

文章编号: 1005-0523(2015)05-0073-14

现场实测风速风压研究的进展

潘吉洪

(中铁四局集团机电设备安装公司, 江西 南昌 330200)

摘要:通过国内外学者对近地边界层、低矮建筑、高层(超高层)建筑、大跨空间结构、桥梁的风速风压所做的实测研究进行了归纳总结,进而对现场实测风速风压的进展情况给出了一些展望。

关键词:现场实测; 风速; 风压; 进展

中图分类号: TU311

文献标志码: A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.05.012

风灾是造成损失最严重的一种自然灾害。近年来由于全球气候的变暖,造成风灾的数量和强度逐年增大。风灾统计表明,全球每年由于风灾造成的损失在 100 亿美元以上。在现代重大工程结构中越来越多地运用新技术、新材料、新设计方法,致使工程结构复杂多变,超高层和大跨度结构的不断涌现,工程结构逐渐呈现出轻质量、高柔度和低阻尼的特性,导致工程结构对风的敏感性越来越强,风荷载也扮演着越来越重要的角色,某些情况下甚至成为设计的控制荷载。因此,风荷载作用下工程结构的动力响应特性受到学术界越来越多的重视。

土木工程结构抗风研究的手段主要有风洞试验、数值模拟和现场实测。土木工程抗风研究依靠的主要手段是风洞试验,风洞试验对结构抗风理论的研究和重大工程的设计有着非常重要的意义。但是,风洞试验存在紊流尺度、雷诺数相似模拟的困难和非线性相似率模拟的问题^[1-2]。目前关于风场特性的实测数据非常有限,主要还是以风洞试验数据为主。而现场实测数据是研究风荷载特性最为直接的资料,也是对现有试验方法和理论模型进行修正最为权威的依据^[3]。结构抗风研究中要把现场实测作为一项非常重要的基础性和长期性的工作。然而在强风作用下结构的现场实测费用高、难度大,因此关于工程结构风场特性的现场实测相对于风洞试验和数值模拟还缺乏系统性的研究。由于有限的实测风场数据尚不能在结构风振振动分析中得到普遍的应用,人们对现场实测风速风压特性和气固耦合作用还缺乏足够的认识。因此,现场实测风速风压的研究对结构的抗风研究具有重要的意义。本文将对关于风速风压的现场实测进行归纳总结,进而对该领域的发展作进一步的展望。

1 国内外关于风速风压实测研究的进展

由于对工程结构进行风场实测费用高、难度大,关于风速风压的现场实测研究相对匮乏,有待于对实测数据库进一步的完善和充实。下面将对风速风压实测研究涉及到的领域进行分类归纳。

1.1 近地边界层风速风压的实测研究

近年来,各种实测风速风压仪器的出现为边界层风场的观测工作提供了很好的硬件基础,国内外学者对边界层风速风压特性的观测研究给予了越来越多的重视。

在国外,许多学者开展了对近地边界层风速风压的实测研究。如 Andersen 等^[4]在挪威建有近地海风观

收稿日期: 2015-07-13

作者简介: 潘吉洪(1971—),男,高级工程师,研究方向为铁路桥梁。

测数据库。Sparks 等^[5]通过大规模的风场观测工作探讨了风速复发间隔特性。Harstveit^[6]在挪威 5 个山地地形设置不同测试点对平均风速进行实测研究,对摩擦速度、湍流度和阵风因子等参数进行分析,结果表明:顺风向脉动风速标准差与摩擦速度比值有较大的变化;顺风向湍流度与阵风因子比值则几乎不变。Sharma 等^[7]基于不同高度、不同位置处热带气旋的实测数据,对中性稳定条件下和对流不稳定条件下的湍流特性参数进行了对比分析,对比结果表明:相对于中性条件下规范建议值,对流不稳定条件下不同地貌类别的湍流度取值应该有不同程度的增大。Kato 等^[8]利用超声风速仪对两次台风作用下市区脉动风特性进行了实测研究。John 等^[9]对台风作用过程中脉动风场和温度波动进行了实测研究,分析了强风的功率谱和统计特性。Tielemann^[10]对大气边界层的强风平均风速、湍流度、阵风风速进行了观测研究,来验证平均风速模型预测风速的准确性。Cao 等^[11]通过在日本 Miyakojima 岛 15 m 高度处的 16 个风速仪对强台风风速开展了同步实测研究,通过实测数据分析了近地湍流特性,分析结果表明:湍流度随风速增大而减小,但风速增大到一定程度时,湍流度几乎不再变化。Tamaru 等^[12]采用多普勒雷达对海滨及内陆等 3 个不同地貌区平均风速、风向、竖向风速进行了同步实测,并对 50~340 m 高度范围内的台风数据进行风剖面 and 湍流度剖面研究分析。

在国内,徐幼麟等^[13]利用安装在深圳帝王大厦顶部的监控系统对台风风场进行了实测分析,发现顺风向、横风向湍流度比香港屋宇署推荐值和季风条件下相应数值偏高;顺风向脉动风速功率谱密度与 Karman 谱密度吻合良好,而横风向吻合不好。Hui 等^[14-15]基于香港昂船洲大桥附近一处 50 m 高的气象塔对季风和台风资料的风剖面、湍流度、湍流积分尺度进行实测分析。傅继阳等^[16]对对超高层建筑的近地边界层风速进行了实测研究,研究发现:纵向、横向、垂直方向上的湍流强度随平均风速的增大有减小的趋势;顺风向的阵风因子随平均风速的增大而缓慢减小;纵向及横向湍流积分尺度随平均风速的增大而增大。Shiau 等^[17-18]利用超声风速仪对台湾基隆港附近离地 26 m 高度处进行实测研究,分析认为:脉动风速符合高斯分布;顺风向脉动风速功率谱密度与 Karman 谱密度吻合较好。覃军等^[19]利用实测资料对山区复杂地形上风场的一般特征和局地性特点进行了研究,详细分析了山谷风的时空变化规律,并比较了山谷风演变的不同阶段的平均风速和小风频率。庞加斌和李秋胜等^[20-21]分别对浦东地区和广东沿海地区近地强风平均风速和风向开展了实测研究,分析了湍流强度和阵风因子,说明了实测强风的脉动强度剧烈。陈凯等^[22]对傍山地区的强风风场特性进行了实测研究,在整个强风过程中该地区的最大瞬时风速和平均风速都远远高于气象站的记录,表明傍山地区局部风场有很大的特殊性。王桂玲等^[23]根据实测风场资料,研究了复杂地形上城市地区的低层风场特征,提出低层流场变化及形式受季风和地形扰动影响,局部地层流场受地形扰动强烈,其表现形式为水平漩涡状态,其中城市对漩涡的形成有显著影响。肖仪清等^[24-26]对台风过程近地层湍流特性进行了实测研究,发现:各方向湍流度随平均风速增大而减小;阵风因子与湍流度呈线性关系;台风过程中湍流积分长度的变异非常大。陈丽、徐安、李正农等^[27-29]对中信广场的风场与结构响应特性进行了实测研究,通过分析实测数据验证了湍流强度随平均风速增大而减小和阵风因子随湍流强度增大而增大等规律。胡尚瑜等^[30]基于台风实测风速资料分析了不同时距下平均风速和风向等风场特性差异,分析结果表明:近地强风的平均风速和风向在不同平均时距下差别不大,湍流度和阵风因子较高,与平均时距呈线性相关;不同平均时距下顺风向脉动风速谱与 Davenport 谱、Kaimal 谱、Von-Karman 谱和 Harris 谱吻合程度不同;1 min 平均时距相对能更好地反映台风湍流特征量和脉动风功率谱。肖仪清等^[31]基于五次台风过程中长时间序列的 6 组风特性观测数据,拟合研究了近地台风的脉动风速谱,发现实测风速谱与标准谱吻合的不理想,采用标准谱来直接描述台风影响区的脉动风速谱需谨慎对待。李秋胜等^[32]对香港中环地区的自然风场特性进行现场实测和分析研究发现:利用超声风速仪和风浆式风速仪所得到的 10 min 平均风速的大小和方向基本一致,从而证明了数据的可靠性;得出该地区上空自然风场包括平均风速、风方向、湍流强度、阵风因子、湍流积分尺度的分布规律和三个方向之间的比例关系;紊流风谱符合 Von-Karman 谱。宋丽莉等^[33]对复杂山地近地层强风特性进行了分析,发现由于地形的复杂化使主导风向和最大风速的方向均发生了改变,风速的垂直分布变得更加复杂,风的垂直廓线也不完全满足幂指数分布形式。张朝能等^[34]对高原山区城市流场进行了观测研究。方平治等^[35]基于台风登陆前后近地风场特征进行了实测研究发现不同登陆地区的台风特性有一定的差异。鄧

