

# 华东总院机场航站楼钢结构设计实践

周 健 / 华东建筑设计研究总院

## 1 老虹桥机场

华东总院的航站楼设计从 60 年代初的老虹桥机场（现 T1）开始，从 60 年代到 90 年代经过多次改造和扩建，达到目前规模。早期航站楼的屋盖为中小跨度的钢筋混凝土结构，1988 年扩建的 B 楼第一次采用了 21.5m 的较大跨度钢屋盖，结构形式是平面钢桁架，桁架构件均为角钢（图 1）。



图 1 虹桥机场 T1 现状

## 2 浦东机场 T1 航站楼

1996 年浦东机场 T1 航站楼项目中与法国建筑师安德鲁的合作，开始了华东总院大跨度航站楼钢屋盖设计的历程，张弦梁这一后来被广泛采用的新型结构形式在该项目中第一次被介绍到中国。

T1 航站楼总面积约 28 万  $m^2$ ，其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。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 2、3），间距为 9m 的屋架与间距 18m 的纵向柱列的错位布置又形成一种和谐的韵律。这种独特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。

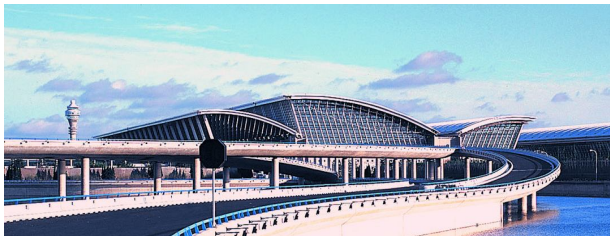


图 2 浦东机场 T1 航站楼侧面

斜柱支承的张弦梁体系 R1~R4 分别被用于跨越楼前高架、办票厅、商业餐饮大厅和候机厅各大空间，水平投影跨度分别为 49.3m，82.6m，44.4m 和 54.3m（图 4）。



图 3 T1 办票大厅内景



图 4 R1~R4（自左至右）

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。R1 屋盖为水平悬臂式抗侧+拉索抗风体系，通过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，全部抗侧刚度由低标高一侧的剪力墙提供，半开敞屋面受风的不利性则由跨中设置的抗风索解决。R2、R3 屋盖为立面索抗侧+配重抗风体系，玻璃幕墙面内设置的钢拉索平衡了高端斜柱与低端的抗侧刚度差异，上弦箱形截面中灌注水泥砂浆的配重抵抗了风吸力以保证下弦索不松弛。R4 屋盖为空间群索稳定体系，结构的侧向刚度和抗风吸全部由倒四棱锥形布置的斜拉群索承担，群索的设置给建筑内部空间带来新意，其初始预应力的确定是在索张力-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。

索端锚固节点、索球与钢索相连节点、群索下锚固节点等都精心设计以满足受力和美观的双重需求（图 5）。

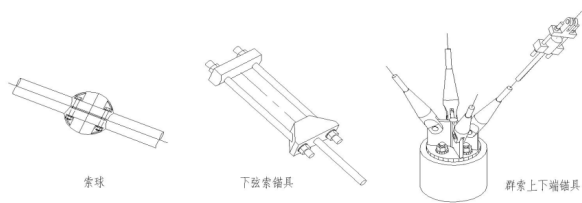


图 5 索节点示意图

### 3 浦东机场 T2 航站楼

从 2004 年的浦东机场 T2 航站楼设计开始，华东总院走上了全过程原创的道路，结构专业的关注点进一步向追求结构受力要求与建筑外观效果需求有机结合、力求表现结构逻辑美的目标转变。

T2 航站楼建筑面积约 51 万  $m^2$ ，其立面造型与 T1 协调呼应，延续了整个航站区朴素庄重而又充满时代感的气质：T1 航站楼为四道简洁的弧线，阳刚而充满力度；T2 航站楼则由两条波浪线组成，柔和而灵动。二者刚柔并济，共同组成上海新的航空门户形象（图 6）。



