

文章编号:1673-2049(2006)02-0020-10

# 国家体育场钢结构设计中的优化技术

范重,刘先明,范学伟,胡纯炀,胡天兵,王喆

(中国建筑设计研究院,北京 100044)

**摘要:**针对国家体育场大跨度钢结构中存在用钢量较大的问题,通过对主结构和次结构的布置进行调整,使结构的受力性能与节点构造得到了改善;在板件应力状态分析的基础上,提出了适用于焊接薄壁箱形构件的设计方法;根据主结构与次结构受力的特点,提出合理确定杆件计算长度系数的方法;提出钢结构分段吊装方案,合理确定临时支撑塔架的位置,并考虑安装顺序对结构抗震性能的影响;通过合理选用新型中国产高强钢材,有效地控制了结构自重;在 ANSYS 软件平台上开发了设计与优化功能,以满足国家体育场复杂大跨度钢结构设计的需求;通过多种布索方案的综合比较,对采用预应力技术的可行性进行了深入的研究。通过对多种优化方法的研究与应用,有效地减小了国家体育场大跨度钢结构的用钢量,并取得了显著的技术进步及社会经济效益。

**关键词:**国家体育场;薄壁箱形构件;计算长度;安装顺序;高强钢材;软件开发;结构优化;预应力  
**中图分类号:**TU391 **文献标志码:**A

## Optimization Techniques of Steel Structure Design for National Stadium

FAN Zhong, LIU Xian-ming, FAN Xue-wei, HU Chun-yang, HU Tian-bing, WANG Zhe

(China Architecture Design and Research Group, Beijing 100044, China)

**Abstract:** According to the steel tonnage of National Stadium large-span roof steel structure being relatively large in the original preliminary design, the load bearing capacity and connection characteristics of the structure were improved greatly by means of re-adjustment of the primary structure and secondary structure. The suitable design method for thin-wall weld box section was presented based on the stress analysis of the panels of box sections. According to the structural characteristics of the main truss structure and the secondary structure, the calculation length factors of the compressed members were defined reasonably. Panel by panel erection scheme for the roof structure was presented and the locations of temporary supporting towers were arranged reasonably, the effect of construction procedure on the seismic resisting capacity of the structure was also included in the soon. The proper choice of the domestic high-strength steel reduced the total weight of the structure effectively. In order to satisfy the requirements of the complicated large-span steel structure design of National Stadium, the design and optimization functions were developed based on ANSYS software platform. Feasibility of the prestressed techniques was studied through the comprehensive comparison between several cable arranging schemes. All those effective optimization measures reduced the steel tonnage of National Stadium large-span steel structure and the significant technology; social economic benefits were achieved.

收稿日期:2006-03-01

作者简介:范重(1959-),男,北京市人,教授级高级工程师,工学博士,E-mail:fanz@cadg.cn。

**Key words:** National Stadium; thin-wall box member; calculation length; erection procedure; high-strength steel; software development; structure optimization; prestress

## 0 引言

国家体育场位于北京成府路南侧,奥林匹克公园中心区内,是2008年北京承办第29届奥运会的主体育场,承担奥运会开、闭幕式与田径比赛。国家体育场建筑屋面呈鞍形,长轴为332.3 m,短轴为297.3 m,最高点高度为68.5 m,最低点高度为40.1 m,总建筑面积约为258 000 m<sup>2</sup>。建筑的设计使用年限为100 a,项目总投资为31.3亿元,其中建筑安装成本为22.67亿元,其“鸟巢”结构将成为北京市的标志性建筑。瑞士赫尔佐格德梅隆设计公司、中国建筑设计研究院与奥雅纳工程顾问公司组成的瑞-中设计联合体承担国家体育场设计工作。

国家体育场初步设计于2004年3月15日完成。在原方案与初步设计中,固定座席可容纳8万人,活动座席可容纳2万人,大跨度屋盖可开启部分位于体育场田径跑道外沿的上方,固定屋盖中间开口长度为139 m,宽度为73 m,可开启面积约为9 575 m<sup>2</sup>。

根据有关部门与专家论证会的审查意见,瑞-中设计联合体在原初步设计的基础上进行了以下调整:

(1)在保持“鸟巢”艺术品质的基础上,严格控制工程建筑安装成本,确保项目建设总投资控制目标的实现。

(2)取消可开启屋盖,扩大固定屋盖的开孔。

(3)取消东、西看台上端9 000个临时座席。

国家体育场的修改初步设计工作已于2004年11月22日通过了北京市“2008”工程建设指挥部办公室主持召开的初步设计审查会的审查。原初步设计中钢结构部分以奥雅纳工程顾问公司的设计为主,中国建筑设计研究院作为协助方。在修改初步设计中,中国建筑设计研究院负责结构建模、主要计算分析、初步设计报告编制及全部初步设计图纸。为了有效地控制工程造价,在修改初步设计与其后的施工图设计中,采取了多种结构优化措施。本文中,笔者对国家体育场钢结构设计中采用的优化技术进行了简要介绍。

## 1 结构布置

国家体育场大跨度屋盖支撑在24根桁架柱之上,柱距为37.958 m。取消可开启屋盖后,固定屋

盖中间开洞长度增至185.3 m,宽度增至127.5 m。由于国家体育场大跨度钢结构大量采用由钢板焊接而成的箱形构件,使交叉布置的主结构与屋面及立面的次结构一起形成了“鸟巢”的特殊建筑造型。主场看台部分采用钢筋混凝土框架-剪力墙结构体系,与大跨度钢结构完全脱开<sup>[1]</sup>。

### 1.1 主桁架

主桁架围绕屋盖洞口环梁放射形布置,有22根主桁架直通或接近直通,并在中部形成由分段直线构成的内环桁架。为了避免出现过于复杂的节点,4根主桁架在内环附近截断,如图1所示。