伦海和史文海等^[36-37]分别对北京近地和温州地区强风特性进行了观测研究,测得的强风样本进行了分析,结果表明近地强风的湍流度和阵风因子较大。苏志等^[38]对北部湾沿海7个气象站从建站至2008年最大风速、极大风速资料分析表明:越靠近海的地方基本风压越大,阵风风压分布特点与基本风压相同,而且阵风风压比基本风压大。徐安等^[39]采用三维超声风速仪观测了台风登陆过程,得出台风登陆过程中平均风速存在先增大后减小的过程,特别是当风眼通过观测站时,其平均风速相对很小;阵风因子与湍流强度之间存在线性关系。胡尚瑜等^[40]通过实测获得台风登陆期间三维脉动风速数据,对近地边界层平均风特性和湍流特性进行分析,分析结果表明:近地100 m范围内平均风速剖面符合对数律和指数律分布,平均湍流度剖面符合指数律分布;湍流强度与阵风因子相关性拟合参数值与Ishizaki推荐参数值基本一致。王旭等^[41-42]对台风影响下的上海浦东地区近地层湍流积分尺度和脉动特性进行实测研究,研究结果发现:各向湍流度随实测高度的增大而减小;各向阵风因子随平均风速的增大而减小;湍流积分尺度均值随着实测高度的增大而增大;各高度处湍流积分尺度实测结果与美国规范的经验结果相比明显偏小,与日本和欧洲规范相比偏大,而与印度规范最为接近。李正农等^[43]对冬季季风北京郊区近地面风剖面的平均风速和风向角、湍流度、阵风因子等风场特性参数进行实测研究,研究发现:随着高度的增加,湍流度和阵风因子呈逐渐减小的趋势;实测湍流度的值与欧洲、美国、日本等国相关规范湍流度取值较为接近,而与我国规范差异较大;实测横风向与顺风向湍流度的比值与相关文献实测结果接近;10 m高度范围内顺风向、横风向湍流积分尺度随着高度增加而增大,且随着平均风速的增大而增大。史文海等^[44-46]基于温州地区的台风实测风场资料,分析了不同平均时距下近地台风的湍流特性并且通过对比不同时段滑动平均统计特性对实测数据加以充分利用,得出能充分揭示近地强风特性的简洁有效的滑动平均方法。李秋胜等^[47]对沙尘暴天气下北京气象塔8~320 m高度之间的风速和温度资料进行统计分析,结果表明:指数律和修正对数律能够较好地描述300 m以下平均风速沿高度的实际变化规律,而对数律在强风条件下的适用范围为200 m左右。龙水等^[48]通过对强台风“尤特”登陆过程近地风进行现场实测,获得了风速风压的时程数据,对数据的分析结果表明:阵风因子随着湍流强度的增大而增大;其顺风向脉动风速功率谱,与各经验谱进行比较后得知,Karman谱与实测谱最为吻合。陈伏彬等^[49]基于100 m高测风塔上风速仪的现场实测数据,获得了开阔地貌台风风场的平均风速剖面与湍流度剖面模型,研究结果表明:在开阔场地条件下,台风近地边界层平均风速沿高度分布符合对数律,亦即满足指数律。

尽管国内外学者对近地边界层风速风压的实测做了一些研究,但是人们对边界层风速风压特性的认识还远不清楚。目前国际上常用的水平和竖向脉动风速功率谱值(Simiu谱、Von-Karman谱和Davenport谱等)在某些重要频段内相差很大,甚至以倍计。直接采用标准谱描述台风影响区的脉动风速谱有些不太恰当,需要谨慎对待。最优拟合谱相较于标准谱其改善幅度较大,但是现有的实测数据不足以归纳出可以替代标准谱的相应参数,需要获取更多的实测数据。通过对湍流度和湍流积分尺度的分析研究,其实测的结果与多国国际规范规定的取值存在一定差异,湍流度和阵风因子的关系与某些经验计算结果还是存在较大误差。脉动风速竖向相干函数指数衰减系数与国际上惯用的建议值有明显差异。说明对于平均风速和脉动风速的认识还远远不够。如何确定一个合理的平均时距能够较好反映风速风压特性和风速谱模型,尚需进行大量的实测分析研究和积累。不同地形、不同高度上的风速风压特性,尤其是强/台风特性的实测资料还明显欠缺。因此,需要深入地开展边界层风场特性研究,为近地层建筑物的抗风设计提供可靠的风特性参数。

1.2 低矮建筑风速风压的实测研究

在风灾造成的损失中主要是由低矮房屋的风损和风毁造成的,全球每年由于风灾造成的损失中低矮房屋的损毁占到50%以上^[50]。在过去的40多年间,许多学者通过现场实测和风洞试验等手段,对低矮房屋的风荷载特性展开研究,取得了不少有意义的成果。风洞试验由于其局限性而存在一些问题,现场实测能够更全面、更准确地研究低矮房屋的风荷载特性。

国外的一些学者以低矮房屋全尺寸测量获得的现场实测数据为基础,结合大量的风洞试验,研究了低矮房屋在良态气候条件下的一些风速风压的特性。如英国艾尔斯伯里试验楼的现场实测^[51],该实验楼的特

殊之处在于屋面坡角可在 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间任意可调。该实验房在建成两年后被拆除,但是一些学者还是通过风洞试验结果和仅有的实测数据进行对比研究,发现分析低矮房屋屋面风压分布可以采用相似参数(建筑高度与地表粗糙度之比)^[52-53];英国的西尔斯试验楼的现场实测,通过全尺寸模型的实测风压数据,研究了屋面的局部压力分布规律,对低矮房屋风洞试验以及数值模拟方法的修正提供了实测依据^[54-56];美国德克萨斯理工大学试验楼的现场实测,该项目通过采用不同的数据采集模式获取了实验楼表面的实测风压数据,一些学者通过利用其实测数据对风洞试验及数值模拟方法进行了验证,所做的研究为低矮房屋抗风设计提供了重要的参考依据^[57-61];文献^[62-63]也通过该试验楼对良态气候条件下的低矮房屋风荷载展开大量的现场实测,并和风洞试验进行对比,研究表明:在斜向风作用下,低矮房屋角部边缘区域受锥形旋涡、气流分离而产生较大局部峰值负压。新西兰的(Silsoes cube building)试验楼的现场实测,该项目通过全尺寸模型的实测风压分布与已得的风洞试验结果进行对比,结果表明:在风向角为 45° 的时候接近迎风边缘的吸力最大,该对比结果为低矮房屋的风荷载特性的研究提供了重要的参考^[64]。Richards^[65]也通过该试验楼对平均风压分布和峰值风压分布做了实测研究。Porterfield^[66]以及 Caracoglia^[67]通过开展飓风天气条件下典型居住房屋屋面、墙面角部局部风压的实测研究,分析发现:在飓风作用下,低矮房屋的角部区域具有较高的脉动风压和峰值负压。美国启动的佛罗里达州海岸监测计划(FCMP)^[68-69]对典型低矮居民房屋构建了风压现场实测系统,对屋面风压进行实测研究,获得了较为丰富的低矮房屋屋面风压的现场实测数据,但由于受测试仪器的局限,实测的低矮房屋屋面风压系数的结果存在一定的不确定性。

