

# 轻型门式刚架结构的等效静力风荷载

李元齐<sup>1</sup>, 景晓昆<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401)

**摘要:** 针对现行规范对轻型门式刚架结构风荷载的取值没有考虑脉动风荷载空间相关性的情况, 分别采用荷载响应相关法和国外风荷载规范求得门式刚架结构风荷载的分布和大小, 基于与现行规范计算结果的对比分析, 提出轻型门式刚架结构等效静力风荷载分布的估计方法. 基于刚性模型同步测压风洞试验测得的门式体形模型表面风荷载时程数据, 建立了轻型门式刚架结构有限元整体模型. 通过按建议方法求出的风致响应与实际动力响应极值的对比, 验证了建议的风荷载分布的合理性, 计算结果表明采用该方法得到的风致响应更接近实际动力响应极值, 且表达形式简洁, 方便工程设计使用.

**关键词:** 轻型门式刚架结构; 动力时程分析; 荷载响应相关法; 等效静力风荷载

**中图分类号:** TU392.5

**文献标志码:** A

## Equivalent Static Wind Load on Light-weight Steel Structure with Gabled Frames

LI Yuanqi<sup>1</sup>, JING Xiaokun<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The estimation of wind load on light-weight steel structure with gabled frames in the current code doesn't involve the spatial correlation of fluctuating wind load. The distribution and magnitude of wind load on light-weight steel structure with gabled frames are obtained with load response correlation (LRC) method according to international wind load codes and standards. Compared with the calculation results based on the current code, the estimation of equivalent static wind load on light-weight steel structure with gabled frames is proposed. Based on wind load time series obtained from the synchronous multi-pressure measurement on a rigid gable roof building model, a finite element model for light-weight steel structure with gabled frames is established. Calculation

results show the wind load effects obtained by the proposed estimation method are much closer to the extreme values of dynamic time history analysis, and the expression is concise and practicable.

**Key words:** light-weight steel structure with gabled frames; time history analysis; load response correlation (LRC) method; equivalent static wind load

轻型门式刚架结构已广泛应用于工业和商业建筑中, 但由于构件重量轻、相对薄柔, 风荷载成为此类结构设计的重要荷载之一, 乃至控制荷载. 目前, 现行规范《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》<sup>[1]</sup> CECS102: 2002(以下称“《门规》”) 对轻型门式刚架结构风荷载的取值采用的是阵风系数与平均风荷载乘积的形式, 该方法虽简单明了, 但用平均风荷载的分布表示等效静力风荷载, 显然没有考虑脉动风荷载的空间相关性, 不能有效反映主体刚架在实际风压不均匀分布及脉动效应下的不利效应. 因此如何得到合理的且便于工程设计使用的等效静力风荷载是轻型门式刚架结构抗风设计的重要问题.

鉴于此, 本文分别采用荷载响应相关法和国外风荷载规范求得门式刚架结构风荷载的分布和大小, 基于与《门规》计算结果的对比分析, 提出门式刚架结构的等效静力风荷载分布的估计方法, 在此基础上, 通过按建议方法求出的风致响应与实际动力响应极值的对比, 验证了本文建议的风荷载分布的合理性, 方便适用于工程设计中.

## 1 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 风洞进行了门式体形刚性模型测压试验. 模型缩尺

收稿日期: 2013-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(50978192); 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE09-B-01)

第一作者: 李元齐(1971—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为冷弯型钢结构及结构抗风. E-mail: liyq@tongji.edu.cn

通讯作者: 景晓昆(1983—), 女, 工学博士, 主要研究方向为轻型钢结构设计理论. E-mail: jingxk@126.com

比为1:40,试验风速比为1:3,根据位移与速度的关系,可得时间缩尺比为3:40.雷诺数是表征惯性力与粘性力的比值,由于实验室中满足雷诺数要求非常困难,且雷诺数对门式体形这类有棱有角的低层房屋影响非常小,故本次试验中不考虑雷诺数的影响.

模型屋面半坡高度被视为参考高度,该处的风速被视为参考风速.采用尖塔-粗糙元的方法,成功模拟出《建筑结构荷载规范》<sup>[2]</sup>GB50009—2001(以下

简称“中国规范”)定义的B类地貌.图1给出了模拟得到的平均风速剖面 and 湍流强度剖面以及脉动风速谱.图中, $z$ 为离地面的高度; $V(z)$ 为高度 $z$ 处的风速; $V_{\text{ref}}$ 为参考高度处的风速; $I(z)$ 为高度 $z$ 处的湍流强度.模拟得到的平均风速剖面指数为0.16,模型屋面半坡高度处湍流强度约为0.22.风洞试验模拟的参考高度处的脉动风速谱与Von Karman谱基本吻合,该处的湍流积分尺度约为1.15 m.

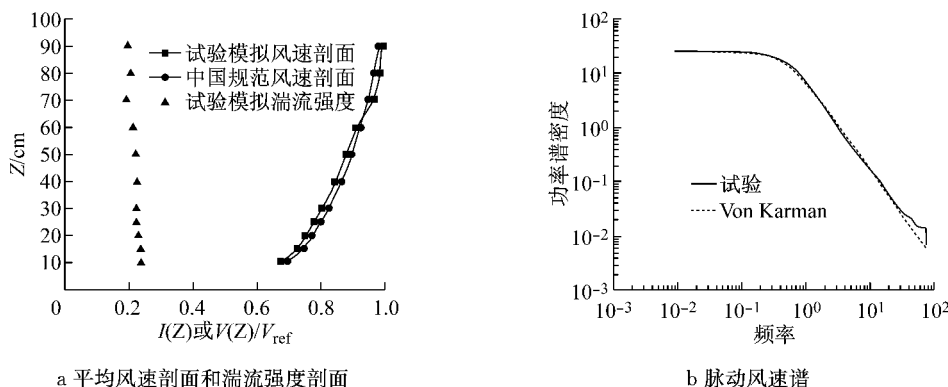


图1 风洞中模拟的B类风场特性

Fig.1 Simulated wind field for terrain category of B

模型尺寸及表面测点布置如图2所示.定义垂直吹向屋脊的风向角为 $0^\circ$ 风向,试验风向角间隔取为 $45^\circ$ ,按顺时针方向增加,共8个风向角.各点同步采样频率为312.5 Hz.

