

大跨屋盖结构多目标等效静风荷载分析方法

吴迪¹, 武岳¹, 张建胜²

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090; 2. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江杭州 310014)

摘要:针对大跨屋盖结构多振型参与风振的特点,提出一种多目标等效静风荷载确定方法。其基本思想是,分别建立多目标等效方程组和约束方程组,前者可获得与各等效目标吻合程度最好的解,后者是根据风荷载作用方向为垂直于建筑物表面的钝体空气动力学原理得到的风荷载各方向分量的关系,限制某些奇异荷载作用模式的出现,从而解决了大跨屋盖结构等效静风荷载研究中突出存在的多目标等效问题。结合两个典型大跨屋盖结构的风洞试验,对不同类型的结构响应进行了等效静风荷载分析,并将分析结果与采用单目标方法所得的结果进行对比,结果表明该方法得到的等效静风荷载作用下各类响应均与动力极值响应吻合良好,达到了以少量的等效静风荷载模式实现所有目标等效的目的,并且所得等效静风荷载分布较符合实际风荷载作用规律。

关键词:大跨屋盖结构;多目标等效方程组;约束方程组;多目标等效静风荷载

中图分类号:TU393.3 TU312.1 **文献标志码:**A

Multi-objective equivalent static wind loads for large span roofs

WU Di¹, WU Yue¹, ZHANG Jiansheng²

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The determination of equivalent static wind loads (ESWL) for large span roofs is a difficult problem in theoretical research of structural wind engineering. According to the characteristics of spatial structures, a new method was proposed to obtain ESWL for multiple equivalent objectives. First, a multi-objective equivalent equation was proposed to make the ESWL capture the maximum load effects of structure at the same time. Then a constraint equation related to the direction of wind loads was constructed in order to reduce the dimension of ESWL vector and to exclude some unrealistic and curious load distributions. At last, the method was applied to two typical large span roofs combined with wind tunnel tests. The results show that the maximum load effects captured by the ESWL agree well with those directly estimated by frequency domain response analysis. As a result, only few ESWL with clear physical meaning are needed to obtain all responses with sufficient accuracy.

Keywords: large span roofs; multi-objective equivalent equations; constraint equations; multi-objective ESWL

基金项目:国家自然科学基金项目(90815021),铁道部科技研究开发课题(2010T001-E)。

作者简介:吴迪(1982—),男,山东济南人,博士研究生。E-mail: forseti2001@163.com

收稿日期:2010年1月

0 引言

等效静风荷载 (equivalent static wind loads, ESWL) 是联系结构风工程与工程实践的桥梁,其理论研究始于高层及高耸建筑结构。上世纪 60 年代, Davenport 等^[1,2] 提出以阵风荷载因子方法 (GLF 法) 确定等效静风荷载,该方法表达简洁、使用方便,被很多国家的建筑荷载规范采用。1992 年, Kasperski^[3] 提出具有里程碑意义的荷载-响应相关系数法 (LRC 法),该方法利用荷载和响应之间的相关函数确定实际最可能发生的最不利风荷载分布,被认为是确定等效静风荷载背景分量的理想方法。Holmes^[4] 将 LRC 法和惯性力法相结合,给出了由平均风荷载、背景等效风荷载以及多阶共振响应分量产生的惯性风荷载组合的等效风荷载分布形式。至此,针对高层、高耸建筑结构的顺风向等效静风荷载分析方法趋于成熟。

