

国家体育场多目标等效静风荷载

陈波, 杨庆山

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对大跨结构的风振响应特点, 研究多目标等效静风荷载的分析方法, 并采用该方法对国家体育场等效静风荷载进行了研究。该等效静风荷载分析方法的基本过程是: 根据结构风振响应特性, 选择风荷载的主要本征模态和结构主导振型惯性力作为构造多目标等效静风荷载的基本向量, 根据最小二乘法, 得到基本向量的最优组合系数, 从而得到针对多个等效目标的等效静风荷载。国家体育场的分析结果表明: 在所有风向下的风振响应中, 背景响应远大于共振响应, 其中 0° 风向和 270° 风向对结构最为不利; 在针对多等效目标的等效静风荷载作用下, 所有关键位置的节点位移响应和支座反力都与实际动力响应极值吻合较好。

关键词: 国家体育场; 等效静风荷载; 风振响应; 本征模态; 主导振型

中图分类号: TU393.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2009)06-0027-07

Equivalent Static Wind Load for Multiple Targets of China's National Stadium

CHEN Bo¹, YANG Qing-shan¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: According to characteristics of large-span structures, a methodology was proposed to analyse the equivalent static wind load for multiple targets of China's National Stadium. The general principles were, taking dominating eigen-modes and dominating vibration modes as basic vectors to express equivalent static wind load for multiple targets; and then obtaining optimization coefficient with least square approximation method; thus, obtaining the equivalent static wind load for multiple targets. Upon the case study, it was found that background response was much more than resonant response for all of the wind directions with most unfavorable at 0 degree and 270 degree directions. And structural response of all nodes and all supports under a single equivalent static wind distribution were in good agreement with peak values under actual dynamic wind loads at the same time.

Key words: China National Stadium; equivalent static wind load; wind-induced response; eigen-mode; dominating mode

国家体育场是2008年第29届奥运会的主体育场, 平面呈 $332.3\text{ m} \times 296.4\text{ m}$ 椭圆形, 屋盖中部开有 $185.3\text{ m} \times 127.5\text{ m}$ 的椭圆孔洞^[1], 如图1所示。大跨结构对风荷载较为敏感, 风荷载常常成为该类

结构设计的控制性荷载之一。在工程设计阶段, 结构工程师习惯以等效静力风荷载的形式考虑风荷载的动力效应。而目前对大跨空间结构的等效静风荷载研究还存在诸多问题, 该文对国家体育场的等效

收稿日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(50808010); 教育部博士点基金新教师项目(200800041030); 北京交通大学科技基金(2008RC015)

作者简介: 陈波(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事大跨空间结构风工程方面的研究, (E-mail) chenbohrb@163.com。

静风荷载的分析方法,及具体分布形式进行研究。

等效静风荷载理论研究始于高层、高耸结构,针对该类结构的等效静风荷载分析方法已逐渐趋于成熟^[2-3]。荷载-响应相关系数法(LRC法)^[4-5],现已广泛用于等效静风荷载背景分量的分析^[6-7]。这些方法得到等效静风荷载是某一最大响应(该文称之为单目标,如最大位移或者最大杆件内力)所对应的最不利荷载分布形式。一般情况下,对于风振响应中由第一振型的高层结构,在该荷载作用下所得到的其它位置响应与实际风荷载作用下的最大响应偏差较小。

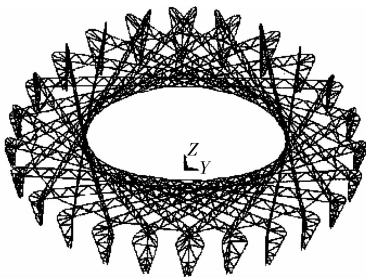


图 1 国家体育场

近年来,一些学者开始试探借鉴高层结构所用方法,研究大跨空间结构的单目标等效静风荷载研究^[8-9]。但这些方法都还没有解决多等效目标问题。所谓多等效目标问题是指:大跨空间结构存在众多关键响应,如各杆件内力、关键节点位移,由于多振型参与结构振动的特点,结构各位置响应不再同时达到最大值,存在一定相位差,因此,若按照既有方法,一个关键响应对应一个等效静风荷载,则众多关键响应将对应对应着许多个等效静风荷载分布形式。