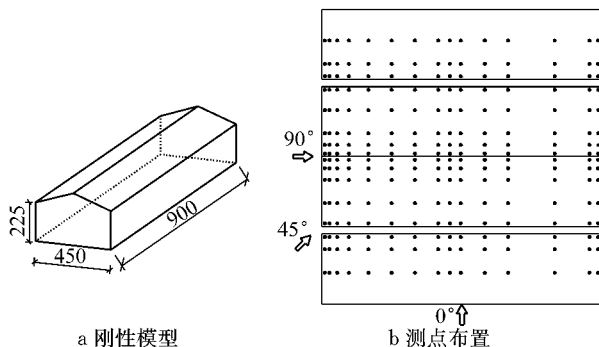


图2 刚性模型和测点布置

Fig.2 Rigid model and layout of pressure taps

图3分别给出模型在 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 风向下平均风压系数和脉动风压系数的分布.所有风向下,屋面全部为负压,在屋面角部、边缘处和屋脊处存在较高的负压; $0^\circ$ 风向时,迎风墙面全部为正压,背风墙面全部为负压, $45^\circ$ 风向时,迎风墙面几乎全部为正压,背风墙面全部为负压且其值较高, $90^\circ$ 风向时,两侧墙面全部为负压且分布对称.试验模型表面的风压

分布规律与相近模型表面风压分布规律是相似的<sup>[3]</sup>.

需要说明的是,本文试验是在新版《建筑结构荷载规范》<sup>[4]</sup>GB50009—2012发布前完成的.新版规范对B类风速剖面指数由0.16修改为0.15,适当降低了标准场地类别的平均风荷载,但对于本文利用试验数据进行理论和数值分析的影响较小.综合考虑,本次试验数据可以用于进一步的理论和数值分析中.

## 2 分析模型

风洞试验门式体形模型的原型为单跨双坡工业厂房,门式刚架间距为6 m.为求简化与典型性,对门式刚架设计做如下规定:刚架梁柱、檩条和墙梁等构件采用Q235,柱脚节点采用铰接形式,刚架梁柱及抗风柱截面均采用实腹式等截面的焊接工字钢.经过初步结构设计,确定刚架梁柱截面尺寸为 $450 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ,抗风柱的截面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,檩条选用带卷边的Z160  $\text{mm} \times 70 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 冷弯薄壁型钢,檩距1.5 m.墙梁截面与檩条截面相同,梁距1.5 m.支撑为 $\Phi 20$ 圆钢.

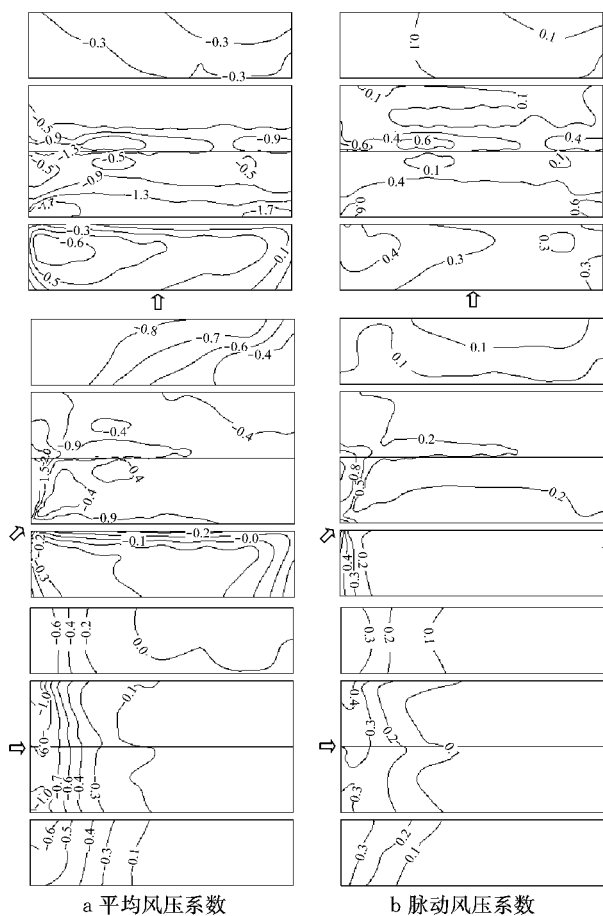


图 3 平均和脉动风压系数分布

Fig.3 Mean and fluctuating pressure coefficient distribution

采用 ANSYS 有限元软件建立了轻型门式刚架的有限元整体模型,如图 4 所示. 刚架梁柱、抗风柱、檩条和墙梁都采用 BEAM44 模拟,支撑采用 LINK10 模拟. 为了能施加风荷载,需在有限元模型中建立屋面板、墙面板和连接件. 屋面板和墙面板采用 SHELL63 模拟,连接件只起到传递风荷载的作用,采用 BEAM4 模拟. 因为不考虑结构和构件的破坏,每个构件的应力状态都处于弹性状态,所有构件

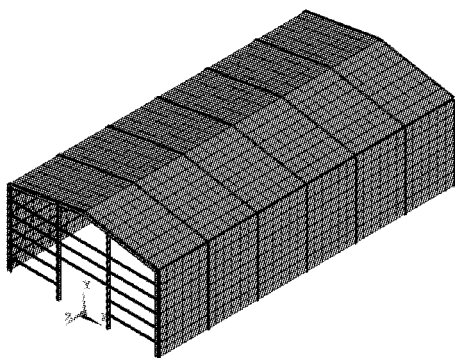


图 4 有限元整体模型

Fig.4 The whole finite element model

的本构模型均采用理想弹性模型.