近年来,借鉴高层建筑结构中的研究成果,国内学者^[5-7] 对屋盖结构的等效静风荷载开展了一系列研究,初步形成了一种用于大跨屋盖结构等效静风荷载研究的精细化理论框架,并给出了等效静风荷载各分量的具体确定方法(以下简称 LRC-惯性力法)。但与高层、高耸建筑结构不同,大跨度屋盖结构具有多振型参与风振的特点,导致将传统的等效静风荷载确定方法用于大跨结构时存在一些问题,其中最突出的问题就是多目标等效问题。所谓多目标等效问题是指,由于大跨度屋盖结构往往存在多阶振型参与振动,导致结构的各种关键响应并不完全相关,针对不同的响应(即等效目标)存在不同的等效静风荷载分布形式,给工程设计带来很大不便。因此,如何采用尽可能少的等效静风荷载分布形式,同时实现尽可能多的目标等效,就成为大跨屋盖结构等效静风荷载理论研究中的重要问题。为解决这一问题, Katsumura 等^[8] 提出了一致等效静风荷载分析方法 (universal ESWL),其基本思想是将脉动风荷载的本征模态作为等效静风荷载的基本分布模式,通过最小二乘法计算各分布模式的最优组合系数,以满足多目标等效的要求。但本征正交分解 (POD) 技术的引入使该方法不易为工程设计人员理解,且要取得较好的等效效果往往需要多阶本征模态,对于大型结构往往面临计算量过大的问题。梁枢果等^[9] 利用数值优化原理提出了一种极值内力等效静风荷载计算方法,但由于未对荷载作用模式加以规定,可能导致等效静风荷载与风荷载实际作用模式不符。陈波等^[10] 在 Katsumura 方法的基础上,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,使等效静风荷载具有一定物理含义,但当结构多振型共振显著时,该方法同样将面临计算效率偏低的问题。

本文在以往研究的基础上提出了一种新的多目标等效静风荷载分析方法,其基本思想是分别建立多目标等效方程组和约束方程组,前者可得到与各等效目标吻合程度最好的数值解,后者可使等效静风荷载的分布符合实际风荷载的作用规律,避免某些不合理作用模式的出现。最后结合风洞试验,将该方法应用于两个典型大跨屋盖结构的等效静风荷载的分析以校验其有效性。

1 多目标等效静风荷载分析方法

1.1 多目标等效方程组的建立

由经典力学知识可知结构在静力 $\{f\}$ 作用下的某一特定位置处的响应可由式(1)求解。

$$R = \sum_i I_{Ri} f_i = [I_R]^T \{f\} \quad (1)$$

式中, I_{Ri} 为影响线函数,表示在 i 自由度方向施加单位力时特定位置处的响应, f_i 为作用于 i 方向的力。

同理,满足多目标等效的静风荷载 $\{F_e\}$ 与结构在脉动风荷载作用下的动力响应极值应满足式(2)关系。

$$[I_R]_{m \times 3n} \{F_e\}_{3n} = \{\hat{R}\}_m \quad (2)$$

式中, m 为等效目标个数, n 为结构表面的节点数(即直接受到风荷载作用的节点数), $3n$ 为风荷载向量的维数, $[I_R]_{m \times 3n}$ 为结构影响线矩阵, $\{F_e\}_{3n}$ 为等效静风荷载向量, $\{\hat{R}\}_m$ 为结构上各等效目标位置在风荷载作用下的极值响应:

$$\{\hat{R}\}_m = \text{sign} \{\bar{R}\}_m \cdot g \{\sigma_R\}_m \quad (3)$$

式中, $\text{sign} \{\bar{R}\}_m$ 为平均风响应 $\{\bar{R}\}_m$ 的符号向量, σ_R 为响应的标准差, g 为峰值因子,一般取 3.0~4.0。

式(2)相当于一个以 $\{F_e\}_{3n}$ 为未知数的非齐次线性方程组,其未知数个数为 $3n$, 方程个数(即等效目标个数)为 m , 本文称之为等效方程组。由线性代数理论可以证明^[11], 求解等效方程组可以得到与各等效目标吻合程度最好的数值解,但由于这一求解过程基于纯粹的数学优化而未对荷载作用模式加以规定,导致等效静风荷载的分布往往与人们对风荷载的认识相悖,例如某些位置风荷载的数值可能非常大,进而导致将风荷载与其它形式荷载组合时出现困难(具体分析见 2.2 节)。为解决这一问题,有必要在等效方程组的基础上对荷载分布形式进一步加以限制,以实现等效静风荷载分布的合理化。

1.2 约束方程组的建立

根据钝体空气动力学理论,风荷载的作用方向是垂直于建筑物表面的,显然等效静风荷载也应遵循这一规律,即等效静风荷载应垂直于建筑物表面。但直接求解式(2)获得的等效静风荷载往往并不满足这一条件,这也是奇异荷载作用模式出现的主要原因,为此本文引入与荷载作用方向相关的约束方程,目的就是避免奇异荷载作用模式的出现。

