

# 建筑结构 优秀设计图集

## 4

《建筑结构优秀设计图集》编委会

中国建筑工业出版社

# 建筑结构优秀设计图集

## 4

《建筑结构优秀设计图集》编委会

中国建筑工业出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

建筑结构优秀设计图集. 4 / 《建筑结构优秀设计图集》  
编委会. —北京: 中国建筑工业出版社, 2004  
ISBN 7-112-07017-1

I. 建… II. 建… III. 建筑结构—结构设计—中  
国—图集 IV. TU318-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 121425 号

本书系全国第三届优秀建筑结构设计评选出的大跨、空间、特种和工业建筑结构部分 36 个获奖项目汇编而成, 是我国 1995 年~2002 年期间大跨、空间、特种和工业建筑结构设计的代表作。每个项目均介绍工程概况、计算方法、地基基础、结构布置和构造大样等, 以图为主, 辅以少量文字说明, 具有较强的技术性、资料性和实用性, 对建筑结构设计及施工人员、土建类大专院校师生有较大参考价值。

责任编辑: 蒋协炳

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 刘梅 刘玉英

**建筑结构优秀设计图集**

4

《建筑结构优秀设计图集》编委会

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京蓝海印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 插页: 4 字数: 624 千字

2005 年 2 月第一版 2005 年 2 月第一次印刷

印数: 1-2500 册 定价: 60.00 元

ISBN 7-112-07017-1

TU·6253 (12971)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

## 序 言

随着国家经济持续快速发展,我国已成为世界建筑业最活跃、繁荣的地区之一,建筑的建造速度和规模属世界之前列,涌现了一批优秀建筑,丰富了建筑形式和结构体系。这些优秀建筑是建筑师、结构工程师及机电设备等工程师通力合作的结晶。结构工程师为新颖的建筑形式和现代化的建筑功能的实现提供了重要的技术支撑,对保证建筑工程的质量、安全和经济起着重要作用。

为促进我国建筑工程健康、快速发展,提高结构设计技术水平,鼓励结构工程师的积极性和创造性,中国建筑学会十分赞成建筑结构分会的提议,决定于2003年主办第三届全国优秀建筑结构设计的评选,由建筑结构分会负责承办。建设部质量安全司也积极支持此项评选,为支持单位。全国优秀建筑结构设计奖为国内建筑结构设计最高荣誉奖。

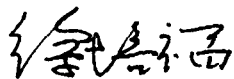
第三届优秀建筑结构设计的评选范围是1995年~2002年期间建成的建筑工程的建筑结构设计。此次活动得到了各省、市、自治区建筑学会、各设计单位的热烈响应,申报项目共129项。为做好评审工作,组织了由30名全国著名的结构专家组成评审委员会;公开发布评奖的条件:1.在建筑结构设计中有所创新,对提高建筑结构设计水平有指导意义;2.在建筑结构设计中解决了难度较大的结构问题,对提高建筑结构设计水平有指导作用;3.在建筑结构设计中适应建筑功能要求,对提高工程质量和施工速度有显著作用,取得显著的经济效益。评审委员认真负责地审阅申报材料,评审会上进行讨论评议,最后采用无记名投票方式产生了一等奖10个、二等奖21个、三等奖44个;评选结果于2003年11月20日~12月20日在中国建筑学会网站上公示,听取意见;最后于2004年7月由中国建筑学会在中国建设报、建筑学报、建筑结构学报、建筑结构刊物上正式发布获奖项目名单。2004年10月中国建筑学会建筑结构分会年会上由中国建筑学会、建筑结构分会和建设部质量安全司的领导向获奖者颁发奖状和证书。

为进一步表彰获奖的优秀建筑结构工程,并满足广大读者的需要,在第一屆和第二届优秀结构设计评选后,曾精选部分获奖项目汇编成第1册和第2册图集,本届评选后在75项获奖项目中我们精选了71项汇编成两册。其中第3册收集了优秀高层及多层建筑设计,第4册收集了优秀大跨度空间结构及特种结构设计。由于各获奖设计单位的大力支持、编委会成员的努力,本书能在较短的时间内正式出版。