用时域方法计算风致响应的参数有:①基本风压:0.55 kPa(重现期 50 年,按上海地区考虑);②时间步长:0.034 7 s(考虑风洞试验的采样频率);③结构阻尼比:0.02;④体系为经典阻尼体系,采用瑞利阻尼.

本征正交分解是一种有效的分析和重建建筑结构表面随机风场的方法<sup>[5]</sup>. 模型表面原始风压场经过本征正交分解,可以用很少的前几阶本征模态就可以很好地重建风压场,提高了计算效率<sup>[6]</sup>. 同时该方法不仅解决了风压测点与结构有限元模型加载节点的不匹配问题,还可以有效保持模型所测得风场在时间和空间上的相关性,可以作为风致响应有限元计算中相应表面节点的输入风荷载<sup>[7]</sup>. 本文根据风洞试验中模型已有测点的风压时程,通过本征正交分解获得有限元模型表面各节点的风压时程. 限于篇幅,本文以 0°风向角的风洞试验结果对门式刚架结构的等效静力风荷载分布估计进行研究.

### 3 等效静力风荷载分布估计

#### 3.1 基于荷载响应相关的等效静力风荷载分析

荷载响应相关法(load response correlation, LRC)是由学者 Kasperski<sup>[8]</sup>提出,该方法考虑了脉动风荷载的空间相关性,利用荷载与响应之间的相关系数来确定实际可能发生的最不利极值风压分布. 对于  $i$  点响应的等效静力风荷载  $p_{ri}$  为

$$p_{ri} = \bar{p}_k + g_B \rho_{ri, pk} \sigma_{pk} \quad (1)$$

式中:  $g_B$  表示为背景响应的峰值因子,本文取 3.5<sup>[8-9]</sup>;  $\bar{p}_k$  和  $\sigma_{pk}$  分别表示  $k$  点风荷载的平均值和标准差;  $\rho_{ri, pk}$  表示  $k$  点脉动风荷载和  $i$  点响应的荷载响应相关系数,即:

$$\rho_{ri, pk} = \sum_{l=1}^m a_{il} \sigma_{pk} / \sigma_{pk} \sigma_{ri} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{pk}$  表示  $k$  点和  $l$  点的脉动风荷载协方差;  $a_{il}$  表示影响系数;  $\sigma_{ri}$  为  $i$  点响应的标准差.

门式刚架结构的单榀刚架计算模型如图 5 所示,共 20 个节点,作用在每个节点的风压是根据单榀刚架计算宽度(取从属宽度)内的实际测压点的风压通过面积平均计算得到. 控制点有 5 个,包括柱脚 A 和 E,梁柱拼接节点 B 和 D 以及梁梁拼接节点 C; 控制截面有 8 个,即 A1-A1、B1-B1、B2-B2、C1-C1、C2-C2、D1-D1、D2-D2 和 E1-E1.

关心的风致响应包括 8 个控制截面处的轴力

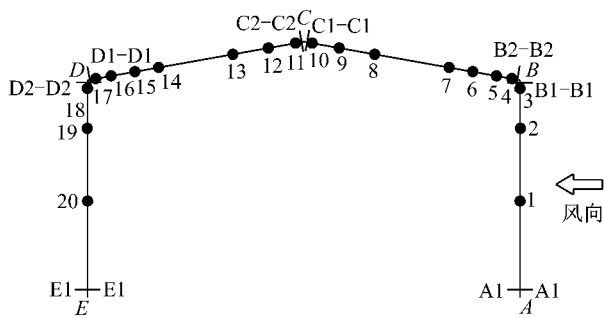


图5 LRC法计算模型

Fig.5 The calculation model for LRC method

$N$ 、剪力  $Q$  和弯矩  $M$ 。图6给出了在  $0^\circ$  风向下端樯和中间樯刚架的动力时程响应极值和分别按《门规》及

LRC法计算得到的风致响应(绝对值)对比。可以看出,按《门规》求出的端樯刚架和中间樯刚架的响应与时程响应极值的对比结果较为一致;按《门规》求出的迎风刚架柱轴力明显低于时程极值,其他构件的轴力要略高于时程极值;按《门规》求出的剪力与时程极值差距较大,更多地低于时程极值;按《门规》求出的迎风刚架柱顶端弯矩  $M_B$  明显低于时程极值,梁拼接节点处的弯矩  $M_C$  和背风刚架柱顶端弯矩  $M_D$  略低于时程极值。相比之下,LRC法求出的响应则略高于或接近时程响应极值。因此需要分析LRC法得到的等效静力风荷载大小和分布,为获得门式刚架的等效静力风荷载提供理论基础。