A. Kasumura 等^[10-11]提出将脉动风荷载的本征模态作为构造等效静风荷载的基本向量,通过最小二乘法计算针对多个等效目标的等效静风荷载。在该方法的基础上,Hu Xiaohong^[12]提出将几个关键响应对应的等效静风荷载分布形式作为构造多个等效目标的等效静风荷载基本向量。该文在针对单目标等效静风荷载方法的基础上,借鉴 A. Kasumura 方法,根据单目标等效静风荷载分析方法,以及结构风振响应特征,将脉动风荷载本征模态和结构振型惯性力构造多等效目标等效静风荷载,提出改进的大跨结构多目标等效静风荷载分析方法。采用频域方法分析国家体育场的风振响应,在此基础上,对国家体育场的多目标等效静风荷载进行研究。

1 多目标等效静风荷载分析方法

1.1 单目标等效静风荷载分析方法

风振响应可以分为平均响应、背景响应和共振响应三部分。与此对应,各响应分量分别对应着等效静风荷载的平均分量、背景分量和共振分量。所研究的等效静风荷载是针对某一极值响应,如最大位移。

根据文献^[9,13],综合运用荷载响应相关系数法(LRC法)^[4]和本征正交分解法(POD法)^[14],等效静风荷载背景分量 $\{F_c^b\}$ 可表示为:

$$F_{c,k}^b = g_B \rho_{ri,Fk} \sigma_{Fkk} = \sum_{m=1}^M \alpha_m G_m(x_k, y_k, z_k) \quad (1)$$

式中 g_B 表示背景响应峰值因子; $\rho_{ri,Fk}$ 表示 k 点脉动风荷载和 i 点响应的荷载响应相关系数; σ_{Fkk} 表示 k 自由度方向的脉动风荷载均方差; α_m 表示各阶本征模态在等效静风荷载背景分量中的权重因子。 $G_m(x, y, z)$ 、 λ_m 是脉动风荷载相关系数矩阵的特征向量和特征值,可以按照特征值方程计算得到:

$$C_r G_k = \lambda_k G_k \quad (2)$$

$$C_r = \overline{\{F(x, y, z, t)\} \{F(x, y, z, t)\}^T} \quad (3)$$

其中 $F(x, y, z, t)$ 表示点 (x, y, z) 处的脉动风荷载时程。

根据结构动力学方程、振型分解法和结构特征值方程,等效静风荷载的共振分量可用主要振型惯性力表示为:

$$\{F_c^r\} = g_R \sum_{j=1}^n \{P_{e0}\}_j \omega_j \quad (4)$$

式中 g_R 表示共振响应峰值因子; $\{P_{e0}\}_j = M\{\varphi\}_j \omega_j^2$ 表示第 j 振型对应的惯性力幅值; ω_j 表示结构主导振型在等效静风荷载共振分量中的权重因子。

单目标等效静风荷载可表示为平均分量、背景分量和共振分量的组合:

$$\{F_c\} = \{\bar{F}\} + \text{sign}(\bar{r}) \cdot [\gamma_b \{F_c^b\} + \gamma_r \{F_c^r\}] \quad (5)$$

其中 $\text{sign}(\bar{r})$ 表示平均响应 \bar{r} 的符号函数; $\{\bar{F}\}$ 表示荷载平均分量; γ_b 、 γ_r 分别表示等效静风荷载背景分量 $\{F_c^b\}$ 和共振分量 $\{F_c^r\}$ 的组合系数,

$$\gamma_b = \frac{g_B \sigma_b}{\sqrt{(g_B \sigma_b)^2 + (g_R \sigma_r)^2}}; \gamma_r = \frac{g_R \sigma_r}{\sqrt{(g_B \sigma_b)^2 + (g_R \sigma_r)^2}} \quad (6)$$