作用于某节点 o 处的等效静风荷载向量可写为向量形式:

$$\bar{F}_{e,o} = F_{x,o} \bar{i} + F_{y,o} \bar{j} + F_{z,o} \bar{k} \quad (4)$$

设建筑物表面在该节点处的法向量方向余弦为 $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$, 则等效静风荷载向量应满足:

$$\frac{F_{x,o}}{\cos\alpha} = \frac{F_{y,o}}{\cos\beta} = \frac{F_{z,o}}{\cos\gamma} \quad (5)$$

式(5)可进一步展开为:

$$\begin{cases} F_{x,o} \cos\beta - F_{y,o} \cos\alpha = 0 \\ F_{x,o} \cos\gamma - F_{z,o} \cos\alpha = 0 \end{cases} \quad (\cos\alpha \neq 0) \quad (6)$$

为便于程序处理,将式(6)表达为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \cos\beta & -\cos\alpha & 0 \\ \cos\gamma & 0 & -\cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x,o} \\ F_{y,o} \\ F_{z,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可确定等效静风荷载各方向分量的关系,将之推广到整个结构,可得齐次线性方程组:

$$[C]_{2n \times 3n} \{F_e\}_{3n} = \{0\}_{2n} \quad (8)$$

其中, $[C]$ 定义为约束矩阵(秩为 $2n$),其作用是保证等效静风荷载在各节点的合力与建筑表面垂直,可由结构表面各节点坐标确定。

式(8)由 $2n$ 个线性无关的方程组成,本文称之为约束方程组,其作用相当于规定等效静风荷载的作用方向必须垂直于建筑物表面,从而限制一些不合理分布形式的出现,由线性代数理论可知,约束方程组的实质是对等效静风荷载向量进行降维,使其维数由 $3n$ 降为 n ,据此可将等效方程组(2)改写为:

$$[I_R^*]_{m \times n} \{F_e^*\}_n = \{\hat{R}\}_m \quad (9)$$

式中, $\{F_e^*\}_n$ 、 $[I_R^*]_{m \times n}$ 分别为降维后的等效静风荷载向量和影响线矩阵。

求解方程组(9)即可获得针对多个等效目标的等效静风荷载,根据结构表面节点数 n 与等效目标数 m 的关系,方程组(9)的解可分为以下三种情况:

(1)当 $n = m$ 时,方程组有唯一解,对于结构所有表面节点竖向位移的等效属于该种情况;

(2)当 $n > m$ 时,方程组有无穷多个可能的解,对于支座反力的等效往往属于该种情况;

(3)当 $n < m$ 时,方程组无精确解,此时只能得

到方程组在最小二乘意义上的解,即使范数 $\|[I_R^*] \{F_e^*\} - \{\hat{R}\}\|$ 取最小值的 $\{F_e^*\}$,可以证明这个解为^[11]:

$$\{F_e^*\} = ([I_R^*]^T [I_R^*])^{-1} [I_R^*]^T \{\hat{R}\} \quad (10)$$

由于大跨屋盖结构杆件数量众多,因此对于所有杆件内力的等效往往属于第三种情况。

1.3 应用方法

至此本文提出了一种实用的多目标等效静风荷载分析方法,具体步骤如下:

(1)对结构进行风振响应分析,确定各等效目标的动力响应极值;

(2)提取结构影响线矩阵,构建等效方程组(2);

(3)提取结构几何信息,构建约束方程组(8);

(4)利用约束方程组对等效方程组进行降维,获得降维后的等效方程组(9),根据等效目标数与结构受荷节点数的关系求解式(9)得到满足多个目标的等效静风荷载。

可以看出,构建方程组(9)所需要的结构影响线矩阵、动力响应结果和结构几何信息均可以通过现有的有限元软件和设计软件方便获取,而无需 POD 等复杂的数学方法;同时约束方程组的建立赋予了等效静风荷载明确的意义,便于为设计人员理解。

另外值得注意的是,对于需要同时考虑多种类型响应的情况,应对不同类型的极值响应 \hat{R} 和相应的影响线矩阵进行归一化处理,以消除各类响应量级的差别对计算结果的影响。

