

大型冷却塔结构风致稳定和风振效应研究进展*

赵林¹, 陈旭², 柯世堂³, 张军锋⁴, 葛耀君¹

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室 上海, 200092)

(2. 上海师范大学建筑工程学院 上海, 201418)

(3. 南京航空航天大学土木与机场工程系 南京, 210016)

(4. 郑州大学土木工程学院 郑州, 450001)

摘要 伴随我国经济快速发展,火/核电厂大型冷却塔建设保持快速增长势头,呈现超高、超大的发展趋势。风荷载作用下的冷却塔筒壳体风致稳定和结构风振效应成为结构设计建造的关键控制因素。笔者从理论分析、试验模拟、数值计算、现场实测 4 个方面论述了冷却塔风致稳定和结构风振效应系列研究进展,阐明了基于环向均匀加载的冷却塔稳定验算公式难于适用复杂风压条件下壳体弹性稳定分析与评估,强调了基于现场实测建立超高雷诺数条件下动态绕流物理风洞试验模拟准则的必要性,推荐开展风致动力分析中冷却塔结构阻尼比实测工作。面向台风和龙卷风等特异风灾气候结构效应研究的现实需求,亟需开展特异风场作用下大型冷却塔壳体失稳和结构风振效应和机理的研究。

关键词 大型冷却塔;风致稳定;风致振动;现场实测;特异风灾

中图分类号 TU33

1 问题的引出

冷却塔是火/核电厂二次高温循环水的冷却基础设施,是电力建设发展的重大生命线节点工程。全世界第 1 座 32.3 m 高的钢筋混凝土冷却塔诞生于 1918 年的荷兰。1965 年,冷却塔高度首次突破百米时,发生了英国渡桥电厂塔群风毁事故,由此拉开了冷却塔抗风研究的序幕^[1]。随后几十年间,欧美发达国家相继出现了多次严重的冷却塔风毁事故^[2](1973 年英国 Adeer 电厂、1978 年美国 Willow Islands 电厂、1979 年法国 Bouchain 电厂、1981 年美国 Grand Gulf 电厂、1984 年英国 Fiddler's Ferry 电厂),但据此开展的系统研究工作推动了大型冷却塔建设和规模的发展。

作为世界上体量最大的高耸空间薄壁壳体结构,若将冷却塔成比例地缩小至鸡蛋大小,其厚度仅为鸡蛋壳的 1/3 左右,冷却塔壳体结构抗风设计除需强度安全之外,更要满足稳定性要求。相比一般的梁、板、柱结构,即使是在弹性范围内结构形式最为简单的柱壳,均布荷载试验条件下的屈曲临界荷载也与理论值有着较大的出入,一般仅为理论值的

20%~50%^[3]。由于冷却塔母线包含双曲线形、圆锥形和圆筒形等复杂结构形式,且在风荷载和自重荷载联合作用下,塔筒呈现随环向和子午向位置变化的双向应力状态,故导致冷却塔复杂壳体结构风致稳定问题难于采用理论解析方法表达。随着冷却塔建设高度增加,为降低结构自重和建造成本,塔筒壁厚越来越薄,结构厚径比越来越小,导致大型冷却塔风致失稳潜在风险不断加强,大型冷却塔结构风致稳定问题历来是结构风工程领域关注的焦点^[4]。

20 世纪 60 年代开始,伴随欧美发达国家电力工业的迅猛发展,大容量高参数发电机组成为电厂建设的主流,与之配套的大型冷却塔甚至超大型冷却塔不断涌现。1970 年,德国建成了高度达 150 m 的大型冷却塔。1986 年,Isar II 期核电厂 165.5 m 高冷却塔的建成标志着超大型冷却塔时代的到来。1999 年,德国 Niederaussem 电厂建成了打破世界纪录的 200 m 超大型冷却塔^[5],标志着超大型冷却塔建设高度迈上了一个新台阶。相对而言,我国冷却塔建设起步较晚。1986 年,国内最高的淮南洛河电厂冷却塔仅为 96 m;2000 年,上海吴泾电厂建成了国内最高的 141 m 冷却塔。进入 21 世纪,为了适应国内经

* 国家自然科学基金资助项目(52008247, 52078383, 52008314);土木工程防灾国家重点实验室自主课题联合资助项目(SLDRCE19-B-11)

收稿日期:2021-12-10;修回日期:2021-12-16

济快速发展带来的电力高速持续增长需求,发改委先后出台了《国务院批转发展改革委、能源办关于加快关停小火电机组若干意见的通知》和《核电中长期发展规划(2005—2020)》。随着国内火电发电机组装机容量的增大,为充分发挥冷却塔环保、高效、节能的优势,并综合考虑建设成本、电厂用地规划等经济因素,从2007年开始,国内兴建了一批超已有规范适用高度^[6](165 m)甚至刷新世界记录的火电超大型冷却塔,如表1所示。同时,科技部出台了《国家科学技术中长期规划纲要(2006—2020)振兴计划》,以国家科技重大专项的形式,预研了一批高度达250 m、塔群布置复杂的核电超大型冷却塔。不难看出,我国已成为超大型冷却塔建设大国,塔型高大化、塔群复杂化成为冷却塔结构发展的必然趋势。在冷却塔高度尚未突破100 m之前,由于塔高

较低,结构刚度较大,风振响应并不明显。随着高度超过165 m、塔筒面积大于 $5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、壳体最小壁厚仅为0.25 m左右的大型冷却塔不断兴建,此类结构兼具超高层建筑和超大跨空间结构自振频率低、模态密集和阻尼比小等特点^[7],风荷载成为其结构设计的关键控制因素。超高雷诺数条件下塔筒表面绕流形态导致风荷载尤其是脉动风荷载分布特征的复杂性^[8]、冷却塔结构风振效应以及等效静风荷载一直是工程界和学术界关注的热点,研究人员进行了长期的研究和探索^[9-10]。

笔者针对风致稳定和风振效应2类大型冷却塔结构抗风性能关键核心问题,从理论分析、试验模拟、数值计算及现场实测4个方面综述国内外系列研究现状,并展望未来研究方向,以求对大型冷却塔抗风研究提供参考借鉴。