1.2 多目标等效静风荷载分析方法

对于大跨结构,在根据第 1.1 节所述方法得到的等效静风荷载作用下,除了等效点的响应与动力极值响应相等之外,其它点的响应都偏离动力极值

较大,也就是说针对最大位移响应点的等效静风荷载不适用于其它等效目标。因此,按照这一方法,若希望与实际动力响应完全等效,则多个等效目标将对应多个等效静风荷载(这个数量往往很大),给工程带来很大的不方便,也偏离了等效静风荷载研究简化结构抗风过程这一初衷。

从式(1)、式(4)和式(5)可以看出:等效静风荷载可用本征模态和结构振型表示;对于不同等效目标,各本征模态和振型所占的权重因子可能不同。以往的研究已表明:风振响应中总是存在贡献较大的本征模态和结构振型,因此,对于部分等效目标所对应的等效静风荷载,将由相同的本征模态或结构振型占主导地位,此时,就能够保证在同一等效静风荷载下,这些等效目标的响应与动力响应极值相同。因此,可以考虑将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等效静风荷载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。

根据式(1)、式(4)和式(5),脉动风对应的等效静风荷载(不包括平均分量)可用主要的本征模态和振型惯性力表示为:

$$\{\tilde{F}_e\} = [c_1\{G\}_1 + c_2\{G\}_2 + \dots + c_{n1}\{G\}_{n1}] + [c_{n1+1}\{P_{e0}\}_1 + c_{n1+2}\{P_{e0}\}_2 + \dots + c_{n1+n2}\{P_{e0}\}_{n2}] = [F_0]\{c\} \quad (7)$$

其中 $\{c\}$ 是各本征模态和振型惯性力的组合系数向量; $\{G\}_i$ 和 $\{P_{e0}\}_j$ 的含义分别同式(3)和式(6); $[F_0]$ 是由基本向量 $\{G\}_i$ 和 $\{P_{e0}\}_j$ 构成的荷载分布形式矩阵。

$$[F_0] = [\{G\}_1, \{G\}_2, \dots, \{G\}_{n1}, \{P_{e0}\}_1, \{P_{e0}\}_2, \dots, \{P_{e0}\}_{n2}] \quad (8)$$

对于某一具体的等效目标,组合系数向量 $\{c\}$ 需要满足:

$$\{\beta\}^T \{\tilde{F}_e\} = \{\beta\}^T [F_0]\{c\} = \hat{y}_i \quad (9)$$

其中 $\{\beta\}^T$ 表示控制点的响应影响线函数; \hat{y}_i 表示动力响应极值。

根据单目标等效静风荷载分析方法可知,若要求等效点与实际极值响应相等,其它非控制点的响应与控制点出现最大响应时刻的真实动力响应相等,则从统计概率角度来看,方程(9)只有唯一解。

实际工程应用时,更关心的是在该等效静风荷载作用下,结构所有位置响应是否与动力响应极值响应吻合,因此可以不保证方程(9)的解是概率意义上的最优解,而是希望这一等效静风荷载同时适用

于多个等效目标。若该等效静风荷载需要同时适用于 m 个等效目标时,则应该满足:

$$\begin{cases} \{\beta\}_1^T \{\tilde{F}_e\} = \{\beta\}_1^T [F_0]\{c\} = \hat{y}_1 \\ \{\beta\}_2^T \{\tilde{F}_e\} = \{\beta\}_2^T [F_0]\{c\} = \hat{y}_2 \\ \dots \\ \{\beta\}_m^T \{\tilde{F}_e\} = \{\beta\}_m^T [F_0]\{c\} = \hat{y}_m \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\{\beta\}_i^T$ 表示第 i 个等效目标的影响线函数; \hat{y}_i 表示脉动风荷载作用下,第 i 个等效目标的极值响应。

式(10)以矩阵形式表示为:

$$[\beta]\{\tilde{F}_e\} = [\beta][F_0]\{c\} = [R_0]\{c\} = \{\hat{y}\} \quad (11)$$

其中 $[\beta]$ 是影响线矩阵; $[R_0]$ 表示基本向量构成的矩阵 $[F_0]$ 作用下,各等效目标点的结构响应 $[R_0] = [\beta][F_0]$ 。

设矩阵 $[R_0]$ 的秩数为 n ,则非齐次方程组(11)的解为:(1)当 $n = m$ 时,方程组(11)有唯一解;(2)当 $n > m$ 时,方程组(11)有无穷多个可行解;(3)当 $n < m$ 时,方程组(11)是矛盾方程组,是无解的,只能得到方程的最小二乘解。

