

高层建筑结构抗风可靠性研究进展

全涌, 姚博, 顾明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 回顾并总结了建筑结构可靠性评价标准、可靠性动静态分析方法和考虑风向的可靠性分析方法等几个涉及结构抗风可靠性问题的国内外研究成果, 同时对多国荷载规范中关于风向和抗风可靠性的规定进行了讨论. 通过分析结构可靠性的评判准则、研究方法、结构动力响应参数、风向等多个因素对结构抗风可靠性的影响以及现有研究方法中所存在的问题, 指出当前结构抗风可靠性研究中存在的不足, 并提出了进一步研究的建议.

关键词: 高层建筑; 结构可靠性; 分析方法; 风向

中图分类号: TU312

文献标志码: A

Research Progress of Wind Reliability of High-rise Buildings

QUAN Yong, YAO Bo, GU Ming

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

Abstract: By reviewing the researches of structural reliability under wind loads, such as evaluation standard, static and dynamic analysis, and directional analysis, wind direction effect and wind-reliability, the wind direction effect and wind reliability in the load codes of various countries were discussed. In addition to the evaluation method of reliability, dynamic parameters, influence of wind direction on reliability and the deficiencies of present researches were analyzed. Suggestions for further research are also proposed in the end.

Key words: high-rise building; structural reliability; analysis method; wind direction

随机性. 以结构动力学和概率论方法为基础的结构抗风可靠性研究对高层结构的安全性、实用性和经济性等都起着重要作用, 可使结构设计在可靠性与经济性之间寻求平衡, 以最优的可靠度满足各种预定的功能.

1930 年, 英国航空委员会为了研究飞机的故障率, 首次提出了可靠度问题. 到 1960 年代, 可靠性研究已从航空、宇航等关键领域扩展到土木、机械和电力等领域. 其中, 影响较为深远的是 Cornell^[1] 基于前人的工作提出的采用新的指标来表示体系的可靠度. 随后, Lind^[2] 采用分项系数的方式来代替可靠度指标用于表示结构的可靠性. Davenport^[3] 首次提出并讨论了结构抗风可靠性问题, 引导风工程研究人员在该领域展开研究.

迄今, 人们对高层建筑风荷载可靠性的研究和分析还不够, 结构工程师们在结构设计时往往不考虑或只粗略地考虑了风向的影响, 因而给出偏于保守的设计结果, 大大增加了设计成本. 本文从高层建筑失效模式、安全界限值、可靠度的静态和动态分析方法、考虑风向的研究方法和各国规范对风向和可靠性的描述等角度对结构抗风可靠性进行了较为全面的回顾与总结, 最后指出当前结构抗风分析中存在的问题与不足, 并对进一步展开研究提出建议.

1 高层建筑抗风可靠性评价标准

基于可靠度理论的高层建筑风荷载分析, 关键在于判断高层建筑失效模式, 确定其失效方式所属范畴, 并确定风荷载作用下的安全界限.

1.1 高层建筑失效模式

作用在高层建筑上的风荷载达到一定程度就会使建筑产生各种形式的破坏或损伤, 风荷载作用下

随着现代高层建筑和高耸结构向更高和更柔的方向发展, 风荷载的影响也越来越显著, 并成为其结构设计的主要控制性荷载之一. 在随机性很强的风荷载作用下, 高层建筑的动力响应也具有非常强的

收稿日期: 2014-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51278367); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金(SLDRCE10-B-03)

第一作者: 全涌(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: quanyong@tongji.edu.cn

通讯作者: 姚博(1986—), 男, 工学博士, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: liixue05-116@163.com

高层建筑结构失效模式的极限状态可以分为两大类:承载能力极限状态和正常使用极限状态。通常情况下正常使用极限状态对高层建筑结构抗风设计的影响更为直接和明显,如结构位移或层间位移过大引起框架、剪力墙等开裂;加速度过大引起人员不适如恶心头晕等。因此,无论位移还是加速度都不能超过一定的限度。

准确判断结构失效模式对可靠性分析的准确性影响至关重要。Ang等^[4]采用故障树分析方法判别结构的主要失效模式,并进一步分析了该结构体系的失效概率;Murotsu^[5]提出识别结构失效模式的分支-约界方法。此外,枚举法和 β 约界法等也广泛用于失效模式的判别,这些方法的不足之处是计算量较大。

1.2 安全界限值

在高层建筑抗风设计中,常用的安全界限包括位移界限、加速度界限(舒适度界限)、强度极限和疲劳极限。强度极限和疲劳极限主要跟建筑材料有关,这里主要介绍受风荷载影响较为直接的位移界限和加速度界限。

水平位移界限值一般包括两个方面,即高层建筑顶点位移的界限值和层间位移界限值。设置一定的位移界限值可以防止钢梁、钢柱等出现大的塑性变形,同时也可以保障隔墙、填充墙等不出现裂缝或损坏。如何选取合理的位移界限值一直是学者们争论的焦点问题。Fleaming等^[6]认为顶部侧移值受建筑高度和风压的影响,建议顶点位移限值应为 $H/550 \sim H/300$, H 为建筑物高度;Johnston^[7]认为高层建筑的侧移限值在 $H/600 \sim H/400$ 之间比较合理。Pernica^[8]对高层结构层间位移的取值进行了研究并建议层间位移界限取为 $H/500 \sim H/200$ 。表1为我国《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规范》^[9]规定的建筑顶点和层间位移极值取值。

