

浦东国际机场(一期工程)航站楼钢结构 研究与设计

汪大绥 张富林 高承勇 周健 陈红宇

(华东建筑设计研究院, 上海 200002)

摘要: 本文介绍了上海浦东国际机场第一期工程中的航站楼钢结构研究设计, 包括其特点和分析, 特别是抗震和抗风设计。文中简要地阐述了其模型风洞实验的结果。

关键词: 机场航站楼 大跨度钢屋盖结构 张弦梁 风洞试验

1. 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平方公里, 将拥有4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500万吨。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。

航站楼是国际机场的枢纽建筑。一期航站楼由航站楼主楼(402m×128m)和登机廊(1374m×37m)组成, 二者之间以两条宽54m的廊道相连。主楼中包括进厅、办票部分、行李处理部分和商业餐饮等部分。航站楼的建筑外形是一组轻灵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。倾斜的玻璃幕墙赋予建筑以动感。内部空间设计也独辟蹊径, 金属吊顶仅遮住弧形屋架的上弦, 在深兰色的天穹下, 悬垂着一根根白色的腹杆, 其间以黑色的预应力钢索相串连, 充分展现结构的力度。浦东国际机场一期工程于1999年10月1日竣工投入试运行。(见图1)



图1 浦东机场航站楼

2. 结构选型与布置

根据建筑功能的需要和受力特点, 航站楼的结构采用了钢筋混凝土与钢结构二种体系。

标高12m以下的基座部分, 地面以上共二层, 采用钢筋混凝土结构。纵向柱距为18m, 横向则根据建筑功能的要求, 采用不同的柱距, 最大为22.65m, 大跨度部分采用预应力结构。根据空间划分的可能性, 布置了一定数量的剪力墙, 以增强基座部分的整体刚度。结构在纵向划分为7个温度区段, 横向划分为三个区段, 伸缩缝最大间距为72m。

12m以上部分均为大空间, 全部采用钢结构。屋盖跨越结构采用预应力张弦梁。航站楼共有四种跨度的张弦梁, 复盖进厅, 办票厅、商场和登机廊四个大空间, 分别简称为R1、R2、R3和R4, 其支点水平投影跨度依次为49.3m、82.6m、44.4m和54.3m。详见图2~图4。

张弦梁的上下弦均为圆弧形, 其上弦由三根平行方管组成, 中间主弦为400×600焊接方管, 两侧付弦为300×300方管, 由两个冷弯槽钢焊成。主付弦之间以短管相连。腹杆为圆钢管。上弦与腹杆均采用国产Q345低合金钢。下弦为一根钢索, 采用国产高强冷拔镀锌钢丝, 外包高密度聚乙烯, 二端通过特殊的热铸锚组件与上弦连接。腹杆上端以销轴与上弦连接, 下端通过索球与钢索连接(图5~图7)。张弦梁纵向间距为9m, 通过纵向桁架将荷载传给倾斜的钢柱或直接支承在混凝土剪力墙上。钢柱为双腹板工字柱, 按18m轴线间距成对布置, 且与张弦梁不在同一

平面内，形成一种特殊的韵律。纵向桁架为空间桁架，宽1700mm，高1300mm，上下弦及腹杆均为焊接方管。

为了保持结构的稳定或增加抗侧刚度，结构中还较多地使用了不同方式布置的钢索，成为本工程的一大特色。图8所示为R4中采用的群索的下端锚具。

除进厅外，航站楼的各大空间均以玻璃幕墙围护，纵向幕墙均为倾斜状，安装在钢柱平面内，幕墙支架采用双圆管结构，最大长度27m，其下端为固定铰，支承于混凝土结构，上端支承于纵向桁架的底部，为适应屋面结构的位移，采用了以四氟板为减摩材料的可滑动支承。幕墙支架结构详见图9。

3. 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

了解此种体系的各种受力性能是非常必要的。我们根据工程特点和设计的需要，进行了下列几方面的工作：

3.1. 大跨度张弦梁足尺试验。其目的是检验结构的承载性能，探索下弦施加预应力时整榀桁架结构的变形规律，对节点构造的合理性进行验证，同时通过制作一榀桁架来为批量制作确定合理的工艺参数。详见《上海浦东国际机场候机楼钢屋架足尺试验研究》一文。