我国学者李秋胜^[70-75]、戴益民^[76-80]、胡尚瑜^[81-82]等人为获取低矮房屋风荷载特性,基于可移动式平屋顶型和双坡屋面型实验房(追风房)实测系统,对我国东南沿海台风登陆地区季风、热带风暴、台风及强台风开展了一系列的实测研究,获取了大量符合我国实际情况的有代表性和规律性的登陆台风风速、房屋表面风压等实测数据,填补了我国低矮房屋原型实测的空白,通过部分实测数据分析了近地面平均风速的特点和变化规律以及该低矮房屋表面风压分布特性,实测结果表明:低矮房屋屋面的角部、边缘和屋脊等区域的局部风压比屋面平均风压要大得多;屋面角部区域气流发生较强的分离和漩涡脱落,易形成较高的峰值负压和较大的脉动风压,各工况的风压标准差峰值基本上都出现在屋檐角部;屋面风压受风向角及屋面坡角的影响;通过探讨试验房屋面角部区域峰值压力时间和空间上的平均折减效应,得出峰值负压系数大于现行规范规定值,说明现有规范对沿海多台风地区低矮房屋的设计偏于不安全;湍流度及湍流积分尺度越大,屋面风压呈现递增趋势;由于未考虑竖向风攻角和竖向脉动风速变化的影响,在屋面角部区域现行规范计算方法相对低估其脉动风荷载。王旭等^[83]通过对东海边上海浦东国际机场附近建造的一栋坡角可在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内自由调节的低矮房屋及测试塔,对海边附近的风场特性及低矮建筑屋盖表面风压特性进行实测研究,通过实测数据分析表明:风速与风向角耦合作用明显,尤其是竖向风攻角对风速脉动影响较大;偏度和峰度对风压的非高斯分布影响较大,而且偏度及峰度呈线性相关。

综合以上可以看出,国内外学者对低矮房屋风速风压的现场实测研究取得了不少有意义的研究成果,但是关于台风作用下的低矮房屋风速风压的实测研究开展的仍然比较少。由于每次台风的风特性各不相同,所以低矮房屋表面风速风压的实测过程存在难以预料和不确定的因素;在增设建筑构造措施时,如何确定合理的峰值负压以及峰值负压产生的机理问题可为低矮房屋的抗风设计提供科学依据,其重要性可想而知;由于未考虑竖向风攻角和竖向脉动风速的变化,现行规范关于屋面角部区域的风荷载的计算方法相对低估其脉动风荷载。基于以上因素,都需要开展大量的实测研究,才能建立真正适合低矮房屋抗风研究的实测数据库。

1.3 高层(超高层)建筑风速风压的实测研究

高层(超高层)建筑,由于科学技术、设计理念、新型材料的发展,逐渐呈现出轻质量、高柔度、低阻尼的特性。其自振频率较低,比较接近于台风作用下的风振振动频率,因此容易引起超高层建筑的风致响应,国内外学者对其风振问题给予了越来越多的关注和重视。

超高层建筑逐渐呈现出轻质量、高柔度和低阻尼特性致使结构的风致动力响应明显增加,结构对风敏

感性进一步提高,导致结构风荷载取值和风致动力响应估计与控制成为当今结构设计所面临的主要问题之一。超高层建筑风速、风压场及风致动力响应实测的目的:是获取结构在强风(台风准用下外表面态和动态压力的分布特征和横向的湍流特性,进一步为在湍流风作用下结构横向振动的理论研究、结构抗风设计、幕墙设计、风致振动控制设计提供实测数据。

在国外, Ellis^[84]通过对几座高层建筑的现场实测,研究了高层建筑的动力特性,特别是阻尼问题。Kato 等^[85]对一高层建筑进行了风速风压的实测研究,并对风振内部压力进行分析发现:其风振内部压力系数沿整栋建筑物高度相对不变;内部平均压力系数与风洞试验获得值吻合较好。Kanda 等^[86]做了一些风压的现场实测研究工作,进行了多个项目的实测工作,实测项目包括平均风压系数、根方差风压系数、脉动风压的阵风等,实测发现:在高层建筑物迎风面上的脉动压力相干系数具有一致性,基本上确定了高层建筑物迎风面和背风面的压力谱趋势。Harikrishna 等^[87]通过对一座 52 m 高的格构式钢结构塔的风荷载特性及结构响应进行了实测,对阵风响应因子方法进行了研究,发现顶部位移的实测阵风因子值相较于其他规范中的值显得非常不足,主要是因为加速器对低频范围的背景响应不够敏感。Glanville 等^[88]通过对钢框架塔进行了动力特性以及风振响应的实测研究,发现钢框架塔的风振响应随着脉动风速和横向湍流的增大而增大。Momomura 等^[89]对日本山区的输电线路进行了多年的实测,发现塔的风振响应与风向角的关系很大,塔的加速度响应与风速成比例关系。Snanada 等^[90]通过实测研究获得了一座 200 m 的混凝土烟囱在强台风和季风作用下超临界雷诺数区域的风压特征和振动响应特性,证实了涡旋的交替脱落和脉动升力引起的横风振动。Ruscheweyh 等^[91]在三年时间内对一座 28 m 高的钢结构烟囱的风振振动进行了全尺测量,研究了其阵风响应及涡旋共振特性,实测结果验证了相关长度模型能够很好地预测风振振动特性。

在国内,针对高层建筑风速风压的现场实测研究和风振结构振动实测研究始于上世纪 70 年代对广州宾馆进行的风速、风压及风振响应的实测研究。70 年代后期,孙天风等^[92]对北京石景山发电厂的无肋双曲型自然通风冷却塔风压分布的全尺测量,风压实测结果表明:双曲线型冷却塔风压分布的负压峰值随着塔面粗糙度的增大而上升;冷却塔内壁风压力在强风时是非均匀分布的,迎风面内侧负压较大,尾流区负压很小,这种不均匀性随风速增大会变得更加显著。郭良茂等^[93]通过石景山发电总厂光滑面双曲线自然通风冷却塔双塔平均风压分布的全尺寸实测,研究发现:该双塔外侧的压力分布与单塔的结果吻合较好;双塔在来流风向角时,在两塔之间形成一定的“夹道效应”,造成两塔内侧负压峰值提高。周文超等^[94]完整记录了台风作用下格构式塔架 10、20、30 和 40 m 高度处的风速时程和 40 m 高度处部分时段的风振加速度响应时程,基于实测数据发现:顺风向湍流度随实测高度的增加而减小;格构式塔架的加速度响应随高度的增加而增加,当风速大于 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,加速度随平均风速近似线性增大。随着经济与科学技术的发展,城市地貌和建筑高度发生了很大的变化,高层建筑所处的风环境也发生了变化,势必会引起建筑风效应发生一定的变化。陈丽、徐安、李正农等^[28-29]对广州中信广场风场与结构响应特性进行了实测研究,分析了实测数据发现:平均风速与加速度响应的均方值关系,结构的横风向加速度响应与顺风向加速度响应接近;布置在中信广场上的部分测压点测得的风压谱呈现典型的纵向和横向风压特性,而另一部分测点风压功率谱并无明显特征。申建红等^[95]设计出了新型风压传感器,获得了超高层建筑顶部的风速风向记录,记录了墙面 6 个测点的风压时程,基于高空风速风压同步实测结果,分别对实测场地的风速风向特征及墙面风压特征进行了分析,结果表明:特殊地形条件下的风速脉动不完全符合典型的风速谱,而且其概率密度函数有可能不符合高斯分布;在这种情况下,的墙面风压也呈现出不同程度的非高斯特征,尤其是在分离流区域;脉动风压的空间相关性与风洞试验研究的结果具有相同的规律。李秋胜等^[96-104]对超高层建筑在风荷载作用下的风速、风向以及风振加速度和位移响应展开了实测研究工作,研究发现:湍流积分尺度随平均风速的增大而增大;湍流度和阵风因子随平均风速的增大而减小;风振加速度响应随实测风速的增大而增大;Von-Karman 谱能够相当好地描述风速的能量分布;实测的阻尼系数有较明显的幅值依赖特性,并且随幅值的增大而增大,随着阻尼系数的降低,顺风向和横风向的均方根加速度响应明显增加;均方根位移响应随风速、湍流度的增大而增大;利用 HHT 方法分析了台风作用下的建筑物的平均风速与风振响应的非平稳特性,并与传统的方法对比发