表1 风荷载作用下高层结构顶点、层间位移限值

Tab.1 Limited displacement values of tall buildings with wind load

结构类型	顶点位移限值	层间位移限值
框架(轻质隔墙)	1/550	1/450
框架-剪力墙(筒体)	1/800	1/750
筒中筒、框筒	1/900	1/800
剪力墙	1/1 000	1/900

舒适度安全界限值是指高层建筑风致加速度响应不应超过一定范围。加速度界限值一般通过住户问卷调查和试验模拟两种方式确定。Hansen等^[10]通

过对住户进行问卷调查建议6年重现期加速度限值为 $g/200$ 。Goto^[11]通过试验模拟发现,加速度界限是一个与加速度和振动频率有关的量,同时通过运动模拟认为最大加速度不超过 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。另外,Shioya等^[12]研究了单轴运动、椭圆运动和圆周运动下人体对加速度的感应阈值问题。结果表明,单轴运动时频率对阈值的影响非常大,而椭圆运动和圆周运动的感应阈值随振动频率变化的规律并不明显,此研究结果与前人的研究结论不一致,有待于进一步发展。Burton等^[13]研究发现,当建筑顶部加速度固定时人体对振动的感应度随结构振动频率而变化,这表明结构的振动频率也是人体舒适度感应的影响因素之一。

上述研究表明,如何合理地选取安全界限值,不同学者基于不同的研究方法和依据得出的结论并不一致。

2 可靠度分析方法

高层建筑抗风设计的目的是使建筑在一定设计期限内、一定条件下正常使用,可通过安全性、适用性、耐久性等来评价高层建筑在风荷载作用下的可靠性。通常情况下风荷载可靠度可由各随机变量的联合概率密度函数得到,但是针对具体情况该函数是不易得到的,因此通常采用一些近似计算方法进行结构可靠性分析。按照分析的深入程度的不同,这些可靠性分析方法可分为静力分析方法、动力分析方法和考虑风向的分析方法。

2.1 静力分析方法

可靠性的静力分析是指结构在进行可靠性分析时不考虑时间因素影响的一种分析方法,根据分析对象的复杂程度分为结构构件分析方法、结构体系分析方法和蒙特卡洛模拟方法。

2.1.1 结构构件分析方法

结构构件在可靠度分析时常用的分析方法包括一次二阶法、响应面方法和帕罗黑莫方法等,其中最常用影响最为广泛的方法是一次二阶矩方法及其改进方法。

一次二阶矩方法是将非线性功能函数按照泰勒展开式展开,通过求解变量的一阶矩和二阶矩得到求解可靠度问题的简化计算方法。采用该方法进行可靠性计算时只需获得基本变量的均值和方差这两个基本参数,因而是可靠度问题分析中最简单和最常用的方法。在一次二阶矩方法基础上进一步发展

了多种可靠度计算方法,如验算点法^[2]等。

Cornell^[1]采用可靠度指标 β 表示结构的失效概率,进一步发展了一次二阶矩方法。Veneziano^[14]进一步研究发现,虽然可靠度指标 β 具有简便性和广泛适用性的特点,但在某些条件下可靠度指标 β 并非定值,同时它也不能完全考虑安全区域的几何特性,因此他重新定义了一个改进的可靠度指标 γ 。

Ditlevsen^[15]指出,虽然与不同的极限状态曲面相关联的可靠性各不相同,但是却有相同的可靠性指标 β_{hi} ,因此参数 β_{hi} 能否满足工程可靠性的要求值得怀疑。为此,Ditlevsen提出了广义可靠度指标 β_g 的概念,并指出当变量 x 为高斯矢量时, β_{hi} 和 β_g 具有相同的大小。

现有各国规范在计算结构可靠度指标时普遍采用一次二阶矩法,准确使用该方法的前提是变量满足统计独立正态分布和极限状态方程具有线性形式。当功能函数在验算点处非线性程度较高时,一次二阶矩方法误差较大。基于此不足,Fiessler等^[16]采用泰勒展开式取二次项和曲率拟合二次曲面,提出了二次二阶矩方法;Breitung^[17]通过抛物线拟合将结构失效概率 P_f 表示为可靠度参数的函数表达式且渐进趋向于真实可靠度,从而促进了二阶矩理论的重要发展。当渐进条件不满足的时候,Hohenbichler等^[18]基于重要抽样方法改进了采用二阶可靠度方法计算失效概率的问题。Ayyub等^[19]对常用结构可靠度分析方法进行了总结,并以风荷载作用下结构设计为例说明了一次二阶矩方法虽然对许多问题都能够满足可靠性设计要求,但是其中风险并不能准确把握,并进一步阐述了二阶矩方法的优点。

2.1.2 结构体系分析方法

通常情况下,实际的结构体系都不是由一个构件组成的,而是由许多构件组成的复杂体系,因此结构体系可靠性是由各个构件单元可靠性决定的。对复杂体系可靠度的研究主要包括结构系统失效模式判别和系统失效概率计算两方面的内容。虽然结构体系的失效模式很多,但是没有必要寻找其中每一个失效体系,实际分析中只需寻找主要的失效模式即可。常用的寻找方法是分支约界法^[5]。计算结构体系失效概率的一个难点是各个失效模式之间存在一定的相关性,准确计算失效概率非常困难,因而往往采用近似的方法进行计算。这些近似方法包括:通过确定结构体系失效概率上下限进行计算的区间估计方法^[15]和求解失效概率具体值的点估计方法。

