

格构式输电塔结构多质点简化模型研究

张庆华^{1,2}, 顾明¹, 黄鹏¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 华北水利水电学院 郑州 450011)

摘要: 采用“串联多质点系”力学模型, 建立了典型 500 kV 酒杯型输电塔和鼓型输电塔简化模型。根据高频动态测力天平风洞试验结果, 计算了输电塔简化模型的风致响应, 与根据实际结构有限元模型的结果进行了比较, 对简化模型的计算误差及适用性进行了分析。结果表明, 简化模型不适合用于格构式结构局部杆件的响应分析, 但在计算反映结构整体特性的响应时具有较高的精度。

关键词: 输电塔; 简化模型; 串联多质点模型; 风致响应

中图分类号: TU 761.3; TU317 文献标识码: A

Multi-degree-freedom model of a lattice transmission tower

ZHANG Qing-hua^{1,2}, GU Ming¹, HUANG Peng¹

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Based on a multi-degree-freedom model, simplified models of two typical 500kV transmission towers were established. The wind-induced responses of the two simplified models were computed according to wind tunnel tests, and compared with the results of a finite element model. Moreover, the calculation error and applicability of the two models were analyzed. The results showed that the two simplified models are not applicable to calculating the responses of local truss members, but have higher accuracy for the responses reflecting the characteristics of the whole structure.

Key words: transmission tower; simplified model; multi-degree-freedom model; wind-induced response

随着我国电网建设, 作为高压输电线路重要组成的输电铁塔得到了前所未有的发展, 塔高从最初的几十米发展到 2009 年建成投产的舟山大跨越, 塔高 370 m (全球输电铁塔第一高)^[1], 风荷载已成为其主要的控制荷载。风致输电塔线体系动力特性已成为国际、国内风工程和结构工程界长期关注的重要研究课题。

“串联多质点系”力学模型是输电塔线体系风振响应计算分析中广泛采用的一种简化模型^[2-7], 其方法是将输电塔线体系简化为具有多个集中质量的串联多自由度体系, 各集中质点之间由刚性杆相连。简化模型的采用, 便于风力的加载, 提高了计算效率。然而, 输电塔作为典型的格构式空间桁架结构, 其复杂的空间形式和几何外形决定了杆件的变形对结构的响应必然要有较大的影响, 而“串联多质点系”力学模型采用了质量集中, 刚度等效等简化方法, 恰恰忽略了局部变

形的影响, 这必然将会造成结构风致响应的计算结果与实际结果的不一致。

本文采用“串联多质点系”力学模型, 建立了 500kV 典型单回路酒杯型输电塔和双回路鼓型输电塔简化模型, 根据片段刚性模型天平测力试验结果^[8-11], 计算了简化模型的风致响应, 与根据实际结构有限元模型计算得到的响应结果^[11]进行了比较, 对简化模型的响应计算误差进行了分析, 给出了“串联多质点系”力学模型用于响应计算的适用范围。

1 简化模型的建立

简化模型建立时, 仅考虑输电塔结构各方向一阶振动模态(X 、 Y 向侧弯和扭转振型), 不考虑模态交叉项对结果的影响。由文献[11]的分析可知, 上述参数的选择对响应计算结果的影响很小, 能够保证足够的计算精度。

1.1 简化模型的质量和转动惯量

用“串联多质点系”力学模型建立了输电塔简化计算模型(图 1)。其中, 酒杯型输电塔共分 9 层, 鼓型输电塔共分为 12 层, 每层质点考虑两个方向的平动质量和绕竖向参考轴的转动惯量(I_{zz}), 各质点的质量和转

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50621062); 国家自然科学基金重点项目(50638010)

收稿日期: 2011-08-30

第一作者 张庆华 男, 博士, 1977 年 8 月生

通讯作者 顾明 男, 博士, 教授, 1957 年生

动惯量可直接通过有限元软件 ANSYS 获得,酒杯型输电塔和鼓型输电塔各节段质心高度、分布质量和转动惯量参见表 1。

1.2 简化模型刚度矩阵的确定

假定: 在水平荷载和扭转荷载作用下,横截面不发生周边变形,整个截面产生位移和转角后仍保持为平面。塔架各杆件完全处于弹性阶段^[12]。

具体方法如下: 设结构的分层数为 i , 每层关键点数为 j (通常取主材处的节点)。在各层关键点上依次

施加 $1/j$ 的单位力, 从而可得到各节点两个方向的线位移 u_{ij} 、 v_{ij} , 节点位移向量为:

$$\{U_{ij}\} = \{u_{ij} \quad v_{ij}\} \quad (1)$$

简化模型中, 该层对应节段位移为:

$$\{U_i\} = \{u_i \quad v_i \quad \theta_i\} \quad (2)$$

其中 $\mu_i = \sum_{j=1}^N u_{ij}$, $\nu_i = \sum_{j=1}^N v_{ij}$, 即将位于同一层上各节点线位移值求和再平均, 得到输电塔简化模型节段二个方向的线位移。

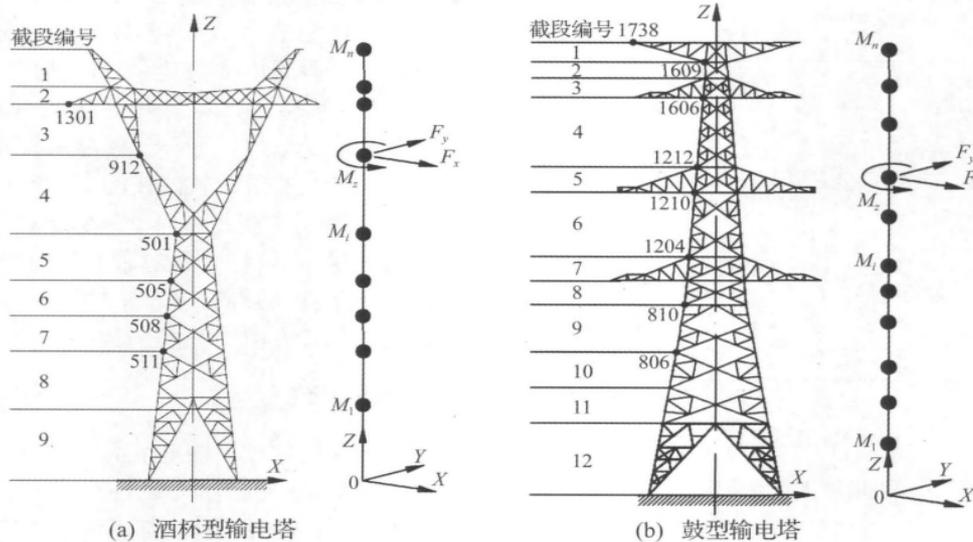


图 1 典型输电塔“串联多质点系”简化模型

Fig. 1 Multi-degree-of-freedom model of typical transmission towers

表 1 典型输电塔简化模型参数

Tab. 1 The model parameters of transmission towers

模型	层数	质心高度/m	质量/kg	$I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$
酒杯型输电塔	1	52.906	1 142.2	1.27E+05
	2	48.805	5 010.2	3.17E+05
	3	44.755	1 754.1	9.35E+04
	4	36.285	4 252.0	6.66E+04
	5	29.124	2 421.9	1.86E+04
	6	23.389	1 548.6	1.96E+04
	7	18.880	1 603.9	2.72E+04
	8	12.691	3 094.2	7.23E+04
	9	5.863	5 265.2	1.64E+05
鼓型输电塔	1	56.151	1 855.8	0.43E+05
	2	53.505	299.9	669.6
	3	50.821	4 118.3	0.90E+05
	4	45.591	2 267.5	0.12E+05
	5	39.051	6 090.7	0.22E+06
	6	33.984	2 960.3	0.32E+05
	7	28.026	8 368.2	0.25E+06
	8	25.045	3 655.5	0.58E+05
	9	20.844	4 719.5	0.12E+06
	10	15.734	3 803.0	0.15E+06
	11	10.686	5 404.9	0.25E+06
	12	5.174	10 740.0	0.74E+06

节点位移 $\{U_{ij}\}$ 和节段位移 $\{U_i\}$ 间的关系为:

$$\{U_{ij}\} = [T_{ij}] \{U_i\} \quad (3)$$

$[T_{ij}]$ 为节点位移与截面位移的转换矩阵,

$$[T_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_{ij} \\ 0 & 1 & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式 (1) ~ (4) 可以求得:

$$\begin{cases} u_{ij} = u_i - y_{ij}\theta_i \\ v_{ij} = v_i + x_{ij}\theta_i \end{cases} \quad (5)$$