对于大跨空间结构,等效目标非常多,包括所有杆件内力、所有支座反力和关键点的位移响应,因此大多数情况下属于 $n < m$ 这一情况,常常只能得到方程组(11)的最小二乘解。

根据式(7)和方程组(11),则易知:针对 m 个等效目标的等效静风荷载(脉动响应对应的部分)可以表示为:

$$\{\tilde{F}_e\} = [F_0]\{c_0\} \quad (12)$$

需要说明的是:在脉动风荷载作用下, $\hat{y} = g\sigma_y$ 和 $\hat{y} = -g\sigma_y$ 都是结构工程设计中所关心,需要考虑 $\pm\{\tilde{F}_e\}$ 两者情况。因此,与平均风荷载组合,总等效静风荷载的两种分布形式可表示为,

$$\{F_e\} = \{\bar{F}\} + \{\tilde{F}_e\} = \{\bar{F}\} + [F_0]\{c_0\} \quad (13a)$$

$$\{F_e\} = \{\bar{F}\} - \{\tilde{F}_e\} = \{\bar{F}\} - [F_0]\{c_0\} \quad (13b)$$

综合前文,多目标等效静风荷载分析方法的主要步骤可以概括为:(I)选择对结构响应的主导本征模态或结构振型作为基本向量,构造荷载分布形式矩阵 $[F_0]$;(II)构造方程组(9),计算组合系数 $\{c_0\}$;(III)根据式(13),得到多目标的等效静风荷载。

该文方法与文献[10-11]的不同之处在于:文献

[10-11]直接采用脉动风荷载构造多目标等效静风荷载,更适用于等效静风荷载中背景分量占主要成分的情况,而本文是根据单目标等效静风荷载分析方法,以及结构风振响应特征,将脉动风荷载本征模态和结构振型惯性力构造多等效目标等效静风荷载,具有更明确的物理含义和理论依据,如前文所述,在构造多目标等效静风荷载的基本向量数量相同的条件下,该文方法将具有更好的计算精度。

在构造式(8)这一荷载分布形式矩阵时,可以根据风振响应特性进行简化:当结构刚度很大时,风振响应中背景响应占主导地位,共振响应可忽略,此时用主要本征模态构造 $[F_0]$;当结构刚度很柔时,风振响应中共振响应占主导地位,背景响应可忽略,此时用主要振型惯性力构造 $[F_0]$;当结构刚度介于上述两种之间时,则需要同时用主要本征模态和结构振型惯性力构造 $[F_0]$ 。

2 国家体育场风振响应分析

2.1 结构介绍

国家体育场屋盖顶面成鞍形,最高点高度为 68.5 m,最低点高度为 42.8 m。屋盖主要由 48 榀巨型框架和中间环梁构成,支承在周边 24 根组合柱上,柱距 37.958 m,主框架如图 2 所示。

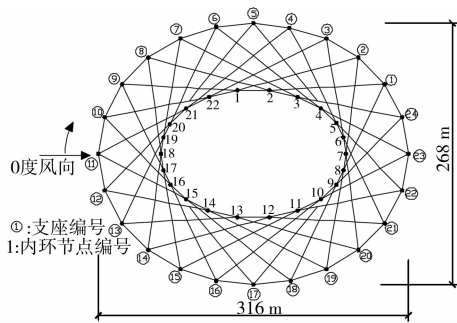


图 2 国家体育场主框架

对国家体育场屋面进行了多点同步测压风洞试验,并考虑周围建筑物对风荷载的干扰效应,试验由英国 BMT Fluid Mechanics Ltd. 公司完成^[15]。试验以 10° 为间隔,共测试了 36 个不同风向的风压分布情况。所有风荷载计算均按(GB 50009-2001)规定之 100 a 一遇基本设计风压 0.50 kPa 进行。图 3 给出了其中 2 个风向的平均风压系数分布情况,风压参考点位置为体育场檐口高度 62.4 m,所有风压系数都是以此为参考点。