区间估计法包括宽界限方法和窄界限方法,其中宽界限方法表达式为

$$\max_{i=1}^n(P_{fi}) \leq P_{fs} \leq 1 - \prod_{i=1}^n(1 - P_{fi}) \quad (1)$$

式中: P_{fi} 为各个构件的失效概率; P_{fs} 为结构体系的失效概率。这种方法只考虑单个失效模式的情况,未考虑失效模式之间的相关性,所以得到的上下限范围较宽,结果误差也较大。为此Ditlevsen^[15]等人对这种方法进行了改进,得到人们所熟悉的窄界限方法,可表示为

$$P_{fi} + \sum_{i=2}^n \max(P_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} P_{fij}, 0) \leq P_{fs} \leq \sum_{i=1}^n P_{fi} - \sum_{i=2}^n \max(P_{fij}) \quad (2)$$

式中: P_{fij} 为第 i 个和第 j 个失效模式同时发生的概率。此外,Ashish等^[20]均提出相应的区间识别方法。

点估计方法包括PNET方法、泰勒展开方法^[21]等。PNET方法基于各失效模式之间相关性大小将其分成若干组,每组中选取发生概率最大的失效模式作为该组的失效模式并假设各组之间失效模式是独立的,最后计算体系的整体失效概率。采用该方法进行计算的关键是选取合适的分组相关系数。通常根据经验进行选取并没有客观科学依据,相关系数偏大或偏小都会影响结果的准确性。为此,采用当量相关系数来解决上述问题,可使相关系数的计算有统一标准。Ditlevsen^[21]针对串联系统可靠度问题提出了泰勒展开方法,该方法将多维正态分布的联合概率分布函数以相关系数为变量进行泰勒展开,展开后可以用一维积分进行代替,大大简化了计算。

2.1.3 蒙特卡洛方法

无论是一阶矩方法还是二阶矩方法,都是通过建立极限状态方程求解可靠度,但是对于很难建立合适的功能函数,理论分析难以解决的复杂问题,可采用蒙特卡洛数值分析方法。蒙特卡洛方法存在无需考虑复杂的功能函数、收敛稳定等诸多优点。结构安全度蒙特卡洛模拟的一个重要内容就是解决当前方法抽样时存在的不足之处。Ayyub等^[19]回顾总结了现有几种可行的抽样方法,包括重要抽样方法、分层随机抽样方法、拉丁超立方抽样方法等,其中属重要抽样方法的应用最为广泛。Hohenbichler等^[18]基于重要抽样改进了采用二阶可靠矩方法计算的失效概率的问题。该方法通过采用一个修正因子来修正二阶可靠矩方法得到失效概率,从而得到准确的结构失效概率。Bucher^[22]提出了一个新的抽样方法,该方法在最初抽样之前无需进行一阶可靠度分析。

Ayyub 等^[19]对风荷载作用下结构荷载进行设计,并基于模型的方差缩减技术(VRT)进一步改进了蒙特卡洛方法,从而使模拟更加有效.此外 Schueller 等^[23]也提出了自己的改进方法.

Kareem^[24]对风敏感结构进行可靠度分析,采用不同的分析过程对高耸结构进行定量可靠度估计.研究表明,改进的一次二阶矩方法和结合降方差技术的蒙特卡洛模拟方法可以为风致敏感性结构的可靠性分析提供较为精确的结果.

2.2 动态分析方法

可靠性的动态分析方法是一种研究高层建筑结构动力响应在一定时间内不发生失效破坏的分析方法.由于找到一个合适的破坏准则研究动力可靠度问题远比研究静力可靠度问题要复杂和困难,同时也没有找到该问题的准确解析方法,仅存在一些不同程度的近似求解方法,如泊松模型及其修正方法,因而动力可靠度分析方法的研究仍然处于理论发展阶段.动力可靠度问题根据研究对象的不同可以分为线性动力可靠度问题和非线性动力可靠度问题,其中线性动力可靠度问题又可分为单自由度和多自由度的情况.结构,尤其是高层高耸结构在各种激励下往复运动,重复作用的荷载会使结构和材料性能逐步衰减,从而使结构的可靠性降低,此时动力可靠度分析又包含了结构疲劳破坏可靠度分析.

2.2.1 线性系统

Udwadia^[25]研究了自由和强迫振动状态下具有随机质量、刚度和阻尼的单自由度线性系统的动力特征,研究显示系统参数的概率描述仅部分有效,一些响应特性的结果可以封闭式方程求解. Spencer 等^[26]研究了线性和非线性振动条件下首次超越破坏问题的系统随机性,他们将系统随机变量状态矢量离散化并采用首次超越破坏问题的有限元方法求解相关的科尔莫哥洛夫方程. Jensen 等^[27]提出了一种适用于线性单自由度动力系统不确定度的分析方法.该方法通过采用加权余量法推导目标问题的线性常微分方程组,通过对方程组的整合计算响应变量.计算表明,采用这种方法计算得到的结果和其他方法计算的结果精度一致.