2 算例

为验证本文方法的适用性,分别对一个悬挑屋盖和一个球形屋盖在同济大学 TJ-2 边界层风洞中完成的刚性模型动态测压试验(风洞试验的具体结果参见文献[12])进行等效静风荷载研究,并将本文方法分析结果与单目标方法分析结果进行了对比。文中的等效静风荷载均以风压系数表示,参考点为屋檐高度。

2.1 悬挑屋盖

悬挑屋盖原型结构水平尺寸为 $100\text{m} \times 25\text{m}$,网架厚度为 3m ,檐口高度为 25m (图1)。以风洞试验获得的风压时程为激励,采用考虑振型耦合的频域分析方法(即 CQC 法)对结构进行了风振响应分析。图2给出了原型结构各阶振型的应变能贡献,前2阶振型的应变能贡献达到总响应能量的80%,前4阶振型的应变能贡献超过95%。

图3a和图4a分别给出了以结构所有上弦节点(共56个)竖向位移 \hat{R}_Δ 、所有上弦杆件(共121根)

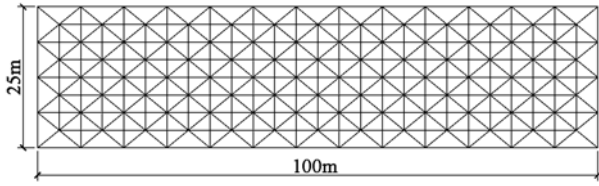


图1 悬挑屋盖原型结构

Fig. 1 Structural model of cantilevered roof

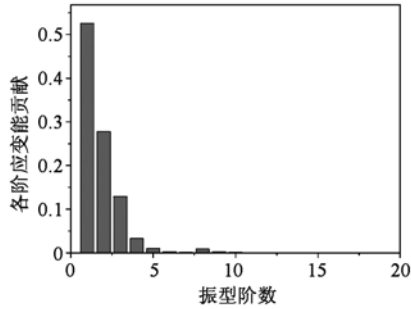
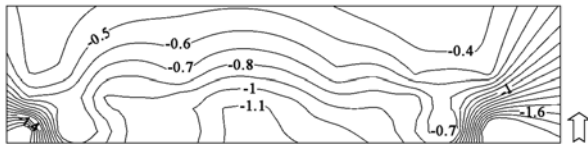
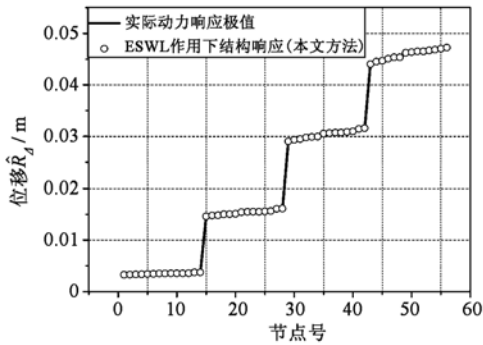


图2 各阶振型对响应的应变能贡献

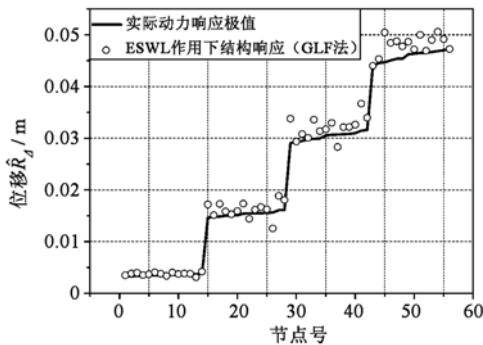
Fig. 2 Strain energy of each structural mode to fluctuating response