本图册的内容包括各工程的工程概况、计算方法、结构布置、构造大样、配筋做法、抗震构造措施,部分工程还介绍了试验研究主要结果。对于结构设计人员,有较高的参考价值。

在参考这些工程的经验时,请注意从1997年~2003年期间正值我国一批主要的结构设计标准规范进行修订,而这些工程大部分是按修订前的标准规范设计的,修订后的新规范

范适当提高了安全度,对结构规则性化、地震作用、荷载组合、抗震措施以及对复杂结构的特殊要求等都增加了新的内容。新增加的内容有些是工程经验的总结(包括本书介绍的一批工程),有些是国内外大地震震害经验和研究成果的总结。本书收集的工程设计难免有个别内容与新标准规范不符合之处,望请读者注意和谅解。此外,也请读者在参考这些工程经验时,注意实际工程所处的地震地面运动强弱和地基情况不同,风作用、气候温度变化、建筑使用功能不同等情况。针对具体情况作具体分析是必要的。



2004年9月

# 目 录

## 序言

### · 大跨及空间结构、工业建筑结构 ·

浦东国际机场一期航站楼结构设计 .....	3
首都国际机场新航站楼与停车楼结构设计 .....	16
河南鸭河口电厂干煤棚结构设计 .....	31
青岛颐中体育场索膜结构挑篷结构设计 .....	45
北京植物园展览温室钢结构设计 .....	60
秦皇岛体育馆组合屋盖结构设计 .....	68
威海体育场全张拉式膜结构罩篷结构设计 .....	76
东莞国际会展中心结构设计 .....	84
武汉体育中心体育场结构设计 .....	99
浙江大学新校区风雨操场结构设计 .....	104
宁波国际会议展览中心结构设计 .....	121
安徽省国际会议展览中心结构设计 .....	137
芜湖市奥林匹克公园主体育场挑篷钢结构设计 .....	149
温州市体育中心游泳馆结构设计 .....	160
广州体育馆屋盖结构设计 .....	164
黄山体育馆屋盖钢网壳结构设计 .....	172
上海科技馆结构设计 .....	179
河南省体育中心体育场结构设计 .....	191
烟台体育中心体育场罩棚结构设计 .....	204
深圳游泳跳水馆结构设计 .....	211
武汉国际会展中心结构设计 .....	223
四川大学体育馆网壳屋盖结构设计 .....	231
汕头游泳跳水中心结构设计 .....	237

### · 特种建筑结构 ·

70m 跨度网架屋盖结构体系和钢管混凝土柱的结构设计 .....	247
江苏南京广播电视塔结构设计 .....	261
漳州后石电厂 600MW 汽轮发电机组基础设计 .....	276
125000kN 压力机基础设计 .....	289
青岛市五四广场《五月的风》雕塑结构设计 .....	304

---

北京王府井大厦深基坑工程逆作法设计 .....	311
外高桥造船基地平直分段生产中心钢结构厂房设计 .....	325
超大吨位重型厂房结构设计 .....	332
HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置主机厅结构设计 .....	341
涟钢棒材厂主厂房结构设计 .....	352
洛河电厂技改工程锅炉改造土建结构设计 .....	359
安徽省气象局多普勒雷达塔结构设计 .....	378
石家庄市广播电视塔结构设计 .....	386

# 大跨及空间结构、 工业建筑结构





# 浦东国际机场一期航站楼结构设计

建设地点 上海市  
设计时间 1997/1999  
工程竣工日期 1999  
设计单位 华东建筑设计研究院有限公司  
[200002] 上海市汉口路 151 号  
主要设计人 汪大绥 张富林 高承勇 周 健 陈红宇  
本文执笔 汪大绥 周 健

获奖等级 全国第三届优秀建筑结构设计一等奖

## 一、工程概况

浦东国际机场是为了满足日益增长的航空客货运的需要而兴建的大型国际枢纽机场，位于上海浦东新区的东部，濒临长江口。按照总体规划，机场按 4E 级设计，总占地面积约  $32\text{km}^2$ ，将拥有多座航站楼和 4 条 4000m 跑道，具备起降最大型客机的能力。其最终规模为年处理航空旅客 7000~8000 万人次，货物 500 万 t。机场的建设将分期实施，一期工程包括一座航站楼、一条跑道和相应的配套设施，已于 1999 年 9 月 16 日竣工投入运行。