这样, 当已知节段的两个方向线位移后, 再根据某一节点位移求解方程 (5) 即可求出节段的转角。从而可以求出简化模型的整体位移柔度阵, 通过求逆, 即可得到简化模型的刚度矩阵。

1.3 简化模型固有频率与模态

根据简化模型的质量和刚度, 可以求出简化模型的固有频率与振型, 表 2 给出了有限元模型与简化模型各方向一阶固有频率比较 (f_x 、 f_y 为 X、Y 向侧弯固有频率, f_z 为扭转固有频率)。表中可见, 简化模型的固有频率与有限元模型的固有频率非常接近, 误差最大仅为 6.708%。图 2 为酒杯型输电塔和鼓型输电塔简化模型 X、Y 向侧弯和扭转阵型图, 该振型已对质量矩阵归一。

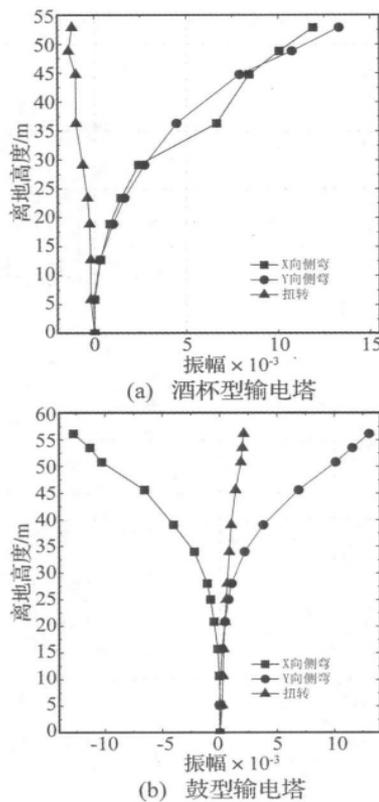


图2 输电塔简化模型振型

Fig. 2 The mode shape of simple models

表2 有限元模型与简化模型固有频率(Hz)比较

Tab. 2 The comparison of natural frequencies

	阶数	有限元模型	简化模型	误差/%
酒杯塔	f_x	1.263 70	1.281 92	1.442
	f_y	1.341 29	1.341 91	0.046
	f_z	1.711 72	1.826 55	6.708
鼓型塔	f_x	1.767 07	1.794 21	-1.536
	f_y	1.842 98	1.834 70	0.449
	f_z	4.072 26	4.191 09	-2.918

误差定义:(有限元模型固有频率-简化模型固有频率)/有限元模型固有频率×100%

2 输电塔风振响应计算

分别采用简化模型和有限元模型计算了酒杯型输电塔和鼓型输电塔的静动力风致响应。响应计算风荷载由高频天平测力风洞试验获得^[8-11]。

2.1 简化模型响应计算

计算得到的输电塔简化模型的响应为该层中心处的两个平动方向及扭转方向的响应。若需要计算各层不同位置处节点的响应,需根据几何关系考虑平动及扭转响应的影响。取输电塔中心为坐标原点,并设某节点P在XY平面内的坐标为(a,b),简化模型计算得到的输电塔中心的X、Y方向及扭转方向的平均位移响应为 U_x 、 U_y 和 R_z ,响应根方差分别为 σ_{U_x} 、 σ_{U_y} 和 σ_{U_z} ,

则P点的X、Y向平均位移为:

$$\begin{cases} X_p = U_x - bR_z \\ Y_p = U_y + aR_z \end{cases} \quad (6)$$

位移响应根方差值为:

$$\begin{cases} \sigma_{P_x}^2 = \sigma_{U_x}^2 + b^2\sigma_{R_z}^2 - 2b\sigma_{U_x R_z}^2 \\ \sigma_{P_y}^2 = \sigma_{U_y}^2 + a^2\sigma_{R_z}^2 + 2a\sigma_{U_y R_z}^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\sigma_{U_x R_z}$ 为X向平动位移与扭转位移的互协方差, $\sigma_{U_y R_z}$ 为Y向平动位移与扭转位移的互协方差。

2.2 有限元模型响应计算^[11]

通过有限元软件 ANSYS 建立了酒杯型输电塔和鼓型输电塔有限元模型。其中,角钢构件用 Beam44 单元模拟,采用 Mass21 单元来考虑连接螺栓、节点板等附件导致的质量增加。有限元模型的模态矩阵和刚度矩阵可直接通过有限元软件获得。

