

# 多重约束下空间桁架结构抗风优化\*

黄友钦, 林俊宏, 傅继阳, 吴玫荣

(广州大学 联合研究中心, 广东省结构安全与健康监测工程技术研究开发中心, 广州 510006)

**摘要:** 目前复杂结构的抗风优化研究大多集中于高层建筑, 很少针对风敏感的大跨屋盖结构, 考虑强度、刚度和几何尺寸等多重约束, 基于虚功原理和 Lagrange 乘子将抗风优化转化为无约束问题, 编制数值程序整合有限元计算和优化分析两部分, 然后对杆件数为 10 080 的实际双层柱面网壳进行优化设计, 讨论了设计变量可行域、初始值和调整步选择等对优化结果的影响. 研究表明, 采用本文方法可实现对空间桁架结构进行多重约束下的高效抗风优化设计, 网壳总重降低约 37%, 风致响应分布不均使得有必要设定可行域下限, 而设计变量初值和调整步选择不影响最后的优化结果.

**关键词:** 空间桁架结构; 抗风优化; 多重约束; 准则法; 调整步

**中图分类号:** TU318<sup>+</sup>.1; O302      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.08.006

## 引 言

传统设计是在假定材料强度、构件尺寸和布置方式的条件下进行强度和变形的校核, 其设计结果取决于设计人员的专业知识和实践经验, 而优化设计不需要人为假定, 由计算程序自动搜索符合优化目标的设计变量<sup>[1]</sup>. 优化分析同时考虑结构的安全性和经济性, 在保证结构安全的前提下减少材料用量, 从而降低工程造价. 大跨屋盖结构通常由大量构件组成, 在设计中需要进行优化分析来确定最优的设计方案. 同时, 此类结构为典型的风敏感结构, 风荷载常为控制屋盖设计的主要荷载, 因此有必要对其抗风优化方法进行研究<sup>[2]</sup>.

然而, 目前结构抗风优化研究主要集中于高层建筑结构. Chan 等以风致位移和加速度响应为约束条件, 采用最优准则法对具有 3D 模态的高层建筑进行尺寸优化, 得到了最小工程造价<sup>[3-4]</sup>. Huang 等将振动控制装置和材料费用同时作为目标函数, 指出两种方式同时使用对减小结构响应效率较高<sup>[5]</sup>. Spence 等进一步考虑场地气候信息, 建立了基于可靠度的高层建筑抗风优化模型<sup>[6]</sup>. 因此, 以往抗风优化研究很少涉及大跨屋盖结构, 且未考虑强度约束条件.

本文以一实际双层柱面网壳结构为研究对象, 同时考虑强度、刚度、几何尺寸等多重约束, 基于虚功原理和 Lagrange 乘子来建立等效静力风荷载下的优化设计方法, 编制相应计算程序

\* 收稿日期: 2013-06-03; 修订日期: 2013-06-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51222801; 51208126); 广东省教育厅育苗工程项目(2012LYM\_0107)

**作者简介:** 黄友钦(1982—), 男, 福建宁德人, 助理研究员, 博士(Tel: +86-20-39366451; E-mail: yqhuang.dennis@gmail.com);

傅继阳(1976—), 男, 湖北黄梅人, 研究员, 博士(通讯作者. E-mail: jyfu@gzhu.edu.cn).

并细致讨论了杆件截面积下限、设计变量初始值和调整步选择等关键参数对优化结果的影响。

## 1 抗风优化原理

首先建立空间桁架结构抗风优化的数学模型,然后通过 Lagrange 乘子将有约束问题转化为无约束问题,最后给出抗风优化的计算步骤和程序框图。

### 1.1 数学模型

结构抗风优化中通常将结构总重作为目标函数,即通过优化获得最轻设计。空间桁架结构的设计变量可方便地取杆件的截面积。约束条件包括结构的强度、刚度和几何约束,约束容许值分别用杆件应力、节点位移和最小杆件截面积表示。

因此,可建立空间桁架结构的抗风优化数学模型为

$$\begin{cases} \text{search} & \mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}, \\ \min & W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i l_i, \\ \text{s. t.} & \sigma_i \leq [\sigma_i], \\ & u_q \leq [u_q], \\ & A_i \geq A_{\min}, \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  表示所有构件的截面积;  $W$  表示结构重量;  $\rho_i$  和  $l_i$  分别表示构件  $i$  的截面积和长度;  $\sigma_i$  和  $[\sigma_i]$  分别表示构件  $i$  的风致应力和容许应力;  $u_q$  和  $[u_q]$  分别表示节点  $q$  的风致位移响应和容许位移;  $A_{\min}$  表示截面积下限值。

### 1.2 无约束处理

大跨屋盖结构中一般存在大量构件,而设计变量越多则优化效果越好。因此,本文将屋盖中所有构件的截面积作为设计变量,采用最优准则法进行优化计算。

当最严约束是位移约束时,引入 Lagrange 乘子将有约束问题转化为无约束情况<sup>[1]</sup>。假设最严约束是节点  $q$  达到最大位移,即  $u_q = [u_q]$ , 而其他节点位移违反原问题的约束条件,则通过下一轮的射线步来调整,从而目标函数转化为

$$L(\mathbf{A}, \lambda) = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i l_i + \lambda (u_q - [u_q]), \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为 Lagrange 乘子。