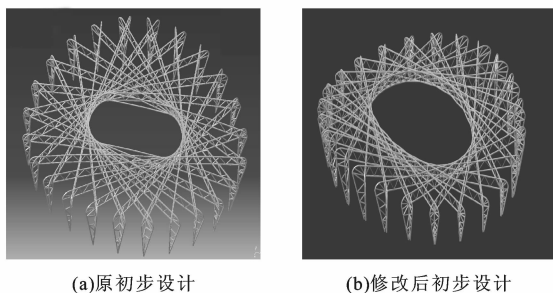


图1 国家体育场主结构布置

Fig. 1 Main Structure Layout of National Stadium

为了减小构件制作难度,降低加工成本,尽量减小现场施工的复杂性,对屋盖结构的几何构形进行了适当的简化。主桁架弦杆在相邻腹杆之间保持直线,代替空间曲线构件,避免出现过大的 $P-\Delta$ 效应。由于主桁架大部分采用了规则的箱形截面,从而大大降低了构件加工的成本。为了减小主桁架受压下弦的面外长度,在主桁架第一节中间1/3的范围内布置水平支撑。

主桁架腹杆夹角一般控制在60°左右,网格大小尽量均匀,上、下弦节点对齐,使其具有较好的对称性。在设置施工临时支撑塔架的主桁架交叉点位置时,将腹杆布置为双K形,以减小安装期间的弯曲应力。当主桁架上弦节点与次结构距离很近时,将腹杆的位置调整至次结构的位置。

### 1.2 桁架柱

菱形内柱保证至少1个节点有3根杆件相交,在满足建筑立面效果的基础上,尽量形成完整的封闭式桁架柱,腹杆布置应保证立面楼梯通行最小净空高度不小于2.2 m。腹杆采用宽度为1 200 mm的矩形截面,与内柱同宽,以增加传力的直接性。腹

杆连接于外柱与立面次结构的交点。内、外柱节间长度尽量等分、均匀,避免在腹杆之间形成很小的夹角。腹杆轴线与内、外柱轴线在同一平面内,消除偏心连接的影响。

### 1.3 屋面与立面次结构

屋面与立面次结构的主要作用是为主结构提供面外的侧向支撑及为屋面膜结构、排水沟、下弦声学吊顶、屋面排水系统等提供支承条件,以减小主结构构件的计算长度,并形成结构抗侧力体系。

在修改初步设计中,屋面次结构布置主要考虑控制屋面膜结构板块面积的大小,次结构的数量明显少于原初步设计。通过调整立面次结构的疏密程度,达到有效减小外柱的计算长度的目的。在标高 6.800 m 以下机房与商业房的位置,需要截断某些立面次结构构件。在设计中严格控制截断次结构的数量,同时使保留的立面次结构布置均匀、对称。

## 2 焊接薄壁箱形构件

### 2.1 焊接薄壁箱形构件应用

国家体育场大跨度钢结构主要采用由钢板焊接而成的箱形构件。为了满足建筑造型的要求,构件的外形尺寸受到较大限制。由于钢结构自重占在结构内力中所占比重很大,有效地减少了用钢量,不但对节约工程投资、控制造价有非常直接的作用,同时对于减小地震与温度作用、增强结构的安全性也具有十分重大的意义。

为了减小用钢量,在设计焊接箱形截面构件时尽量采用较小的壁厚。由于大截面薄壁箱形构件截面的宽厚比较大,在受压时很容易发生局部失稳,需要采用板件有效宽度的概念及利用板件的屈曲后强度。目前在各国钢结构设计规范中,均只考虑了箱形构件在轴心受压、受弯及偏心受压时的有效宽度计算方法,没有考虑拉弯构件的受压翼缘可能出现的屈曲问题,对于薄壁箱形构件存在很大的安全隐患。目前各国的钢结构设计规范中仅给出轴心受拉、轴心受压、弯-剪、拉弯、压弯等类型结构的设计方法,无法涵盖构件在复杂空间结构中的实际受力状态;另外,在确定箱形构件的有效宽度时,中国现行《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中只是简单地根据构件的拉、压状态进行判别,没有考虑板件局部稳定与构件整体稳定承载力之间的关系,有效截面宽度取值偏于保守,因此,如何合理确定焊接薄壁箱形构件受压板件的宽厚比与其他相应的实际措施,是保证结构的安全性、提高材料利用率、有效减

小用钢量的关键问题之一。

试验研究表明,薄壁箱形截面构件的板件具有较好的屈曲后强度,可以采用有效截面的方式计算其承载力。箱形截面构件的有效宽厚比主要与板件的宽厚比、相邻板件的约束影响、钢材强度、构件的长细比及应力分布有关。当板件的宽厚比大于有效宽厚比限值时,进行箱形构件的强度与稳定计算过程中构件截面在受压时仅部分截面有效。由于板件的早期局部屈曲对结构刚度影响不大,故在计算结构的变形时,可按全截面考虑。

在综合比较了各国钢结构设计规范、冷弯薄壁型钢设计规范和相关研究文献的基础上,提出了根据箱形构件板件应力状态确定焊接薄壁箱形构件的板件有效宽厚比的方法与相应的构件设计公式,分别考虑拉、压、双弯、双剪、扭等内力的作用,并在与非线性有限元计算、构件试验研究结果进行对比的基础上,将所得的研究成果应用于国家体育场焊接薄壁箱形构件设计中。

基于焊接薄壁箱形构件应力状态确定板件有效宽度方法的基本思想是:将焊接箱形截面构件视为由 4 块独立的板件组成,板件之间互为腹板;将板件按毛截面计算时的应力分布状态分为 4 类,分别对每块板件的受力条件进行判别,以确定其相应的有效宽度;根据各板件的有效宽度确定构件的截面特性<sup>[2]</sup>。

在空间桁架结构中,薄壁箱形截面构件可能受到拉、压、弯、剪、扭等内力的作用。按上述方法得到薄壁箱形截面构件的有效截面特性后,可以进行构件的正截面强度、抗剪强度、受压稳定性验算;同时,还需要考虑有效截面形心与毛截面形心之间偏心的影响。