由于输电塔模型复杂,节点较多,风力施加时,根据附属面积,直接将风力施加于关键节点处,为了保证相同计算条件,动力响应计算时,有限元模型频域响应计算仅考虑各方向一阶振型。

3 响应比较

本节主要比较了输电塔简化模型风致响应与有限元模型计算结果的不同,给出了典型关键点(关键点的选取参见图1)位移响应、基底弯矩的计算误差,误差定义:(有限元模型结果-简化模型结果)/有限元模型结果。

对于输电塔结构,Y(X)轴的最大响应发生在 $0^\circ \sim 40^\circ$ ($50^\circ \sim 90^\circ$)风向,极值风向下的峰值响应是对结构具有控制意义的响应,这里主要对比关键点峰值位移响应和输电塔基底弯矩的计算误差。

3.1 静力响应比较

图3给出了酒杯型和鼓型输电塔有限元模型和简化模型关键点平均位移响应计算误差,图4为平均基底弯矩的计算误差,可以看出,有限元模型与简化模型得到的关键点平均位移响应有较大的误差,但平均基底弯矩值基本吻合,误差不超过2.5%。

3.2 动力响应比较

图5、图6分别给出了有限元模型和简化模型计算得到的关键点脉动位移响应误差和脉动基底弯矩误差。与静力响应相同,有限元模型与简化模型得到的关键点脉动位移响应有较大的误差,但两者计算得到的脉动基底弯矩基本吻合,峰值弯矩处的误差基本能控制在5%以内。

3.3 简化模型计算误差及原因分析

由响应结果比较可以看到,简化模型计算得到的静动力基底弯矩有较高的精度,而采用简化模型首先计算出中心位移响应,再根据几何关系求得的关键点

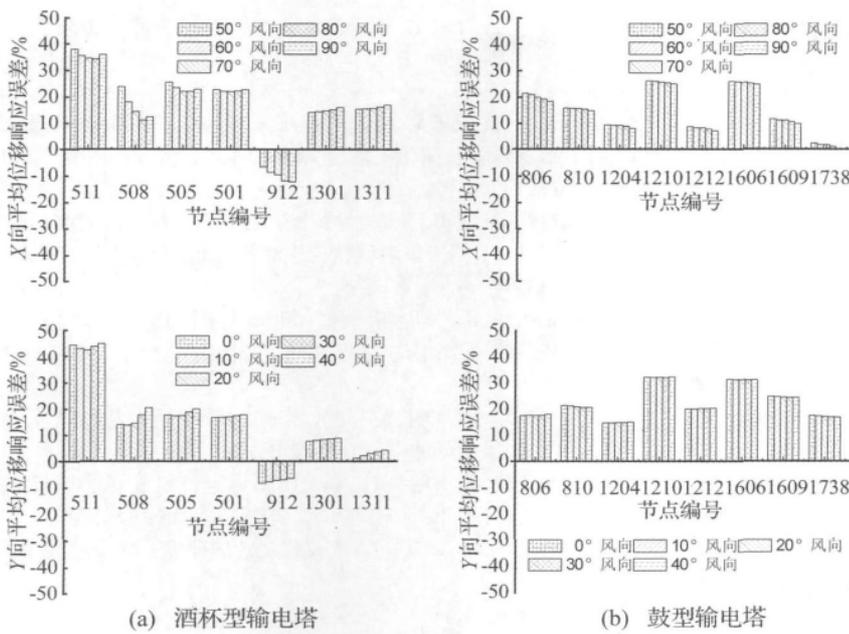


图 3 关键点平均位移响应计算误差
Fig. 3 The calculating error of average displacements of key joints