图 6 浦东机场 T2 航站楼侧立面

屋盖结构由 18m 开间 Y 形钢立柱支撑 9m 间距的 3 跨总长 217m 的张弦连续梁形成，连续梁使整个建筑空间成为一个整体，通透、宽敞。连续梁在波谷处为单一箱型截面，波峰处分叉为二肢以配合梯形天窗的开设，并通过平行布置交于一点的腹杆与下弦钢拉杆形成梯形的张弦梁结构。Y 形分叉钢柱的使用使张弦梁得以直接支承于柱顶（图 7、8）。

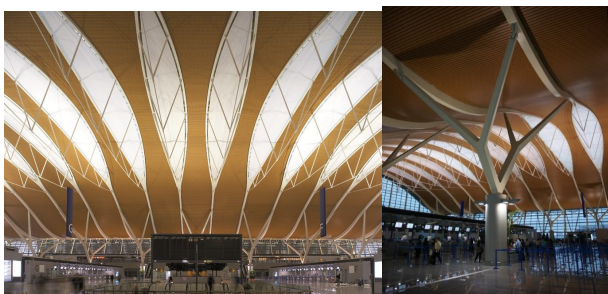


图 7 张弦连续梁室内效果

图 8 Y 形分叉钢柱

所有外露构件、节点的形式与尺度都经过了反复推敲和精细计算分析，关键处还专门进行了足尺试验研究。创造性地将机械零件“向心关节轴承”用在柱顶万向铰接节点的设计（图 9），由此发展的“钢结构杆端万向铰接节点装置”专利技术，拓宽了建筑行业铰接节点的设计思路，成为后续的大量重要工程的借鉴。

登机桥的设计也是一个亮点，采用 TMD 减振技术，解决了大跨高比轻巧结构的人致振动问题（图 10）。处于 T1、T2 中心位置的机场配套宾馆空中咖啡厅，也设计成了飞碟状以配合飞翔的主题（图 11）。

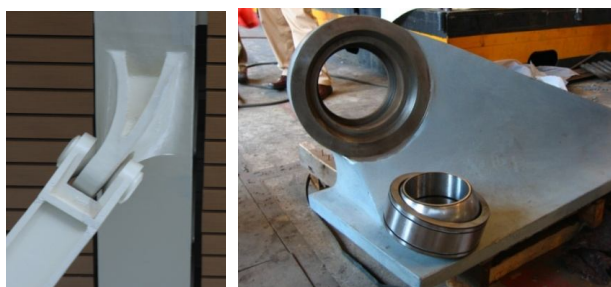


图 9 钢结构杆端万向铰接节点

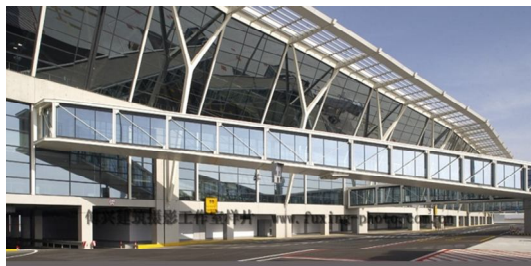


图 10 TMD 减振的登机桥

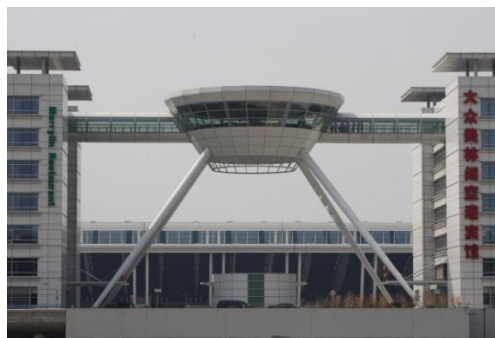


图 11 空中咖啡厅

### 4 虹桥综合枢纽机场 T2 航站楼

2007 年虹桥综合枢纽机场 T2 航站楼的设计中，华东总院探索了在没有超大空间前提下钢结构的表现方式。

办票大厅是最大跨度为 36m 的简单梁柱结构形式，梁与吊顶间欲露还遮的关系使得梁截面显得纤细，节点的处理更追求精致的效果：实腹钢梁端部变截面收小，两端分别与主体框架及钢立柱铰接，与钢立柱铰接处结合柱间支撑、柱间系杆和屋面平面支撑设计成组合铰接点（图 12、13）。

