

文章编号:1671-6833(2014)05-0059-05

基于多目标等效风荷载的变截面门式刚架抗风优化

王艳萍, 黄友钦, 吴玖荣, 唐雁腾

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

摘 要: 轻钢门式刚架结构是单层工业厂房中一种常见的结构形式, 风荷载是其结构设计的重要荷载之一. 已有抗风优化研究中一般仅考虑单目标的等效静力风荷载, 在多个约束条件时不能保证优化结果的准确性. 笔者基于风洞试验数据库构造多目标等效静力风荷载, 基于最优准则法对单榀变截面门式刚架进行抗风优化设计. 分别以工字钢的腹板高度和材料总重为设计变量和优化目标, 以柱顶水平位移和跨中挠度为约束条件, 基于 MATLAB 数值平台, 编制了抗风优化计算程序. 研究表明, 多目标等效静力风荷载能够保证约束位移的数值与随机峰值基本一致, 在满足约束条件的前提下, 优化设计使结构总重降低了 23.2%, 经济效益明显, 且优化后的截面尺寸符合变截面门式刚架的力学特点.

关键词: 变截面门式刚架; 抗风优化; 多目标等效静力风荷载; 最优准则法

中图分类号: TU318 + 1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.014

0 引言

轻钢结构是目前国内外应用和发展速度最快的低矮结构型式, 广泛用于各类工业和民用建筑中^[1]. 对于门式刚架等大跨屋盖结构, 风荷载往往是主要控制荷载之一, 对此类结构进行抗风优化设计可减少结构的材料用量, 并且改善结构的受力性^[2-4].

目前, 关于轻型门式刚架的风效应和优化设计的研究成果较多. S. Jang 等^[5]通过非线性有限元分析研究了轻钢结构厂房在风荷载作用下的极限承载力. D. T. Phan 等^[6]运用遗传算法搜索门式刚架最优设计方案, 研究了澳大利亚典型风区对门式刚架最优参数的影响. 吴剑国等^[7]采用平均值舍入法获取离散点, 改进了复合形迭代过程和停机准则, 对门式刚架结构进行优化设计. 赵彦革等^[8]根据微积分原理, 在满足强度要求的前提下对变截面门式刚架斜梁进行优化设计, 确定了截面突变处的最优高度. 基于量子粒子群算法, 傅继阳等^[9]采用等效静力风荷载对门式刚架结构进行了抗风优化. 吴玖荣等^[10]采用 SAP2000 有限元分析结果, 运用最优准则法(The Optimum Criterion method, OC 法)研究了变截面门式刚架的抗

风优化设计方法. 然而, 已有研究中均采用以单个响应为目标的等效静力风荷载作为优化设计的荷载输入. 而结构优化设计中通常存在多个响应约束, 单目标等效静力风荷载仅能保证在单个目标处的响应值与实际随机风场中的峰值一致, 而难以保证在其他约束处的响应计算值的准确性^[11], 因此可能影响优化结论的可靠性.

笔者以单榀变截面门式刚架为研究对象, 基于风洞试验数据库构造多目标等效静力风荷载, 以腹板高度为设计变量, 以材料总重最小化为优化目标, 将柱顶水平位移和跨中挠度为约束条件, 建立抗风优化数学模型, 进一步采用 OC 法进行抗风优化设计.

1 结构简介及风荷载来源

笔者研究某一工业厂房中的门式刚架结构. 门式刚架的宽度 B 和高度 H 分别为 16 m 和 4 m, 横梁倾角为 $\beta = 9.4^\circ$, 在柱脚处铰接, 如图 1 所示. 柱采用沿单侧线性变化的工字钢楔形柱, 取两端截面为控制截面, 梁采用三段式变截面, 截面变化处为控制截面, 5 个控制截面的位置见图 1. 各控制截面处的初步设计尺寸如表 1 所示, 其中, h 为工字钢截面高度, b 为翼缘宽度, t_f 为腹板厚度,

收稿日期:2014-05-10; 修订日期:2014-07-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51222801, 51208126); 广东省自然科学基金重点项目(S2011030002800); 2012 年广东省高等学校人才引进专项资金项目

通信作者:黄友钦(1982-), 男, 福建宁德人, 广州大学助理研究员, 博士, 主要从事结构风工程研究, E-mail: yqhuang@gzhu.edu.cn.

t_w 为翼缘厚度.