由  $\frac{\partial L}{\partial A_i} = 0$  和  $\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$  得到

$$\rho_i l_i + \lambda \frac{\partial u_q}{\partial A_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$u_q - [u_q] = 0. \quad (4)$$

将式(3)的两边乘以  $A_i$ , 再逐项求和后可得

$$W + \lambda \sum_{i=1}^n \left( A_i \frac{\partial u_q}{\partial A_i} \right) = 0. \quad (5)$$

对于空间桁架结构,节点位移可写为

$$u_q = \sum_{i=1}^n \frac{F_i F_{iq} l_i}{A_i E_i}, \quad (6)$$

式中,  $F_i$  为风荷载下杆件  $i$  的内力;  $F_{iq}$  为节点  $q$  作用有单位虚力时杆件  $i$  的内力。

进一步有

$$\frac{\partial u_q}{\partial A_i} = -\frac{F_i F_{iq} l_i}{A_i^2 E_i} + \sum_{j=1,3,\dots,i-1,i+1}^n \left[ \left( \frac{\partial F_j}{\partial A_i} \right) \left( \frac{F_j l_j}{A_j E_j} \right) + \left( \frac{\partial F_{jq}}{\partial A_i} \right) \left( \frac{F_j l_j}{A_j E_j} \right) \right], \quad (7)$$

根据虚功原理得到

$$\frac{\partial u_q}{\partial A_i} = -\frac{F_i F_{iq} l_i}{A_i^2 E_i}. \quad (8)$$

上式两边分别乘以  $A_i$  再逐项相加得到

$$\sum_{i=1}^n \left( A_i \frac{\partial u_q}{\partial A_i} \right) = -\sum_{i=1}^n \frac{F_i F_{iq} l_i}{A_i E_i}, \quad (9)$$

式(9)与式(6)比较后可得

$$\sum_{i=1}^n \left( A_i \frac{\partial u_q}{\partial A_i} \right) = -u_q. \quad (10)$$

将式(10)代入式(5),并考虑式(4),求得 Lagrange 乘子为

$$\lambda = \frac{W}{[u_q]}, \quad (11)$$

将  $\lambda$  的表达式和式(8)代入式(3)得到

$$1 = \frac{W}{[u_q]} \frac{F_i F_{iq}}{\rho_i A_i^2 E_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (12)$$

上式两边同时乘以  $A_i$ ,将左端写为  $A_i^{(k+1)}$ ,右端写为走射线步后的  $A_i^{(k)}$  ( $k$  表示第  $k$  次迭代计算),就得到满位移步中的截面积迭代公式。

### 1.3 抗风优化方法及程序设计

多重约束条件下空间桁架结构的抗风优化计算可按如下步骤进行:

1) 设定设计变量初始值。可将结构在优化前初始设计方案中的杆件截面积作为初始设计变量  $\mathbf{A}^{(0)} = \{A_1^{(0)}, A_2^{(0)}, \dots, A_n^{(0)}\}$ 。

2) 计算等效静力风荷载。初始设计方案下计算结构在随机风场中的风致响应,获得结构上的等效静力风荷载,并假设在优化计算过程中保持不变。

3) 计算应力比和位移比。令迭代次数  $k = 1$ , 等效风荷载下进行结构静力分析,得到结构杆件的应力和节点的位移,从而计算应力比和位移比:

$$\beta_i^{(k)} = \frac{\sigma_i^{(k)}}{[\sigma_i]}, \quad (13)$$

$$\gamma_q^{(k)} = \frac{u_q^{(k)}}{[u_q]}, \quad (14)$$

式中,  $\beta_i^{(k)}$  和  $\sigma_i^{(k)}$  分别表示第  $k$  次迭代中杆件  $i$  的应力比和风致应力;  $\gamma_q^{(k)}$  和  $u_q^{(k)}$  分别表示第  $k$  次迭代中节点  $q$  的位移比和风致位移。

4) 走射线步。由于最优解位于最严约束曲面,所以应通过射线步使迭代点落在最严约束曲面上,避免计算收敛到非最优点<sup>[7-8]</sup>。比较应力比和位移比的最大值,通过将最大值乘以所有杆件截面积来把设计点拉回至最严约束曲面:

$$\mathbf{A}'^{(k)} = R_{\max}^{(k)} \mathbf{A}^{(k)}, \quad (15)$$

式中,  $R_{\max}^{(k)}$  表示比例系数的最大值,即  $R_{\max}^{(k)} = \max \{ \beta_{\max}^{(k)}, \gamma_{\max}^{(k)} \}$ , 其中  $\beta_{\max}^{(k)} = \max_i \{ \beta_i^{(k)} \}$  和  $\gamma_{\max}^{(k)} = \max_q \{ \gamma_q^{(k)} \}$ 。

5) 走调整步. 在多重约束的情况下, 根据应力比和位移比的取值范围, 最严约束可能为应力约束或位移约束, 因此调整步选择分为两种情况.