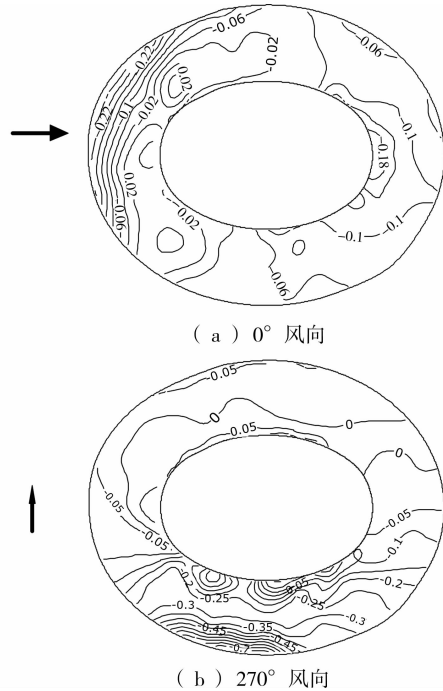


图 3 国家体育场平均风压系数分布

2.2 风振响应分析

采用大型有限元分析软件 Ansys10.0 对国家体育场结构的自振特性进行了分析,图 4 给出了结构前 200 阶自振频率的分布情况,高阶振型的频率分布较为密集。图 5 还给出了前两阶振型,其振动特征表现为以屋面的竖向振动为主。

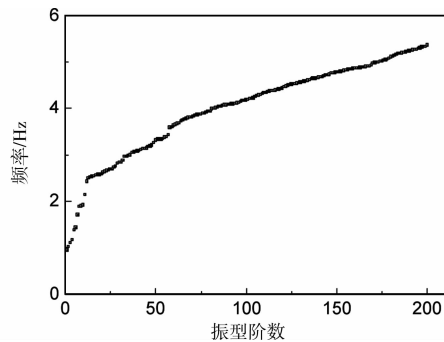


图 4 结构固有频率分布

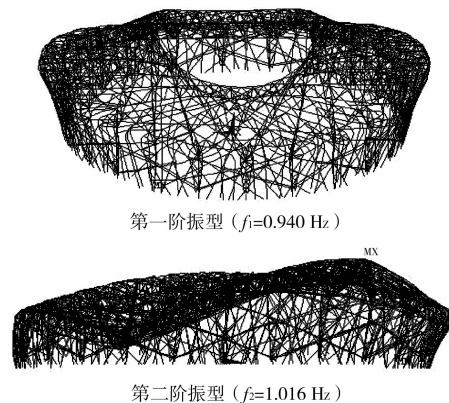


图 5 前两阶振型

采用频域分析方法^[16],对 12 个风向分别进行风振响应的平均响应、背景响应和共振响应进行了系统分析,其中共振响应分析考虑了贡献最大的前 50 阶 Ritz 向量的贡献。每个风向中位移响应最大点各响应分量列于表 1。

表 1 不同风向最大位移点的响应各分量分布

风向角/ °	平均响应/ mm	背景响应/ mm	共振响应/ mm	脉动风均 方差响应/ mm	最大位移/ mm
0	9.1	5.8	1.2	5.9	29.8
30	9.4	5.0	1.3	5.1	27.4
60	5.4	5.1	1.8	5.4	24.3
90	6.6	2.4	1.8	3.0	17.0
120	9.4	2.4	1.8	3.0	19.8
150	6.8	3.6	1.1	3.7	19.9
180	5.7	3.6	0.9	3.7	18.7
210	5.6	3.2	1.1	3.4	17.5
240	10.6	3.2	2.1	3.9	24.1
270	11.5	4.5	2.1	5.0	29.0
300	5.6	4.2	1.5	4.5	21.4
330	8.7	4.8	1.2	4.9	25.9

此外,风振响应分析过程中还研究了杆件内力和支座反力,但是结果表明:风荷载引起的框架梁的单元应力比较小,因此研究等效静风荷载时,不考虑单元内力响应。从表 1 以看出:0°和 270°为结构的 2 个最不利风向角;不同风向最大位移点最大值与平均值都大于 2,脉动风的效应不可忽略;绝大多数风向的背景响应与共振响应的比值都大于 2,尤其是对两个最不利风向角 0°和 270°,背景响应与共振响应的比值分别为 2.17 和 2.71。因此,共振响应可以忽略,只需考虑平均响应和背景响应,对应的等效静风荷载也只需考虑平均分量和背景分量。