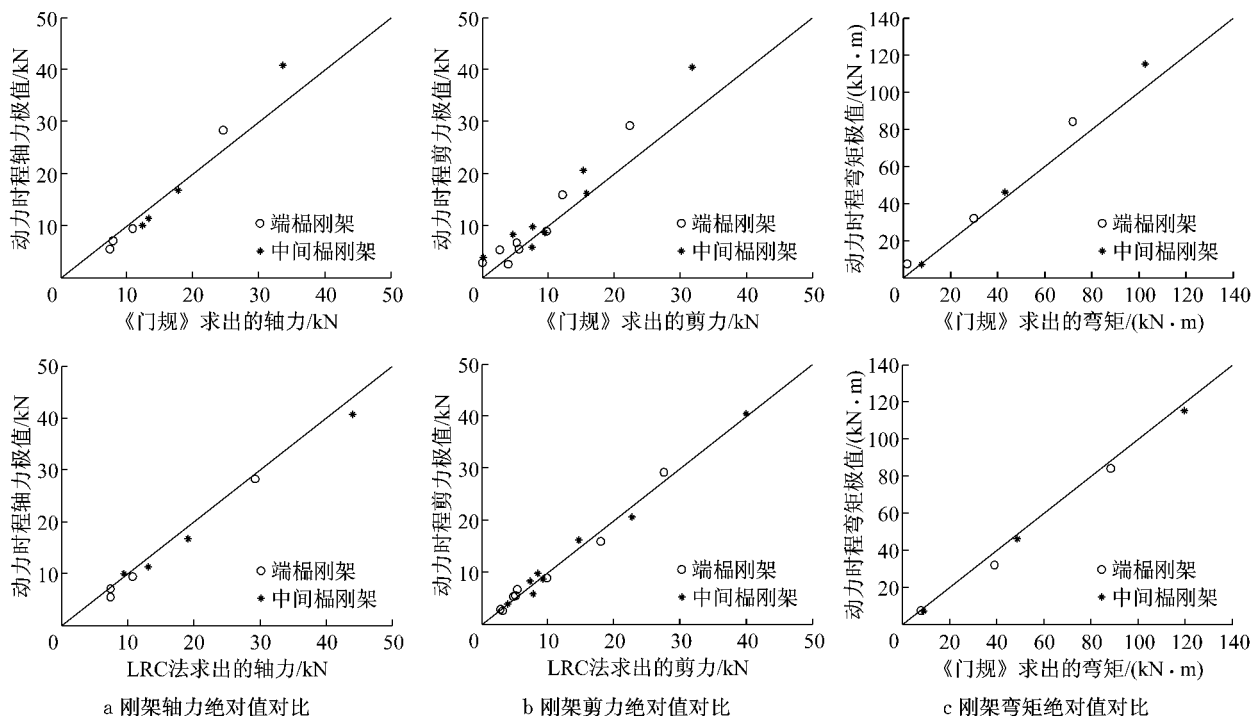


图6 《门规》和LRC法求出的风致响应与动力时程响应极值对比

Fig.6 Comparison of wind load effects determined by CECS102:2002, LRC method and extreme effects from dynamic time history analysis

对于相同的响应,LRC法得到端樯和中间樯刚架的等效静力风荷载的分布形式是十分相似的,只是大小不同。限于篇幅,图7只给出LRC法求出的部分响应对应的等效静力风荷载和《门规》规定的风荷载的分布形式对比。为便于表述,将每个节点(位置见图5)的等效静力风压转化为节点代表宽度内的线性荷载  $q_i$ ,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $i=1,2,\dots,20$ ,分布在刚架表面,正压画在刚架内侧,负压画在刚架外侧。可以看出,《门规》规定迎风刚架柱和背风刚架柱的风荷载为均匀分布是较为合理的,而规定迎风刚架梁和背风刚架梁的风荷载也为均匀分布,这显然不同于

LRC法的结果。LRC法得到的迎风刚架柱和背风刚架梁的等效静力风荷载分布是不均匀的,但分布形式大体可以分为两部分:靠近迎风刚架梁端部和靠近背风刚架梁屋脊处(约  $1/2 \sim 1/3$  的刚架跨度)的等效静力风荷载要显著高于《门规》的风荷载;迎风刚架梁和背风刚架梁的其余区域的等效静力风荷载要接近或低于《门规》的风荷载。

表1给出了端樯和中间樯刚架分别按LRC法求出的部分响应对应的等效静力风荷载和《门规》规定的风荷载的大小对比。表中  $N, Q, M$  分别表示轴力、剪力和弯矩,其下角标代表不同的控制截面,详