① 若最严约束是应力约束, 则走满应力步, 杆件截面积按下式进行更新:

$$\hat{A}_i^{(k+1)} = \beta_i'^{(k)} A_i'^{(k)} = \left[ \frac{\beta_i^{(k)}}{R_{\max}^{(k)}} \right]^\alpha A_i'^{(k)}, \quad (16)$$

式中,  $\beta_i'^{(k)}$  表示杆件  $i$  的满应力比例系数;  $\alpha$  为控制步长的阻尼指数, 合理取值可避免收敛的振荡现象.

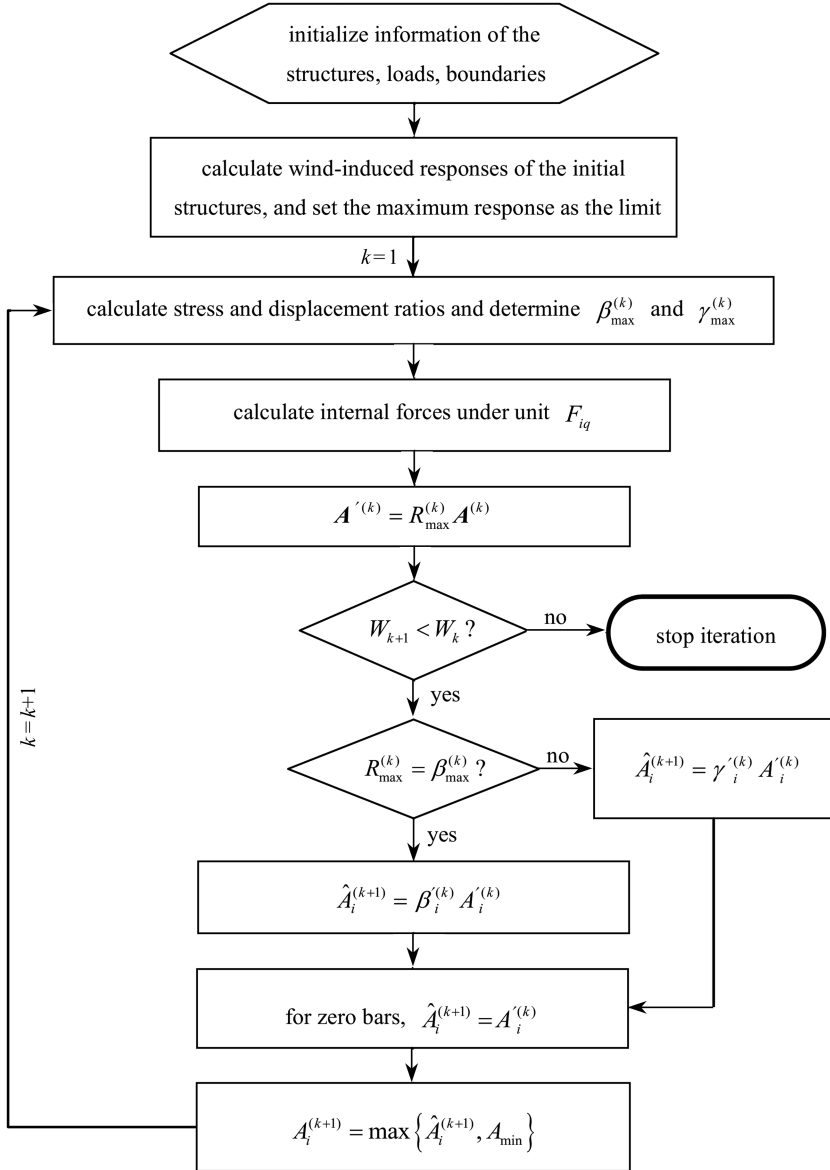


图1 空间桁架结构的抗风优化程序框图

Fig. 1 Program layout of wind resistant optimization on spatial truss structures

② 若最严约束是位移约束, 则走满位移步, 截面积按下式进行调整:

$$\hat{A}_i^{(k+1)} = \gamma_i'^{(k)} A_i'^{(k)} = \left[ \frac{W}{[u_q]} \frac{F_i F_{iq}}{\rho_i A_i^2 E_i} \right]^\alpha A_i'^{(k)}, \quad (17)$$

式中, 阻尼指数  $\alpha$  与满应力步取相同值。

6) 满足几何约束. 在调整步中可能因某些比例系数较小, 而使截面积大幅减小, 因此通过设定截面积下限使其满足几何约束:

$$A_i^{(k+1)} = \max \{ \hat{A}_i^{(k+1)}, A_{\min} \}. \quad (18)$$

7) 迭代收敛条件. 记录每次走射线步后的目标函数值, 当目标函数值不再减小时停止迭代, 否则回到第 3) 步继续计算。

基于 MATLAB 数值平台, 编制空间桁架结构的抗风优化计算程序 WROP (wind-resistant optimization program), 整合了风致响应计算和优化分析两大模块. 该数值程序的计算流程如图 1 所示。

## 2 双层柱面网壳抗风优化

首先介绍作为本文研究对象的双层柱面网壳, 然后计算结构上的等效静力风荷载, 最后给出该网壳结构的优化计算结果。

### 2.1 结构简介

用于分析的正放四角锥双层柱面网壳, 由圆钢管桁架单元组成, 沿两纵边支承(见图 2)。该结构包含 10 080 个单元和 2 592 个节点, 初始设计方案的总重量约为 604 t, 材料密度取为  $7\ 850\ \text{kg/m}^3$ 。

