

世博演艺中心屋盖钢结构设计与分析

汪大绥, 周建龙, 包联进, 姜文伟, 陈建兴, 黄永强

(现代设计集团华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

【摘要】 演艺中心屋盖钢结构采用大跨空间钢桁架结构体系,沿环向支承在看台斜框架结构顶部。结构体系选型及布置综合考虑了建筑造型、内部使用空间以及悬挂荷载较大等要求。分别采用了单独模型和整体模型对竖向荷载、风荷载、温度作用、地震作用以及下部结构变形等荷载工况作用下的结构受力和变形进行了对比分析。

【关键词】 空间桁架; 结构选型; 计算模型; 结构变形

Structural Design and Analysis of the Roof for Expo Performance Center

Wang Dasui, Zhou Jianlong, Bao Lianjin, Jiang Wenwei, Chen Jianxing, Huang Yongqiang

(East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Xian Dai Architectural Design Group, Shanghai 200002)

Abstract: Expo Performance Center's steel roof adopts large span- space truss system, which is supported on the top of the leaning frame of the stand in circumferential direction. The structural system is decided to meet the requirements of architectural outline, usage of the inside space and large suspension load. Roof individual model and structural integral model are both analyzed to make comparison of the structural load-bearing performance and deformation considering the vertical load, wind load, thermal action, seismic action and the impact of the deformation of the sub-structure.

Keywords: space truss; comparison of structure system; analysis model; deformation

1 前言

世博演艺中心位于世博轴东侧,总建筑面积约 10.3 万平方米。建筑形态似空中飞碟(见图 1),平面投影呈圆三角形,平面尺寸为 165m × 205m,中央赛场和观众席布置呈长圆形。设计容纳观众人数为 18000 人,通过灵活分隔等技术手段,可形成不同规模和形态的观演空间,能满足大中型综艺演出、体育赛事、集会庆典等多功能的使用需求。上部结构体系主要由碟形主体、碟形屋面以及外围商业建筑三部分组成。本文将碟形屋盖钢结构为重点进行介绍。

2 屋盖结构方案

2.1 屋盖概况

碟形屋盖覆盖表演区和休闲区两个区域。表演区屋盖平面为长圆形,由四段直线段(短边 8.4m,长边 33.6m)以及四个四分之一圆弧段(半径 51.05m)连接而成,短跨跨度 110.5m,长跨跨度 135.7m,屋面最高标高 41.0m,矢高 6.9m。休闲区屋盖在表演区屋盖四周,平面呈不规则三角形,最大跨度 44.6m,檐口高度 6m。屋盖等高线布置见图 2,顶点标高 41m,外边线标高 26m。

不规则屋面等高线分布导致屋盖结构高度不等。从下而上屋盖可分解为屋盖支承结构、屋盖结构、建筑屋面次结构等三个层次。其中支承结构高度 5m,屋盖桁架结构高度跨中 7m,支座处 3.0m,建筑屋面次结构高度从 0.9 ~ 4.5m 变化。其中屋盖支承结构作为屋盖



