

基于风振舒适度的高层建筑生命周期费用模型

赵 昕¹, 余天意²

(1. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 根据感知结构在风荷载作用下振动的人数所占比例, 将超高层建筑舒适度性能水平划分为5个等级, 并以结构水平振动加速度作为控制指标, 建立了超高层建筑舒适度性能的评价方法。通过虚拟激励法进行频域分析, 求得结构在随机风荷载作用下的响应特性, 获得1次强风作用下结构各性能水平的可靠度; 考虑工程场地可能出现的风荷载水平, 得到建筑生命周期内各舒适度性能水平的可靠度; 同时, 根据投资-收益准则, 建立基于舒适度性能的超高层建筑生命周期费用模型; 该模型可以考虑不同设计方案下的生命周期费用, 并可依据生命周期费用最小原则进行投资决策, 是基于性能的抗风设计的具体应用。利用该方法对某超高层建筑调频质量阻尼器(TMD)安装与否进行了投资决策, 说明了本方法的适用性。

关键词: 超高层建筑; 基于性能的抗风设计; 舒适度; 生命周期费用; 投资-效益准则

中图分类号: TU318.1

文献标志码: A

Human Comfort Performance-based Life Cycle Cost Model of High-rise Structures Under Wind Load

ZHAO Xin¹, YU Tianyi²

(1. Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the percentage of human perception of the vibration of the building under wind load, the human comfort performance of the building was classified into five levels. The maximum acceleration was adopted as the quantitative index of the performance. Pseudo excitation method was employed in the frequency domain analysis for the calculation of the reliabilities of each performance of the super tall building under random wind force. The randomness of the wind speed being taken into consideration, the failure probabilities of the human comfort levels were obtained for the

whole life cycle. A failure model for the wind induced human comfort of super tall buildings was derived base on the cost-effectiveness criterion. This model evaluated the life cycle cost of the different design schemes, which could help make design choice based on the minimum life cycle cost criteria. It is of great significance to the performance-based wind-resistant design. The proposed method was applied to the human comfort design choice of a super tall building with tuned mass damper (TMD) device to illustrate its effectiveness and applicability.

Key words: super tall buildings; performance-based wind-resistant design; human comfort; life cycle cost; cost-effectiveness criterion

由于超高层建筑的高、柔特性, 结构在风荷载作用下会产生振动。过大的振动会引起居住者产生不适感, 影响工作效率, 造成经济损失。各国规范一般都以某一回归期风荷载作用下结构顶部振动的最大加速度为控制指标。但是按这种设计方法, 业主很难了解结构在不同风压下的具体性能水平, 比如, 工程师对建筑抗风性能的期望是满足正常使用的安全性要求, 而业主对建筑性能的期望则可能是人体舒适度有较高的水平。另外, 建筑结构的性能水平没有用来进行经济评估, 业主无法了解初期投资能获得多大收益, 例如是否需要采用调频质量阻尼器(TMD)装置进行减振控制等。

基于性能的设计(performance-based design)是解决此类问题的重要手段。基于性能的设计主要是保证结构在不同灾害水平下保持相应的性能水平。基于性能设计在工程抗震领域获得了广泛的应用, 而基于性能的抗风设计(performance-based wind-resistant design)目前研究还较少, 而对于超高层建筑来讲, 风荷载却往往是结构设计的控制荷载。基于

收稿日期: 2012-12-13

基金项目: 上海市青年科技启明星计划(11QH1402700); 上海市科技攻关计划(09dz1207704)

第一作者: 赵 昕(1975—), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为超高层建筑设计理论。E-mail: 22zx@tjadri.com

性能的结构抗风设计的目的是在不同强度水平风振作用下,能够有效地控制建筑结构的安全、舒适使用性能,使建筑物实现明确的不同性能水准,从而使建筑物在整个生命周期内,在遭受可能发生的风振作用下,总体费用达到最小^[1]。卜国雄等^[2]对含有TMD结构的设计进行了研究,采用了“效-费比”进行经济性评价,是对基于性能的抗风设计的有益探索。然而其未考察结构舒适度失效产生的后果,不能对不含TMD结构的生命周期费用进行评价,也未体现不同功能建筑物对舒适度要求的高低以及相应的舒适度失效影响。

