级；

(4)本工程实际仍然采用了洁净区15次/h的换气风量，但系统设计时采用了变频技术可以实现系统风量调节，并通过实际测试来确定经济运行的节能换气风量。

高大洁净厂房中不同粒径的产生尘规律和运动规律十分复杂，采用目前的数学模拟的分析结果还有待测试数据的验证，下一步的工作需要对成品现场测试，验证方案的合理性，为高大洁净厂

房空调系统设计提供重要的依据。

参考文献

- [1] 赵彬,李先庭,彦启森. 入口紊流参数对室内空气分布的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2000,19(1):1-5.
- [2] 电子工业部第十设计研究院. 空气调节设计手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [3] 许钟麟著,空气洁净技术原理(第三版)[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [4] GB50073-2001 洁净厂房设计规范. 北京:中国计划出版社,2001.
- [5] 李兆坚,张小航,宋道宏,吴飞. 高大洁净厂房空调换气次数对洁净度的影响测试分析. 国防系统委员会第三届年会论文集,2010(06).
- [6] 万才大. 西昌卫星发射中心卫星测试装配空调洁净. 暖通空调,1991,(4).
- [7] 高树德. 高大空间净化工程设计若干问题. 暖通空调,1994,(4).

审稿:肖武

中外航空发动机产业合作的 制约因素与对策研究

■ 张波 「工艺」

摘要: 航空发动机国际产业合作的形式主要有转包生产、协同设计和共同经营等3种模式。国内外的实践证明,国际合作是扩大产业发展空间、增强产业发展动力、加速技术进步的重要途径。然而,由于多方面的原因,中外航空发动机产业的合作却受到许多制约,其结果表现为:国内航空发动机工业在提高转包生产市场份额方面后继乏力,在提升合作层次方面困难重重。本文将在深入分析中外航空发动机产业合作制约因素的基础上提出相应的对策和建议。

关键词: 航空发动机; 产业合作; 对策; 建议

1 制约转包生产市场份额扩大的因素

1.1 成本优势逐步丧失

长期以来,国内航空工业吸引转包生产的主要优势在于成本较为低廉。但是近年来,我国的成本优势正在逐步丧失,这主要表现在以下4个方面。

第一,其他发展中国家的介入。随着大量发展中国家工业化进程的发展,越来越多的发展中国家也具备了航空发动机零部件的制造能力,从而吸引了大量航空工业的转包生产业务,其中最为突出的国家是墨西哥。据AeroStrategy公司的2010年的一项抽样调查显示,墨西哥是当今吸引航空工业制造类投资项目最多的国家。从1990年到2009年,墨西哥共吸引全球航空工业制造类的投资项目33个,图1为部分进驻墨西哥的知名航空

企业。同期,我国排名第二,共吸引投资项目28个。墨西哥之所以能承接如此之多的转包生产,主要是因为毗邻美国、接近OEM、北美自由贸易区(NAFTA)和与美国签订的双边航空安全协定(Bilateral Aviation Safety Agreement)。随着大量航空制造企业在墨西哥的集聚,墨西哥的竞争力还将进一步增强。

第二,国内劳动力成本的普遍上涨。随着我国经济建设效果的显现,国民经济实力日益增强,职工工资收入逐年提高。但与快速增长的国内生产总值和企业利润相比,我国职工的收入增长幅度依然偏低。2002—2009年,中国国内生产总值年递增幅度为10.13%,但职工工资扣除物价因素后年均增长只有8.18%。相对低廉的劳动力成本成为我国吸引外资、开拓海外市场的重要手段,为国家经济腾飞奠定了坚实的基础。但随着2008年美国金融危机的爆发,我国出口导向型的产业结构遭受了严重的打击,作为扩大内需、实现国内产业结构战略性调整的一部分,国家在

作者简介:张波,男,工程师,2006年毕业于北京航空航天大学制造工程专业,现就职于工程技术研究院。



图1 部分进驻墨西哥的知名航空企业

“十二五”规划中确定了居民收入增长与经济发展同步的发展目标，“让人民生活得更更有尊严”、“让广大劳动群众实现体面劳动”。为此，国内部分专家与人力资源与社会保障部的官员都建议参照日本20世纪60—70年代的做法，推行国民收入倍增计划。国内劳动力成本的上升是我国产业结构升级调整的必然和必需，将有利于我国整体经济的长期和持续发展，但对航空工业转包生产所带来的不利（尽管可能是暂时的）也是显而易见的。

第三，人民币的升值和汇率变动。发动机制造产业是资本密集型的产业，其产品最终被销往国际市场，因此特别容易受到汇率的影响，降低汇率影响已经成为发动机主承包商供应链管理决策的重要方面。例如，面对美元对欧元和英镑汇率的持续走低，罗·罗公司正不得不把更多的业务转移到低成本国家或美元区^[1]。作为低成本国家，我国吸引了大量航空转包生产业务，但是近年来，伴随着我国经济持续高速增长，国际收支的双顺差和不断增加的巨额外汇储备都为人民币升值带来了巨大的压力，西方发达国家出于种种目的，也动用政治舆论逼迫人民币升值。随着人民币对美元和欧元汇率的不断攀高，我国的低成本优势将大打折扣，对航空转包生产的吸引力也必将由此而有所降低。

第四，能源危机引发的运输费用上涨。经济全球化高速发展有赖于相对低廉的燃油。然而，

从2002年起，全球原油价格便开始进入了持续性的高涨。2001年国际原油年均价为24.2美元/桶，而如今每桶原油的价格已经上涨了数倍。2008年，全球航运业领先企业马士基航运公司曾表示，燃油成本占货轮运营成本的比例已从10年前的20%激增至当前的近50%。在航空货运领域，这一数字估计是35%~40%。即使油价回落，但长期高位运行已经不可避免。尽管作为产业链中的一环，运输业要实现运价的上升并不是一件简单的事，运力和货量的博弈始终是决定运价的关键。但从长期趋势看，高油价必将导致国际运价持续走高。运输成本增加，令过去一些厂商习以为常的全球生产供应链已被打破，厂商在经营中将更多考虑本地化或者当地化运营，以尽可能地减少运输成本。虽然到目前为止，制造业内运费上涨的最大受害者还仅限于生产低附加值产品的企业，航空工业产品因为其附加值高而暂时未受太大影响，但可以肯定的是，在运输成本方面，远离欧美的中国航空发动机制造企业正越来越面临着不利的竞争局面。

一件简单的事，运力和货量的博弈始终是决定运价的关键。但从长期趋势看，高油价必将导致国际运价持续走高。运输成本增加，令过去一些厂商习以为常的全球生产供应链已被打破，厂商在经营中将更多考虑本地化或者当地化运营，以尽可能地减少运输成本。虽然到目前为止，制造业内运费上涨的最大受害者还仅限于生产低附加值产品的企业，航空工业产品因为其附加值高而暂时未受太大影响，但可以肯定的是，在运输成本方面，远离欧美的中国航空发动机制造企业正越来越面临着不利的竞争局面。

1.2 现有加工能力有限

当今全球各大主机承包商为增强自身的核心竞争力，提高经营的灵活性和利润率，把大量附加值低的生产任务外包，这对子承包商的加工能力提出了很高要求，有时甚至不得不放弃劳动力成本最低的原则。

例如，波音全球战略部的官员David McKenna披露^[2]，在研制新产品时，相对于成本而言，波音公司在寻求全球合作伙伴时更关注的是技术实力。“在新项目中，我们需要全球最佳的伙伴，不管它来自意大利、瑞典、法国、韩国、日本、中国（还是）美国”，他说，“中国虽然可以组装诸如A320那样的金属飞机或制造翼盒，但是还不能制造像787所用的最新型复合材料机翼”——对于这种复合材料机翼，波音最终选择的是日本的东丽（Toray）公司，并与之签订了



图2 罗·罗公司位于新加坡的工厂与员工

16年共计60亿美元的合同。东丽公司位于日本东京，该地区的劳动力成本甚至远远超过美国本土的许多地区，波音之所以与东丽合作，完全是因为该公司在碳纤维复合材料技术方面堪称全球的领导者之一——2007年其市场份额约为全球市场的35%。

面对类似的抉择，发动机制造商们也给出了类似答案。罗·罗在扩展其海外生产能力时优先考虑的同样也是技术水平，最终其新厂址选在了相关技术基础雄厚的新加坡和美国的佛吉尼亚。图2为罗·罗公司位于新加坡的工厂与员工。此外，日本之所以能在发动机主轴、轮盘、叶片和低压压气机等零部件的全球转包市场上独领风骚，很大一部分原因就在于它在精密加工和复合材料制造方面拥有全球领先的技术优势。

与国外先进的制造技术水平相比，国内还有很大的差距，落后的工艺技术主要有^[3]：涡轮叶片的精密铸造工艺，粉末涡轮盘的高效制备技术，整体叶盘的制造技术，大型宽弦风扇空心叶片制造技术，树脂基复合材料、钛合金、高温合金机匣制造技术等。制造工艺的大面积落后严重制约了我国航空发动机制造企业在国际转包市场上的竞争力。

1.3 国外工会组织的反对

经济全球化为发达国家产业结构升级、全球

资源优化配置带来了历史性的机遇，但与此同时，它也给发达国家的部分产业工人带来了冲击——随着大量制造业务被转包到国外，大量工人至少暂时失去了工作。为此，国外航空制造商也常常遭到本国工人在工会组织的下的有力抵制。

2008年，波音的工人为反对大量的工作被外包导致工作机会的减少，在工会的组织下27,000名工人参加了

了波音公司13年以来最为持久的罢工。这次罢工共持续了58天，进一步拖延了波音一再延期的787项目，使得波音公司蒙受了巨大的经济损失。据专家估计，波音在这次罢工中，仅在销售收入方面每天的损失大约为100万美元，第三季的股票收益减少了大约14%。

面对强大的工会组织，国外航空制造商也不得不做出让步，在国内保留部分生产制造业务。但与此同时，它们也发现了这样做的好处，其中包括：第一，有利于继续获取政治支持。在选民政治中，政府必须考虑包括就业在内的诸多民生问题，庞大的雇员规模便成为发动机制造企业换取政府支持的有力筹码。第二，有利于坐享本土与海外劳动力市场竞争的渔翁之利。通过在本土保留部分生产制造能力，发动机制造商在把业务转包给其他国家时就不至于遭遇到过高的报价。实际上，海外转包商的低价还常常被用来迫使本土高技术工人降低工资和福利要求。

2 制约国际合作层次提高的因素

2.1 设计开发能力不足

国际航空发动机产业风险合作的重要特征之一是合作各方都拥有各自的技术特长，相互之间能够形成优势互补。正是这种优势上的互补，

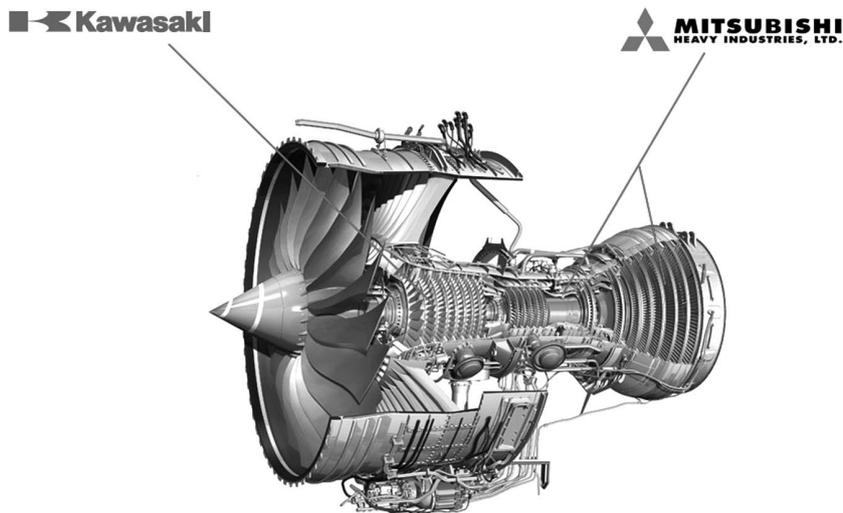


图3 日本企业在Trent1000发动机中参与的工作

产生了协同效应，提高了发动机研制的速度和质量，降低了成本和风险。

例如，日本的航空制造企业之所以能够参与众多的国际合作项目，并在其中发挥举足轻重的作用，有很大一部分原因就是日本的航空企业在零部件方面已经具备了很强的设计开发能力。例如，石川岛重工（IHI）凭借其在复合材料技术方面的深入研究，创新性地开发出表面带有特殊凹槽的碳纤维叶片，空气在凹槽的作用下可以在叶片周围形成隔热层，从而有效地防止叶片被高温烧毁^[4]。

通过长期的技术积累，三菱重工在航空发动机零部件设计开发方面亦取得了很多成果，这为其参与国际合作研发项目铺平了道路。2004年，罗·罗公司民用航空总裁 Charles Cuddington就遑达1000发动机与日本三菱重工确定风险与收益共享的合作伙伴（RRSP）关系时说，“我们非常高兴地欢迎三菱重工成为遑达1000发动机的风险与收益共享合作伙伴。我们许多发动机项目的核心技术都来自日本，这一传统现在通过三菱加入遑达发动机项目而得以延续。”图3为日本企业在Trent1000发动机中参与的工作。

经过几十年的探索与研究，国内虽然具备了一定发动

机设计和研发能力，但是与世界航空发动机工业强国相比差距还很大，甚至在部件的设计开发方面亦比不上日本、德国等国，从而难以与发动机行业巨头形成优势互补，进而加入后者的风险合作伙伴序列。

2.2 技术保密

追求技术卓越是实现超额利润的重要途径之一，保守自己的核心技术秘密成为每个发动机企业确保其竞争优势的自觉行为。与此同时，发动机技术作为航空工业的重要基础，关系到国家和产业的安全与繁荣，亦被各国政府视为重要秘

密，严加保守。为此，发动机产业的国际合作都面临着企业和国家保守技术秘密的困难。

1970年，美国尼克松总统为加强美法两国战略合作关系，授意通用电气公司接受法国斯奈克玛公司提出的合作研制发动机的建议时，就曾经遭到了通用电气公司的抵制。通用电气担心与斯奈克玛的合作会导致技术秘密的外泄、加剧航空发动机制造业的竞争。在两国长期利益诉求的迫使下，通用电气公司最终屈从了政府的压力，与斯奈克玛合作开发了CFM56发动机，但也依然对保护其在核心机领域的技术秘密在合作协议中做出了严密的安排：第一，合作双方进行了明确的分工。通用电气公司负责设计和制造核心机，斯

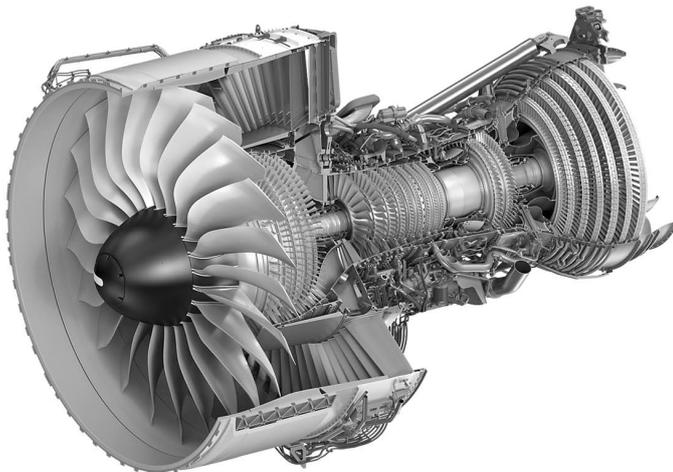


图4 GP7000航空发动机剖视图

奈克玛负责设计和制造与核心机相配套的其他部件；第二，CFM56发动机的集成和测试都必须在通用电气位于美国的工厂进行，并且在任何情况下斯奈克玛公司都不能私自打开核心机的封装。

CFM56发动机取得了巨大的商业成功，其合作过程中的技术保密措施也在后来的合作项目中得以延续。1996年，当通用电气和普惠联合成立发动机联盟公司（Engine Alliance）合作研制GP7000发动机时，这两家美国公司为了保护各自的技术秘密，同样采取了界限分明的技术分工：通用公司负责研制高压部分，普惠公司负责研制低压部分^[5]。图4为GP7000航空发动机剖视图。

出于股东和自身利益的考虑，有时大型航空发动机制造企业也有可能愿意承担一些“泄露技术秘密”的风险而与国外的其他企业开展合作。但是当涉及到中方的企业时，这些所谓的风险却常常被西方国家政府透过意识形态的放大镜无限放大，中外航空工业的合作遭到了更为严密的封锁。

例如上个世纪90年代，当我国提出制造AE-100运输机时，为在激烈的配套发动机项目竞争中获胜，通用电气公司曾经多次向美国政府申请与我国合作生产一种简化版的CFM-56发动机（CFM-56-Lite），但是由于该型号发动机的核心机与B-1、F-16等军用飞机所使用的发动机核心机相同，所以美国政府拒绝了通用电气公司的一再请求^[6]。

不仅直接的技术合作遭到美国政府的禁止，有时不涉及技术的经济合作也遭到了美国政府的封杀。1990年，中国航空技术进出口公司（中航技）购买了位于西雅图的一家飞机零件制造企业（MAMCO Manufacturing）的股份，但是乔治·布什总统却接受了美国外资委员会（Committee on Foreign Investment in the United States, CFIUS）的建议，援引1950年的《国防生产法》，勒令中航技出售刚刚购入的该公司的股份。美国外资委员会认为：尽管这家制造企业的技术并不先进，但这些技术却受到出口限制；中航技通过（原）航空部与军方有着密切的联系；通过占有该公司股份，中航技有可能打通与其他航空航天企业的特殊渠道。

相对于美国政府的严密封锁，欧洲国家在与我国的航空发动机技术合作方面，限制相对宽松，但是在核心技术方面依然高度敏感。例如，在AE-100运输机竞争中，罗·罗公司曾经提出让我

国承担高温压气机和低温涡轮的生产，并承诺在德国帮助我国培训工程师。但相对于我国更关心的高温涡轮和燃烧室模块，罗·罗公司依然不能接受^[7]。此外，从工程师培训的地点来看，罗·罗公司把地点选择在德国，显然也是为了避免中方人员接触到其位于英国的核心设计与试验设施。

3 中外航空发动机产业合作发展前景

随着全球经济的全面复苏，航空工业又将步入快速发展期。墨西哥、印度等航空工业相对落后的国家将发挥其毗邻OEM、劳动力低廉等优势，继续扩大它们在国际转包生产市场上的份额。德国、意大利、日本等转包大国也将通过与行业巨头的合作经营而继续获取大部分、高价值的转包生产业务。我国在巨大的市场需求、相对雄厚的技术基础和完善的基础设施条件等有利条件的支持下，航空发动机产业转包生产的规模还将继续扩大，但随着制约因素的凸现，未来或将放慢增长速度。如果我国能及时进一步增强加工制造能力，并在某些产品领域形成特有的技术优势，将有效地延缓上述不利局面的出现。

发动机产业高层次国际合作的驱动力来自于利益的权衡。对于企业来说，主要是短期利益与长期利益的权衡；从长远来看，我国航空发动机产业实力的增长必然会进一步加剧国际航空发动机市场的竞争；但从短期来看，加强与我国的合作将有利于扩大国外航空发动机制造商的市场份额，增强其在当前激烈竞争中的实力。在现实与未来的抉择中，当今全球发动机制造业正面临着经典的“枪手决斗”博弈模型——在决斗中，枪法最好的枪手往往成为众矢之的，而枪法最差的枪手（中国），往往一开始会幸免于难。