(a) 等效静风荷载(风压系数)分布



(b) 本文方法等效结果

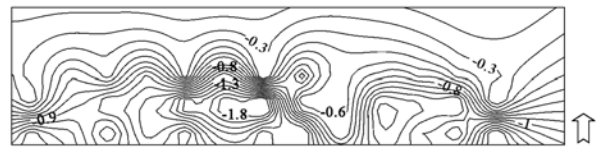


(c) GLF 法等效结果

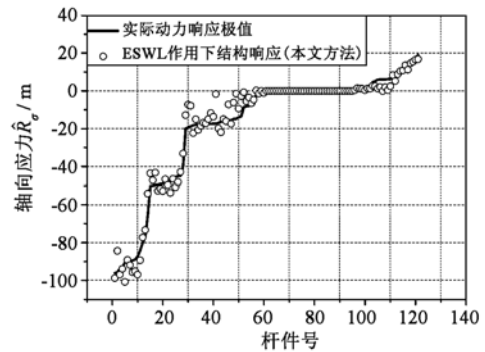
图3 针对节点竖向位移的等效静风荷载及其极值响应

Fig. 3 Equivalent static wind loads and response for nodal displacement

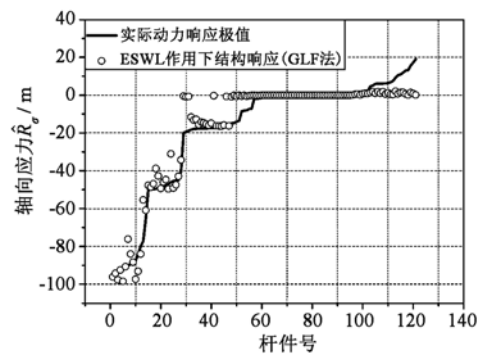
轴向应力 \hat{R}_σ 为等效目标的等效静风荷载分布。可以看出,等效静风荷载分布数值上变化较为均匀,没有出现奇异荷载作用模式,表现出较好的规律性。图 3b 和图 4b 给出了上述等效静风荷载以静力形式作用下结构的响应,并与 CQC 方法得到的结构动力极值响应进行了对比。图 3c 和图 4c 给出了采用 GLF 法的计算结果。为便于表示,图中节点号/杆件号依实际动力响应极值由小到大排序。可以看出,本文方法和 GLF 法均与目标响应吻合较好,其原因是结构参振振型较少,风振响应由少数几阶振型控制,各等效目标间具有较强的相关性。但即便如此,GLF 法也仅能保证控制点响应(即响应最大点)完全等效,非控制点响应则与目标值存在一定偏差。



(a) 等效静风荷载(风压系数)分布



(b) 本文方法等效结果

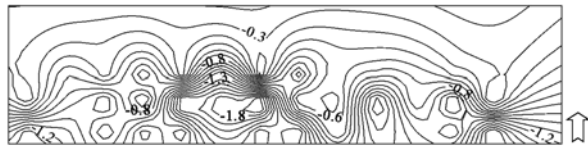


(c) GLF 法等效结果

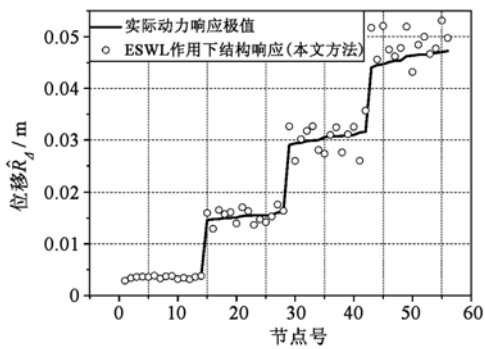
图4 针对杆件轴向应力的等效静风荷载及其极值响应

Fig. 4 Equivalent static wind loads and response for axial stress of members

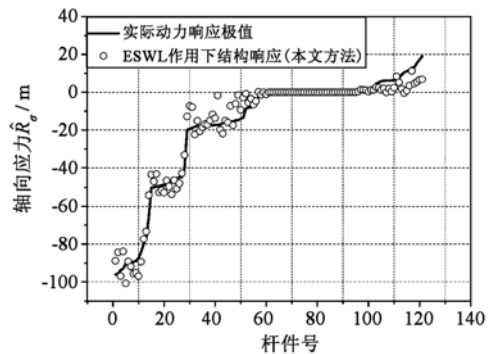
图 5a 给出了同时针对节点竖向位移 \hat{R}_Δ 和杆件轴向应力 \hat{R}_σ 的等效静风荷载分布,其分布形式与图 4a 类似,原因是结构杆件数量远大于节点数量,杆件轴向应力在等效方程组中占据了更大的权重。该等



(a) 等效静风荷载(风压系数)分布



(b) 位移等效结果



(c) 轴向应力等效结果

图5 同时针对节点竖向位移和杆件轴向应力的等效静风荷载及其极值响应

Fig. 5 Equivalent static wind loads and response for nodal displacement and axial stress