3.2. 结构模型三向地震振动台试验研究。通过一个结构单元模型（包括8榀钢桁架与下部混凝土结构）的振动台试验，验证结构在地震作用下的整体工作性能，并找出其薄弱环节。详见《浦东国际机场R2钢屋盖模型三向地震振动台试验研究》一文。

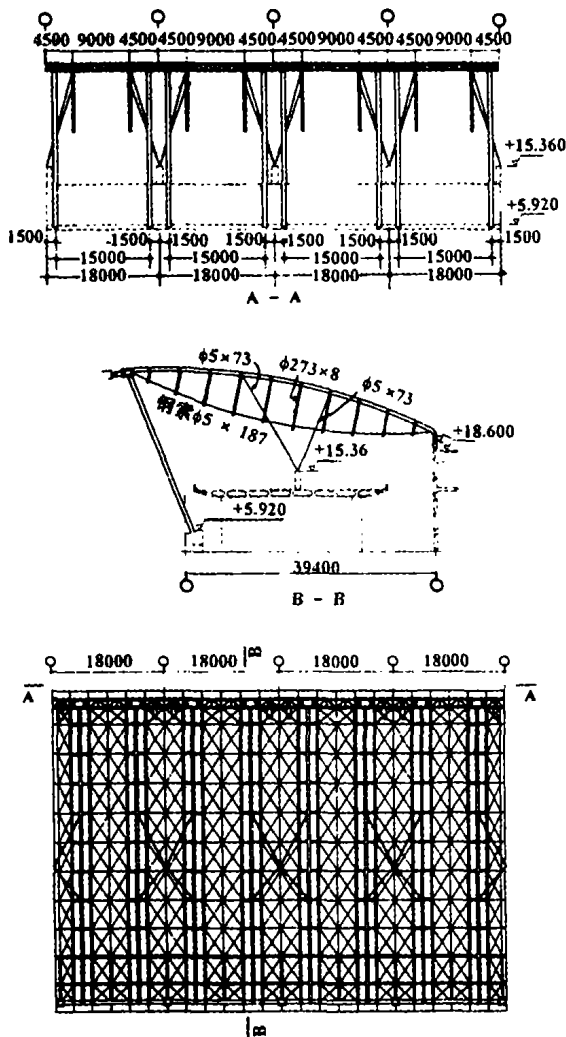


图2 进厅R1钢结构平面图

