

井冈山火电厂干煤棚优化设计研究

齐月芹 宋一乐

武汉大学土建学院 (湖北武汉 430072)

薄爱军

武汉东风建筑工程公司 (湖北武汉 430072)

摘 要 应用满应力优化准则对井冈山火电厂干煤棚空间网架结构进行了截面优化, 并应用三维有限元法研究了该结构的静力、动力特性。

关键词 优化设计 网壳结构 静力 动力分析

井冈山华能电厂位于江西省吉安地区, 电厂装机容量为4台30MW燃煤发电机组。为确保电厂可储存4~5d的耗煤量, 设计了一座干煤棚, 经结构选型比较, 外型定为三圆弧双层柱面网壳结构。本文应用满应力优化准则法对干煤棚的杆件进行了截面优化设计, 得出了用钢量最省、结构简单、受力合理的网壳结构型式。并对选定的结构设计进行了三维有限元静力及动力分析。

1 优化基本原理

满应力优化是优化准则法的一种主要方法, 满应力法认为各个杆件应力达到满应力时, 结构重量 W 最轻。满应力设计中的应力比法是: 先估算设计变量的初始截面积 $A^{(0)} = (A_1^{(0)}, A_2^{(0)}, \dots, A_n^{(0)})$, 通过各工况的力学分析, 求出各工况中的最大应力为 $\sigma_{\max}^{(0)} = \max(\sigma_{ij}^{(0)})$, 式中 $\sigma_{ij}^{(0)}$ 为第 i 杆件在第 j 工况的应力, 将 $\sigma_{\max}^{(0)}$ 与其容许应力 $[\sigma_i]$ 相比较, 求出其应力比为 $\beta_i^{(0)} = \sigma_{\max}^{(0)} / [\sigma_i] = \max(\beta_{ij}^{(0)})$, 应用叠代公式 $A_i^{(k+1)} = \beta_i^{(k)} A_i^{(k)}$, 直至目标函数 $W^{(k)} = \sum \rho_i A_i^{(k)} l_i$ 重量最轻时结束优化, 输出杆件的截面积结果。

根据上述方法对火电厂干煤棚进行了截面优化设计, 列出数学表达式:

a. 设计变量。预先选定网壳结构的外形尺寸, 进一步对网壳杆件截面进行优化, 设计变量取为杆件的截面积 A_i , $i = 1, 2, \dots, 5278$ 。

b. 目标函数。目标函数取用钢量。用钢量=杆件重+结点重+螺栓重(0.2倍结点重)+主檩条重+次檩条重+1mm屋面钢板重。

$$\min(W^{(K)}) = \min\left\{\sum \rho_i A_i^{(K)} l_i + W_d + W_{ls} + W_d + W_{cl} + W_{wm}\right\}$$

式中 ρ_i 为第 i 杆件的单位容重; $A_i^{(K)}$ 为第 i 杆件的第 K 次优化后的截面积; l_i 为第 i 杆件的长度; $W_d, W_{ls}, W_d, W_{cl}, W_{wm}$ 分别为结点重、螺栓重、主檩条重、次檩条重、屋面钢板重。

c. 约束条件。约束条件取各个杆件在各种荷载组合下的最大应力(最大拉应力、最大等效压应力)不超过应力强度(200MPa)。截面积不小于620mm²(杆件最小面积) 每计算一次约束条件, 均需按前述方法分别求4种荷载组合下的网壳内力。即:

$$N_{\max}/A_i^{(K)} \leq [\sigma_i]$$

$$A_i^{(K)} \leq 620$$

式中 N_{\max} 为第 i 杆件的最大轴力; $[\sigma_i]$ 为杆件的容许应力。

其程序框图如图1所示。

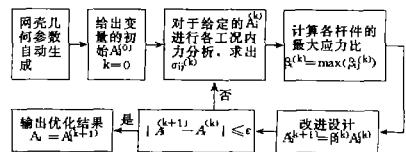


图1 网壳结构优化设计程序框图

2 结构型式

选定的井冈山火电厂干煤棚结构型式为两纵边支撑两端带肋的三圆弧双层柱面网壳结构, 其型式如图2所示。该结构跨度 $L=87\,000\text{mm}$, 长度85200mm, 图2中上弦结点位于三段光滑连接的圆弧