3 国家体育场多目标等效静风荷载

风振响应分析结果表明:任何风向,最大位移点基本都出现在体育场内环节点上,因此,所有节点位移响应中,可以将体育场内环的 22 个节点的位移响应作为等效目标;风荷载引起的支座反力较大,48 榀主框架的 24 个支座反力(每两榀主框架共一支座)也应作为关心的等效目标。因此,国家体育场等效静风荷载分析过程中,将内环 22 个节点的竖向位移和 24 个支座反力应作为需要考虑的主要等效目标,主要研究 0°和 270°这 2 个最不利风向角。

第 2 节的风振响应分析结果已表明,国家体育场结构的风振响应中,背景响应远大于共振响应,因此,只需选取风振响应的主要本征模态构造多目标等效静风荷载(式 8)。

首先对 0°风向等效静风荷载进行研究。图 6 给出了 0°风向角下,各本征模态对背景响应的应变能贡献大小。从图中可以看出:第 1 阶本征模态的贡献占绝对控制地位,所占比例达到 57.3%,贡献从大到小的本征模态依次是第 1 阶、第 2 阶、第 4 阶、第 5 阶、第 7 阶、第 8 阶、...,其中前 6 个最主要的本征模态的应变能贡献累计比例达到 89.7%。图 7 给出了第 1 阶和第 2 阶本征模态的分布形式。

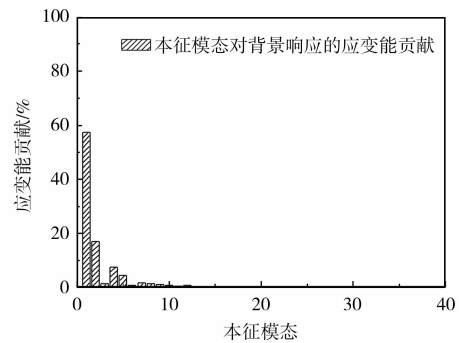
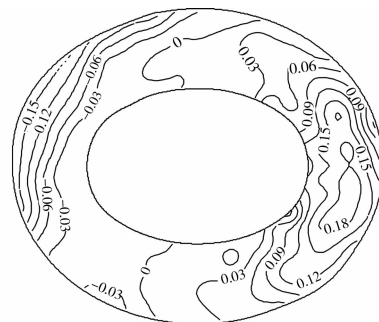
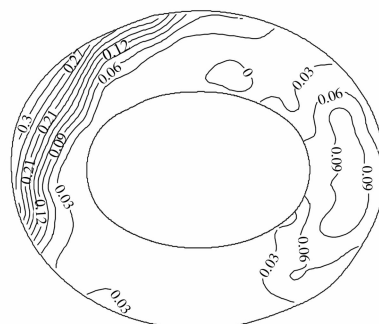