Singh 等^[28]采用直接积分方法估计了多自由度阻尼系统的统计频率响应.在时域内采用模态扩展方法和直接数值积分式来处理,在频域内采用了频响函数随机矩阵的转置,且将这两种方法和最佳序列扩展方法、数值模拟方法等其他方法进行了对比;接着, Lee 等^[29]假设激励荷载的振幅为随机变量但

其随时间的变化是确定的,并基于该假设和给定的概率特征值来估计模态响应和物理响应,通过考虑脉冲激励和谐波激励两种荷载形式进行验证.

Manohar 等^[30]在研究结构动力问题时发现,使用动态刚度矩阵的方法可以有效地用于高层钢架结构的分析.该方法无需考虑正态模态扩展,避免了正态计算时可能引入的截断误差,特别适合于高频应用;另外,这种方法在模拟结构阻尼时允许更高的结构柔度出现,对高度较高的建筑尤为适用.鉴于这样一种考虑, Adhikari 等^[31]均采用动态刚度矩阵分析钢架结构随机参数.

Jensen 等^[27]研究了在多自由度随机振动方程中刚度和阻尼为一系列零均值且不相关随机变量的函数和荷载为非平稳激励矢量情况下的可靠度问题,同时也研究了时域内非平稳协方差矩阵的进展情况.结果显示,系统不确定度对模态间相互作用的分析有明显的影响.

Rahman 等^[32]采用无网格法用于分析具有随机特征材料参数的线弹性边界值问题.对材料随机场离散化处理时所引入的节点无需像无网格节点那样与位移场特征相关.作者同时也概述了处理系统随机变量和求解响应均值和协方差的方法.

2.2.2 非线性系统

高层建筑结构在进行失效分析和可靠性评估时,考虑结构的非线性特性将具有十分重要的意义.然而,考虑结构非线性效应会对结构体系的研究产生很大的影响,给结构设计和可靠性分析带来很大的难度.目前为止仍然没有被广泛接受的非线性可靠度理论分析方法.鉴于高层建筑抗风研究中考虑结构非线性问题的复杂性,众多学者也进行了广泛的探索.

Chang 等^[33]研究了几何形状和材料特性都具有随机性的梁的大振幅振动情况,并分析了自由振动和随机激励、简谐激励条件下非线性结构系统的响应问题.作者采用局部平均法等多种方法来解决随机场的离散化问题,并通过等效线性方法对非线性强迫随机振动响应问题进行研究.结果表明,该方法得到的结果与蒙特卡洛模拟方法得到的结果具有很好的一致性.

Liu 等^[34]采用一次矩方法和二次矩方法对几何非线性结构的可靠性问题进行研究.在可靠度分析中与所需基本变量相关的非线性响应的梯度表达式得到了新的发展,文章首次将一阶矩和二级矩可靠度分析方法应用于非高斯随机场和系统可靠度分

析。

Teigen 等^[35]详细阐述了具有结构参数随机分布的预应力混凝土结构可靠性分析的非线性有限元方法,并提出计算公式用于考虑荷载随机性、材料特性、结构几何特性和材料非线性的影响。此外, Haldar 等^[36]采用有限元计算方法对非线性可靠性进行了研究。

2.2.3 疲劳破坏问题

基于 Miles 线性累计损伤假设理论可用于结构疲劳破坏的可靠性分析。Alan 的研究表明,采用窄频带的峰值概率密度函数计算疲劳可靠度的方法对非窄频带情况同样适用,但有可能使结果偏于保守; Wirsching 等^[37]在研究结构疲劳破坏时提出了等效窄带方法,该方法在求解宽带过程的疲劳损伤时,可由窄带损伤乘以一个修正系数得到; Holmes^[38]在 Wirsching 工作的基础上提出了顺风向风荷载作用下结构的疲劳寿命计算方法,该方法通过提出一个疲劳损伤假设模型,给出求解结构疲劳寿命的封闭表达式,且这种方法对窄带共振响应和宽带背景响应都有较好的适用性。另外, Deoliya 等^[39]也对风致疲劳进行了研究。

3 考虑风向的分析方法

建筑结构的风荷载估算通常并未考虑基本风速的风向特性,但实际结构的风致响应是受风速大小及其风向特性共同影响的。同一地点各个方向的风速大小一般差异较大,且同一建筑结构在不同风向的相同风速作用下动力响应也有着明显的差异。图 1 为某地考虑和不考虑风向时极值风速的区别。因此,合理研究高层建筑抗风可靠性应该考虑极值风速的方向性影响。

3.1 设计风速的风向特性对结构可靠度的影响

Davenport 等^[40]研究了风向效应对风荷载评估结果的影响。研究表明,在分析方向敏感性结构时,采用考虑风向效应的评估方法得到的结构失效概率明显小于最不利风向方法。Davenport^[41]较全面地分析了高层建筑结构在风荷载设计时广泛进行可靠度设计的必要性,并指出如何考虑风向、阻尼等因素的不确定性,同时讨论了实测对减少不确定性的重要作用。