对于国家来说，主要是局部利益与整体利益的权衡。尽管发动机产业关系到国家和产业的安全与持久繁荣，但是在国家间相互的角力中，它依然只是众多棋子中的一枚。在国家间利益广泛、深入地相互渗透与交错的大格局下，出于合纵连横的需要，并不排除这个棋子成为国家间战略合作祭品的可能。例如，上个世纪80、90年代，美国出于在冷战中拉拢中国围堵前苏联的需要，也曾经与中国开展过包括和平典范（Peace Pearl Project）在内的国防工业合作。当然，随着冷战的结束，这些合作便被美方匆匆以各种借口

而终止。在当今美国独霸全球、国际政治趋于缓和的历史性背景下，军事需求对中外发动机工业合作的推动力明显不足，但如果我国能有效、灵活地发挥国际市场、外汇储备、战略物资、人力资源等优势，依然有可能逐步引导并促成中外航空发动机产业的高层次合作。

就合作最终所能达到的高度而言，国外合作的成功案例表明，中外合作很难达到发动机的核心技术，以高温涡轮、燃烧室等为代表的核心技术依然必将受到各国企业的严密封锁。对此，我国航空发动机工业必须保持清醒的认识，坚持独立自主的科研方针，深入持久地开展相关技术研究，争取早日开发出拥有完全知识产权的发动机核心机，从根本上治愈长期以来制约我国航空工业发展的“心脏病”。

4 促进中外航空发动机产业合作的对策与建议

要进一步扩大转包生产的规模，国内的航空发动机制造企业应当从压缩生产经营成本，提高加工制造能力入手。具体的措施包括：建立转包生产联盟，利用国内发动机制造企业的地区差异，降低劳动力成本；推广精益生产的理念和方法，降低生产过程中的浪费；发挥中航工业集团相关的多元化经营优势，建立生产、物流、金融的多元一体的转包生产联合体，降低流通环节的成本；建立、完善利益分配机制，促进制造工艺研究成果在制造企业的工程化应用。对于来自国外工会组织的抵制，中方企业应当借助国家商务部、外交部等部门，在双边贸易、国际政治和舆论等层面予以回应。

实际上，对于我国立志于立足世界航空工业强国之林的发展目标而言，更重要的是要进一步提高中外航空发动机产业合作的层次，实现协同设计和共同经营。

为此，对于企业需要实施双管齐下、互为补充的发展策略：一方面，加强与俄、法、德、日等国发动机制造企业的合作，部分地借助其强大的零部件配套能力支撑、加速国内航空发动机总体设计和核心机的研发能力的提升；另一方面，把握当今世界航空发动机技术的发展趋势，瞄准国外的先进水平，加强零部件的设计开发能力和航空发动机关键制造技术。随着两方面能力的不

断提高，我国航空发动机的研发能力将大大增强，这将有利于打破英美等国的技术垄断，消除其技术保密的顾虑，为提升中外航空发动机产业的合作层次减少障碍。

与此同时，如前所述，国家也应当从战略的高度、多维度地创造有利于提升中外发动机产业合作层次的条件和机会。

参考文献

- [1] Rolls-Royce to shift production away from Britain. RL: http://findarticles.com/p/articles/mi_qn4158/is_20080208/ai_n21280488?tag=content;coll.
- [2] Emily Flynn Vencat. A Boeing of Asia. Newsweek International. URL: <http://www.msnbc.msn.com/id/12652775/site/newsweek/print/1/displaymode/1098/>.
- [3] 王良. 我国航空发动机制造技术的现状与挑战. 航空制造技术, 2008(25).
- [4] Bill Gordon. Japan's Aerospace Industry. November, 1997.
- [5] GE/P&W Work Out Details of 747-X Joint-Venture Plan. Flight International. Vol.4, 1996.
- [6] China's Aerospace Industry, Jane's Information Group, 1997.
- [7] AE-100 Engine Competition Accelerates as Rivals Fight. Flight International. Vol.13, 1996.

审稿：郭志海

基于成本的飞机总装模式 选择模型研究

■ 曹璐雯 王明珠 「工艺」

摘要: 飞机总装模式是总装厂房采取的飞机装配生产形式。本文从国内外现有的3种飞机总装模式出发,分析影响飞机总装模式选择的主要因素,并以企业利益最大化为目标,构建飞机总装生产线“产量-收益”数学模型,深入分析飞机产量对总装模式选择的影响,确定3种工艺模式转型的拐点。从量化模型可见,在其他条件许可的前提下,连续移动生产线是飞机大批量生产的最佳选择。

关键词: 飞机总装; 总装模式; 移动生产线; 产量; 成本

0 引言

飞机总装任务是将各部件对接成完整的飞机,并在飞机上安装各种设备和系统以及进行各种调整、试验检查和检验,是飞机装配工作的最终阶段^[1]。一般来说,大中型飞机总装部分工作量占到飞机整体制造工作量的5%~20%,而总装周期占飞机生产周期的百分比可达25%~40%^[2],是大中型飞机生产制造中的“瓶颈”。

飞机总装模式指的是总装厂房采取的飞机装配生产组织形式。飞机总装工作具有内容复杂、技术性强、专业性强、工作面窄、开敞性差、工序顺序性强等特点^[2]。通过采用各种方法与手段,尽量提高飞机总装的准确性和装配效率,缩短总装周期,降低总装成本,是飞机总装生产组织管理的重点,也成为航空制造企业的核心技术之一。

当前,随着科学技术的不断发展,数字化技术的应用使飞机总装技术水平实现重大突破,先进的管理方式促进飞机总装生产模式不断演进。美国波音公司为了满足飞机的快速生产需求,降

低装配成本,吸取汽车行业流水生产线的理念,率先开展生产线流程再造,在总装中采用移动生产方式,从而大大缩短了飞机总装时间,降低了飞机制造成本,提高了装配质量。随后,空客公司、洛克希德·马丁公司也分别在A380、F-35等飞机装配生产线中采用移动生产线技术,以实现飞机产品大批量生产,同时降低生产成本、提高产品质量^[3]。移动装配生产线逐渐体现出其在飞机总装生产中的优势。我国航空工业当前正处于高速发展的阶段,从飞机总装生产模式的现状来看,仍普遍以传统的固定站位式装配为主,随着大型客机、新支线客机及其他各类军民用飞机项目的相继上马,掌握总装移动生产线技术对我国新一代飞机的研制生产有着重要意义。本文分析了现有3种飞机总装生产模式特点及应用条件,总结了进行飞机总装生产模式选择的5个影响因素,并进一步针对飞机批次产量建立飞机产量影响下的总装模式选择量化模型,为我国飞机总装生产工艺方案选择提供参考。

1 飞机总装的三种模式及其当前主要应用

目前,国内外各大飞机制造公司采用的总装

作者简介:曹璐雯,女,工程师,2009年毕业于北京航空航天大学航空宇航制造工程专业,现就职于规划咨询研究院。

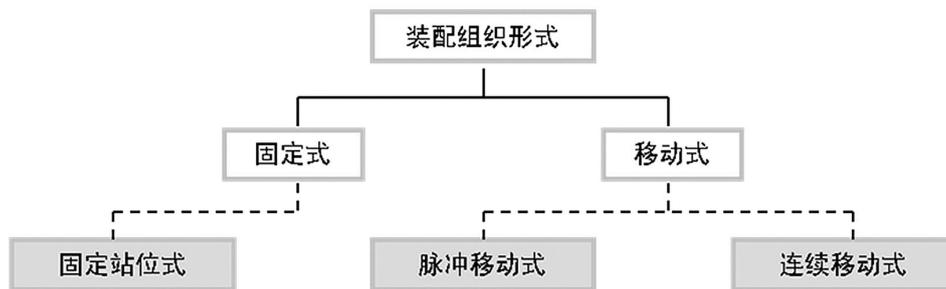


图1 总装生产模式分类



图2 B737飞机连续移动总装生产线



图3 B777飞机连续移动总装生产线

模式有3种：固定站位式、脉冲移动式和连续移动式(见图1)。这3种总装模式在工艺区位布置、生产工人素质、工艺设备性能等方面有不同的要求。

1.1 固定站位式

由一个或几个装配小组在某一固定的工作区域内，完成所有的装配和调试工作，这种装配方式称为固定站位式总装生产模式。飞机在整个总装过程中始终停留在某一固定的工作站位上，对工人的综合技能要求较高，对工艺设备的性能要求比较灵活，原则上需要在每一个站位上配备一套完整的工装设备。

1.2 脉冲移动式

根据总装工艺和节拍，依次在几个不同的飞机站位由专门小组进行专项生产，完成总装任务，称为脉冲移动总装生产模式(脉动式)。这种生产模式强调“间断性的均衡移动”，对装配工人的专业技能要求较高，一条总装生产线配备一套总装工艺设备，根据各个站位的具体工作内容配套相应的装配工装、检测仪器以及动力设施。

1.3 连续移动式

连续移动总装生产模式实质上是精益生产理论在飞机制造业的应用^[3]，即生产线上的飞机

从一个工作站缓慢移动到下一个，在整个装配过程中，飞机始终以平稳的速度移动，每一项装配工序必须在一定时间内由专项工人完成，也形象地称之为流水线式。这种工艺模式要求生产线连续布置，相邻工作区域内无缝连接，生产线没有截断或分流，其对工人的熟练程度和技术管理水平有较高要求，强调工艺设备“灵活的移载性能”，一次性投入要求也比较高。

目前，为了满足飞机的快速生产需求，降低装配成本，波音、洛克希德·马丁等飞机制造公司分别在波音系列民机、F-35等飞机的总装生产线中采用了移动生产方式，从而大大缩短了飞机总装时间，降低了飞机制造的成本，提高了装配质量。如B737在1999年建成移动生产线后，总装时间由原来的22天减少到11天，工作流程产品存货降低50%，储备存货降低59%，该生产线以每分钟2英寸(50.8mm)的稳定速度前行，最终将飞机装配时间减少到8天^[3]。目前，波音公司旗下的B717、B737、B747、B757、B767、B777、B787产品全面采用了这种总装模式(见图2和图3)，使波音公司在提高生产效率、降低生产成本、稳定产品质量方面有了很大的突破^[4]。

表1 3种总装工艺模式的适用条件

总装模式	总装工艺	生产规模	技术水平	管理水平	经济投入
固定站式	无特别需求	单件 小批	工艺不稳定 研制阶段	较低	经济投入小； 可以分期投入
脉冲移动式	模块集成式	成批	工艺较稳定	较高	可以分期投入
连续移动式	传统装配 形式	大批	产品成熟 工艺稳定 技术水平先进	高	一次性经济投入较 高；整条生产线不能 分期建设



图4 德国汉堡总装厂A320飞机脉冲移动总装生产线

空客公司在飞机总装生产方面也进行了大量的研究投入，但就目前来看，其与波音公司在总装生产模式方面有所区别。空客系列飞机的总装工作主要采用固定式集成工作站的装配模式或脉冲移动总装模式。空客公司法国图卢兹工厂生产A320系列飞机采用固定站式总装生产线，而德国汉堡和天津空客的总装厂房均采用了脉冲移动式生产线进行A320系列飞机的装配生产，使交付周期缩短45%，生产效率增加35%(见图4)。空客公司的新型客机A380仍采用固定站式总装生产线，但其正在不断向移动生产线的方向改进。同时，空客英国公司将A380机翼的生产线改成脉冲式生产线，节省了飞机10%的时间和成本。

2 影响飞机总装模式选择的主要因素分析

飞机制造企业总装生产模式的选择与企业的发展水平有着密切的关系，在本质上是对资源的管理和调配问题。通过对3种总装生产模式的特点分析，飞机总装模式的选择受到总装工艺方式、产量需求、企业管理水平、技术能力和经济投入5

方面因素影响，3种总装模式在各影响因素下的适用条件如表1所示。

上述5类影响因素的发展促进了总装生产模式的调整、转型，而总装生产模式的选择也将推动影响因素的发展，二者相互促进，相互制约。国内外航空主机生产企业往往根据自身情况，选择适合的总装生产模式开展生产。

在目前的国际航空制造业中，空客、波音等航空巨头以成熟的产品工艺、高水平的工艺技术、大额的成本投入和稳定的产量需求为保障，将移动总装生产模式成功应用在企业生产中，成为垄断市场的核心竞争力之一。我国飞机主机生产企业在生产中，普遍具有产品型号多、生产批量少、生产任务不均衡、总装自动化程度低等共性，仍主要运用传统的固定站式总装生产模式。

3 飞机产量对总装模式选择的影响模型

飞机总装模式选择的影响因素众多，但随着管理水平的不断提升和技术的逐渐成熟，总装模式选择实质上是由成本和产出的关系决定，因此，飞机产量需求成为选择总装生产模式的重要因素。

由于企业生产的最终目的是实现最大收益，根据这一目标，本文构建了以飞机年产量 N 为自变量，年收益 Y 为因变量的飞机总装生产线“产量—收益”数学模型，以求得不同总装生产模式的产量适用情况。

3.1 飞机总装生产的成本计算

要获得飞机的年收益 Y ，总装生产每年的成本投入 C 是最为关键的因子。一般来说，飞机总装生产的成本投入 C 包括：一次性投资成本 F 和可变成本 V 两大部分，将该成本投入折算到每一年的成本投入，则其组成如图5所示。

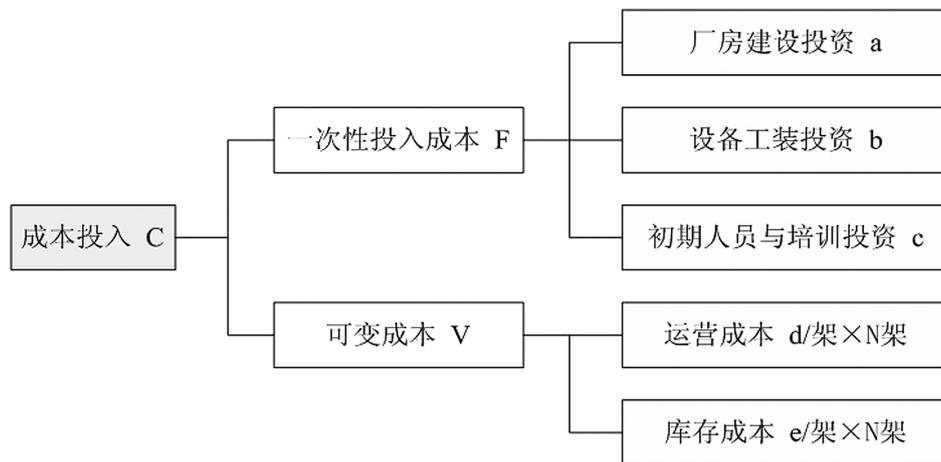


图5 成本投入组成

一次性投资成本F：包括厂房建设投资a、设备工装投资b、初期人员培训投资c，（假设厂房投资按30年折旧，设备工装投资按15年折旧，人员培训投资按5年折旧，固定资产按平均年限折旧法核算每年成本投入）；

可变成本V：包括单架飞机总装生产消耗的运营成本d、单架飞机消耗的库存成本e。

则每年的总装成本投入C可表示为：

$$C=F+V=\left(\frac{a}{30}+\frac{b}{15}+\frac{c}{5}\right)+(d \cdot N+e \cdot N) \quad (3-1)$$

3.2 三种模式下飞机总装生产最高年产量计算

飞机总装生产周期与飞机的年产量N密切相关。假设3种总装生产工艺模式下，厂房设计为 n_i 个站位，生产周期为 D_i 天/架，则飞机的最高年产量为：

$$N_{i(\max)}=\frac{250}{D_i} \times n_i \quad (3-2)$$

i = 固定站式、脉冲移动式、连续移动式。

3.3 飞机总装生产年收益的计算

以飞机总装生产年收益Y的比较，作为3种总装模式生产方式选择的决定因素。在某一产量需求下，以年收益最大为最优选择。假设单架飞机的收益为P，飞机年生产N架，则在不同总装生产模式下，该飞机的年收益为：

$$\begin{aligned} Y_i &= P \cdot N - C_i = P \cdot N_i - \left(\frac{a_i}{30} + \frac{b_i}{15} + \frac{c_i}{5}\right) - (d_i \cdot N_i + e_i \cdot N_i) \\ &= (P - d_i - e_i) \cdot N_i - \left(\frac{a_i}{30} + \frac{b_i}{15} + \frac{c_i}{5}\right) \end{aligned} \quad (3-3)$$

i = 固定站式、脉冲移动式、连续移动式。

其中：

a_i —某种总装生产模式下，总装厂房建设费用（单位：万美元）； b_i —某种总装生产模式下，工艺设备工装费用（单位：万美元）； c_i —人员培训费用（单位：万美元）； d_i —单架飞机生产消耗的运营成本（单位：万美元）； e_i —单架飞机消耗的库存成本（单位：万美元）。

当 $N_i=0$ 时， $Y_i=-\left(\frac{a_i}{30}+\frac{b_i}{15}+\frac{c_i}{5}\right)$ ，即为某种总

装生产模式下，一次性投资成本在每年的折旧；

当 $Y_i=0$ 时，飞机产量为：

$$N_{i(Y=0)}=\left(\frac{a_i}{30}+\frac{b_i}{15}+\frac{c_i}{5}\right)/(P-d_i-e_i)$$
，此时该

种总装生产模式达到收支平衡。

当 $N_i=N_{i(\max)}$ 时，在现有生产条件下，已经达到了最大的生产能力，需要增加生产线以实现扩大再生产。

当 $N_i>N_{i(\max)}$ 时，平均每年一次性投资成本为2F，则年收益为：

$$Y_i=(P-d_i-e_i) \cdot N_i-2\left(\frac{a_i}{30}+\frac{b_i}{15}+\frac{c_i}{5}\right) \quad (3-4)$$

直至达到新的最大生产能力，以此类推。

根据公式（3-4），以飞机年产量N为横坐标，以年收益Y为纵坐标，绘制不同总装生产工艺模式下的年收益曲线见图6。

当 $N=N_{\text{固} \rightarrow \text{脉}}$ ， $Y_{\text{固}}=Y_{\text{脉}}$ 时，固定站式与脉冲移动式总装生产模式“产量-收益”曲线相交，此时两种生产模式的收益相同，为固定式

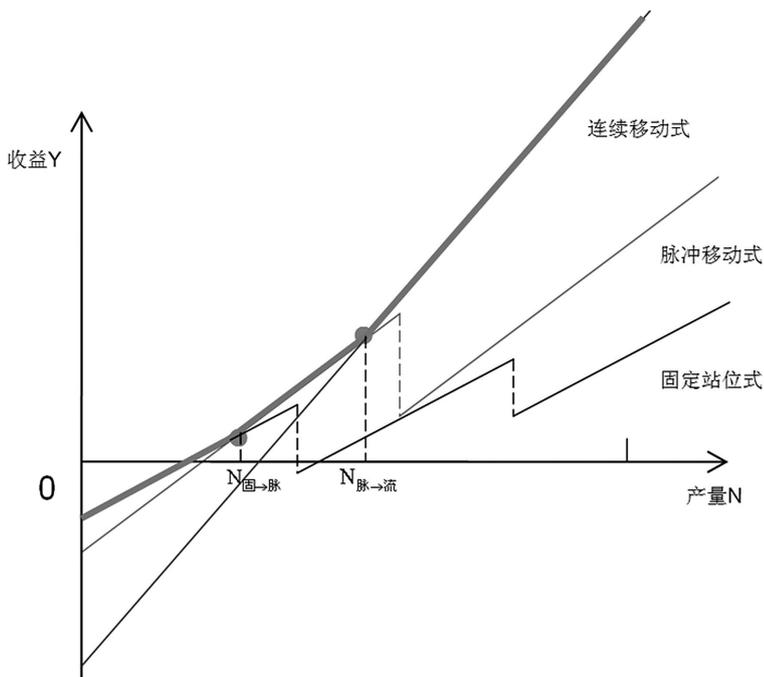


图6 三种总装模式下的年收益函数示意图

与脉冲移动生产模式转换的拐点。当 $N > N_{固 \rightarrow 脉}$ 时， $Y_{脉} > Y_{固}$ ，脉冲移动生产方式带来的企业效益更大。