刚架上的风荷载数据来自日本东京工业大学 (Tokyo Polytechnic University) 的空气动力数据库. 将测点风压系数乘以参考风压, 则得到测点的实际风压. 根据就近原则和线性插值, 由测点风压来计算节点风压. 进一步将节点风压乘以相应的节点附属面积, 可得到每个节点 3 个自由度上的风力时程.

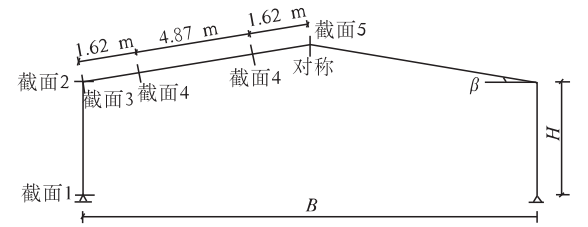


图 1 门式刚架示意图
Fig.1 The studied portal frame

表 1 各截面的初步设计尺寸
Tab.1 Initial dimension of sections m

截面号	h	b	t_f	t_w
1	0.40	0.24	0.01	0.008
2	0.85	0.24	0.01	0.008
3	0.82	0.22	0.01	0.006
4	0.55	0.22	0.01	0.006
5	0.80	0.22	0.01	0.006

2 多目标等效静风荷载计算

风荷载是一种随机过程, 因此结构设计中一般将其等效为静力荷载考虑. 为了更加准确地考虑各个目标响应处的等效荷载, 笔者计算以所有结构响应为目标的等效静力风荷载进行优化设计. 将风场本征模态和结构振型作为基本向量, 确定针对多个等效目标的基本向量最优组合系数, 从而得到多目标的等效静风荷载^[12].

脉动风荷载对应的等效静力荷载可表示为

$$F_e = F_0 c. \tag{1}$$

式中: F_0 为等效荷载的基本向量矩阵, 取为本征模态向量, 通过对脉动风荷载协方差矩阵进行本征正交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD) 得到. c 为组合系数向量.

上式左、右两边同时乘以 β^T , 得到

$$\beta^T F_e = \beta^T F_0 c. \tag{2}$$

式中: β^T 表示等效目标的影响线函数.

由 β^T 的定义可知:

$$\beta^T F_e = \hat{y}, \tag{3}$$

式中: \hat{y} 表示等效目标处的风振响应极值

$$\hat{y} = g \times \sigma_r \times \text{sign } \bar{y}. \tag{4}$$

式中: g 为峰值因子; σ_r 为脉动响应均方根; \bar{y} 表示平均响应; sign 为符号函数, 表示 \hat{y} 的符号与平均响应 \bar{y} 一致.

因此, 组合系数向量应满足以下方程

$$\beta^T F_0 c = \hat{y}. \tag{5}$$

从而, 对于 m 个等效目标的情况, 组合系数向量应满足

$$\begin{cases} \beta_1^T F_0 c = \hat{y}_1; \\ \beta_2^T F_0 c = \hat{y}_2; \\ \dots\dots \\ \beta_m^T F_0 c = \hat{y}_m. \end{cases} \tag{6}$$

由上式方程组可解得 c , 代入式 (1) 则得到脉动风荷载的多目标等效分量, 进一步可得到总等效静力风荷载

$$F = \bar{F} + F_e = \bar{F} + F_0 c, \tag{7}$$

式中: F 为总的等效静力风荷载; \bar{F} 为平均风荷载.

由计算求得 1 至 4 阶的贡献率分别为 55.7%、23.2%、10.4%、7.1%, 因此前 4 阶本征模态的贡献率已达 95%, 取其前 4 阶本征模态来重建风场. 将得到的多目标等效静力风荷载作为静力荷载作用于结构, 得到的结构各自由度上的位移如图 2 所示, 并与频域计算得到的随机风振响应峰值进行比较. 可以看出, 多目标等效静力风荷载下所有位移都与随机风振响应分析得到的极值十分接近, 验证了多目标等效静力风荷载计算理论的有效性.

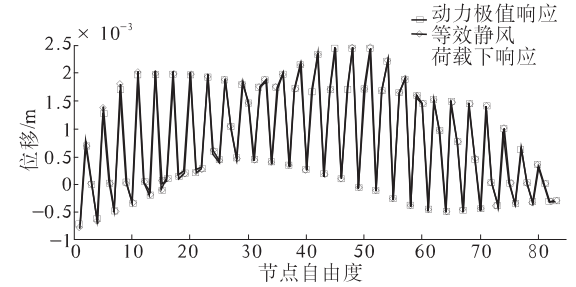


图 2 多目标等效风荷载下位移与动力极值响应的比较
Fig.2 Comparison of the static displacements under the equivalent loads and the random peak displacements

3 抗风优化数学模型及 OC 法原理

3.1 抗风优化数学模型

(1) 设计变量
以 5 个控制截面处的腹板高度 h_w 为优化设计

变量,也即工字钢截面尺寸中的 b 、 t_f 、 t_w 保持不变,而截面总高度 h 的值将随 h_w 的变化而改变. 设计变量的初值和限值如表 2 所示.