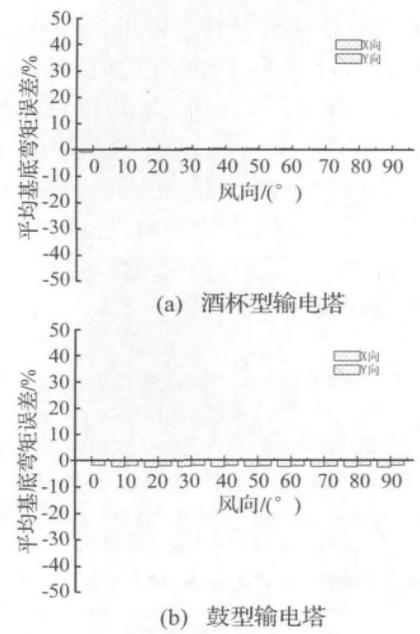


图 4 输电塔平均基底弯矩计算误差
Fig. 4 The calculating error of average base bending moment

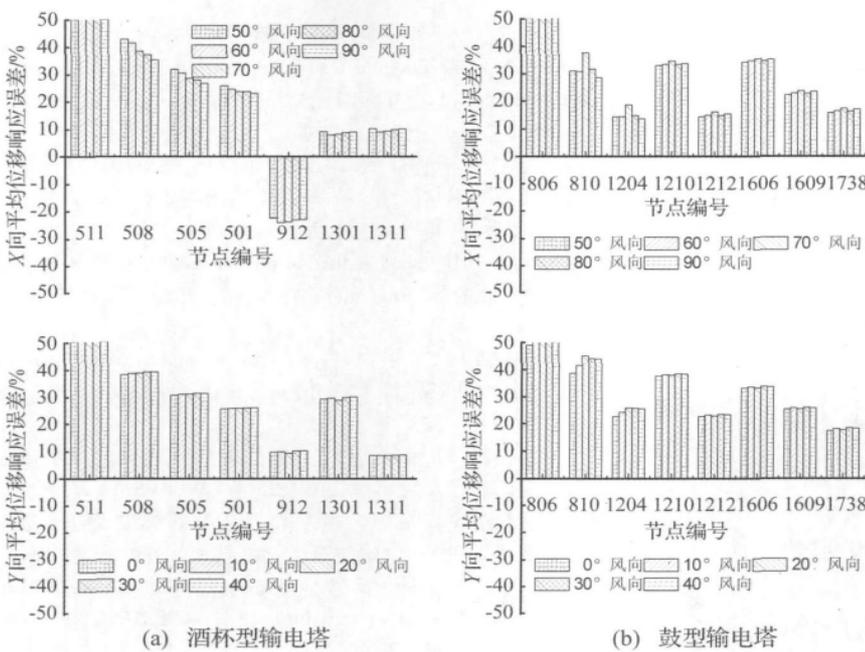


图 5 关键点脉动位移响应计算误差
Fig. 5 The calculating error of root mean square value of displacements of key joints

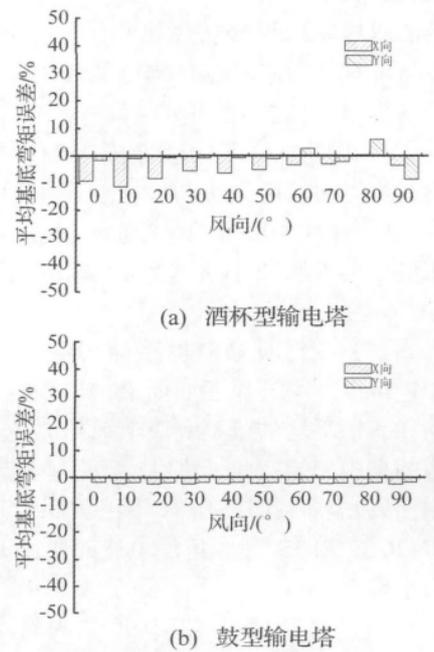


图 6 输电塔脉动基底弯矩及误差
Fig. 6 The calculating error of root mean square value of base bending moment

位移响应与有限元模型相比产生了较大的误差,结果甚至有可能偏危险(杆端位移响应的计算误差也将直接影响杆件轴力的计算)。

简化模型位移响应误差产生的主要原因在于:在简化模型建立时,为了获得整体刚度,假定各节段横截面不发生周边(局部)变形。采用几何关系由中心质点位移求关键点位移,也是建立在假设节段为刚性,不考

虑内部杆件变形。但是,输电塔实际是由大量杆件构成的格构式结构,外荷载作用下局部杆件的变形不能忽略。有限元模型与简化模型位移响应的计算误差证明了杆件的局部变形对位移响应有较大的影响。