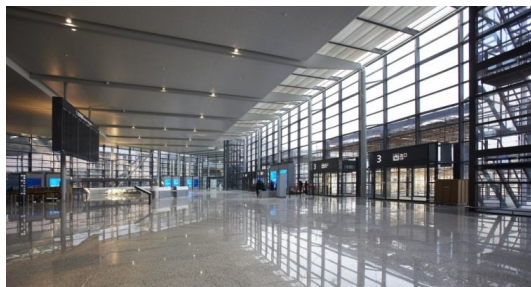


图 12 办票大厅



图 13 组合铰接点

长廊空侧贵宾休息厅上部屋盖，平面投影为一斜边长 90m 的直角三角形，采用双向张弦梁结构，张弦的布置方向结合建筑的指向性需求设置。改造了下弦索锚具，将锚索计置于其中用于实时监测索力变化，腹杆尝试了双板空腹格构的方式（图 14、15）。

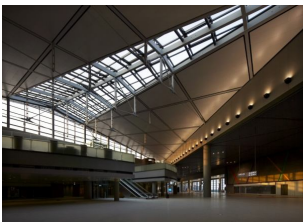


图 14 贵宾休息厅屋盖



图 15 空腹格构腹杆

航站楼内，设有多条连接通道，结构上或采用悬挂方式，或通过优化桁架形式，努力使之成为一道景观（图 16、17）。室外的雨篷也作了精心的处理（图 18）。

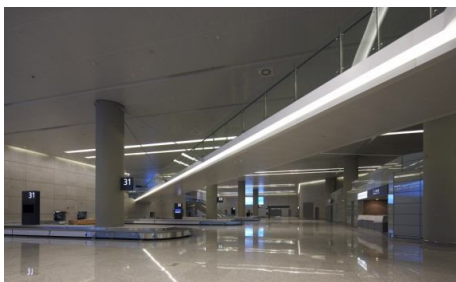


图 16 到达厅通道



图 17 出发层通道

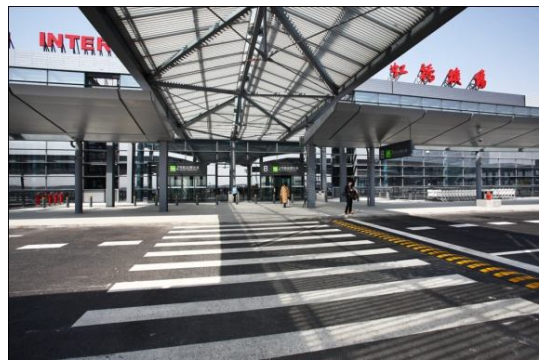


图 18 入口雨篷

在标高 36.650m 处连接航站楼与东交通中心跨度约为 90m 的一双高空连接廊是该项目中的最大跨度结构，采用钢桁架形式，搁置于两端的结构单体上。为减小连接廊对被搁置结构单体的地震效应，一端采用液体粘滞阻尼器隔震支座连接，另一端可滑移（图 19、20）。



图 19 高空连廊



图 20 液体粘滞阻尼器隔震支座

## 5 萧山机场 T3 航站楼扩建

2009 年杭州萧山机场 T3 扩建，是在原航站楼基础上的加接和局部加顶，原建筑外形、柱网尺寸、结构强度都对新建结构形成约束条件。华东总院承担了方案和初步设计工作。

主楼中排柱距采用 12m 和 36m 间隔跨，以协调原结构 12m 间隔的柱距；前排柱子采用间距为 12m 的摇摆钢柱，以减小对原结构柱的负担，柱间适当设置拉索以抵抗水平荷载。

屋盖采用连续单向波形、悬挑处上翘的单层网壳结构，构件按三向网格布置，网壳的波谷处支撑于中排柱顶。壳体在顺波方向主要依靠拱的作用以受压为主，36m 柱距间屋盖设置下弦拉索平衡拱形结构推力；

垂直波方向，利用波峰和波谷间的高差，屋面整体以桁架的原理提供承载力，斜向网格构件起到桁架斜腹杆的作用，纵向构件作为桁架的弦杆，整个屋盖有良好的空间受力性能（图 21）。