现, HHT 方法在时频分析中有广阔的应用前景。傅继阳等^[105]通过对广州西塔在台风作用下的风特性、风振响应及风振压力进行了实测研究, 研究发现: 实测的阻尼系数有明显的幅值依赖特性, 并且随幅值的增大而增大; 风振压力的概率密度函数非常接近于高斯分布, 通过对迎风面的风振压力进行分析验证了准静态假定, 同时发现建筑物的端部区域风荷载有涡旋脱落现象。Wu 等^[106]通过对帝王大厦的风振响应作了实测研究工作, 从实测结果中得到幅值依赖系数, 发现幅值依赖特性在顺风向及横风向风振响应中的作用非常明显。武占科和顾明等^[107-109]分别对上海环球金融中心的中强度脉动风荷载和风速进行了现场实测, 并对实测数据分析发现: 湍流度随平均风速增大而减小, 阵风系数随湍流度的增大而增大, 随平均风速的增大开始有减小趋势, 之后基本保持不变; 纵向、横向和竖向湍流积分尺度随平均风速增大而增大; 紊流强度、阵风因子和紊流积分尺度明显受到来流方向的影响; 高度大于 200 m 的高空脉动风特性不宜采用规范值。史文海等^[110]对台风“鲇鱼”作用下厦门沿海某超高层建筑的风场风压特性进行了实测研究, 研究发现: 沿海地区超高层建筑风场具有湍流度随平均风速增大变化平稳, 阵风因子随湍流度增大而增大等规律, 并且实测脉动风速谱与 Von-Karman 谱吻合较好; 同面内各测点的风压相关性较强, 异面之间风压的相关性相对较弱; 迎风面的平均风压较大, 且部分时段的实测值大于理论计算值, 背风面的实测平均风压较小; 迎风面的平均风压系数较大, 迎风面角部位置的平均风压系数较中部位置的大且脉动较大, 背风面的平均风压系数为负值且绝对值非常小; 迎风面的极值风压系数随着风向角的变化正负波动较大, 建筑平面中部位置的极值风压系数较小, 背风面的极值风压系数基本为负值, 除了角部测点, 各测点分布较为均匀, 建筑各面的极值风压系数的绝对值随着风速的增大呈逐渐减小的趋势; 迎风面的脉动风压系数较大且变化较大, 背风面的脉动风压系数非常小且变化平稳, 除个别测点, 建筑各面的脉动风压系数随着平均风速的增大呈明显的递减趋势。

由于高层建筑的风速风压的实测耗时、费力、难度也较大, 实测的范围和内容相对比较局限。台风和良态两种气候模式下风荷载的产生机理不同, 台风作用下的建筑物的脉动风特性不能用良态气候模式的统计值。随着我国沿海地区高层建筑的高度不断攀升, 200~500 m 的超高层将不断涌现, 但是我国现行的建筑结构荷载规范对于高度大于 200 m 的高空脉动风特性还没有规定, 因此有必要对高度大于 200 m 的高层建筑展开高空强(台)风风速风压的现场实测和研究工作。而且, 不同高度、不同风速、不同的风环境造成实测数据具有一定的差异, 因此只针对某些特定的高度、风速和风环境范围内的实测数据分析出来的结论不一定具有普遍性, 还需要进一步的研究探讨。通过对现场实测数据分析拟合的风谱表达式优于常见的四种标准谱, 因此有必要针对特定的地区和高度进行实测对功率谱密度函数进行修正。另外关于高层建筑表面脉动风压分布特性的实测研究还不是很多, 因此对数据的准确性、可靠性还需更多的实测研究加以充实和完善, 同时高层建筑群楼间干扰效应会对建筑物表面的风压产生一定影响, 因此也有必要在这方面进行实测研究。

1.4 大跨空间结构风速风压的实测研究

大跨度空间结构均具有质量轻、柔性大、阻尼小、自振频率较低等特点, 是典型的风敏感结构, 而且这些结构往往比较低矮, 在大气边界层中处于风速变化大、湍流度高的区域, 再加上屋顶形状多不规则, 其绕流和空气动力作用十分复杂, 所以这种大跨空间结构对风荷载十分敏感, 尤其是风的动态响应^[111]。国外学者 Yoshida 等^[112]利用多通路测压系统进行了气成膜圆屋顶平均风压的实测, 结果表明气成膜圆屋顶压力成非均匀分布的负压, 最大负压出现在圆屋顶的中心部位。Appedey 等^[113]对悉尼的 Belmore 进行了风压实测, 并与风洞试验结果进行对比, 发现现场实测结果比风洞试验结果要小得多, 所有在屋盖顶的测试点均发生气流分离, 有时会产生再附着现象。Pitsis 等^[114]在基于文献^[113]所做的研究的基础上对悉尼的 Caltex 体育馆进行实测, 并深入地比较了实测结果和风洞试验结果的差异。国内学者陈伏彬等^[115]对广州会展中心的钢屋盖部分区域进行了现场模态测试, 利用风速仪传感器采集到会展中心区域在常风状态下风效应特性, 实测结果发现: 该会展中心的钢屋架自振频率较小, 其竖向刚度较弱; 由于所测风速数据比较小, 未对风效应作过多分析。傅继阳等^[116]以广州国际会展中心 E 跨屋盖为案例, 对其进行了基于风洞试验的风振响应分析和竖向风致振动的实测研究, 研究结果表明: 对于类似于广州国际会展中心 E 跨屋盖的张弦梁结构, 其风致振动通

常为基阶振型所控制,因此跨中位置的峰值位移响应通常大于其他位置;阻尼比取值对于结构均方根位移响应的计算结果有着较大影响,阻尼比的增大使得位移响应谱的共振峰被平抑,从而降低了结构的均方根位移响应。张志宏等^[117]为保证我国东南沿海地区大跨预应力柔性体系的抗风安全性,并为规范规程的进一步修订做准备,针对强/台风多发地区实际、典型大跨空间索体系—乐清“弯月”体育场,进行现场风压风振实测,以获得足尺结构在真实建筑风环境下的风荷载和风致效应。

由于对大跨空间结构进行现场实测的费用和难度较大,国内外关于大跨空间结构风速风压的现场实测极少,大跨空间结构的抗风设计任重而道远,因此有必要对大跨空间结构展开大量的实测研究工作。

1.5 桥梁风速风压的实测研究

桥梁风场的实测的难度大、费用高,使得桥梁风场的实测研究一般与健康监测系统相结合。目前,国内外很多大跨桥梁均安装了包括风速仪和振动传感器在内的结构健康监测系统(SHMS),为开展桥梁抖振响应及风特性实测研究提供了平台。

在国外,Delaunay等^[118]通过对法国的伊瓦洛兹斜拉桥进行了脉动风及风振响应的实测研究,验证了先前通过风洞试验拉条模型与谱方法理论计算结合的方法所得的研究成果。Bietry等^[119]在法国 Saint-Nazair 斜拉桥的主跨跨中处布置了风速仪和加速度传感器,并对该桥自然风场特性风振动力响应进行了实测分析。Miyata等^[120]对日本明石海峡大桥上在强台风作用下的功率谱密度和纵向风速波动的空间相关性进行了分析,并对桥面的横向位移响应作了同步实测分析,结果表明:在设计手册中,基于各向同性湍流特性的相干函数比指数方程更能代表实测结果;指数方程的衰减系数随着平均风速的增大而有较弱的增长趋势。Frandsen^[121]对丹麦大贝尔特东悬索桥桥位处自由风场风速、风向、桥面风压及桥面竖向加速度响应进行了同步实测研究,研究结果表明:在风速较小(大约 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),而且风向基本垂直(近乎垂直)于桥的轴向时,桥面发生了侧风涡激振动并最终导致出现锁定现象;前沿桥面的风压更适合来研究涡旋脱落现象;结构的位移幅度能够影响压力-加速度的相关性,而且在锁定现象时,其相关性达到最大。Macdonald^[122]对英国的塞文二桥斜拉桥上风速和加速度响应进行了实测分析,结果表明:实测桥位处脉动风的平均纵向湍流度比设计值低,在全尺测量下几种模态的气动阻尼值与由准定常理论得到的气动阻尼值相差较大。Delong、Zuo等^[123-124]通过对斜拉桥风雨振情形下进行长期观测,并与风振和涡激振动这两种振动情形的分析对比,发现引起风雨振的涡激振动类型的激励与经典 Karman 涡旋脱落不同。