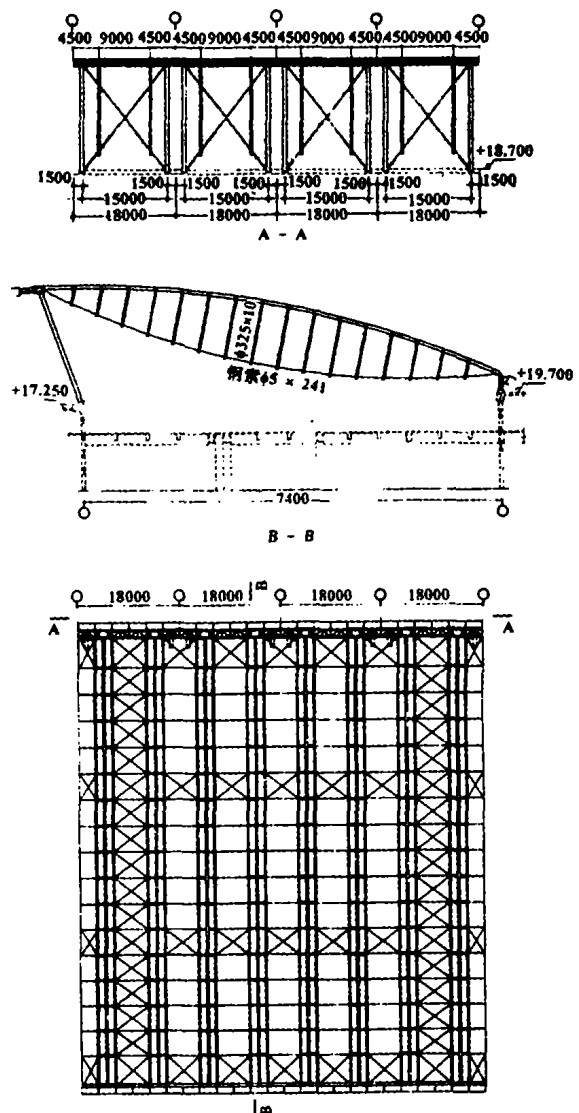


图3 办票大厅R2钢结构平面图

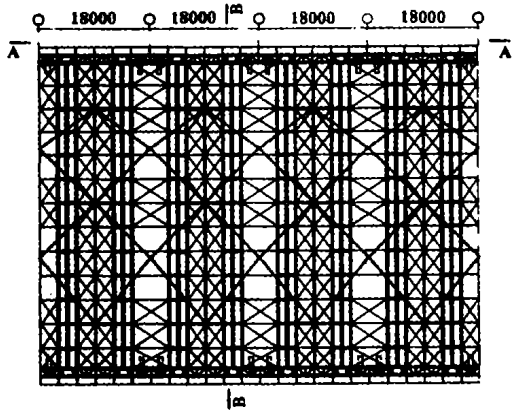
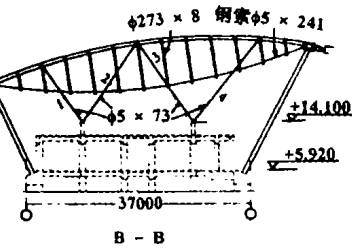
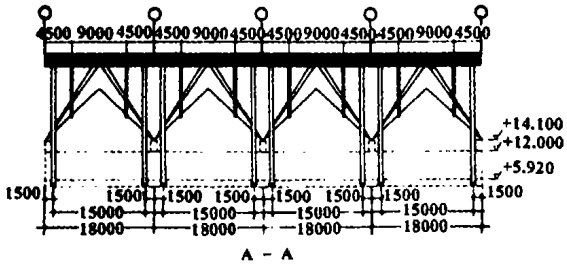