Simiu 等^[42]基于风速风压数据研究了风向效应对围护结构风荷载设计的影响。研究发现,传统的最不利风向方法会两倍甚至更多地高估设计荷载,而

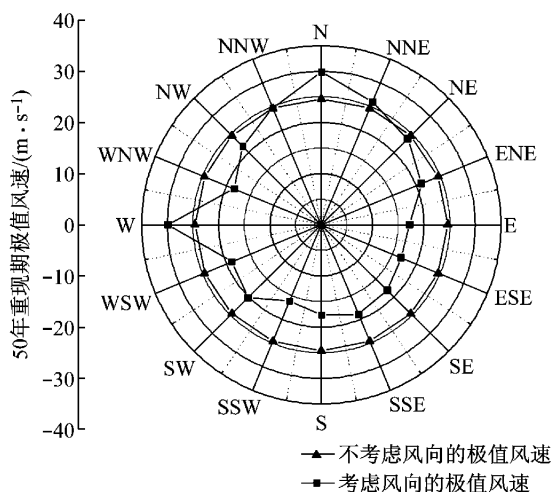


图 1 极值风速考虑风向与不考虑风向的差异

Fig.1 Difference between directional extreme wind speed and non-directional extreme wind speed

不加选择地使用折减因子的做法并不合适。

Wen^[43]研究了风向对高层建筑结构抗风可靠性的影响。作者对理想状况下各参数进行分析并进一步开展可靠性的研究,并在结构抗力和风气候信息已知的前提下将该方法用于实际情况。研究表明,考虑风向的设计荷载明显低于最不利风向方法设计荷载,这与 Davenport 研究结果一致;如果欲使结构在不同方向均具有一致的失效概率,则各个方向的设计风荷载必须进行相应的调整。Wen^[44]进一步对多处近 20 年的风速数据进行分析并验证了上述结论,同时研究了基于短期风速风向数据预测长期风向效应的理论可行性。结果表明,文中分析方法可以比较准确地预测年最大结构响应,同时可以给出响应随结构方向变化的可靠度估计。

Rigato 等^[45]基于空气动力学和气候数据库技术提出了一种用于结构荷载设计的简化方法,该方法可以对风向效应进行真实估计。将该方法用于台风地区钢框架结构设计得到的结果与基于 ASCE7—98 规范的结果进行了对比。结果表明,ASCE 设计方法(采用的折减因子 $K_d=0.85$)会低估风荷载效应,而基于数据库的风荷载设计方法在建筑结构无论考虑风向与否的情况下均能提供失效概率一致,且具有最佳经济效益的设计结果。

Jia 等^[46]提出了实用的基于风速风向联合概率分布函数计算高耸结构风致疲劳破坏的方法,并分析了风向效应、横向风等对结构高周疲劳的影响。研究发现,风向效应对疲劳破坏的影响主要同结构的方向、位置和各个方向大风速发生的概率等有关,并进一步指出文中的疲劳计算方法对其他高层建筑同

样适用。

Kasperski^[47]指出,从纯概率统计角度出发,计算具有一定超越概率的设计风荷载时,极值风速和气动力系数这两个随机变量是不能分开考虑的,必须统筹考虑它们在不同方向上的概率特性才能得到正确的风荷载计算结果。

3.2 各国规范对风向效应的考虑

3.2.1 美国规范^[48]

Ellingwood^[49]建议采用0.85的折减因子来考虑风向对风荷载的影响并将该值应用于当时的美国荷载规范ANSI A58.1。风向因子用于表示最大风向和最不利风向一致的概率,后来又将风向效应的影响从荷载组合中分离出来作为一个独立因子用于动压计算。根据结构类型的不同风向因子的大小也有不同的变化,取值范围介于0.85~1.00之间,如构件及围护结构、拱形屋顶等采用0.85的风向因子,圆形截面的烟囱、特殊截面的桁架塔采用0.95的风向因子等。

重要性因子(importance factor)用于调整结构的可靠度水平,使之与不同地貌建筑分类保持一致。ASCE7—05分别对非台风区和台风区4类地貌下建筑的重要性因子进行规定:非台风区域四类地貌下的重要性因子依次为0.87,1.00,1.15,1.15,其中0.87和1.15的重要性因子分别对应的年超越概率为0.04和0.01(即25年重现期和100年重现期);台风区各重要性因子依次为0.77,1.00,1.15,1.15,且建筑年超越概率沿海岸线变化。将重要性因子分别作用于台风地区和非台风地区可给出近似一致的安全可靠性水平。新的ASCE7—10规范对基本风速做了修订并可直接反映概率的影响,因而取消了重要性因子的规定。

3.2.2 英国规范^[50]

英国规范BS 6399-2规定的风向因子基于每30度风向角最大风速得到并用于英国地区基本风速的调整。当建筑方向确定时,标准给出各角度的风向因子变化范围是0.73~1.00;建筑方向不确定时,出于安全考虑各向采用的风向因子均为1.00不变。英国规范采用的基本风速超越概率为0.02,并采用概率因子 S_p 来调整每年基本风速的不同超越概率。概率因子 S_p 是一个与目标超越概率有关的函数式,可表示为

$$S_p = \sqrt{\frac{5 - \ln(-\ln(1-Q))}{5 - \ln(-\ln 0.98)}} \quad (3)$$

式中: Q 为所求设计风速的超越概率。由基本风速乘

以该概率因子 S_p 即可得到目标重现期的基本风速。

3.2.3 澳大利亚/新西兰规范^[51]