表1 国内在建/投运的具有代表性的火电厂超大型冷却塔

Tab.1 Typical super-large cooling towers under construction/operation in Chinese thermal power plant

所属工程	塔高/m	塔群数量	在建/投运时间/年份	标志性技术特点
山东聊城信源集团电厂	222	8	2019	世界最高冷却塔
山西长子赵庄电厂	216	2	2018	世界最高钢结构塔
山西潞安长子电厂	220	1	2017	2017年世界最高冷却塔
内蒙古国电投土右旗电厂	210	4	2016	2016年世界最高冷却塔
陕西大唐彬长电厂	210	4	2016	2016年世界最高冷却塔
宁夏国电方庄电厂	210	4	2016	2016年世界最高冷却塔
重庆神华万州电厂	191	4	2015	国内最高、世界第2高位塔
安庆神华电厂二期	189	2	2014	国内最高湿冷塔
江苏华润彭城电厂	167	4	2010	国内最高排烟塔
浙江国华宁海电厂二期	177	2	2009	国内最高海水塔
浙江国华宁海电厂	176	4	2007	2007年国内最大湿冷塔

2 风致稳定性

2.1 理论分析

壳体结构稳定作为经典难题早在18世纪中期提出,由于当时的建筑以土、木结构为主,稳定问题并未引起重视。进入20世纪,随着壳体结构在航空、航天、桥梁、近海平台、海底管道和高层建筑等领域的广泛应用^[11],工程界和学术界逐渐意识到稳定是保证壳体结构安全性的关键因素。

壳体稳定问题总体分为第1类稳定问题(即分支点失稳问题)和第2类稳定问题(即极值点失稳问题)。在第1类稳定问题中,当达到临界荷载时,壳体结构将从原来的平衡状态跃阶至第2个平衡状态。图1为壳体结构两类失稳模式。如图1(a)所

示,均匀受压的理想柱壳在达到临界荷载时,由拱形平衡状态跳跃至翘曲平衡状态。第2类稳定问题中,壳体失稳前后始终保持同一种平衡状态,随着荷载的增加,当达到临界荷载时,壳体变形逐渐增大直至结构破坏。均布荷载作用下有初始缺陷的球壳的失稳过程如图1(b)所示。从数学角度出发,分支点失稳问题可以归结为广义特征值方程的求解,其中特征值对应于临界失稳荷载,特征向量则为对应的失稳模态。极值点失稳问题本质是非线性方程求根过程,通过荷载步设置对结构增量平衡方程迭代求解,获得存在极值点的荷载-变形连续曲线。卢文达等^[12]基于最小势能原理推导了环肋旋转壳在外压和自重联合作用下,线性前屈曲一致稳定理论的二阶变微分方程,将线弹性稳定问题转化为广义特征

值求解问题。杨智春等^[13]基于结构失稳时系统刚度矩阵的奇异性,将风荷载和自重作用下的双曲冷却塔屈曲稳定分析转化为数学中的广义特征值求解问题,其最小特征值对应于临界荷载,相应的特征向量即对应于结构的屈曲模式。李龙元等^[14]通过引入即时刚度参数,并结合荷载增量迭代法和改进的弧长法,描述了大型钢筋混凝土双曲冷却塔非线性失稳的整个路径,结果表明:失稳前冷却塔非线性效应较小,线性稳定分析结果具有较好的近似性,考虑环向加肋后,冷却塔临界失稳荷载明显提高,因而环向加肋对提高稳定性非常有效。

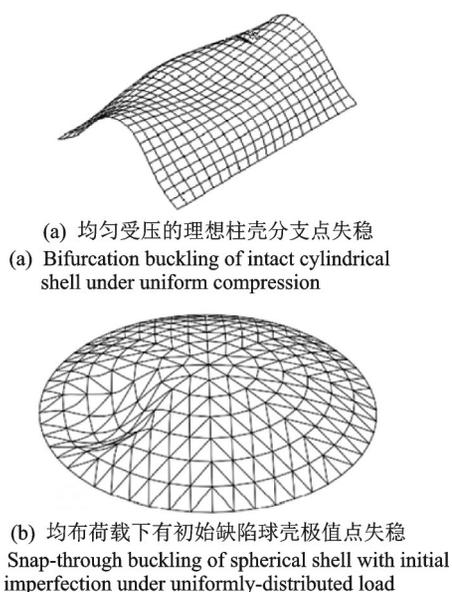


图 1 壳体结构两类失稳模式

Fig.1 Two types of buckling modes of shell structure

渡桥电厂风毁事故前,冷却塔结构分析建立在壳体无矩理论,即薄壳理论中的平衡方程忽略壳体面内的弯矩和剪力,壳体截面内力仅有沿着厚度方向的均布拉压应力,因而以渡桥电厂为代表的冷却塔塔筒仅布置 1 层中央钢筋网,无法有效抵抗塔筒内弯矩作用。显然,这种忽略壳体弯矩效应和横向剪力效应的简化方法不能反映壳体实际受力状态,也是导致渡桥电厂风毁的重要因素。20 世纪 70 年代以后,以直法线有矩理论为基础的薄壳结构稳定分析方法逐渐取代了旋转壳无矩理论。陈健等^[15]结合经典稳定理论能量准则,开发了求解线弹性失稳临界荷载和屈曲模态的冷却塔结构分析软件。但是,由于壳体失稳理论值与试验值存在明显差异,这种差异不仅表现在失稳荷载理论值明显高于试验值,还在于失稳模式中的周向波数的理论预期值与试验值差异显著,因而理论分析结果一般作为冷却

