

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0175-05

门式刚架轻钢厂房屋盖竖向风振等效静力风荷载研究

梁德志, 陈雪峡

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

摘 要: 轻型门式钢架结构由于具有质量轻、柔性大、阻尼小的特性, 使得其比常见的低矮建筑对风荷载更为敏感。目前分析低矮房屋背景分量等效静力风荷载较好的方法是荷载响应相关方法(LRC 法), 但是由于其具有计算繁琐、与响应位置和类型较复杂等不足而难于直接应用于实际工程。该文应用一种简化的 LRC 法-荷载升力相关法(LLC 法)求解门式刚架结构的背景分量等效风荷载。结合具体的工程算例, 采用有限元软件建立不同屋盖跨度变截面门式刚架结构的实体模型, 选取檩条与屋架的交接处作为施加脉动风荷载的节点, 求解结构在最大升力情况下的等效静力风荷载, 并将结果与按荷载规范计算所得风载进行对比分析。研究表明: 门式刚架轻钢厂房屋盖受竖向脉动风的影响不容忽视, 在设计中需予以考虑。

关键词: 门式刚架; 轻钢厂房屋; 等效静力风荷载; LRC 法; LLC 法; 风振响应

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S040

EFFECTIVE STATIC WIND LOAD FOR THE ROOF OF LIGHT-WEIGHT STEEL STRUCTURE WITH GABLE FRAMES DUE TO VERTICAL WIND

LIANG De-zhi, CHEN Xue-xia

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: A portal frame structure is more sensitive to wind loads than the common low-rise buildings, because of its light weight, great flexibility, and lower damping characters. At present, one of the best methods to analyze the background effective static load of the common low-rise building is Load-Response-Correlation method (LRC method). However, it is difficult to be directly applied to engineering practice by the insufficient in its complicated computation, complex response to location and type. This paper used a simplified LRC method-Load-Lift-Correlation method (LLC method) to solve the background effective static load of the light-weight steel structure. Combining with a specific project example, we used the finite element software to establish different roof span portal frame structure models, selected the junction of the purline and roof as the research node of reflecting vertical wind-induced vibration response, solved the background effective static load of the light-weight steel structure in the maximum lift, and contrasted with the load which analyzed by the load code for the design of building structures. Research shows that, the effect of vertical wind-induced vibration to the portal frame structure cannot be ignored and should be taken into account in the design.

Key words: gabled frames; light-weight steel structure; effective static wind load; LRC method; LLC method; wind-induced dynamic responses

随着科技的发展和施工工艺的进步, 各种外形美观、结构新颖的大跨度门式刚架得到了广泛的应

用。这种建筑结构相对跨度比较大, 结构重量轻, 施工工期也相对较短, 具有一定的优越性。

收稿日期: 2012-05-01; 修改日期: 2013-01-07

通讯作者: 梁德志(1955—), 男, 辽宁北镇人, 教授, 硕士, 从事结构分析与设计理论研究(E-mail: liangdezhi2000@163.com)。

作者简介: 陈雪峡(1986—), 女, 山东菏泽人, 硕士生, 从事轻型门式刚架的脉动风致响应分析研究(E-mail: 602290924@qq.com)。

由于此类结构一般比较低矮,处于大气边界层底部,风速梯度较大,紊流度也较大,结构所处的风场十分复杂。风流经刚架时,会在屋面的大部分区域产生强大的吸力,并引起屋面的风振。若从位移风振系数的角度出发,研究竖向风振对轻型门式刚架结构的影响,可得出竖向位移风振系数在 1.20 左右浮动,在设计中应给予考虑^[1]。

所谓等效静力风荷载是指将该荷载以静力形式作用在结构时产生的响应与实际风荷载产生的动力最大响应相同^[2]。其理论的基本思想是将脉动风动力效应以与其等效的静力形式表达出来,从而将复杂的动力分析问题转化为易于被设计人员接受的静力分析问题。