效静风荷载作用下的结构响应见图5b、5c,可以看出该静风荷载作用下所有节点竖向位移和杆件轴向应力均与实际动力响应吻合较好。

2.2 球形屋盖

球形屋盖结构模型取频数为6的K6型单层球面网壳,如图6所示,结构杆件截面按稳定性要求进行选取^[13]。图7给出了球形屋盖各阶振型对系统应变能的贡献,可以看出该结构的风振响应呈现多振型参振的特点,最大贡献振型为第91阶。

图8a、9a,图10a分别给出了以结构所有非支座节点(共91个)竖向位移 \hat{R}_d 、所有杆件(共306根)轴向应力 \hat{R}_σ 、所有支座(共36个)竖向反力 \hat{R}_N 作为等效目标,得到的等效静风荷载分布。可以看出,等效静风荷载分布变化较为均匀,没有出现奇异荷载

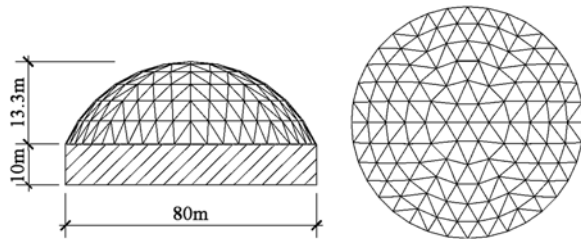


图6 球形屋盖结构模型

Fig. 6 Structure of dome roof

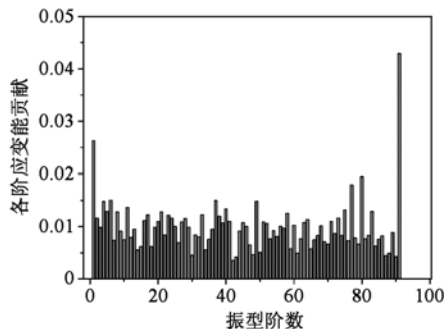
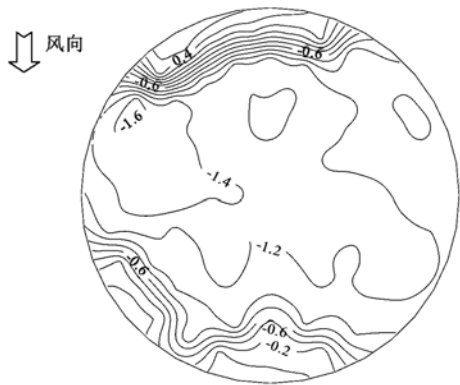


图7 各阶振型对响应的应变能贡献

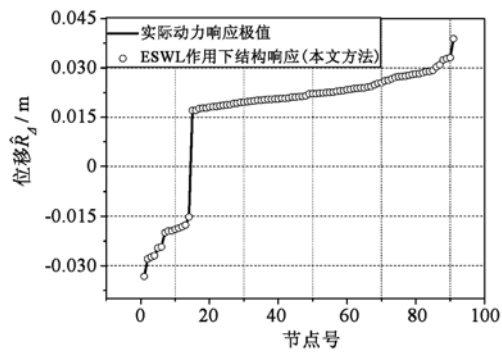
Fig. 7 Strain energy of each structural mode to fluctuating response

作用模式;针对不同类型响应的等效静风荷载分布差异较大,说明对于该结构不宜将所有类型响应同时作为等效目标计算等效静风荷载。图8b、9b,图10b分别给出了以本文方法得到的等效静风荷载作用下结构的静力响应和由动力分析得到的位移响应极值,图8c、8d给出了以GLF法和LRC-惯性力法计算得到的针对最大节点位移的等效结果。可以看出,以GLF法和LRC-惯性力法得到的等效静风荷载仅能保证控制点(即响应最大点)的响应与动力极值响应相等,其它点的响应则与动力极值存在较大偏差,其原因是该球形屋盖的风致振动由多个振型共同控制,各极值响应间的相关性较差,不是同时出现,导致以这两种方法进行结构抗风设计时必须考虑针对多个控制点的等效静风荷载,给工程应用带来很大不便。而由本文方法得到的等效静风荷载作用下各类响应均与动力极值响应吻合良好,达到了以少量的、符合实际风荷载作用规律的等效静风荷载模式实现所有目标等效的目的。