航站楼是机场的枢纽建筑，由航站楼主楼 ( $402\text{m} \times 128\text{m}$ ) 和候机廊 ( $1374\text{m} \times 37\text{m}$ ) 两大部分组成，二者之间以两条宽 54m 的廊道相连，总面积约 28 万  $\text{m}^2$  (图 1~图 4)。航站楼中包括进厅、出发检票大厅、到达大厅、商业餐饮部分、候机厅、行李处理部分、设备机房、办公部分等，设备齐全，功能完善，其建筑外形是一组轻盈的弧形钢结构，支承在稳重的混凝土基座上，犹如振翅欲飞的海鸥，象征着浦东的腾飞。上部建筑以大面积玻璃幕墙和金属屋面板围护，展现出现代高科技建筑的非凡风采，倾斜的幕墙赋予建筑以强烈的动感，形成鲜明的个性。与建筑物的外形相呼应，航站楼的内部空间也独树一帜，进厅、检票大厅、候机厅等主要功能部分均采用大跨度结构，形成数万平方米的无柱空间。置身于这些震撼人心的空间内，人们的视线可以透过玻璃幕墙到达金波万顷的东海，繁忙的停机坪和广袤的浦东大地。大空间内深蓝色的金属吊顶仅遮盖住结构圆弧形的上弦，宛若深邃无限的天穹，其下悬垂着一根根白色的腹杆，并以黑色的预应力钢索相串连，充分展现结构的力度 (图 5)。而屋架与纵向柱列的错位布置又形成一种和谐的韵律。这种独一无二的空间效果使航站楼建筑从外观到内部都具有极强的个性，因而也极具标志性，给人以深刻的印象，与浦东国际机场作为国际枢纽航空港的地位十

分相称。

这一构思精妙的宏伟建筑，由富有创新的结构设计保证其实现。

航站楼建筑 12m(或 12.8m)标高以上要求大空间，此标高以下的空间则相对较小的特点，本工程选择了钢筋混凝土结构与钢结构混合体系。上部采用钢结构，下部为钢筋混凝土结构，两种不同体系各得其所，较好地满足了建筑的要求，功能性与经济性得到了较好的统一。

## 二、基础-软土地基中多种桩长使用于同一单体

浦东国际机场位于东海之滨，场址用地为海滩发育而成。航站楼一期工程场地勘察报告揭示，场地浅部第②-1层至第④层各土层分布稳定，土性均匀，第⑤层以下各土层由于地质历史上受古河道切割影响，其沉积分布范围、土性有较大差异。第⑤层粘性土划分为4个亚层。上海地区分布较广的第⑥层暗绿~褐黄色粉质粘土在场区缺失。第⑦层由于受东西向古河道切割，其层面南北向起伏较大，在古河道位置埋深较大，最深达60m左右，最浅处为30m左右。场地浅部地下水属潜水类型，补给来源主要为大气降水、地表迳流及潮水，埋深一般为0.85m~2.20m。根据上海地区宏观地震地质背景、本场地工程地质条件，在宏观判别的基础上，结合多种方法综合分析评价，本场地按设防烈度7度(近震)考虑，为不液化(局部轻微液化)场地，场地土类别为Ⅳ类。

勘察报告揭示：本场地第⑤-1-1层及其以上各土层以饱和软弱粘性土为主，不宜作为本工程的桩基持力层；⑤-2层夹多量粉砂，土质较好，第⑤-4层土质较好，但厚度较薄且分布很不稳定。第⑦-1层砂质粉土、第⑦-2层粉细砂层，工程力学性质均较好，但⑦-1层在场地内分布不均匀，厚度变薄或缺失。综合上述地质情况，考虑到本工程对地基沉降变形有严格要求，为此选择⑦-2层作为本工程的桩基持力层，采用预制钢筋混凝土方桩。桩截面分别为450×450mm和500×500mm，并在有⑦-1层处、无⑦-1层处、古河道河床边坡和古河道河床底部这四种地质状况，分别做了八组试桩，通过八组桩的静载荷试验，研究沉桩的情况和单桩设计承载力的取值。在施工图设计中，根据勘察报告提供的持力层层面标高的等高线平面，划分不同分区，选用不同的桩长和桩径。其中航站楼主楼，划为85个分区，选用了450mm方桩18种桩长、500mm方桩48种桩长，总桩数为2639根。航站楼登机长廊，划出64个分区，选用了450mm方桩17种桩长、500mm方桩24种桩长，总桩数为2803根。联接廊划出三个分区，选用500mm方桩3种桩长，总桩数175根。登机桥固定端，划为28个分区，选用了450mm方桩4种桩长、500mm方桩10种桩长，总桩数158根。

