

国家体育场主体钢结构方案优化

石永久 王 岚 侯建群

(清华大学建筑设计研究院 北京 100084)

[提要] 在不改变招标文件要求的前提下,对 2008 年北京奥运会主体育场的主体钢结构方案进行了优化设计,通过对结构在不同荷载条件下的优化分析和设计,综合考虑了材料供应和施工的技术要求,提出了可供参考的设计建议。

[关键词] 国家体育场 结构优化 钢结构

The national stadium is the main stadium for the 2008 Olympic Games. The scheme of the main steel structure is introduced. The optimization analysis and technical design have been made under different load combinations and the requirements of material as well as construction also have been considered. The suggestions are proposed, which could be referred in practical design.

Keywords: the national stadium; optimization; technical design

一、工程简介

国家体育场是 2008 年北京奥运会主体育场。作者参与了北京奥林匹克公园(B 区)国家体育场项目法人投标,遵照招标文件的要求对北京奥运会主体育场的主体钢结构投标方案进行了优化设计。

国家体育场看台呈碗形,最多可容纳 100 000 个座椅。支撑体育场看台的是一系列放射状布置的混凝土框架。覆盖体育场碗状看台的是一个巨大的“鸟巢”形空间钢结构。现重点介绍主体“鸟巢”钢结构的方案优化设计。国家体育场主体钢结构分为主结构、次结构和移动屋盖三部分,如图 2~4 所示。主结构由一系列空间桁架围绕着内部的碗状看台旋转而成,屋顶形成马鞍形曲面,长轴约 340m,短轴约 292m;次结构为镶嵌在主结构上弦多边形网格内的一系列交叉杆件;移动屋盖跨越整个结构开口空间,由对称的两部分组成。移动屋盖曲线部分为悬臂区域,直线部分支撑在主结构的上弦,跨度约 80m,能够沿着主结构上的固定轨道开启和关闭。主体结构的地下部分采用型钢混凝土柱。

二、主体钢结构优化设计

采用通用有限元程序 ANSYS (5.7 版)对主体结构的受力和变形进行计算和设计。所有构件均采用线弹性梁元 BEAM4,单元间为刚性连接,基础连接也取刚接,计算分别考虑移动屋盖在开启位置和闭合位置两种状态。结构的荷载取值和各种工况组合见表 1、2。遵照招标文件的要求,主体钢结构的屋顶曲面形状、构件布置、箱形截面的外形和边长尺度等与建筑外观相联系的条件要保持不变,如主结构构件箱形尺寸 1.5m×1.5m;屋顶上、下弦间的距离遵照原概念设计尺寸等。



图 1 国家体育场透视图

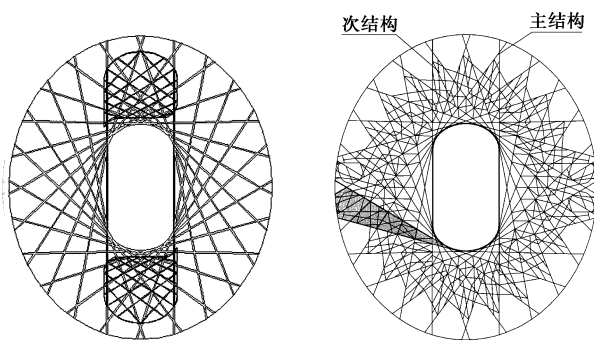


图 2 主体钢结构屋顶平面示意图

基于这一背景,优化设计的重点是在不改变原建筑概念设计方案和使用功能要求的前提下,合理选择截面形式和截面尺寸,保证主体钢结构符合我国现行规范的要求,可使设计经济合理。在结构分析过程中,首先按照建筑概念设计方案提供的截面尺寸对结构进行了整体分析。在此基础上,对结构就不同构件截面形式、截面尺寸以及钢材等进行了多次的优化调整,下面将各阶段的优化分析作一简要概述。

1. 建筑概念设计提供的截面尺寸

建筑方案要求所有构件均为箱形截面,主结构构

荷载取值 表 1

序号	荷载类型	荷载标准值		备注
		钢材密度	7 850	
1	自重(kg/m ³)	钢材密度	7 850	程序自动计算
2	恒载(kN/m ²)	主结构上弦	0.2	
		主结构下弦	0.2	
		移动屋盖上弦	0.2	
		轨道结构自重	1.5	
3	活载(kN/m ²)	主结构上弦	0.5	
		主结构下弦	0.5	
		移动屋盖上弦	0.5	
4	基本风压(kN/m ²)	0.5	百年一遇	
5	基本雪压(kN/m ²)	0.45	百年一遇	
6	设计地震分组	第一组		
7	抗震设防类别	乙类		
8	抗震设防烈度	8度		