上, 中部大圆弧半径为 $R_1 = 76\,082\text{ mm}$, 两侧小圆弧半径 $R_2 = 28\,791\text{ mm}$, 拱高 (上弦矢高) 为 $H = 31.137\text{ m}$, 拱厚 $2\,800\text{ mm}$, $\alpha = 71.88^\circ$, $m = 9$, $n = 12$, 横截面方向上弦杆长度相等为 $4\,010\text{ mm}$ 。下弦杆长度为 $2\,600 \sim 4\,000\text{ mm}$ 。网壳下弦结点位于与上弦圆弧同心的三圆弧上, 网格选用正交正放四角锥型式。纵向方向上弦杆为 $21 \times 4\,000\text{ mm}$, 下弦杆为 $20 \times 4\,000\text{ mm}$, 两端有肋, 小圆弧在支座处的切线与地面垂直, 以尽量减少网壳的水平推力。网壳两侧底部上弦结点直接支撑在基础上。

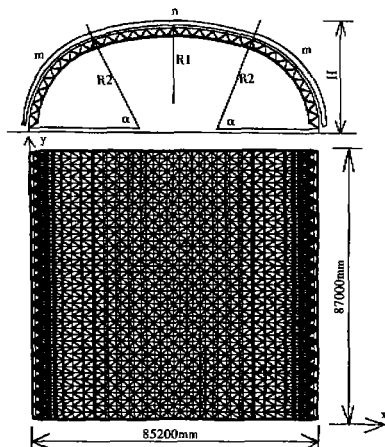


图 2 三圆弧双层柱面网壳

3 设计资料

a. 屋面。采用主檩条+次檩条+屋面钢板体系, 主檩条采用 I14, 数量 22 个, 沿跨度方向与网壳同时安装, 次檩条采用 I12 轻型冷弯薄壁型钢檩条, 间距为 $1\,500\text{ mm}$, 压型钢板采用 V—125 \times 1.0 型板材。

b. 杆件。采用无缝钢管, 材料为 235 钢, 弹性模量 $E = 20\,600\text{ MPa}$, 容重 $\rho = 7\,800\text{ kN/m}^3$ 。杆件左右对称, 杆件截面种类有 9 种。

c. 结点。横截面上结点左右对称, 采用螺栓球结点, 有 7 种类型。

d. 支座。网壳两纵边底部上弦结点直接支撑在

基础上, 支座结点的三个平动位移均受约束, 每侧有 22 个支座结点。

e. 荷载与工况。永久荷载有杆件自重+结点自重 (包括螺栓自重)+主檩条自重+次檩条自重+屋面钢板自重计算, 其中螺栓自重为结点自重的 20%。

可变荷载有活荷载 $= 0.30\text{ kN/m}^2$, 灰荷载 $= 0.30\text{ kN/m}^2$, 风荷载为平均风, 方向为水平向, 作用在网壳结构的一侧。温度与地震作用均不考虑。计算机程序自动形成网壳自重, 荷载全部转换为结点荷载, 荷载作用在结点上, 杆件不承受横向荷载。

把荷载组合 4 种:

组合 1: 1.2 自重+1.4 灰荷载; 组合 2: 1.2 自重+1.4 灰荷载+0.6 \times 1.4 风荷载; 组合 3: 1.2 自重+1.4 风荷载+0.6 \times 1.4 灰荷载; 组合 4: 1.0 自重+1.4 风荷载+0.6 \times 1.4 灰荷载。

其中 1.2 为永久荷载分项系数, 1.4 为可变荷载分项系数, 0.6 为荷载组合系数。组合 2 和 3 是考虑到灰荷载和风荷载都可能起控制作用, 组合 4 是考虑到风荷载起控制作用时永久荷载可能对结构有利, 故永久荷载分项系数取 1.0。

4 成果分析

4.1 内力计算原理

优化程序及接口程序用 FORTRAN77 语言编制, 在 Digital Visual Fortran 5.0 编译系统下编译通过。由满应力法得出截面面积后, 根据型钢表, 选取最接近的截面。再输入到空间桁架内力计算程序中计算各杆件的内力、应力和位移。网壳有 1372 个结点, 5378 个单元, 4116 个自由度, 66 个约束, 方程数为 12150。该程序可和 SUPERSAP 程序接口计算应力和位移, 以便校核计算结果, 并进行可视化分析。