航站楼基础设计采用了独立桩基承台、双向基础梁拉结，以提高基础的整体性。航站楼主楼和登机长廊分别有作为设备机房、仓库之用的地下室，主楼地下室宽度50多m，长度400多m；长廊地下室宽5.6m、长1374m，均不设永久性变形缝，为超长的地下室。为了解决施工期间混凝土的收缩变形，设置了横向施工后浇带，主楼地下室设置了四道施工后浇带；长廊地下室设置了14道施工后浇带，并对其中的7道作了诱导缝设计。地下室采用了抗渗等级为P8、强度等级为C30的混凝土浇捣，地下室外墙板还采用了掺加UEA膨胀剂的混凝土浇捣，并配合相应的施工措施以减少裂缝的产生。

### 三、混凝土结构部分-大体量大柱网清水混凝土

航站楼混凝土部分采用现浇钢筋混凝土大柱网框架结构体系,根据建筑的功能划分,设置了一定数量的剪力墙,以增加结构的整体刚度。整个混凝土结构有几个特点:第一,柱网大,纵向柱距均为18m,横向为不等柱距,最大为22.65m,部分大跨度梁采用预应力。第二,体量巨大,主楼平面长402m,宽102m;候机廊长达1374m,宽37m。由于结构超长、超宽,因此纵横向均设置了温度伸缩缝,主楼纵向划分为7段,横向划分为3段,候机廊纵向划分为20段。伸缩缝区段的最大长度为72m。第三,大面积清水混凝土,建筑要求混凝土结构的大部分外露部分(包括室内、室外)采用清水混凝土,以取得特定的装饰效果,为此,在结构设计中,对混凝土原材料的选择(包括水泥、骨料和外加剂)、保护层厚度、模板及其支撑系统的设计、养护方法等方面都进行了专题研究和试验,取得了良好的效果。

### 四、钢结构部分-张弦梁体系的灵活运用

钢结构是航站楼主体结构中的关键部分,跨越进厅、办票大厅、商业餐饮大厅和候机廊四个大空间,总覆盖面积(包括挑檐)约16万 $\text{m}^2$ ,除跨越结构和支承结构外,还包括大面积围护幕墙的支承结构。为了恰当地表达海鸥展翅欲飞的建筑创意,斜柱支承的张弦梁体系被用于跨越各大空间,并根据各跨结构的不同特点,设置了不同类型的预应力钢索来维持结构体系的稳定和抵抗邻海大风的影响。这是本工程钢结构最显著的特点,同时也给设计与施工带来了较大的挑战性。

#### 1. 张弦梁-垂直向基本受力结构单元

张弦梁是以方管为上弦,以钢索为下弦,中间连以腹杆,经张拉以后形成的结构(图6)。本工程采用的张弦梁,上弦为圆弧形,下弦为折线形(圆的内接多边形),腹杆平行布置,均垂直于上弦圆弧二端的连线。跨越四大空间的四种张弦梁,其支承点水平投影跨度分别为49.3m,82.6m,44.4m和54.3m。

上弦由三根平行的方管组成,中间主弦为 $400 \times 600\text{mm}$ 焊接方管,钢板壁厚18~25mm,两侧副弦为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 方管,壁厚8mm,由两根冷弯槽钢焊成。主副弦之间由短方管相连,上弦的总宽度为3.30m。腹杆采用园钢管,管径 $\phi 273 \sim \phi 325$ 。上弦与腹杆均采用国产Q345低合金钢。下弦为单根钢索,采用上海浦江缆索厂生产的大扭矩挤包索,其材质为高强冷拔镀锌钢丝,强度级别为1570MPa,外包黑色高密度聚乙烯。钢索二端通过特殊的热铸锚组件与上弦相连。腹杆上端以销轴与上弦相连,下端通过特殊设计的索球与钢索相连,这种构造可以保证在下弦张拉时或张弦梁整体受力时腹杆均只承受轴力(图7)。

张弦梁间距为9m,而建筑纵向柱距为18m,建筑师为了得到一种特殊的韵律,要求张弦梁与支承柱错位布置。为此,必须设置纵向托架来支承张弦梁并将荷载传递给纵向柱列。托架承受张弦梁传来的竖向力、水平力、扭矩,以及幕墙传来的水平力,因此设计成空间桁架,宽1700mm,高1300mm。由两根上弦,两根下弦及腹杆组成,杆件截面为焊