图4 登机廊R4钢结构平面图

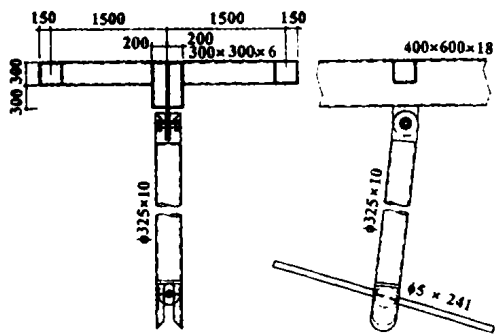


图5 张弦梁剖面

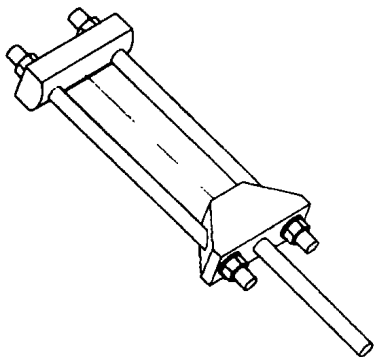


图6 下弦锚具

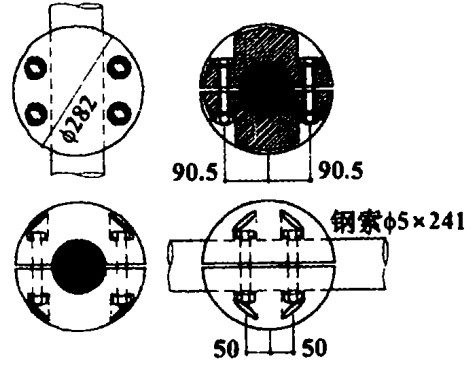


图7 索球

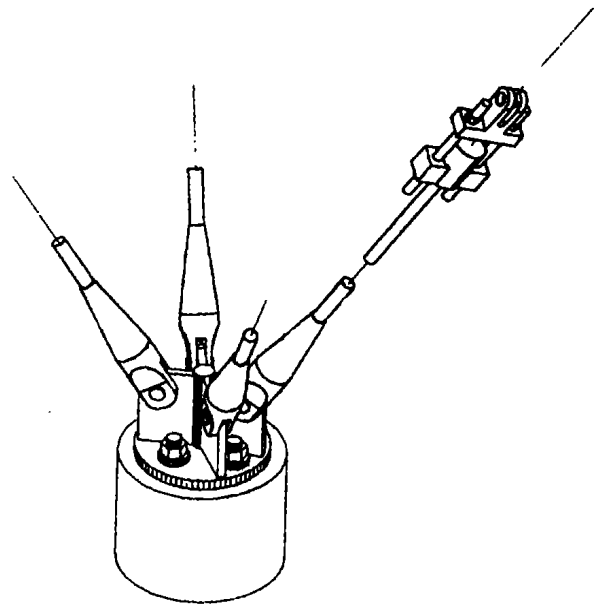


图8 群索上下端锚具

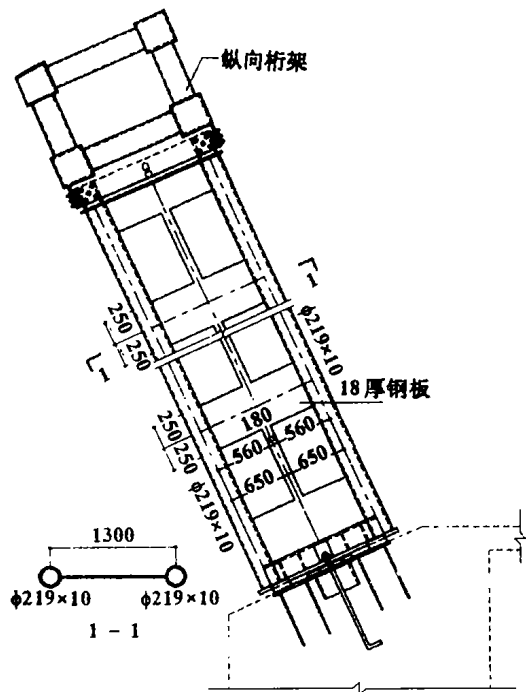


图9 幕墙支架图

3.3. 整体模型风洞试验。

本工程位于沿海，风荷载的合理确定至关重要。多个圆弧形屋顶的气动特性如何；R1结构三面敞开，一面近于封闭，屋盖上下两个表面均受压，体型系数如何取值；长达1.4公里的结构，风压在纵向如何分布；施工过程中屋盖先于围护结构完成，在部分封闭的情况下气动特性有何变化；所有这些都是设计者关心的问题。为此，我们进行了整体模型的风洞试验。

试验采用1/300刚性模型，用有机玻璃制作。每个屋盖在纵向布置了26个测压截面，每个截面上有7~31个测点，在预计风压较敏感的截面上测点加密。屋盖R1上的测点可同时测读上下表面的风压。墙面上也布置了测点以了解作用于玻璃幕墙的风压。整个模型共布置了1500个测点，根据对称性可以得到2800点的风压。同时用六分量天平测模型所受的合力，以校核测压结果。

试验在低速风洞中进行，试验风速为15m/s，流场为均匀流。模型作360°旋转，每隔10°测定一次。经计算得到瞬时风压及10分钟平均风压。

试验结果表明，本工程屋盖形如机翼，升力效应明显，其上表面均为负压，但各部分分布不均匀，总体来看，接近中部的截面不均匀性小，而接近端部时不均匀性大，尤其是端部截面的前缘部分出现峰值，远高于现有资料提供的数值。R1上表面为负压，下表面为正压，二者相互迭加，形成很不利的风压，最不利的风向角对不同的屋盖不同时出现，同一屋盖的不同部位也同时出现。大体上R1的最不利风向在140°~220°之间（180°为东），R2的最不利风向在220°~240°。图10所示是几个较典型的风压沿屋面的分布图。我们在具体取值时按整个截面合力最大的情况考虑，并按风压分布最不均匀的情况复核。