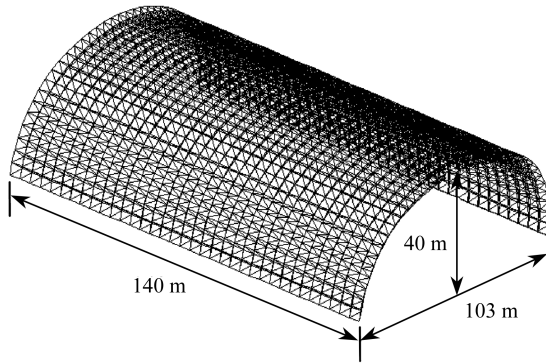


图 2 双层柱面网壳

Fig. 2 The double-layer cylindrical reticulated shell

将初始设计方案对应的等效静力风荷载下的最大应力值和最大位移值作为约束容许值, 即  $[\sigma_i] = \max \{ \sigma_1^{(0)}, \sigma_2^{(0)}, \dots, \sigma_{10\ 080}^{(0)} \}$  和  $[u_q] = \max \{ u_1^{(0)}, u_2^{(0)}, \dots, u_{2\ 592}^{(0)} \}$ , 从而保证优化设计在初始设计的风荷载效应范围内进行. 同时, 将初始设计方案的最小截面积作为优化中的截面积下限, 即  $A_{\min} = \min \{ A_1^{(0)}, A_2^{(0)}, \dots, A_{10\ 080}^{(0)} \} = 8.51\ \text{cm}^2$ 。

### 2.2 等效静力风荷载

在风敏感结构的设计中, 一般通过等效静力风荷载来计算结构在风荷载作用下的响应, 即当等效静力风荷载作用于结构时引起的某一结构响应与实际风荷载作用时该响应的最大值一致<sup>[9]</sup>. 阵风荷载因子 (gust loading factor, GLF) 法因其计算简便, 自提出后在结构抗风设计中得到了广泛应用, 并被写入美国、加拿大、欧洲等地的荷载规范中<sup>[10-12]</sup>。

根据 GLF 法, 作用在结构上以某个目标响应等效的静力风荷载可表示为

$$\hat{\boldsymbol{p}} = \left(1 + g \frac{\sigma_r}{\bar{r}}\right) \cdot \bar{\boldsymbol{p}}, \quad (19)$$

式中,  $\bar{\boldsymbol{p}}$  表示结构上的平均风荷载;  $g$  表示基于可靠度分析得到的峰值因子(取  $g = 2.5$ )<sup>[10]</sup>;  $\sigma_r$  和  $\bar{r}$  分别表示随机风振响应计算得到的目标响应的均方根值和平均值。

该双层柱面网壳的刚性模型测压风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 风洞中完成<sup>[13]</sup>, 基于试验获得的非定常风荷载, 通过平稳激励随机振动分析得到了结构的风致位移或应力响应:

$$\boldsymbol{\sigma} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{S}(\bar{\omega}) d\bar{\omega}}, \quad (20)$$

$$\boldsymbol{S}(\bar{\omega}) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{H}(-i\bar{\omega})\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{R}\boldsymbol{S}_p(\bar{\omega})\boldsymbol{R}^T \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{H}(i\bar{\omega})\boldsymbol{A}^T, \quad (21)$$

式中,  $\boldsymbol{\sigma}$  表示响应均方根;  $\boldsymbol{S}(\bar{\omega})$  表示响应功率谱;  $\boldsymbol{A}$  表示相应于模态坐标  $u_j = 1$  的目标响应的向量  $\boldsymbol{a}_j$  组成的矩阵;  $\boldsymbol{H}(i\bar{\omega})$  表示频响函数;  $\boldsymbol{\Phi}$  表示结构振型;  $\boldsymbol{R}$  表示由测点风压换算至节点风力的指数函数;  $\boldsymbol{S}_p(\bar{\omega})$  表示测点风压谱。

这样, 由式(19)~(21)以及平均的风荷载、结构响应, 则可得到结构上的等效静力风荷载。综合考虑该结构的位移和应力峰值响应, 以  $150^\circ$  风向角下的结果最为显著, 因此以该风向角得到的最大等效静力风荷载  $\hat{\boldsymbol{p}} = 1.66\bar{\boldsymbol{p}}$  进行抗风优化设计。图 3 给出了该风向下位移和应力最大的节点或单元的响应功率谱。可以看出, 背景和共振响应在频谱上明显分离, 谱峰对应的频率分别与结构第 2, 3, 4 阶振型(频率分别为 1.51 Hz, 1.63 Hz, 2.01 Hz)吻合。