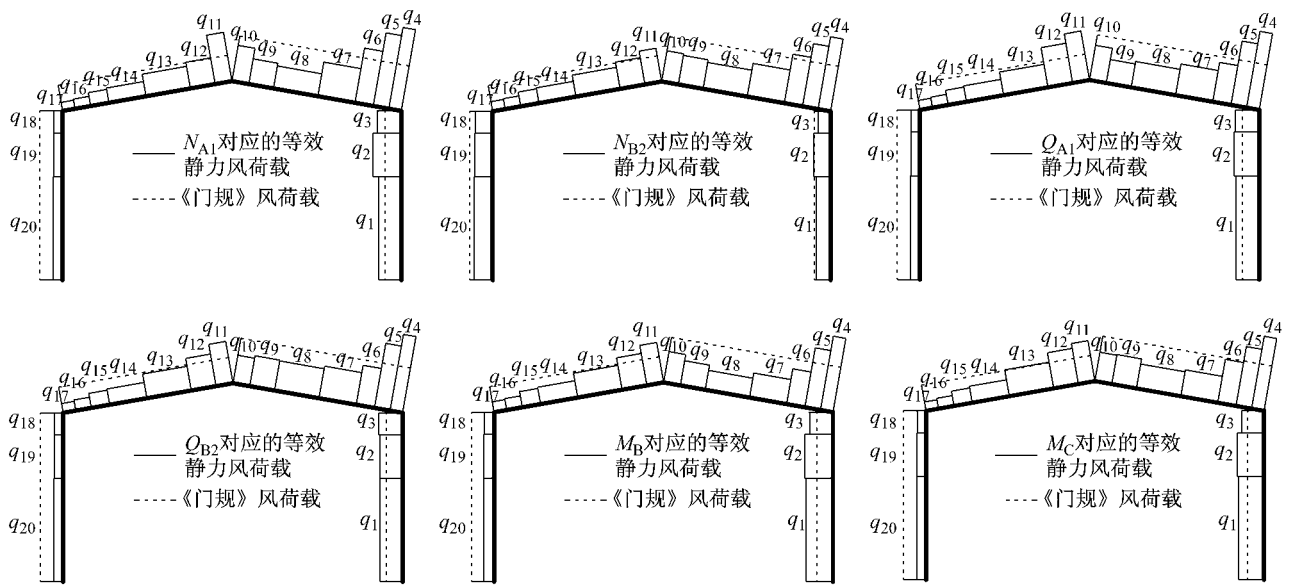


图 7 LRC 法求出的部分响应对应的等效静力风荷载分布形式与《门规》对比

Fig.7 Comparison of the distribution of equivalent static wind load corresponding to selected wind load effects determined by LRC method and CECS102:2002

表 1 LRC 法求出的部分响应对应的等效静力风荷载大小与《门规》对比

Tab.1 Comparison of the magnitude of equivalent static wind load corresponding to selected wind load effects determined by LRC method and CECS102:2002

determined by LRC method and CECS102:2002														kN·m <sup>-1</sup>
等效静力 风荷载	《门 规》值	端 樑 刚 架						《门 规》值	中 间 樑 刚 架					
		N <sub>A1</sub>	N <sub>B2</sub>	Q <sub>A1</sub>	Q <sub>B2</sub>	M <sub>B</sub>	M <sub>C</sub>		N <sub>A1</sub>	N <sub>B2</sub>	Q <sub>A1</sub>	Q <sub>B2</sub>	M <sub>B</sub>	M <sub>C</sub>
q <sub>1</sub>	0.87	1.27	0.79	1.26	1.29	1.44	1.40	0.87	1.30	1.39	1.43	1.32	1.43	1.46
q <sub>2</sub>	0.87	1.53	0.95	1.36	1.29	1.51	1.46	0.87	1.38	1.32	1.46	1.39	1.50	1.45
q <sub>3</sub>	0.87	1.35	-0.67	1.21	1.22	1.24	1.22	0.87	1.38	1.31	1.37	1.17	1.47	1.42
q <sub>4</sub>	-2.43	-4.48	-4.07	-4.18	-4.26	-4.05	-4.01	-3.47	-6.51	-5.90	-5.98	-6.50	-5.50	-5.85
q <sub>5</sub>	-2.43	-4.20	-3.50	-3.46	-3.71	-3.22	-3.26	-3.47	-5.93	-5.38	-5.50	-5.93	-5.30	-5.11
q <sub>6</sub>	-2.43	-3.13	-2.72	-2.13	-2.26	-1.90	-2.37	-3.47	-5.34	-4.64	-4.75	-5.36	-4.43	-4.16
q <sub>7</sub>	-2.43	-1.97	-1.86	-1.70	-1.86	-1.34	-1.47	-3.47	-4.23	-3.59	-3.42	-4.25	-3.83	-3.74
q <sub>8</sub>	-2.43	-1.30	-1.49	-1.41	-1.71	-1.06	-1.35	-3.47	-2.82	-2.69	-2.15	-2.80	-2.13	-2.39
q <sub>9</sub>	-2.43	-1.45	-1.63	-1.28	-1.76	-1.35	-1.64	-3.47	-2.43	-2.38	-2.04	-2.42	-2.12	-2.41
q <sub>10</sub>	-2.43	-2.07	-1.76	-1.90	-1.61	-1.69	-1.60	-3.47	-2.96	-2.99	-2.55	-2.81	-3.19	-3.00
q <sub>11</sub>	-1.39	-2.77	-1.87	-2.70	-2.41	-2.19	-2.25	-2.25	-4.60	-4.36	-4.28	-5.08	-4.47	-4.50
q <sub>12</sub>	-1.39	-1.51	-1.51	-2.17	-1.86	-1.75	-1.98	-2.25	-3.48	-3.53	-3.20	-3.46	-3.73	-3.95
q <sub>13</sub>	-1.39	-1.28	-1.20	-1.26	-1.40	-1.33	-1.46	-2.25	-2.59	-2.67	-2.28	-2.57	-2.88	-2.85
q <sub>14</sub>	-1.39	-0.85	-0.86	-0.86	-0.92	-0.92	-0.91	-2.25	-1.64	-1.68	-1.32	-1.76	-1.41	-1.54
q <sub>15</sub>	-1.39	-0.78	-0.80	-0.80	-0.85	-0.86	-0.82	-2.25	-1.41	-1.50	-1.30	-1.51	-1.38	-1.25
q <sub>16</sub>	-1.39	-0.56	-0.59	-0.58	-0.61	-0.62	-0.57	-2.25	-1.24	-1.38	-1.18	-1.33	-1.27	-1.08
q <sub>17</sub>	-1.39	-0.49	-0.54	-0.52	-0.53	-0.57	-0.49	-2.25	-1.04	-1.19	-0.88	-1.11	-1.16	-0.90
q <sub>18</sub>	-1.21	-0.50	-0.98	-0.49	-0.49	-0.54	-0.45	-1.91	-1.65	-1.80	-1.75	-1.62	-1.54	-1.16
q <sub>19</sub>	-1.21	-0.52	-1.01	-0.50	-0.50	-0.55	-0.46	-1.91	-1.59	-1.74	-1.72	-1.56	-1.56	-1.11
q <sub>20</sub>	-1.21	-0.54	-1.04	-0.52	-0.53	-0.57	-0.48	-1.91	-1.76	-1.86	-1.77	-1.72	-1.58	-1.24

