

[编者按] 新建武汉火车站作为全国四大铁路网客运中心之一,规模宏大,造型独特,结构设计难度是多方面的。从结构形式看,武汉站将大跨空间结构、多层框架结构、桥梁结构融为一体,需要研究如何将这三种特性迥异的结构形式协调起来,使之有效地进行工作。从结构承受的荷载来看,既有一般的恒载、楼面活载、屋面活载,也包括由于武汉站特殊工作形式带来的列车振动荷载,以及特殊体型带来的复杂风荷载。从设计目标上来看,除了保证建筑的安全、经济、美观外,建筑的舒适度及防恐也被列入结构设计中需要考虑的问题。从结构计算与设计上看,在确定合理的结构体系以后,对于如此大规模的结构,需要进行一系列细致的整体线性、非线性静力及动力计算,也需要一系列细部节点的分析与验算。总之,武汉站在高架站房的结构体系、抗风抗震、节点分析与设计、列车振动对结构的影响、建筑舒适度、防恐等多方面,对结构专业提出了新的课题。这些新问题都是以往规范及科研成果没有涵盖的,而且有许多内容是第一次涉及。故以专栏形式对此项目的部分研究成果进行集中介绍。

武汉火车站复杂大型钢结构体系研究

赵鹏飞¹, 潘国华², 汤荣伟¹, 陶 勇², 钱基宏¹
杜义欣¹, 阳 升¹, 李跃林¹, 郭占一², 宋 涛¹

(1 中国建筑科学研究院,北京 100013; 2 中铁第四勘察设计院集团有限公司,武汉 430063)

[摘要] 新建的武汉火车站是特大型火车站,它将大跨结构、多层钢结构、桥梁结构融为一体。结合建筑特点对屋面与楼面结构体系进行了选择,并对主要结构的受力特点进行了分析。在屋面结构中,采用拱与网壳杂交的“拱-壳”组合体系,而拱与网壳采用 V 形撑进行连接。楼面结构与屋面结构的间接结合,降低了主要构件的受力。工程采用的结构体系对于其他大型公建,特别是大型高架车站具有很好的借鉴意义。

[关键词] 武汉火车站; 组合体系; V 形撑; 拱; 网壳; 大跨度楼面

Research on the complicated steel structure system of Wuhan railway station

Zhao Pengfei¹, Pan Guohua², Tang Rongwei¹, Tao Yong², Qian Jihong¹
Du Yixin¹, Yang Sheng¹, Li Yuelin¹, Guo Zhanyi², Song Tao¹

(1 China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2 China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Wuhan railway station is combined with long span structure, multi-story structure and bridge structure. How to select the floor and roof structure system according to the architectural characteristic is presented. The structure characteristic of main elements is analyzed. In the roof, the “arch-shell” combinatorial system is adopted, the arch and the latticed shell is linked with the latticed shell by V branch. The inner force of main structure is reduced by the indirect combination of floor and roof structure. The structure system of the project can supply reference for big-scale public works, especially for elevated railway station.

Keywords: Wuhan railway station; combinatorial system; V branch; arch; latticed shell; long-span floor

1 工程概况

新建的武汉火车站是全国四大铁路网客运中心之一,总建筑面积355 391 m²,建筑为3层,站房最高点为58m。由三部分组成:中央站房,南、北侧雨棚(图1)。图2是武汉站沿顺轨向剖面图,4N~5N,5N~6N,6N~7N跨与3N~4N跨基本相同。其中,10.25m标高是站台层(桥梁结构),18.8m是高架候车室,25.5m是一夹层。

武汉站建筑具有以下特点:1) 建筑体量宏大。顺

轨方向476m;横轨方向300m,站房建筑面积高达220 000m²,仅屋盖面积就达150 000m²;主结构最大跨度116m。2) 屋面形态复杂,其沿横轨、顺轨两个方向的曲线均为高次函数。3) 借鉴航空港的等候空间模式,屋面实现大跨度,楼面也要实现大跨度。4) 是我国第一个严格意义上的高架车站,列车轨道架设在距地

作者简介:赵鹏飞,博士,副研究员,一级注册结构工程师,Email: zhaopengfei@cabrtech.com.