对于腹板同时存在拉、压应力的拉弯、纯弯和压弯薄壁箱形构件,由于有效截面几何特性与是否考虑偏心的不同,按现行《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中计算得到的正截面应力值偏小。

### 2.2 加肋焊接薄壁箱形构件应用

国家体育场屋面次结构的外形截面尺寸为 1 000 mm×1 000 mm,立面次结构的外形截面尺寸为 1 200 mm×1 200 mm。在修改初步设计中,考虑了在箱形构件内部设置横向和纵向加劲肋的方法。由于设置纵向加劲肋可以使板件的宽厚比减小,使板件的局部稳定性有很大改善,从而增加了截面的有效宽度,使得材料的利用率明显提高。在船舶结构与桥梁工程中的一些大型箱式构件经常采用设置

内部加劲肋的做法,但目前在房屋建筑工程中还很少应用<sup>[3]</sup>。

在设置纵向加劲肋时主要考虑提高纵向加劲肋的有效性,采用惯性矩较大的 L 形、T 形截面形式,从而通过合理调整纵向与横向加劲肋的数量与间距,以提高材料的利用率,同时保证施工时人员可以在箱形构件内部通行。带有 L 形与 T 形纵向加劲肋的箱形构件截面如图 2 所示。

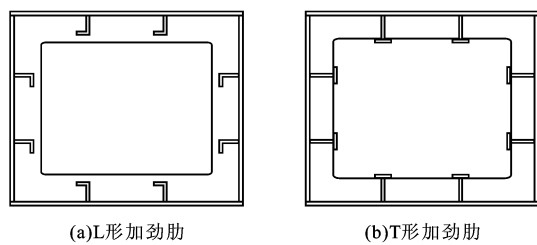


图 2 带纵向加劲肋的箱形构件截面

Fig. 2 Box-Member Section with Longitudinal Stiffeners

为了考察加肋薄壁箱形构件的抗震性能,对其轴心受压情况进行了非线性有限元分析。在计算模型中,采用构件的一阶整体失稳模态模拟初始缺陷,假定构件的横向初始变形量最大值为杆长的 1/1 000。当构件的应力大于钢材的屈服强度时,将进入塑性状态,强化模量为初始弹性模量的 0.6%。箱形构件尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×8 mm,计算长度为 20.0 m,采用 Q345 钢材,构件分为无纵向加劲肋、带有一道纵向加劲肋和两道纵向加劲肋及 2 000 mm 间距横向加劲肋 3 种情况。

无加劲肋构件在轴向荷载作用下,四面壁板很快出现局部屈曲变形,局部变形呈并列的波形,越靠近构件的中部,变形量越大,表现出较强的非线性特征。当达到临界荷载时,在构件中部的局部变形急剧增大,出现明显的褶皱,形成局部的塑性区,承载力突然下降。在超过承载力峰值后,构件的承载力下降较为平缓,还可以维持较高的承载力水平,表现出较好的延性。带有纵向加劲肋的构件在轴向荷载作用下的局部变形减小,构件在达到临界荷载前接近于理想线弹性,承载力明显提高。当达到临界荷载时,承载力突然下降的幅度较大,局部塑性变形区域主要集中在构件中部;在超过临界荷载后,虽然还可以维持一定的承载力,但承载力下降较快,延性较差。

无加劲肋、带有一道纵向加劲肋和两道纵向加劲肋的薄壁箱形构件轴心受压时的内力-变形曲线如图 3 所示。设置加劲肋对于延迟薄壁箱形构件发生局部屈曲、提高构件承载力、减小用钢量具有很大

的作用。设置加劲肋后,薄壁箱形构件轴心受压承载力提高,在达到极限承载力后还可以维持一定的承载能力,但延性有所减弱。综合考虑了无加劲肋与有加劲肋方案的优缺点后,在实际工程中采用了无纵向加劲肋焊接薄壁箱形构件。

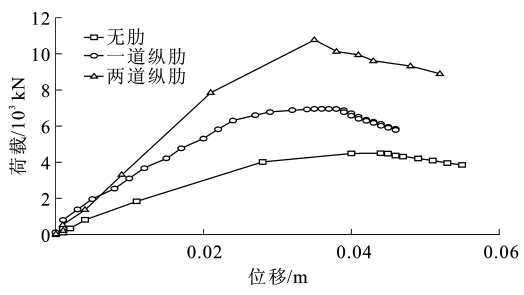


图 3 纵向加劲肋薄壁箱形构件的轴向力-轴向变形

Fig. 3 Axial Force and Deformation for Thin-Wall Box Member with Longitudinal Stiffeners

### 3 杆件计算长度系数

#### 3.1 主桁架杆件

现行《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中对管桁架结构的计算长度没有专门的规定,通常参照对一般平面桁架结构计算长度的规定。由于方管桁架的节点刚度较大,对杆件变形的约束作用明显,合理确定杆件的计算长度,可以取得一定的经济效果。对于管桁架的受压弦杆,面内计算长度可以取构件的节间长度。考虑到受拉弦杆和腹杆的抗弯及抗扭效果,对管桁架受压弦杆平面外的位移形成约束作用,而且受压弦杆本身也具有一定的抗弯和抗扭能力,故对其在平面外的计算长度可以适当折减。HSS Design Guide 中规定管桁架受压弦杆面内、外的计算长度均可以取构件的节间长度的 0.9 倍。在设计中,主桁架受压弦杆在面内、外的计算长度系数均取 1.0,偏于保守。

桁架腹杆面外的计算长度与连接节点形式有很大关系,当采用管桁架时,腹杆四周焊缝与弦杆连为一体,这与节点板连接时平面外刚度很小有明显区别。考虑到杆端焊缝的约束作用,腹杆的计算长度系数可以折减。HSS Design Guide 中规定管桁架受压腹杆在面内、外的计算长度均可以取构件长度的 0.75 倍。在本次初步设计中,腹杆在面内的计算长度系数取 0.8,面外的计算长度系数则参照日本管结构设计指针取 0.9。