塔线弹性风致稳定分析的参考值。

2.2 试验模拟

物理模型试验由于模拟参数易调可控,成为冷却塔风致稳定机理研究最为直观有效的手段。冷却塔壳体稳定试验研究如图 2 所示。Der 等^[16]采用增压风洞试验,完成了系列紫铜和氯乙烯树脂(polyvinyl chloride,简称 PVC)双曲冷却塔缩尺模型的风致整体稳定研究,如图 2(a)所示,分析了自重、底支柱、环向裂缝、子午向裂缝和塔顶刚性环等因素对结构整体稳定性的影响,提出了基于厚径比的整体弹性失稳临界风压经验公式。Mungan^[17-20]针对圆柱壳、双曲壳和加劲双曲壳通过轴对称静水压力荷载试验,研究了不同应力组合下的壳体局部屈曲稳定性,如图 2(b)所示,提出了基于屈曲应力状态(buckling stress state,简称 BSS)的冷却塔局部弹性稳定检算公式。上述基于试验结果拟合的整体和局部稳定评价公式由于简单实用,被中、英、德等国冷却塔设计规范采纳^[6,21-22],也成为众多研究者理论和数值结果的借鉴和参照^[23-25]。

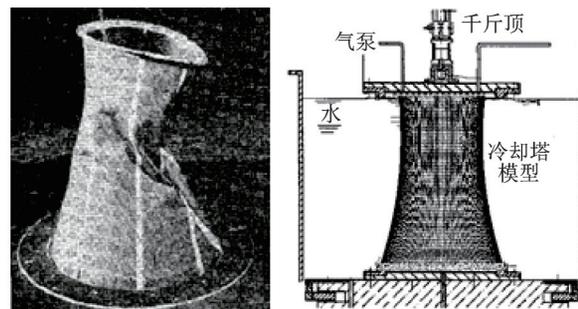


图 2 冷却塔壳体稳定试验研究

Fig.2 Experimental study on shell stability of cooling tower

上述稳定验算公式形成过程存在风荷载模式模拟不足、模型质量和刚度不协调以及壳体线型、壁厚、边界与实际结构存在差异等缺陷^[26-27]。具体表现为:①荷载层面:整体稳定试验并未考虑大气边界层风剖面 and 紊流效应,局部稳定试验采用环向均布水压模拟实际三维非均布风压,无法反映真实风环境下的冷却塔屈曲应力状态、屈曲模态形状和后屈曲平衡路径;②模型层面:电沉积工艺制作的等壁厚壳体模型和热塑工艺制作的环氧树脂壁厚壳体模型均非几何缩尺完全相似的冷却塔失稳模型,模型的质量、轴向刚度和弯曲刚度三者相似关系难以协调,无法反映实际结构动力特性,且受制作工艺和加

工精度制约,壁厚、线型等特征尺寸偏差较大,成型后的模型存在较大的初始几何缺陷。

近年来,以立体打印为代表的增材制造、快速成型技术迅猛发展,冷却塔完全缩尺高精度薄壳模型的低成本、高效率制作加工成为现实。孙琪超等^[28]采用3D打印模型还原了早期冷却塔失稳物理风洞试验,验证了连续壳模型适用冷却塔风致稳定试验研究的合理性,但也意识到基于早期稳定试验结果的冷却塔弹性稳定验算公式存在不足,以及开展复杂风压作用下大型冷却塔弹性稳定试验研究的紧迫性。

2.3 数值计算

计算力学的发展使有限单元法对壳体稳定性分析能力有了长足的进步,目前线弹性范围内的壳单元模拟精度基本满足工程需求。文献[27-29]分别构建了冷却塔整体和局部稳定试验有限元模型,提出了基于塔筒实际风压分布的改进塔筒弹性稳定验算公式。文献[23-25,30-32]基于有限元分析研究了塔型参数、初始缺陷、表面加劲、内压效应、气动措施、施工过程和塔群布置等因素对冷却塔寿命期内结构抗风稳定性性能的影响,提出了规范弹性稳定安全系数取值偏于保守。相比之下,欧美规范已开始逐步放弃弹性稳定安全系数大于5的强制条款,同等条件下即便稳定安全系数取3.0亦可展开工程设计,从而兼顾了工程安全性和经济性。

在实际风致破坏倒塌过程中,塔筒出现大变形而呈几何非线性,壳体应力超过材料容许应力而呈

材料非线性。文献[33-34]基于有限元隐式算法开展了考虑双重非线性效应的冷却塔结构塑性失效研究,结果表明:风荷载作用下塔筒表面裂缝出现和发展引发的材料强度破坏导致了结构失效甚至倒塌,塔筒开裂前非线性特征不明显,裂缝出现后位移迅速增加,材料进入塑性屈服状态,因此冷却塔风致结构失效属于极限承载力问题而非屈曲稳定。文献[35-36]采用钢筋混凝土分层壳单元进行精细化有限元隐式分析后指出:冷却塔结构失效始于子午向钢筋屈服,并随着环向钢筋屈服的扩散而达到承载力极限状态。

为了连续动态地再现原型结构失效倒塌过程,显式有限单元法逐步应用到了冷却塔爆破拆除和强风、强震、爆炸、撞击等自然或人为造成的极端外部荷载作用下的倒塌模拟中。Yu等^[37]采用显式动力分析软件LS-DYNA开展了规范八项式风压作用下超大型钢筋混凝土冷却塔倒塌过程模拟,风毁后的冷却塔残余形态与渡桥电厂相似。吴鸿鑫等^[38]结合软件Fluent和LS-DYNA,揭示了三维风荷载作用下冷却塔倒塌过程的变形姿态和受力机制。陈旭^[39]基于三维显式有限元分析,结合多风扇主动控制风洞和龙卷风风洞测压试验结果,再现了超大型冷却塔台风和龙卷风作用典型工程地貌下的结构失效倒塌全过程。图3为大型冷却塔风致倒塌全过程模拟。由于结构倒塌分析是一个涉及强度、变形、损伤和断裂等连续介质力学问题和碰撞、接触、位移不连续等非连续介质力学问题的复杂学科领域,因而冷却塔风致倒塌数值模拟相关研究目前还处于起步阶段。

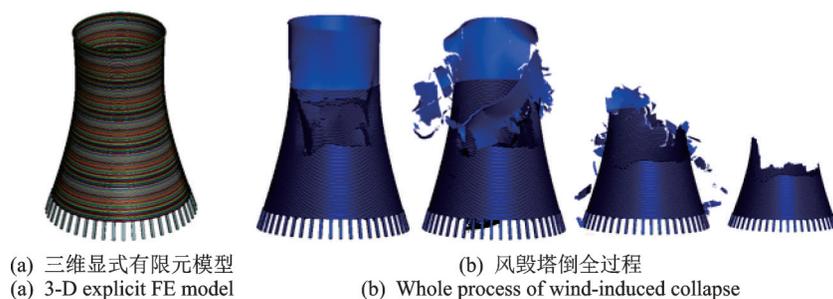


图3 大型冷却塔风致倒塌全过程模拟^[39]