香港青马大桥是国内最早建立完善的风与结构健康监测系统的桥梁,徐幼麟等^[125]基于该桥的监测系统对台风萨姆的风速和桥梁响应进行了实测研究,并将抖振响应结果与理论分析结果进行了比较。Li等^[126]通过一座大跨度双箱梁悬索桥建立风效应监测系统并进行风致振动的全尺测量,获得了双箱梁下表面的风压分布,由脉动风压的功率谱密度函数确定了双箱梁的涡旋脱落频率,而且还记录了 37 次涡激振动现象,通过分析风场特性及涡激振动特性,结果表明:沿桥梁跨度方向的平均风速、湍流度是不同的;在双箱梁下表面前沿附近区域的平均风压系数达到最大值之后迅速减小,脉动风压系数在角部区域产生较大的波动;沿桥跨方向的不均匀风场对全尺测量桥梁的涡激振动有重要影响。刘峰等^[127]对贵州省关岭至兴仁公路盘江大桥桥位处设了风速及风剖面短期测风点获得了短期测风资料,并开展了短期定点风速观测以及峡谷内低空垂直风速观测,通过对实测的资料分析发现:该桥位河谷的“狭管效应”明显;对六次强风过程的分析发现其产生的高频率脉动对低桥位影响不大。李永乐、廖海黎等^[128]基于已有的风速观测记录,对京沪高速铁路南京长江大桥桥址区的风向分布进行了统计分析针对风速观测记录的特点,证明了利用不同高度处月最大风速记录推算地表粗糙度系数的可行性;最后分别根据原始风速观测记录和基本风压分布图推算了该桥的设计基准风速。陈政清等^[129-130]在岳阳湖大桥进行了长期的斜拉索风雨振动现场实测,获得了风速等参数对风雨振的影响规律,风速是拉索风雨振的决定因素之一,拉索的振动存在某一临界风速。李永乐、唐康等^[131]基于深切峡谷桥址区的龙江大桥现场实测风速记录,进行了一系列的研究,研究结果表明,与常规桥梁的单一风速标准不同,山区大跨度桥梁宜采用考虑主梁及各桥塔风特性差异的复合风速标准;气象站与桥址区的风速相关性不显著,相关性分析宜采用比值法。闵志华等^[132]基于东海大桥健康监

测系统得到的斜拉桥在“罗莎”台风下的结构动力响应和环境因素的监测数据,分析了台风的风特征、风振结构振动,结果表明:台风期间随着风速的增加紊流强度降低,且横风向紊流强度的改变要较顺风向紊流强度的变化更加敏感,阵风因子随着风速的增加而降低;随着风速的增大,结构的竖向、横向和扭转加速度是逐渐增大的。李爱群、王浩、谢静、谢以顺等^[133-138]基于润扬悬索桥结构健康监测系统,对台风“麦莎”、“韦帕”、“卡努”以及冬季的强北风进行了风特性实测和风振响应同步观测,通过实测风速风向的数据主要探讨了桥址区的强风特性分析、主梁和缆索振动响应特性分析以及振动与风速的关系,通过实测发现:风速沿垂直高度的分布服从幂指数律,紊流强度较高,紊流强度和阵风因子之间存在相关性;随着风速的增大,主梁横向、竖向和扭转横向均方根响应总体上均有增大趋势,主缆横向、竖向加速度均方根响应也呈现出随着风速增大而增大的趋势,且两岸边缆振动响应与风速之间的关系表现得比跨中主缆更为明显,同一截面上下游缆索加速度响应值相差很小,跨中主缆的横向振动响应比两岸边缆的大;实测风水平紊流功率谱密度函数 Kaimal 谱吻合得不太理想,低频段偏低,高频段偏高。李杏平等^[139]通过对苏通长江大桥桥位处进行了为期一年多的风特性数据现场实测,通过对实测数据的分析发现:湍流强度随风速的增大而增大;湍流积分尺度与风速之间存在较好地相关性,表现为湍流积分尺度随风速的增大而近似线性增大;实测冬季强北风和夏季台风的顺风向紊流功率谱函数均在低频部分与 Kaimal 谱吻合性较好,而在高频部分较 Kaimal 谱偏高。赖马树金^[140]借助于某斜拉桥结构健康监测系统获得的风速和加速度信号,分析了某斜拉桥风场特性和风致振动现象,通过安装在两个截面上游 7 米处风速仪记录的风速数据,分析了两个截面上来流自由风场的平均风速和平均风向角、湍流度、脉动风功率谱密度函数以及湍流积分尺度,并对两个截面自由风场特性进行了比较分析以及空间相关性分析,同时也对比了有车和无车条件下结构加速度响应与平均风速的变化关系,结果发现:测定时间段内桥上的风速较不平稳,湍流度较小;表明当来流自由风经过桥面后,平均风速减小了,但湍流度急剧增加,随着来流平均风速的增加,尾流脉动风的幅值也增加,且近似呈线性关系;在时频域内,脉动风的能量分布具有自相似特性;随着平均风速的增加,有车、无车时竖向加速度均方值都呈增加趋势,但有车时,加速度幅值较大且增加明显,对于侧向加速度而言,随着风速的增加,加速度幅值也增加且有车、无车时增长趋势基本相同;随着风速的增加,结构频率受风速的影响较小,基本稳定在一个值;竖向和侧向总阻尼比都随平均风速的增加而增加,且趋势明显。喻梅等^[141]利用现场实测和风洞试验进行了斜风作用下西堠门大桥的抖振响应研究,研究结果表明:通过加速度响应与平均风速相关性分析可知,随着平均风速的增大,主梁横向和竖向加速度均方根值增大,扭转加速度均方根与平均风速相关性略小。王浩等^[142-143]以苏通大桥为对象,利用结构健康监测系统进行了风速风向联合分布研究、台风“海葵”全过程桥位处的风速实测研究和风振抖振响应的实测研究,研究结果表明:苏通大桥上的风特性监测数据合理可靠、桥址区极值风速分布概型接近 Weibull 分布,考虑风向影响的极值风速总体上比不考虑风向影响时的结果要小;该桥斜拉索和主梁的抖振加速度均方根值总体上随风速的增大而增大^[144];就本次实测而言,该桥主梁和斜拉索的抖振加速度响应在风速大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时陡然增大,值得引起注意;迎风侧斜拉索的尾流作用对背风侧斜拉索处的风环境存在一定程度的影响。

由于大跨度桥梁风场理论分析和现场实测研究工作的复杂性,关于桥梁风速风压的实测研究还不够系统深入,有待于对桥梁的健康监测系统进一步的完善使其发挥最大功用。

2 总结

目前国际上常用的水平和竖向脉动风速功率谱值(Simiu 谱、Von-Karman 谱和 Davenport 谱等)在某些重要频段内相差很大,甚至以倍计。直接采用标准谱描述台风影响区的脉动风速谱是不太恰当,需要谨慎对待。通过对现场实测数据分析拟合的风速功率谱表达式优于常见的 4 种标准谱,因此有必要针对特定的地区和高度进行实测功率谱密度函数进行修正。但是现有的实测数据不足以归纳出可以替代标准谱的相应

参数,需要获取更多的实测数据。

湍流度和湍流积分尺度实测的结果与多国国际规范规定的取值存在一定差异,脉动风速竖向相干函数指数衰减系数与国际上惯用的建议值有明显差异,说明对于平均风速和脉动风速的认识还远远不够。有学者通过改变平均时距,发现采用新的平均时距比通用的 10 min 平均时距能够更好地反映风场特性,因此如何确定一个合理的平均时距能够较好反映风速风压特性和风速谱模型,尚需进行大量的实测分析研究和积累。

国内外学者对低矮房屋风速风压的现场实测研究取得了有意义的成果,但是在台风作用下的低矮房屋风速风压的实测研究仍然开展的比较少。由于每次台风的风特性各不相同,所以风荷载以及低矮房屋表面风压的实测过程存在难以预料和不确定的因素;如何确定在增设建筑构造措施条件下合理峰值负压以及峰值负压产生的机理问题可为低矮房屋的抗风设计提供科学依据;未考虑竖向风攻角和竖向脉动风速的变化,关于屋面角部区域现行规范的计算方法相对低估其脉动风荷载,因此有必要展开更多的实测研究,把竖向风攻角和竖向脉动风速考虑进去。把上述因素考虑进去进行实测研究,才能建立有效适合低矮房屋抗风研究的实测数据库。

随着我国沿海地区高层建筑的高度不断攀升,200~500 m 的超高层将不断涌现,但是我国现行的建筑结构荷载规范对于高度大于 200 m 的高空脉动风特性还没有规定,因此有必要对高度大于 200 m 展开高空强(台)风环境参数的现场实测和研究工作。另外对高层建筑表面脉动风压分布特征数据的实测研究还不是很多,因此对数据的准确性、可靠性还需更多的实测研究加以充实和完善,同时高层建筑群楼间干扰效应会对建筑物表面的风压产生影响,因此有必要对这方面进行实测研究。