同理，当 $N = N_{脉 \rightarrow 连}$ ， $Y_{脉} = Y_{连}$ 时，脉冲移动式与连续移动式总装生产模式“产量-收益”曲线相交，此时两种生产模式的收益相同，为脉冲移动式与连续移动生产模式转换的拐点。当 $N > N_{脉 \rightarrow 连}$ 时， $Y_{连} > Y_{脉}$ ，连续移动生产方式带来的企业效益更大。

因此，以年收益 Y 最大为目标，当年产量 $N \in [0, N_{固 \rightarrow 脉}]$ 时，固定站位式的收益最高，应选用固定站位总装模式进行生产；当年产量 $N \in [N_{固 \rightarrow 脉}, N_{脉 \rightarrow 连}]$ 时，脉冲移动式的收益最高，应选用脉冲移动总装模式进行生产；当年产量 $N \in [N_{脉 \rightarrow 连}, N_{连 \rightarrow 流}]$ 时，连续移动式的收益最高，应选用连续移动总装模式进行生产；当 $N \in [N_{连 \rightarrow 流}, +\infty]$ 时，则需要扩大再生产。

4 结束语

飞机总装生产模式的选择与飞机产量需求有着直接的关系，同时也受到管理水平、技术能力、工艺方式与经济投入的制约。在总装工艺许可的前提下，当飞机产量较低时，采用固定站式是最为经济的总装工艺模式，它不需要移动生

产线大资金的前期投入，对工艺要求也比较宽松。此外，当飞机处于研制阶段或者尚未定型的工艺不稳定时期，采用固定站式可以比较灵活地处理工艺流程的改变以及总装过程中经常遇到的技术问题。当飞机产量增加，企业需要在原有资源情况下增加产能时，此时的总装工艺逐渐稳定，可以考虑选择脉冲移动总装生产模式。当飞机进入批量生产，产量大幅上扬时，在前一阶段的资本积累和工艺探索下，先进、高效的连续移动总装生产模式将是最佳的选择。本文以飞机总装生产收益最大化为目标建立的飞机产量需求量化模型，定量给出不同总装模式对飞机产量的适用情况，并尝试寻求各种总装模式之间转换的产量拐点，为飞机总装生产模式的选择提供科学方法。

当前，我国具有自主知识产权的大型民用客机研制生产工作正在如火如荼的展开，在强调飞机产品安全、舒适和环保的基础上，还强调研制生产周期短及低成本^[5]。据对C919飞机市场定位、产品特点和生产规模的分析，结合其投资建设情况，其研制阶段可先采用固定站式进行总装生产，随着飞机产量的增加和工艺成熟度的提高，选择脉冲移动式的总装模式，并在产量大幅增加时，转化为连续移动式总装生产模式。从长远考虑，各阶段下的总装生产线建设应充分考虑不同模式之间的转化，进行兼容性的投资建设。

参考文献

- [1] 孙文博. 影响飞机总装配生产周期的因素分析[J]. 西飞科技, 2007.
- [2] 季青松. 飞机总装配工作及其特点[J]. 运输机工程, No. 152, 2007.
- [3] 许国康. 飞机总装移动生产线技术[J]. 航空制造技术, 2008.
- [4] 于勇, 陶剑, 范玉清. 波音787飞机装配技术及其装配过程[J]. 航空制造技术, No. 14, 2009.
- [5] 中国商用飞机有限责任公司. 大型客机总装移动生产线技术研究[R], 2008.

审稿：郭志海

北京新机场与航空都市区发展规划研究 ——以北京新航城为例

■ 胡赵征 李守旭 郭璟坤 「规划」

摘要： 到2049年，将是新中国建国100周年。作为新中国的首都，北京的发展让世界瞩目。本文由北京第二机场（即北京新机场）落地大兴为缘起，研究新机场和临空都市区（即新航城）规划建设对北京城市功能、空间、经济和文化发展的影响。

关键词： 2049；新机场；新航城；新北京

作为新中国的首都，北京的发展让世界瞩目。随着北京第二机场（即北京新机场）落户大兴，新机场引发的客流和城市功能聚集，及围绕新机场的临空都市区（即新航城）规划建设将对未来北京城市功能空间拓展，尤其是北京南部的城市功能空间拓展产生重大影响，新航城临空特色产业的发展和北京世界城市功能沿南中轴布局将对北京经济发展产生重大影响，每年过亿的国际客流使得国门区将成为国家文化宣传的主阵地和文化软实力的展示区，对北京社会文化发展产生重大影响。

1 新机场

按照国家十二五综合交通运输体系发展规划和中国民用航空发展十二五规划，北京第二机场即北京新机场(以下简称新机场)将于十二五期间在北京南部新区、北京南中轴南延线与永定河交点北侧开工建设。新机场地跨北京、河北省界，用地涉及北京市大兴区、河北省廊坊市广阳区，远期控制用地面积约65km²，远期客运量

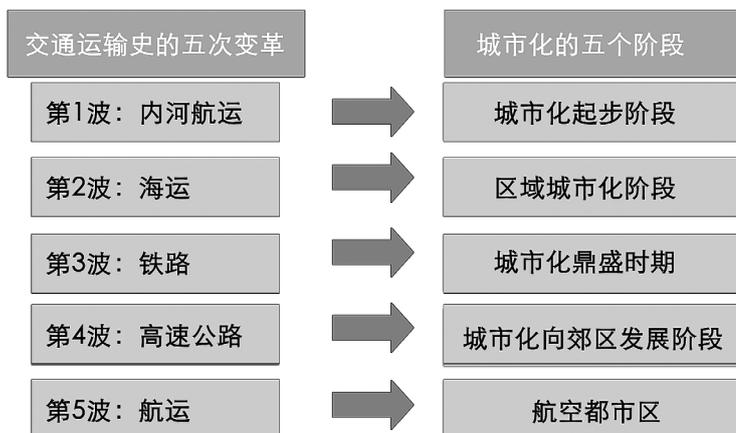
每年过亿人次。新机场建成后，其占地面积和客运规模都将成为世界上最大的机场之一。

2 新航城

为充分利用新机场带来的客、货流量资源和速度竞争优势，围绕机场筹划建设航空都市区，即新航城成为必然选择，成为北京迈向世界城市的重要支撑。

2.1 五波理论—航空都市区

美国北卡罗来纳大学教授John D. Kasarda提



作者简介：胡赵征，男，高工，2002年毕业于华中科技大学城市规划专业，现就职于规划咨询研究院。

图1 城市发展五波理论

出的“第五波理论”(见图1),认为世界交通运输业的发展将先后经过内河航运、海运、铁路和高速公路为主导的运输发展阶段,这“四波”依次兴替之后,航空运输成为推动经济发展的“第五波”。

沿着人类交通运输方式的变革历程,可以看出人类交通运输实践与理论研究的高度契合。第一个冲击波是由天然内河航运引起的,城市依河而建,河流成为人类文化和城市的发源地,如长安、伦敦等;第二个冲击波是由海运引起的,世界级的商业城市出现在一些海港周围,如巴塞罗那、里斯本、香港等;第三个冲击波是由铁路引起的,一些地处内陆的城市借助铁路运输成为商品交易集散中心,如亚特兰大、法兰克福、郑州等;第四个冲击波是由高速公路引起的,小汽车的出现引发城市向郊区蔓延,如洛杉矶、旧金山等;第五个冲击波是由航空引起的,主要是在经济全球化背景下,航空运输适应了国际贸易距离长、空间范围广、时效要求高等要求,因而成为经济发展的驱动力,是现代化国际经济中心城市迅速崛起的重要依托。

新的国际经济中心崛起的一个重要因素是机场,尤其是大型枢纽机场。从世界级城市发展经验看,伦敦、东京、纽约、香港、新加坡等都是从依托海港发展到依托空港,在航运和贸易的基础上发展而来,从而成为国际金融中心和国际经济贸易中心城市。

2.2 定位研究

航空城是一个多元动态的巨系统,为了实现由独立机场到航空城市的功能转变,需要明确其职能定位。在北京新航城规划研究中,我们提出了“国际化智慧航城”的定位。

2.2.1 国际化

北京新机场作为国际枢纽机场,国际化是围绕其建设的新航城的最根本要求。既要成为全球人流、物流的中心,也要成为经济活动、资本流动的中心,这就要求在城市建设、产业发展、形象特色等方面体现全球化的内在要求,培养新航城全球竞争能力,包括经济竞争力、文化影响力、社会包容性和环境示范性等方面。

1) 经济竞争力

经济竞争力是国际化的重要因子,经济总量大,经济势能强,集聚能力高是影响国际化城市形成与发展的关键因素。在速度经济时代,国际化的新航城经济竞争力是以国际高端民用航空产

业集群、临空产业集群和世界城市战略性产业集群为体现。

2) 文化影响力

适应国际化发展与竞争要求,国际化的城市要在国际上有重要的文化影响力。新航城作为中国门户和世界枢纽,要成为中国文化传播的阵地和国内外文化交流的汇集地,要借助枢纽机场致力于构建高效的文化传播网络,塑造有亲和力的文化环境和社会氛围,鼓励优秀文化走向世界,显著提高中国文化的国际影响力,同时也能够展示出多元文化交汇融合的独特魅力。

3) 社会包容性

国际化的城市汇集全球各地多方人士,要构建文明和谐的社会环境,社会包容性非常重要。新航城要以开放的心态吸引、融合世界各地人士,体现中华民族宽厚待人的传统美德,体现“北京精神”中“包容、厚德”的品质,使航城居民、旅客和游客都能够乐在其中,使不同国度、不同民族、不同区域的人,都能在其中寻找发展的机会。

4) 环境示范性

绿色优美的生态环境是国际化必不可少的条件之一。新航城要建设成为全球绿色宜居家园的典范,构建以原始次生林和永定河水系构成的绿色生态环境,打造具有国际形象、东方特色、创新活力的城市形象,推行绿色低碳的先进生产生活方式和消费模式,形成自觉自律、尊重生态环境的社会风尚,彰显新航城国际化发展的环境示范性。

2.2.2 智慧城市

新航城作为中国的门户和国际社会活动的枢纽,是高端人才聚集活动的中心,尖端科技汇集展现之地,是北京建设世界城市重要功能的承接区和展示区,也必将是我国最高级城市建设水平的体现。新航城的发展需要利用新一代信息技术和社会管理模式,构建全新的生活方式和城市建设形态,展现世界独一无二的智慧城市。

智慧城市的目标是要形成经济社会全方位的智能化,即在高端先进的临空高科技产业集聚发展的基础上,构建城市发展的智慧环境,实现航城系统中人、物和组织之间的物联化、互联化和智能化。建设智慧公共服务和城市管理系统,完善面向公众的公共服务平台建设加快推进面向企业的公共服务平台建设。

2.2.3 航空都市区

航空都市是指一种以国际枢纽机场或国内干线机场为依托,包括客货运输、仓储加工、综合贸易、商业服务、会议展览、生活居住、园艺农业、文体娱乐等设施的,以临空产业为特色的综合性新城或具有城镇性质的新兴功能区,其经济发展、产业类型及功能布局都具有明显的临空指向特征。

当今国际经济正在创造一个以航空、数字化、全球化和时间价值为基础的全新竞争体系。机场因其速度快和流量大担当了国家和地区经济增长发动机的角色。随着航空运输时代的到来,符合速度经济城市高速运转要求的航空大都市,也成为世界城市发展的必然形态。航城一般依附大中城市发展,借助机场的区位优势、交通运输优势和口岸优势,吸纳生产、技术、资本、贸易、人口在其周边集聚,从而形成具备多种功能的经济区域。它是在现代化、工业化、世界经济一体化不断加快的进程推动下产生的,代表了未来国际都市的发展方向。

2.3 产业研究

2.3.1 产业目标

新航城产业发展以新机场建设为第一前提,通过空港经济发展与腹地区域经济发展的双向互动,从临空产业发展内核与北京经济建设两个角度出发,系统、科学地提出了新航城产业发展的目标。

1) 中国大国形象及东方文化展示区

新航城作为国际枢纽机场所在地,是全球人流、物流的重要节点,更是国际人士进入中国的第一站点,其在树立我国国际形象方面的战略地位毋庸置疑,理应成为中国形象和东方文化的重要展示区。国际上知名的航空城都有本国形象和特色文化展示的内容。文化展示是航空城重要的产业内容。

2) 北京建设世界城市重要职能区

对全球政治、经济、文化具有控制力与影响力是世界城市的两个核心功能。为达到拥有这两大影响力的发展目标,世界城市需具备多种要素,包括能吸引国际总部核高端人才的集聚、拥有雄厚的经济实力和现代产业体系、能代表先进的城市信息化水平,具有国际性的金融竞争力等。目前,北京提出了建设世界城市的发展目标。但总体而言,北京距离世界城市还有一定的

距离,在如国际交往、文化传播等方面的功能尚有待加强。

新航城作为新兴的中国门户型城市,理应在北京建设世界城市的进程中发挥自身作用,有效补充北京市的国际交往职能、文化传播职能、国际性金融职能、国际性商贸职能、以及洲际交通枢纽职能等。

3) 北京实体经济发展主阵地

目前,我国已进入经济转型和产业结构调整的关键时期,战略性新兴产业及高端制造业成为国家大力支持发展的支柱性产业。随着大兴区与亦庄经济技术开发区行政整合的完成,北京南部新区已明确定位于打造南部高新技术制造业和战略新兴产业集聚区,打造“北京创造”的品牌。而新航城区域作为未来航空工业、临空高科技制造、物流、文化等产业的集聚地,凭借临空产业自身高技术、高附加值和低碳环保的特点,体现了我国产业国际化、高端化的发展方向。新航城将与亦庄共同构成南部新区产业发展的基石,从而成为北京实体经济发展的主阵地,国家产业转型和战略性新兴产业发展的排头兵。

4) 北京高端服务经济引航区

从新航城的产业发展类型来看,高端服务业,包括国际总部经济、国际会议会展业、国门商务服务业、航空物流业、文化创意业、休闲娱乐业,这些都是新航城重点发展的产业内容,充分体现了其国际化、高端化的特点。与此同时,新航城还同中关村区域、CBD、金融街等区域共同构成北京高端服务的核心功能区,是北京高端服务经济的引航区。

2.3.2 产业选择

通过对国内外大型枢纽机场临空经济产业

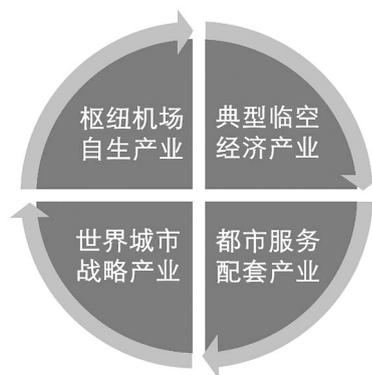


图2 新航城发展产业类型

表1 新航城发展产业内容列表

领域	重点方向	重点内容 (典型项目)
枢纽机场自生产业	枢纽机场航空运输服务	航空公司与航空联盟基地 航空货邮与快递服务基地 公务机及通用航空运营服务基地
	航空运输服务全价值链配套	全球航空制造商用户支援服务中心 航空运输维修保障基地 航空配餐服务基地 通用航空运营服务保障基地 航空油料供应综合保障服务基地 飞机销售、租赁与金融服务中心
典型临空经济产业	航空制造与临空高科技制造	航空制造产业园区 临空保税高科技制造园区
	综合保税物流服务	航空物流园 环渤海多式联运综合物流中心 大型综合性海关保税园区
	航空相关研发与培训	航空研发中心 临空科技制造研发中心 航空教育与培训基地
世界城市战略产业	总部经济与全球性战略资源商贸服务	国际组织机构专区 国际商务总部经济区 全球战略性资源贸易服务专区 全球金融服务中心 国际高端产业博览会展中心
	世界文化创意与高端休闲娱乐服务	中国文化主题公园 全球东方文化博览与交流中心 国际文化创意与交流服务基地 国际艺术时空博览苑 健康与东方养生服务产业 国际品牌主题公园 数字化体验主题公园 国际体育休闲中心 生态文化休闲产业
都市生活配套服务产业	都市生活配套服务	都市生活服务产业 高端商业服务产业 高端文化娱乐服务产业 其他

规律进行总结，同时结合国家战略性产业导向和北京建设世界城市的要求，满足区域经济发展与产业转变升级的需要，制定出新航城产业四大方向，分别是枢纽机场自生产业、典型临空经济产业、世界城市战略产业、都市服务配套产业(见图2)，内含八大产业领域，具体内容见表1。

2.4 规模研究

新航城规模研究包括：人口规模研究、用地规模研究和经济规模研究等三部分内容。

1) 用地规模

按照类别法和空间容量法分别进行新航城中心城区总用地规模核算，在满足生态资源承载力、节约土地资源和满足新航城建设功能需求的情况下，综合考虑新航城建设总用地面积约160 km²，含机场用地65km²。

2) 新航城人口规模

通过民航带动就业岗位法和产业发展就业岗位法，可以估算出新航城远期将带动约60万的就

表2 南中轴战略功能指引

功能	发展策略	产业具体类型
国际交往	打造中国东方主题文化，提升地区的首善气质和格调，实现中国文化的宣灌与输出	文化中心、主题公园、文化博览会、体育赛事、文化展演
创新总部	聚焦航空和临空等机场特色和规模优势产业，打造企业总部经济；发展文化传媒等区域内特色产业，促进产业集群发展，形成规模优势	总部经济（航空运输、航空物流、航空制造、临空高技术制造企业总部）
		文化传媒产业
		配套商务服务产业
先进制造	引入顶级和核心企业，打造面向典型临空产业和国家战略的产业新区	临空产业集群区（航空物流、航空制造、临空保税高科技制造）
金融商务	构建多极网络化系统，打造全产业链国际金融服务体系，形成专业化国际金融服务中心	离岸金融、国际结算、国际托收、国际信用证等特色国际金融服务业 金融要素市场、风险投资和金融后台服务等
会展商贸	满足未来北京国际服务贸易交易会与区域高端消费需求	会展中心（京交会）、国际论坛会议、高端商务商业
洲际门户	洲际联运，面向世界的国际门户，实现从物流商贸向金融总部运筹功能拓展，形成物流、贸易、金融的完整体系，世界物流枢纽港	航空客运、国际中转
		物流贸易：引入顶尖现代物流企业
		保税仓储区和专业市场