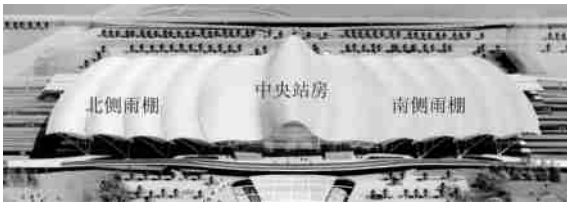


图1 武汉站效果图

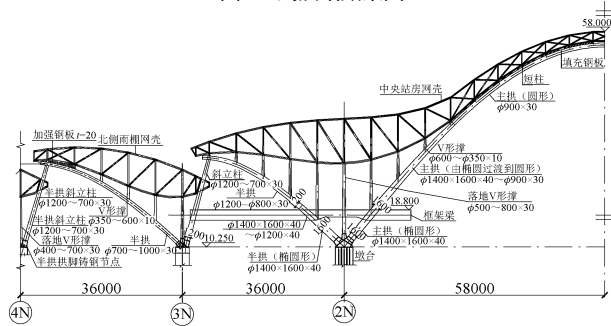


图2 武汉站顺轨向剖面图

面 10.25m 的桥梁结构上,桥墩同时支承桥梁结构与站房结构。需深入研究列车运营对站房结构的影响、列车风引起的安全问题及站房振动引起的舒适问题。

2 结构体系

2.1 中央站房屋面结构体系

中央站房屋面的支承结构由五楹主拱、半拱和斜立柱组成(图3),五楹的间距基本为 64.5m,最大主拱跨度为 116m。屋面结构为正交正放式网壳结构^[1],其上弦平面布置交叉撑。其中,上下弦采用圆管,腹杆有两种形式:刚性圆腹杆和柔性钢拉棒;上弦面内交叉撑采用柔性钢拉棒。

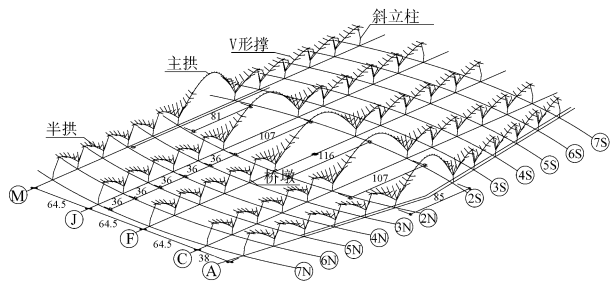


图3 武汉站的支承结构体系

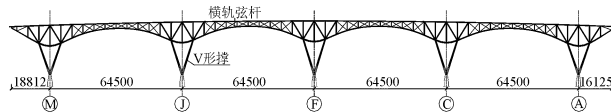


图4 中央站房屋面结构横轨剖面

体系的几个要点为:1)网壳弦杆为复杂的空间曲线。2)在拱顶直接用短柱与网壳相连,短柱之间填充钢板;在其余位置二者则采用V形撑连接。屋面网壳与主拱、半拱组成了“拱-壳”组合体系。3)屋面网壳结构双向变厚度,横轨向在跨中最薄,支座处(半拱、V形

撑处)最厚(图2,4)。4)站房结构与雨棚结构并无联系;其支撑结构仅在轴 3N, 3S 处共用一个桥墩,由于桥墩的刚度与主拱、半拱等支承构件相比要大很多,因此整个雨棚结构和中央站房结构相对较独立。5)主拱、半拱也承担着楼面梁的支承任务,由于共用支撑结构,楼面结构与屋面结构有间接的联系。6)主拱、半拱均为变截面。主拱下部的内力巨大,而铁路作业的特殊性又严格限制了构件在横轨方向的尺寸。在此情况下,采用了一种特殊的截面——椭圆形钢管截面(长轴×短轴=1 600×1 400,内置混凝土),不但解决了横轨方向截面尺寸受限的问题,还成为建筑的一大亮点。主拱截面由下部的椭圆形渐变为圆形。7)支承结构通过铸钢节点与下部结构连接。

上述结构体系的优点在于:1)屋面以网壳结构覆盖,这种格构式结构的长处是对屋面形状进行了离散,易于实现,而且刚度较大,比较适宜该建筑形状复杂、荷载形式多的特点。2)根据屋面形状的走势,网壳的支承结构采用拱无疑是最为适宜的。拱的优势是具有较大的面内刚度,能够较为充分地利用材料的轴向强度,而且可以为建筑留出较大的空间^[2]。3)网壳与拱的距离可以进行一定量的调节,便于实现屋面与支撑结构脱开的效果。4)拱与网壳的结合,不是简单的支承与被支承的关系。二者的结合会展现出新的工作性态——拱是网壳的支承,而网壳又大大增加了拱的刚度。事实上,该结构是网壳与拱组合而成的杂交结构。5)节点主要采用相贯焊接的方式,这是杆件间连接最为简单、直接的方式。中央站房屋面结构竖向荷载的传力路径为:网壳—V形撑—主拱或半拱(斜立柱)墩台—桥墩。