接方管或 H 钢。在一个温度缝区段内形成连续桁架。

纵向托架支承于斜柱上，斜柱为双腹板工形柱，用 Q345 钢板焊成，按 18m 轴线间距成对布置，两根柱之间距为 3m，在纵向形成 3+15+3+15+3 的韵律。柱外侧翼缘的中段向内收进，形成一个凹槽，供暗敷水落管及电线管之用。斜柱的下端铰支于钢筋混凝土框架，上端与托架刚接。

跨越进厅、办票厅、商业餐饮大厅和候机厅四大空间的钢结构分别简称为 R1、R2、R3 和 R4。各部分功能和造型各有特点，因此其结构布置也不相同。

### 2. R1 屋盖：水平悬臂式抗侧+拉索抗风体系

R1 跨越进厅，其下为高架路与地面道路，相当于一个约 50m×400m 的大雨篷。且三面敞开，一边接近于封闭。R1 张弦梁的高端支承于纵向托架及斜柱，低端支承于纵向剪力墙(图 8)。该跨结构受力的特点是纵向刚度极不均匀，高端纵向支承体系的刚度远低于低端的钢筋混凝土剪力墙，三面开敞一面封闭的形体，对结构受风也极为不利，正面气流进入后受到封闭墙面的阻挡而拥塞成为正压，与流过屋面的气流形成的负压相叠加，形成很大的向上的风压，对于采用柔性下弦而屋面覆盖材料又很轻的张弦梁结构，这是很不利的受力状态。

针对纵向刚度不均的情况，结构布置上采取了增强屋面低端在钢筋混凝土剪力墙上的固结并加强屋面上弦平面内支撑系统的措施。每榀张弦梁的低端支座设计成与剪力墙刚结，并在每个柱距内另设一根刚结于剪力墙的竖向箱形短柱，短柱与各榀张弦梁之间以箱形梁连接，共同承受纵向刚度不均匀而产生的扭矩。加强屋面上弦平面内的支撑系统，使整个屋面成为一个类似于圆柱壳面的水平向悬臂体系，从而减少纵向刚度不均所造成的扭转变形，把屋面高端的纵向位移控制在可接受的范围内。

半开敞屋面受风的不利性，通过模型风洞试验得到了充分的证实。计算表明，向上的风压超过屋面体系的自重从而将使张弦梁下弦索的拉力消失而导致结构整体失效。为了保证结构能承受风压，并对有可能出现的超过设计风压的灾害性天气现象也有一定的抵御能力，设计中采用了设置抗风索的方法。抗风索每榀张弦梁设二根，相邻二榀张弦梁的四根索形成一组，其下端锚固于设在高架路分隔带中央的混凝土柱上，上端连接张弦梁上弦。每根索均施加一定值的预应力。抗风索的设置不仅可以有效地抵抗巨大的风吸，对改善屋面纵向刚度不均现象也有积极的作用。

### 3. R2、R3 屋盖：立面索抗侧+配重抗风体系

R2 和 R3 跨越办票大厅和商业餐饮大厅。每个大厅三面围以玻璃幕墙，另一面是混凝土墙，其张弦梁也是高端支承于托架和斜柱，低端支承于混凝土墙，其结构受力特点是纵向刚度不均匀。张弦梁的弧形上弦，形似机翼，来流产生的升力效应，在屋面上产生很大负压。在结构设计中，针对纵向刚度不均匀的情况，我们在斜柱之间设置了由交叉索组成的支撑系统，与斜柱、托架共同形成纵向抗侧力系统，从而有效地改善了纵向受力情况，保证了玻璃幕墙平面内变形控制在可接受的范围内(图 9)。交叉索亦采用冷拔镀锌钢丝大扭矩挤包索，并施加一定预应力，以保证在两向地震作用下所有的索都保持受拉状态。

风洞试验表明，在设计风压作用下，作用于屋面的风吸力已接近屋面体系自重，为了保证此种状态下张弦梁下弦索中保持一定量的拉力值，经过多种方案的分析比较，最后采取了在张弦梁上弦箱形截面中灌注水泥砂浆的方法，这个方法简单易行，造价低，作用明

确、直接。需灌浆的节间数由计算确定，位置尽量布置在跨中，以便使一定的附加质量产生尽可能大的下弦拉力。

本工程的围护结构施工顺序是金属屋面板先于玻璃幕墙，因此在施工的某一阶段，有可能出现屋面已完成，幕墙未封闭或未完全封闭的情况，从而形成不利的受风状态。风洞试验模拟了此种工况，设计中根据这种临时工况采取了在跨中增设临时抗风索的措施。