#### 3.2 次结构构件

屋面次结构在主桁架形成的菱形网格中呈不规则交叉布置,构件以受弯为主。立面次结构在外柱

之间呈不规则交叉布置,直接作用于立面次结构的荷载较小。在原初步设计中,将主结构作为次结构的支承点,次结构面外计算长度直接取用主结构支承点之间的距离,计算长度很大,当杆件受压时材料的利用率很低。由于次结构呈网状交叉布置,受力形式类似于单层网壳结构。为了确定次结构构件的计算长度,直接采用整体计算模型进行非线性分析,计算时分别考虑了竖向荷载和水平地震力作用。

受压构件在达到稳定承载力时,其计算长度系数  $\mu$  按欧拉公式计算

$$\mu = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{P_{cr}}} \tag{1}$$

式中: $l$  为构件的几何长度; $P_{cr}$  为构件失稳时的最大轴向压力。

对于屋面与立面的次结构构件,由于次结构的截面尺寸较大,在竖向荷载与水平方向地震力作用下的荷载因子均较大,构件的稳定承载力高于构件截面能够提供的材料屈服承载力,应力比值均超过 1.0,说明次结构为强度控制。考虑次结构初始缺陷后的分析结果表明,次结构的稳定承载力对初始缺陷不敏感。根据非线性分析结果,结合次结构的特点,并根据《网壳结构技术规程》(JGJ 61-2003),次结构面外计算长度系数均取 1.6,且屋面次结构面外计算长度不超过其延长线与两相邻主桁架交点之间的距离。当立面次结构构件的面外计算长度小于 20 m 时,计算时按 20 m 取用,其面内计算长度系数均为 1.0。

4 钢结构安装顺序

安装顺序对大跨度钢结构用钢量影响很大。在安装过程中,如果屋面次结构与主结构同时安装,次结构构件的内力将会明显增大,导致次结构构件截面壁厚增大,结构总用钢量增加;主、次结构之间区别不明显,地震力作用效应将增大,难以按指定的顺序出现塑性铰,形成良好的抗震体系;另外,合理布置临时支撑塔架的位置与数量,对主结构构件在安装过程中可能出现的应力状态有较大的影响,因此,对国家体育场大跨度钢结构的建造过程进行了详细的施工模拟分析。

国家体育场屋盖钢结构施工顺序对结构构件在重力荷载作用下的内力将产生明显的影响。根据总工期的要求,大部分看台混凝土结构先行施工,屋盖钢结构部分随后进行施工。协调钢结构安装与混凝土结构施工的关系,对保证混凝土看台部分连续施

工、钢结构的顺利安装具有重大的意义。由于采用整体提升施工方案时混凝土部分不能先期施工,导致总体工期上受到限制与滑移受到场地的限制等因素,故确定采用散装法施工,在屋盖主桁架交叉点的位置设立 78 个临时支撑塔架,其平面布置见图 4。计算分析表明,安装顺序对大跨度结构构件的内力、变形有明显的影响,因此,有必要对国家体育场大跨度钢结构的建造过程进行详细的施工模拟分析。

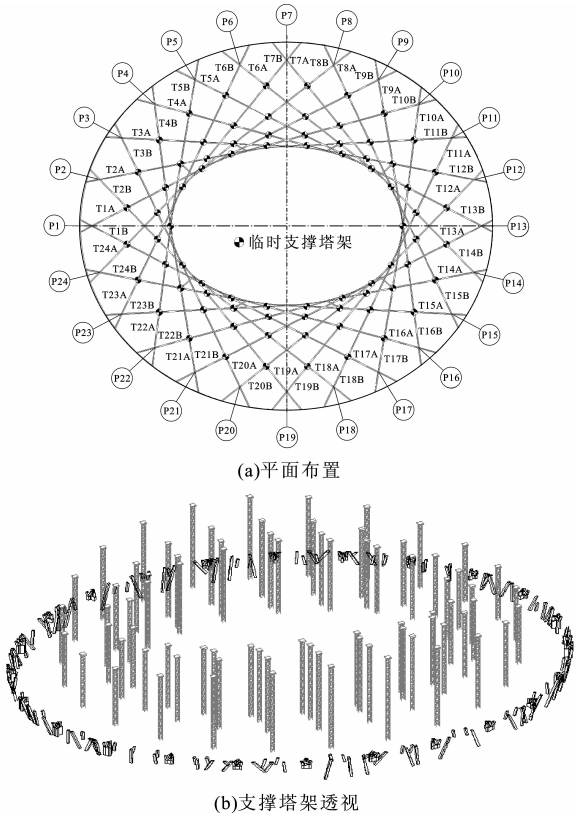


图 4 屋盖结构临时支撑塔架  
Fig. 4 Temporary Supporting Tower Frame for Roof Structure

在大跨度结构设计中,运用有限元法计算程序中将“死”单元(不参与整体结构分析的构件)逐次激活的技术,对钢结构整个施工过程进行分析,并模拟结构在整个施工过程中刚度和荷载的变化情况。在建立结构整体分析模型时,包括建立全部结构的节点和单元。将整个施工过程分为若干个主要阶段,进行第  $n$  阶段结构受力分析时,将在其后阶段安装的单元指定为“死”单元,这些“死”单元没有刚度和自重。在进行第  $n+1$  阶段施工的受力分析时,该阶段施工安装的“死”单元被激活,恢复应有的刚度和自重效应。被“激活”的单元建立在结构变形后的几何构形上,在第  $n$  阶段被“激活”构件的重力荷载作用产生的内力与位移和以前各阶段重力荷载