见图 5.  $N_{A1}$  对应的那列数值表示当风荷载  $q_1 \sim q_{20}$  取这列数值时能计算得到的  $N_{A1}$  值,其他  $N$ 、 $Q$ 、 $M$  同理.考虑到取 LRC 法得到的等效静力风荷载包络值作为单樑刚架最不利的风荷载较为合理,可以得到,对于迎风刚架柱,LRC 法求出的等效静力风荷载的大小约为 1.5~1.8 倍的《门规》风荷载.对于迎风刚

架梁,LRC 法求出的靠近迎风端处的等效静力风荷载的大小约为 1.2~1.9 倍的《门规》风荷载,LRC 法求出的其余区域处的等效静力风荷载的大小约为 0.7~0.8 倍的《门规》风荷载.对于背风刚架梁,LRC 法求出的靠近屋脊处的等效静力风荷载的大小约为 1.1~2.0 倍的《门规》风荷载,LRC 法求出的其余区

域处的等效静力风荷载的大小约为 0.4~0.8 倍的《门规》风荷载。对于背风刚架柱, LRC 法求出的等效静力风荷载的大小约为 0.9 倍的《门规》风荷载。

### 3.2 与国外相关规范的对比分析

选择具有国际影响力的规范,即美国(ASCE7-05)<sup>[10]</sup>、澳洲(AS/ZS1170. 2: 2011)<sup>[11]</sup>、日本(AIJ2004)<sup>[12]</sup>和欧洲规范(EN1991-1-4: 2005)<sup>[13]</sup>,计算端樑和中间樑刚架的风荷载取值和风致响应,并与《门规》的计算结果进行对比分析。各国国家的规范关于风荷载的取值都是基于阵风荷载因子,因此风荷载标准值可以统一写为

$$w_k = w_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \gamma = 0.5 \rho v_0^2 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \gamma \quad (3)$$

式中:  $w_k$  为风荷载标准值,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $w_0$  为基本风压,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $v_0$  为基本风速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\alpha_1$  为风压高度系数;  $\alpha_2$  为体型系数;  $\alpha_3$  为阵风荷载因子(也可称为动力系数);  $\gamma$  为其他修正系数,包括地形修正系数、遮蔽修正系数、风向修正系数、重现期修正系数和结构重要性系数等。

《门规》规定基本风压的取值是参考中国规范的。中国规范计算风荷载标准值的出发点是基本风压,并给出了全国基本风压区划图,而美国、澳洲、日本和欧洲规范则是从基本风速出发,对应地给出了

基本风速区划图。为了便于比较,将中国规范的基本风压换算为基本风速。表 2 给出了各国规范对于基本风速的确定方法,其差别主要是风速时距和重现期的取值不同。为了便于对比,本文取 3 s 和 10 min 基本风速比为 1.45 : 1.0,取 100 年和 50 年重现期基本风速比为 1.05 : 1.0<sup>[14]</sup>。

表 3 给出了各国规范关于门式刚架结构的风荷载标准值的计算结果对比。需要说明的是:(1)选取上海地区基本风压  $w_0 = 0.55 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ,对应的基本风速  $v_0 = 29.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其他国家规范在此基础上进行基本风速的换算。(2)《门规》引用 MBMA2006<sup>[15]</sup>的体型系数后,基本风压应乘以综合调整系数 1.05<sup>[1]</sup>。(3)各国规范对空气密度的取值差别较小,故对风荷载标准值的计算影响较小。(4)本文的门式刚架结构模型高度略低于 10m,故各国规范对风压高度系数取值可按 10 m 高度处的数值采用,即均为 1.0。(5)日本规范不区分刚性和柔性结构,给出了统一的计算公式,本文的门式刚架结构的基频是 1.63 Hz,按日本规范计算的阵风荷载因子为 1.69;澳洲规范对基频大于 1.0 Hz 的结构,建议阵风荷载因子取为 1.0;欧洲规范对高度低于 15 m 的结构,建议阵风荷载因子取为 1.0。

表 2 各国规范基本风速确定方法

Tab.2 Methods of the basic wind velocities of codes of different countries and regions

	规范名称				
	中国	美国	澳洲	日本	欧洲
标准地貌类别	空旷平坦地面(B类)	开敞地区(C类)	开敞地区(2类)	空旷平坦地面(Ⅱ类)	空旷地区(Ⅱ类)
标准高度/m	10	10	10	10	10
平均风速时距/s	600	3	3	600	600
重现期/年	50	50	50	100	50
最大样本风速	年最大风速	年最大风速	年最大风速	年最大风速	年最大风速
风速分布概率	极值Ⅰ型分布	极值Ⅰ型分布	极值Ⅰ型分布	极值Ⅰ型分布	极值Ⅰ型分布

表 3 各国规范关于门式刚架结构的风荷载标准值的取值

Tab.3 Wind load characteristic value of each code for steel structure with gabled frames