该规范采用建筑方向两侧各45°角内最大风速作为设计风速,风向因子基于阵风风速数据的概率分布获得并用于风速的折减。该规范将澳大利亚和新西兰划分为A~D和W共5种风作用地形区域,其中A区又包括 $A_1 \sim A_7$ 7种不同的地域。对于A区和W区,每45度划分为一个风向,不同的风向具有不同的风向因子 M_d ,大小介于0.80~1.00之间;对于B,C,D这3种地形区域,风向因子根据结构特性在所有的方向进行统一规定:当求解整体建筑的合力、倾覆力矩或求解主要结构的风荷载时,采用0.95的风向因子;当求解围护结构或直接支撑构件时,采用1.00的风向因子。

3.2.4 日本规范^[52]

日本AIJ规范采用风向因子 K_D 反映易受地形、位置影响的极值风速的方向特性,且直接通过表格的形式给出各地8个气象风向(每个风向角45°)的风向因子。8个风向的风向因子是由16个风向转换而来,代表了每个风向角67.5°扇形区域的极值风速与全风向极值风速的比值。考虑到难以确定的龙卷风、下击暴流的影响,该规范规定风向因子的下限取为0.85,所以各个方向风向因子的取值范围介于0.85~1.00之间。

中国规范(GB5009—2012)^[53]和加拿大的荷载规范^[54]未对风向效应进行讨论。

3.3 针对美国规范的讨论

当前,美国结构最小荷载标准(ASCE7—10)对风向性进行了考虑,认为极值风速的折减不一定来自气动力特性值最强的方向,但是并没有基于极值分布的可靠度分析方法来确定相应的折减因子。Vega-Avila^[55]联合考虑气候和气动数据用于风向效应分析,提出了采用可靠度分析确定风向因子的方法。将围护结构分为墙体部分和屋顶部分,又对每一部分划分成不同的区域,比各个不同区域分别给出了4种不同重现期下的围护结构风向因子。研究显示各个区域取值范围在0.45~0.84之间,同时也给出了各个区域风向因子相应的变异系数和超越概率。结果表明,对于建筑构件并不推荐采用风向因子,因为对具有明显风向影响的非结构构件(如幕墙),如采用当前加拿大规范NBCC采用的0.80的平均风向折减因子,当荷载设计值有20%的折减时,将会有18%的建筑物风荷载超过设计值从而有较大风险。

McAnulty^[56]指出,当前美国规范 ASCE7—95 规定的风荷载因子是由各个气象站点的风速数据统计得来的,而这些气象站并未考虑台风效应. McAnulty 采用了当时最新的模拟台风的蒙特卡洛模拟方法,并基于两种不同的台风风速分布模型和最新的计算数据对美国海湾和东海岸台风荷载进行了专门的研究,提出了一个有别于当前规范的,适用于台风区域的荷载因子.

Ellingwood 等^[57]基于最新研究和风荷载的概率组合提出了风荷载参数的统计模型. 同时指出当前 ASCE7 的风荷载确定方法并不能保证内陆地区和台风地区具有统一的结构可靠度,并建议将考虑风向效应的荷载因子从荷载因子中单独分离出来,并将荷载因子由 1.3 提高到 1.5~1.6,从而使可靠度与设计保持一致.

Laboy 等^[58]针对美国 ASCE7 规范中风向因子在台风地区会低估建筑真实可靠度的问题进行了研究,提出了解决该方法的方法. 另外也对风向因子的发展过程进行了比较系统的总结,并提出了评价台风区风向因子的有效方法.

3.4 实用典型设计方法

在处理风向的概率问题时,通常认为强风可以来自任何风向,但出现在各个风向的概率各不相同. 计算考虑风向的具有一定超越概率的高层建筑结构风荷载计算方法大体上包括超越概率法、Holmes 方法、Cook 方法和 Simiu 方法.

超越概率法由 Davenport^[59]提出,该方法考虑了风荷载在不同方向上的变化,并根据结构的动力特性计算某一小角度荷载的概率特性,联合 ASCE7 的荷载系数(基本组合的第 4,6 种形式)和相应的重要性因子计算得到一定失效概率的荷载. 该方法得到的重现期荷载要低于全风向方法,缺点是仅对唯一构件受损时可以给出较为准确的概率结果,另外该方法也无法确定荷载的风向和气动特性.

Cook^[60]方法的原理是,首先定义气候方向因子 S_θ 和等效风速因子 k_θ ,并采用二者的乘积来表示风向的影响,通过进一步求解有效风速并最终得到设计荷载. 其中,等效风速因子 k_θ 表示一定概率的全风向风速和某个特定风向内相同概率的风速之比. 该方法的实质是,高层建筑荷载在各个方向均有相同保证率,风速小的风向等效风速因子就大,荷载保证率也就越大;减小低风速方向和增强高风速方向的结构强度,以达到设计的平衡. 通常情况下,由于受高层建筑动力特性的影响,各向实际保证率与设

计保证率之间有较大出入.