Fig.3 Whole process simulation of wind-induced collapse of large cooling tower^[39]

2.4 研究趋势

风荷载条件旋转壳体结构弹性稳定性为大型冷却塔结构设计的关键控制因素,而现行水工规范中基于早期物理风洞试验结果的整体稳定验算公式以

及基于环向均匀加载模式的局部稳定验算公式由于模拟条件不足,已难于适用实际非均布、非对称复杂风压条件下的大型冷却塔壳体弹性稳定问题。为此,亟需开展考虑真实空间风压分布作用的塔筒弹性稳定试验研究,修正规范中不合理的设计条款,建

立兼顾设计合理性和便捷性的壳体结构稳定评价公式,为大型冷却塔抗风稳定设计提供科学合理的参考依据。与此同时,开展考虑非线性效应的大型冷却塔结构塑性失效显式动力分析,研究风荷载作用下结构屈曲应力状态、屈曲模态形状和后屈曲平衡路径,揭示大型冷却塔结构风致失效全过程的宏观倒塌模式和微观失效机理,建立大型冷却塔风致动力失效评价准则,针对结构薄弱部位建议加固和改进措施,寻求大型冷却塔结构抗风性能最大化,避免火/核电站出现风毁塔倒而引发次生灾害。

3 结构风振效应

3.1 数值计算

冷却塔作为空间高耸薄壳结构,是典型的风敏感结构,风荷载作用下的结构风振效应不容忽视。冷却塔风振响应数值计算方法主要包括频域分析方法和时域分析方法。

频域分析方法通过频响函数建立外部激励与结构响应的关系,通过振型分解将结构响应统计量描述为各阶振型的广义模态响应,并在模态空间内进行线性叠加组合。频域分析方法可分为基于随机振动理论的模态叠加法和基于荷载频谱特性的三分量法。模态叠加法中的平方和开平方法(square root of sum of squares,简称SRSS法)计算耗时虽小,但忽略了模态间的相互耦合,导致冷却塔这类振型分布密集且风振响应由多阶模态共同参与的结构风振响应计算误差较大。完全组合法(complete quadratic combination,简称CQC法)虽能考虑所有振型及其耦合项的影响,但是对于冷却塔这类自由度多且风荷载激励点多的结构计算耗时巨大。为此,Lin等^[40]、许林汕等^[41]引入了虚拟激励法,该方法与CQC法相比精度相同,而计算效率大幅度提高,通过与气弹模型风洞试验结果对比,表明采用前30阶模态即可满足精度要求。三分量法可以描述结构风振响应中的背景响应和共振响应,但忽略了背景和共振模态间的耦合项。Ke等^[42]提出了能够同时考虑背景响应、共振响应、背景和共振耦合响应以及共振模态间耦合响应且兼顾计算精度和计算效应的一致耦合分析法(consistent coupling method,简称CCM),采用该方法计算得到的某215 m超大型冷却塔风振响应与气弹模型风洞试验结果以及CQC法计算结果吻合较好,并指出超大型冷却塔脉动响

应以共振响应为主,且耦合响应不能忽略。大型冷却塔风振响应数值计算如图4所示。图4(a)为基于CCM的频域响应分析。频域分析方法计算简单、思路清晰,但仅限于线性结构或弱非线性结构的风振响应计算,不能考虑结构非线性效应和结刚度、阻尼的变化,仅能获得脉动响应的统计量,无法反映结构响应全过程信息。

时域分析方法通过有限单元法将结构离散化并施加随时间变化的风荷载时程,在时域内采用逐步积分方法直接求解运动微分方程,从而获得结构动力响应时程。Orlando^[43]采用有限元时域计算,研究了双塔布置时群塔干扰效应对塔筒内力分布的影响。Zahlten等^[44]基于钢筋混凝土材料非线性分层壳单元,开展了风荷载作用下的冷却塔非线性时程分析,研究了塔筒内、外表面裂缝分布和非线性位移响应的频谱特征。Yu等^[45]将时域分析与结构配筋设计相结合,提出了基于配筋量准则的冷却塔结构抗风设计方法,如图4(b)所示。时域分析方法可获得位移、内力、应力和应变等结构动力响应的完整信息,能在时域内对结构刚度和阻尼进行修正,并考虑结构几何非线性和物理非线性等特性,适用于火/核电大型冷却塔这类安全等级高、重要性系数大的大跨度、大体量结构风振效应的研究。