作用产生的内力与位移相叠加。在其后阶段施工安装的单元仍然保持为“死”单元。重复上述过程,从而可以模拟在整个施工过程中结构构件内力与变形的发展过程。

分别考虑同时安装主结构与屋面次结构和临时支撑塔架卸载后安装次结构时,从总体上说,对桁架柱、主桁架、立面次结构用钢量影响差别较小,但采用临时支撑塔架卸载后安装屋面次结构方案时,桁架柱内柱和主桁架下弦用钢量明显降低。安装顺序对屋面次结构和转角区次结构的用钢量影响较大,当采用临时支撑塔架卸载后安装次结构顺序时,屋面次结构与转角区次结构用钢量明显降低。这主要是由于次结构不承担主桁架在临时支撑塔架卸荷过程中承受的结构整体重力荷载效应,屋面次结构的内力显著减小。相应地,次结构自重减轻,也给整体结构带来有利的影响,主结构与次结构层次分明,结构抗震性能得到改善。

## 5 钢材型号的合理确定

### 5.1 Q345GJ 钢材

在国家体育场结构设计中,为了有效地控制成

本,缩短订货周期,全部采用中国产钢材。对于厚钢板选用了中国产 Q345GJ 钢材。

《高层建筑结构用钢板标准》(YB 4104-2000)是在非等效采用日本 JISG 3136-1994 标准的基础上,结合中国的实际情况而制定的行业标准。与中国标准《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591-94)中的 Q345 相比,其磷、硫质量分数明显降低。在 YB 4104-2000 中还明确规定钢材的屈服强度与抗拉强度的比值不大于 0.8 时,纵向冲击功有所提高,完全能够满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2001)中对钢材抗拉强度与屈服强度比、伸长率及冷弯性能等相关的要求,具有较好的机械性能与焊接性能。

对于热轧钢板,板厚  $a$  越大,钢材的强度越低。根据 YB 4104-2000 生产的 Q345GJ(Z)钢材,中厚板的屈服强度明显提高,对于 50~100 mm 厚钢板,屈服强度为 325 MPa,仅降低 6%,可以取得明显的经济效益。Q345 与 Q345GJ 的拉伸、冲击和冷弯性能见表 1。

由于 Q345GJ 钢材的板厚效应小,可以减少结构的用钢量,改善结构的安全性,有效地发挥了中国产新型钢种的技术优势,对于控制用钢量起到了很好的作用。

表 1 Q345 与 Q345GJ 的拉伸、冲击和冷弯性能

Tab. 1 Tensile Strength, Impact Energy and Cold Bending Performance of Q345 and Q345GJ

钢材型号	质量等级	拉伸试验						冲击试验		180°弯曲试验	
		不同钢板厚度 $a(\text{mm})$ 下的屈服点强度 $\sigma_s/\text{MPa}$				抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	伸长率 $\delta/\%$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	冲击功 (纵向)/J	不同钢板厚度 $a(\text{mm})$ 下的弯心直径	
		$6\leq a\leq 16$	$16<a\leq 35$	$35<a\leq 50$	$50<a\leq 100$					$6\leq a\leq 16$	$16<a\leq 35$
Q345	B	$\geq 345$	$\geq 325$	$\geq 295$	$\geq 275$	470~630	$\geq 21$	20	$\geq 34$	$2a$	$3a$
	C						$\geq 22$	0	$\geq 34$		
	D						$\geq 22$	-20	$\geq 34$		
	E						$\geq 22$	-40	$\geq 27$		
Q345GJ	C	$\geq 345$	345~455	335~445	325~435	490~610	$\geq 22$	0	34	$2a$	$3a$
	D							-20			
	E							-40			

### 5.2 Q460 钢材

为有效控制构件的最大壁厚,减小焊接工作量,使连接构造比较合理,设计中在桁架柱内柱受力最大的部位采用了高强度的 Q460 钢材。此时要求钢材的抗拉强度与屈服强度的比值不应小于 1.2,伸长率大于 20%, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的冲击功不低于 34 J,板厚方向截面收缩率不小于 Z35;同时,严格控制碳当量,经过严格的焊接工艺评定,使其具有良好的可焊性。这是在中国建筑工程中首次采用 Q460 钢材,由中国河南舞阳钢厂生产。

### 5.3 GS-20Mn5V 钢材

为了使桁架柱与下部 T 形合并段的连接构造比较简单,通过铸钢节点将内柱的菱形截面转换为矩形截面。由于铸钢节点位置处于结构受力的关键部位,构件将受到很大的轴力与弯矩,节点域壁厚较大。铸钢节点采用按德国 DIN-17182 标准生产的高可焊性与高韧性铸钢 GS-20Mn5V,其化学成分被严格控制,可焊性好,与现行《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中采用的铸钢材料相比,屈服强度明显提高,经调质处理后,当钢材壁厚大于 100 mm

时,屈服强度不小于 280 MPa;另外,其延伸率、冲击韧性均得到很大改善。

#### 5.4 钢材分级优化配置

为了使国家体育场大跨度钢结构经济合理,优材优用,在设计中采取了以下方式:

(1)当钢板厚度小于 34 mm 时,采用 Q345 钢材;当钢板厚度大于 36 mm 时,采用 Q345GJ 钢材。

(2)主结构钢材冲击韧性为 D 级,次结构钢材冲击韧性为 C 级,次要的马道、设备支架等钢材冲击韧性为 B 级。

### 6 软件开发与结构优化计算

在国家体育场设计过程中,在 ANSYS 软件平台上开发了设计与优化功能,以适应复杂大跨度结构设计的需求。

#### 6.1 构件应力度控制原则

计算结构优化时将构件的应力水平控制作为主要优化目标。在确定控制应力度时考虑了结构安全度、施工偏差与各种不可预见的因素。目标应力度的设定与结构的重要性、杆件受力特点及工程造价直接相关。在确定国家体育场钢结构优化计算的目标应力度时,还考虑了屋面聚四氟乙烯(PTFE)膜结构侧向不平衡力对主桁架上弦、屋面次结构侧向弯矩的影响,与灯光、音响、雨水槽、大屏幕等集中吊挂荷载引起的局部应力,以及在罕遇地震力作用下形成破坏机构时主桁架与次结构需要加强的部位。