基于此,本文提出了基于风振舒适度性能的超高层建筑生命周期费用评估方法,分析了其生命周期费用的组成。对于特定自振周期的结构,依据振动加速度峰值将结构舒适度划分为不同性能水平,考察各性能水平的失效概率及相应的失效后费用。采用生命周期费用最小原则,对TMD安装及优化选取等结构设计进行决策。

1 结构生命周期费用理论

在结构工程领域,结构的生命周期设计理论与方法的研究是国内外研究的热点。芬兰的 Asko Sarja 等^[3]对结构生命周期的综合设计进行了系统的研究,他将投资-效益准则作为基于性能设计的重要原则,使人们从只注重结构安全向全面注重结构的性能、安全和经济等多方面转变。

在建筑结构全寿命费用分析模型中,比较典型的有 Dan M. Frangopol 等^[4]、Y. K. Wen 等^[5-6]提出的,其将生命周期费用 L_{cc} 分为3个部分:初期投资 I ,结构维护和检修费用 M ,结构失效费用 F 。即可由下式表达:

$$L_{cc} = I + M + F \quad (1)$$

基于性能设计的重要意义便在于寻求结构可靠性与经济性的平衡,使结构生命周期的总费用最小。

2 抗风结构舒适度生命周期费用分析与计算

超高层建筑结构在风荷载作用下产生振动,依据结构振动加速度水平可以将结构舒适度划分为若干性能水平等级,某一性能水平失效时会引起相应比例的人员感到不安和工作效率下降,从而直接或间接造成经济损失。若将结构风振舒适度性能水平

划为 n 级,且设1年内第 j 级性能水平失效造成的损失为 c_j ,结构发生第 j 级性能水平失效的概率为 p_{ij} ,则1年内,建筑结构因舒适度失效产生的费用 c_1 为

$$c_1 = \sum_{j=1}^n c_j p_{ij} \quad (2)$$

为了对建筑结构整个生命周期进行考察,在综合评价时还需考虑资金折现的影响。为简化分析,可考虑时不变结构,各年发生失效的费用相同,由此可以得到如下生命周期舒适度费用评估模型:

$$L_{cc} = C_0 + C_m + C_f = C_0 + C_m + \sum_{i=1}^{T_{life}} c_1 \frac{1}{(1+r)^i} \quad (3)$$

式中: C_0 为初始投资; C_m 为检修维护费用; C_f 为失效费用; T_{life} 为生命周期使用年限,对于超高层建筑一般可取100年; r 为资金折现率。

为了提高舒适性,往往采取增大构件截面、安装TMD装置等减小结构的振动,然而这样会增加初始投资。

一般来说,对于选定结构形式、建筑材料的设计方案,基本可以确定结构的初始投资 C_0 。对于含有TMD的结构,其初始投资可以由所选定的质量块费用、阻尼器费用、橡胶支座费用和导轨费用等加和求得。检修维护费用可以参照相关经验进行计算。对于TMD装置的检修维护费用 C_m 可近似取初始造价的4%~5%^[2]。而各设计方案下结构各性能水平的舒适度可靠性及其失效后的损失费用需要进行精细分析和计算。

2.1 结构风致舒适度性能水平量化

国内外相关研究表明,影响人体舒适度的主要因素是振动频率、振动加速度和振动持续时间。其中起决定因素的是振动加速度。因此,目前国际上广泛采用建筑物的风振加速度响应来评价高层建筑的舒适度性能。

考虑到评价建筑物居住性能,应贴近生活感觉,经常的轻微的不安,其往往比偶然的严重的感觉更不能忍受。而且结构产生振动超过人们知觉域且引起不适时,会立即影响工作效率,结构振动继续增大到绝大部分人都能感知振动时,人们通常会选择避开振动场。因此对多数结构而言,采用知觉域进行舒适度性能评价是合适的。日本学者 Tamura 等^[7]对该问题进行了较多的研究,拟合出风致振动环境中感知振动人数的比例与振动频率等的关系,并据此划分结构风振性能水平。相关成果也在日本规范

(AIJES-V001—2004)^[8]中得到体现:结构的风振舒适度性能水平可由 1 年回归期的风荷载作用下结构的最大振动加速 a_{\max} 来确定,其中 a_{\max} 是与振动频率有关的. 根据不同结构最大振动加速度可将结构在风荷载下的舒适度性能划分为“H-10”到“H-90”5 个等级. 其中, H-10 表示 10% 的人感知振动, H-30 表示 30% 的人感知振动,其余类推.

