

南宁国际会展中心旋转双曲面网壳钢结构穹顶设计

莫世海

(广西建筑综合设计研究院 南宁 530011)

[提要] 南宁国际会展中心是南宁市的标志性建筑。位于入口多功能大厅上空的穹顶是整个建筑的焦点。该穹顶为旋转双曲面网壳钢结构, 内外均采用 PTFE 张拉膜封闭, 造型独特。介绍该结构形式、结构分析和计算, 以及结构设计情况。

[关键词] 旋转双曲面网壳 钢结构 膜结构

The design of the rotating hyperboloid shell steel structure in Nanning International Convention & Exhibition Center

Mo Shihai

(Guangxi Institute of Architectural Design & Research Nanning 530011)

Abstract : Nanning International Convention & Exhibition Center will be the symbol of Nanning City. The great folded steel cupola above the multipurpose hall is the focus of the whole building. The steel cupola is a rotating hyperboloid shell structure. The translucent PTFE membrane covers both the inner and outer sides of the steel structure. The unique cupola is a perfect combination of steel structure and membrane structure. The paper introduces the structural type, the structural analysis and the design of the steel cupola.

Keywords : Rotating hyperboloid shell structure, steel structure, membrane structure

1 工程概况

南宁国际会展中心位于南宁市琅东新区的山丘上, 建筑面积约 11 万 m^2 。下部为钢筋混凝土结构, 屋盖为钢结构。该建筑方案由德国 G M P 建筑设计事务所完成, 由广西建筑综合设计研究院配合完成施工图的设计。此处介绍位于入口多功能大厅上空的



图 1 竣工前现场效果图

旋转双曲面网壳钢结构穹顶, 它由 12 个双曲面空间结构单元旋转而成, 其屋盖材料采用半透明的 PTFE 薄膜材料。这个造型独特、结构巧妙、材料新颖的穹顶犹如 12 片花瓣组成的一朵硕大的朱槿花, 象征着南宁市的市花, 同时也象征着生活在广西的十二个民族, 如图 1 所示。

2 钢结构体系与结构布置

该结构主要由 12 个空间结构单元旋转而成 (图 2, 3, 4)。每个单元分为内外两层, 内层和外层均具有两个曲面。每个曲面由弦杆和腹杆组成。每根弦杆均为圆弧曲线。弦杆 1 为内层曲面的弦杆, 弦杆 2 为内外层曲

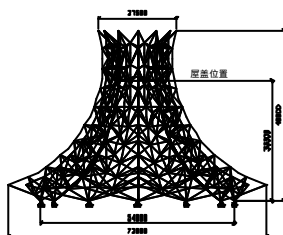


图 2 钢结构构件立面图

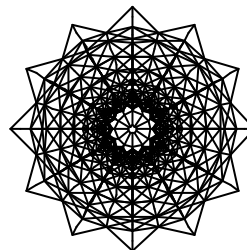


图 3 钢结构构件平面投影图

面单元共用的弦杆,弦杆 3 为外层曲面的弦杆 (图 4)。通过内弦杆 1 和外弦杆 3 之间增加腹杆形成中间的平面桁架来改善结构单元的受力性能。屋盖位于结构高度的约三分之二处 (图 2 的中心部分),通过屋盖加强了结构的整体性。结构底部外径 72m,内径 54m;顶部外径 21.5m,内径 13m,高 48m。

结构支承在底部多功能大厅屋面钢筋混凝土环梁的 12 个销轴铰支座上。利用弦杆上增加附属的连接构件在内外曲面各覆盖有一层半透明的薄膜。每个结构单元内部利用中间桁架腹杆连接 12 部检修梯由底部通至顶部。