4 结 论

本文采用“串联多质点系”力学模型,建立了 500

kV 典型单回路酒杯型输电塔和双回路鼓型输电塔简化模型,计算了简化模型的风致响应,与根据实际结构有限元模型计算得到的响应结果进行了比较。结果表明,“串联多质点系”简化模型不适合用于格构式结构局部杆件的响应分析,但在估算结构整体受力情况,特别是计算反映结构整体特性的响应(如基底弯矩)具有很高的精度,同时,简化模型的计算效率也大大优于有限元模型。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 浙江舟山亚洲第一输电线路大跨越全线贯通 [EB/OL]. <http://www.sgcc.com.cn/xwzx/gsxw/2010/06/224790.shtml>, 2010.
- [2] Ozono S, Maeda J, Makino M. Characteristics of in-plane free vibration of transmission line systems [J]. *Engineering Structures*, 1988, 10: 272-280.
- [3] Ozono S, Maeda J. In-plane dynamic interaction between a tower and conductors at lower frequencies [J]. *Engineering Structures*, 1992, 14(2): 210-216.
- [4] 李宏男,王前信. 大跨越输电塔体系的动力特性 [J]. *土木工程学报*, 1997, 30(5): 28-35.
- [5] 李宏男,石文龙,贾连光. 考虑导线影响的输电塔侧向简化抗震计算方法 [J]. *振动工程学报*, 2003, 16(2): 233-237.
- [6] 李宏男,石文龙,贾连光. 导线对输电塔体系纵向振动的影响界限及简化抗震计算方法 [J]. *振动与冲击*, 2004, 23(2): 1-7.
- [7] 瞿伟廉,殷惠君,陈波. 输电线路动力分析的多质点模型研究 [J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2003, 20(2): 1-5.
- [8] 张庆华,顾明,黄鹏. 500 kV 单回路输电塔塔头风荷载计算模型研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(12): 151-154.
- [9] 张庆华,顾明,黄鹏. 格构式塔架风力特性试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(2): 1-4.
- [10] 张庆华,顾明,黄鹏. 典型输电塔塔头风力特性试验研究 [J]. *振动工程学报*, 2008, 21(5): 452-457.
- [11] 张庆华. 典型输电塔风荷载及效应研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [12] 王肇民, Peil U. 塔桅结构 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.

(上接第 147 页)

角的双坡屋面低矮房屋进行了一系列风洞模型试验,并与没有任何附属檐口构造的坡屋面风荷载进行了对比分析,并由此得出下列结论:

(1) 屋面坡度的改变影响迎风面来流分离和再附。当屋面坡度为 14.0° 时,无论是平均、脉动还是极值风压,迎风面都非常大;而随着屋面坡度增加,迎风面负压会逐渐减小,当达到一定的坡度时甚至会出现正压。

(2) 对于低矮双坡屋面房屋,檐口采用各种附属构造可以减小迎风屋面前檐口附近的风压(平均、脉动和面积平均的最不利极值风压),这主要由于附属结构的出现一定程度上抑制了屋面来流的分离,因而对屋面风压有一定的削减作用。而对于减小的幅度而言, 26.6° 和 33.7° 坡角的坡屋面要比 14.0° 坡角的坡屋面小得多。

(3) 通过对不同几何形状的附属构造的对比,本文所示的檐口形状 3 和 8 的折减效果最好,对附属面积为 0.81 m^2 的最不利面积极值风压,折减可达 47% 以上。

参考文献

- [1] Stathopoulos T, Luchian H. Wind-induced forces on eaves of low buildings [J]. *Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1994, 52: 249-261.
- [2] 孙瑛,全涌,田村幸雄等. 不同屋檐类型对低矮建筑表面风荷载的影响 [C] // 第十三届全国结构风工程学术会议论文集. 大连, 2007: 837-742.
- [3] Blackmore P H. Load reduction on flat roofs-the effect of edge profile [J]. *Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1988, 29(1-3): 89-98.
- [4] Robertson A P. Effect of eaves detail on wind pressures over an industrial building [J]. *Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1991, 38(2-3): 325-333.
- [5] 黄鹏,陶玲,全涌等. 浙江省沿海地区农村房屋抗风情况调研 [J]. *灾害学* 2010, 25(4): 90-95.
- [6] 浙江省标准设计站. 05J 系列浙江省建筑标准设计图集—瓦屋面 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [7] American Society Of Civil Engineering. Minimum design loads for buildings and other structures [S]. ANSI/ASCE 7-05, ASCE, New York, 2006.
- [8] Davenport A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1964, 28: 187-196.