注: 目前尚无风洞试验数据, 风荷载体型系数按荷载规范近似取值。

荷载组合工况 表 2

组合序号	恒荷载	活荷载	风荷载	水平地震	竖向地震
1	1.35	1.4	—	—	—
2	1.35(1.0)	0.7×1.4	0.6×1.4	—	—
3	1.20(1.0)	1.2×0.5	0.2×1.4	1.3	—
4	1.20(1.0)	1.2×0.5	—	—	1.3
5	1.20(1.0)	1.2×0.5	0.2×1.4	—	1.3
6	1.20(1.0)	1.2×0.5	—	1.3	0.5
7	1.20(1.0)	1.2×0.5	0.2×1.4	1.3	0.5

注: 表中公式均为矢量和。

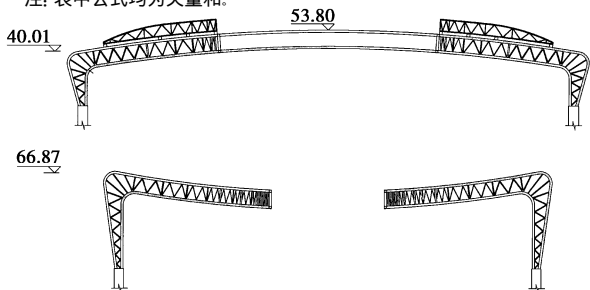


图 3 主体钢结构长轴、短轴剖面示意图

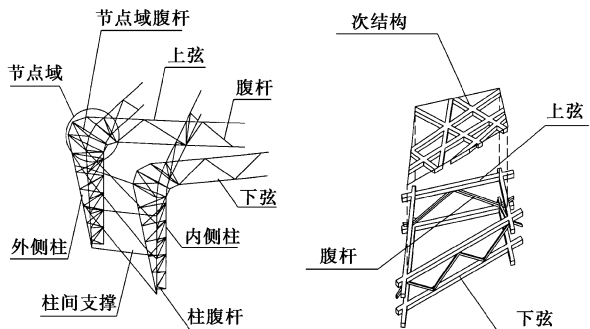


图 4 结构空间关系示意图

件为1 500mm×1 500mm×100mm, 次结构构件为1 500mm×1 500mm×10mm。构件尺寸按照建筑概念设计提供的截面数据, 采用 Q345 钢材, 结构计算的主要结果详见表 3。

建筑概念设计提供的截面尺寸与计算结果 表 3

位置		截面尺寸(mm)	结构质量(t)	屋顶重	87 575
屋顶	上下弦杆	1 500×1 500×100			
	腹杆	750×750×50	29 952	柱间支撑重	29 952
柱	弦杆	1 500×1 500×100			
	腹杆	750×750×50	1 518	移动屋盖重	1 518
柱间支撑					
次结构			1 500×1 500×10	主结构最大竖向位移(mm)	-571
				主结构最大拉应力(N/mm ²)	466
移动屋盖	上下弦杆(悬臂区域)	400×400×16	-268	主结构最大压应力(N/mm ²)	-418
	腹杆(悬臂区域)	200×200×8		移动屋盖最大竖向位移(mm)	-268
		300×300×24		移动屋盖最大拉应力(N/mm ²)	271
				移动屋盖最大压应力(N/mm ²)	-281

采用建筑概念设计提供的截面进行分析, 分析结果显示结构的用钢量相当大, 局部应力也很大, 次结构和柱间支撑应力较小。移动屋盖的最大位移在移动屋盖悬臂区域远端中点, 主要由移动屋盖的自重产生。通过施工阶段的起拱解决以后, 能够满足移动屋盖沿轨道运动的要求。

2. 抗震构造要求

在所有构件仍保持箱形截面和轮廓尺寸不变的前提下, 板件厚度减小, 并按国家现行抗震规范的宽厚比要求设置必要的加劲肋, 构件截面形式见图 5。次结构构件采用 Q235 钢材, 其它构件采用 Q345 钢材。调整后的构件尺寸和结构计算结果详见表 4。