$\varepsilon = 1.013$

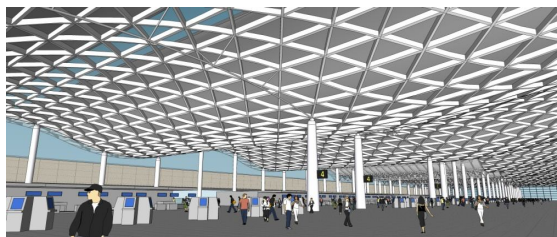
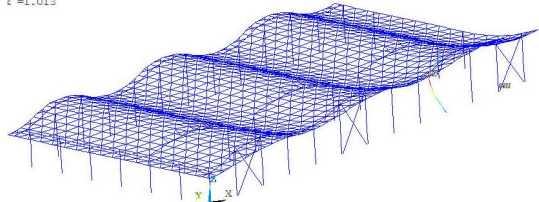


图 21 主楼屋盖结构

屋盖在单侧有较大的悬挑，悬挑根部波峰波谷间的高差随悬挑长度的大小而同步变化。同时，悬挑屋面在立面上斜向向内收进，波峰处悬挑长度较大，波谷处悬挑长度较小，这样就较大地减小了波谷处受压弦杆的长度，使得结构更为稳定。

长廊采用树状柱支撑的单层壳结构（图 22）。

本项目施工图由浙江省院后续完成，屋盖的结构形式改成了网架。

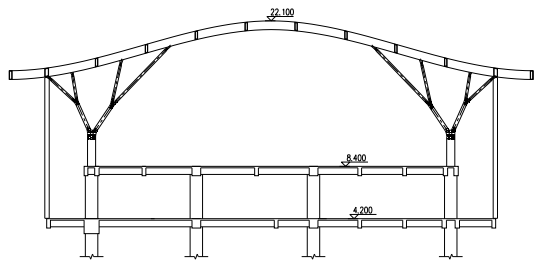


图 22 长廊屋盖

## 6 南京禄口机场 T2 航站楼

2010 年，华东总院同时开始了两个机场的设计——南京禄口机场 T2 和苏中机场。

禄口机场 T2 航站楼，是华东总院原创机场中第一个大屋盖采用全吊顶的建筑，钢屋盖结构设计的重点确定在结构体系与建筑形体的配合、外露柱、天窗等部位的细部表达及经济性。

航站楼建筑面积 23 万  $\text{m}^2$ ，主楼屋盖平面形状接近于扇形，上下表面均为自由曲面，最大跨度 78m，最大悬挑尺寸 23.5m，采用单-双层结合的曲面网格结构体系。通过调整建筑上下表面的曲面形状，在曲面间形成空间将结构受力需要的构件不露痕迹地布置

于其中，结构表面直接与建筑曲面契合。主要受力跨沿径向放射状布置，为多管空间桁架，主跨间中间位置结合天窗的设置采用单层结构，单双层结构间自然过渡；其余位置由双层网架填补（图 23~25）。

支承屋盖的悬臂柱有锥形钢管混凝土直柱和 Y 形钢管斜柱两种形式，柱顶一般与屋盖铰接，处于悬臂端根部的 Y 形柱柱顶节点通过一对止推轴承的应用实现了小尺寸下大拉压承载力的理想铰接（图 26）；端部部分采用水平可滑移节点以释放部分温度应力。