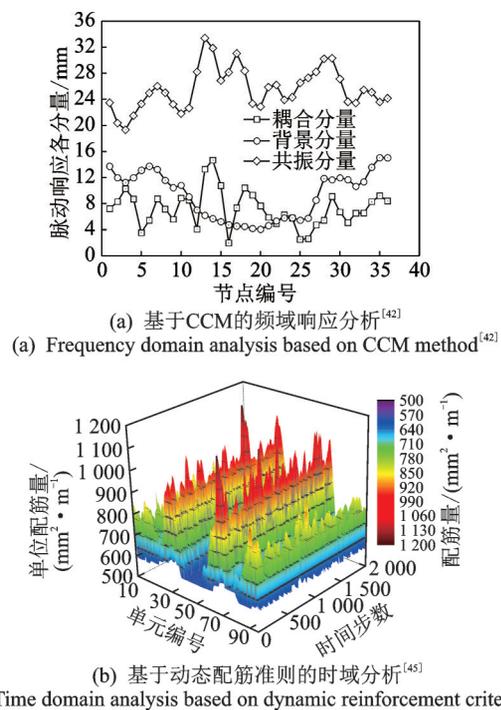


图4 大型冷却塔风振响应数值计算

Fig.4 Numerical calculation of wind-induced vibration of large cooling tower

3.2 试验模拟

冷却塔体型大、结构柔,气弹模型风洞试验是获得此类结构风振响应最直接的途径。冷却塔气弹模型如图 5 所示。冷却塔气弹模型主要分为 2 类。一类源于渡桥电厂风毁后用于整体气动稳定研究,并被美国土木工程协会推荐使用的连续壳气弹模型(也称完全气弹模型)^[46]。模型设计满足与原型结构柯西数相似,对原型结构塔筒尺寸进行完全缩尺,考虑壳体轴向、抗弯、扭转共计 7 个有效刚度模拟,选用与塔筒混凝土密度、泊松比相近的材料进行加工。这类气弹模型可实现壳体质量、刚度的连续分布,能较精确地模拟冷却塔结构质量、刚度和阻尼。图 5(a)为连续壳气弹模型。Armit^[47]基于连续介质气弹模型风洞试验,还原了渡桥电厂冷却塔风毁事故。结果表明:受前塔尾流的影响,后塔的迎风区子午向拉应力极大地超过了钢筋的极限抗拉强度,从而导致子午向钢筋被拉断,结构发生整体倒塌,且冷却塔风荷载下静态应力和动态应力处于同一量级,共振应力按风速的四次方增长,远高于静态应力的增长速度。文献[48-49]以塔筒中部子午向应力为指标,提出了不同尺度冷却塔风致动力响应的共振因子以及典型群塔布置下的干扰效应系数。邹云峰等^[50]结合激光位移计测振试验,研究了单塔和群塔组合工况下的大型冷却塔风振响应特征。结果表明,大型冷却塔风致动力响应以背景分量为主,共振分量不明显。由于连续介质气弹模型与原型结构的

的频率比仅与模型材料与混凝土材料的弹性模量比有关,选用环氧树脂材料加工几何缩尺比为 1/200~1/400 的气弹模型,则模型基频率约为原型结构的 85~170 倍,对于一座高为 250 m、基频为 0.7 Hz 的超大型冷却塔,对应的连续介质气弹模型基频介于 60~120 Hz。这样的模型刚度远远超过被动风洞中湍流所能激发共振的有效频段,这也是连续介质气弹模型风洞试验中以背景响应为主导、共振响应显著偏小的缘由。

另一类是由赵林等^[51]提出的等效梁格气弹模型,如图 5(b)所示。此类等效模型采用空间正交桁梁代替连续壳,通过改变正交梁的厚度和宽度来实现抗弯、抗剪、抗扭刚度和轴向刚度模拟,通过附加配重进行壳体质量模拟,通过桁梁骨架表面张贴轻质弹性薄膜作为外衣进行气动外形模拟。Zhao 等^[52]基于等效梁格模型,对某 215 m 超大型冷却塔的风振效应研究表明,除尾流区外冷却塔风振效应均以共振响应为主导,且高频高阶模态易激发共振效应。Ke 等^[53]通过在等效梁格气弹模型纵横梁节点间布置测压孔,实现了气弹模型同步测压测振,研究了超大型冷却塔自激力效应对表面风荷载和结构风效应的影响。结果表明,自激力改变脉动风压分布特征,对脉动风效应的影响不可忽视。由于等效梁格气弹模型正交桁梁厚度和宽度的调节,实现了试验模型与原型结构频率比的自由调节,从而将模型频率控制在风洞湍流脉动风能量的有效频段内,激发了冷却塔风致共振效应,如图 5(c)所示。

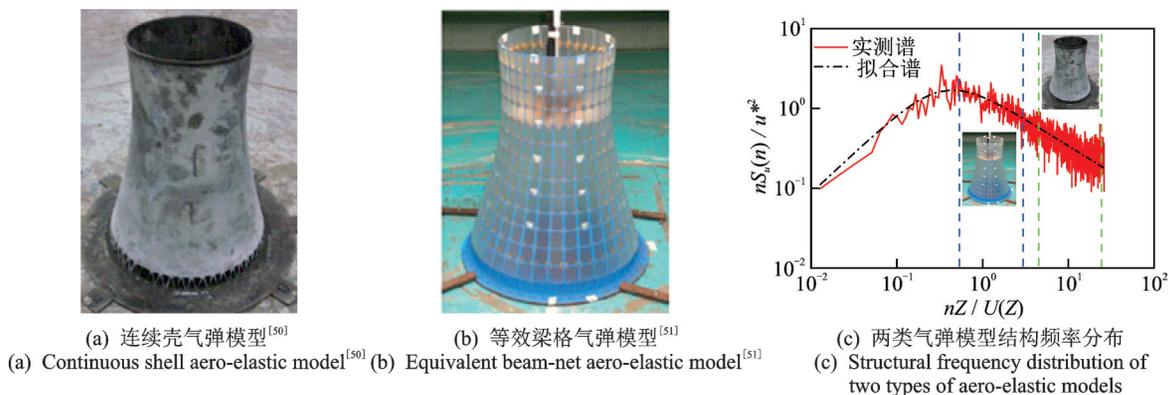


图 5 冷却塔气弹模型

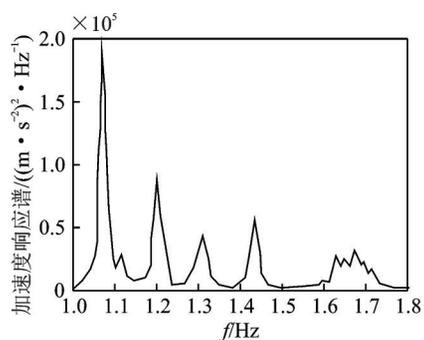
Fig.5 Aero-elastic model of cooling tower

3.3 现场实测

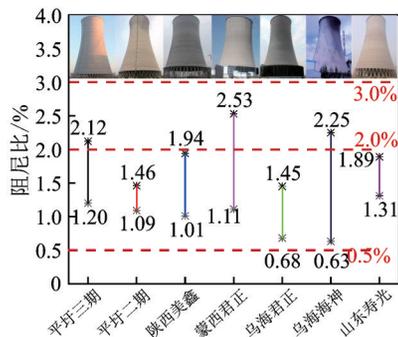
现场实测是风工程研究中最直接有效的方法,是检验理论分析、模型试验和数值计算准确与否的标准,但实施代价昂贵,对实测设备和外界环境要求