业岗位。

3) 新航城经济规模

新航城经济规模按照旅客吞吐量带动经济效益、空港物流带动经济效益合工业园区经济效益。其中，旅客吞吐量带动经济效益包括新机场周边科技研发、总部办公、商务服务业经济效益等。经估算，预计新航城远期经济规模约在1万亿元人民币左右，国内生产总值（GDP）约2000~3000亿元人民币。

2.5 空间结构

在经济全球化、城市空间结构与形态日益多元化和复杂化的大背景下，通过对国内外典型航空城和空港地区的空间模式演变规律进行总结、分析和预测，按照有利于南部新区产业结构调整和新航城核心功能的提升，有利于增强区域经济联系和城乡协调发展，有利于生态环境保护和城市环境质量改善，有利于北京传统轴线空间格局延续的原则，提出了“一核一轴环状组团”的“中字型”的新航城空间结构，形成“点轴布局、星状模式、圈层结

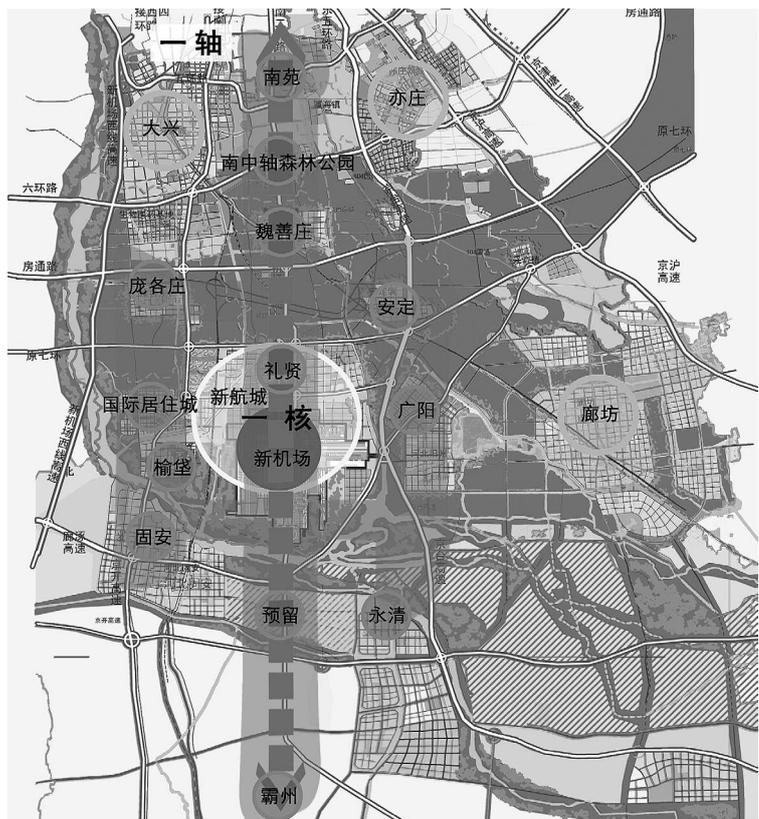


图3 大兴新航城空间规划结构

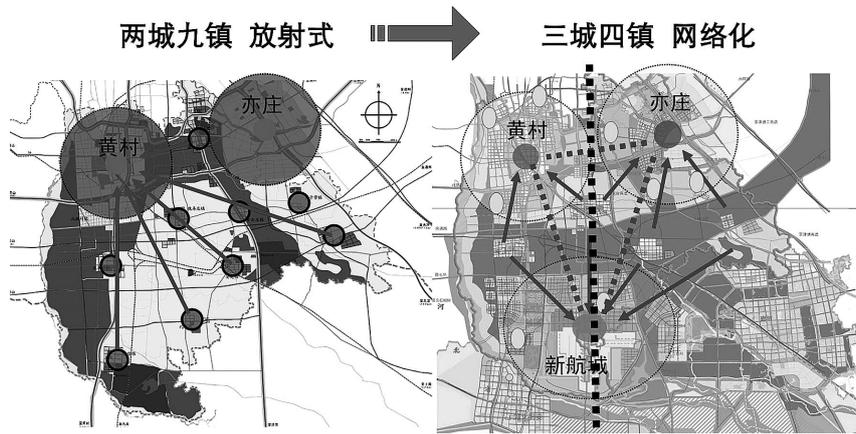


图4 大兴新航城城镇体系规划结构

构、组团发展”的空间模式。

一核：指新航城中心城区，包括新机场以及新机场北侧的临空产业区、保税加工区、航空物流区、国门商务区、礼贤镇区。

一轴：指北京南中轴，通过新航城的建设引

导南中轴的世界城市职能布局，包括国际交往职能、文化与传媒职能、国际性金融职能、国际性商贸职能、洲际交通枢纽职能等。

环状组团：指围绕新机场，按照职能分工合作建设的多个城镇组团，通过服务新机场来提高各组团的核心功能和综合竞争能力，包括国际居住城、庞各庄镇、榆垓镇、安定镇、魏善庄镇、广阳区、固安县、永清县等。

要实现新航城的空间发展格局，必须结合前述的战略规划整体定位、产业规划的产业布局和南部新区的现状条件等，按照临空产业圈层布局的空间规律，积极引导产业与人口在新航城集聚，加强临空新市镇间的分工合作，优化北京南部新区的空间结构，改善生态

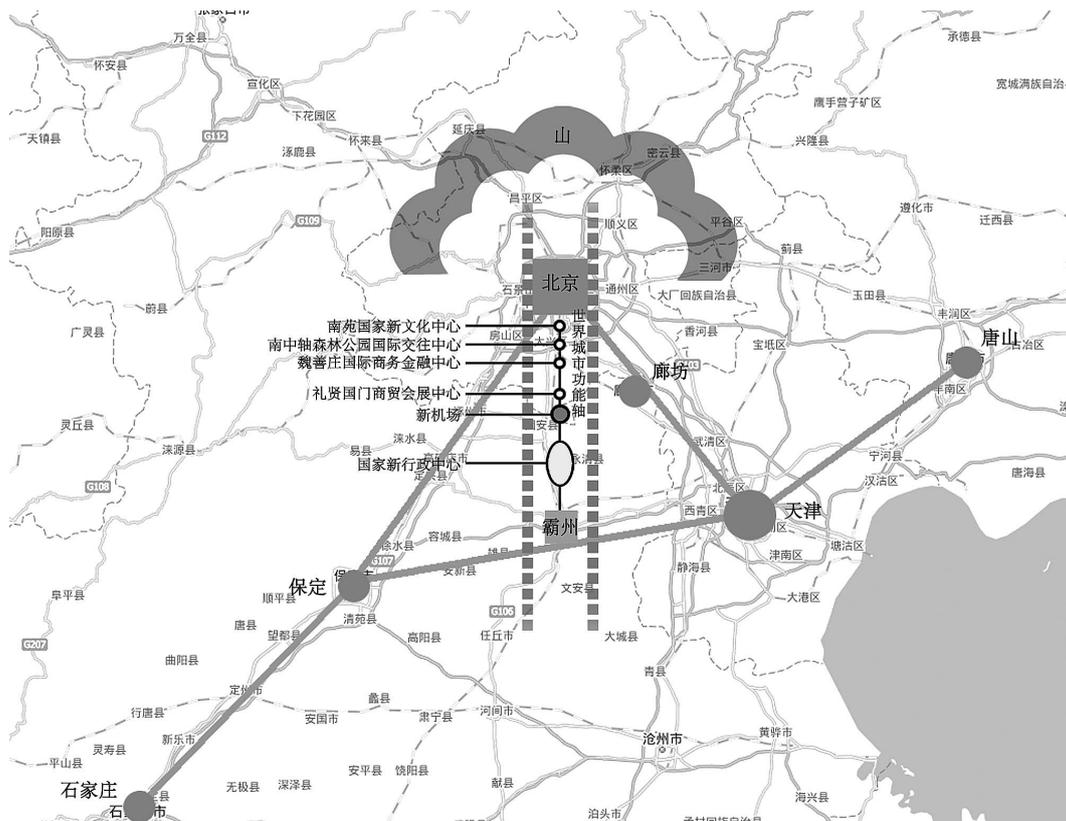


图5 北京世界城市轴线功能布局

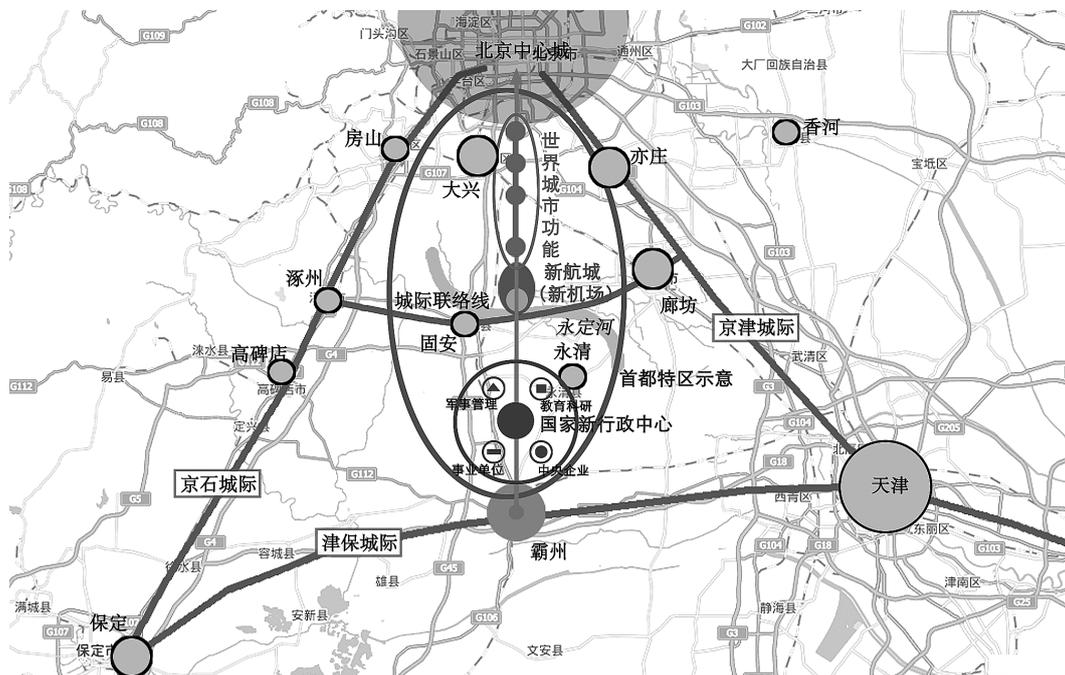


图6 首都特区范围与功能示意

环境和交通市政条件，完善北京世界城市职能，提高新航城地区的核心经济功能和综合竞争力，保证城市整体发展目标的实现。

3 新北京

3.1 新区城镇体系

新航城的建设将改变北京南部新区原有“两城九镇放射式”的城镇体系结构为“三城四镇网络化”的城镇体系结构。通过新航城的建设，优化整合北京南部区域的城市空间结构，实施以新航城、新市镇为中心的城镇化战略，与城市空间布局和产业结构调整相适应，逐步形成分工合理、高效有序的网络状城镇空间结构，构筑城乡一体、统筹协调发展的新格局。

(1)按照统筹规划、分类指导、突出重点、示范带动的原则，依托高速公路和重大基础设施，建设设施配套、环境优美、各具特色的航空新市镇；

(2)扩大新市镇规模。立足各城镇的现有条件，选择一批区位条件优越、发展基础好、潜力大的建制镇作为新市镇，规划用于满足新航城近期就业人口需求的居住组团。新市镇规划人口规

模达到8~15万人，形成聚集效益和区域竞争优势，镇区人均建设用地面积严格控制在120m²以内，促进土地的集约使用；

(3)建设与居住人口相应的公共设施，加快新市镇教育、文化、卫生、体育等社会事业的发展，提高新市镇的公建配套能力和水平；

(4)结合新航城临空产业的配套需求和本地资源条件，对新市镇产业进行升级改造，以解决农民就业为主要目标，促进乡镇工业向劳动密集型都市工业和第三产业的转变；

(5)加快城乡一体的公共交通体系和市政基础设施建设，改善投资环境，引导新市镇集中发展。

3.2 北京中轴线南延

北京城市建设南北发展不均衡，导致了南中轴的建设和保护也落后于北中轴。新机场作为国家重大基础设施，随着新机场的建设，可改变目前南中轴建设和保护滞后的现状。一是结合新机场和新航城的建设，将南中轴南延至新机场，影响范围扩展至河北霸州地区，通过南中轴的建设，带动整个南部区域的跨越式发展。二是结合北京世界城市的定位，在南中轴线布局与世界城市相匹配的核心职能，如国际交往职能、文化与

传媒职能、国际性金融职能、国际性商贸职能、洲际交通枢纽等职能,提升北京南部城市形象和公共配套水平,成为国家参与全球竞争的战略节点,打造北京面向未来的轴线——未来之轴。

在北京南中轴沿线地区,利用南苑机场搬迁建设北京南城国家级文化中心,提升南城的公共文化水平,形成国际文化与传媒职能;利用南中轴森林公园建设东方文化主题公园,打造中国文化宣传体验的主阵地,形成国际交往职能;在新机场与北京主城之间的魏善庄地区建设国际商务中心区,形成国际金融与商务职能;在新机场北部门户区建设国门商务与会展中心,作为“京交会”的永久举办地,形成国际商贸职能,共同支撑北京世界城市的建设。

3.3 首都特区

新机场地跨北京、河北两个地区,其带动作用不仅仅局限于北京南部地区,而是整个京津冀鲁地区。以此重大基础设施建设作为契机,研究成立以新航城为核心、囊括北京南部大兴以及周边廊坊、霸州、涿州高碑店部分区域的国家级跨省合作示范区,将新航城及其辐射区域的发展纳入国家战略,申请国家新区的管理政策。远期可作为北京城市副中心或首都特区,集中安排国家行政管理、军事管理、央企、中央事业、国家教育科研等的新增部分,在区域层面疏解首都功能,促进首都政治文化功能的区域拓展。

4 结语

当今国际经济正在创造一个以航空、数字化、全球化和时间价值为基础的全新竞争体系,各国对于快速交通以及信息技术的应用越来越频繁,要求也越来越高,而机场因其速度快和流量大担当了国家和地区经济增长的发动机的作用。如今,空港商业城、临空经济区、空港新城、航空城的概念已在全球蔓延,从北美到欧洲再到亚洲,全球范围内正在掀起建设航空城的浪潮。国际上,许多国家和地区已经从战略高度上进一步认识到了机场对于区域经济的战略地位,开始大力推进临空经济的发展。而围绕机场出现的航空都市区便成为城市、区域、乃至国家发展的竞争优势所在,航空都市区会改变原有城市的功能、空间形态、经济结构和文化影响力,我们的生活也将因此而改变!

参考文献

- [1] John D.Kasarda. Time-Based Competition & Industrial Location in the Fast Century[J]. Real Estate Issues.Winter 1998/1999,Vol.23,No.4:24-29.
- [2] John D.Kasarda, Grey Lindsay. Aerotropolis: The way we' ll live next[M]. New York:Farrar,Straus and Giroux,2011.
- [3] 吴唯佳. 面向发展模式的转型:北京2049的缘起与进展[J]. 建筑学报,2010,(2):3-7.
- [4] 吴唯佳,于涛方等. 北京城市空间趋势和布局战略思考——《北京城市总体规划(2004~2020年)》实施评估研究. 北京规划建设,2012(1):19.
- [5] 李守旭,郭璟坤等. 北京大兴新航城发展战略研究. 中国航空规划建设发展有限公司,2011.
- [6] 临空经济发展战略研究课题组. 临空经济理论与实践探索[M]. 北京:中国经济出版社,2007.
- [7] 李守旭,胡赵征等. 北京大兴新航城整合规划研究. 中国航空规划建设发展有限公司,2011.
- [8] 曹允春. 临空经济——速度经济时代的增长空间[M]. 北京:经济科学出版社,2009.
- [9] 李守旭,班波等. 北京南中轴规划研究. 中国航空规划建设发展有限公司,2012.
- [10] 吴唯佳. 北京发展战略与新机场新区研究. 清华大学,2012.

审稿:李守旭

索穹顶整体张拉成型模型试验研究

■ 葛家琪 张国军 王树 张曼生 张奇铭 黄季阳 刘鑫刚 「结构」

摘要: 根据索穹顶结构施加预应力的不同方法,既可以通过对所有拉索施加预应力完成对结构预应力的施加,也可以通过对部分预应力索施加预应力,其他非预应力索被动受力达到整个结构被赋予预应力,探讨索穹顶结构预应力成型方法。根据不同的预应力施加方法对结构进行全过程仿真分析,表明出结构的最终内力和位形和预应力施加方法无关。结合内蒙古伊旗全民健身体育中心索穹顶实际工程,制作了1/4的试验模型,按照地面组装、分步提升整体张拉的思路,采用ANSYS数值模拟对成型过程进行了全过程仿真分析,对索穹顶预应力张拉成型方法进行验证。通过在模型试验过程中合理布置拉力传感器对结构从拼装到成形的全过程进行内力跟踪监测,监测结果与仿真分析结果吻合较好,从试验模型的内力变化曲线可找到内脊索开始受力即为结构由机构转变为结构的转折点。

关键词: 索穹顶; 整体张拉成型; 试验模型

0 引言

索穹顶是现代空间结构中科技含量最高的结构形式之一,但该新型空间结构体系在我国的应用很少。目前我国在索穹顶结构体系的判定、结构静动力特性分析和模型试验研究等方面都做了许多工作^[1],但是对索穹顶施工成型技术的研究很少,这实际上是索穹顶在我国得不到推广应用的关键原因。

索穹顶在预应力建立之前是一个机构,随着对索进行预应力张拉,索穹顶逐渐被赋予刚度,成为具有刚度和承载能力的结构。索穹顶张拉成型过程体现在以下三个主要方面:一是索杆构件的安装就位方法,主要包括整体一次成型方法和分步提升成型方法;二是预应力导入方式,包括张拉预应力索选择、预应力张拉次序、预应力张拉批次及相互影响;三是预应力张拉方法,与索杆构件安装就位相对应,包括整体一次成型分步张拉法和分步提升成型整体张拉方法。

整体结构计算力学模型是以所有索、杆构件的初始几何形态坐标值为基准,先将所有拉杆及拉索按原长且无预应力状态一次整体成型。同时通过施加初应变或输入负温度方法,张拉预应力索达到设定的预应力值,形成索穹顶结构。与整体结构计算力学模型对应的预应力张拉成型施工方法就是整体成型分步张拉方法。该施工方法需搭设满堂临时支撑,将所有构件以初始几何形态在高空连接就位,杆及非预应力张拉索以结构初始形态尺寸下料,预应力索则以初始形态尺寸及设计预应力值为基准进行缩短下料,即预应力索的下料长度比初始形态尺寸要短,该缩短值可以通过设计预应力值确定。利用工装将预应力索与连接节点临时连接,在安装张拉时利用工装牵引逐步逐级张拉预应力索至节点后锁定就位。预应力索达到设计预应力值的同时索穹顶结构成型。

整体成型分步张拉的索穹顶施工成型方法,与设计计算成型原理一致,预应力导入过程清晰。国外大量索穹顶工程采用该方法施工^[2]。但该方法需搭设满堂施工临时支撑或者利用大型吊车,预应力索需在高空分批次安装张拉。该方法施工占地面积大、费时费工,且带来很多高空作