#### 4. R4 屋盖-空间群索稳定体系

R4 覆盖候机廊，全长 1374m。候机廊的两侧共安置了 28 座登机桥，整个建筑的四周均用玻璃幕墙围护。因此，其张弦梁二端均支承于斜柱和托架，若不采取其他措施，整个结构体系的刚度很差，尤其是在横向，由于张弦梁上下弦与托架纵轴交汇于一点，该节点虽按刚结设计，其抗弯刚度也很小，如果节点在某种作用下进入塑性，横向抗侧力体系即成为四铰机构。为了解决这一问题，设计中设置了群索稳定系统。做法是在跨内设二列纵向短柱(由下部混凝土框架柱向上延伸)，柱距为 18m，每根短柱上设四根钢索，成倒四棱锥形布置。索的上端通过加强檩拉住张弦梁的上弦。索与张弦梁不在同一平面内，每根索的索力都有纵向和横向两个分量，因此可以对整个结构提供双向约束，从而保证体系的稳定，同时也完全解决了负风压作用下张弦梁本身的稳定问题(图 10)。对群索必须施加预应力才能使结构具有初始刚度。确定初始预应力值的原则是保证在水平力作用下各根索保持受拉状态，同时满足位移要求。群索的设置是本跨结构最显著的特点，也给建筑内部空间带来新意，但却给结构设计与施工带来很大的难度。它使结构具有明显的非线性性质，结构分析中必须反映索的刚度与拉力值的关系。群索的初始预应力相当于给整个体系加载，因此必须在群索张力-抗侧刚度-张弦梁受力-张拉群索引起的变形等诸多因素中寻求合理的平衡。施工过程中，建立索力的方法、顺序、索力的检测和控制，张拉过程中结构形状的控制等也都是有相当难度的课题。

R4 的斜拉群索是保持结构稳定，提供整体结构各向抗侧刚度，同时抵抗风吸的重要构件，其初始拉力值的确定是一个关键的问题。过小，会有部分索在水平力作用下退出工作，削弱结构的抗侧刚度；过大，会给结构带来过多的附加垂直荷载，加大下弦索、上弦杆及托架的受力。理想的索力是使每一根索达到在任何荷载组合下均不出现松弛所需的最小索力，此处松弛的概念是指索的非线性刚度不小于一定的值。考虑到各种荷载组合出现的可能性，取在不包含地震的所有组合下，索的刚度始终不小于其材料抗拉刚度的 90%；在有多遇地震参予的荷载组合下，此值降低至 50%；对于罕遇地震，要使所有索均不出现松弛所需初始索力将非常巨大从而难以实施，按“大震不倒”的原则，允许部分索松弛退出工作，但确保每一根斜拉群索的强度条件，此时，结构整体仍是稳定的。

以上的考虑是从力的角度出发确定索力，并未兼顾变形控制，由于 R4 斜柱提供的抗侧刚度极其有限，群索的张拉会对结构的形状产生很大的影响，必须对索力进行调整，以使结构的初始形状符合设计要求。综合上述因素，各斜拉索控制的初始索力值最后控制为 ①184.3kN，②443.6kN，③238.8kN，④195.0kN(屋面全部完成后)。

### 五、结构非线性特性的研究和利用

本工程屋架采用了张弦梁形式，并大量使用了索这一特殊的材料，使屋盖的工作体现

出明显的非线性特性，具体表现在三个方面：

1. 斜拉索的非线性刚度

索是一种只能受拉而不能受压的特殊构件，并且，在受拉状态下，其刚度也不是固定不变的，而是随索力的减小而减小，减小的程度与索的长度、二端点的高差及自重大小有关。这是因为在实际工作中，二端点间的索为一随应力变化而不断改变垂度的悬链线，而非直线，要正确反应出它的实际工作状态，可采用二种方法进行模拟，一是在二端节点间增设节点，将其分成多段直线索来模拟悬链线进行分析；二是将二端节点间索视为一直线的材料非线性杆件，其材料刚度随应力增大而增大，而这种刚度变化恰能描述悬链线形状变化的效应。本工程中设计中采用后一种方法来模拟斜拉群索和柱间交叉索，对于每一根不同的索，均可找出其特定的索力—刚度曲线关系，从而反映它的实际工作状态(图 11)。研究发现当索应力小于一定的水平时，索的刚度将明显减小，直至退出工作。在设计中，通过对索初始应力的控制，使其在水平风载及 7 度小震作用下，索的最终拉应力不小于上述控制值，从而确保斜索对体系的抗侧刚度的贡献得到充分保证，使得位移计算结果与按线性拉杆计算结果接近；在 7 度罕遇地震作用下，部分索刚度进入明显减小阶段甚至受压退出工作，相应计算所得位移有所增大，但结构整体仍处于稳定。