这种评价方法能够很好表达出不同自振频率的建筑的振动感受,并可以将振动加速度与人体反应量化. 因此本文采用此种评价方式,即根据结构自振周期确定结构抗风舒适度第 j 性能的水平振动速度限值 λ_j .

2.2 抗风结构各舒适度性能水平失效概率计算

高层建筑在风荷载作用下,会产生顺风向、横风向和扭转响应. 实际上,风荷载通常被描述成随机过程,因此对结构进行随机振动响应分析是计算结构在风荷载作用下各性能水平失效概率的基础.

2.2.1 结构风荷载随机响应计算

由于风荷载的随机过程特性,结构在风荷载下的响应可以利用其响应功率密度谱来描述,其是通过荷载的功率谱经过频响函数等方法求得. 而对于可能存在的振型密集或具有非线性阻尼的随机振动分析,可采用虚拟激励法^[9]计算.

结构顺风向振动是由脉动风引起的. 一般可将脉动风用具有零均值的高斯平稳随机过程来表达. 结构顺风向风荷载功率密度谱通常可采用 Davenport 谱、Van Karman 谱等,考虑脉动风的相关性可获得结构顺风向风荷载谱. 通过随机振动结果分析,便可获得结构响应的功率密度谱,进而可求得结构顺风向响应的均方差.

风作用下,不仅会出现顺风向响应,而且随着目前建筑物高度不断增加,结构的横风向效应愈加明显,甚至会超过顺风向成为结构抗风设计的控制荷载^[10-11]. 而横风向风振的机理比较复杂,影响因素较多,不像顺风向气动力谱可根据准定常理论和片条假定由来流风速直接推导得到. 目前广泛采用基底高频测力天平进行相关研究,其基于结构 1 阶振型为线性的假设求得结构的横风向气动力谱^[11]. 同济大学全涌、顾明等高频测力天平技术拟合出了 4 种不同风场、15 种不同外形的超高层建筑横风向气动力谱,并给出了闭合公式^[12]. 则同理可计算得到结构横风向响应的均方差.

对于某些外形变化较大的建筑在风荷载作用下还会产生扭转振动. 结构的扭转振动是由于迎风和

背风面及侧面风压的不对称所致,与紊流及尾流激励有关. 当结构质心和刚度中心偏离时,弯曲振型与扭转振型出现耦合,结构响应与单一方向的响应有很大差别,表现为复杂的空间运动形式^[13]. 因此这类建筑宜考虑结构扭转效应的影响,其计算方法可参考文献^[13].

TMD 对超高层的风振控制效果十分显著. 由于 TMD 系统和主结构的耦合作用,结构动力方程中的质量及刚度矩阵为非对称阵,阻尼矩阵也非经典正交阻尼矩阵. 对于这种问题,可采用等效阻尼或采用文献^[9]提出的虚拟激励法等进行解决.

2.2.2 结构各舒适度性能水平失效概率计算

基于首次超越破坏机制,结构在强风作用下,动力响应超越各个舒适度水平界限的概率就是结构的舒适度失效概率^[14].

曹宏等^[14]研究表明,用正态分布法描述结构的风振加速度反应峰值的概率密度分布较为恰当,在结构响应标准差已知时,其响应超过限值 λ_j 的概率密度函数由下式求得^[15]:

$$p_t(\lambda_j, -\lambda_j) = 1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\lambda_j}{\sqrt{2}\sigma_x}} e^{-t^2} dt \right)^N; N = \frac{\sigma_x T}{\pi \sigma_x} \quad (4)$$

式中: σ_x , σ_x 分别为相应结构速度和加速度的均方差; T 为阵风持时,通常可取 10 min.