严苛。国内外冷却塔相关实测研究工作主要集中于塔筒表面静动态风压分布模式^[8,54],而鲜有冷却塔风振响应现场实测研究。大型冷却塔风振响应现场实测如图 6 所示。Winney^[55]对英国 Didcot 电厂高为 114.1 m 的双曲自然通风冷却塔开展了加速度响应

现场实测工作,在低风速条件下,冷却塔在前几阶自振频率处出现了共振响应。图6(a)为现场实测风致加速度响应谱。Jeary等^[56]对美国佛罗里达某高为126.3 m的冷却塔进行了台风下的塔筒加速度响应测量,冷却塔在第1、第9、第11、第16阶自振频率处出现了明显的共振响应。文献[7,57]对国内不同地域、塔型、塔高及年限的8座大型冷却塔(包括4座自然通风湿冷塔、3座间接空冷塔、1座高位收水塔)开展了风致加速度响应的现场实测工作,研究了响应的时变特性、非高斯特性以及空间相关性,获得了典型塔高和塔型的自振频率和结构阻尼,如图6(b)所示。实测结果表明,冷却塔风振响应存在多模态参与,在个别模态处结构共振效应明显。风振实测的数据虽然稀少,却极有参考价值,历次的风振实测均表明冷却塔在风荷载作用下的共振响应不容忽视。



(a) 现场实测风致加速度响应谱^[55]
(a) Field measurement of wind-induced acceleration response spectrum^[55]



(b) 基于风振响应现场实测的阻尼比识别^[7]
(b) Damping ratio identification based on field measurement of wind-induced vibration response^[7]

图6 大型冷却塔风振响应现场实测

Fig.6 Field measurement of wind-induced vibration of large cooling tower

3.4 趋势进展

随着百万级火电燃煤机组配套的超大型冷却塔不断涌现,以及近海核电机组配套的超大型冷却塔兑现建设,传统钢筋混凝土冷却塔高度已经进入了

200 m级的新阶段。同时,随着空间桁架体系^[58]、新型索网体系的钢结构冷却塔的出现^[59],冷却塔结构风振效应将面临新的挑战。因此,亟需建立考虑超大型冷却塔非线性效应的结构风振响应数值计算方法,提出适用于新型钢结构冷却塔风洞试验研究的气弹模型设计方法,开展来流风场、表面风压和风振效应的原型结构现场实测工作,建立超高雷诺数条件下动态绕流物理风洞试验模拟准则,提出风致动力分析中冷却塔结构阻尼比实测经验拟合公式,探索超大型混凝土/钢结构冷却塔风振动力效应机制。

4 结束语

当前,我国发电量已占全球发电总量的29%,处于运营状态的冷却塔500余座,近十年间已经规划建设突破200 m级世界纪录的超大型冷却塔10余座,世界前三规模的超大型冷却塔均已在国内建成。未来,我国冷却塔建设规模仍将保持快速增长势头并呈现超高、超大的结构发展趋势。在此背景下,超大型冷却塔不仅面对传统抗风理论框架下基于良态气候模式的风致稳定和风振效应的研究瓶颈,还要面对国内强台风、龙卷风等灾害气候发生频次增加、受灾程度加剧的趋势^[60-61],超大型冷却塔将受特异风灾气候的威胁。常规基于直线式边界层气流模拟的风洞试验方法和抗风计算分析难于适用具有复杂风速剖面、高紊流强度、大积分尺度甚至非平稳特性的大尺度强台风,以及具有三维强切变旋转风场特性的小尺度龙卷风。若继续沿用基于良态气候模式的极限状态抗风设计理论,势必带来巨大安全隐患,一旦发生特异风致倒塔事故,则会造成财产损失和人员伤亡,危害电厂运营安全,对于核电厂甚至可能引发核安全事故。因此,未来冷却塔抗风研究将立足超大型冷却塔建设发展的趋势,面向特异风灾气候,开展强台风和龙卷风等特异风场作用下的冷却塔壳体失稳模式和结构风振机理研究,揭示典型工程场地、特异风场条件下的超大型冷却塔稳定失效和动力效应机理,为建立特异风灾气候超大型冷却塔结构抗风设计框架提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] POPE R A. Structural deficiencies of natural draught cooling towers at UK power stations. part 1: failures at ferrybridge and fiddlers ferry [J]. Proceedings of the ICE-Structures and Buildings, 1994, 104(1): 1-10.
- [2] BAMU P C, ZINGONI A. Damage, deterioration and