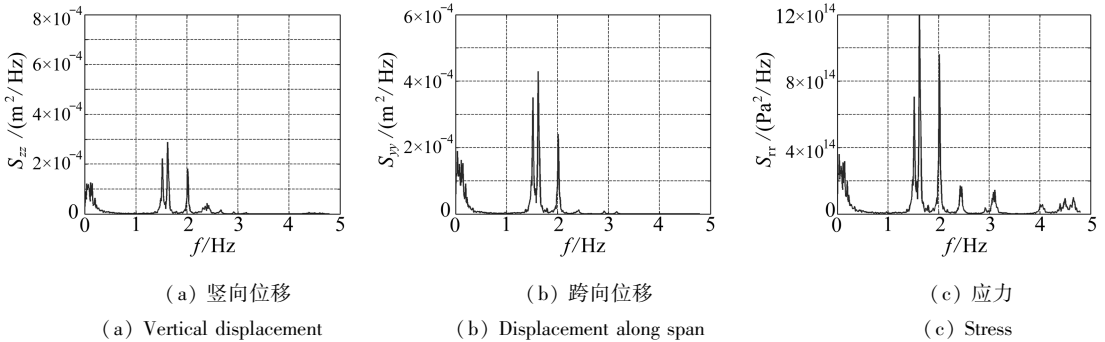


图 3 典型风向下结构响应功率谱

Fig. 3 Auto-power spectrum of the structure in typical wind directions

### 2.3 优化结果

根据计算结果(阻尼指数  $\alpha$  取 0.2), 初始设计方案下风致杆件应力最大值为 195 MPa, 风致节点位移最大值为 13.8 cm(见图 4, 每个节点位移包括 3 个方向的值), 因此抗风优化设计的容许应力和容许位移分别为  $[\sigma_i] = 195$  MPa 和  $[u_q] = 13.8$  cm。

第 1 次迭代 ( $k = 1$ ) 中, 网壳的应力比和位移比如图 5 所示。可以看出, 由于采用初始设计结构对应的位移和应力的最大值作为约束容许值, 应力比和位移比的最大值均为 1.0, 大部分杆件的应力比小于 0.5, 而大部分节点的位移比小于 0.2, 因此结构风致响应的分布较不均匀, 有必要进行抗风优化设计。

在射线步中比例系数最大值  $R_{\max}^{(1)} = 1.0$ , 因此走射线步后的杆件截面积与初始截面积相同, 结构重量也为初始重量。调整步中, 将位移约束作为最严约束, 则走满位移步得到的调整系数  $\gamma_i^{(1)}$  和杆件截面积如图 6 所示。可以看出, 调整系数总体上小于 1.0, 大于 1.0 的系数约占

14%，从而导致调整后某些杆件的截面积大于初始截面积，而最小截面积被修正至初始最小值。

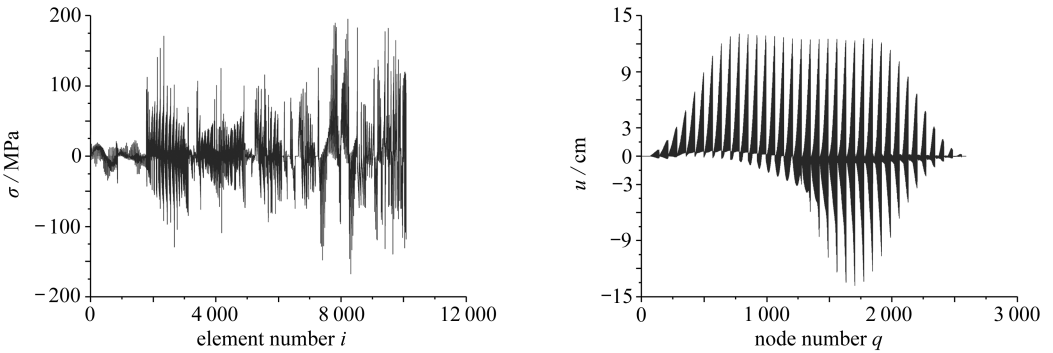


图4 初始设计结构在等效静力风荷载下的应力和位移

Fig. 4 Stress and displacement of the initial structure under equivalent static wind load