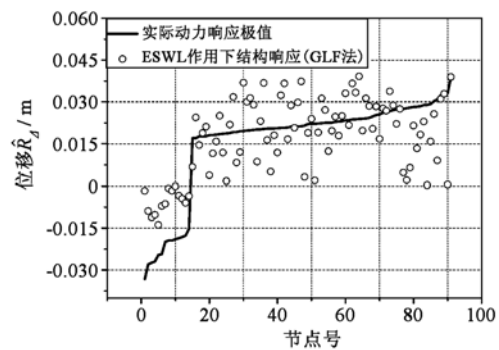
另外,为说明约束方程组的作用,图11给出了直接求解等效方程组得到的针对杆件轴向应力的等效静风荷载分布,可以看出,与图9a相比,仅考虑等效方程组得到的等效静风荷载数值较大,且球壳表面风压变化十分剧烈,所得结果很难为工程设计人员接受。



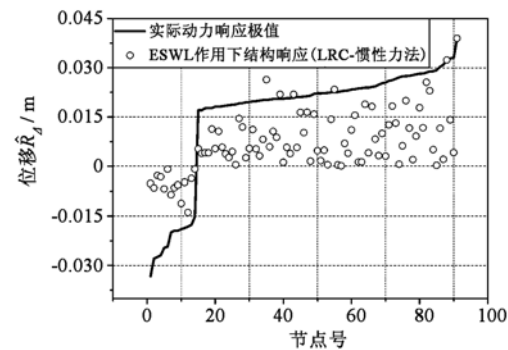
(a) 等效静风荷载(风压系数)分布



(b) 本文方法等效结果

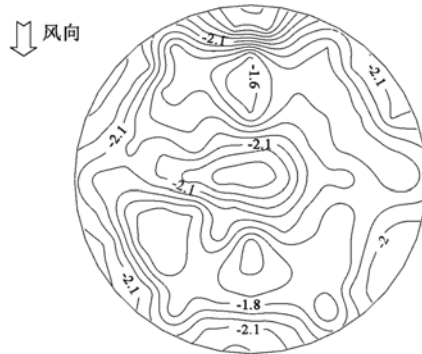


(c) GLF法等效结果

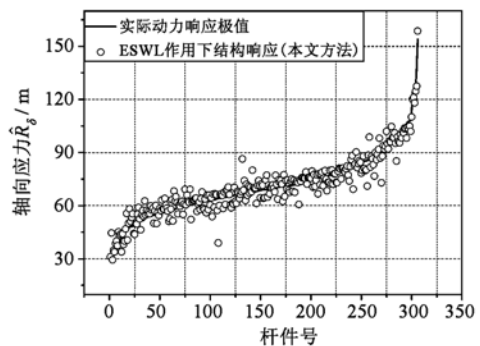


(d) LRC-惯性力法等效结果

图8 针对节点竖向位移的等效静风荷载及其极值响应
Fig. 8 Equivalent static wind loads and response for nodal displacement

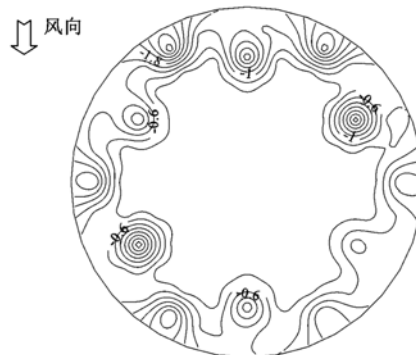


(a) 等效静风荷载(风压系数)分布

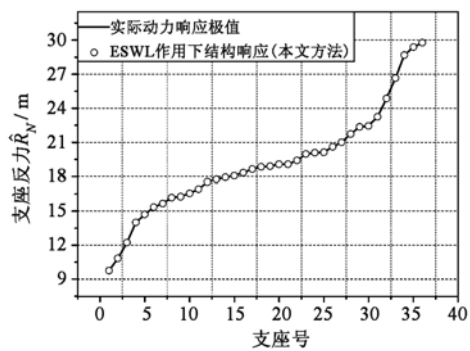


(b) 本文方法等效结果

图9 针对杆件轴向应力的等效静风荷载及其极值响应
Fig. 9 Equivalent static wind loads and response for axial stress of members