抗震构造截面尺寸与计算结果 表 4

位置		截面尺寸(mm)	截面类型	结构质量(t)	屋顶重	45 330
屋顶	上下弦杆	1 500×1 500×50	A			
	腹杆	750×750×25	A	10 240	柱间支撑重	15 511
柱	弦杆	1 500×1 500×50	A			
	腹杆	750×750×25	A	1 518	移动屋盖重	1 518
柱间支撑			1 500×1 500×50			
次结构			1 500×1 500×10	C	主结构最大拉应力(N/mm ²)	311
					主结构最大压应力(N/mm ²)	-474

按照抗震构造要求, 主要调整了板件厚度, 通过计算分析, 结构总的用钢量大幅下降, 但结构的最大应力仍很大。可见仅仅按照抗震构造要求来调整断面是不合适的。按照抗震构造要求计算分析, 结构位移也略有增加。由于结构以竖向荷载为主, 结构竖向位移主要由结构自重产生, 因此可通过施工阶段起拱解决。

3. 次结构优化

从以上的分析发现次结构的受力较小, 而次结构的分布又很广, 所以先对次结构进行优化。首先取出一块具有代表性的次结构单独进行分析。经过反复调整计算, 确定了次结构的截面类型、尺寸和钢材。次结构最终选用格构式, Q235 钢材, 截面形式详见图 6。次结构四角为 120mm×4mm 的方钢管(FG1), 中间通过斜向和竖向的方钢管(60mm×2mm)相连, 通过外包

钢板(厚 2mm)来实现箱形截面的建筑效果。次结构的独立分析完成后,将这一优化结果带入主体钢结构的整体计算中,进行校核分析。在空间整体计算中,次结构为格格式,主结构仍保持抗震构造截面条件,采用 Q345 钢材。结构计算结果详见表 5。

次结构优化结果 表 5

格格式次结构	次结构重 (t)	结构总重 (t)	最大竖向位移 (mm)	最大拉应力 (N/mm ²)	最大压应力 (N/mm ²)
120×4 (FG1) 60×2 (FG2)	4 610	79 988	-51	167	-167

注:次结构重中含外包钢板的重量。

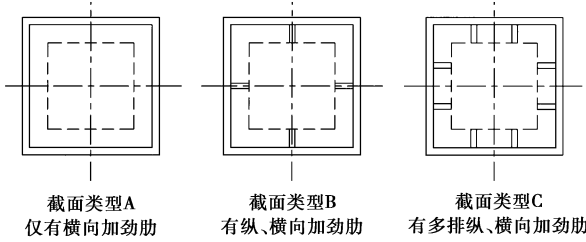


图 5 截面类型示意

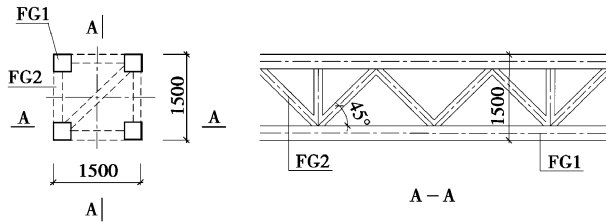


图 6 次结构格格式截面示意

次结构优化分析表明,次结构的应力较小,完全可以采用 Q235 钢材。格格式次结构在空间整体分析时也符合各项设计要求。在空间整体计算校核中,次结构改成格格式对结构的整体刚度影响较小。调整以后次结构的用钢量减少了一半。这是由于建筑造型上要求屋顶上弦布置较密的次结构,形成了较大的整体刚度,因而次结构的调整空间比较大。次结构调整为格格式,可以在地面分段组装后再在空中连接,对于施工来说也是非常有利的。

4. 主结构优化

在次结构优化的基础上,对主结构进行了优化。根据结构的应力分布规律,将主结构构件截面尺寸进行了相应调整,屋顶杆件划分为外圈、中圈、内圈三个区域,在外轮廓尺寸保持不变和满足设计规范要求的前提下,采用不同的壁厚,见图 7。柱间支撑改为长方形截面,见图 8。次结构构件尺寸不变。次结构构件采用 Q235 钢材,其它构件采用 Q345 钢材。调整后的结构构件尺寸详见表 6。结构计算结果详见表 7。