不同地形、不同高度、不同的风环境造成实测数据具有一定的差异,因此只针对某些特定的高度、风速和风环境范围内的实测数据分析出来的结论不一定具有普遍性,还需要进一步的研究探讨,而且强/台风特性的实测资料还明显欠缺,因此有必要展开大量的实测来得到普适性的结论。

由于对大跨空间结构和桥梁进行现场实测的费用和难度较大,国内外关于空间结构风速风压的现场实测极少,有待于展开大量的实测研究工作。关于桥梁风速风压的实测研究还不够系统深入,有待于对桥梁的健康监测系统进一步的完善使其发挥最大功用。

实测过程中的仪器的选择对实测结果也有很大的影响,现行的仪器可能会使实测的结果不够准确,随着科学技术的进步,满足实测风速风压的智能仪器也会得到发展,数据采集的准确性能够得到保证,为风工程数据资料库的完善提供一个保证。鉴于有些实测的难度较大,可以根据某些相关关系或守恒特性建立区域内其他位置与已有风速风压资料观测点间的联系,从而估计其它位置处的局部风特性,因此在进行实测的同时,相应的关于预测方面的理论知识也应该进一步的发展。

参考文献:

- [1] 顾明,周印,张锋,等. 用高频动态天平方法研究金茂大厦的动力风荷载和风振响应[J]. 建筑结构学报, 2008, 21(4): 55-61.
- [2] SAMALI B, KWOK C S, WOOD G S, et al. Wind tunnel tests for wind excited benchmark buildings [J]. J Eng Mech ASCE, 2004, 130(3): 447-450.
- [3] 顾明. 土木结构抗风研究进展及基础科学问题[C]//第七届全国风工程和工业空气动力学学术会议, 成都, 2006: 67-83.
- [4] ANDERSEN O J, LOVSETH J. Gale force maritime wind. The Froya data base. Part I: Sites and instrumentation, Review of the database [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57(1): 97-109.
- [5] SPARKS P R, REID G T, REID W D, et al. Wind conditions in hurricane Hugo by measurement, inference, and experience[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1/3): 55-66.
- [6] HARETVEIT K. Full scale and turbulence intensity measurements of gust factors and their relations in hilly terrain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1996, 61 (2/3): 195-205.
- [7] SHARMA R N, RICHARDS P J. A re-examination of the characteristic of tropical cyclone winds[J]. Journal of Wind Engineering

- and Industrial Aerodynamic, 1999, 83(1/3):21-33.
- [8] KATO N, OHUKUMA T, KIM J R, et al. Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1/3): 67-78.
- [9] JOHN Z YIM, CHOU C R. A study of the characteristic structures of strong wind[J]. Atmospheric Research, 2001, 57(3):151-170.
- [10] TIELEMAN H W. Strong wind observation in the atmospheric surface layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(1): 41-77.
- [11] CAO SHUYANG, TAMURA YUKIO, NAOSHIKIKUCHI, et al. Wind characteristics of a strong typhoon[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(1): 11-21.
- [12] TAMURA Y, IWATANI Y, HIBI K, et al. Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2007, 95 (6):411-427.
- [13] XU Y L, ZHAN S. Field measurements of Di Wang tower during typhoon York [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2001, 89(1):73-93.
- [14] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind turbulence characteristic study at the Stonecutters Bridge site: part I: mean wind and turbulence intensities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2009, 97(1):22-36.
- [15] HUI M C H, LARSEN A, XIANG H F. Wind turbulence characteristic study at the Stonecutters Bridge site: part II: wind power spectral integral length scales and coherences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2009, 97(1): 48-59.
- [16] FU J Y, LI Q S, WU J R, et al. Field measurements of boundary layer wind characteristics and wind-induced responses of super-tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8/9): 1332-1358.
- [17] SHIAU B S, CHEN Y B. In situ measurement of strong wind velocity spectra and wind characteristic at Keelung coastal area of Taiwan[J]. Atmospheric Research, 2001, 57 (3):171-185.
- [18] SHIAU B S, CHEN Y B. Observation on wind characteristic and velocity spectra near the ground at the coastal region[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12-15):1671-1681.
- [19] 覃军, 袁业畅, 李燕, 等. 山区复杂地形条件下的风场分析[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(4):493-497.
- [20] 庞加斌, 林志兴, 葛耀君. 浦东地区近地强风特性观测研究[J]. 流体力学试验与测量, 2002, 16(3):32-39.
- [21] 李秋胜, 戴益民, 李正农, 等. 强台风“黑格比”登陆过程中近地风场特性[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4):54-61.
- [22] 陈凯, 余永生, 贾丛贤. 傍山地区的强风场特性实测研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(3):18-22.
- [23] 王桂玲, 蒋维楫. 复杂地形上的低层风场特征[J]. 解放军理工大学学报, 2006, 7(5):1491-495.
- [24] 肖仪清, 孙建超, 李秋胜. 台风湍流积分尺度与脉动风速谱—基于实测数据的分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5):45-53.
- [25] 黄世成, 周嘉陵, 王咏青, 等. 两次台风过程近地层湍流度和阵风因子分析[J]. 气象科学, 2009, 29(4):454-460.
- [26] 胡尚瑜, 宋丽莉, 李秋胜. 近地边界层台风观测及湍流特征分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(4):1-8.
- [27] 陈丽, 李秋胜, 吴玖荣, 等. 中信广场风场特性及风振结构振动的同步监测[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3):169-174.
- [28] 徐安, 傅继阳, 赵若红, 等. 中信广场风场特性与结构响应实测研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1):115-119.
- [29] 李正农, 宋克, 李秋胜, 等. 广州中信广场台风特性与结构响应的相关性分析[J]. 实验流体力学, 2009, 23(4):21-27.
- [30] 胡尚瑜, 李秋胜, 李正农, 等. 不同平均时距下近地台风实测风特性研究[C] // 第十三届全国结构工程风工程学术会议论文集, 大连, 2007, 31-35.
- [31] 肖仪清, 李利孝, 吴志学, 等. 基于近地观测的脉动风速谱研究[C] // 第十三届全国结构工程风工程学术会议论文集, 2007: 19-25.
- [32] 李秋胜, 马存明, 张双喜, 等. 沿海城市中心风场特性及香港国际金融中心风振振动现场实测[C] // 第十三届全国结构工程学术会议论文集, 大连, 2007:208-215.
- [33] 宋丽莉, 吴战平, 秦鹏, 等. 复杂山地近地层强风特性分析[J]. 气象学报, 2009, 67(3):452-460.
- [34] 张朝能, 宁平, 沈武艳, 等. 高原山区城市流场观测研究[J]. 昆明理工大学学报, 2008, 33(4):77-80.
- [35] 方平治, 赵兵科, 邵德民, 等. “圣帕”台风登陆前后的近地风场特征[C] // 烟台, 第十四届全国结构工程学术会议论文集, 2009:57-62.
- [36] 邵伦海, 李秋胜, 胡非. 城市地区近地强风特性实测研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(2): 8-12.
- [37] 史文海, 李正农, 张传雄. 温州地区近地强风特性实测研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10):34-40.
- [38] 苏志, 张瑞波, 周绍毅, 等. 北部湾沿海基本风压和阵风风压分析[J]. 热带地理, 2010, 30(2):141-144.