图 1 演艺中心建筑效果图

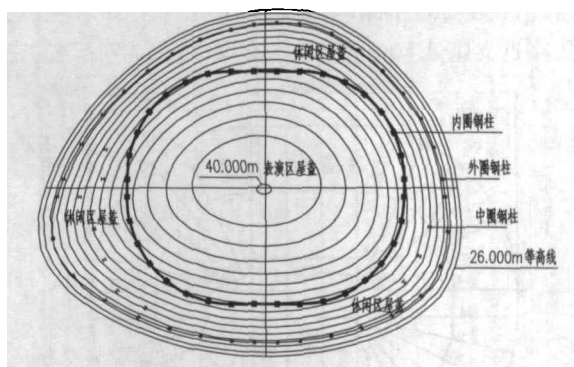


图 2 屋盖结构等高线图

结构与下部看台斜框架结构的过渡层,是屋盖结构的竖向承重以及水平荷载作用下的抗侧力体系。

2.2 屋盖结构选型

屋盖平面形状、矢高、承受荷载以及周边支承结构是屋盖结构选型的主要因素,建筑外观和功能也非常重要。由于矢高较低,悬挂集中荷载荷载较大,方案阶

段进行了空间网架结构、空间桁架结构、张弦梁以及悬挂结构几种结构体系的比较。空间桁架结构体系在建筑外观、内部空间、竖向刚度、悬挂荷载适应性、以及支承结构水平推力等方面具有相对优势。空间桁架结构也考虑了主次桁架布置形式,但考虑到主桁架支座反力(竖向力及水平推力)比较集中,对下部斜框架结构产生不利影响,屋面荷载传递途径较长,且整体性及冗余度不如空间桁架结构,因此屋盖钢结构采用空间桁架结构体系。

屋盖结构体系及布置在不同荷载工况下通过协调支承结构的抗侧刚度,以及屋盖结构支座的弹性约束条件,保证屋盖结构的竖向刚度以及扭转刚度,减小屋盖结构支座的水平推力对下部斜框架的影响。影响屋盖竖向刚度以及柱顶水平推力的主要因素为屋盖形状、荷载分布、环向拉力环以及压力环刚度、支座构造以及支承结构抗侧刚度等。在结构计算分析过程中考虑上述各参数的作用,确定了合理的支座边界条件以及屋盖结构平面布置及形状。

2.3 屋盖钢结构

采用了长圆形低拱高的空间钢桁架结构体系,见图3,短边跨度110.5m,长边跨度135.7m,支承于下部36根斜框架柱。中央直线部分(33.6×110.5)是圆筒状桁架,拱高10m,屋盖结构高度跨中7m,支座处3.0m;两端半径51.05m的1/4圆形部分是球形的一部分,布置24根径向桁架。为了支承径向桁架以及协调桁架变形并加强屋盖刚度,在屋盖中央重载区、1/4跨度以及支座处设置环向加强桁架(HTR1~HTR4)。桁架上弦承受轴向压力为主,为了防止压杆平面外失稳,减小上弦杆件平面外计算长度,提高屋盖抗扭刚度及整体性,在上弦平面桁架节间布置水平支撑。在屋盖下弦靠近支座处节间增设水平支撑,防止个别荷载工况

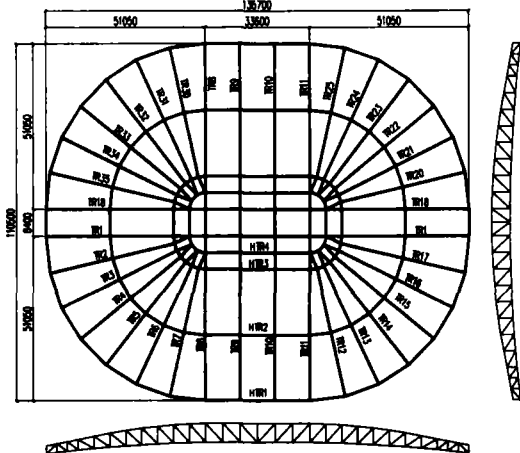


图3 屋面结构布置图(HTR1~HTR4为环向桁架, TR1~TR36为径向桁架)

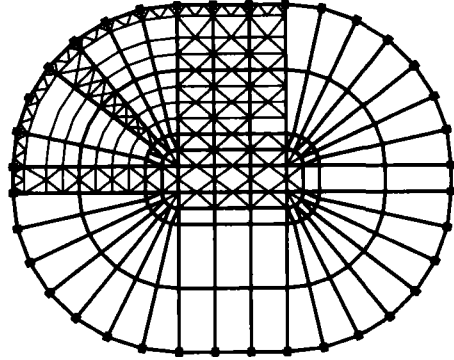


图4 屋面桁架上弦支撑布置图(仅表示1/4区域, 其余区域对称布置)

下弦受压导致平面外失稳。

3 屋盖结构设计

3.1 竖向荷载作用下屋盖设计

屋盖结构恒载和活载标准值见表1。作为综合类表演艺术中心,工艺要求较高,活动照明设备、风管、马道以及大型显示屏等局部吊挂荷载较大,重载区(舞台上区域)吊挂荷载(包括马道转换支架重量)为2.0kN/m²。屋面活荷载与雪荷载不同时发生,但考虑屋面活荷载或雪荷载不均匀分布。