需要注意的是,上面的安全界限是在一定的平均风压 w_k 下得到的^[16]. 所以其计算的可靠度是在一定风压下的条件概率,于是,1 年内强风作用下大于第 j 级舒适度性能水平的失效概率 P_{ij} 为

$$P_{ij} = \int_0^{+\infty} P_i(\lambda_j, -\lambda_j | w = w_k) f(w) dw \quad (5)$$

其中, $f(w)$ 为 1 次强风 10 min 最大平均风压 w 的概率密度函数.

至此,1 年内建筑结构在风荷载作用下发生第 j 级性能水平的舒适度失效概率便求解出来了,结构处于各舒适度性能水平的可靠度为大于本级性能水平可靠度与高一级性能水平可靠度之差,公式如下:

$$p_{ij} = P_{ij} - P_{(j+1)}, j = 1, 2, 3, 4, p_{i5} = P_{i5} \quad (6)$$

2.3 抗风结构各舒适度性能水平失效费用估算

不同结构功能的建筑,同一振动水平造成的损失也不一样. 例如,医院要求较高水平的振动舒适度,高档酒店、写字楼对舒适度要求也较高;而对于观光塔等来讲,对舒适度要求就相对较低,因舒适度失效造成的损失也就少一些.

因此,对结构各性能水平舒适性失效费用进行

估算时,需要综合考虑结构使用功能,居住者人数,人员敏感程度和当地经济条件水平等。

对于不同的建筑,建议的各舒适度性能水平的失效费用可以按下式计算:

$$c_j = \alpha n \chi C \quad (7)$$

式中: α 为不同性能水平影响系数,可由经验或统计回归法得到; n 为处于振动环境中的人数; χ 为建筑不同使用功能的影响系数,对于酒店、办公楼等对振动加速度敏感的可取为 1.0,观光塔等取为 0.8; C 为当地年人均收入。

3 算例

某 100 层超高建筑,层高 5 m,建筑总高 $H=500$ m,截面尺寸 $B=D=69$ m,其结构及简化后的 20 质点串模型如图 1 所示。结构的阻尼比取为 0.02,当地的风环境为 D 类地貌,50 年一遇的基本风压 w_0 为 0.55 kPa。拟对结构舒适度性能进行评估,并对是否安装 TMD 进行决策。

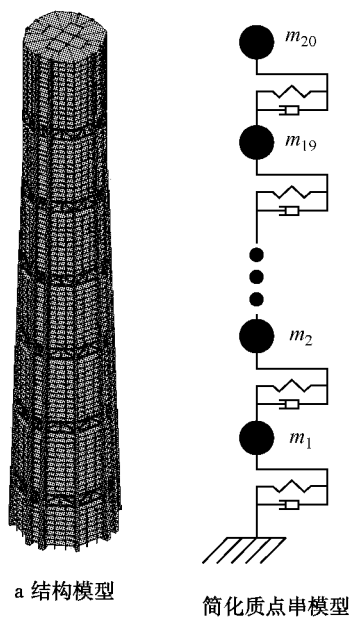


图 1 某超高层结构模型及质点串模型

Fig.1 A super tall building and the simplified model

3.1 结构响应及各性能水平失效概率

结构顺风向脉动风速功率密度谱采用 Davenport 谱。将 1 年内可能出现的基本风速离散化为: 20.0, 23.7, 26.8, 29.7, 32.2, 34.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 6 个风力水平。分别求出各个风压等级的脉动荷载谱,并运用虚拟激励法求解结构响应。

以 29.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速水平为例,结构各质点加速度响应标准差如图 2 和图 3 所示。可以看出,结构在横风向的响应要大于其顺风向响应。

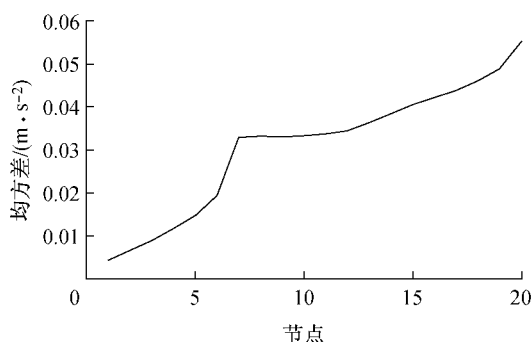


图 2 结构顺风向加速度响应均方差

Fig.2 The standard deviation of acceleration response of each point in the along-wind direction