除了上述三方面的试验研究外，还对结构中的一些关键构件的性能进行了试验，如钢索的残余变形，热铸锚的强度，索球与索的夹持强度等。这些试验研究，加深了我们对结构体系的认识，也为合理的设计打下了基础。

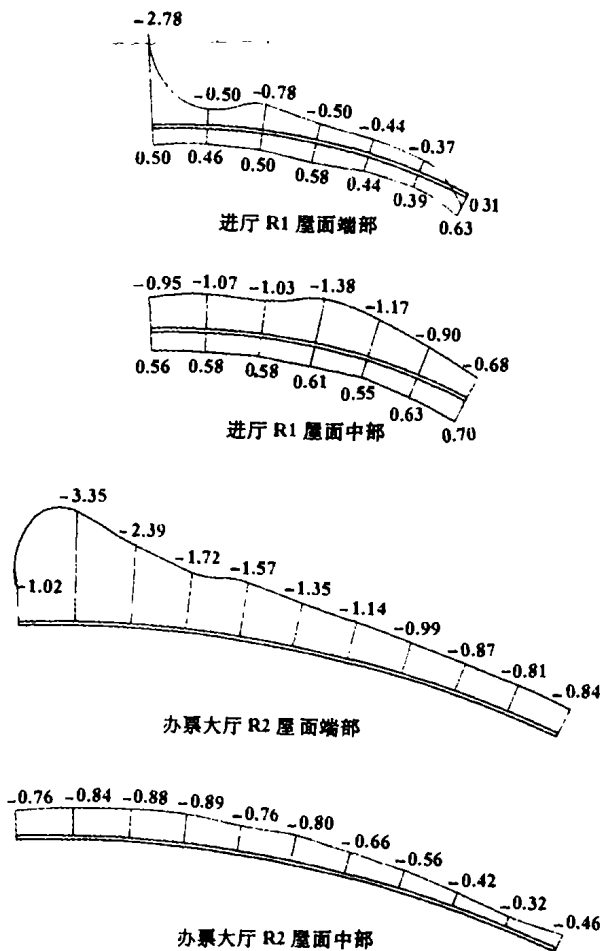


图10 屋面风力分布图(表示体型系数)正为压风、负为吸风

4. 结构分析与设计

航站楼的建筑外形和建筑师对内部空间的特殊要求造成了结构刚度的不均匀性，不利的气动外形和轻屋面的采用使屋面结构的抗风成为设计中的控制因素。张弦梁及群索的非线性性质使结构设计变得更为复杂。

结构整体分析采用了SAP84和ANSYS两种程序。前者用于线性分析，后者用于非线性分析。分析模型取两条变形缝之间的一个结构单元。用ANSYS分析时，上弦及檩条按梁单元，腹杆及支撑系统构件按杆单元，下弦及其他索按索单元输入，对两种分析结果经综合后按不利情况进行杆件及节点设计。

4.1 结构体系的抗震设计

R1、R2、R3与R4均采用张弦梁结构，其共同的问题是张弦梁与钢柱不在同一平面上，通过纵向桁架传力。在横向水平力作用下，纵向桁架

受扭。又由于张弦梁上下弦与纵向桁架中心线交汇于一点,该处节点抗弯刚度不大从而降低了整个结构的横向刚度。而这四部分结构也各有不同的特点,在这种情况下,如何使结构具有足够且较均匀的两向刚度是抗震设计的关键,我们对不同的部分采用了不同的做法。

R1:屋架高端支承于纵向桁架与斜柱,低端支承于混凝土剪力墙,结构纵横向刚度较多地依靠一端的剪力墙,为了解决纵向水平力作用下结构扭转过大的问题,除了将斜柱上端与纵向桁架设计成刚结以抵抗一部分水平力外,还通过加强屋架上弦面内的支撑系统并在低端另设刚结于剪力墙的800×800方形钢柱来约束整个屋面的扭转,使纵向水平力作用下高端水平位移的最大值控制在40mm。