在钢屋盖结构安装结束并施加部分附加恒载(如屋面系统),简称施工阶段1,屋盖桁架在支承柱顶采用聚四氟乙烯滑动支座;桁架与支承柱连接后施加剩余的附加恒载,简称施工阶段2。

表1 屋盖恒荷载和活荷载标准值

荷载工况	荷载情况	取值
恒载	屋面建筑做法	0.50kN/m ²
	檩条及节点	0.20kN/m ²
	建筑找平结构层	0.20kN/m ²
	均布吊重	0.10kN/m ²
	暖通风管(局部)	0.50kN/m ²
	重载区吊挂荷载	2.0kN/m ²
活载	屋面检修荷载	0.50kN/m ²
	雪荷载	0.25kN/m ²
	马道检修荷载(局部)	1.0kN/m ²

在施工阶段1,由支座处周边拉力环形桁架和屋面桁架形成自平衡状态,缓和柱顶水平推力对下部结构影响。采用滑动支座期间施加恒载越多,施加后续竖向荷载对柱顶水平推力越小,但桁架挠度以及构件内力增加;反之,采用滑动支座期间施加恒载越少,施加后续竖向荷载对柱顶水平推力越大,但有利于控制桁架挠度以及减小桁架构件内力。因此,在竖向荷载作用下,应在减小屋盖桁架对支座产生水平推力以及保证桁架刚度之间找到平衡点。

设计考虑今后承建商可以有不同施工方案的选择,定义了施工上限及施工下限概念,施工下限即在施工阶段1施加的荷载为屋盖自重+25%附加恒载,施工上限即在施工阶段1施加的荷载为屋盖自重+50%附加恒载。施工阶段1桁架的竖向变形通过起拱解决,起拱值取恒荷载作用下的桁架变形值,活荷载作用下桁架竖向变形控制在跨度的1/500。

3.2 地震作用下屋盖设计

水平地震及竖向地震作用参数同下部主体结构,阻尼比取0.02,竖向地震影响系数最大值取水平地震影响系数最大值的65%以及结构重力代表值的10%两者较大值。在水平(竖向)地震作用下,屋盖结构产生的水平力及由于质量分布不均产生的地震扭转力矩通过刚性屋盖传递给支承结构,在框架柱以及柱间支撑进行分配,再传递给下部斜框架结构。竖向地震作用按振型反应谱法、弹性时程分析以及结构重力代表值的10%两者较大值。

3.3 风荷载作用下屋盖设计

基本风压取100年一遇的 $w_0 = 0.60 \text{ kN/m}^2$ 。对本工程复杂体型屋盖,我国规范没有对风荷载的体型系数做明确的规定,设计参考欧洲规范^[3]中关于圆形扁平屋盖结构风荷载体型系数的规定以及风洞试验报告^[4]对体型系数的建议值。将整个屋盖结构分为A、B、C三个区域(如图5),根据屋盖的矢高、结构高度与宽度的比值,确定各分区的体型系数分别为-0.5, -0.44和-0.13,风荷载均为吸力。屋盖桁架结构属于刚性结构,对风荷载相对敏感,参考风洞试验报告^[4]等有关资料,风振系数取1.5,计算中A、B、C三个区的风荷载标准值分别取-0.60、-0.53和-0.16 kN/m^2 。

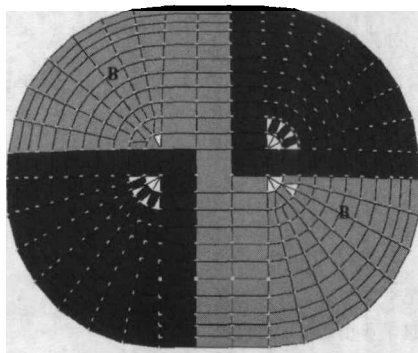


图5 屋盖风荷载分布

在水平风荷载作用下,屋盖结构产生的水平力及由于屋面体型不规则产生的风荷载扭转力矩通过刚性屋盖传递给支承结构,在框架柱以及柱间支撑进行分配,再传递给下部斜框架结构。