对于屋架张弦梁下弦索，由于节间长度很短，且索力变化范围均高于刚度显著减小的临界值，刚度的变化很小，计算中均用线性拉杆替代，精度足够。

2. 下弦索的应力刚化

屋架的形式为张弦梁，由于建筑造型的需要，下弦出平面方向不允许设置任何支撑，其平面外的稳定问题是设计中必须慎重考虑的。在线性分析范围内，由于腹杆上端为双向铰，无抗弯能力，下弦索与腹杆位于同一垂直平面，无出平面应力分量，当出平面外力作用于腹杆下端或索上时，张弦梁的正常工作完全取决于下弦索的非线性效应，主要表现在两个方面，一是应力刚化(STRESS STIFFENING)，一是大变形效应。

应力刚化，此处是指索的轴向应力对其平面外刚度的显著影响，对 R2 单榀张弦梁的计算显示，当我们在腹杆下节点处施加 1 组固定的出平面水平外力，随着下弦索内轴向应力的变化，下节点平面外位移发生明显变化(图 12)，当索内轴向应力由 62.7MPa 增加至 319.8MPa 时，在水平荷载不变的条件下，跨中水平位移由 560mm 减小至 140mm，当轴力趋近于 0 时，平面外变形无限加大而使结构失效，其余屋盖的计算也显示了同样的结果。可见保持下弦索力不小于一定的值是确保下弦稳定的必要条件。

3. 结构的大变形效应

大变形效应在本结构中显示在多个方面。一是下弦索平面外变形，当下节点发生水平位移后，索的几何形状发生变化，偏离索长度为最短的初始位置，同时索内拉力增大并产生反向恢复力，限制了出平面位移，并使其回归平衡位置。正是由于上述非线性因素的影响，确保了下弦索的出平面稳定，并将下弦的位移控制在可承受范围之内，在 R2 的足尺模型试验中，我们对此种受力状况进行了模拟，结果证实了上述分析，由屋盖自重产生的索力使下弦索在水平荷载下的平面外位移控制在较小限度内，并随水平外力的撤消而恢复平衡位置。

二是指张弦梁结构体系几何位置及尺寸的变化使结构产生的附加的位移和内力，该效应的大小与结构实际产生位移的大小有关。在整体结构工作阶段，其可能产生的变形值与

结构几何尺寸之比均极小,结构的受力状态始终与初始几何状态接近,大变形效应极小(如R2在风吸作用下跨中起拱值在是否考虑大变形效应时的计算结果分别为138mm和136mm);而在张弦梁张拉阶段和R4斜拉群索的张拉阶段,由于此时结构尚未形成整体刚度,张弦梁的起拱和R4的水平及垂直变形均相对较大,均看出大变形效应的作用。当张拉力达到一定值时,非线性特性开始显现,为了保证屋架几何尺寸的准确性,必须把初始张拉力控制在较低的数值,而索力主要靠自重产生。实际设计中,我们把结构胎架上张拉阶段起拱值控制在120mm以内,因而大变形效应可以忽略。

图13为R4群索张拉索力分别按线性、考虑大变形计算与施工实测值之间的关系,可见考虑大变形效应更符合实际。

## 六、施工状态的模拟与校核

对于航站楼钢屋盖这样的大跨度复杂结构,其施工过程也远较一般结构复杂,对施工各个阶段的情况进行模拟分析,从而为施工提供必须的控制指标,并保证施工阶段的结构安全,也是结构设计一个极其重要的组成部分。

实际施工中,R1、R2、R3采用“屋架节间地面拼装,柱梁屋盖端跨组合,区段整体纵向移位”方法,即先在地面胎架上将每18m节间的二榀屋架连同纵向托架拼接成形并张拉至规定索力及外形,然后起吊至主楼端部组合成一个整体区段(36~72m),用计算机控制同步滑移的方法将整体区段拖拉到位;R4采用“地面拼装,四机抬吊,高位负荷,远程吊运”的方法,即先在地面胎架将每18m节间二榀屋架连同部分托架拼接成形张拉完毕,然后用四机抬吊就位后连成整体区段(54~72m),最后安装并张拉斜拉群索至规定索力,整个安装过程中,胎架张拉、群索张拉、计算模型的转化这几个方面与结构的分析有密切关系。