图 23 主楼鸟瞰

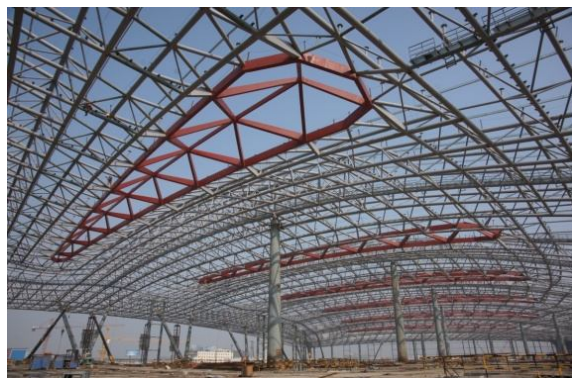


图 24 施工现场



图 25 横剖面



图 26 Y 形斜柱

7 苏中机场

苏中机场（现名扬州泰州机场）航站楼总建筑面积约 3 万 m<sup>2</sup>，是华东总院首次小机场的实践，结构的表达被作为营造室内效果的重要部分。



图 27 苏中机场侧立面

该工程钢屋盖建筑的条件是：主体结构柱网依据扇形平面特点呈放射状布置、钢屋盖结构支承点少、屋面为波浪式双曲面、屋面要求采用菱形网格天窗、钢屋盖结构构件均需外露。

结构设计采用多榀钢屋架+单层双曲面四边形斜交网格的结构体系，钢屋架结合柱网沿径向布置，屋架梁采用拱形连续曲梁，简洁轻巧，最大跨度约 45m；钢屋架通过若干斜柱、摇摆柱与下部主体结构混凝土柱连接，既传递结构竖向荷载又为结构提供径向抗侧刚度，环向抗侧刚度全部由从柱顶斜拉至楼面的钢拉杆支撑提供；在每榀钢屋架间，采用单层双曲面四边形斜交网格结构传递屋面系统荷载（图 28、29）。

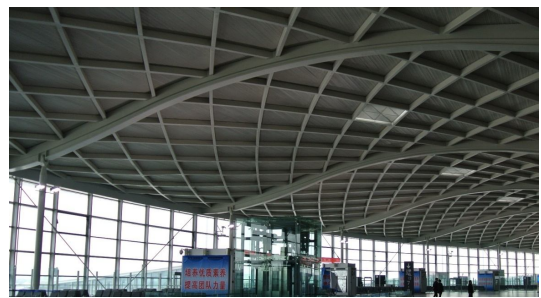


图 28 钢屋盖结构室内照片

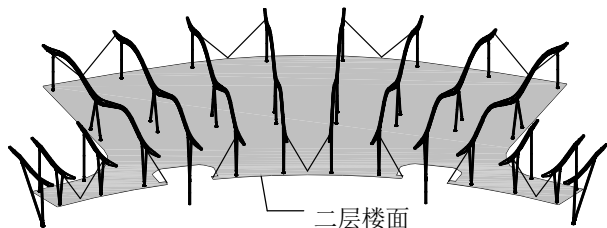


图 29 抗侧力体系的布置

在节点方面的努力包括：方管扭转斜交的复杂关系通过节点处简单的翼缘板弯折解决，传统的销轴节点采用铸钢件创新表达等（图 30）。

水平跨越体系与竖向支承体系的精心巧妙组合，主次结构的合理搭配，构件节点的精细设计，达到了理想的建筑效果和经济的用钢量。



(a) V 形柱脚节点 (b) 人字柱脚节点 (c) 柱顶节点  
图 30 销轴节点

8 温州机场和烟台潮水机场

2011 年开始设计的温州机场和烟台潮水机场都是建筑面积近 10 万 m<sup>2</sup> 的中型机场，屋面也都是自由曲面形式，设计上尝试了两种不同的结构形式。

温州机场的钢屋盖采用传统的点支承四角锥网架；支承柱为锥形钢管混凝土柱，双向典型支承柱距在 36~48m 之间，平面呈交错梅花状分布；屋盖网架在各支承点以外均有 9~20m 不等的悬挑（图 31）。

主入口上方的屋面采光天窗与主楼空侧立面幕墙连成一体、继而延伸到两翼候机廊的空侧立面，是室内效果主要表达的部分。屋面采光天窗跨度较大，结构上采用连续排列的弦支交叉梁结构，顺着天窗进深方向的布置延伸到空侧，沿开间方向则搁置于网架悬挑端（图 32）。