- the long-term structural performance of cooling-tower shells: a survey of developments over the past 50 years [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27 (12): 1794-1800.
- [3] 张军锋. 大型冷却塔结构特性与风致干扰效应研究 [D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [4] KRIVOSHAPKO S N. Static, vibration, and buckling analyses and applications to one-sheet hyperboloidal shells of revolution [J]. *Applied Mechanics Review*, 2002, 55(3): 241-270.
- [5] BUSCH D, HARTE R, KRÄTZIG W B, et al. New natural draft cooling tower of 200m of height [J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(12): 1509-1521.
- [6] 李武全, 罗书祥, 彭向东, 等. DL/T 5339-2006 火力发电厂水工设计规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] KE S T, YU W, ZHU P, et al. Full-scale measurements and damping ratio properties of cooling towers with typical heights and configurations [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 124: 437-448.
- [8] ZHAO L, GE Y J, KAREEM A. Fluctuating wind pressure distribution around full-scale cooling towers [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 165: 34-45.
- [9] SOLLENBERGER N J, BILLINGTON D P, SCANLAN R H. Wind loading and response of cooling towers [J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(3): 601-621.
- [10] ZHANG J F, GE Y J, ZHAO L, et al. Wind induced dynamic responses on hyperbolic cooling tower shells and the equivalent static wind load [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 169: 280-289.
- [11] 陈铁云, 沈惠申. 结构的屈曲 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1993: 1-3.
- [12] 卢文达, 顾皓中. 带有环向肋的双曲冷却塔的线性稳定分析 [J]. *应用数学和力学*, 1989, 10(7): 559-567.
- LU Wenda, GU Haozhong. Buckling of cooling tower shells with ring-stiffeners [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1989, 10(7): 559-567. (in Chinese)
- [13] 杨智春, 李斌, 樊丽君. 双曲冷却塔在风载下的应力分析与屈曲稳定性分析 [J]. *工程力学*, 2003(SI): 385-387.
- YANG Zhichun, LI Bin, FAN Lijun. Stress and buckling analyses of hyperbolic cooling towers under wind loads [J]. *Engineering Mechanics*, 2003(SI): 385-387. (in Chinese)
- [14] 李龙元, 卢文达. 加肋双曲冷却塔的非线性稳定分析 [J]. *应用数学和力学*, 1989, 10(2): 105-110.
- LI Longyuan, LU Wenda. Nonlinear buckling analysis of hyperbolic cooling tower shell with ring-stiffeners [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1989, 10(2): 105-110. (in Chinese)
- [15] 陈健, 黄志龙, 武际可, 等. 旋转壳及附属结构应力分析软件系统 [J]. *计算力学学报*, 1995, 12(3): 337-343.
- CHEN Jian, HUANG Zhilong, WU Jike, et al. Stress analysis software systems for revolutionary shells attached structures [J]. *Computational Structural Mechanics and Applications*, 1995, 12(3): 337-343. (in Chinese)
- [16] DER T J, FIDLER R. A model study of the buckling behavior of hyperbolic shells [C] // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. London, England: ICE Publisher, 1968: 105-118.
- [17] MUNGAN I. Buckling stress states of cylindrical shells [J]. *Journal of the Structural Division*, 1974, 100(11): 2289-2306.
- [18] MUNGAN I. Buckling stress states of hyperboloidal shells [J]. *Journal of the Structural Division*, 1976, 102(10): 2005-2020.
- [19] MUNGAN I. Buckling stresses of stiffened hyperboloidal shells [J]. *Journal of the Structural Division*, 1979, 105(8): 1589-1604.
- [20] MUNGAN I. Buckling of reinforced concrete cooling tower shells: BSS approach [J]. *ACI Structural Journal*, 1982, 79(5): 387-391.
- [21] Association of Consulting Engineers, BEAMA Ltd, Concrete Society, et al. BS 4485-4-1996 code of practice for structural design and construction-water cooling towers [S]. London, England: British Standard Institution, 1996.
- [22] BLOMEKE P, BOCKHOLD J, DEPE T, et al. VGB-S-610-2019 structural design of cooling towers VGB-standard on the structural design, calculation, engineering and construction of cooling towers [S]. Essen, Germany: VGB PowerTech e.V., 2019.
- [23] 柯世堂, 赵林, 张军锋, 等. 电厂超大型排烟冷却塔风洞试验与稳定性分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(2): 114-118.
- KE Shitang, ZHAO Lin, ZHANG Junfeng, et al. Wind tunnel test and stability performance analysis of super large cooling towers with gas flue in power plant [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(2): 114-118. (in Chinese)
- [24] 柯世堂, 杜凌云. 不同气动措施对特大型冷却塔风致响应及稳定性能影响分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(5): 79-89.

- KE Shitang, DU Lingyun. Impact study on wind-induced response and stability for super large cooling tower with different aerodynamic measures [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2016, 43(5): 79-89. (in Chinese)
- [25] 柯世堂, 朱鹏. 超大型冷却塔施工全过程风致稳定性演化规律研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(10): 172-180.
- KE Shitang, ZHU Peng. Evolution of the wind-induced stability of super large cooling towers during the whole process of construction [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(10): 172-180. (in Chinese)
- [26] 张军锋, 葛耀君. 现行规范中双壳体冷却塔静风局部稳定公式来源 [J]. *建筑结构*, 2011, 41(3): 100-109.
- ZHANG Junfeng, GE Yaojun. Origin of specifications about local buckling of hyperboloidal cooling towers in current codes [J]. *Building Structure*, 2011, 41(3): 100-109. (in Chinese)
- [27] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 基于风洞试验的双曲冷却塔静风整体稳定研究 [J]. *工程力学*, 2012, 29(5): 68-77.
- ZHANG Junfeng, GE Yaojun, ZHAO Lin. Study on global aerostatic stability of hyperboloidal cooling towers based on the wind tunnel tests [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(5): 68-77. (in Chinese)
- [28] 孙琪超. 自然通风冷却塔整体稳定性模型实验及有限元分析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [29] 田敏, 赵林, 焦双健, 等. 双曲壳结构非均匀风压作用局部稳定验算 [J]. *工程力学*, 2019, 36(9): 136-143.
- TIAN Min, ZHAO Lin, JIAO Shuangjian, et al. Local stability algorithm for hyperbolic shell structures under non-uniform wind loads [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(9): 136-143. (in Chinese)
- [30] SABOURI-GHOUMI S, KHARRAZI M H K, JAVIDAN P. Effect of stiffening rings on buckling stability of R. C. hyperbolic cooling towers [J]. *Thin-Walled Structure*, 2006, 44(2): 152-158.
- [31] XU Y Z, BAI G L. Random buckling bearing capacity of super-large cooling towers considering stochastic material properties and wind loads [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2013, 33: 18-25.
- [32] 王浩, 柯世堂. 基于风洞试验的四塔布置超大型冷却塔风致综合受力与稳定性 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(2): 330-336.
- WANG Hao, KE Shitang. Comprehensive performance of stress and stability of super large cooling tower under four-tower combination based on wind tunnel tests [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(2): 330-336. (in Chinese)
- [33] MANG H A, FLOEGL H, TRAPPEL F, et al. Wind-loaded reinforced-concrete cooling towers: buckling or ultimate load? [J]. *Engineering Structures*, 1983, 5(3): 163-180.
- [34] DJERROUND M, MERABET O, Reynouard J M. Buckling and failure analysis of cooling tower and its application to a real case [C]//Transactions of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Stuttgart, Germany: North-Holland Publishing Company, 1993: 339-334.
- [35] NOH S Y, KRÄTZIG W B, MESKOURIS K. Numerical simulation of serviceability, damage evolution and failure of reinforced concrete shells [J]. *Computers & Structures*, 2003, 81(8): 843-857.
- [36] NOH H C, CHOI C K. Ultimate behavior of reinforced concrete cooling tower: evaluation and comparison of design guidelines [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2006, 22(2): 223-240.
- [37] YU Q Q, GU X L, LI Y, et al. Collapse mechanism of reinforced concrete super large cooling towers subjected to strong winds [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(6): 1-10.
- [38] 吴鸿鑫, 柯世堂, 王飞天, 等. 超大型冷却塔风致倒塌全过程数值仿真与受力性能分析 [J]. *工程力学*, 2019, 30(1): 1-10.
- WU Hongxin, KE Shitang, WANG Feitian, et al. Numerical simulation and force performance analysis of wind-induced collapse of super large cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 30(1): 1-10. (in Chinese)
- [39] 陈旭. 台风和龙卷风作用下大型冷却塔风荷载及风致失效 [D]. 上海: 同济大学, 2018.
- [40] LIN J H, ZHANG Y H, LI Q S, et al. Seismic spatial effects for long-span bridges, using the pseudo excitation method [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(9): 1207-1216.
- [41] 许林汕, 赵林, 葛耀君. 超大型冷却塔随机风振响应分析 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(4): 180-184.
- XU Linshan, ZHAO Lin, GE Yaojun. Wind-excited stochastic response of super large cooling tower [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(4): 180-184. (in Chinese)
- [42] KE S T, GE Y J, ZHAO L, et al. A new methodology for analysis of equivalent static wind loads on super-large cooling towers [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 111: 30-39.
- [43] ORLANDO M. Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(8): 979-992.