作者简介:葛家琪,男,研究员,1987年毕业于同济大学建筑结构专业,现就职于工程技术研究院。

业安全隐患,因此需寻求更为简便安全的索穹顶张拉成型的创新方法。

针对内蒙古伊旗全民健身体育中心直径71.2m的索穹顶工程,制作了1:4试验模型,对索穹顶预应力张拉成型方法进行研究。通过该项研究,总结出实际工程所采用的预应力张拉工艺,探索该结构施工中的要点和关键技术,以便制定出有效合理的施工方法,达到指导实际施工的目的。

1 模型试验研究方法 with 内容

1.1 分步提升整体张拉成型方法

索穹顶张拉成型与承载全过程仿真分析与设计研究成果表明^[3]:对于索穹顶结构,当索及撑杆等构件的材料尺寸和结构几何形态确定后,选择不同的预应力进行张拉均能达到预定的结构几何位形和内力。施工张拉方式和张拉顺序对张拉成型后的结构几何成型及其内力响应同样没有影响。索穹顶结构的上述力学特征为创新张拉成型方法明确了工作方向。依据索穹顶结构几何力学特征并针对其构件纤柔、自重轻的特点,提出了索穹顶分步提升整体张拉的成型方法。与传统的整体成型分步张拉方法相同,预应力索的下料长度比初始形态尺寸要短,不同的是将所有索、杆、节点按投影平面位置在地面进行组装,预应力索与内部节点之间不再设牵引工装而是直接连接。仅在主索与边界节点之间设牵引工装连接,牵引工装的设置仅起提升作用。选择预应力张拉索利用牵引工装及辅助设备将索穹顶逐步提升,张拉预应力索并最终将最外圈径向索锁定就位。预应力索在分步提升就位过程中得到拉伸,实现设计预应力,而不再对预应力索进行局部张拉,故将该法称为分步提升整体张拉预应力成型方法。

1.2 模型结构张拉成型全过程仿真分析

针对整体成型分步张拉和分步提升整体张拉两种索穹顶施工成型方法,应用重启动法分别进行施工全过程仿真分析。通过对比不同施工成型方法分析确认在成型态下力学性能的一致性,从理论分析方面证明分步提升整体张拉方法的可行性、正确性,同时得到每一提升过程状态下拉索的内力及其他关键技术参数理论计算值。

在对结构进行全过程仿真分析时采用大型通用有限元分析软件ANSYS进行分析,计算模型的构件规格和模型试验构件规格一致,如表1所

示。索穹顶计算模型边界条件为铰接,拉索采用LINK10单元,拉索的弹性模量根据材料的实际测试结果取值为 1.6×10^5 MPa,线膨胀系数取值为 1.2×10^{-5} ,撑杆采用LINK8单元,中心拉力环采用BEAM188单元。

在进行模拟分析时,结构预应力的施加通过给索单元设置初始应变实现,利用生死单元技术实现对部分构件从未受力到参与受力的过渡。构件的张拉通过对拉索进行升温或者降温进行模拟,温度值通过拉索的张拉伸长值和弹性模量计算得到。

1.3 模型结构试验实测

模型试验采用了实际工程拟采用的分步提升整体张拉的成型方法,在试验过程中,量测不同预应力张拉步骤的结构位形、构件内力的发展历程。量测内容包括:脊索内力、斜索内力、环索内力、撑杆内力、外环梁内力及撑杆上下端点位移及其他关键点位移,在试验与数值模拟的基础上,验证索穹顶预应力张拉成型施工方法的可行性和正确性。

1.4 结构由机构转换为结构的演变历程

索穹顶在预应力建立之前是一个机构,各构件的内力由自重产生,内力较小,但是在机构转换为结构以后,随着对结构进行预应力张拉,结构逐渐被赋予刚度,预应力的的大小决定了结构刚度的大小。通过结构成型全过程仿真分析曲线找出索穹顶由机构转换为结构的转折点,从模型试验的施工成型全过程监测数据找出索穹顶由机构转换为结构的契合点,找出两者的关联,从预应力度度的概念上给出索穹顶由机构转换为结构的概念定义。

2 试验模型设计

2.1 试验模型的制作

制作了1:4的试验模型,模型见图1所示,节点构造如图2所示。表1为模型试验构件规格列表,表2为试验模型与原结构内力比较。

2.2 试验测点布置

在整个试验过程中,通过在部分拉索上布置拉力传感器(图3a)进行索力监测、在撑杆及外环梁上布置振弦应变计(图3b)进行钢结构应力监测,通过在全站仪进行关键节点位移监测,具体测点如图4所示。

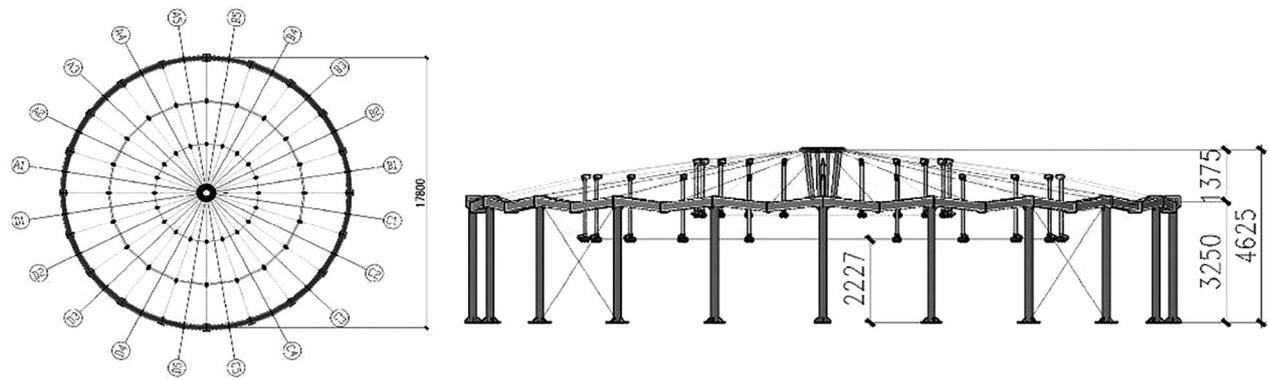


图1 试验模型



(a)撑杆上节点

(b)撑杆下节点

(c)内拉环

图2 节点构件

表1 模型试验构件规格

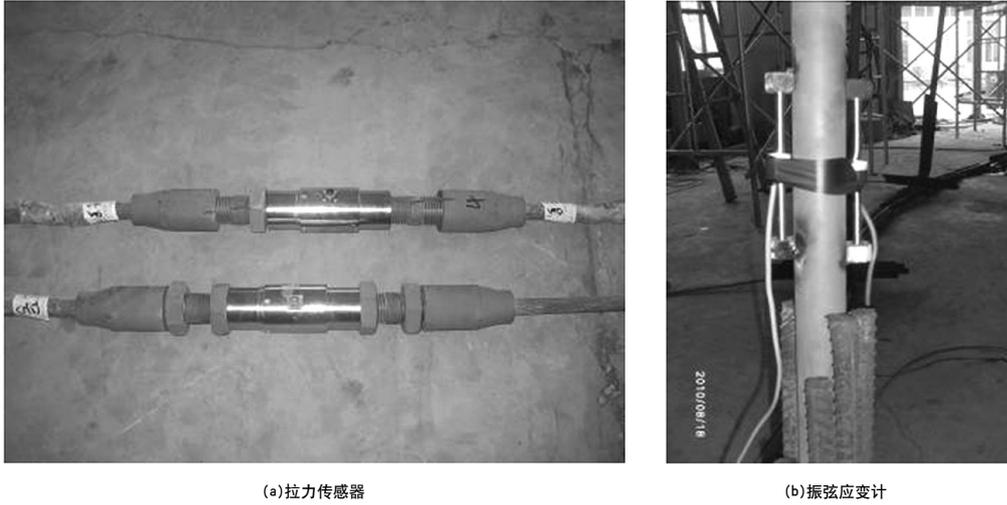
位置	原型规格	原型面积(mm ²)	缩尺理论面积(mm ²)	模型规格	模型面积(mm ²)	相似比
内脊索	φ 38	853	53.3	φ 12	85.95	1 : 9.9
中脊索	φ 48	1361	85.1	φ 12	85.95	1 : 15.8
外脊索	φ 56	1844	115.25	φ 12	85.95	1 : 21.5
内斜索	φ 32	605	37.8	φ 8	34.2	1 : 17.7
中斜索	φ 38	853	53.3	φ 10	59.69	1 : 14.3
外斜索	φ 65	2488	155.5	φ 16	152.81	1 : 16.3
内环索	3 φ 40	3318	207.4	φ 18	192.15	1 : 17.3
外环索	3 φ 65	7466	466.6	2 φ 24	681.38	1 : 11
内撑杆	φ 194 × 8	4674	292.13	φ 48 × 3	424	1 : 11.0
中撑杆	φ 194 × 8	4674	292.13	φ 48 × 3	424	1 : 11.0
外撑杆	φ 219 × 12	7804	487.75	φ 48 × 3	424	1 : 18.4

表2 模型与原型内力比较

拉索位置	原型内力(kN)	模型内力(kN)
内脊索	345.3	21.6
中脊索	495.8	30.5
外脊索	775.3	47.8
内斜索	155.0	9.1
中斜索	278.2	17.2
外斜索	660.7	42.2
内环索	839	51.8
外环索	1990	128.0
内撑杆	-94.7	-5.6
中撑杆	-87.7	-5.1
外撑杆	-206.1	-13.0

2.3 本试验模型的预应力张拉方法

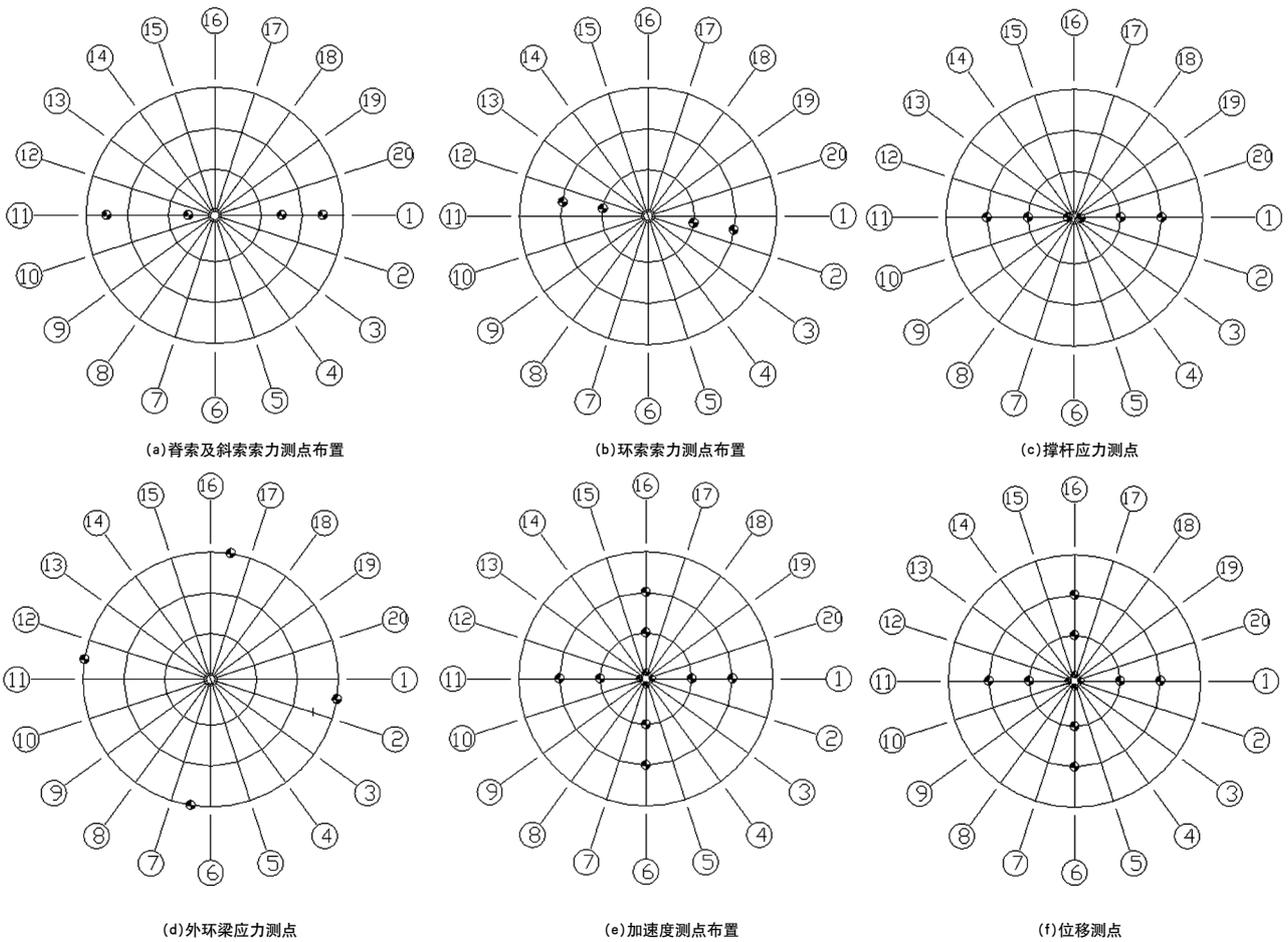
本模型试验是针对内蒙古伊旗全民健身体育中心索穹顶结构进行的模型试验，因此对该试验模型的预应力施加方法采用和原结构相同的预应力成型方法，即通过对外斜索预应力张拉达到对整个结构施加预应力的目的。结合结构的安装，索穹顶试验模型具体方法是：非预应力索按照初始态长度下料，通过工装索牵引斜索整体逐步提升安装张拉就位。



(a) 拉力传感器

(b) 振弦应变计

图3 内力及应力监测仪器



(a) 脊索及斜索索力测点布置

(b) 环索索力测点布置

(c) 撑杆应力测点

(d) 外环梁应力测点

(e) 加速度测点布置

(f) 位移测点

图4 测点布置

表3 张拉位置及张拉伸长值

张拉方式	张拉伸长值(mm)				
逐圈张拉斜索	29	26	23	—	—
张拉环索和内斜索	—	—	23	120	120

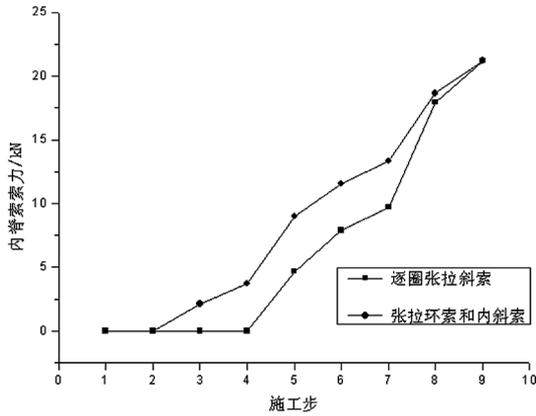
3 模型结构张拉成型过程全过程仿真分析

3.1 整体成型分步张拉成型过程

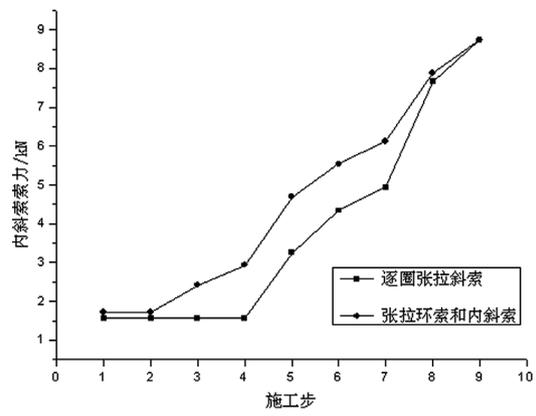
通过对试验模型进行全过程仿真分析模拟结

表4 张拉步骤及张拉分级

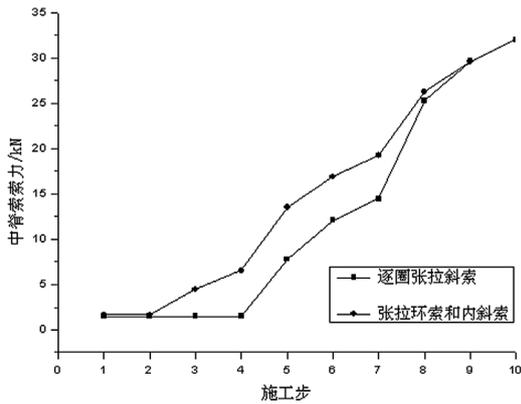
逐圈张拉斜索张拉分级				张拉环索和内斜索张拉分级			
张拉步	外斜索	中斜索	内斜索	张拉步	外环索	内环索	内斜索
1	—	—	—	1	—	—	—
2	35%	—	—	2	35%	—	—
3	35%	35%	—	3	35%	35%	—
4	35%	35%	35%	4	35%	35%	35%
5	65%	35%	35%	5	65%	35%	35%
6	65%	65%	35%	6	65%	65%	35%
7	65%	65%	65%	7	65%	65%	65%
8	100%	65%	65%	8	100%	65%	65%
9	100%	100%	65%	9	100%	100%	65%
10	100%	100%	100%	10	100%	100%	100%