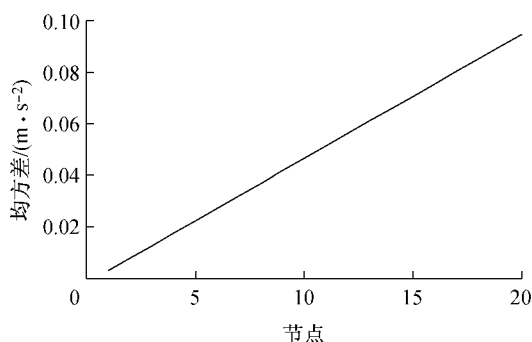


图 3 结构横风向加速度响应均方差

Fig.3 The standard deviation of acceleration response of each point in the across-wind direction

需要指出的是,在计算横风向结构响应时,由于采用的是基底高频测力天平的相关结果,其是基于建筑物 1 阶振型近似为线性的假设,得到作用在建筑物上的广义 1 阶力谱^[11,17];因此,其结构响应为在竖向上也表现为线性。而在顺风向计算时,考虑了所有参振振型,结构的 1 阶振型呈弯剪型。因此,受高阶振型的影响,结构在中部部分楼层加速度响应有极值点出现。

如前所述,对于特定自振周期的建筑,其在风荷载下的性能水平可以通过振动加速度进行量化。对于本建筑,其自振周期为 0.112 Hz,可得到结构各性能水平的峰值加速度限值如表 1 所示。

表 1 结构各性能水平的峰值加速度限值

Tab.1 The peak acceleration of each performance of the building

性能水平	H-10	H-30	H-50	H-70	H-90
限值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.034 9	0.049 8	0.064 2	0.082 4	0.117 6

计算出结构在 1 年回归期下的最大风振加速度,便可以得到结构在该荷载水平作用下的性能,如图 4 所示。可以看出在不采取控制措施时,结构的舒适度性能水平为 H-50。

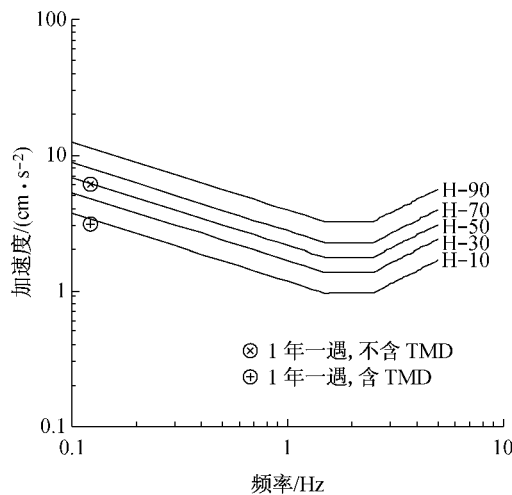


图 4 1 年回归期风荷载下结构舒适度性能

Fig. 4 The human comfort performance of the building under 1-year recurrence wind

考察 1 年内可能发生的风力水平,可求得 1 年内结构的各性能水平可靠度,如图 5 和图 6 所示。

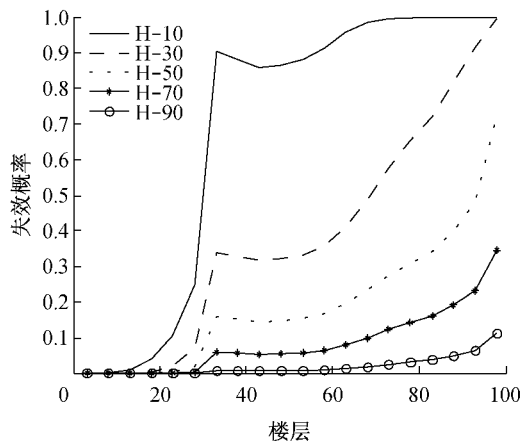


图 5 不含 TMD 结构顺风向性能水平失效概率

Fig. 5 Failure probability of each performance level without TMD device in the along-wind direction