图 6 各本征模态对背景响应的应变能贡献



(a) 第1阶本征模态



(b) 第2阶本征模态

图 7 前 2 阶本征模态

因此,选取最主要的 6 阶本征模态构造式(8)所表示的矩阵 $[F_0]$, 并按照式(11)计算组合系数 $\{c_0\}$, 如表 2 所示。

表 2 等效静风荷载中本征模态组合系数

第 1 阶	第 2 阶	第 4 阶	第 5 阶	第 7 阶	第 8 阶
1 093.5	-447.5	19.2	46.0	-164.3	-302.1

这样,根据式(12)就可以得到等效静风荷载(脉动响应对应的部分),如图 8 所示。

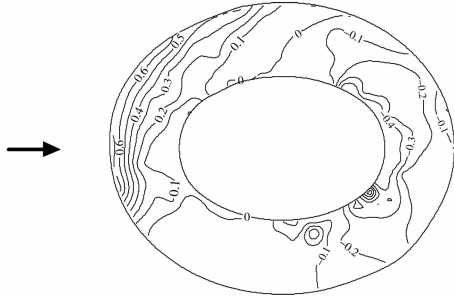
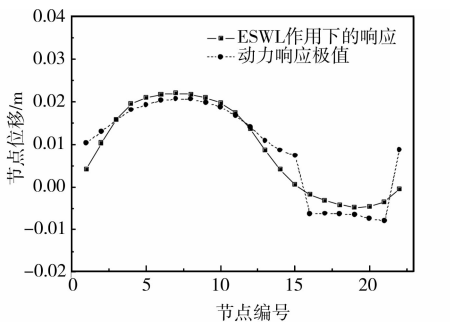
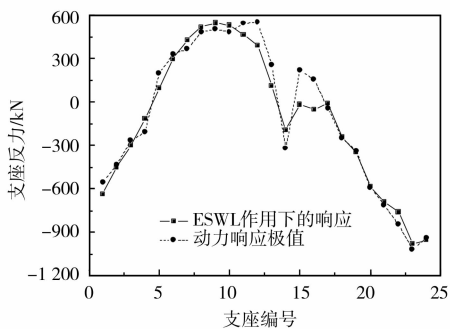


图 8 所有响应对应的等效静风荷载

将图 8 所示的荷载作为静力作用在结构上,计算结构响应,将其与实际动力响应 $\{\hat{y}\}$ ($\{\hat{y}\}$ 仅表示脉动风响应)进行对比,如图 9 所示,图中的节点编号和支座编号如图 2 所示。从图中可以看出:在该等效静风荷载作用下,所有位置节点位移和支座反力与实际动力响应极值吻合较好,误差稍大情况是出现在响应幅值比较小的位置。所分析的结果表明该文方法能够有效地解决等效静风荷载的多等效目标问题。



(a) 等效静风荷载下的位移响应

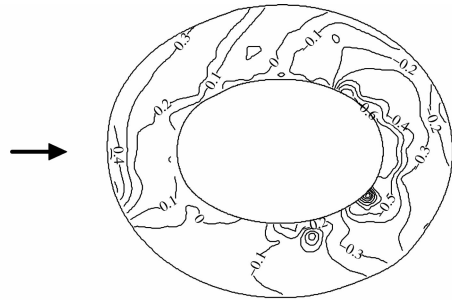


(b) 等效静风荷载下的支座反力

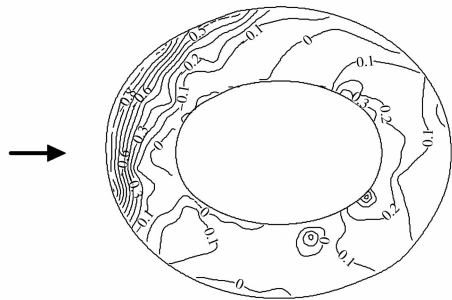
图 9 所有响应对应的等效静风荷载及其响应

根据式(13),可以得到 0° 风向角下,针对所有极

值响应的等效静风荷载,如图 10 所示。



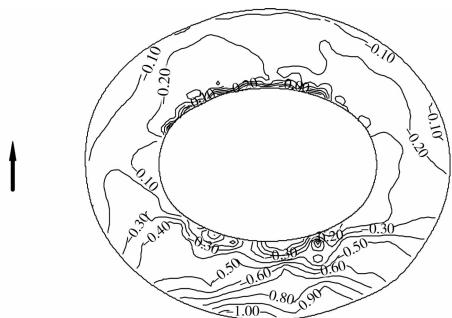
(a) 等效静风荷载(式13a)



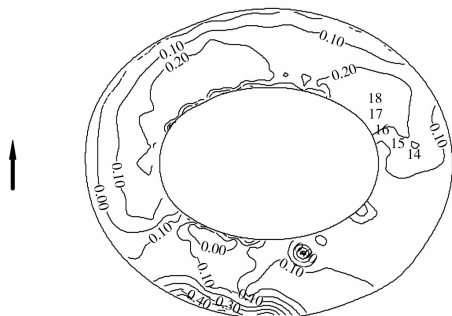
(b) 等效静风荷载(式13b)