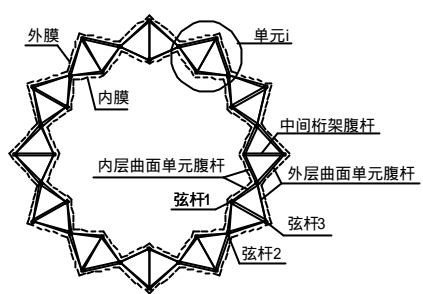


图 4 剖面示意图

3 荷载取值

结构计算中主要考虑的荷载有恒载、活荷载、风荷载、温度效应和地震作用。

3.1 恒荷载和活荷载

钢结构自重由程序自动计算,考虑膜结构附属的连接构件等因素,自重因子取 1.15。灯具、管线等为 0.4kN/m^2 ,检修及活载为 0.5kN/m^2 。

3.2 风荷载

该工程位于南宁市市郊环城绿化带上,周围建筑较稀少,地形地貌属 B 类地区。整个建筑依山就势逐渐升高,山势从低凹地渐渐升至标高 30~40m 高地。旋转双曲面网壳结构形状特殊,风荷载的取值是个难点。为了考虑整个建筑的风压分布,在广东省建筑科学研究院进行了风洞试验,模型为 1/250 比例的整个会展中心建筑模型^[2]。试验结果显示,多功能穹顶外表面的风压具有多边形的特点,接近圆截面构筑物的风压分布。迎风面大面积正压,迎风中心较大,顺风势有一定的减小;凹下的部分迎风面正压比外凸部分的稍大,迎风面正压有上大下小的趋势;侧、背风面及顶部为较均匀的负压;靠近气流分离处的外凸部分有较大负压产生。

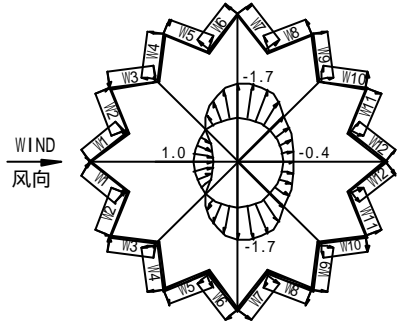


图 5 风荷载体型系数示意图

经过分析比较,风洞试验结果比按《建筑结构荷载规范》(GB50009-2001)中圆截面构筑物 ($H/d=1$) 的取值稍小。在实际设计计算中,为了方便计算,风荷载体型系数 μ_s 按圆截面的构筑物 $H/d=1$ 取值,如图 5 (与风洞试验结果相比,偏于安全)。高度变化系数不考虑高度方向的变化,统一按顶部高度考虑,同时考虑山坡的影响。基本风压按 100 年一遇采用,为 0.40kN/m^2 。

利用 STAAD/PRO 计算的结构基本周期考虑风振效应,风振系数 1.8。

3.3 温度效应

计算时考虑 ± 20 温差作用。

3.4 地震作用

按工程场地土为 Ⅲ 类,抗震设防烈度为 6 度进行计算。采用振型分解反应谱法计算地震作用。

4 结构分析和计算

4.1 分析模型 旋转双曲面网壳钢结构为空间钢结构,弦杆为连续杆件,腹杆两端采用铰接,屋盖与弦杆为刚性连接,支座为铰接节点。使用美国的结构分析与设计软件 STAAD/PRO 进行空间分析,利用 SSDD 软件接力 STAAD/PRO 进行中国规范的验算。并用同济大学空间钢结构结构计算程序 3D3S 进行的复核算。

内外层曲面所覆盖的膜,属骨架式膜结构,仅作为主体钢结构的附属部分考虑。在计算模型中,用很弱的三角形板壳单元来模拟。主要目的是为了更方便地把作用在膜上的质量与荷载传至钢结构上,如风荷载和活荷载等。在主体钢结构的分析中,不考虑张拉膜的实际刚度,而把板壳单元的刚度设得非常小,对结构的受力几乎没有影响。

4.2 荷载组合

根据规范 GB50009-2001 考虑荷载效应组合,考虑自重、恒荷载、活荷载、 $\pm 20^\circ$ 温差、水平地震作用。

由于抗震设防烈度为6度,钢结构自重轻,地震力对结构不起控制作用,水平荷载由风荷载控制。在计算中,考虑了两个方向的地震作用和12个方向的风荷载作用。通过结构计算程序充分考虑各种荷载作用下的最不利的组合。