(a) 等效静风荷载(风压系数)分布



(b) 本文方法等效结果

图10 针对竖向支座反力的等效静风荷载及其极值响应
Fig. 10 Equivalent static wind loads and response for reaction of supports

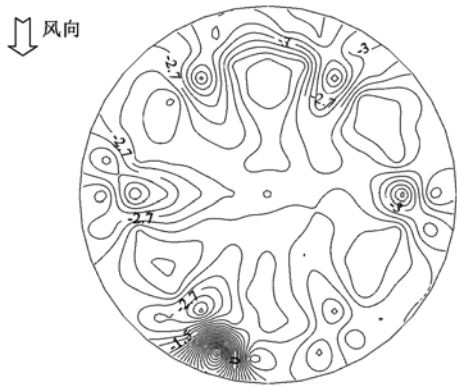


图 11 仅考虑等效方程组的等效静风荷载分布
(针对杆件轴向应力)

Fig.11 Equivalent static wind loads obtained from equivalent equation (for axial stress of members)

3 结论

本文针对大跨屋盖结构等效目标众多,等效静风荷载难以确定的问题,提出了一种考虑多目标的等效静风荷载分析方法。主要结论如下:

(1) 针对大跨度结构多振型参与风振的特点,定义多目标等效方程组和与荷载作用方向相关的约束方程组,利用约束方程组对等效方程组降维,获得同时满足多个等效目标的等效静风荷载分布模式。

(2) 结合风洞试验,将本文提出的方法应用于两个典型大跨屋盖结构的等效静风荷载分析,并与现有方法进行对比,结果表明本文方法可以实现以少量的等效静风荷载模式保证所有目标等效,并且所得等效静风荷载分布较符合实际风荷载作用规律,一定程度上解决了等效静风荷载研究中理论与实际脱节的问题。

参 考 文 献

[1] Davenport A G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961, 19(2): 449-472.

[2] Davenport A G. Gust loading factor[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1967, 93(3): 11-34.

[3] Kasperski M, Niemann H J. The LRC (load-response correlation) method: a general method of estimating unfavorable wind load distributions for linear and nonlinear structural behavior [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43 (1-3): 1753-1763.

[4] Holmes J D. Effective static load distributions in wind engineering [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(2): 91-109.

[5] 武岳,陈波,沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静风荷

载研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 27-39. (WU Yue, CHEN Bo, SHEN Shizhao. Research on equivalent static wind loadings of large-span roof structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22 (4): 27-39. (in Chinese))

[6] 顾明,周昶毅. 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 Xuanyi. Equivalent static wind loads of large span structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28 (1): 125-129. (in Chinese))

[7] 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): 113-118. (XIE Zhuangning, NI Zhenhua, SHI Biqing. Equivalent static wind loads on large span roof structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 113-118. (in Chinese))

[8] Kasumura A, Tamura Y, Nakamura O. Universal wind load distribution simultaneously reproducing largest load effects in all subject members on large span cantilevered roof [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9-11): 1145-1165.

[9] 梁枢果,吴海洋,郭必武,等. 大跨度屋盖结构等效静力风荷载数值计算方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36 (4): 110-114. (LIANG Shuguo, WU Haiyang, GUO Biwu, et al. Numerical calculation of evaluating equivalent static wind loads on long span roof structures [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2008, 36 (4): 110-114. (in Chinese))

[10] 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. (CHEN Bo, YANG Qingshan, WU Yue. Multi-objective equivalent static wind loads for large-span structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 62-67. (in Chinese))

[11] 俞正光,李永乐,詹汉生. 线性代数与解析几何 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. (YU Zhengguang, LI Yongle, ZHAN Hansheng. Linear algebra and analytic geometry [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese))

[12] 孙瑛. 大跨屋盖结构结构风荷载特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. (SUN Ying. Characteristics of wind loading on long-span roofs [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese))

[13] 沈世钊,陈昕. 网壳结构稳定性 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. (SHEN Shizhao, CHEN Xin. Stability of reticulated shells [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))