主结构优化截面尺寸表 表 6

位置		截面尺寸(mm)	截面类型
屋	上弦杆	有移动屋盖轨道处	1 500×1 500×60
		外圈	1 500×1 500×36
		中圈、内圈	1 500×1 500×25
顶	下弦杆	有移动屋盖轨道处、外圈	1 500×1 500×36
		内圈、中圈	1 500×1 500×25
柱	腹杆	有移动屋盖轨道处、外圈	750×750×30
		内圈、中圈	750×750×12
		弦杆	1 500×1 500×40
	内侧上部 20m 弦杆	1 500×1 500×80	
	内侧其它弦杆	1 500×1 500×60	
	0~20m 腹杆	750×750×40	
	其它腹杆	750×750×30	
柱间支撑		1 500×800×25	

注:截面类型 A, B 详见图 5。

主结构优化计算结果 表 7

屋顶重 (t)	27 618	次结构重 (t)	4 610	最大竖向位移 (mm)	-677
立体桁架柱重 (t)	18 395	移动屋盖重 (t)	1 518	最大拉应力 (N/mm ²)	270
柱间支撑重 (t)	6 097	结构总重 (t)	58 238	最大压应力 (N/mm ²)	-271

通过按照受力大小区域调整主结构截面尺寸。在满足设计要求条件下,主结构的用钢量显著下降。主结构和次结构的各部分杆件均调整至较理想状态,结构的应力和位移也在合理范围之内,是比较好的一个结果。

5. 钢材的影响

由于工程的主体结构是以结构自重荷载为主,因此通过各种方式减小结构的重量是非常有意义的。为了进一步优化,根据结构受力特征采用了多种钢材。屋顶以及柱的弦杆和腹杆、柱间支撑的受力较大,钢材采用 Q390;移动屋盖受荷载较小,采用 Q345 钢材;次结构构件采用 Q235 钢材。钢材改变以后,板件厚度作相应调整。移动屋盖和次结构构件尺寸不变。调整后的结构构件尺寸详见表 8,结构计算结果详见表 9。

按照《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001),国家体育场抗震设防类别属于乙类,地震作用应符合北京地区抗震设防烈度 8 度的要求,而抗震措施则需满足抗震设防烈度 9 度的要求。钢材强度提高以后,板件的宽厚比限值更加严格,大部分构件的板件厚度是

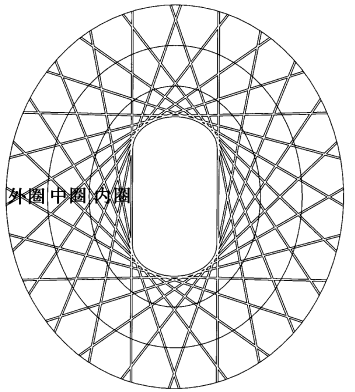


图 7 屋顶弦杆区域划分示意图

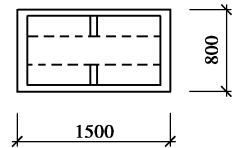


图 8 柱间支撑截面示意

屋顶重(t)	25 698	次结构重(t)	4 610	主结构最大竖向位移(mm)	-778
立体桁架柱重(t)	11 960	移动屋盖重(t)	1 456	主结构最大拉应力(N/mm ²)	306
柱间支撑重(t)	6 802	结构总重(t)	50 526	主结构最大压应力(N/mm ²)	-313

三、结论和建议

通过对结构在不同的荷载条件下(恒载、活载、风载、地震作用等)的分析和设计,综合考虑了材料供应和施工的技术要求,对国家体育场主体钢结构方案进行了充分的优化和计算。

在不改变原建筑概念设计方案和使用功能要求的前提下,通过合理选择截面形式和截面尺寸,可保证我国现行规范对结构安全性、可靠性的要求。

优化设计结果综合考虑了国产钢材的质量、品种以及国内的加工和安装条件。若不考虑相对成熟、可靠的施工技术和施工方法的经济性、可行性,仅从用钢量角度来讲,还有进一步的优化空间,但会相应增加施工的难度和工期。

由于本结构的特点是以结构自重荷载为主,如果建筑外立面允许将箱形截面的边长减小,则可以考虑高强钢材的使用,结构的用钢量会进一步降低。若适当增大屋顶上、下弦之间的距离,对结构的受力将更为有利。屋顶内环是一系列空间桁架的交汇处,并布置有移动屋盖轨道,宜在内环直线段增加一些次结构,以加强内环的侧向稳定。

参 考 文 献

1. 国家体育场招标文件, 2003.
2. 建筑结构荷载设计规范(GB50009—2001).
3. 建筑抗震设计规范(GB50011—2001).
4. 钢结构设计规范(GBJ17—88).