R2、R3:此二部分结构与R1基本相同,所不同的是由于周边有玻璃幕墙,对结构变形的控制要求更严,而建筑师允许在高端的钢柱之间设置柱间支撑。我们利用这一有利因素,在每一柱间设置了由 $\phi 5 \times 73$ 钢索组成的交叉柔性支撑,与纵向桁架、钢柱共同形成纵向抗侧力结构,从而大大改善了屋面二端纵向刚度不均的情况,上弦面内的支撑系统也可因此而简化。柔性支撑均施加预应力,以保证在任意荷载组合下索均处于受拉状态。在水平力作用下,屋面纵向位移最大值出现于跨中,而高端位移仅18mm,完全满足玻璃幕墙平面内变形限值的要求。

R4:登机廊结构与前述不同之处是其屋面二端均为纵向桁架和斜柱支承,整个结构系统横向为不稳定状态,纵向刚度也很弱。如采取设柱间支撑的方法也只能解决纵向刚度问题。为此,采取了设置群索的方法,群索每4根为一组,每轴线上设二组,按空间倒四棱锥布置,每根索的上端锚固于二榀屋架之间的加强檩上,下端集中锚固于钢筋混凝土短柱上。这种布置方式对加强纵横二向的刚度均有贡献,同时也形成一种独特的空间效果。

群索必须施加预应力才能消除索自重引起的过大挠度并为整个结构提供抗侧刚度。群索中的力又相当于给屋架加载,将使屋架外形发生改

变。因此,索力的确定要兼顾刚度与屋架的受力,还要保证在水平力作用下每根索均保持受拉状态。必须通过优化来求得一个较合理的值。

索的非线性性质表现在索的拉伸刚度与其拉力的大小有关,对群索中的每种索,其关系如下:

索号	地震作用下拉力变化范围 kN	刚度变化范围
1	20 - 450	0.275-0.999
2	200 - 840	0.993-0.999
3	20 - 610	0.201-0.999
4	80 - 400	0.910-0.999

注:索号见图4。以索的材料刚度 $E_s A_s$ 为1.0。

索力的建立在主体结构完成后进行。在随后的施工过程中,后加上去的荷载将使索力发生变化,各阶段索力见下表。

索号	结构安装完成	屋面复盖完成	幕墙、吊顶完成
1	216kN	195kN	184kN
2	436kN	451kN	443kN
3	332kN	259kN	239kN
4	251kN	212kN	195kN

一个标准结构单元内共有32根索,施工过程中由于机具、人力等条件的限制不可能同时张拉。而分批张拉时,结构体系的弹性变形将使不同批次的索力相互影响,为使最终索力达到设计值,必须研究在分批张拉过程中索力的变化,研究合理的张拉顺序,进而确定每根索的张拉控制力。为此进行了专门的研究并制定了张拉施工方案来指导施工。

4.2 屋面结构的抗风设计

本工程抗风设计的关键是大跨度屋面体系在负风压下的稳定问题。按风洞试验提供的体型系数计算,R1、R2和R3的风吸力均大于屋面自重,致使屋架下弦拉力消失而退出工作,结构整体失效。对张弦梁而言,保持下弦始终处于受拉状态是结构存在的必要条件。对下弦施加足够的预应力是一种有效的措施。但屋架的初次张拉是在地面拼装台上进行的,在此阶段,下弦的预应力在克服屋架自重后使屋架上弦的起拱迅速增大而跨度减小。为保证几何尺寸,此时的张拉力不

可能很大。屋架安装完毕后，下弦拉力虽有所增大，但仍不足以抵抗风吸力。若此时补张拉，则需高空操作，且难以保证结构外形尺寸及索力的一致性。因此，我们根据各部分结构的具体情况分别采取了不同的抗风吸措施。

R2、R3：屋面体系恒载的标准值约 1.2kN/m^2 ，而风吸力的设计值达 1.46kN/m^2 。按不利组合考虑时，风吸力大于自重，但差值不大。为保持下弦受拉最简单的方法是适当配压重。我们采取的方法是在张弦梁上弦箱形截面中灌注重度为 17kN/m^3 的水泥砂浆。为使尽量小的荷载产生尽量大的下弦拉力，最有效的灌浆部位是跨中。我们根据计算确定了需要灌浆的上弦节间数。灌浆在屋架安装就位后进行。这一方法作用明确，简单易行，费用也较低。