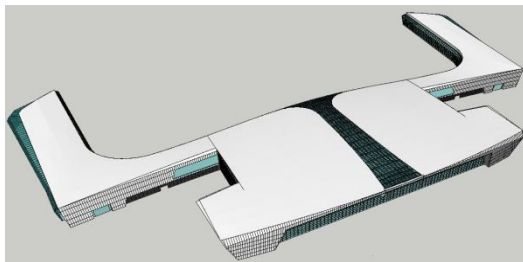


图 31 温州机场形体



图 32 温州机场室内效果

烟台潮水机场的屋面结构采用了大跨波纹腹板梁的方式代替常规的管桁架，这在国内大型公共建筑屋盖体系上也是第一次使用。腹板采用波纹形状，可以避免平腹板产生的局部屈曲变形，从而采用更薄的钢板实现更强的承载能力，可有效降低结构自重，减少用量，而且结构布置简单、受力明确。经方案比较发现，本工程钢结构屋盖在采用大跨波纹腹板梁后实际用钢量下降 20% 左右，现场反映施工非常方便(图 33、34)。



图 33 烟台机场效果图

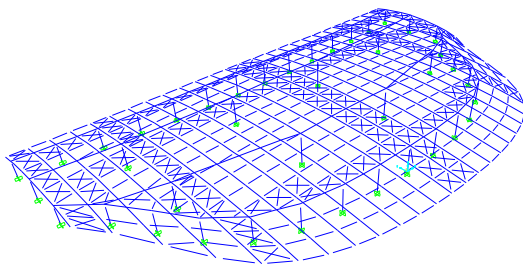


图 34 烟台机场屋盖结构布置

## 9 虹桥 T1 航站楼改建

2013 年开始的虹桥 T1 改建，设计面对的难题是如何在原有结构承载力限制条件下使新建现代结构的美感得到完美展现，同时又保留一定老结构的历史符号。与钢结构相关的主要有 A 楼、B 楼出发厅立面改造(图 35)。



图 35 立面效果图

A 楼立面改造是将原平屋面改成抬高的单坡屋面并与立面和雨篷连成一体，两个搁置端均保留原结构。设计采用了一个单元式的空间杆系结构，杆件间

连接以铰接点为主，受拉杆件采用拉索，使得外露结构充满现代感(图 36)。

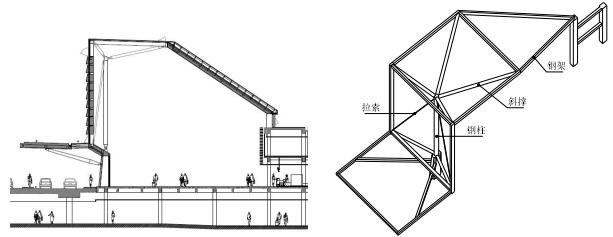
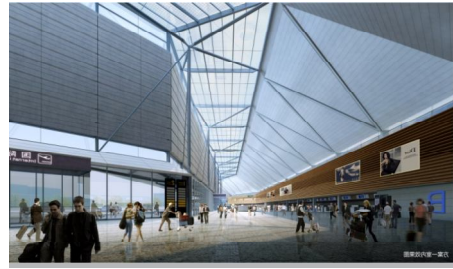
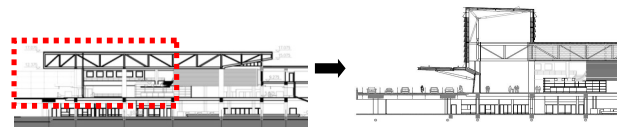


图 36 A 楼出发厅立面钢结构

B 楼立面改造是在保留原主要受力桁架的前提下改造外挑部分的雨篷并增加局部抬高的屋面，幕墙、雨篷和屋面钢结构一体化设计。通过构件传力途径的巧妙设计，使新建钢结构对原屋架的作用与拆除的悬挑端的作用基本等效，从而得以保留并展示原有的钢桁架结构(图 37)。



改造前

改造后

图 37 B 楼出发厅立面钢结构

2014 年，52 万  $m^2$  的浦东卫星厅 S1、S2 新建和 20 万  $m^2$  宁波机场设计同时开始，期待华东总院带大家新的航站楼钢结构作品……

作者简介：周健，华东建筑设计研究总院副总工程师，主持过浦东机场 T2、虹桥机场 T2、南京禄口机场等多个机场航站楼和武汉中心、天津周大福等超高层项目的结构设计。