##### 6.1.1 膜结构张力影响

国家体育场屋盖上弦采用透明的乙烯-四氟乙烯(ETFE)膜材料,屋盖下弦声学吊顶采用白色的 PTFE 膜材料,内环桁架立面采用防水性能较好的 PTFE 膜封闭。膜结构的特点是整个屋面按主、次结构的布置分为 1 000 多个形状各异的板块,ETFE 膜结构布置在主桁架上弦与屋面次结构之间,其最大面积可达 250 m<sup>2</sup>,最小面积不足 5 m<sup>2</sup>,展开面积约为 40 000 m<sup>2</sup>。屋面 ETFE 膜结构的骨架拱垂直布置于板块长边方向,圆钢管拱的平均矢高为其跨度的 1/10 左右,在骨架拱之间设置同方向的谷索。在 ETFE 膜材料垂直于骨架拱的方向布置间距为 1.5 m 左右的加强索,骨架拱、谷索、ETFE 膜及加强索均以板块周边的天沟作为连接构件。

膜结构属于张拉结构,膜材料与加强索、谷索的张力对周边构件形成很大的反力,由于屋面 ETFE 膜结构板块的不规则性,骨架拱布置的方向不一致,板块的大小差别也很大,主结构两侧膜结构的张力

不能保持平衡,从而将在钢结构构件中引起很大的侧向弯矩。为了保证主体结构的安全性,需要严格控制屋面 ETFE 膜结构对主结构的作用。

为了分析膜结构不平衡力所引起主体结构构件的侧向弯矩,分别将最大不平衡力作用于单个构件与整体计算模型。计算结果表明,单根构件验算与结构整体验算两种方法得到的不平衡力影响较为接近,构件长度越长,膜结构不平衡张力对构件应力的影响越大;同时,应力大小还与构件截面尺寸、壁厚等因素有关。侧向不平衡张力引起的附加偏心扭矩对构件的影响不大。

##### 6.1.2 非节点荷载影响

在国家体育场空间桁架结构中,灯光、音响、雨水槽、大屏幕等集中吊挂荷载将引起明显的局部应力,从而有必要对这些吊挂荷载的影响进行全面的分析。雨水槽与排水管吊挂于主桁架上弦,质量较大,满水情况下将在主桁架上弦产生约 9 MPa 的局部应力。

##### 6.1.3 罕遇地震需要加强的部位

在进行国家体育场结构优化设计时,考虑了静荷载、活荷载及不利荷载分布、雪荷载、各种风向角下的风荷载、温度荷载、小震、中震等多种荷载工况的组合。由于直接通过非线性分析对大震作用下结构进行优化是非常困难的,因此,通过大震分析,找出结构中的薄弱部位,并调整其应力度,从而达到提高结构的抗震安全性、防止出现机构倒塌的目的。

##### 6.1.4 构件控制应力比

在整体结构计算中,所有构件的控制应力比值不大于 0.8。考虑膜结构侧向不平衡张力与非节点荷载的影响,根据构件长度的不同,屋面次结构的控制应力比值在 0.5~0.8 范围内变化,主桁架控制应力比值在 0.7~0.8 范围内变化。结合大震分析的结果,主桁架在靠近桁架柱的第一个节间内控制应力比值为 0.7,屋面檐口部位次结构的应力比限值为 0.7。

#### 6.2 优化计算方法

##### 6.2.1 制定构件截面尺寸表

根据建筑外形与构件连接节点的构造要求,确定各类构件的外形截面尺寸。为了便于对构件的壁厚进行优化调整,本工程对结构各部位均制定了不同的构件截面尺寸表,每种构件的截面尺寸保持不变,优化时仅对构件翼缘和腹板的厚度进行调整。

次结构最小壁厚为 10 mm;主桁架弦杆最小壁厚为 18 mm,主桁架腹杆最小壁厚为 10 mm;桁架

柱弦杆最小壁厚为 20 mm,腹杆最小壁厚为16 mm。

### 6.2.2 主要优化步骤

通过对整体结构在各种工况组合下进行计算与截面校核,可以得到构件的计算应力比。将各构件的计算应力比与目标应力比限值范围进行比较,若构件计算应力比介于目标应力比限值范围内,则该构件壁厚保持不变,否则需要对构件进行壁厚调整。调整构件壁厚后再次进行整体计算与截面校核,直至所有构件计算应力度均符合设计要求。

### 6.2.3 优化过程采用的一些技巧

国家体育场钢结构屋盖的自重和温度效应起主要控制作用,而结构自振周期较长,地震力作用与结构刚度关系很大,因此,采用了先静力计算、后动力验算调整的总体优化思路。首先对恒荷载、活荷载、雪荷载、风荷载、温度荷载等所有静荷载工况组合进行计算;其次对构件截面壁厚进行优化调整,使构件壁厚满足设计要求以及对整体结构进行动力计算和截面校核,调整构件壁厚;最后重新进行静力荷载工况分析,使全部构件均满足静荷载工况与地震作用工况要求。

由于国家体育场整体结构 180°旋转对称,优化的同时调整对称杆件的壁厚;另外,当构件计算应力比与控制应力比偏差较大时,采取跳跃调整截面尺寸的方法。

采用上述优化技巧后,通过 9 到 10 轮的计算,即可得到满意的结果。

## 7 预应力技术应用

为了使国家体育场大跨度钢结构在设计中做到技术先进、经济合理,笔者会同中国有关专家共同对预应力技术在国家体育场钢结构中应用的可行性与合理性进行了深入的研究,从预应力方案选择、计算分析、用钢量指标、预应力索与锚具材料的可靠性、节点构造、构件加工制作、预应力索敷设与张拉、建筑效果、工期、造价等方面,对采用预应力技术的合理性进行了论证。