2.2 雨棚结构体系

雨棚也采用正交正放式网壳结构。南、北侧雨棚各分为四片,每片雨棚的建筑面积在 11 000~12 000m²左右。四片雨棚在结构上相互独立。

雨棚支承结构沿顺轨向布置,由南北各 20 楹支承于 10.25m 墩台的半拱和斜立柱组成(图3),每个半拱及对应的斜立柱组成一个支撑单元。半拱跨越一个轨道梁的跨度为 35.3m,与中央站房屋面支承结构相同的是:支撑单元沿横轨向间距 64.5m(跨越 3 个轨道线)。半拱与相邻支撑单元的斜立柱共用一个桥墩。

2.3 楼面结构体系

楼面结构的层数不多,但荷载较大(不含钢结构自重的恒载为 7.5kN/m²,活载 3.5kN/m²),而且跨度也较大(横轨向 21.5m,顺轨约 30m)。经过比较,确定采用钢框架结构作为楼面结构的基本形式,楼板采用以压型钢板为模板的非组合楼板。

楼面梁分为三级:1)第一级为顺轨向主梁,跨度较大,一般为28m,间距一般是21.5m,与桥墩的间距相同。在有主拱、半拱的轴线上(轴C、F、J),此主梁支承在主拱、半拱上(图2);在其它非铁路正线的轴线上,则利用立柱与楼面V形撑作为支承。采用V形撑不但使其与主拱、半拱有所呼应,而且起到了减少主梁跨度的作用。2)第二级是横轨向梁,沿弧线布置,两端一般与第一级楼面梁刚接;最大高度为2.3m,跨度一般为21.5m。3)第三级是顺轨向檩条,铰接于第二级楼面梁上,跨度一般为10m。

图5是18.8m楼面结构顺轨向主梁和横轨向梁的平面布置图。由于楼面的平面尺寸巨大,利用8道温度缝将楼面分为8个温度单元,温度缝的最大间距小于80m。各温度单元之间仅有竖向联系。每个温度单元设置了间隔约30m的后浇带。铁路建筑的特殊性决定了楼面支承结构的多样性,除了上文提到的与屋面结构共用的主拱、半拱外,还包括电梯井、落地柱、楼面V形撑等多种构件。

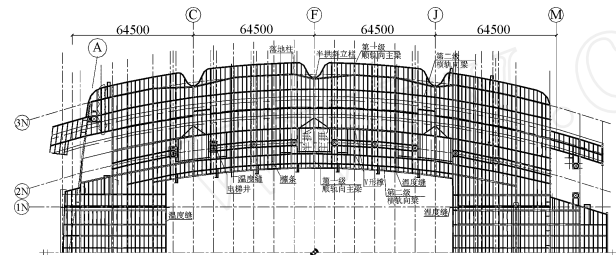


图5 18.8m楼层平面

3 结构受力分析

在结构静力分析中,主要采用SAP2000及ANSYS软件。主要单元有:结构支承体系、楼面结构的梁柱、屋面结构的弦杆为梁单元,屋面结构的腹杆为杆单元,楼面采用板壳单元。

武汉站安全等级为一级。除结构自重外,主要荷载与作用:屋面恒载 0.6kN/m^2 ,楼面恒载 7.5kN/m^2 ;楼面活载 3.5kN/m^2 ;基本雪压 0.6kN/m^2 ;温度作用: ± 30 ;基本风压 0.4kN/m^2 ,风振系数取2.0;体型系数取正风压 $0.3\sim 0.4$,负风压 $-1.0\sim -1.5$ 。

武汉站为6度设防,设防类别为乙类,按照安评报告,相关设计参数为:设计基本地震加速度 $0.0825g$;类场地,特征周期 $0.34s$;多遇地震与罕遇地震的水平地震影响系数最大值分别为 0.0758 和 0.413 。

考虑了风载与温度、地震与温度、地震与风载的组合。地震作用包含双向水平地震作用和三向地震作用。计算结果表明,地震作用不起控制作用,主要受力构件满足大震弹性的要求。控制工况一般是风载与温度作用的组合。