Holmes J D 将结构在风荷载作用下的响应分为平均响应、背景响应和共振响应^[3]。平均响应由结构静力学的方法求解。当脉动风荷载频率与结构自振频率相近时,一般引起共振响应,而对于引起结构背景响应的风载,由于其频率低于结构的自振频率,本质是准静态的,可以通过准静力方法分析^[4]。

目前确定低矮房屋等效静力风荷载背景分量的最好的方法之一是荷载响应相关系数法(LRC)^[5-6]。此种方法能较准确计算背景响应对应的等效静力风荷载,而且在保证最大响应等效的同时,还能保证结构其他点的响应最接近实际可能发生的最不利情况。但由于结构的背景响应类型与分布形式有着很大的关系,这样以来就会缺乏明显的规律性,工程中实际应用起来较为繁琐,用 LRC 法求解等效静风荷载的前提是对位置的选取,实际计算时如果选定的位置不同就会得到不同的响应,而目前对于这些响应的选取方法或者规则还尚不明确。另外大多数情况下还要结合风洞试验,对仪器设备的要求也比较严格。

本文应用一种在 LRC 的基本原理不变的基础上进行简化的方法——荷载-升力相关法(LLC 法)^[7]求解轻型门式刚架结构在最大升力情况下的等效静力风荷载,并结合具体的工程实例,建立变截面门式刚架结构的实体模型,进行有限元分析。将得到的等效静力风荷载与按现行荷载规范计算所得风荷载进行对比分析,研究结构在竖向脉动风荷载作用下的响应,并针对风荷载提出此类结构在设计中应注意的问题。

1 LLC 理论公式

对于轻型门式刚架结构,在风荷载的作用下,屋盖会产生垂直向上的升力。LLC 法的实质就是把 LRC 法中要得到的响应固定为升力,在遵循 LRC 法基本原理不变的基础之上进行简化^[5]。因为风压的采取是由所选定的采样点得到的,这样就没有了结构的影响线系数的困扰,也不会因为出现多个等效风荷载值而无法取舍而感到困扰。实际应用起来较为简单方便。

假定结构的风压值是由所选定的 n 个采样点得到的。那么屋面上所受到的总的升力为:

$$f = \sum_{i=1}^n \bar{p}_i \cdot \bar{A}_i = \sum_{i=1}^n p_i b_i \quad (1)$$

式中: p_i 表示采样点 i 位置的风压; $\bar{p}_i$ 为风压的平均值,点表示点乘:

$$b_i = A_i \cos(\theta) \quad (2)$$

式中: A_i 表示 i 位置风压控制的面积; θ 为 i 位置的屋面的坡度。

则屋面受到的升力的平均值为:

$$\bar{f} = \sum_{i=1}^n \bar{p}_i b_i \quad (3)$$

升力的脉动值可以用下式计算:

$$\tilde{f} = \sum_{i=1}^n \tilde{p}_i b_i \quad (4)$$

对式(4)先平方再取统计意义,可得到升力的脉动均方根:

$$\sigma_f = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{p_{ij}}^2 b_i b_j \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{p_{ij}}^2$ 为 i 与 j 位置风载的协方差; b_j 为 j 位置风压控制的面积,而 i 位置风载与升力的协方差可由下式计算:

$$\sigma_{p_i, f}^2 = \overline{p_i \cdot f} = \sum_{j=1}^n \sigma_{p_{ij}}^2 b_j \quad (6)$$

若定义 $\rho_{p_i, f}$ 为 i 位置的风载与升力的相关系数,即若定义:

$$\rho_{p_i, f} = \sum_{j=1}^n \sigma_{p_{ij}}^2 b_j / (\sigma_{p_i} \sigma_f) \quad (7)$$