3.4 其它荷载作用下屋盖设计

屋面采用隔热保温材料,因此夏季屋顶面阳光直

射下钢屋盖升温不明显,考虑上海地区年平均最高及最低温差,以及将来屋盖结构支座固定时温度暂定在10℃左右,因此验算温度作用时取最大温差为30℃。框架柱与钢屋盖的连接时间(施工阶段2结束)安排在中期(春秋季节),使温差尽可能减小。

由于屋盖结构支承于下部主体斜框架柱上,下部结构在竖向荷载作用或温度作用下,斜框架柱柱顶将产生水平及竖向变形,从而对上部屋盖结构产生影响。下部斜框架柱采用方钢管混凝土柱,桩基持力层为第7层,且采用桩底注浆,因此竖向荷载作用下柱压缩以及基础不均匀沉降将比较小;此外,下部结构对风荷载作用不敏感,且对屋盖结构而言几乎为刚体位移,因此下部结构的差异沉降以及风荷载对上部屋盖结构影响可以忽略。

4 屋盖结构计算分析

4.1 单独结构计算

为了简化计算分析工作,计算模型为屋盖钢结构与观景平台以上的支承结构单独计算,重点考察支承结构抗侧刚度、边界约束条件以及环形桁架等对结构受力影响,计算模型见图6。

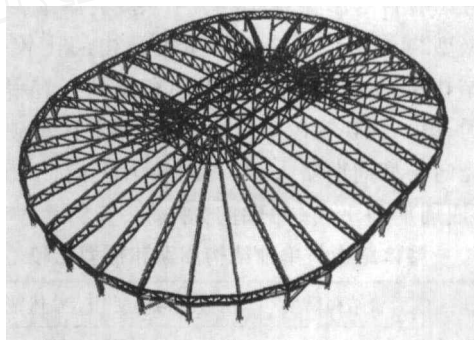


图6 屋盖计算模型

竖向荷载作用下,屋盖桁架主要为轴向力为主,桁架挠度见图7。结构自重作用下竖向位移为151mm,约为跨度的1/732;附加恒载作用下竖向位移为118mm,活载作用下竖向位移为37mm,两者的总竖向位移为155mm,约为跨度的1/713。

竖向荷载作用下,结构水平位移的方向为由屋盖中央向外推,最大水平位移出现在柱顶,附加恒载和活载作用下,最大水平位移分别为15和5mm。

弹性反应谱分析得到地震作用下柱底水平剪力总和X、Y向分别为3281kN和3408kN,剪重比为4.73%和4.91%。竖向地震作用下柱底竖向力总和为1719kN,约为重力荷载的2.5%。时程分析结果得到竖向地震作用平均值为重力荷载的6.8%,实际计算中竖向地震作用取重力荷载的10%。

4.2 整体模型计算分析

在相同计算条件下(结构阻尼比0.035),建立了

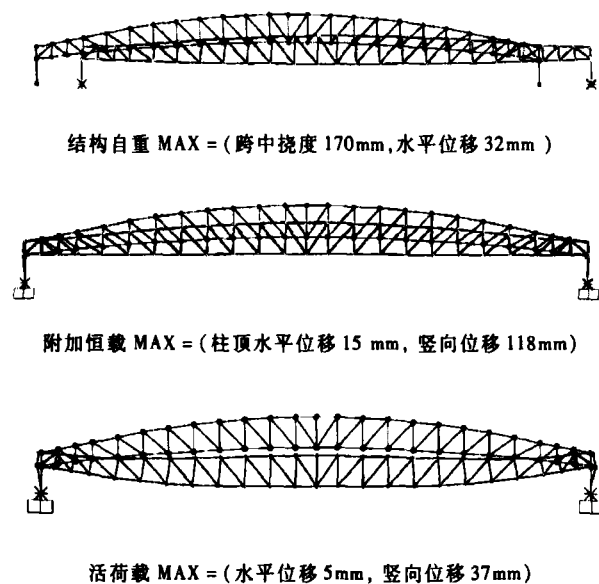


图7 结构位移

屋盖钢结构与下部看台及斜框架结构整体计算模型, 以此计入下部结构对屋盖钢结构设计(如杆件内力及变形、支座反力及位移)的影响, 也可准确计算屋盖钢结构对下部结构内力的影响。