规范名称	《门规》	美国	澳洲	日本	欧洲
基本风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v_0$	1.45 $v_0$	1.45 $v_0$	1.05 $v_0$	$v_0$
空气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.25	1.226	1.2	1.22	1.25
基本风压/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	1.05 $w_0$	2.06 $w_0$	2.02 $w_0$	1.08 $w_0$	$w_0$
风压高度系数 $\alpha_1$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
阵风荷载因子 $\alpha_3$	已考虑在 $\alpha_2$ 中	已考虑在 $\alpha_2$ 中	1.0	1.69	1.0
地形修正系数		1.0	1.0	1.0	1.0
遮蔽修正系数			1.0		
其他修正系数 $\gamma$		0.85	0.90	0.81	
重现期修正系数				1.0	
结构重要性系数		1.0			
风荷载标准值/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	1.05 $\alpha_2 w_0$	1.75 $\alpha_2 w_0$	1.82 $\alpha_2 w_0$	1.48 $\alpha_2 w_0$	$\alpha_2 w_0$

表 4 给出了各国规范关于门式刚架结构体型系数的取值对比。《门规》、美国、澳洲和日本规范对结

构每个构件体型系数取一个值,欧洲规范在迎风 and 背风刚架梁划分了不同区域,0.1e 区域内的体型系

数取值明显高,其中  $e$  取房屋迎风宽度或 2 倍的房屋顶部高度之中者的较小值,对于本文的算例,  $e=21\text{ m}$ .《门规》的体型系数取值是参考

MBMA2006<sup>[15]</sup>的,而 MBMA2006 是参考美国规范的.美国规范体型系数的取值考虑了阵风荷载因子,其中峰值保证因子为 3.4.

表 4 各国规范关于门式刚架的体型系数取值

Tab.4 Shape coefficients of each code for steel structure with gabled frames					
类别	《门规》	美国	澳洲	日本	欧洲
端樯刚架					
中间樯刚架					

表 5 给出了各国规范关于门式刚架结构风荷载的大小与分布的对比结果.表中,  $B$  为计算宽度,按工程设计常用的取从属宽度,  $L$  为门式刚架的跨度.可以看出,欧洲规范给出的门式刚架风荷载分布形式考虑了刚架梁风荷载的不均匀分布,这与 LRC 法得到的等效静力风荷载分布形式较为一致;而《门规》、美国规范、澳洲规范和日本规范规定每个构件的风荷载分布是均匀的.《门规》的体型系数取值与

美国规范非常接近,但由于美国规范采用 3 s 风速,故《门规》风荷载取值低于美国规范.澳洲规范也采用 3 s 风速,故风荷载取值要高于《门规》.日本规范相比对低层房屋这类刚性结构的阵风荷载因子取值较大,故风荷载取值要高于《门规》.与欧洲规范相比,《门规》对迎风刚架柱的风荷载取值偏小,对刚架梁和背风刚架柱的风荷载取值略高.

表 5 各国规范及建议方法关于门式刚架的风荷载大小与分布

Tab.5 The magnitude and distribution of wind load on steel structure with gabled frames from each code and the proposed method

类别	《门规》	美国	澳洲
端樯刚架			
中间樯刚架			
类别	日本	欧洲	建议方法
端樯刚架			
中间樯刚架			

### 3.3 建议的风荷载分布与取值

基于 3.1~3.2 节分析,表 6 给出了《门规》关于门式刚架风荷载分布与 LRC 法得到的等效静力风荷载和国外相关规范的对比情况.可以看出,《门规》对迎风刚架柱的风荷载取值偏低,对迎风和背风刚架梁没有考虑风荷载分布不均匀,对背风刚架柱的风荷载取值适中.因此建议单榀刚架的等效静力风荷载分布形式见表 6.表中, $w_{k1}$ 、 $w_{k2}$ 、 $w_{k3}$ 和  $w_{k4}$  分别为按《门规》的风荷载规定计算得到的迎风刚架柱、

迎风刚架梁、背风刚架梁和背风刚架柱的风荷载标准值, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ,计算宽度  $B$  取从属宽度.对于迎风刚架柱,建议风荷载取值为  $1.7w_{k1}$ ;对于迎风刚架梁,距迎风端  $L/6$  的范围内( $L$  为门式刚架的跨度),建议风荷载取值为  $1.7w_{k2}$ ,其余区域取  $0.7w_{k2}$ ;对于背风刚架梁,靠近屋脊  $L/6$  的范围内,建议风荷载取值为  $1.7w_{k3}$ ,其余区域取  $0.7w_{k3}$ ;背风刚架柱的风荷载保持不变.

表 6 门式刚架风荷载取值的对比情况及建议方法

Tab.6 Comparison of wind load on steel structure with gabled frames and the proposed method

类别	《门规》的对比情况		取值	建议方法
	与 LRC 法对比	与国外规范对比		
迎风刚架柱		低	放大系数:1.7	
迎风刚架梁	迎风端部低 其余区域高	迎风端部适中 其余区域高	迎风端部放大系数:1.7 其余区域降低系数:0.7	
背风刚架梁	靠近屋脊处低 其余区域高	靠近屋脊处适中 其余区域略高	靠近屋脊处放大系数:1.7 其余区域降低系数:0.7	
背风刚架柱	高	适中	不变	

按照建议方法得到的端榀和中间榀刚架的风荷载大小和分布见表 5,求出的风致响应与动力响应极值的比较如图 8 所示.总体来看,按本文建议的等效静力风荷载求出的风致响应更接近动力时程响应极

值,个别风致响应略低于时程响应极值.在实际设计时,门式刚架为左右对称的形式,只要与其对称的控制截面的内力足够大,整个刚架在设计时采用对称设计,构件的抗力就是足够的.