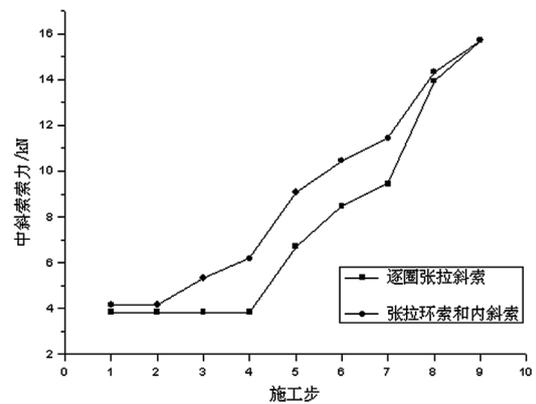
(a)内脊索索力



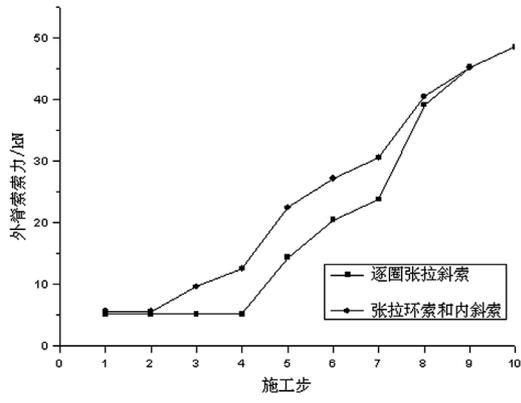
(b)内斜索索力



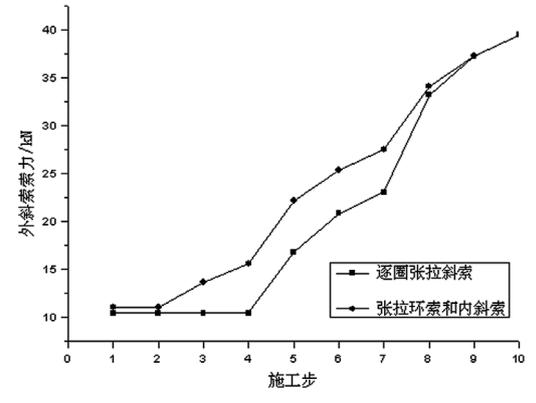
(c)中脊索索力



(d)中斜索索力



(e)外脊索索力



(f)外斜索索力

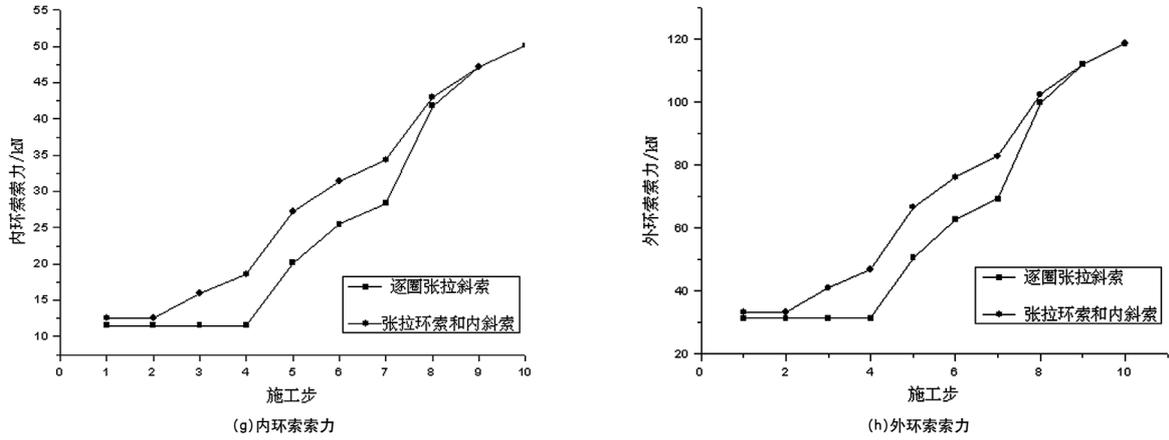


图5 结构内力响应

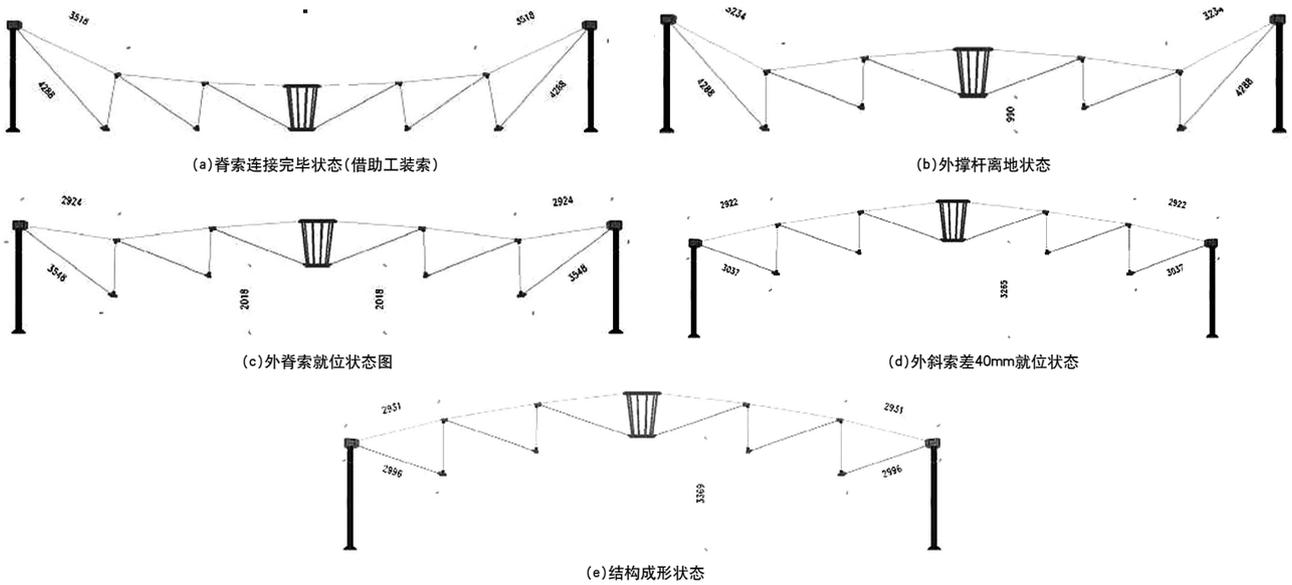


图6 张拉成型过程

构预应力的施加过程。通过两种预应力施加思路进行分析，分析不同的预应力施加方法对结构最终形态的影响。这里重点分析了逐圈张拉3圈斜索和张拉环索+内斜索的方法使结构成型，各索张拉伸长值如表3所示。两种张拉方式的张拉步骤如表4所示。通过两种张拉方式得到结构全过程内力和位移响应如图5所示。

从图5的结构内力响应可以看出，不管采用哪种预应力施加方法，结构在最终状态的内力是一致的，即结构最终状态的预应力分布和张拉方式无关。

3.2 分步提升整体张拉成型过程

3.2.1 张拉成型过程

(1)内拉环放置于地面，放置位置通过全站仪准

确定位，保证拉力环中心与整体结构中心相重合；

(2)除外斜索外，将所有拉索调整到初始状态，通过工装同步提升四周脊索，根据提升高度逐次安装中撑杆、内环索、内斜索及外撑杆、外环索、外斜索等；

(3)利用工装索将外脊索安装至外环梁；

(4)利用工装索将外斜索安装至外环梁；

(5)通过张拉外斜索使结构成形。

3.2.2 仿真分析各施工状态下结构形状

仿真分析张拉成型过程，具体见图6。

3.2.3 分步提升整体张拉成型过程仿真分析

根据3.1节的分析，在下料准确的前提下，索穹顶结构最终的成型态和张拉方式无关，为了方便施工，试验模拟在地面整体拼装，采用分步提升

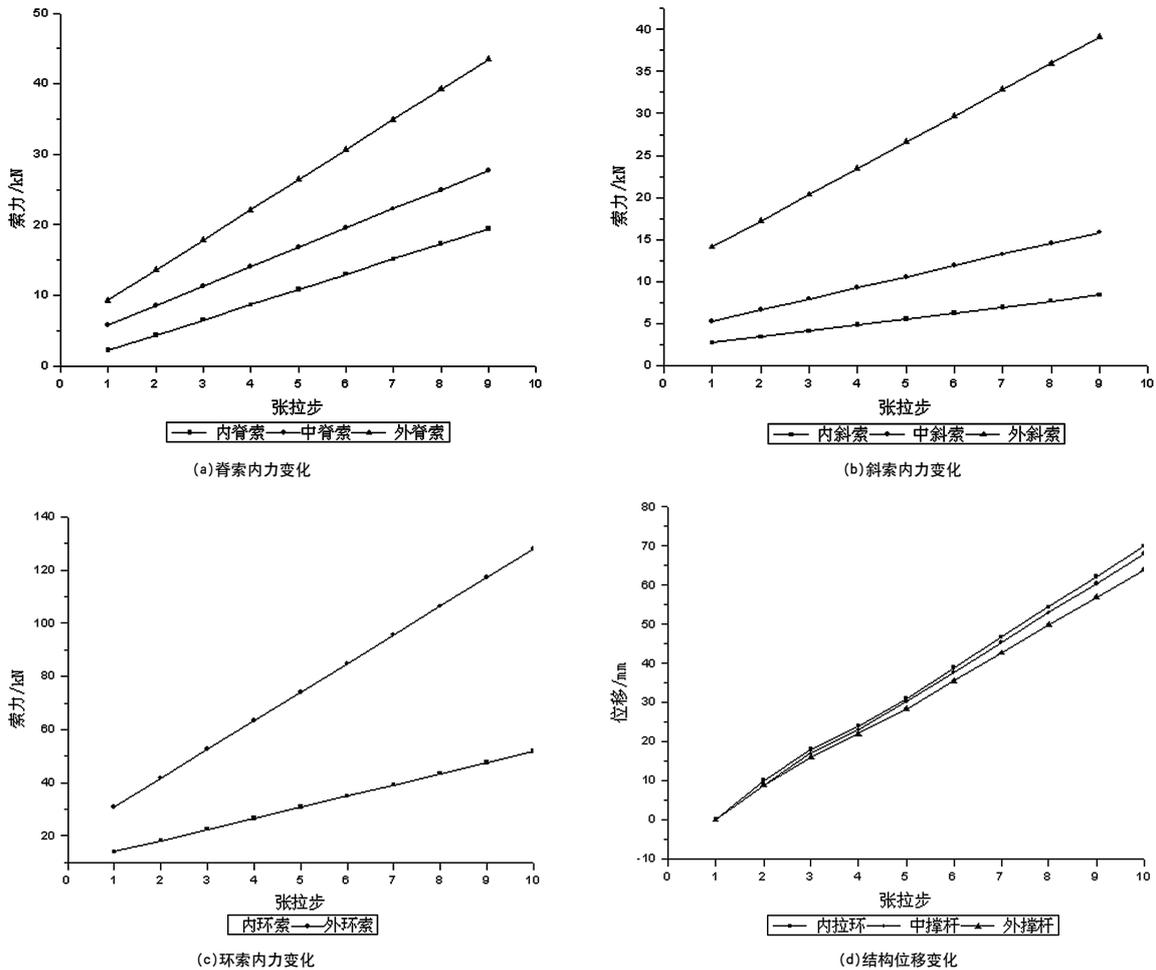


图7 张拉过程的应力和位移响应

整体张拉的施工成型方法。在张拉阶段，分10个张拉步将结构整体张拉就位，20个轴线的外斜索同步张拉，整体张拉过程的结构各位置拉索内力和位移（撑杆上节点和内拉环上端位移）响应如图7所示。

比较分步提升整体张拉的结构张拉过程结果和3.1节整体成型分布张拉的结果可见，结构在成型以后的主索内力分布相同，说明采用分步提升整体张拉的施工成型方法可以使结构达到设计成型状态。

4 模型结构试验结果

4.1 实际安装过程中各状态下的结构形状

实际安装过程中，各阶段模型的状态见图8。

4.2 成形过程索力测试结果

在试验模型中，在两个轴线的内脊索、内斜

索、外脊索、外斜索以及内外环索布置了拉力传感器，全过程监测了安装过程中的索力，监测结果列于表5中。

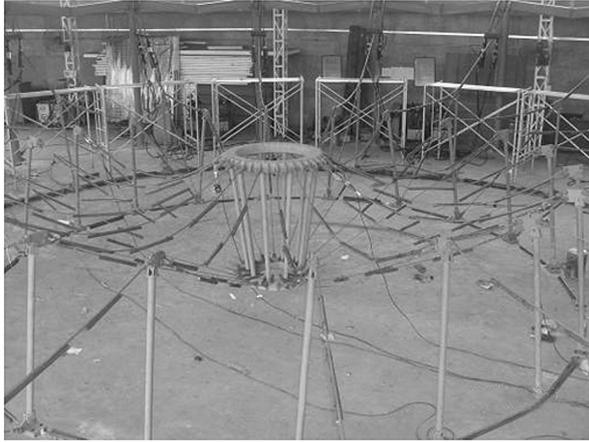
图9给出了结构成型过程中各位置拉索索力变化历程。

4.3 试验结果分析

从图表中可以看出，拉索索力在斜索张拉剩余长度接近25mm就位以前都较小，索力主要由结构自重产生；斜索张拉剩余长度小于25mm以后，在张拉过程中索力急剧增大，且两个位置的拉索索力变化趋势基本一致，且与仿真吻合良好。

4.4 索穹顶由机构到结构的转变

从图9的索力变化可以清楚地认识结构预应力的建立历程。在外斜索张拉剩余长度25mm以前，各位置拉索的内力都很小，内脊索一直处于松弛状态，结构的预应力未建立，内力由结构自重产生。在外斜索张拉剩余长度为25mm时内脊索开始



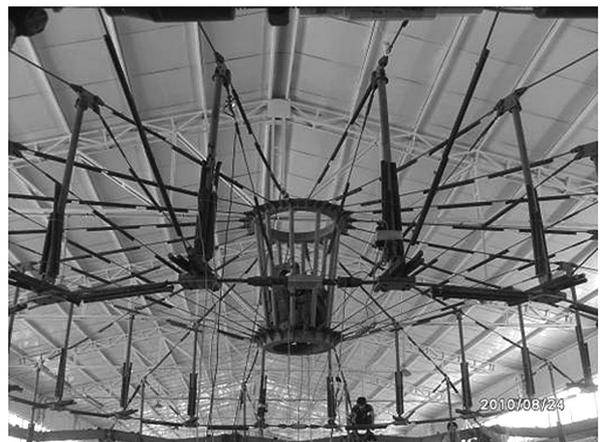
(a)借助工装连接脊索



(b)外环索离地



(c)外脊索就位



(d)外斜索就位

图8 各阶段模型的状态

表5 模型结构成形过程中索力监测 (kN)

施工步	状态说明	1WJ	11WJ	外脊索 计算值	1WX	11WX	外斜索 计算值	1WH	11WH	外环索 计算值	1NH	11NH	内环索 计算值
1	地面组装完毕	0.2	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.8	0.8	0.0	3.3	2.3	0.0
2	外脊索剩余60cm	0.2	0.3	3.5	0.2	0.0	0.0	0.6	0.8	0.0	5.8	4.8	7.3
3	外脊索剩余50cm	0.2	0.3	3.8	0.2	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0	6.7	5.7	7.9
4	外脊索剩余40cm	0.2	0.3	3.9	0.2	0.0	0.0	0.9	0.7	0.0	8.4	7.4	8.3
5	外脊索剩余30cm	0.2	0.3	4.3	0.2	0.0	0.0	0.9	0.7	0.0	9.2	8.2	9.3
6	外脊索剩余20cm	0.2	0.3	4.8	0.2	0.0	0.0	1.0	0.7	0.0	10.1	9.0	10.7
7	外脊索剩余10cm	0.2	0.3	5.2	0.2	0.0	0.0	1.0	0.7	0.0	11.3	10.3	11.6
8	外斜索剩余45cm	3.8	3.8	2.9	0.1	-0.2	3.0	6.4	5.5	7.9	8.0	6.9	7.0
9	外斜索剩余40cm	3.7	3.8	2.9	0.1	-0.2	3.2	6.9	5.9	8.8	7.8	6.8	6.9
10	外斜索剩余35cm	3.6	3.6	2.8	0.1	-0.3	3.5	7.4	6.4	9.7	7.7	6.7	6.8
11	外斜索剩余30cm	3.6	3.6	2.8	0.1	-0.3	3.9	8.3	7.0	10.8	7.6	6.6	6.8
12	外斜索剩余25cm	3.6	3.6	2.9	0.1	-0.3	4.3	8.9	7.6	12.1	7.6	6.5	6.8
13	外斜索剩余20cm	3.5	3.5	2.9	0.2	-0.3	4.8	10.1	8.4	13.6	7.6	6.5	7.0
14	外斜索剩余15cm	3.7	3.6	3.0	0.1	-0.3	5.4	10.9	9.3	16.6	7.7	6.6	7.3
15	外斜索剩余10cm	3.8	3.7	3.2	0.2	-0.2	6.2	12.7	10.5	18.3	7.9	6.8	7.7
16	外斜索剩余45mm	6.7	7.8	3.5	8.5	8.8	6.6	20.1	17.0	19.3	10.7	9.6	8.4
17	外斜索剩余35mm	8.8	12.2	3.7	10.4	10.4	7.3	23.6	19.9	21.7	12.8	11.7	8.9
18	外斜索剩余25mm	14.8	22.4	9.6	13.5	14.3	12.1	36.8	40.4	36.3	17.7	16.6	14.9
19	外斜索剩余15mm	25.6	33.5	24.9	17.5	21.1	22.8	54.1	59.8	68.2	26.0	24.9	29.7
20	外斜索就位	46.8	43.7	47.8	41.0	42.2	42.2	119.5	113.9	128.0	47.9	46.7	51.8

注：灰色区域表示在张拉斜索的过程中，因为传感器在工装和耳板之间，所以传感器读数未采集到真实数据。

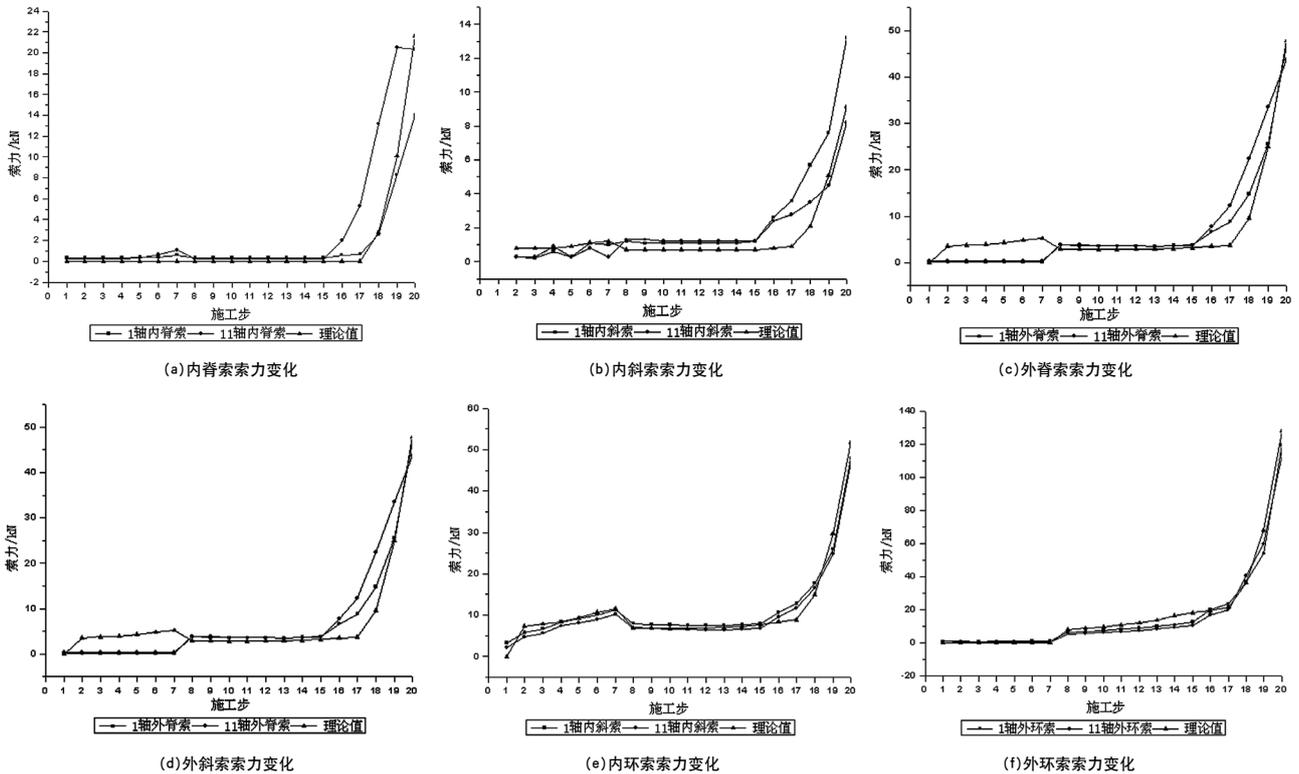


图9 不同位置拉索索力

受力，然后随着外斜索的张拉，各位置拉索的内力急剧增大，因此内脊索开始受力的状态可以作为索穹顶由机构转变为结构的分界。从内脊索开始受力到外斜索就位这个过程即索穹顶结构预应力的建立过程。

5 结论

(1) 提出对索穹顶结构施加预应力的思路，即通过对部分预应力索施加预应力，其他索被动受力达到整个结构被赋予预应力；

(2) 根据对不同的预应力施加方法对结构进行全过程仿真分析，得出结构的最终内力和位形和预应力施加方法无关；

(3) 按照地面整体拼装，整体同步提升和张拉的施工方法进行索穹顶的施工，结构的内力和位移和理论值吻合较好，验证了索穹顶结构预应力的施加和施工顺序无关的结论，同时也说明该施工成形方法适用于索穹顶结构的施工；

(4) 在斜索张拉方案中，索穹顶结构在外斜索接近就位内脊索开始受力以前，结构的内力主要由结构自重产生，从内脊索开始受力开始，随着

外斜索的张拉，结构的内力迅速增长，该过程为结构刚度产生的过程，可以认为内脊索开始受力为索穹顶有机构转变为结构的转折点。

参考文献

[1] 詹伟东,董石麟等. 索穹顶结构体系的研究进展. 浙江大学学报(工学版),2004.
 [2] 董石麟,罗尧治. 新型空间结构分析、设计与施工,2006.
 [3] 葛家琪,张爱林,刘鑫刚等. 索穹顶结构张拉找形与承载全过程仿真分析.