则式(6)中的 $\sigma_{p_i, f}^2$ 又可以表示为:

$$\sigma_{p_i, f}^2 = \rho_{p_i, f} \sigma_{p_i} \sigma_f \quad (8)$$

同样式(5)也可以表示为:

$$\sigma_f = \sum_{i=1}^n b_i (\sum_{j=1}^n b_j \sigma_{p_{ij}}^2) / \sigma_f \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)有:

$$\sigma_f = \sum_{i=1}^n b_i (\rho_{p,f} \sigma_{p_i}) \quad (10)$$

如若定义:

$$P_{e,i} = g \rho_{p,f} \sigma_{p_i} \quad (11)$$

可说明对于任意 i 位置, 如果作用了 $p_{e,i}$ 的静力风荷载将会产生 $g\sigma_f$ 的升力, 其中 g 为保证因子, 对于坡屋面建议取 $g=3.5$, 也就是说 $p_{e,i}$ 就是升力 $g\sigma_f$ 的背景响应等效风荷载。

式(11)也可以表示为:

$$P_{e,i} = g \sum_{j=1}^n \sigma_{p_{ij}}^2 b_j / \sigma_f \quad (12)$$

而屋盖上受到的最大升力就可以表示为:

$$\hat{f} = \bar{f} + g\sigma_f \quad (13)$$

此时相对应最大升力的等效静风荷载为:

$$P_{e,i}(\hat{f}) = \bar{p}_i + P_{e,i} = \bar{p}_i + g \rho_{p,f} \sigma_{p_i} \quad (14)$$

2 计算结果及分析

2.1 模型建立

本文研究的是柱脚固接的单跨双坡变截面门式刚架单层工业厂房结构。厂房的柱距为 6m, 檐口高 9m, 屋面坡度为 1:10。恒荷载取 0.3kN/m², 活荷载 0.5kN/m², 风荷载 0.5kN/m², 地貌类别为 B 类, 地面粗糙度系数 $K=0.00215$ 。分析时取弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ MPa, 泊松比为 0.3, 梁柱单元选择 beam189, 质量单元选择 Mass21。屋面板、檩条与围护结构的质量简化后施加在相对应的节点, 刚架的自重由程序自动计算。

LLC 法主要考虑的是风荷载与升力之间的关系, 故分别选取跨度为 30m 和 36m 的轻型门式刚架屋盖结构进行最大升力情况下等效静力风荷载的研究。计算模型和具体参数如图 1 和表 1 所示。

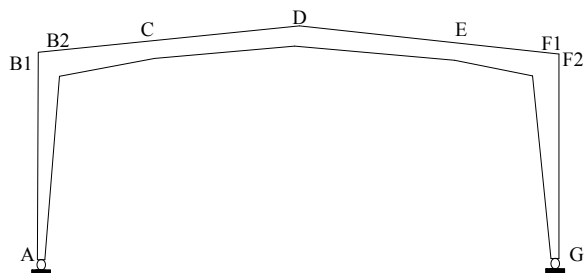


图 1 变截面门式刚架轻钢厂房计算模型
Fig.1 Finite element model of gabled frame

表 1 变截面门式刚架计算模型几何参数 /mm
Table 1 Geometric parameters of tapered portal frames

节点编号	不同屋盖跨度结构的几何模型	
	30m	36m
A	400×200×6×10	450×230×8×10
B1	900×200×6×10	950×230×8×10
B2	900×200×6×10	950×230×8×10
C	600×200×6×8	650×230×6×8
D	600×200×6×8	650×230×6×8