由抗震构造要求控制。例如,《建筑抗震设计规范》8.3.2条和9.2.12条规定,采用Q390钢的箱形截面壁板宽厚比限值为 $36\sqrt{235/390}=27.9$,如屋顶弦杆采用截面类型B,截面厚度应 $\geq 750/27.9=26.9$,取28mm。因此采用Q390钢材后,结构总用钢量不完全是由荷载大小决定而是由抗震构造要求决定的。若不考虑加工等方面的因素,弦杆可以采用截面类型C,要求截面厚度 $\geq 500/27.9=17.9$,取18mm。屋顶弦杆箱形截面的部分板件厚度可由28mm降低至18mm,结构总重量还可以降低约5 000t。但箱形截面施工的难度以及施工成本都会增加很多。由此可见,一方面,使用高强钢材,用钢量的下降是有限的,而高强钢材的价格又较高;另一方面,在构件截面中加多排加劲肋,结构总用钢量降低了,但每吨钢材的加工成本提高了。如何才能达到一个最优的性能价格比的组合,还需要进一步考虑。

调整钢材后的构件截面尺寸表 表 8

位 置		截面尺寸(mm)	截面类型	钢材	
屋	上弦杆	有移动屋盖轨道处	1 500×1 500×36	B	Q390
		外圈、中圈、内圈	1 500×1 500×28	B	Q390
	下弦杆	有移动屋盖轨道处	1 500×1 500×28	B	Q390
		外圈、内圈、中圈	1 500×1 500×28	B	Q390
顶	腹杆	有移动屋盖轨道处	750×750×20	B	Q390
		外圈、内圈、中圈	750×750×14	B	Q390
柱	弦杆	外侧弦杆	1 500×1 500×28	B	Q390
		内侧上部20m弦杆	1 500×1 500×60	A	Q390
	内侧其它弦杆	1 500×1 500×50	A	Q390	
	腹杆	0~20m腹杆	750×750×28	A	Q390
		其它腹杆	750×750×20	B	Q390
	柱间支撑	1 500×800×28		Q390	
移动屋盖 格构式次结构			Q345 Q235		

注:柱间支撑详见图8。

(上接第7页)

由于建筑功能布置的要求,在各厅的顶部也存在噪声源,观众厅顶部为一钢结构屋顶餐厅,音乐厅和多功能厅顶部为一些设备机房,侧舞台顶部为排练厅等。为了解决上述噪声问题,设计上采用了双层楼板方法,如在观众厅顶部采用了双层混凝土楼板、中间设置橡胶隔音垫的方案,橡胶垫采用的是进口专用隔音垫,既能起到隔音的作用,同时作为上部钢结构餐厅柱的承重部分,也能保证其承载能力,使整个观众厅通过双墙和双层楼板与外界在声学区域上完全隔断,确保演出效果。在设备基础上,根据不同的共振噪声频谱,采取相应的减振降噪措施,从而保证减振降噪隔音的效果。

六、结语

杭州大剧院工程作为杭州市新的标志性建筑,建筑设计新颖独特,给结构设计带来很多新的课题,如抗

风设计、双曲面钢结构屋盖设计、大面积圆锥面玻璃幕墙设计、钢管混凝土结构、双墙隔音结构、超长结构的温度应力分析等。浙江大学土木系结构工程研究室、空间结构研究室、钢结构研究室,东南网架集团设计院,晶艺玻璃幕墙公司等参加了上述课题合作,使问题得以顺利的解决。目前剧院主体结构已经完工,正在进行内部装修,将于2004年初投入使用。这里仅对杭州大剧院结构设计整体作一介绍,设计组还将分别对上述专题进行详细的总结介绍。

参加本工程结构设计工作的还有:单益军、周锋、骆敬怡、毕至诚、王林玉等。

参 考 文 献

1. 杭州大剧院风洞试验报告,浙江大学土木系,2001.
2. 杭州大剧院预应力张拉检测及结构应力应变检测报告,浙江大学土木系,2002.
3. 刘振亚.现代剧场设计.中国建筑工业出版社,2000.