审稿: 金来建

卢旺达基加利会展中心大跨度单层网壳结构设计

■ 裴永忠 林涛 汤红军 李晶 朱丹 「结构」

摘要: 卢旺达基加利会展中心大跨单层网壳跨度57m, 高38m, 采用螺旋式三角网格, 圆钢管截面。网壳内外设马道, 网壳外覆盖膜, 内部设百叶, 悬挂于内马道内端。该网壳的特点在于跨度大, 荷载通过内外走道传递, 受力复杂, 节点为高强度螺栓法兰连接。本文主要介绍网壳在复杂荷载下网壳的受力规律、风洞试验、稳定分析以及刚性法兰连接的设计等。

关键词: 单层网壳; 马道; 风洞试验; 稳定分析; 法兰连接

1 工程概况

基加利会展中心位于非洲卢旺达首都基加利, 会展中心由网壳和三层混凝土框架组成(见图1)。单层网壳结构高38m(另有顶部天线高8m), 底部直径为57m。网格系由两组螺旋上升的环向杆件和上下连接的交叉杆件组成的三角形网格, 顶部设置天线。网壳外部和内部沿环向有落下上升的马道, 主要用于维护, 其中内部马道也用来放置管线及遮阳格栅。网壳外覆盖透明薄膜, 下面局部为玻璃幕墙。网壳杆件为圆钢管截面, 环向杆件截面外径均为D325, 壁厚8~16mm, 节点处根据验算加厚或加肋; 交叉斜杆截面主要为D194、D219、D245, 壁厚8~40mm; 由于业主不允许现场焊接, 所有节点采用法兰连接。网壳下部为3层钢筋混凝土结构, 柱网7.5m×7.5m, 框架-剪力墙体系。网壳支承在混凝土结构顶部的环形坡道上, 坡道环梁有现浇梁板与之连接。本工程由德国BHP公司概念设



图1 (a) 会展中心鸟瞰图

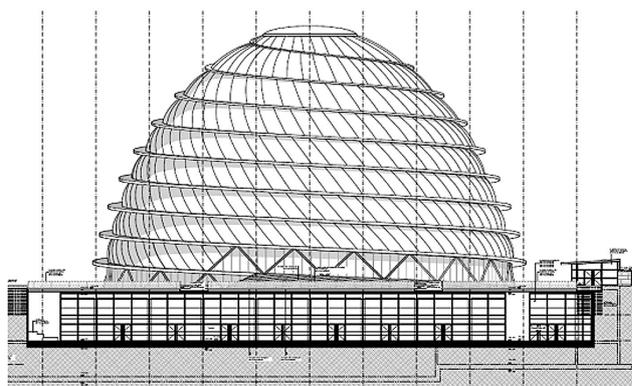


图1 (b) 建筑立面图

作者简介: 裴永忠, 男, 研究员, 2009年毕业于清华大学土木工程系, 现就职于飞机工程设计研究院。

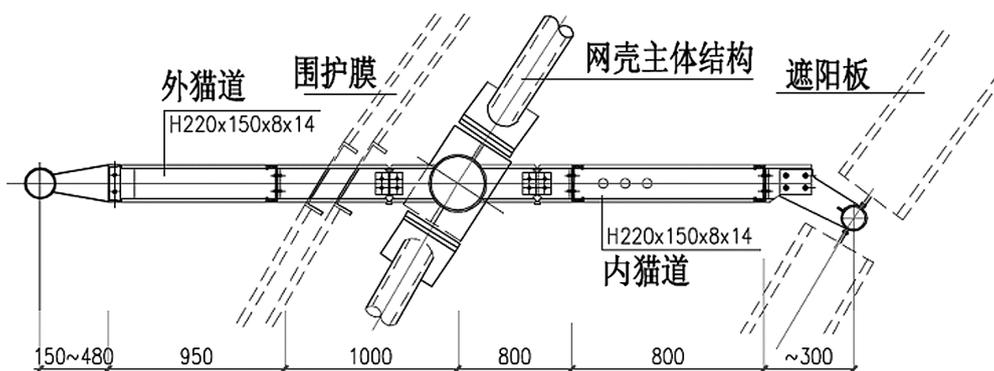


图2 网壳局部剖面图

计,北京建工集团总承包,中国建筑技术集团有限公司设计院负责主体设计,中国航空规划建设发展有限公司负责网壳结构设计。

本工程建筑结构安全等级为二级;基本风压 0.35kN/m^2 (50年重现期),B类地面粗糙度;抗震设防烈度按7度,设计基本地震加速度值 $0.10g$,设计地震分组为第一组。场地类别为II类。建筑抗震设防类别为丙类。网壳恒载中网壳自重由计算程序计算,节点按 12kN/点 ;围护膜 0.3kN/m^2 ,按面荷载输入;内外马道做法约 0.3kN/m^2 ,内遮阳板 0.6kN/m^2 ,通过内马道挑梁传给网壳环向杆件;另外网壳内部局部悬挂多媒体平台, 10kN/点 (共5点)。活载 0.5kN/m^2 。温差根据当地气象资料考虑温差 -20°C 和 $+40^\circ\text{C}$ 。

具体来说,本网壳结构有以下几个特点:

- (1)单层网壳跨度达 57m ,高度 38m ,跨度、高度均较大;
- (2)结构主要荷载作用于马道(见图2),通过挑梁传递至环向杆件或节点,因此网壳环向杆件承受节间受力,并且对网壳产生面外弯矩;
- (3)外马道在围护膜之外,风荷载作用复杂;
- (4)单层网壳节点均采用高强度螺栓法兰连接,法兰连接同时承受轴力和弯剪扭。

2 风洞试验

风洞试验在中国建筑科学研究院风洞实验室进行。试验模型缩尺比为 $1:70$,同时模拟了周围其他建筑和地形的影响,测点数量 773 (包含 208 个下表面测点)。试验在B类地貌下进行,采用尖劈配合粗糙元的方法模拟。风向角 10° 为间隔,共

36 个风向角(见图3)。

试验表明,马道对会展中心的影响主要体现在较高区域(见图4)。由于突出的马道对流动造成较强干扰,会展中心表面部分会出现较高负压,在 130° 风向局部会出现高达 -3.8 的平均压力系数(对应体型系数约 -2.4);而马道对会展中心较低区域的影响相对较小。马道本身由于双面受风,且在较高区域存在“上吸下顶”的受力状态,导致其合压力较高,顶部边缘的合压力系数可达 -4.2 (对应体型系数约 -2.6),结构设计中对外马道起控制作用。

风洞试验还给出了极值压力。结果表明,极值风压的变化范围为 $-2.1\sim 1.5\text{kN/m}^2$,均为马道上的合压力值。

3 静力分析

采用Midas进行计算分析。由于荷载比较复杂,计算中采用两种模型(见图5)。模型1将内外马道加入模型中,但只计入其重量,不计入其刚度,荷载按照实际作用位置输入。模型2只考虑网壳结构本身,输入节间荷载(包括扭矩)。模型1荷载输入比较精确,但设计计算复杂,构件校核时,要针对不同构件设置参数。模型2计算简单,但荷载输入有一定近似。设计中静力分析以模型1为主,抗震分析和稳定分析按模型2。

计算结果表明,在竖向荷载作用下,螺旋的环向杆件主要为拉弯为主,竖向的交叉杆件主要为压弯,拉压均为底部最大,向上递减。温度作用下主要影响底部和顶部一圈杆件,向上则迅速递减。升温时底部一圈环向杆件为压力,最大压

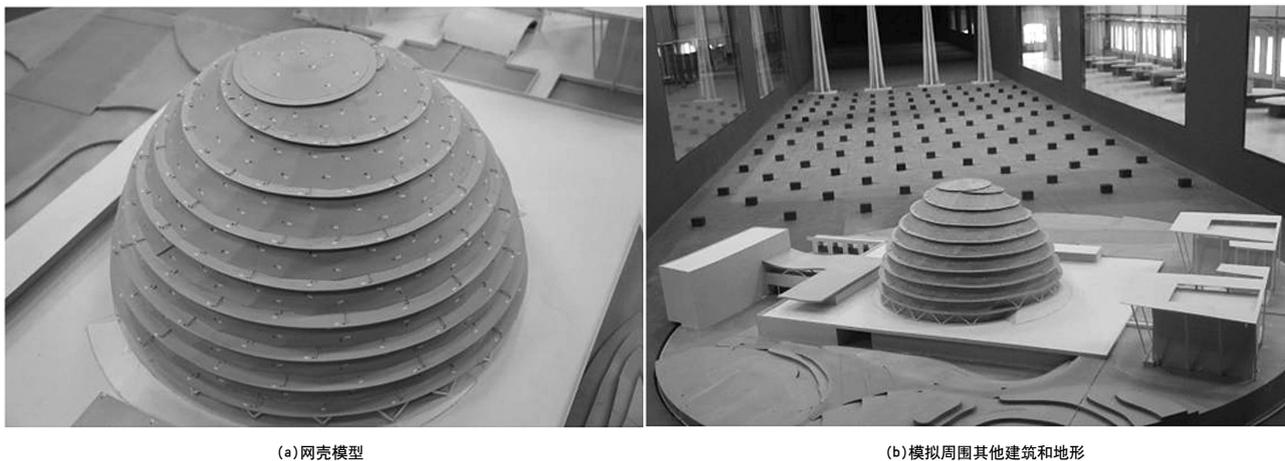


图3 风洞试验模型

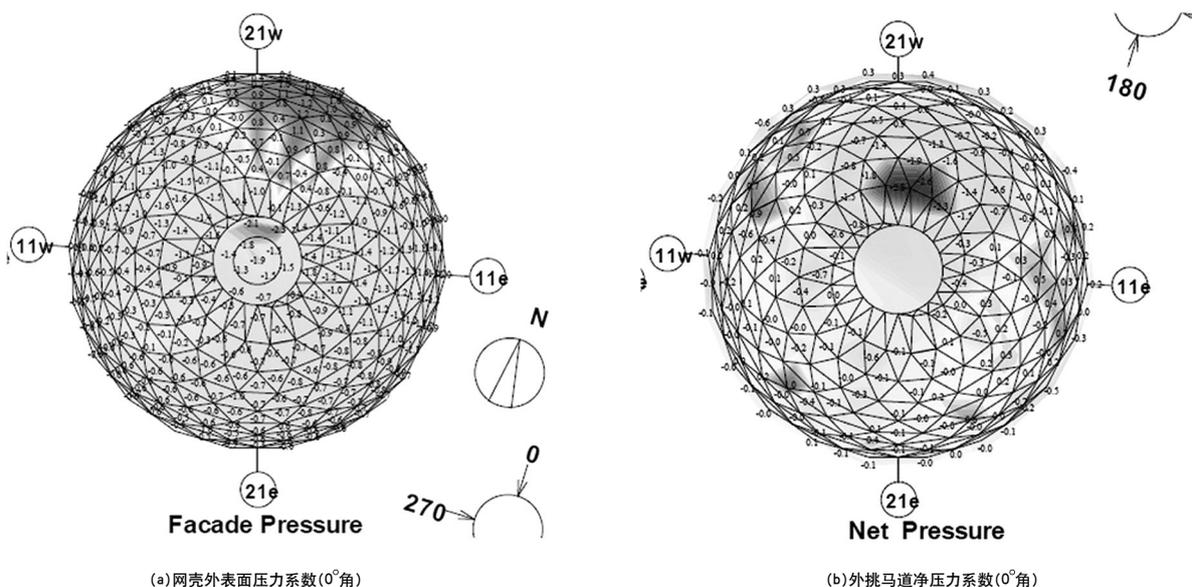


图4 风洞试验典型结果

力-117.8kN，降温时底部一圈环向杆件为拉力，最大拉力58.9kN。网壳顶部附近主要迎风向杆件处风荷载下受力较大，风荷载组合控制。网壳斜杆最大内力出现在底部环形坡道最高处的支座附近，最大压力1432.8kN。

网壳静载下最大挠度16.15mm，位于顶部下1/5处，为跨度1/3530；风荷载下顶部最大侧移1.2mm。

4 抗震分析

网壳的自振频率相当密集，振型亦比较复杂。计算结果表明（见图6），其前30阶自振频

率在3.18~5.01Hz之间。从振型参与质量系数分析，网壳的第一振型为顶部的竖向振动，第二振型为y向为主的平动振型，同时伴随扭转，第三振型为x向为主的平动振型，亦伴随扭转。结构的第1周期为0.3144s，对于高38m、跨度57m单层网壳来说，刚度还是比较大的。

采用振型分解反应谱法进行地震反应分析。同时考虑水平和竖向地震作用，由于网壳频谱密集，考虑各个方向振型参与质量大于90%，振型数取200阶。

在地震作用下，杆件内力表现为上小下大，斜杆的动内力大于环向杆件的内力，网壳支座处内力最大，水平地震作用明显大于竖向地震。另

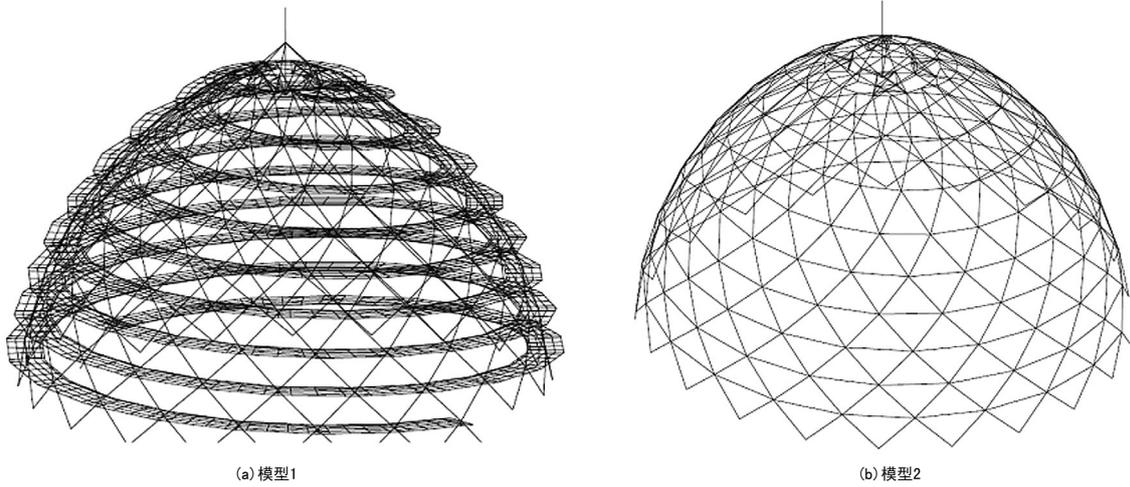


图5 计算模型

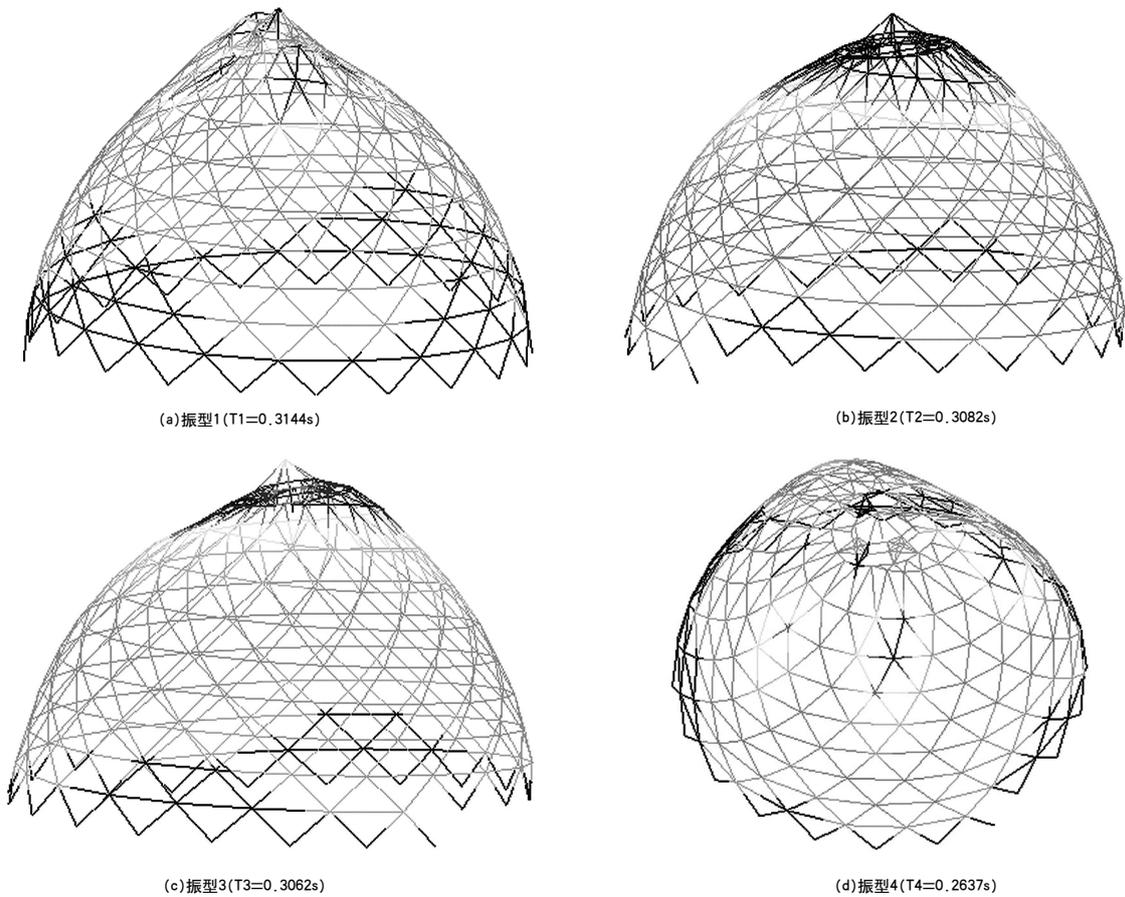


图6 振型和周期

外值得注意的是，由于该网壳特殊的几何构成和较大的矢跨比 ($f/l=2/3$)，竖向静荷载下网壳上部1/3处局部杆件轴力很小，而地震作用下轴力相对较大。但是由于本工程场地地震烈度较低，地震组合工况并不受控制。