表 2 腹板高度的初值及其上、下限值
Tab.2 Initial web height and its limits m

	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	截面 5
初始值	0.38	0.83	0.80	0.53	0.78
下限值	0.10	0.30	0.30	0.20	0.32
上限值	0.80	1.50	1.50	1.10	1.40

(2) 约束函数

门式刚架结构的位移函数通常比强度、稳定约束更难满足,所以笔者只考虑位移约束的情况. 对于变截面门式钢架,柱顶的水平位移和横梁的跨中挠度($B/2$ 处)必须满足设计要求. 对于位移约束有多种方法求,包括拟荷载法^[13]、虚荷载法及虚功法等. 笔者运用虚功法来构造位移函数

$$g = \sum_i^N \int_0^{l_i} \left(\frac{F_x f_{xj}}{EA} + \frac{F_y f_{yj}}{GA} + \frac{M_z f_{zj}}{EI} \right) dx, \quad (8)$$

式中: g 表示位移约束函数; N 和 l_i 分别是第 i 个单元的长度和单元总数; F_x 、 F_y 、 M_z 分别表示外荷载产生的轴力、剪力、弯矩值; f_{xj} 、 f_{yj} 、 f_{zj} 分别表示在约束位移处作用单位力时产生的轴力、剪力、弯矩值; E 和 G 分别为材料的弹性模量和剪切模量,取 $E=2.0 \times 10^8 \text{ Pa}$, $G=7.9 \times 10^7 \text{ Pa}$; A 、 I 分别表示截面的面积、惯性矩.

(3) 优化目标函数

结构总重量通常是评价设计优劣的标准,因此这里以材料总重最轻作为优化目标. 目标函数与设计变量的关系可表达为

$$W = \rho \sum_{i=1}^N l_i \left(2 b_i t_{fi} + \frac{t_{wi}}{2} \sum_{j=1}^2 h_{wij} \right), \quad (9)$$

式中: ρ 为钢材密度,取为 7.85 t/m^3 ; h_{wi1} 和 h_{wi2} 为第 i 个单元两端的腹板高度.

因此,笔者抗风优化设计的数学模型为 search:

$$X = [h_{w1} \ h_{w2} \ h_{w3} \ h_{w4} \ h_{w5}], \quad (10)$$

minimize:

$$W(X_i) = \rho \sum_{j=1}^N l_j \left(2 b_j t_{fj} + \frac{t_{wj}}{2} \sum_{i=1}^5 X_i \right), \quad (11)$$

subjected to:

$$g_1 \leq g_1^U, g_2 \leq g_2^U, \quad (12)$$

式中: g_1 和 g_1^U 分别表示柱顶水平位移及其容许值; g_2 和 g_2^U 分别为跨中挠度及其容许值. 取 $g_1^U=0.01 \text{ m}$, $g_2^U=0.02 \text{ m}$.

3.2 OC 法

OC 法把数学中最优解应满足的库恩 - 塔克 (Kuhn-Tucker, K-T) 条件作为最优结构应满足的准则,然后再构造关于设计变量的迭代公式进行优化求解^[3].

首先按照 K-T 条件构造拉格朗日方程,将目标函数的求解转化成拉格朗日方程求最小值问题:

$$L(X_i, \lambda_k) = W(X_i) + \sum_{k=1}^m \lambda_k (g_k - g_k^U), \quad (13)$$

式中: L 表示拉格朗日函数; λ_k 为第 k 个约束对应的拉格朗日乘子; m 表示约束总数, $m=2$.

在极小值点,拉格朗日函数 L 对 λ_k 和设计变量 X_i 的梯度等于 0. 利用 K-T 条件令 L 对 X_i 微分得到

$$\frac{\partial W}{\partial X_i} + \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial X_i} = 0, \quad (14)$$

进一步可改写为:

$$- \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial W} = 1. \quad (15)$$

对上式两边同乘 X_i 并取 η 次根,然后用二项式定理展开,取线性项后得到的 OC 法迭代公式

$$X_i^{v+1} = X_i^v \left[1 + \frac{1}{\eta} \left(- \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial W} - 1 \right) \right]_v, \quad (16)$$

式中: $v+1$ 和 v 表示 2 个相邻的迭代步; η 为步长因子,用于控制递归的收敛性,取 $\eta=3.0$.