4.2 静力分析计算成果

选定的网壳结构, 用钢量为 503.08 t, 4 种组合工况下支座反力、最大应力见表 1。

表 1 4 种组合的支座反力、最大应力

荷载组合	边座最大支撑反力/kN			中座最大支撑反力/kN			最大应力/MPa		中点位移/cm	
	纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向	拉	压	纵向	竖向
1	134.2	18.1	237.5	115.6	8.9	206.4	85.24	112.76	0	-9.04
2	194.7	25.8	289.4	157.5	12.8	230.9	113.1	172.74	8.25	-9.04
3	174.3	22.9	257.8	138.54	11.25	201.55	118.95	193.05	13.7	-7.35
4	200.8	26.3	286.0	154.3	13.4	195.74	112.3	152.57	13.7	-6.56

注: 中点位移指 $x = 43\,500\text{ mm}$, $y = 42\,600\text{ mm}$ 处的位移

工况1的最大拉应力出现在中间的底部下弦杆上及2边的上部上弦杆上,最大压应力出现在相应部位的上弦杆及下弦杆。因为结构对称,荷载对称,内力及变形均是对称的,如图3a。工况2的最大拉应力发生在背风面的上弦杆上和迎风面的下弦杆,最大压应力发生在背风面的下弦杆和迎风面的上弦杆,如图3b。工况3和工况4的最大拉、压应力情况与工况2类似,但最大压应力、中点横向位移比工况2大,如图3c和图3d、工况2~4由于有水平风荷载作用,反力及变形是不对称的。各个工况的边缘最大支座反力比其他最大支座反力大20%左右,有边缘效应。



图3 4种工况下的位移变形图

4.3 动力特性计算结果

实际结构为多自由度体系,质量位于桁架的各个结点上,其质量包括杆件质量、结点质量、螺栓质量、主檩条质量、次檩条质量和屋面钢板质量。每一个质点的运动方向有3个,即横向、竖向、纵向;通过 SUPERSAP 程序对实际结构进行了固有频率和振型分析,得到前9阶自振频率,见下表2(计算自振频率时,不计灰荷载、风荷载,永久荷载的分项系数取1.0);前4阶振型见图4a~图4d。

表2 前9阶自振频率 Hz

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
自振频率	1.042	1.962	2.082	2.433	2.739	3.097	3.977	4.295	4.559

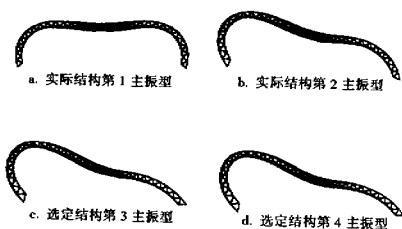


图4 前4阶振型图

5 结束语

5.1 满应力优化方法收敛快,原理简单、直观,且要求重分析的次数一般跟变量的数目关系不大,应用较广泛。

5.2 双层柱面网壳结构作为干煤棚是一种结构简单、受力合理、造型美观、施工方便的结构型式。

5.3 计算结果表明,工况2下支座反力和壳顶中点竖向位移最大,工况3下构件应力和中点水平位移最大。但各工况下构件强度、刚度及稳定性均满足有关规范的要求。

5.4 实际结构的前4阶自振频率范围在1.042~2.433 Hz。而风的周期一般在20~60 s,因此,一般情况下,不会和此建筑形成共振。

5.5 采用两端带肋的结构型式,可克服端部边缘效应,和初步设计无肋方案比,端部应力减小。

参考文献

- 1 尹德钰等.网壳结构设计.中国建筑,1996年
- 2 沈祖炎,陈扬旗.网架与网壳.同济大学,1997年
- 3 李东兵等.大跨度拱型干煤棚风洞试验研究.武汉水利电力大学学报,1999年增刊
- 4 朱以文等.微机有限元前后处理系统 ViziCAD 及其应用 1993年

(收稿日期:2000-11-03)