2.2 结构分析

由脉动风压功率谱乘以结构上各个节点相应的风控面积, 可得到节点随机荷载。本文采用的水平脉动风速谱是不随高度变化的 Davenport 谱, 竖向脉动风速谱采用的是 Panofsky 谱, 结合风速谱与风压谱的转换公式, 可得到风压谱的数学函数表达式为^[8]:

$$S_{HW}(x, z, n) = 16K\bar{w}_z \frac{\bar{v}_{10}^2}{\bar{v}_z^2} \frac{x^2}{n(1+x^2)^3} \quad x = \frac{1200n}{\bar{v}_{10}} \quad (15)$$

$$S_{VW}(x, z, n) = 24K\bar{w}_z^2 \frac{\bar{v}_{10}^2}{\bar{v}_z^2} \frac{x}{n(1+4x)^2} \quad x = \frac{nz}{\bar{v}_{10}} \quad (16)$$

其中: K 为地面粗糙度系数, 取 $K=0.00215$; $\bar{v}_{10}$ 为离地面 10m 高度处的平均风速; z 为所选点距离地面的高度; $\bar{w}_z$ 为 z 高度处的平均风压; $\bar{v}_z$ 为 z 高度处的平均风速; n 为风的频率。

脉动风荷载的空间相干函数主要是为了描述脉动风压的空间相关性而提出的。近年来较为常用的计算公式之一是 Shiotani 在试验的基础上提出的只与两点间距离相关的简化计算公式:

$$coh(i, j, w) = \exp \left[- \left(\frac{(x_i - x_j)^2}{L_x^2} + \frac{(z_i - z_j)^2}{L_z^2} \right) \right] \quad (19)$$

其中: L_x , L_z 分别表示为顺风向和垂直向的空间相干性衰减因子, 建议取 $L_x=50$, $L_z=60$ 。

目前工程中都把脉动风看作是接近平稳的随机过程, 风的记录分析也表明, 每一个样本函数的概率分布几乎相等, 因而脉动风时常作为各态历程过程来近似考虑^[9]。而对于零均值的随机过程, 包含各态历程过程, 相关函数与根方差的关系:

$$\sigma_X = \sqrt{E(X^2)} = \sqrt{R_X(0)} \quad (20)$$

由于本工程是选取檩条与屋架的交接处作为施加脉动风荷载的节点, 而且檩条与檩条之间的间距和柱距都是相等的, 即选取的每一个节点所代表的风压面积是相等的。由此并考虑到式(20)、式(11)或式(12)可以进一步简化为:

$$P_{ei} = g \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2} \tag{21}$$

2.3 计算结果

采用有限元软件建立变截面门式刚架结构的实体模型，通过模态分析，可提取结构前五阶振型的自振频率，将频率转化为周期，具体数据见表 2。

表 2 结构前五阶振型的自振周期 /s
Table 2 The first five vibration cycles of the structure

振型	不同屋盖跨度结构的自振周期	
	30m	36m
振型 1	1.002	1.146
振型 2	0.442	0.504
振型 3	0.199	0.207
振型 4	0.100	0.114
振型 5	0.064	0.071

通过有限元模拟，对算例进行脉动风下的随机振动分析，并结合平均风压下的静力分析，得到本工程在最大升力情况下的等效静力风荷载。

为方便对两种不同跨度结构的数据进行对比分析，故选取屋盖的中心点为 x 轴坐标原点，左半跨为负，右半跨为正。两种门式刚架屋盖结构在最大升力作用下的等效静力风荷载如表 4 所示。并将得到的等效风荷载与按规范计算所得值进行对比分析见图 2 和图 3，两者比值见表 5。

表 3 最大升力下屋盖的等效风荷载 /kN
Table 3 Equivalent static wind load in the maximum lift

x 轴坐标	不同屋盖跨度	
	30m	36m
-16.5	—	3.117
-15.0	—	3.137
-13.5	3.046	3.157
-12.0	3.065	3.175
-10.5	3.083	3.193
-9.0	3.100	3.206
-7.5	3.116	3.225
-6.0	3.132	3.241
-4.5	3.146	3.255
-3.0	3.160	3.269
-1.5	3.173	3.281
0	3.186	3.294
1.5	2.714	2.819
3.0	2.703	2.809
4.5	2.692	2.796
6.0	2.679	2.784
7.5	2.666	2.771
9.0	2.652	2.757
10.5	2.637	2.742
12.0	2.621	2.727
13.5	2.605	2.711
15.0	—	2.696
16.5	—	2.676