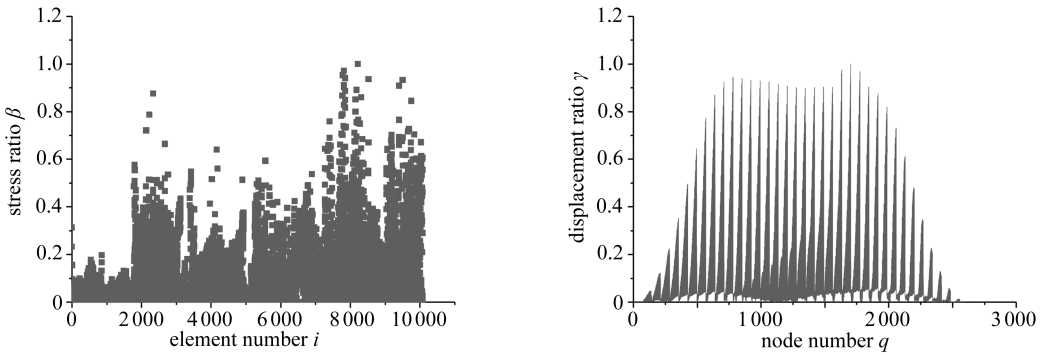


图5 第1次迭代中应力比和位移比

Fig. 5 Stress ratio and displacement ratio in 1st iteration

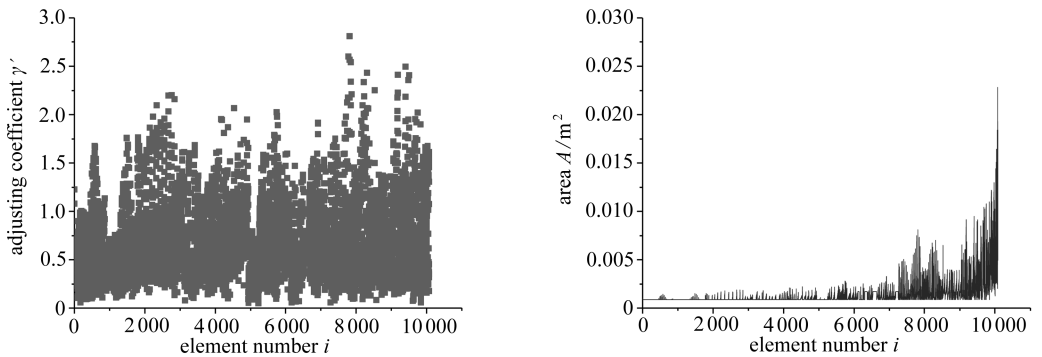


图6 第1次迭代中调整系数和调整步后的截面积

Fig. 6 Adjusting coefficient and area distribution in 1st iteration

第2次迭代中,由于最大应力比超过最大位移比,因此调整步中走满应力步,各杆件的调整系数如图7所示。与图6对比可以发现,两次迭代中的调整系数差别较大,调整系数的范围由0.05~2.81缩小至0.09~1.0,从而杆件截面积进一步减小。

第4次迭代中结构重量出现增加,因此取第3次迭代中射线步后的结果作为抗风优化结果。表1给出了迭代过程中的部分计算结果,图8给出了部分计算结果随迭代次数的变化曲

线,可以看出,双层柱面网壳的抗风优化计算过程中最大应力比和最大位移比的数值起伏变化,其所在的单元或节点也不断变化,因此调整步中可能选择满位移步或满应力步;结构重量降低约37%,两次迭代的最大降幅达34%,因此优化效率较高,通过抗风优化设计使杆件截面积的分布更加合理,结构受力更加协调,同时,由于计算收敛时最大应力比和最大位移比的值接近,因此结构的刚度和强度均得到充分利用。

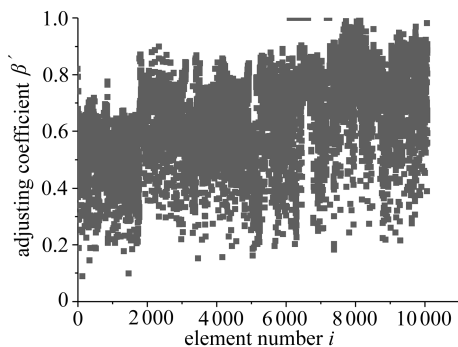


图7 第2次迭代中调整系数分布

Fig. 7 Distribution of adjusting coefficients in 2nd iteration

表1 各次迭代中的部分计算结果

Table 1 Some results in every iteration

iteration number	maximum stress ratio		maximum displacement ratio		radial step		adjusting step	area after optimization $A/m^2$	
	$\beta_{\max}$	corresponding element	$\gamma_{\max}$	corresponding node	$R_{\max}$	$W/t$		maximum	minimum
1	1.00	8 219	1.00	1 704	1.00	604	full displacement	2.28E-02	8.51E-04
2	0.77	8 142	0.69	781	0.77	397	full stress	1.56E-02	8.51E-04
3	1.00	8 142	1.05	781	1.05	379	full displacement	2.56E-02	8.51E-04
4	0.95	7 704	0.82	835	0.95	384			

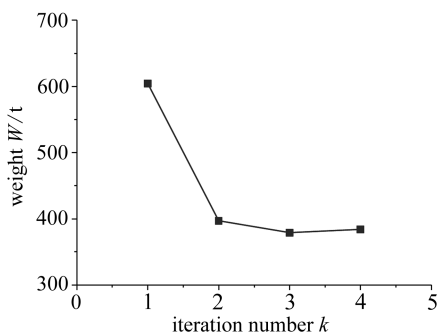
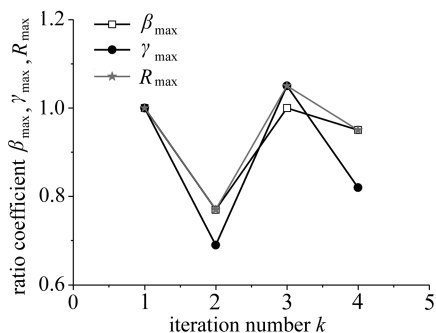


图8 部分计算结果随迭代次数的变化

Fig. 8 Variation of some results with iterations

### 3 参数分析

设计变量下限值、设计变量初始值和调整步选择是本文优化算法中的关键参数,通过对这类参数进一步分析,可使多重约束下的抗风优化设计方法更加明确。



### 3.1 截面积下限

表 2 给出了不设截面积下限时的部分计算结果。与表 1 对比可以看出, 不设截面积下限时优化得到的结构重量仅为表 1 结果的 59%, 但杆件截面积最小值仅为  $0.01 \text{ cm}^2$ , 远小于初始截面积的最小值, 与工程实际不符<sup>[14]</sup>。因此, 由于风致应力的分布较为不均, 有必要设定设计变量可行域的下限值。