### 7.1 预应力索布设方案

在设计过程中分别考虑了 3 种整体布索和 3 种局部布索方案。整体布索可以起到较好的内力重分布的作用,改善了桁架的受力性能,使预应力索效率更高。局部布索的优点是构造简单、施工容易,比较适合大跨度重型桁架,缺点是预应力索布设只是针对受拉弦杆,相当于用高强钢材替换部分普通钢材,预应力效率较低。折线形布索与抛物线形布索方式

如图 5 所示。

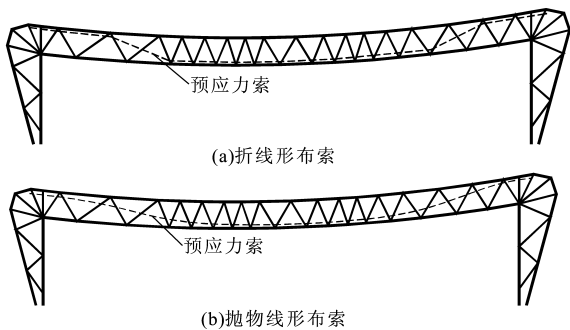


图 5 主桁架整体预应力索布设方式  
Fig. 5 Arrangement Pattern of Global Prestressing Cable for Primary Trusses

### 7.2 预应力计算

通用大型有限元分析软件 ANSYS,主要采用 Beam4 和 Link10 两种单元进行预应力计算。Beam4 为梁单元,用来模拟主桁架杆件,Link10 为只拉不压单元,用来模拟预应力索。对预应力索施加预应力,可以采用在索单元上施加初始负温度,或对索的实常数添加初应变两种方法,计算表明,这两种方法的结果几乎相同。

经过整体模型计算,结构构件之间达到力的平衡状态,此时预应力索的实际应力水平与初始预应力值出现偏差,经过反复对初始预应力度进行调整,最终达到预应力索的张拉应力。计算采用了抗拉强度标准值为 1 860 MPa 的钢绞线,预应力索的允许应力值为 744 MPa。

采用预应力索后,主桁架下弦构件的拉力降低幅度较大,主桁架上弦的压力也有所增大,上、下弦构件内力增长幅值大致相同。施加预应力前后,主桁架腹杆的内力变化不大,主桁架的挠度减小。由于结构整体空间作用的影响,仅在部分主桁架施加预应力,对于整个结构的影响较小,施加预应力后,最大挠度仅减小 0.047 m。

采用预应力索后,结构的总用钢量比未采用预应力索时略有增加,其主要原因如下:

(1)在本工程中,适宜布置预应力索的主桁架的数量较少,可以有效施加预应力的仅有 8 榀,所占比例较小,预应力的效果比一般的预应力钢结构小。一些主桁架在两端柱处较低,而在跨中位置较高,呈向上反拱形,几何形体不利于布索。由于主桁架交叉次数较多,预应力索与主桁架腹杆的碰撞、预应力索之间的交叉会造成构造方面的困难。

(2)由于建筑外观的要求,预应力索的位置不能超出主桁架弦杆高度的范围,预应力索曲线的矢高

较小,使预应力的效率大幅度降低。

(3)为了保证构件具有一定的延性,主桁架弦杆箱形构件的壁厚不宜小于 20 mm,很多下弦构件采用最小壁厚;同时,为了满足主桁架腹杆连接的构造要求,应保证下弦构件截面具有足够的宽度。设置预应力索后,虽然下弦的内力有较大幅度的降低,但其截面尺寸很难再进一步减小。施加预应力将使主桁架跨中上弦杆压力值增大,考虑到钢板强度的厚度效应,将会导致其壁厚增加,因此,当采用预应力后,很难在减小用钢量方面取得预期的效果。

7.3 采用预应力方案的综合评价

布置预应力索的主桁架结构刚度较大,内力也相应增大,而其他未布置预应力索的主桁架的内力将有所下降。通过对构件截面优化调整,这一趋势会更加明显,在桁架之间形成主次关系,内力向部分布置了预应力索的桁架转移,锚具的可靠性对结构的安全性至关重要。由于锚固节点尺寸较大,对建筑外观效果有一定影响。

由于预应力索的定位需要在钢桁架上设置支架,预应力索端部需要可靠锚固,构件在相应的部位需要采取加强措施;另外,预应力索与相交主桁架大量腹杆的位置冲突,增加了钢结构的加工制作难度。预应力采用分束张拉方式,由于张拉顺序的相互影响,必须进行多次调整,现场钢结构安装的难度相应增大。对于本工程来说,采用预应力技术在节省用钢量、降低结构造价方面的效果不理想。预应力索、套管、支架、穿越补强构造、锚具等对造价也将产生一定的影响,因此,最终决定在本工程中不采用预应力方案。

8 结构用钢量

结构优化的主要目的是使构件的利用率接近比较合理的应力水平,达到有效降低结构用钢量的目的。屋盖结构的优化是在基于“鸟巢”概念的最小截面尺寸条件下进行的,很多构件已选用结构构造与加工制作所要求的最薄板材。多遇地震工况组合对构件截面不起控制作用,利用率一般不超过 70%。在设防烈度工况组合时,采用钢材的强度标准值。主结构和次结构在静力荷载作用下与设防烈度地震力作用下的利用率如图 6 所示。