Holmes^[61]在一个较小风向角度范围(如 10°)内进行风荷载极值分析,将规定的设计重现期扩大一倍进行计算,最后结合高层建筑气动特性给出各风向的响应. 该方法的一个优点就是简单方便,可以较好地反应哪个风向是最不利风向,但该方法将设计重现期翻倍的依据并不十分清楚. 另外采用该方法得到的设计荷载大于用超越概率法得到的结果,但比采用全风向方法得到的结果小.

Simiu^[62]将风向均分成若干个区间,取各个区间一定重现期荷载值为 Q_i ,该重现期对应的结构极限荷载为 R ,并认为一定风速下荷载不超过极限状态的概率等效于各向风速均小于该向产生极限状态所对应的风速 $v_i(n_i)$;当各向风速相互独立时,设计荷载概率即为各向风速均小于 $v_i(n_i)$ 的概率. Simiu 方法在各向独立或各向弱相关假设条件下均可得到非保守结果.

4 结论与展望

结构动力可靠度理论经过几十年的发展,在理论研究和实践应用中都取得了长足的进步. 受限于该问题的复杂性和影响因素的多样性和不确定性,结构动力可靠度理论这一课题的研究仍不够完善. 研究风荷载作用下,高层、超高层建筑结构动力可靠度问题将愈发显现其重要意义. 存在的问题:

(1)各发达国家建筑荷载规范在计算风荷载时都从不同的方面考虑了风向的影响,众多研究也证明考虑风向的概率荷载设计可以给出更合理的结果,设计成本也更加经济;但是我国的荷载规范在计算风荷载时仍然未考虑风向的影响,因此有必要开展相关研究,建立适合我国气候特征的方向概率荷载设计的规范方法.

(2)目前关于高层结构动力可靠度的研究主要集中于确定一定重现期内,一定安全界限标准下的动力可靠性指标的问题研究,而对确定一定保证率或者一定重现期的高层建筑风荷载的研究非常少,而这个问题又是高层建筑设计的前提,直接关系到结构的安全性与经济成本. 所以,基于当地气象资料考虑风速风向的分布特性和高层建筑的动态特性来研究一定重现期的设计风荷载具有极为重要的意义.

(3)高层建筑会同时受到各方向风荷载分量的作用,各国规范也给出了风荷载各分量的组合方法,

但是对于这种组合的可靠性研究,或者一定超越概率的组合方法的研究非常少。

参考文献:

- [1] Cornell C A. A probability-based structural code[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1969, 66(12): 974.
- [2] Lind N C. Consistent partial safety factors [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1971, 97(6): 1651.
- [3] Davenport A G. Structural safety and reliability under wind action [C]//Proceedings of International Conference on Structural Safety and Reliability. Munich; [s. n.], 1969: 131-145.
- [4] Ang A H-S, Tang W H. Probability concepts in engineering planning and design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [5] Murotsu K. Reliability analysis of frame structure through automatic generation of failure modes[C]//Reliability Theory and Its Application in Structural and Soil Mechanics. [S. l.]: NATO, 1983, 70: 525-540.
- [6] Fleming J F, Podolny W J, Rile T S. Drift study of tapered framework[J]. Civil Engineering, 1967, 37(17): 34.
- [7] Johnston B G. Drift criteria[C]//Proceeding of the Regional Conference on Planning and Design of Tall Building. Warsaw: Warsaw Technical University, 1973, 7: 635-641.
- [8] Pernica G. Dynamic live loads at a rock concert [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1983, 10(2): 185.
- [9] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土高层建筑设计施工规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
China Academy of Building Research. Specification for design and construction of reinforced concrete structures of tall building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press. 1991
- [10] Hansen R J, Reed J W, Vanmarcke E H. Human response to wind-induced motion of building [J]. Journal of Structural Division, 1973, 99(7): 1589.
- [11] Goto T. The criteria to motions in tall buildings (part1) factors affecting human perception and tolerance of motion [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1975, 237(11): 109.
- [12] Shioya K, Kanda J, Tamura Y, *et al.* Human perception thresholds of two-dimensional horizontal motion [C]//Proceedings of the ASCE Structures Congress. San Antonio: [s. n.], 1992: 13-15.
- [13] Burton M D, Kwok K C S, Hitchcock P A. Frequency dependence of human response to wind-induced building motion [J]. Journal of Engineering, 2006, 132(2): 292.
- [14] Veneziano D. New index of reliability [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1979, 105 (EM2): 277.
- [15] Ditlevsen O. Nallow reliability bounds for structural system[J]. Journal of Structural Mechanics, 1979, 7(4): 453
- [16] Fiessler B, Neumann H J, Rackwitz R. Quadratic limit states in structural reliability[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1979, 105: 661.
- [17] Breitung K. Asymptotic approximations for multinomial integrals [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1984, 110(3): 357.
- [18] Hohenbichler M, Rackwitz R. Improvement of second-order reliability estimates by importance sampling [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(12): 2195.
- [19] Ayyub B M, Haldar A. Practical structural reliability techniques [J]. Structural Engineering, ASCE, 1984, 110(8): 1707.
- [20] Ashish K, Cornell C A. Adaptive hybrid conditional expectation approaches for reliability estimation [J]. Structural Safety, 1991, 11(1): 59.
- [21] Ditlevsen O. Taylor expansion of series system reliability [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(2): 293.
- [22] Bucher C G. Adaptive sampling: an iterative fast Monte Carlo procedure [J]. Structural Safety, 1988, 5(2): 119.
- [23] Schueller G I, Bucher C G, Bougund U, *et al.* On efficient computational schemes to calculate structural failure probabilities [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1989, 4(1): 10.
- [24] Kareem A. Reliability analysis of wind-sensitive structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(3): 495.
- [25] Udawadia F E. Response of uncertain dynamic systems I [J]. Applied Mathematics and Computation, 1987, 22(2-3): 115.
- [26] Spencer B F J, Elishakoff I. Reliability of uncertain linear and nonlinear systems[J]. Engineering Mechanics, 1988, 114(1): 135.
- [27] Jensen H, Iwan W D. Response variability in structural dynamics [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1991, 20(10): 949.
- [28] Singh R, Lee C. Frequency response of linear systems with parameter uncertainties [J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 168(1): 71.
- [29] Lee C, Singh R. Analysis of discrete vibratory systems with parameter uncertainties, part II impulse response[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 174(3): 395.
- [30] Manohar C S, Adhikari S. Dynamic stiffness of randomly parametered beams [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1998, 13(1): 39.
- [31] Adhikari S, Manohar C S. Dynamical analysis of framed structures with statistical uncertainties [J]. International Journal of Numerical Methods in Engineering, 1999, 44: 1157.
- [32] Rahman S, Rao B N. Perturbation method for stochastic meshless analysis in elastostatics[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 50(8): 1969.
- [33] Chang C C, Yang H T Y. Random vibration of flexible, uncertain beam element [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(10): 2329.
- [34] Liu P L, der Kiureghian A. Finite element reliability of geometrically nonlinear uncertain structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(8): 1806.
- [35] Teigen J G, Frangopol D M, Sture S, *et al.* Probabilistic FEM for nonlinear concrete structures I: theory [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117(9): 2674.
- [36] Haldar A, Zhou Y. Reliability of geometrically nonlinear PR