表 2 不设截面积下限时部分计算结果  
Table 2 Some results with no area lower limit

iteration number <i>k</i>	maximum stress ratio		maximum displacement ratio		radial step		adjusting step	area after optimization $A/\text{m}^2$	
	$\beta_{\max}$	corresponding element	$\gamma_{\max}$	corresponding node	$R_{\max}$	$W/t$		maximum	minimum
1	1.00	8 219	1.00	1 704	1.00	604	full displacement	2.28E-02	4.72E-05
2	0.81	8 111	0.69	781	0.81	328	full stress	1.62E-02	1.48E-05
3	1.05	8 111	1.01	781	1.05	253	full stress	1.51E-02	4.67E-06
4	1.03	8 111	1.12	779	1.12	225	full displacement	2.50E-02	1.02E-06
5	2.38	8 037	1.67	1 300	2.38	482			

表 3 给出了截面积下限分别为初始最小值 0.5 倍(情况 A)和 1.5 倍(情况 B)时的结果。可以看出, 情况 A 得到的结构重量为 279 t, 而情况 B 得到的结构重量为 490 t, 迭代次数分别为 4 次和 3 次。因此, 截面积下限值越大, 抗风优化后结构重量的降低程度越小, 所需迭代次数也越少。

表 3 不同截面积下限时得到的结构重量和杆件截面积  
Table 3 Obtained structural weight and area with different area lower limit

iteration number <i>k</i>	$W/t$		area after adjusting $A/\text{m}^2$			
	case A	case B	maximum (case A)	minimum (case A)	maximum (case B)	minimum (case B)
1	604	604	2.28E-02	4.26E-04	2.28E-02	1.30E-03
2	337	490	1.61E-02	4.26E-04	1.43E-02	1.30E-03
3	279	503	2.51E-02	4.26E-04		
4	415					

### 3.2 设计变量初始值

假定该网壳结构的抗风优化中还存在另外两种不同的设计方案, 即所有的杆件截面积均为初始截面积的 0.5 倍(初始方案 1)和 1.5 倍(初始方案 2), 从而初始结构重量分别为 302 t 和 906 t, 但约束条件保持不变。表 4 和表 5 给出了两种初始方案下的部分优化计算结果。与表 1 的结果对比后容易看出, 即使设计变量初始值不同, 但最后得到的杆件截面积和结构重量基本一致, 最大应力比和最大位移比也随着不断迭代计算而趋于接近。因此, 只要荷载条件和约束条件保持不变, 可任意选取结构的初始设计变量, 均可得到结构的最优设计方案。

由于结构中零杆不参与优化计算, 所以不同初始变量下结构重量略有不同, 若在首次迭代中根据初始变量的比例相应放大或缩小零杆的截面积, 则不同初始设计变量下将得到完全相同的结构重量。

表4 初始方案1的部分优化计算结果

Table 4 Some results of case 1

iteration number	maximum stress ratio		maximum displacement ratio		radial step		area after optimization $A/m^2$	
	$\beta_{\max}$	corresponding element	$\gamma_{\max}$	corresponding node	$R_{\max}$	$W/t$	maximum	minimum
1	2.00	8 219	2.00	1 704	2.00	596	2.62E-02	8.51E-04
2	0.68	8 111	0.60	1 704	0.68	391	1.57E-02	8.51E-04
3	1.00	8 142	1.04	1 704	1.04	370	2.55E-02	8.51E-04
4	0.95	7 704	0.83	1 531	0.95	376		

表5 初始方案2的部分优化计算结果

Table 5 Some results of case 2

iteration number	maximum stress ratio		maximum displacement ratio		radial step		area after optimization $A/m^2$	
	$\beta_{\max}$	corresponding element	$\gamma_{\max}$	corresponding node	$R_{\max}$	$W/t$	maximum	minimum
1	0.67	8 219	0.67	1 704	0.67	612	2.10E-02	8.51E-04
2	0.83	8 142	0.75	781	0.83	404	1.55E-02	8.51E-04
3	1.01	8 142	1.05	781	1.05	388	2.57E-02	8.51E-04
4	0.95	7 704	0.82	1 531	0.95	393		

### 3.3 调整步选择

在首次迭代中,最大应力比和最大位移比均为1.0,因此调整步可为应力步或位移步,而表1是假设走位移步的结果.表6给出了首次调整步走满应力步的优化结果.通过与走满位移步的结果(表1)对比可知,首次迭代中调整步选择的不同,导致以后每次迭代中不同的最大应力比和位移比,从而调整步选择也不同,但最后得到的结构重量接近,仅相差2%,而先走满位移步时所需迭代次数更少.