R2在垂直荷载与风载下的内力图见图11。

R1：R1是风压最大的部分，屋面体型系数达 -1.6 ，风吸力远大于自重。为保持下弦处于受拉状态，若采用上弦断面内灌浆的方法，即使主付弦内全长满灌还不足以平衡风力，而且附加的巨大质量对抗震殊为不利。考虑到风荷载的不确定性，大跨度半开敞式屋面应对难以准确定量的灾害性天气现象有较大的抗力余量，我们采取了增加抗风钢索的措施。

抗风钢索每榀屋架设二根，相邻二榀屋架的4根成一组，成倒四棱锥布置，上端直接锚住上弦，下端集中锚固于设在道路分隔带中央的短柱

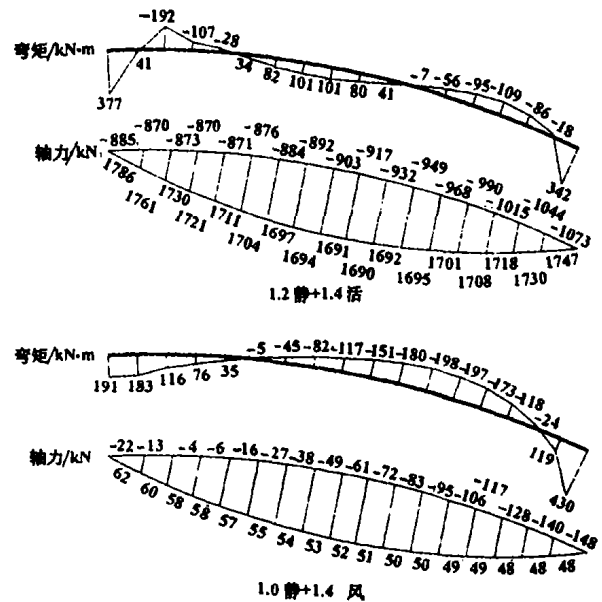


图11 办票大厅R2张弦梁内力图

上。为使钢索不影响道路的通行净空，钢索与地面的夹角较大，因而索力的垂直分量也较大，抗风作用很直接。为了消除过大的垂度，减小索的振动，每根索施加了 $75-85\text{kN}$ 的预应力。抗风索对屋架的“加载”效应不大，而对改善R1纵向刚度不均有利。

5. 结语

本工程的研究与设计，是在浦东国际机场建设指挥部的领导和支持下完成的，同济大学、上海市建筑科学研究院、复旦大学的教师和科研人员参加了本工程的研究，谨对他们付出的创造性劳动表示衷心的感谢。

· 简讯 ·

安庆长江公路大桥胜利合龙

2004年5月18日19时20分，随着敲击定位销的一声脆响，安庆长江公路大桥桥面最后一节钢箱梁顺利吊装就位，主桥实现合龙。

据了解，此次主桥合龙，标志着大桥上部构造工程已全部完工，即将进入桥面沥青铺装阶段，这为年底大桥的建成通车奠定了坚实基础。

建设中的安庆长江公路大桥设计全长 5899.5 米，主桥长 1040 米，主桥为五跨连续双塔双索面钢箱梁斜拉桥，主跨长 510 米，列世界第十六位。大桥全线按双向四车道、高速公路标准进行设计，并考虑远期适应双向六车道的运营要求。工程总投资 13.174 亿元。

安庆长江公路大桥的生命线——斜拉索采用OVM公司研制生产的环氧喷涂钢绞线拉索和OVM250钢绞线拉索体系，全桥共 128 根斜拉索，重约 950 吨，并由柳州欧维姆公司负责全部斜拉索的安装施工。OVM公司从材料供应到现场施工，都把质量放在了第一位，得到了大桥指挥

部的一致好评。日前，安庆长江公路大桥建设指挥部给OVM公司发来了贺信，向他们表示祝贺，并向参建员工表示了感谢。