- frames [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118 (10): 2148.
- [37] Wirsching P H, ASCE A M, Light M C. Fatigue under wide band random stresses [J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(7):1593.
- [38] Holmes J D. Fatigue life under along-wind loading closed-form solutions [J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(1):109.
- [39] Deoliya R, Datta T K. Fatigue reliability analysis of microwave antenna towers due to wind [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2001, 127(10): 1221.
- [40] Davenport A G, Surry D, Stathopoulos T. Wind loads on low-rise buildings; final report of phases I and II. Boundary layer wind tunnel report, BLWT-SS8-1977[R]. London: University of Western Ontario, 1977
- [41] Davenport A G. The relationship of reliability to wind loading [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13(1-3):3.
- [42] Simiu E, Filliben J J. Wind direction effect on cladding and structural loads [J]. *Journal of Engineering Structures*, 1981, 3:181.
- [43] Wen Y K. Wind direction and structural reliability 1 [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1983, 109 (4): 1028.
- [44] Wen Y K. Wind direction and structural reliability 2 [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1984, 110 (6): 1253.
- [45] Rigato A, Chang P, Simiu E. Database-assisted design, standardization, and wind direction effects [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(8):855.
- [46] Jia J, Ellefsen R, Bremer G, *et al.* The effects of wind modeling considerations and wind direction on an accurate fatigue life assessment of high rise tubular structures[C]//The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010:154-161.
- [47] Kasperski M. Design wind loads for a low-rise building taking into account directional effects [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95:1125.
- [48] American Society of Civil Engineers. NSI/ASCE 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures [S]. New York: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [49] Ellingwood B R, Galambos T V, MacGregor J G, *et al.* Development of a probability based load criterion for American national standard A58[R]. Washington D C: National Bureau of Standards, 1980.
- [50] BSI. BS 6399-2 Loading for building. Part 2: code of practice for wind loads[S]. London: BSI, 1997.
- [51] SAI Global Limited. Australian/New Zealand standard structural design actions part 2: wind actions[S]. Sydney: SAI Global Limited, 2011.
- [52] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on building [S]. Tokyo: AIJ, 2006.
- [53] 中国工程建设标准化协会. GB5009—2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- China Association for Engineering Construction Standardization. GB5009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2012.
- [54] National Research Council of Canada. National building code of canada[S]. Ottawa: Canadian Commission on Building and Fire Codes, 2010.
- [55] Vega-Avila, Rolando E. Wind directionality: a reliability-based approach [D]. Lubbock: Texas Tech University, 2008.
- [56] McNulty J N. Wind load factors for Atlantic and Gulf Coast hurricane winds [D]. Lubbock: Texas Tech University, 1998.
- [57] Ellingwood B R, Tekie P B. Wind load statistics for probability-based structural design [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(4): 453.
- [58] Laboy S T, Kalisz S, Gurley K, *et al.* Considering the directionality factor in ASCE 7[C]// ATC & SEI Conference on Advances in Hurricane Engineering. Miami: American Society of Civil Engineers, 2013:1-12.
- [59] 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 Engineering*, 1961, 28 (2):187.
- [60] Cook N J. Further note of directional and seasonal assessment of extreme winds for design [J]. *JWEIA*, 1999, 71(3):201.
- [61] Holmes J. Wind loading of structures [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2007.
- [62] Simiu E. Design of buildings for wind: a guide for ASCE7-10 standard users and designers of special structures [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2011.