- [39] 徐安,傅继阳,赵若红,等. 土木工程相关的台风近地风场实测研究[J]. 空气动力学报, 2010,28(1):23-30.
- [40] 胡尚瑜,李秋胜. 低矮房屋风荷载实测研究(I)—登陆台风近地边界层风特性[J]. 土木工程学报, 2012,45(2):77-84.
- [41] 王旭,黄鹏,顾明. 基于台风“梅花”的近地层湍流积分尺度实测分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010,40(10):1491-1497.
- [42] 王旭,黄鹏,顾明. 台风“梅花”影响下近地风脉动特性[J]. 土木工程学报, 2013,46(2):54-61.
- [43] 李正农,吴卫祥,王志峰. 北京郊外地面风场特性实测研究[J]. 建筑结构学报, 2013,34(9):82-90.
- [44] 史文海,李正农,吴建佳. 近地面强风不同间隔滑动平均统计特性的对比分析[J]. 空气动力学报, 2013,31(5):611-622.
- [45] 史文海,李正农,张传雄. 温州不同时距下近地台风特性观测研究[J]. 空气动力学报, 2011,29(2):211-216.
- [46] 史文海,李正农,秦良忠,等. 近地面与超高空台风风场不同时距湍流特性对比分析[J]. 建筑结构学报, 2012,33(11):18-26.
- [47] 李秋胜,郅伦海,胡非. 沙尘暴天气下城市中心边界层风剖面观测及分析[J]. 土木工程学报, 2009,42(12):83-90.
- [48] 龙水,李秋胜,王云杰. 强台风“尤特”近地风特性实测分析[J]. 自然灾害学报, 2014,23(6):70-78.
- [49] 陈伏彬,李秋胜,胡尚瑜,等. 开阔地貌台风风场现场实测与风洞试验应用研究[J]. 建筑结构, 2015,45(2):89-94.
- [50] SPARKS P R, SCHI S D, REINHOLD T. A. wind damage to envelopes of houses and consequent insurance losses[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994(53):45-155.
- [51] EATON K J, MAYNE J R. The measurement of wind pressures on two storey houses at Aylesbury[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1975,1(1):67-109.
- [52] APPERLEY L, SURRY D, STATHOPOULOS T, et al. Comparative measurements of wind pressure on a model of the full-scale experimental house at Aylesbury [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1979,4(3/4): 207-228.
- [53] SILL B L, COOK N J, FANG C. The Aylesbury comparative experiment: a final report [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1992,43(1/3):1553-564.
- [54] RICHARDSON G M, ROBERTSON A P, Hoxey R P, et al. Full-scale and model investigations of pressures on an industrial/agricultural building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990,36(Part 2):1053-1062.
- [55] RICHARDSON G M, SURRY D. The Silsoe building: a comparison of pressure coefficients and spectra at model and full-scale [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992,43(1/3):1653-1664.
- [56] DALLEY S. Surface pressure spectra on a model of the Silsoe structures building and comparison with full-scale [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996,60(4):177-187.
- [57] LEVITAN M L, MEHTA K C, VANN W P, et al. Field measurements of pressures on the Texas Tech building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991,38(2/3):227-234.
- [58] MEHTA K C, LEVITAN M L, IVERSON R E, et al. Roof corner pressures measured in the field on a low building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992,42(1/3):181-192.
- [59] LEVITAN M L, MEHTA K C. Texas Tech field experiments for wind loads: Part I .Building and pressure measuring system [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992,43(1/3):1565-1576.
- [60] LEVITAN M L, MEHTA K C. Texas Tech field experiments for wind loads:Part II ;Meteorological instrumentation and terrain parameters [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992,43(1/3):1577-1588.
- [61] YEATTS B B, MEHTA K C, SMITH D A. Field experiments for wind effects on low buildings[C]//Proceedings of the ninth International Conference on Wind Engineering. New Delhi: Wiley Eastern Ltd, 1995.
- [62] BANKS D, MERONEY R N, SARKAR P P, et al. Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000,84(1):65-85.
- [63] WU F, SHARKAR P P, MEHTA K C, et al. Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001,89(5):403-420.
- [64] RICHARDS P J, HOXEY R P. Wind pressures on the roof of a 6m cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007,10(12):1-10.
- [65] RICHARDS P J, HOXEY R P. Wind loads on the roof of a 6m cube [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/7):984-993.
- [66] PORTERFIELD M L, JONES N P. The development of a field measurement instrumentation system for low-rise construction[J]. Wind & Structions, 2001,4(3):247-260.
- [67] CARACOGLIA L, JONES N P. Analysis of full-scale wind and pressure measurements on a low-rise building [J]. Journal of

- Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 2009, 97 (5):157-173.
- [68] APONTE-BERMEDEZ L D. Measured hurricane wind pressure on full-scale residential structures: analysis and comparison to wind tunnel studies and ASCE-7[D]. Gainesville: University of Florida, 2006.
- [69] LIU Z, PREVATT D O, APONTE-BERMEDEZ L D, et al. Field measurement and wind tunnel simulation of hurricane wind loads on a single family dwelling [J]. Engineering Structures, 2009, 31(10):2265-2274.
- [70] 李秋胜, 戴益民, 李正农. 可移动式低矮房屋风压的实测研究[C]//第十三届全国结构风工程学术会议论文集, 大连, 2007: 868-874.
- [71] 李秋胜, 胡尚瑜, 黄建平, 等. 双坡屋面低矮房屋风荷载实测研究[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集, 烟台, 2009: 743-748.
- [72] 李秋胜, 胡尚瑜, 戴益民. 低矮房屋屋面实测峰值风压分析[J]. 湖南大学学报, 自然科学报, 2010, 37(6): 11-16.
- [73] 李秋胜, 戴益民, 李正农. 强台风“黑格比”作用下低矮房屋风压特性[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 62-68.
- [74] 李秋胜, 戴益民, 李正农. 低矮房屋风荷载实测研究(II)—双坡屋面风压特征分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 1-8.
- [75] LI Q S, HU S Y, DAI Y M, et al. Field measurements of extreme pressures on a flat roof of a low-rise building during typhoons [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 111(1): 14-29.
- [76] 戴益民, 李秋胜, 李正农. 低矮房屋屋面风压特性的实测研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 9-13.
- [77] 戴益民, 李秋胜, 李正农. 低矮房屋屋面风压的实测及分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(7): 88-96.
- [78] 戴益民, 李秋胜, 李正农. 低矮房屋的风载特性—近地风剖面变化规律的研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 42-48.
- [79] 戴益民, 李秋胜, 李正农. 低矮房屋风荷载的实测及风洞试验研究[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集, 烟台, 2009: 743-742.
- [80] 戴益民, 李秋胜. 低矮房屋迎风屋面局部风压特性研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 103-109.
- [81] 胡尚瑜, 李秋胜, 黄建平, 等. 台风作用下低矮房屋屋面角部峰值压力实测研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 15-24.
- [82] 胡尚瑜, 李秋胜, 戴益民, 等. 近地台风风场特性及低矮房屋风荷载现场实测研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 30-38.
- [83] 王旭, 黄鹏, 顾明. 海边坡角可调试验房风荷载现场实测研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 176-182.
- [84] ELLIS B R. Full-scale measurements of the dynamic characteristics of buildings in the UK[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 59(2/3): 365-382.
- [85] KATO N, NIIHORI Y, KURITA T, ET AL. Full-scale measurement of wind-induced internal pressures in a high-rise building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69-71: 619-630.
- [86] JUN. KANDA, TAKESHI OHKUMA. Recent developments in full-scale wind pressure measurements in Japan[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 33(1/3): 243-252.
- [87] HARIKRISHNA P, SHANMUGASUNDARAM J, GOMATHINAYAGAMA S, ET AL. Analytical and experimental studies on the gust response of a 52 m tall step lattice tower under wind loading [J]. Computers and Structures, 1999, 70(2): 149-160.
- [88] GLANVILLE M J, KWOK K C K. Dynamic characteristics and wind induced response of a steel frame work[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995(54/55): 133-149.
- [89] MOMOMURA Y, MARUKAWA H, OKAMURA T, ET AL. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997(72): 241-252.
- [90] SATOSHI S, MASAYASE S, HISASHI M. Full scale measurements of wind force acting on a 200m concrete chimney and the chimney's response[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41-44(1/3): 2165-2176.
- [91] RUSCHEWEYH H, GALEMANN T. Full-scale measurements of wind-induced oscillations of chimneys[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 65(1/3): 55-62.
- [92] 孙天风, 周良茂. 无肋双曲线型冷却塔风压分布的全尺寸测量和风洞研究[J]. 空气动力学学报, 1983, 12 (4): 68-76.
- [93] 周良茂, 李培华. 两个邻近全尺寸双曲冷却塔风压分布的测量[J]. 气动实验与测量制, 1992, 6(3): 37-44.
- [94] 周文超, 黄鹏, 顾明. 台风作用下格构式塔架风振响应研究[J]. 建筑结构, 2014(44): 759-763.
- [95] 申建红, 李春祥. 强风作用下超高层建筑风场特性的实测研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 62-68.
- [96] LI Q S, YANG K, WONG C K, ET AL. The effect of amplitude-dependent damping on wind-induced vibrations of a super tall building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(9): 1175-1198.
- [97] LI Q S, WU J R, LIANG S G, ET AL. Full scale measurements and numerical evaluation of wind-induced vibration of a 63-