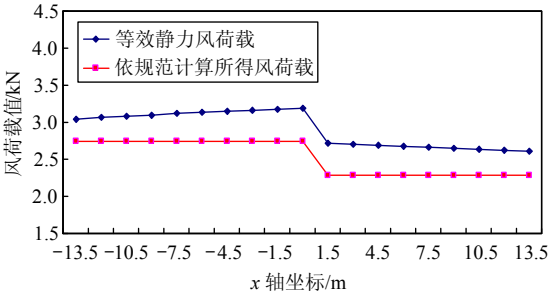


图 2 最大升力情况下 30m 跨屋盖结构的等效风荷载与依规范计算所得风荷载

Fig.2 The equivalent static wind load and the load calculated by the code of the structure span is 30m

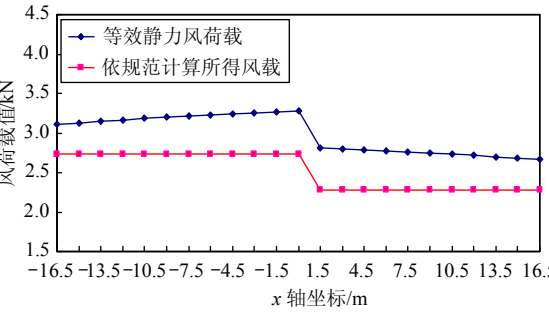


图 3 最大升力下 36m 跨结构的等效风荷载与依规范计算所得风荷载

Fig.3 The equivalent static wind load and the load calculated by the code of the structure span is 36m

表 4 不同跨度屋盖结构等效静风荷载与按规范所得风荷载的比值

Table 4 Ratio of equivalent static wind load in maximum lift and calculated by the code of different span structure

x 轴坐标	不同屋盖跨度	
	30m	36m
-16.5	—	1.138
-15.0	—	1.146
-13.5	1.127	1.155
-12.0	1.136	1.161
-10.5	1.143	1.168
-9.0	1.146	1.174
-7.5	1.154	1.180
-6.0	1.158	1.185
-4.5	1.163	1.189
-3.0	1.174	1.199
-1.5	1.185	1.220
0	1.216	1.245
1.5	1.213	1.236
3.0	1.199	1.231
4.5	1.195	1.226
6.0	1.189	1.219
7.5	1.183	1.215
9.0	1.177	1.212
10.5	1.172	1.203
12.0	1.163	1.196
13.5	1.157	1.189
15.0	—	1.182
16.5	—	1.173
平均值	1.171	1.193

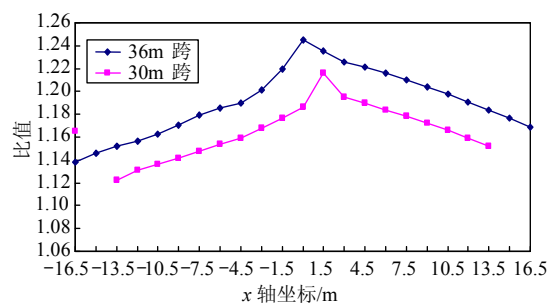


图4 不同跨度结构等效静风荷载与按规范所得值的比值

Fig. 4 Ratio of equivalent static wind load in maximum lift and calculated by the code of different span structure

3.3 分析与讨论

1) 在风速功率谱中, 风的卓越周期一般在 20s~60s。当结构的周期在 20s~1s 时, 风振产生的影响最为显著, 在 1s~0.5s 时影响次之^[8]。由表 2 可知结构的第一阶自振周期皆大于 1s, 在风振影响显著的范围之内, 说明结构在脉动风作用下的风振现象不可忽略。