- [44] ZAHLTEN W, BORRI C. Time-domain simulation of the non-linear response of cooling tower shells subjected to stochastic wind loading[J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(10): 881-889.
- [45] YU M, ZHAO L, ZHAN Y Y, et al. Wind-resistant design and safety evaluation of cooling towers by reinforcement area criterion [J]. *Engineering Structures*, 2019, 193: 281-294.
- [46] ISYUMOV N, CERMAK J E, DAVENPORT A G, et al. ASCE manuals and reports on engineering practice No.67: wind tunnel models studies of buildings and structures[S]. Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2015.
- [47] ARMIT J. Wind loading on cooling towers[J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(3): 623-641.
- [48] NIEMANN H J. Wind effects on cooling-tower shells [J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(3): 643-661.
- [49] NIEMANN H J, KOPPER H D. Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(10): 874-880.
- [50] 邹云峰, 牛华伟, 陈政清. 基于完全气动弹性模型的冷却塔风致响应风洞试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(6): 60-67.
ZOU Yunfeng, NIU Huawei, CHEN Zhengqing. Wind tunnel test on wind-induced response of cooling tower based on full aero-elastic model[J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(6): 60-67. (in Chinese)
- [51] 赵林, 葛耀君, 曹丰产. 双曲薄壳冷却塔气弹模型的等效梁格方法和实验研究[J]. *振动工程学报*, 2008, 21(1): 31-37.
ZHAO Lin, GE Yaojun, CAO Fengchan. Equivalent beam-net design method of aeroelastic model about hyperbolic thin-shell cooling towers[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2008, 21(1): 31-37. (in Chinese)
- [52] ZHAO L, CHEN X, KE S T, et al. Aerodynamic and aero-elastic performances of super-large cooling towers [J]. *Wind and Structures*, 2014, 19(4): 443-465.
- [53] KE S T, GE Y J. The influence of self-excited forces on wind loads and wind effects for super-large cooling towers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 132: 125-135.
- [54] SUN T F, GU Z F, ZHOU L M, et al. Full-scale measurement and wind-tunnel testing of wind loading on two neighboring cooling towers[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 43(1): 2213-2224.
- [55] WINNEY P E. The modal properties of model and full scale cooling towers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1978, 57(1): 131-148.
- [56] JEARY A P, FRIDLIN D, WANG L. Dynamic stability considerations for a natural-draft cooling tower under repair with hurricane-force wind action [C] // *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering*. Amsterdam, Netherlands: Dutch-Flemish Wind Engineering Association, 2011:1-8.
- [57] WANG H, KE S T, GE Y J. Research on non-stationary wind-induced effects and the working mechanism of full scale super-large cooling tower based on field measurement[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 184: 61-76.
- [58] MA T T, ZHAO L, CHEN N Y, et al. Wind-induced dynamic performance of a super-large hyperbolic steel-truss cooling tower[J]. *Thin-walled Structures*, 2020, 157: 107061.
- [59] 胡宗羽, 钱基宏, 马明, 等. 索结构冷却塔研究[J]. *建筑科学*, 2016, 32(11): 1-6.
HU Zongyu, QIAN Jihong, MA Ming, et al. Research on a cable cooling tower[J]. *Building Science*, 2016, 32(11): 1-6. (in Chinese)
- [60] 张春艳. 中国沿海登陆台风灾害风险特征分析[D]. 南昌: 江西理工大学, 2019.
- [61] 黄大鹏, 赵珊珊, 高歌, 等. 近 30a 中国龙卷风灾害特征研究[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(2): 97-101.
HUANG Dapeng, ZHAO Shanshan, GAO Ge, et al. Disaster characteristics of tornadoes over China during the past 30 years [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, 35(2): 97-101. (in Chinese)



第一作者简介:赵林,男,1974年7月生,博士、教授。长期从事桥梁和建筑结构抗风性能研究。曾获国家自然科学基金委“优秀青年科学基金”、教育部“新世纪优秀人材”资助计划、交通运输部中青年科技创新领军人才。荣获上海市科技进步一等奖3项、上海市科技进步二等奖2项、中国公路学会科技进步一等奖1项。参编专著3部,发表学术论文120多篇。申请国家发明专利授权5项、实用新型技术专利6项、软件著作权11项。
E-mail: zhaolin@tongji.edu.cn

通信作者简介:陈旭,男,1988年10月生,博士、讲师。主要研究方向为结构抗风。
E-mail: chenxu@shnu.edu.cn