5 结构设计

(1) 杆件截面

根据计算,弦杆的截面采用 457.2×16 ,腹杆最大截面为 323.9×16 ,腹杆最小截面为 177.8×6 ,屋盖采用焊接箱型截面 $450 \times 250 \times 16$ 。整个钢结构的用钢量约650t。钢管采用国产冷成型直缝管材,钢材为Q345B。



图 6 支座节点

(2) 节点设计

结构的弦杆为连续的构件,腹杆与弦杆采用相贯连接节点。底部柱脚节点采用铰轴形式的节点(图6)。该形式的铰接点仅能沿一个方向转动,设计时把12个支座定位在能径向转动的方向上。采用铰接支座为施工带来了方便。

(3) 焊接

支管与主管的连接焊缝为相贯线焊缝,沿全周连续焊接并平滑过渡。当支管壁厚 6mm 时,采用全周角焊缝。当焊管壁厚 $> 6\text{mm}$ 时,根据支管管壁与主管管壁的夹角和部位不同,采用全周带坡口的全熔透焊缝、带坡口的部分熔透焊缝或角焊缝。

焊缝的质量等级:主管的对接焊缝为全熔透焊缝,焊缝质量等级为一级。其余全熔透焊缝质量等级为二级,角焊缝和部分熔透焊缝为三级。



图 7 建设中的钢结构

(4) 防锈及防火涂装

钢构件表面采用喷射(或抛射)除锈,钢构件基层除锈等级要求达到 Sa2 1/2 级,钢构件表面采用水性无机富锌底漆防锈,涂层厚度 $2 \times 50 \mu\text{m}$,环氧云铁中间漆 $2 \times 30 \mu\text{m}$,表面采用薄层防火涂料防火,建筑物耐火等级为一级,构件的耐火极限为 1.5 小时。

(5) 优化设计

本工程钢结构施工图完成后,由业主组织国内钢结构专家进行了施工图审查。施工单位也提出了优化方案。我们综合了钢结构专家们和施工单位的意见,在满足建筑外观要求

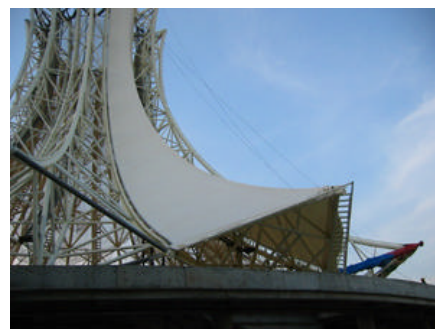


图 8 外层膜的安装

的情况下对结构进行了优化设计。主要是对腹杆的数量进行了优化，减少了腹杆的数量，方便了施工。

6 结束语

本工程的旋转双曲面网壳钢结构穹顶施工采用平面分为 12 块，立面分为 4 段进行吊装，在空中对接的方法施工（图 7）。于 2003 年 3 月开始钢结构吊装，2003 年 8 月完成主体钢结构和膜结构的安装（见图 8 和图 1）。

参考文献

- [1] 钢结构设计规范（GBJ17-88）
- [2] 建筑结构荷载规范（GB50009-2001）
- [3] 建筑抗震设计规范（GB50011-2001）
- [4] J. A. Packer, J. E. Henderson, J. J. Cao（曹俊杰），空心管结构连接设计指南. 科学出版社，1997.
- [5] 广东省建筑科学研究院，南宁国际会议展览中心风洞动态测压试验报告。

附：

作者：莫世海（mo shi hai）

工作单位：广西建筑综合设计研究院

地址：广西南宁市华东路 39 号 邮编：530011

联系电话：13312908276，0755-25118603

E-mail: moshihai@163.net

现联系地址：

深圳市文锦路文锦大厦二楼 203 号

广西建筑综合设计研究院深圳分院

邮编：518002