计算中,如果拉格朗日乘子等于 0,表示该约束为被动约束,对拉格朗日乘子方程的求解不起作用;如果拉格朗日乘子大于 0,则表示该约束为主动约束,拉格朗日方程求解时需要考虑该乘子.

在迭代的过程中,会不断出现新的设计变量值. 考虑到设计变量的变化 $X_i^{v+1} - X_i^v$ 会引起约束函数 $g_k^U - g_k^v$ 的变化,整合拉格朗日乘子值可得到线性方程组

$$\sum_{s=1}^m \lambda_s^v \left(\sum_{i=1}^N \lambda_k X_i^v \frac{\partial g_k}{\partial X_i} \frac{\partial g_s}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial W} \right)_v = - \sum_{i=1}^N X_i^v \left(\frac{\partial g_k}{\partial X_i} \right)_v - \eta (g_k^U - g_k^v). \quad (17)$$

式(16)和式(17)一起形成了 OC 法解决连续优化问题的理论基础.

4 优化结果与讨论

图 3 和图 4 分别为目标函数和设计变量随优

化迭代次数的变化,相应数值如表 3 所示. 由图表可见,该结构抗风优化计算的收敛速度较快,迭代 5 次时达到收敛状态. 这里截取了前 6 次迭代结果,计算总时长约 200 s. 将优化收敛后的材料总重和设计变量与表 2 给出的初值对比可以发现,通过优化使材料总重减少了 23. 2%,设计变量的降低幅度为 44. 5% ~ 73. 7%. 因此,通过优化设计使结构在保证抗风安全性的同时达到一定的经济效益.

同时,由表 3 可以看出,优化后截面 1 和截面 5 的腹板高度为尺寸下限值,而截面 2 到截面 4 的腹板高度介于上、下限值之间;截面 2 和截面 3 的设计变量值较其它截面更大.

图 5 给出了优化后的门式刚架示意图. 可以看出,刚架柱的尺寸自柱脚往柱顶逐渐增加,而刚架梁的尺寸在梁端最大而跨中较小,与变截面门式刚架的力学特性和设计要点较为符合^[14].

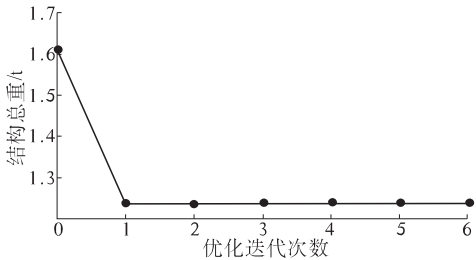


图 3 结构总重随迭代次数的变化
Fig. 3 Variation of total weight with iteration

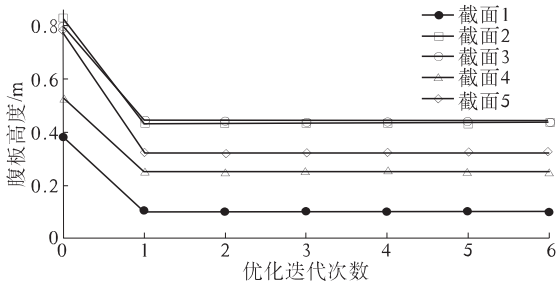


图 4 设计变量随迭代次数的变化
Fig. 4 Variation of design variables with iteration

表 3 不同迭代次下的结构总重和设计变量

Tab. 3 Total weights and design variables in iterations

迭代次数	截面 1/m	截面 2/m	截面 3/m	截面 4/m	截面 5/m	总重/t
0(初值)	0.380 0	0.830 0	0.800 0	0.530 0	0.780 0	1.612 5
1	0.100 0	0.435 8	0.441 9	0.247 6	0.320 0	1.238 7
2	0.100 0	0.416 6	0.456 6	0.252 2	0.320 0	1.238 4
3	0.100 0	0.425 3	0.448 8	0.248 2	0.320 0	1.237 2
4	0.100 0	0.427 8	0.450 5	0.248 0	0.320 0	1.237 9
5	0.100 0	0.428 3	0.450 8	0.248 0	0.320 0	1.238 0
6	0.100 0	0.428 4	0.450 9	0.248 0	0.320 0	1.238 0

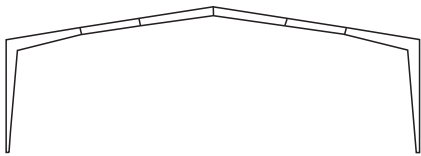


图 5 优化后的门式刚架示意图
Fig. 5 The portal frame after optimization

5 结论

(1)将多目标等效静力风荷载用于优化设计,可以保证每个响应均得到与随机响应峰值基本一致的等效值,避免了单目标等效静力风荷载对优化精度的影响.