5 稳定分析

线性屈曲分析表明，由于本网壳较大的矢跨比 ($f/D=2/3$) 和特殊的几何构成，结构的前2阶屈曲模态均为典型的局部失稳模态 (见图7)，表

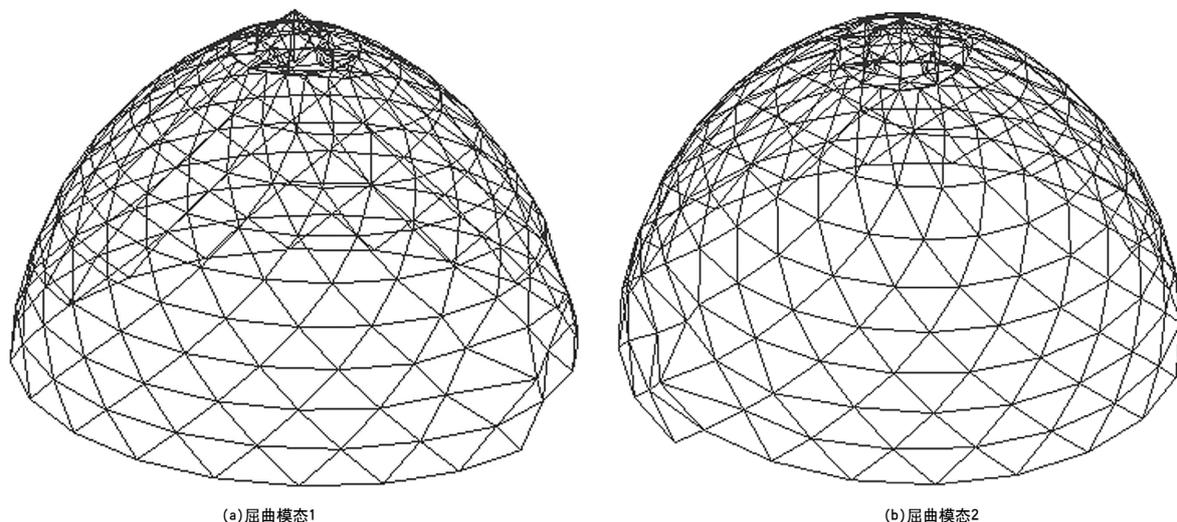


图7 网壳的屈曲模态

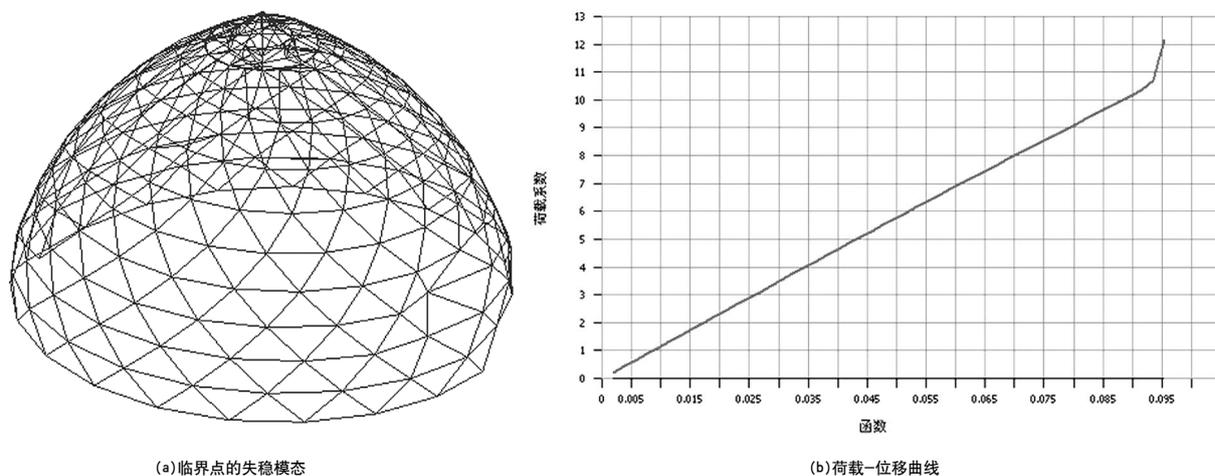


图8 几何非线性分析的结果

现在底部环形坡道的最高处支座上端节点的外凸或内凹，事实上这也是静力状态下杆件受力较大的区域。

对网壳进行几何非线性计算，分析中假定材料为线弹性。考虑结构1阶屈曲模态作为初始缺陷分布模态，其最大值按网壳跨度的1/300取值。计算结果得到的第一临界点的荷载安全系数为10.5，满足规范要求。其失稳形式（见图8）表现为底部环形坡道的最高处支座上端节点处的局部失稳，与线性分析的一阶屈曲模态基本一致。

6 法兰节点设计

按建筑要求，网壳所有节点采用法兰连接，

而且节点板的形状也根据建筑要求。环向杆件采用方形端板，设4片肋板，斜杆为圆形端板，不设肋板。直接相贯焊接节点处环向杆件加厚（见图9）。环向杆件主要承受轴向拉力，同时有剪力、弯矩和扭矩，其形状的特殊性导致目前有关法兰节点的设计方法均无法直接采用。设计中高强度螺栓的计算偏于安全按摩擦型连接计算，同时考虑轴向拉力，同时有剪力、弯矩和扭矩。

节点板厚度根据有限元分析结果确定。利用有限元软件Ansys进行数值模拟分析。钢管、法兰板和高强螺栓采用20节点实体单元solid95模拟，通过预紧单元PREST17模拟高强螺栓的预紧力。为了准确考虑撬力作用的影响，使用接触单元target170和contact174，在法兰板之间、高强螺栓

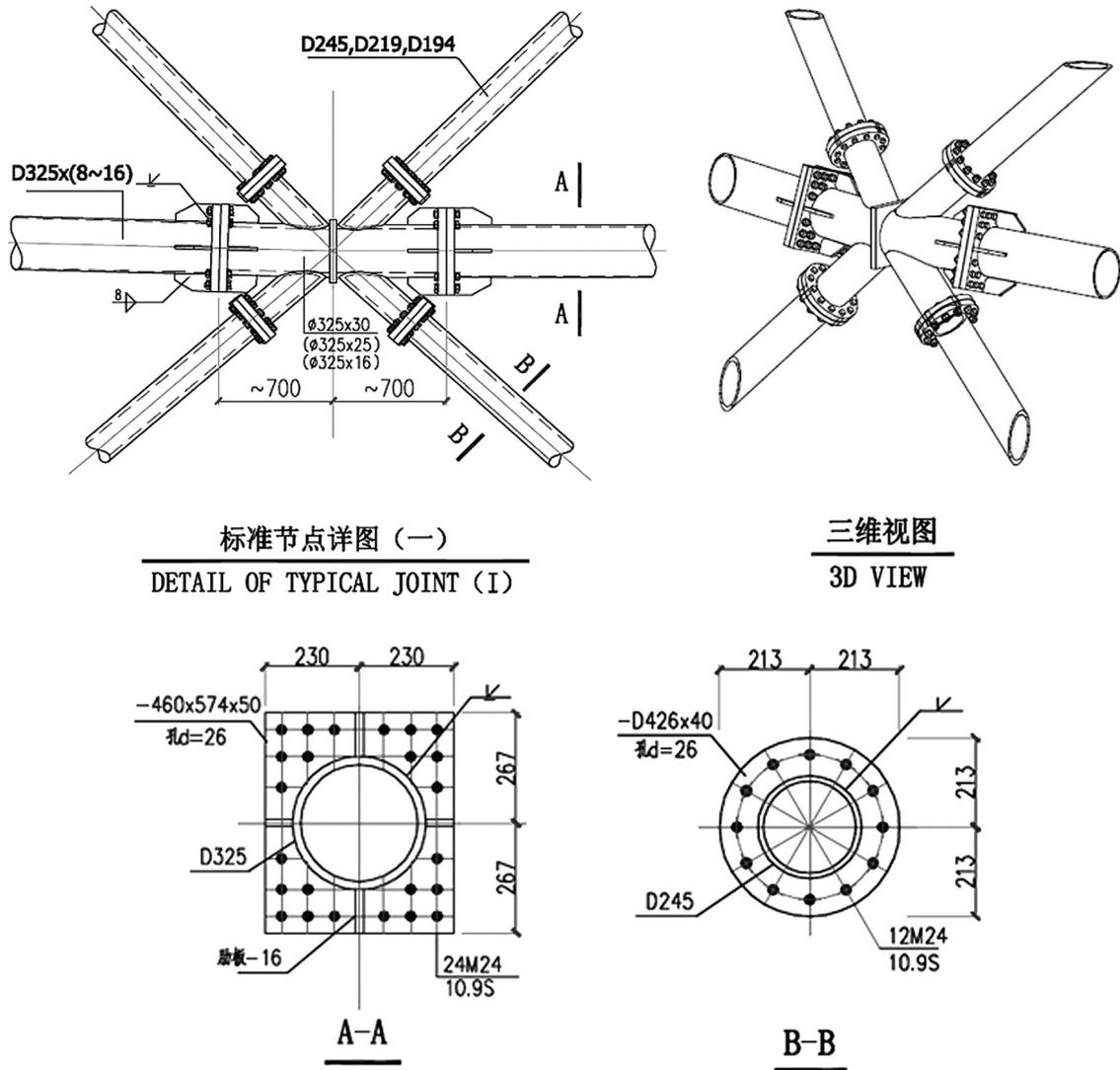


图9 节点设计图

螺帽、螺母和法兰板之间以及螺杆和螺栓孔壁之间建立接触面，模型的有限元网格如图10所示。法兰板、钢管的本构模型均采用带有平台段的多线性等向强化模型。高强螺栓的本构模型采用直接强化的多线性等向强化模型。

有限元分析结果表明，在设计荷载作用下，节点应力的较大区域出现在钢管根部，应力在 $200\text{N}/\text{mm}^2$ 左右，端板自身应力较小，根部最大应力约为 $100\text{N}/\text{mm}^2$ ，图11中肋板与圆管相交处出现了应力集中，实际设计图中肋板做消角已避免应力集中的出现，高强度螺栓的预紧力没有变化。端板除在肋板处外侧稍有翘起外，其他处紧密相贴。以上说明设计荷载下节点在弹性范围内，端板厚度能保证刚接。

大部分斜向杆件主要承受压力，顶部少数 $D194 \times 8$ 杆件虽受拉，但拉力很小。节点设计中每种截面最大轴力绝对值按拉力考虑，按《高耸结构设计规范》中柔性法兰节点计算。计算出来高强度螺栓直径和节点板厚度减少级差。底部轴压力较大，减小3个级差，中部2个级差，顶部轴压力较小，出现拉力的可能性大，选择杆件最大轴力绝对值计算。

7 结语

基加利会展中心单层网壳结构跨度大，外表面有凸出的马道；结构主要荷载通过挑梁传递至环向杆件或节点，网壳环向杆件承受节间荷载和

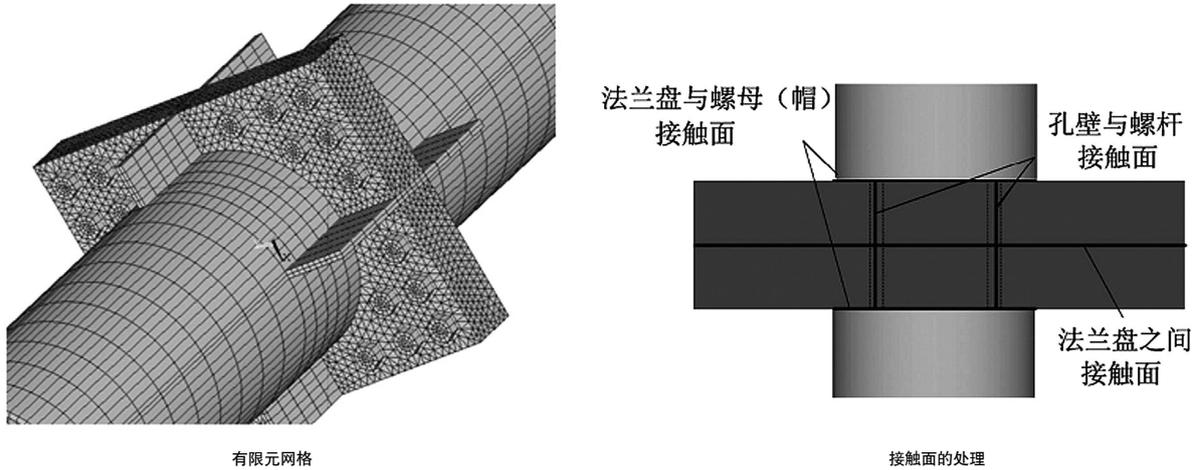
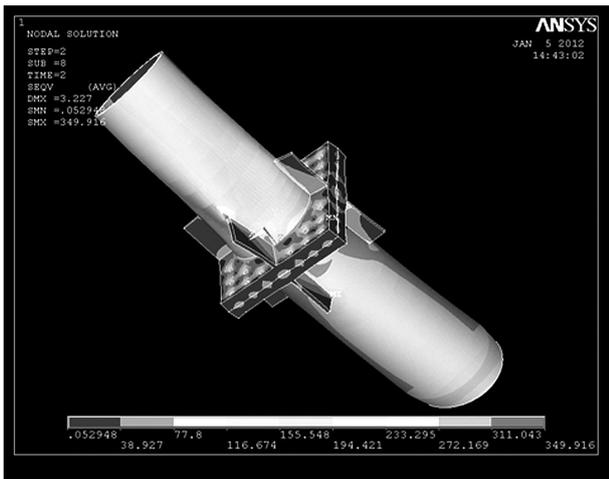
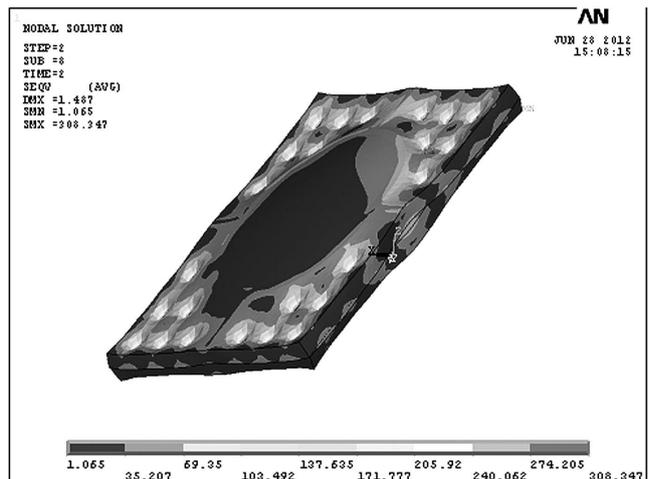


图10 节点分析模型



节点分析结果



端板结果

图11 有限元分析结果

面外弯矩；单层网壳节点均采用高强度螺栓法兰连接，法兰连接同时承受轴力和弯剪扭。本工程设计中针对上述情况做了较为详细的计算分析。本文的结果可供其他类似工程参考。

参考文献

- [1] JGJ7-2010 空间网壳结构技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 卢旺达基加利会展中心风洞测压试验报告. 中国建筑科学研究院, 2011.
- [3] 尹德钰, 刘善维, 钱若军. 网壳结构设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [4] 宗亮, 王元清, 石永久. 钢管结构法兰连接节点抗弯承载性能的有限元分析. 中山大学学报

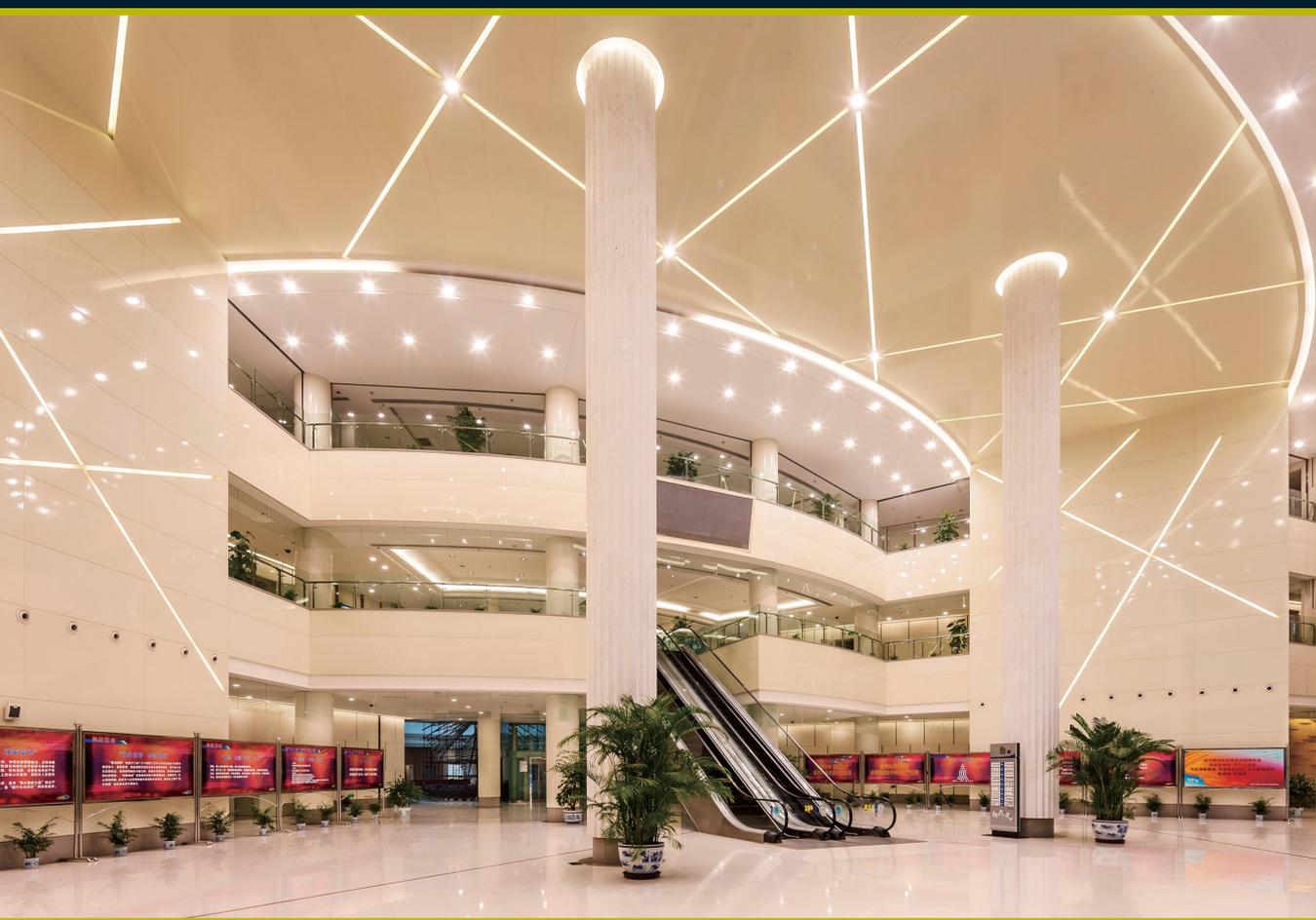
(自然科学版), 2011, V01.32(4), 431-436.

[5] 王元清, 宗亮, 石永久. 钢管结构法兰连接节点抗弯承载性能的试验研究. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, V01.38(7), 13-19.

[6] GB 50135-2006 高耸结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

审稿: 金来建

2013年第1期（总第107期）
2013年3月出版
准印证号：京内资准字9913-L0337号



成都飞机设计研究所新区科研楼