原初步设计用钢量为 53 875 t。由于取消活动屋盖,扩大固定屋盖开口面积,以及采取各种优化措施,在修改初步设计阶段屋盖结构的总用钢量为

41 875 t,比原初步设计节省了 12 000 t。国家体育场各类构件用钢量如表 2 所示。

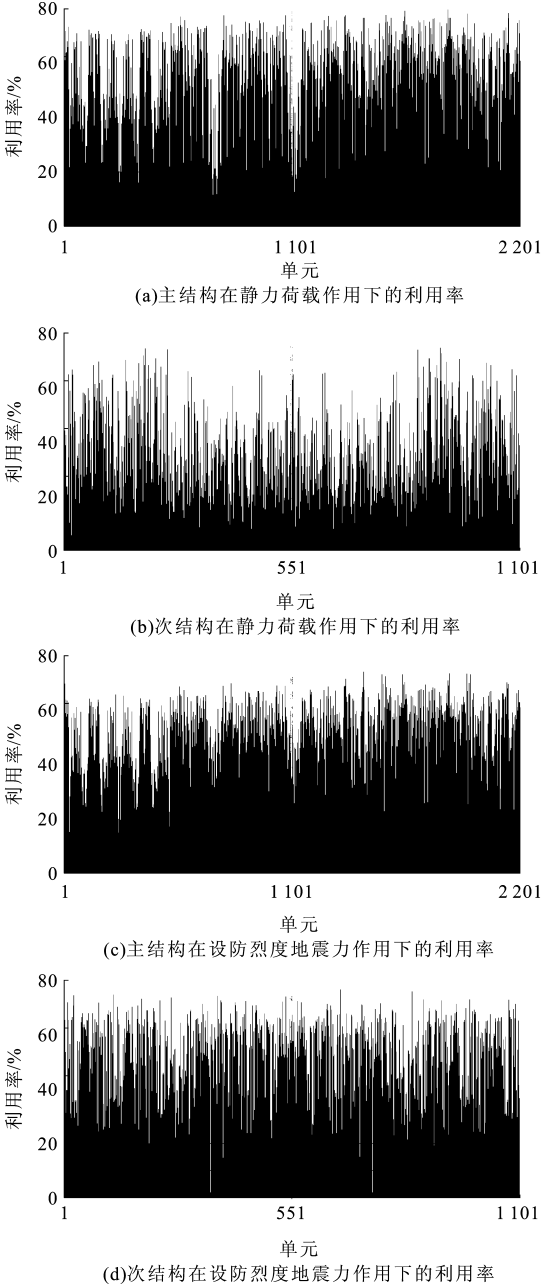


图 6 屋盖结构杆件利用率

Fig. 6 Utilization Ratio of Roof Structure Members

9 结 语

国家体育场的结构优化工作受到社会各界的关注。在修改初步设计与施工图设计过程中,对主桁架、桁架柱、次结构的布置进行了调整,结构抗震性能与节点构造得到了改善;利用板件有效宽度的概念,提出了焊接薄壁箱形构件的设计方法;根据主结构与次结构受力的特点,合理确定杆件计算长度系数;考虑安装顺序对用钢量的影响,合理确定临时支

表 2 屋盖结构各类构件用钢量

Tab. 2 Steel Tonnage for Various Members of Roof Structure

构件类别	用钢量/t
主桁架	12 600
内环桁架建筑装修	120
组合柱	10 130
组合柱合并段	750
组合柱柱脚	1 668
屋面次结构	4 156
立面次结构	7 158
立面次结构柱脚	356
主、次结构合计	36 938
楼梯	3 940
楼梯柱脚	197
马道	800
楼梯与马道合计	4 937
总计	41 875

撑塔架的位置与数量;通过钢材合理选用,做到优材优用;在 ANSYS 软件平台上开发了设计与优化功能,适应复杂大跨度结构设计的需求;对采用预应力技术的可行性进行了深入的研究。通过采取上述综合的优化措施,有效地减小了结构用钢量,达到了控

制工程造价的目的,取得了显著的技术进步及社会经济效益。

参考文献:

References:

[1] 范 重,吴学敏,郁银泉,等. 国家体育场大跨度钢结构修改初步设计[J]. 空间结构,2005,3(11):3-13.  
FAN Zhong,WU Xue-min,YU Yin-quan,et al. Revised Preliminary Design of Steel Structure of National Stadium[J]. Spatial Structures,2005,3(11):3-13.

[2] 范 重,范学伟,刘 岩. 焊接薄壁箱形构件在国家体育场工程中的应用研究[J]. 工程建设与设计,2005,53(1):21-24.  
FAN Zhong,FAN Xue-wei,LIU Yan. Application and Study of Welded Thin-Wall Box Section in National Stadium[J]. Construction & Design for Project,2005,53(1):21-24.

[3] 范 重,范学伟,刘先明,等. 加肋薄壁箱形构件在国家体育场工程中的应用[J]. 工业建筑,2004,41(增 1):11-18.  
FAN Zhong,FAN Xue-wei,LIU Xian-ming, et al. Study of Thin-Wall Box Section with Inner Stiffeners in National Stadium[J]. Industrial Construction,2004,41(S1):11-18.

《建筑技术》2006 年征订通知

《建筑技术》创刊于 1970 年,由北京建工集团有限责任公司主办,面向国内外公开发行业;为中国期刊方阵双高期刊、首届国家期刊奖获奖期刊、全国自然科学建筑类核心期刊、中国科技论文统计源期刊;荣获全国优秀科技期刊一等奖。

《建筑技术》任务是:交流建筑技术新经验,推广建筑科技新成果,介绍国内外建筑新技术,促进建筑管理现代化,贯彻建筑科技法规,研讨建筑技术政策,传播建筑科技信息,开发建筑技术市场,为中国建筑业的科技进步服务,为中国建筑市场的繁荣和发展服务,为中国社会主义现代化建设服务。

《建筑技术》主要包括:建筑施工技术、设计施工实例、建筑装饰装修、质量通病防治、建筑科技法规、施工组织管理、工程建设监理、建筑材料制品、新型模板机具、房屋加固改造、设备安装技术、建筑节能环保。

欢迎订阅、投稿及刊登广告!

地 址:北京市三里河北街甲 1 号建筑技术杂志社 邮 编:100045

电 话:(010)68511882 68589257 传 真:(010)68511882 68589257