表6 首次调整步为满应力步时的部分计算结果

Table 6 Some results with first adjusting step as full stress step

iteration number	maximum stress ratio		maximum displacement ratio		radial step		adjusting step	area after optimization $A/m^2$	
	$\beta_{\max}$	corresponding element	$\gamma_{\max}$	corresponding node	$R_{\max}$	$W/t$		maximum	minimum
1	1.00	8 219	1.00	1 704	1.00	604	full stress	1.28E-02	8.51E-04
2	1.03	8 219	1.11	1 704	1.11	484	full displacement	2.40E-02	8.51E-04
3	1.01	8 113	0.69	781	1.01	441	full stress	2.01E-02	8.51E-04
4	1.02	8 113	0.85	781	1.02	396	full stress	1.77E-02	8.51E-04
5	1.02	8 113	0.98	781	1.02	371	full stress	1.61E-02	8.51E-04
6	1.03	8 113	1.09	781	1.09	381	full displacement		

## 4 结 论

基于准则法建立空间桁架结构的抗风优化数学模型和计算步骤,编制相应数值程序对一实际双层柱面网壳结构进行抗风优化,并细致讨论了设计变量下限、初始值和调整步选择等关

键参数对优化结果的影响. 通过研究得出以下主要结论:

- 1) 准则法用于多重约束下复杂桁架结构的抗风优化中优化效率较高, 对于设计变量为 10 080 的双层柱面网壳, 仅通过 4 次迭代计算就使结构重量降低 37%.
- 2) 空间桁架结构的抗风优化中有必要通过设定几何约束来避免优化得到的杆件截面积过小, 而截面积下限值越大则优化后结构重量越高, 所需迭代次数越少.
- 3) 采用准则法进行抗风优化计算时, 不同初始设计变量下得到的优化结果接近, 随着迭代次数增加, 各项计算参数的数值也趋于一致.
- 4) 首次迭代中调整步选择将影响以后各次迭代的最大应力比、最大位移比及调整步选择等, 但最后得到的结构重量不受调整步选择的影响.

#### 参考文献 (References):

- [1] 朱杰江. 建筑结构优化及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011. (ZHU Jie-jiang. *Optimization and Application of Structural Optimization* [M]. Beijing: Peking University Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 程志军, 楼文娟, 孙炳楠, 唐锦春. 屋面风荷载及风致破坏机理[J]. 建筑结构学报, 2000, **21**(4): 39-47. (CHENG Zhi-jun, LOU Wen-juan, SUN Bing-nan, TANG Jin-chun. Wind load on roof structures and mechanism of wind-induced damages [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, **21**(4): 39-47. (in Chinese))
- [3] Chan C. Optimal lateral stiffness design of tall steel buildings of mixed steel and concrete construction[J]. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2001, **10**(3): 155-177.
- [4] Chan C, Huang M, Kwok K. Stiffness optimization for wind-induced dynamic serviceability design of tall buildings[J]. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 2009, **135**(8): 985-997.
- [5] Huang M, Tse K, Chan C, Lou W. Integrated structural optimization and vibration control for improving wind-induced dynamic performance of tall buildings[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2011, **11**(6): 1139-1161.
- [6] Spence S, Giofrè M. Large scale reliability-based design optimization of wind excited tall buildings[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2012, **28**: 206-215.
- [7] 蔡新, 郭兴文, 张旭明. 工程结构优化设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CAI Xin, GUO Xing-wen, ZHANG Xu-ming. *Optimization Design of Engineering Structures* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [8] 钱令希. 工程结构优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (QIAN Ling-xi. *Optimum Design of Engineering Structures* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [9] 周暄毅. 大跨屋盖结构风荷载及风致响应研究[D]. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2004. (ZHOU Xuan-yi. Wind loads and wind-induced response on large span roofs [D]. PhD Thesis. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese))
- [10] Davenport A. Gust loading factors[J]. *ASCE-Journal of Structural Division*, 1967, **93**: 11-34.
- [11] Lazzari M, Saetta A, Vitaliani R. Non-linear dynamic analysis of cable-suspended structures subjected to wind actions[J]. *Computers and Structures*, 2001, **79**(9): 953-969.
- [12] Kareem A, Zhou Y. Gust loading factor—past, present and future[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, **91**(12/15): 1301-1328.
- [13] 黄友钦. 风雪共同作用下大跨屋盖结构的动力稳定[D]. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2010. (HUANG You-qin. Dynamic instability of large-span roofs under simultaneous actions of wind

and snow[D]. PhD Thesis. Shanghai: Tongji University, 2010. (in Chinese))

- [14] 中华人民共和国建设部. 网壳结构技术规程(JGJ 61-2003)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. *Technical Specification for Latticed Shells*(JGJ 61-2003)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese))

## Wind Resistant Optimization of Spatial Truss Structures Under Multi-Constraints

HUANG You-qin, LIN Jun-hong, FU Ji-yang, WU Jiu-rong

(*Engineering Technology Research and Development Center for Structural Safety and Health Monitoring in Guangdong Province, Joint Research Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China*)

**Abstract:** The existing wind resistant optimization research on wind-sensitive structures mostly focused on high-rise buildings, and large span roof structures were seldom involved. The wind resistant optimization problem under multi-constraints like strength, stiffness and geometric dimensions, was converted to an unconstrained problem based on the principle of virtual work and Lagrange multiplier. A numerical program including finite element computation and optimization analysis was then developed to optimize a real double-layer cylindrical reticulated shell with 10 080 bars, followed by discussion of the influences of design variable feasible regions, design variable initial values and adjusting steps on the optimum results. Studies show that wind resistant performance of spatial truss structures under multi-constraints can be efficiently optimized by the proposed approach, and total weight of the shell is decreased by 37%. Lower limits of the design variables are necessary owing to non-uniform distribution of wind-induced responses, and different choices of initial design variables and adjusting steps could hardly influence the final optimum results.

**Key words:** spatial truss structure; wind resistant optimization; multi-constraints; criterion method; adjusting steps