增加结构总质量的 2%~3% 的 TMD 装置即可使结构的加速度响应减为原来的一半左右. 同理可求得 1 年内含 TMD 装置的结构各性能水平失效概率,如图 7 和图 8 所示。

3.2 结构生命周期舒适度费用评估及投资决策

获得结构各性能水平的失效概率后,可以用前面建立的生命周期舒适度费用模型进行评估,由于本结构横风向响应起控制作用,可按横风向进行计算,计算年限取 100 年,资金折现率取 3.5%。

为了比较含与不含 TMD 结构的生命周期费用,可将不含 TMD 装置的结构初始费用设为 0. 含 TMD 的初始费用为 2 245 500 美元, TMD 的维护费

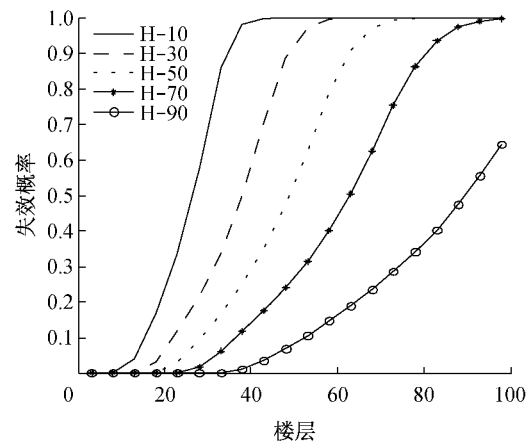


图 6 不含 TMD 结构横风向性能水平失效概率

Fig. 6 Failure probability of each performance level without TMD device in the across-wind direction

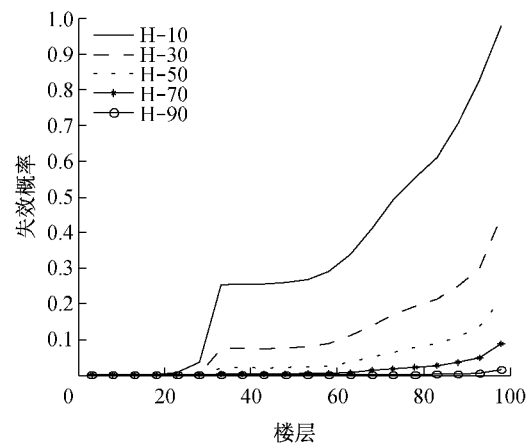


图 7 含 TMD 结构顺风向性能水平失效概率

Fig. 7 Failure probability of each performance level with TMD device in the along-wind direction

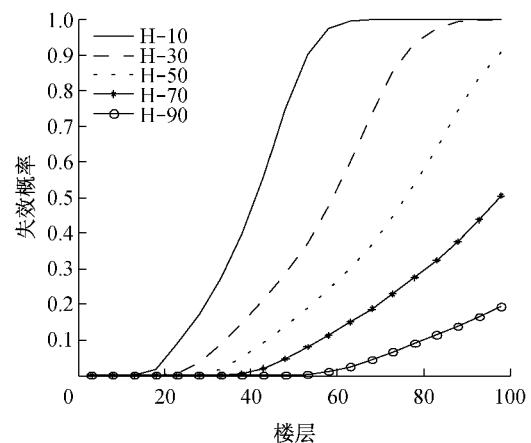


图 8 含 TMD 结构横风向性能水平失效概率

Fig. 8 Failure probability of each performance level with TMD device in the across-wind direction

用可近似取为初始造价的 5%。则由结构舒适度生命周期费用分析模型可以求得,结构在计算年限内的

费用如表 2 所示。

表 2 生命周期费用期望值
Tab.2 Expected life cycle cost

设计 方案	资金折 现率/%	$T_{life}/$ 年	$C_0/$ 美元	$C_m/$ 美元	$C_f/$ 美元	$L_{cc}/$ 美元
不含 TMD	3.5	100	0	0	4 554 270	4 554 270
含 TMD	3.5	100	2 245 500	112 275	1 963 150	4 320 925