### 1. 胎架张拉

由于下弦为柔性的钢索,因而单榀屋架本身的成形就有一定的难度,下弦索必须达到一定的应力水平,才能使单榀屋架具有必要的刚度,而这一应力水平的确定,除了要保证屋架的形状之外,还要为抵抗风吸力提供一定的预拉力,这一过程是通过下弦索的张拉来完成的。张拉阶段抵抗下弦拉力的,仅仅是弧形的上弦杆,其单独的抗弯刚度是极其有限的,而屋面荷载尚未全部作用上去,在设计所要求的预应力之下,跨中的起拱值将达480cm(R2),由于各榀屋架的起拱值很难控制到一致,从而会给下道工序的整体区段拼装带来困难。根据这一情况,我们决定在胎架张拉这一阶段,以控制结构的形状为主要控制因素,将张拉力控制在较低水平,抵抗风吸不足的那部分预拉力在后阶段结构整体成形后由二次张拉及灌注砂浆来提供。

### 2. 斜拉群索张拉

如前所述,斜拉群索是R4结构稳定的必要构件,斜拉索初始应力的确定以在任何工况下索均不出现压力并保持一定的拉应力为标准,按设计要求给各索施加确定的预拉力是保证R4正常工作的关键。而给每区段32根索施加预拉力是一个十分复杂的问题,其复杂性体现在两个方面:1. 施加预应力时的结构状态与结构全部完成时的不同;2. 没有足够的设备一次给一个区段内所有的索同时施加预拉力。分批张拉不可避免,这就给设计提出了二个要求:1. 提供结构各安装阶段对应的索力值;2. 确定分批张拉顺序及对应的张拉



力。由于在结构的整体分析中，斜拉群索的索力是通过让索发生初始应变的形式施加的，使上述问题易于解决：改变作用于结构上的荷载以模拟幕墙、屋面板、吊顶是否完成的各个阶段，从而可得出对应阶段的索力值；在模型中去除尚未张拉的索，便可求得先期张拉索的实际张拉力(表 1、表 2)。

各施工阶段对应群索拉力(kN)

表 1

索 号	结 构 完 成	屋面覆盖完成	幕墙吊顶完成
①	216	195	184
②	436	451	443
③	332	259	239
④	251	212	195

张拉步索力变化

表 2

张拉顺序	索 力(kN)			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
②		155.4		
③		431.7	292.8	
④		365.2	379.6	195.7
①	216.5	435.8	332.3	250.5

根据实际施工条件，分 4 批每批 8 根张拉 32 根索，以张拉过程中索力变化幅度较小，且结构较大侧移尽早出现尽早回复。为确定张拉顺序的依据，按②号索→③号索→②号索(复测)→④号索→①号索→④号索(复测)的顺序进行张拉。从理论上说，结构的计算方法可以保证每次张拉一根索，张拉一遍即使 32 根索最终全部达到设计值，但是各种边界条件的假定误差及施工误差的累计使计算模型的精确定受到影响，且无可行的消除误差手段，而每批 8 根的张拉量加上适当的复测调整以消除误差，使张拉力的精度，设备的占用，施工周期的控制各方面均得到了较好的满足。

### 3. 计算模型的转化

在一般的结构设计中，总是将全部的荷载组合作用于完成后的结构上进行分析。本工程实际情况是，部分的荷载是在结构尚未完全成形时已经作用上去了，即计算模型在不同的荷载作用阶段存在转换的过程，以 R2 为例，下弦的胎架张拉使预应力和此时的结构自重作用于二端铰接的单榀屋架上；连接各榀屋架的托架梁及檩条支撑的自重作用于全部柱脚均铰接且不含柱间交叉索的整体结构上；下弦的二次张拉、交叉索的张拉、屋面、吊顶、幕墙荷载作用于直柱柱脚刚接，且含交叉索的最终结构上。相同的荷载作用于不同的模型上其效应显然有一定的差异，在设计中，按不同的施工阶段及对应的荷载分别进行了计算分析。

## 七、试验与研究

如此规模的大跨度张弦式钢结构在我国是首次采用，国际上亦未见报道，通过试验研究来了解此种体系的各种受力性能是非常必要的。根据工程特点和设计的需要，进行了下