(2)采用 OC 法进行变截面门式刚架的抗风优化,具有收敛速度快、优化效果好等优点,基本上前 5 次迭代后达到收敛,材料总重降低了约 23. 2%,在保证结构抗风安全性的同时节约了钢材,产生了经济效益.

(3)设计变量的取值随着优化迭代而发生改变,其中 2 个设计变量取值为下限值,优化收敛后刚架柱的腹板高度自柱脚往上不断增加,而刚架梁的两端腹板高度较大,符合变截面门式刚架的设计特点.

参考文献:

[1] 王元清,石永久,陈宏,等. 现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J]. 建筑结构学报, 2002, 23 (1): 26 - 31.

[2] 中国建筑金属结构协会建筑钢结构委员会. CECS102: 2002, 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2003.

[3] CHAN C M. An optimality criteria algorithm for tall steel building design using commercial standard sections[J]. Structural Optimization, 1992, 5(1/2): 26 - 29.

[4] 黄友钦,王艳萍,傅继阳,等. 基于齿形法的空间

桁架结构抗风优化[J]. 郑州大学学报:工学版, 2013, 34(5): 22-25,37.

[5] JANG S, LU L W, SADEK F. Database-assisted wind load capacity estimates for low-rise steel frames [J]. Journal of Structure Engineering, 2002, 128 (12): 1594 - 1603.

[6] PHAN D T, LIM J B P, MING C S Y, et al. Optimization of cold-formed steel portal frame topography using real-coded genetic algorithm [J]. Procedia Engineering, 2011(14): 724 - 733.

[7] 吴剑国,曹曦,龚铭,等. 改进的离散复合形法与门式刚架结构优化设计[J]. 同济大学学报, 2002, 30(2): 164 - 168.

[8] 赵彦革,何广乾. 变截面门式刚架斜梁的优化设计[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 70 - 74.

[9] 傅继阳,钟亮,黄友钦,等. 基于量子粒子群算法的门式刚架结构抗风优化[J]. 西安交通大学学

报, 2013, 48(5): 845 - 850.

[10] 吴玖荣,董超超,徐安,等. 大跨度变截面门式刚架抗风优化设计研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2): 69 - 74.

[11] 陈波,杨庆山,武岳. 大跨空间结构的多目标等效静风荷载分析方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 62 - 67.

[12] 陈波,李明,杨庆山. 基于风振特性的多目标等效静风荷载分析方法[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 152 - 157,164.

[13] WANG F W, CHAN S L. Optimization and sensitivity analysis of space frames allowing for large deflection [J]. Engineering Structures, 2006, 28 (10): 1395 - 1406.

[14] 张其林. 钢结构设计系列丛书轻型门式刚架[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 2006.

Wind Effect Optimization of Portal Frames with Varying Sections
Based on ESWLs for Multi-targets

WANG Yan-ping, HUANG You-qin, WU Jiu-rong, TANG Yan-teng

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

Abstract: The light-weight portal frames are commonly used in single floor industrial buildings, and wind load is one of the most important design loads. However, previous studies on structural wind effect optimization only considered the equivalent static wind loads (ESWLs) for a single-target, which might cause inaccurate results under multiple constraints. In this paper, the ESWLs for multi-targets are constructed based on the database of wind tunnel tests, and the Optimum Criterion (OC) method is adopted to optimize the wind effect of a portal frame with varying sections. The height of web plates of the joist steel are selected as the design variables, the minimum weight of steel is the objective under the constraints of horizontal displacement at the column top and the vertical deflection in the mid-span. The code is written on the platform of MATLAB. Studies show that constrained displacements under ESWLs for multi-targets are consistent with the peak random displacements. The optimization makes the total weight decrease by 23.2% , generating obvious economic benefits. Moreover, the optimized sectional dimensions conform to the mechanical characteristics of portal frames.

Key words: portal frames with varying sections; wind effect optimization; ESWLs for multi-targets; OC