由此可见,安装 TMD 对结构舒适度性能有很大的改善,虽然初期投资增加了很多,但是从生命周期费用来看,结构总体费用反而降低。因此,可以考虑选择安装 TMD。

4 结语

本文介绍了结构风荷载作用下的舒适度问题,并对含与不含 TMD 结构的抗风动力可靠度和基于性能的抗风设计进行了探究,运用虚拟激励法求解结构响应,计算出结构各性能水平的可靠度。最后基于此建立了一个风致失效费用的模型,从而量化结构因风振产生的损失。此项成果可应用于结构全寿命成本分析中,便于业主投资决策。

本文的算例表明,TMD 装置对结构舒适度水平的提高有较大的贡献,合理地增加初期投资可以降低生命周期总费用。此项成果可以用于结构初期设计优化,对 TMD 安装决策等有一定意义,为以后相关问题的解决提供了较为高效的方法。

需要指出的是,由于人的主观感受和经济因素具有很强的变异性,精确评估因舒适度问题产生的损失是十分困难的。在本方法推广运用之前,还需要大量的数据统计工作,但本文的方法为解决基于性能的超高层建筑抗风舒适度问题提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 周云,汪大洋,陈小兵. 基于性能的结构抗风设计理论框架[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 244.
ZHOU Yun, WANG Dayang, CHEN Xiaobing. Framework on performance-based wind-resistant design theory[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 244.
- [2] 卜国雄,谭平,周福霖. 基于投资-效益准则的 TMD 装置的优化设计[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 24.
BU Guoxiong, TAN Ping, ZHOU Fulin. Optimal design of the TMD device based on cost-performance criterion[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 24.
- [3] Sarja A. Integrated life cycle design of structures[M]. New York, London: Taylor & Francis, 2002.
- [4] Frangopol D M, Lin K Y, Estes A C. Life-cycle cost design of deteriorating structures[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, 123(10): 1390.
- [5] Wen Y K, Kang Y J. Minimum building life-cycle cost design criteria. II: applications [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(3): 338.
- [6] Wen Y K, Kang Y J. Minimum building life-cycle cost design criteria. I: methodology [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(3): 330.
- [7] Tamura Y, Kawana S, Nakamura O, et al. Evaluation perception of wind-induced vibration in buildings [J]. Proceedings of the ICE—Structures and Buildings, 2006, 159(5): 283.
- [8] Architectural Institute of Japan Recommendations. AIJES-V001-2004 Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004.
- [9] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LIN Jiahao, ZHANG Yahui. The pseudo excitation method to the random vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [10] 赵昕,丁洁民,孙华华,等. 上海中心大厦结构抗风设计[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 1.
ZHAO Xin, DING Jiemin, SUN Huahua, et al. Structural design of the Shanghai Tower for wind loads[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 1.
- [11] 全涌,曹会兰,顾明. 高层建筑横风向风效应研究综述[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 810.
QUAN Yong, CAO Huilan, GU Ming. Cross-wind effect of high-rise buildings: state of art [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(6): 810.
- [12] 全涌,顾明. 超高层建筑横风向气动力谱[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(5): 627.
QUAN Yong, GU Ming. Power spectra of across-wind loads on super high-rise buildings [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(5): 627.
- [13] 唐意,顾明,金新阳. 偏心超高层建筑的风振研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 178.
TANG Yi, GU Ming, JIN Xinyang. Research on wind-induced response of structurally asymmetric tall buildings [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 178.
- [14] 曹宏,李秋胜,李桂青,等. 抗风结构安全度的计算方法[J]. 土木工程学报, 1994, 27(1): 40.
CAO Hong, LI Qiushen, LI Guiqing, et al. Calculation of wind-resistant structure safety [J]. China Civil Engineering Journal, 1994, 27(1): 40.
- [15] 宋永发,常金鹏,王延龙. 高层建筑的顺风向风振响应分析及舒适度研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 484.
SONG Yongfa, CHANG Jinpeng, WANG Yanlong. Analyses of along-wind loading response of tall buildings and degree of comfortable feeling [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(4): 484.
- [16] 罗乃东,赵国藩. 高层、高耸结构抗风动力可靠度[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(2): 208.
LUO Naidong, ZHAO Guofan. Analysis of dynamic reliability for wind loading of high-rise building [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(2): 208.
- [17] Kareem A. Dynamic response of high-rise buildings to stochastic wind loads [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 42(1): 1101.