图 10 0° 风向的总等效静风荷载

按照与 0° 风向相同的分析方法,对 270° 风向角的等效静风荷载也进行了研究,图 11 给出了将 22 个节点位移和 24 个支座反力同时作为等效目标,所对应的等效静风荷载。同理,可以验证,将其作为静力荷载作用在结构上,各点响应与实际动力响应极值吻合较好。



(a) 等效静风荷载(式13a)



(b) 等效静风荷载(式13b)

图 11 270° 风向的总等效静风荷载

4 结 论

该文主要针对当前分析大跨结构等效静风荷载中存在的主要问题,研究多目标等效静风荷载分析方法,并采用该方法对国家体育场的等效静风荷载进行了深入研究。主要结论有:

1)选择风振响应中的主要本征模态和结构振型作为构造多目标等效静风荷载的基本向量,根据最小二乘法,可以得到这些基本向量的最优组合系数。该方法可以解决等效静风荷载分析的多等效目标问题。

2)国家体育场所有风向的风振响应中,背景响应远大于共振响应,共振响应可忽略不计;其中, 0° 风向和 270° 风向是两个最不利风向角。

3)对国家体育场两个最不利风向角的等效静风荷载研究结果表明:在针对多等效目标的等效静风荷载作用下,所有关键位置的节点位移响应和支座反力都与实际动力响应极值吻合较好。

参考文献:

- [1] 范重,刘先明,范学伟,等. 国家体育场大跨度钢结构设计与研究[J]. 建筑结构学报, 2007,28(2):1-16.
FAN ZHONG, LIU XIAN-MING, FAN XUE-WEI, et al. Design and research of large-span steel structure for the National Stadium [J]. Journal of Building Structure, 2007, 28(2):1-16.
- [2] Davenport. Gust Loading Factors [J]. Journal of the Structural Division, 1967, 93(ST3):11-34
- [3] YIN ZHOU, AHSAN KAREEM. Gust loading factor: New Model[J]. J. Struct. Eng., 2001, Vol. 127, No. 2:168-175.
- [4] KASPERSKI M. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design[J]. Eng. Struct., 1992,14: 37-34.
- [5] TAMURA Y, KIKUCHI H, HIBI K. Extreme wind pressure distributions on low-rise building models[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2001, 89:1635-1646.
- [6] ZHOU Y, KAREEM A, GU M. Equivalent static buffeting wind loads on structures[J]. J. Struct. Eng., 2000, 126 (8): 989-992.
- [7] 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 SHI-ZHAO. Background of equivalent static wind loads on large span roofs [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 21-27.
- [8] 顾明, 周暄毅. 大跨度屋盖结构等效静力风荷载方法及应用[J]. 建筑结构学报, 2007,28(1):125-129.
GU MING, ZHOU XUAN-YI. Equivalent static wind loads of large-span roof structure [J]. Journal of Building Structures, 2007,28(1):125-129.
- [9] 陈波. 大跨屋盖结构等效静风荷载精细化理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [10] KASUMURA A, TAMURA Y, NAKAMURA O. Universal wind load distribution simultaneously reproducing maximum load effects in all subject members on large span cantilevered roof [C]//The Fourth European and African Conference on Wind Engineering. ITAN AS CRM Prague, 11-15 July, 2005.
- [11] KATSUMURA A, TAMURA Y, NAKAMURA O. Universal wind load distribution simultaneously reproducing largest load effects in all subject members on large-span cantilevered roof[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2007,95:1145-1165.
- [12] HU XIAO-HONG. Wind loading effects and equivalent static wind loading on low-rise buildings[D]. Texas Tech University, 2006.
- [13] HOLMES J D. Effective static load distributions in wind engineering[J]. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2002,90: 91-109.
- [14] TAMURA Y, SUGANUMA S, KIKUCHI H, et al. Proper orthogonal decomposition of random wind pressure field[J]. Journal of Fluids and Structures, 1999,13: 1069-1095.
- [15] 国家体育场有限责任公司. 北京国家体育场风洞测试结构荷载研究报告[R]. 北京, 2004.
- [16] CHEN BO, WU YUE, SHEN SHI-ZHAO. A new method for wind-induced response analysis of long span roofs[J]. International Journal of Space Structures, 2006,21(2):93-101.

(编辑 胡 玲)