4 结构的受力特点

4.1 屋面网壳的受力特点

网壳传力途径是荷载首先沿横轨方向传递,传递至主拱位置时,直接由主拱、V形撑、半拱传递给下部结构。所以网壳以单向受力为主。由于下弦的曲线形状,使横轨向桁架产生了“拱”的效应,具体表现在:在跨中,上弦轴力大于下弦,甚至下弦轴力也为压力(图6)。

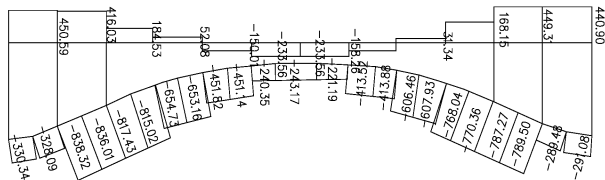


图6 中央站房网壳横轨弦杆轴力

中央站房屋面的中部,结构沿顺轨向上凸。此结构形态类似于拱,使网壳上下弦的轴力均为受压。但由于此拱缺少有力的水平支撑,使其发挥的作用有限,没有成为荷载主要的传递途径。

4.2 主拱的受力特点

主拱是结构最主要的支承构件,其受力性态为双向压弯,主要受力特点为:

1)对下部结构的推力巨大。结构主拱的最大跨度为116m,而且需同时承受屋面和楼面荷载,主拱水平推力达 $16\,000\text{kN}$ 。但由于半拱水平推力与主拱推力方向相反,很大程度上减小了对下部结构的推力,两者的合力对下部结构的推力为 $7\,100\text{kN}$ 。

2)由于楼面结构的存在,使主拱的弯矩分布发生了一定的变化。主拱最大弯矩的位置由拱脚上移到其与楼面主梁相交的位置,而且使主拱控制截面弯矩减少20%。图7是在主拱、半拱之间设置楼面梁与否,主拱、半拱内弯矩的对比。由此可以看出,楼面与主拱之间不是单纯的被支承与支承的关系,而是有“互动”的成分存在的。

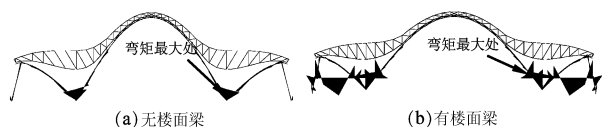


图7 主拱弯矩图的对比

3)主拱拱脚的面外弯矩由轴F向东西两侧逐渐增大,最大出现在轴A和M,主要是超长结构在温度作用下网壳向两侧的推力作用所致。

4)“拱-壳”组合体系中二者的结合,提高了结构刚度。这一点在结构的屈曲分析上有明显表现^[5](图8)。

4.3 结构在温度作用下的受力特点

4.3.1 屋面结构

部分 V 形撑的轴力(恒 + 活)/kN 表 2

V 形撑	落地	第二	第三	第四	第五	顶端
轴 M (靠外侧的一肢)	- 215	442	- 79	- 107	- 587	- 1 102
轴 M (靠内侧的一肢)	- 4 023	- 1 266	69	- 18	- 65	- 1 923
轴 ⑥	- 2 852	- 472	- 17	- 198	- 814	- 2 290

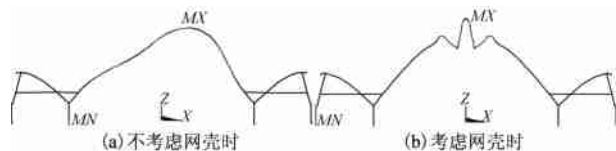


图 8 主拱首阶屈曲波形

中央站房与雨棚在横轨向的长度达到 300m,而且由于种种原因没有设缝。在温度作用下,结构的边缘构件发生较大的变形。其中,在 30 的温度作用下,网壳一端水平位移达到 50mm 左右,结构基本以轴 ⑥为不动点向两侧伸长,整个雨棚的侧向刚度比较对称。为了定量说明温度作用下结构反应的大小,将温度上升产生的效应与恒 + 活作用下产生的效应进行对比。比较的对象是雨棚结构轴 ⑥, M 的半拱、V 形撑(表 1)。

雨棚结构部分构件的内力对比 表 1

工况	恒 + 活			升温 30		
	轴力	面内弯矩	面外弯矩	轴力	面内弯矩	面外弯矩
轴 M 半拱拱脚	- 1 327	1 942	100	247	54	51
轴 M V 形撑	- 2 071	6	73	- 33	10	5
轴 ⑥ 半拱拱脚	- 1 297	1 542	1 918	- 270	58	1 560
轴 ⑥ V 形撑	- 2 931	22	80	- 752	360	100