- storey reinforced concrete tall building [J]. Engineering Structures, 2004, 26(12): 1779–1794.
- [98] LI Q S, XIAO Y Q, WONG C K, ET AL. Field measurements of typhoon effects on a super tall building [J]. Engineering Structures, 2004, 26(2): 233–244.
- [99] LI Q S, XIAO Y Q, WONG C K. Full-scale monitoring of typhoon effects on super tall buildings [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(5): 697–717.
- [100] LI Q S, FU J Y, XIAO Y Q, ET AL. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China's tallest building [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 1745–1758.
- [101] LI Q S, WU J R. Time-frequency analysis of typhoon effects on a 79-story tall building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(12): 1648–1666.
- [102] LI Q S, XIAO Y Q, FU J Y, ET AL. Full-scale measurements of wind effects on the Jin Mao building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(6): 445–466.
- [103] LI Q S, XIAO Y Q, WU J R. Typhoon effects on super-tall building [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 313(3/5): 581–602.
- [104] 李秋胜, 赵林, 朱乐东. 台风 101 大楼风振响应实测及分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(3): 24–31.
- [105] FU J R, WU J R, XU A, ET AL. Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower [J]. Engineering Structures, 2012, 35: 120–139.
- [106] WU J R, LIU P F, LI Q S. Effects of amplitude-dependent damping and time constant on wind-induced responses of super tall building[J]. Computers and Structures, 2007, 85(15/16): 1165–1176.
- [107] 武占科, 赵林, 朱乐东. 上海环球金融中心工地场地良态风环境特性观测分析[J]. 结构工程师, 2009, 25(2): 98–103.
- [108] 武占科, 赵林, 朱乐东. “罗莎”(0716)台风高空实测脉动风特性分析[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(3): 291–296.
- [109] 顾明, 匡军, 全涌, 等. 上海环球金融中心大楼顶部风速实测数据分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 114–122.
- [110] 史文海, 李正农, 罗叠峰, 等. 台风“鲇鱼”作用下厦门沿海某超高层建筑的风场风压特性实测研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(1): 1–9.
- [111] 马春艳, 苏波, 徐小兵, 等. 大跨结构风场特性现场实测的研究综述[J]. 钢结构, 2012(5): 152–158.
- [112] YOSHIDA M, KONDO K, SUZUKI M. Fluctuating wind pressure measured with tubing system [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990(36): 351–360.
- [113] APPERLEY L W, PIRSIS N G. Model/full-scale pressure measurements on a grandstand [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986(23): 199–259.
- [114] PIRSIS N G, APPERLEY L W. Further full-scale and model pressure measurements on a cantilever grandstand [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1991, 38(2/3): 439–448.
- [115] 陈伏彬, 李秋胜, 李正农, 等. 广州国际会展中心钢屋盖现场实测研究[C]//第十三届全国结构风工程学术会议论文集, 大连, 2007: 404–409.
- [116] 傅继阳, 赵若红, 徐安, 等. 大跨屋盖结构风效应的风洞试验与原型实测研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(9): 12–18.
- [117] 张志宏, 刘中华, 董石麟. 强/台风作用下大跨空间索桁体系现场风压风振实测研究[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2013, 42(5): 546–550.
- [118] DELAUNAY D, GRILLAUD G. Field measurements of the wind-induced response of a cable stayed bridge: Validation of provisional studies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(74/76): 883–890.
- [119] BIETRY J, DELAUNAY D, CONTI E. Comparison of full-scale measurement and computation of wind effects on a cable-stayed bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 57(2/3): 225–235.
- [120] MIYATA T, YAMADA H, KATSUCHI H, ET AL. Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(11/15): 1517–1527.
- [121] FRANDRSEN J B. Simultaneous pressures and accelerations measured full-scale on the Great Belt East suspension bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(1): 95–129.
- [122] MACDONALD JOHN H G. Evaluation of buffeting predictions of a cable-stayed bridge from full-scale measurements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(12/15): 1465–1483.
- [123] ZUO DELONG, JONES NICHOLAS P. Interpretation of field observations of wind- and rain-wind-induced stay cable vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(2): 73–87.

- [124] ZUO D, JONES N P, MAIN J A. Field observation of vortex- and rain-wind-induced stay-cable vibrations in a three-dimensional environment[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/7): 1124-1133.
- [125] XU Y L, ZHU L D. Buffeting response of long-span cable-supported bridges under skew winds. Part 2: case study [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 281(2/5): 675-697.
- [126] LI HUI, LAIMA SHUJIN, ZHANG QIANGQIANG, ET AL. Field monitoring and validation of vortex-induced vibrations of a long-span suspension bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014(124): 54-67.
- [127] 刘峰, 许德德, 陈正洪. 北盘江大桥设计风速及脉动风频率的确定[J]. 中国港湾建设, 2002: 23-27.
- [128] 李永乐, 廖海黎, 强士中. 京沪高速铁路南京长江大桥桥址区风特性研究[J]. 桥梁建设, 2002: 5-7.
- [129] 陈政清, 柳成荫, 倪一清. 洞庭湖大桥拉索风雨振中的风场参数[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 52-57.
- [130] 陈政清. 斜拉索风雨振现场观测与振动控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 5-10.
- [131] 李永乐, 唐康, 蔡宪棠. 山区大跨度桥梁复合风速标准研究[C]. 第十四届全国结构风工程学术会议论文集, 2009.
- [132] 闵志华, 孙利民, 淡丹辉. 台风下斜拉桥风振振动和动力特性分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 1139-1173.
- [133] 李爱群, 王浩, 谢以顺. 基于 SHMS 的润扬悬索桥桥址区强风特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(3): 508-511.
- [134] 王浩, 李爱群, 谢以顺. 台风“麦莎”作用下润扬悬索桥抖振响应实测研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(3): 706-712.
- [135] 王浩, 李爱群, 黄瑞新, 等. 润扬悬索桥桥址区韦帕台风特性现场实测研究[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 128-133.
- [136] 王浩, 李爱群, 谢静, 等. 基于斜风分解的台风韦帕作用下润扬悬索桥抖振响应现场实测研究[J]. 振动工程学报, 2009, 22(4): 430-437.
- [137] 谢静, 李爱群, 王浩. 基于 SHMS 的润扬悬索桥桥址区北风特性的研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(2): 213-218.
- [138] 谢以顺, 李爱群, 王浩. 润扬悬索桥桥址区实测强风特性的对比研究[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(1): 47-51.
- [139] 李杏平, 李爱群, 王浩, 等. 基于长期监测数据的苏通大桥桥址区风特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 82-85.
- [140] 赖马树金. 基于现场监测技术的某斜拉桥风场特性及风效应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2009.
- [141] 喻梅, 廖海黎, 谢静, 等. 大跨度桥梁斜风作用下抖振响应实测及风洞试验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 27(3): 51-56.
- [142] 王浩, 王龙花, 樊星辰, 等. 基于健康监测的苏通大桥风速风向联合分布研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(5): 55-61.
- [143] 王浩, 程怀宇, 李爱群, 等. 台风“海葵”作用下苏通大桥抖振全过程实测研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(4): 15-21.
- [144] 王浩, 李爱群, 谢静, 等. 台风作用下超大跨度斜拉桥抖振响应现场实测研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 71-78.

Research on Field Measurement of Wind Velocity and Wind Pressure

Pan Jihong

(1 Electromechanical Installation Co., LTD. of CTCE Group, Nanchang 330200, China)

Abstract: Field measurement data as the most direct information for providing insight into wind load effects, can be regarded as the most authoritative reference for modifying the existing experimental methods and theoretical models. The research on field measurement of wind velocity and wind pressure has the vital significance for studying wind-resistance of civil engineering structures. This paper firstly summarizes researches on the field measurement of wind velocity and wind pressure for the surface boundary layer, low building, tall (super-tall) building, great span spatial structure and bridge both at home and abroad, then provides some prospects for advances on field measurement wind velocity and wind pressure.

Key words: field measurement; wind velocity; wind pressure; advances

(责任编辑 王建华)