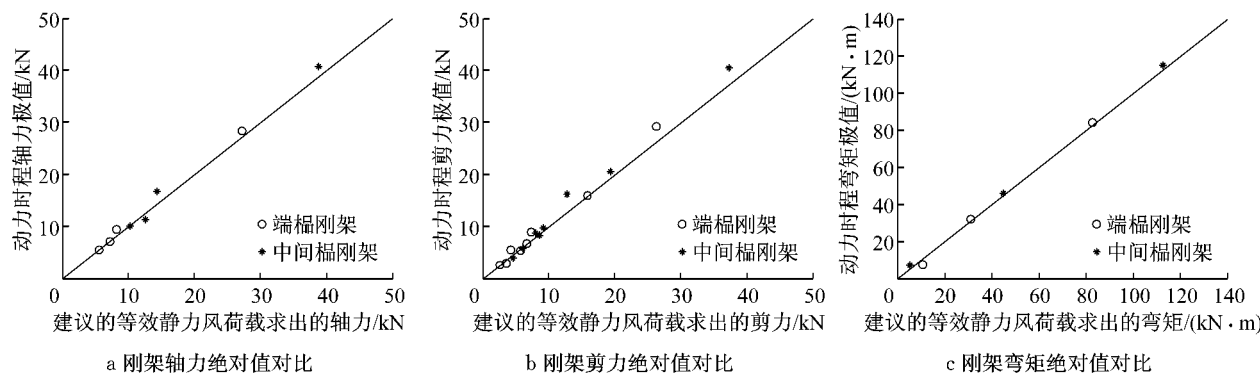


图 8 建议的等效静力风荷载求出的风致响应与动力时程响应极值对比

Fig.8 Comparison of wind load effects from the proposed equivalent static wind load and extreme effects from dynamic time history analysis

## 4 结语

本文分别采用荷载响应相关法和国外风荷载规范求得门式刚架结构风荷载的分布和大小,并与《门规》计算结果的对比分析,提出了轻型门式刚架结构的等效静力风荷载分布的估计方法,即对于迎风刚架柱,建议风荷载取值为  $1.7w_{k1}$ ;对于迎风刚架梁,距迎风端  $L/6$  的范围内,建议风荷载取值为  $1.7w_{k2}$ ,

其余区域取  $0.7w_{k2}$ ;对于背风刚架梁,靠近屋脊  $L/6$  的范围内,建议风荷载取值为  $1.7w_{k3}$ ,其余区域取  $0.7w_{k3}$ ;背风刚架柱的风荷载保持不变.

对长跨比为 1:2 的门式刚架结构(本文的分析模型),通过与  $0^\circ$  风向下的动力响应极值对比,验证了本文建议方法的有效性.对于长跨比为 1:1 的门式刚架结构模型,以及  $45^\circ$  风向的工况,按本文建议的风荷载求出的风致响应也较为接近动力时程响应极值<sup>[16]</sup>.该建议方法表达形式简洁,计算简便可靠,



适用于工程设计。

轻型门式刚架结构建筑外形是多样的,本文结合《门规》研究的是典型单跨双坡建筑外形的厂房,并考虑了两种长跨比(1:1和1:2),有一定的代表性。对于多跨多坡等建筑类型的厂房的风荷载取值以及风场参数对其的影响,还需开展进一步验证分析工作。

#### 参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会. CECS 102:2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2003.  
China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 102:2002 Technical specification for steel structure of light-weight buildings with gabled frames [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB50009—2001 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.
- [3] Holmes J D. Wind pressures on tropical housing [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53: 105.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [5] Tamura Y, Suganuma S, Kikuchi H, et al. Proper orthogonal decomposition of random wind pressure field[J]. Journal of Fluid and Structures, 1999, 13: 1069.
- [6] 谢壮宁,倪振华,石碧青. 大跨度屋盖结构的等效静风荷载[J]. 建筑结构学报,2007, 28(1):113.  
XIE Zhuangning, NI Zhenhua, SHI Biqing. Equivalent static wind loads on large span roof structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 113.
- [7] 李元齐,沈祖炎. 本征正交分解法在曲面模型风场重构中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006, 34(1):22.  
LI Yuanqi, SHEN Zuyan. Application of the proper orthogonal decomposition method to wind field reconstruction of models with curved surface[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(1): 22.
- [8] Kasperski M, Niemann H J. The LRC method: a general method of estimating unfavorable wind load distribution for linear and nonlinear structure behavior[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43: 1753.
- [9] Kasperski M. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design[J]. Engineering Structural, 1992, 14(1): 27.
- [10] American Society of Civil Engineers. ASCE/EI7-05 Minimum design loads for buildings and other structures [S]. New York: ASCE, 2006.
- [11] Australian/New Zealand Standard. AS/NZS1170. 2: 2011. Structural design actions part 2: wind actions[S]. Sydney: Standard Australia, 2011.
- [12] Architectural Institute of Japan. AIJ2004. Recommendations for loads on building [S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [13] European Standard. BS EN 1991-1-4: 2005. Eurocode1: actions on structures. part1-4: general actions-wind actions [S]. London: British Standard Institution, 2005.
- [14] 张军峰,葛耀君,柯世堂,等. 中美日三国规范高层结构风荷载标准值对比[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2011, 38(10): 18.  
ZHANG Junfeng, GE Yaojun, KE Shitang, et al. Comparative study on the nominal value of wind loads on tall buildings among the codes of China, American and Japan[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2011, 38(10): 18.
- [15] Metal Building Manufacturers Association. Metal building systems manual[S]. New York: Metal Building Manufacturers Association Incorporated, 2006.
- [16] 景晓昆. 基于有效静力风荷载的轻型门式刚架结构抗风设计理论研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2013.  
JING Xiaokun. Wind-resistant design method for light-weight steel structures with gabled frames based on effective static wind load[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2013.