考虑看台与屋盖结构相互作用, 整体结构模型的基本振型与单独看台结构和屋盖结构的比较见表2。整体结构第一周期为扭转, 周期和振型与看台单独结构相同; 第二周期为屋盖竖向振动, 周期比单独屋盖结构的竖向振型周期略大; 第三周期为X向(长轴向)平动; 第四周期为Y向(短轴向)平动。

整体结构与单独结构周期和振型比较 表2

振型	看台结构模型		屋盖结构模型		整体结构模型	
	周期	振型	周期	振型	周期	振型
1	1.149	RZ	0.847	UZ	1.134	RZ
2	0.590	UX	0.622	UX	0.867	UZ
3	0.578	UY	0.513	UY	0.647	UX
4	/	/	0.476	RZ	0.603	UY

考虑看台与屋盖相互作用, 由于鞭梢效应, 屋盖水平地震力明显增大, 这导致屋盖的支承结构地震内力也有较大增加。整体结构中屋盖的地震力与单独屋盖模型的结果比较见表3。考虑相互作用后, X向和Y向的地震作用分别为单独屋盖结构计算结果的2.08倍和2.73倍, 竖向地震差别不大。

考虑下部结构刚度与单独模型(不考虑下部结构刚度)时钢屋盖构件内力相差不大, 主要是因为屋盖支承结构刚度远小于下部结构刚度。屋盖内力变化主要为支座位移引起。下部结构活荷载仅分布在看台区域时, 屋盖支座变形很小, 引起的桁架内力很小仅在悬挑

桁架区域布置活荷载对屋盖支座位移影响比较显著, 另下部结构悬挑桁架相邻跨活荷载不利分布对屋盖外环桁架内力有影响(如表4), 因此在屋盖结构设计时应该考虑下部结构活荷载不利分布。

屋盖结构水平地震作用(kN) 表3

地震作用	屋盖结构模型	整体结构模型	比值
X	3 281(4.73%)	6 864(9.89%)	2.08
Y	3 408(4.91%)	9 338(13.46%)	2.73
Z	1 719(2.5%)	1 999(2.91%)	1.16

活荷载分布对桁架内力的影响(kN) 表4

杆件	满跨分布	仅看台区域分布	仅悬挑区域分布
上弦	-14	5	-16
下弦	152	9	146

在各荷载工况组合下, 构件应力比较核结果汇总见图8, 所有构件都能满足承载力及稳定要求。

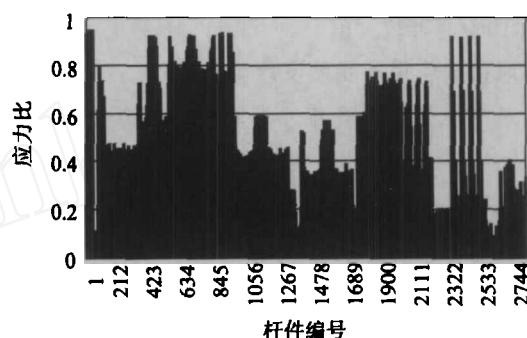


图8 杆件应力比较核结果汇总

5 结语

1) 在竖向荷载作用下, 应在减小屋盖桁架对支座产生水平推力以及保证桁架刚度之间找到平衡点。

2) 考虑下部结构刚度的整体模型与单独模型钢屋盖构件内力差异不大, 主要是因为屋盖支承结构刚度远小于下部结构刚度。但屋盖支承结构承担地震内力有较大增加, 同时应考虑下部结构活荷载不利分布。

3) 在各荷载工况组合下, 钢屋盖构件都能满足承载力及稳定要求。

参考文献

- [1] 弗吉尼亚费尔韦瑟. 大型建筑的结构表现技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 日本钢结构协会. 钢结构技术总览. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] Eurocode 1-Actions on Structures (EN1991). European Committee for Standardization. 2001.
- [4] 湖南大学风工程试验研究中心, 上海世博演艺中心风荷载试验研究报告[R]. 2008.