注:轴力、弯矩单位分别为 kN, kN·m。

可见结构在温度作用下较为显著的反应是:1) 轴 M V 形撑的轴力与面内弯矩,其中轴力效应约为恒 + 活作用下的 1/4,面内弯矩更是提高了一个数量级;2) 轴 M 半拱拱脚的面外弯矩,其数值几乎与恒 + 活作用下的相同;3) 轴 ⑥支承在温度作用下的效应不显著。

这种超长的结构在温度作用下的最不利位置就是两侧的支承结构。对武汉站结构来说,除了轴 ⑥, M 半拱产生了较为明显的面外弯矩外,特殊的 V 形撑结构也产生了可观的轴力与弯矩效应,这是值得关注的。

4.3.2 楼面结构

楼面结构共被分割为 8 个温度单元,如果不设置温度缝,边缘构件将承受巨大的弯矩,特别是边、角柱;轴 ③, ④的主拱、半拱在屋面网壳承受温度作用时已经产生了很大的内力,而此时再叠加上楼面对其的温度作用,对主骨架的受力极其不利;楼面混凝土的开裂问题也将十分严重。

对于大型公建的楼面结构来说,平面尺寸大是不可避免的,须合理地设置温度缝。合理的温度缝,不是数量越多越好,而是不但要尽量降低温度对结构的影响,而且最好实现与其他专业的统一。

4.4 V 形撑的受力特点

V 形撑不但是项目的一大特色,也是重要的结构构件。表 2 是一片雨棚部分 V 形撑在恒 + 活作用下的轴力,V 形撑的受力具有以下特点:

1) 布置在最下端 V 形撑(落地 V 形撑,图 2)和最顶端的 V 形撑受力较大,其他 V 形撑则受力很小。这是因为这两个 V 形撑下端直接连接在混凝土结构或半拱斜立柱上。从另一个角度讲,也替半拱、主拱分担了相当一部分荷载。2) 在竖向荷载作用下均表现为轴 ⑥, M (边跨)的 V 形撑受力很大,由于支承形式特殊,轴 ⑥, M 的 V 形撑两肢受力相差悬殊。3) V 形撑的受力以轴力为主,弯矩较小。

5 结论

武汉站结构体系的受力有以下特点:1) 拱与网壳形成“拱-壳”组合体系后,结构的刚度明显增强;2) 网壳结构受力有一些双向的成分,但仍以单向受力为主;3) 网壳沿横轨向出现了拱的效应;4) 主拱是一个受力巨大的压弯构件,巧妙地借助于楼面梁与楼面,减小了自身的内力;5) 温度作用下,结构的边缘构件受力较大;而将楼面结构合理地设置温度缝,降低了楼面板本身及其边缘支承构件的温度效应;6) V 形撑的受力大小与其所处的位置有很大关系。

武汉站的结构体系受力是合理的,原因在于:1) 网壳与拱组成了一个体系进行受力,具有杂交优势,扬长避短,组合后二者的受力状况也有了改变。2) 尽量利用了各种结构形式的面内强度与刚度,比如,对于屋面网壳,使其有了拱的效应;3) 作为格构式的结构,网壳中构件以受轴力为主,充分发挥了材料的性能;4) V 形撑简化了主拱与网壳的联系方式,而且由于落地 V 形撑的存在,分担了主拱、半拱相当一部分荷载;5) 楼面与屋面进行了间接的“结合”,降低了主骨架的受力。

这种新颖、特殊的结构形式,对于实现武汉站的造型是一个很好的选择,完美地体现了建筑意图。采用的结构体系对于其它大型公建,特别是大型高架车站具有很好的借鉴意义:顺轨向可充分利用桥墩(可连续利用,也可间断利用);横轨向也可跨越若干轨道线,给建筑布置以很大的自由。

参 考 文 献

[1] 尹德钰,刘善维,钱若军. 网壳结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
 [2] 王国周,瞿履谦. 钢结构——原理与设计[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
 [3] 李国强. 多高层建筑钢结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
 [4] 瞿履谦,李少甫. 钢结构[M]. 北京:地震出版社,1991.
 [5] 杜义欣,汤荣伟,赵鹏飞,等. 武汉火车站复杂屋盖及其支承结构的屈曲分析研究[J]. 建筑结构,2009,39(1).