2) 由表 3 可知在同一个 x 轴坐标点, 36m 跨屋盖结构的等效风荷载皆大于 30m 跨的。说明随着屋盖跨度的增加, 结构的风致响应也越来越明显。表明屋盖跨度的改变会对轻型门式刚架工业厂房的风振响应分析产生影响。

3) 由图 2 和图 3 可知在脉动风作用下的等效静力风荷载分布并不均匀, 屋盖结构的迎风面节点等效风荷载值较大, 其中位于框架梁顶部节点的荷载值最大, 背风面侧次于迎风面侧。且屋盖结构上每个节点的等效静风荷载值都明显高于规范所得值^[10]。表明在实际工程中进行此类结构的设计时, 按照规范不考虑风动力响应对门式刚架的影响是偏于不安全的, 应考虑脉动风荷载对此类结构的影响。

4) 通过表 4 可知由 LLC 法求解的等效静力风荷载与按规范计算所得值的比值, 对于 30m 跨和 36m 跨的屋盖结构分别在 1.171 左右和 1.193 左右浮动。说明此类结构的脉动风致响应现象达到了不可忽视的地步, 这与文献[1]的结论是一致的。

3 结论和建议

由于门式刚架轻钢结构本身自重较轻、柔度较大, 再加上阻尼小、自振频率低的特性, 使得此类结构在脉动风作用下风振响应不可忽略。对于 30m 跨和 36m 跨的轻型门式刚架屋盖, 若按照本文对各参量进行取值, 则结构在脉动风作用下的等效风荷载值与按规范计算所得风载的比值在 1.17 左右和

1.19 左右浮动。并且随着屋盖跨度的增加, 结构的风致响应也越来越明显。依据我国现行荷载规范和门式刚架轻型房屋钢结构规程, 不考虑风动力响应对轻型门式刚架结构的影响是偏于不安全的, 在设计中应考虑脉动风荷载对此类结构的影响。

参考文献:

- [1] Dezhi Liang, Min Huang. Study on vertical wing-induced vibration responses for portal frame structures [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011: 71/72/73/74/75/76/77/78: 3605—3609.
- [2] 陈波, 武岳. 大跨度屋盖结构等效静风荷载分析方法及应用[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(4): 95—113.
Chen Bo, Wu Yue. Large span roof structure equivalent static wind load analysis methods and applications [J]. Wuhan University of Technology Journal, 2008, 30(4): 95—113. (in Chinese)
- [3] Holmes J D. Effective static load distributions in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aero Dynamics, 2002, 90: 91—109.
- [4] 陈波, 武岳, 沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静力风荷载背景分量的确定方法探讨[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 21—27.
Chen Bo, Wu Yue, Shen Shizhao. Determine the method of large-span roof structure equivalent static wind load background component [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 21—27. (in Chinese)
- [5] 沈国辉, 孙炳楠, 楼文娟. 屋盖结构背景响应等效风荷载的一种简化算法[J]. 工程力学, 2010, 23: 163—168.
Shen Guohui, Sun Bingnan, Lou Wenjuan. The roof structure backgrounds response equivalent wind load of a simplified algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2010, 23: 163—168. (in Chinese)
- [6] Holmes J B. Effective static load distributions in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 91—109.
- [7] Kasperski M. The LRC [load-response-correlation] method a general method of estimating unfavorable wind load distribution for linear and non-linear structural behavior [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41/42/43/44: 1753—1763.
- [8] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985: 33—36.
Zhang Xiangting. Manual of wind load theory and wind resistant on engineering structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985: 33—36. (in Chinese)
- [9] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985: 21—23.
Zhang Xiangting. Calculation of wind pressure and wind-induced vibration on structures [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985: 21—23. (in Chinese)
- [10] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范(2006 版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
GB 50009-2001, Load code for the design of building structures (2006) [S]. Beijing: China Architecture, 2006. (in Chinese)