

# 强/台风作用下大跨空间索桁体系现场 风压风振实测研究

张志宏<sup>1\*</sup>, 刘中华<sup>2</sup>, 董石麟<sup>3</sup>

(1. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 200233; 2. 浙江精工钢结构有限公司, 浙江 绍兴 312030;  
3. 浙江大学 土木工程学院, 杭州 玉泉 310027)

**摘要:** 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, 建筑工程学院针对强/台风多发地区实际、典型大跨空间索桁体系—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。一方面, 这是研究大跨柔性体系强/台风作用下的风荷载特性、风致效应及机理最为直接和有效的手段, 测试数据最具有科学研究和实际应用价值。另一方面, 亦是深入研究其在强/台风作用下结构抗风设计实用方法的基础。若能取得创新性成果, 可显著提升我国大跨预应力柔性体系的抗风设计研究水平。

**关键词:** 空间索桁体系; 现场实测; 风荷载; 风致效应

**中图分类号:** TU 352.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-5137(2013)05-0546-05

我国是世界上少数几个风灾影响严重的国家之一, 紧邻西北太平洋的我国东南沿海地区(如温州地区乐清市), 更是热带气旋影响的重灾区, 每年都要受到1~2次影响。热带气旋给人民的生命财产安全带来了严重威胁, 如2004年14号强台风“云娜”正面袭击乐清市, 中心最大风速达58.7 m/s, 在乐清上空停留长达12 h, 3210间民房和厂房等大量低矮建筑倒塌, 全市直接经济损失近18亿元。

然而, 近年来大跨柔性空间索桁体系(多用于体育场罩棚结构、通常采用PTFE/PVC膜材围护)应用于我国东南沿海地区大型体育、公共建筑已比较多见, 建筑高度一般在20~40 m左右, 属于广泛意义上的近地低矮建筑范畴。如已建成的深圳宝安“竹林”体育场, 佛山“世纪莲”体育场和在建的乐清“弯月”体育场等, 环索初始设计预应力均在 $2 \times 10^7$  N以上。由于对强/台作用下大跨柔性体系非线性风致效应机理认识不足及其抗风设计理论和实用方法的欠缺, 台风区大跨柔性体系的抗风安全性极易成为工程设计的薄弱环节。具体体现在如下几个方面:

(1) 我国建筑结构荷载规范均基于良态气候, 较适用于不易受台风影响的内陆地区。然而, 我国东南沿海地区最大风速大多由非良态气候的台风引起, 台风下近地风场特性如平均风速剖面、湍流强度剖面、功率谱和风速风向风压的非平稳特性等<sup>[1-2]</sup>与良态气候下有较大的差异。

(2) 大跨索膜结构往往具有复杂的气动外形, 我国建筑结构荷载规范要求通过刚性模型测压风洞试验确定其风压体型系数, 沿用风振系数或等效静力风荷载等高层、高耸结构(竖向一维尺度占优)的抗风设计、计算方法, 忽视了大跨空间结构(平面占优或三维尺度接近)的动力特性(如多模态耦合、多

收稿日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278297); 上海师范大学结构工程重点学科建设项目; 上海市085内涵建设项目

作者简介: 张志宏(1974-), 男, 博士, 上海师范大学建筑工程学院副教授; 刘中华(1976-), 男, 高级工程师, 浙江精工钢结构有限公司总工程师。

振型参与和动力失稳等)和近地风场绕流特征.此外,风洞试验亦较难准确模拟强/台风下大气边界层近地风场特性如湍流特征尺度、湍流强度、雷诺数、建筑风环境和竖向风等.大跨柔性体系尚存在非线性动力特性明显和风与结构的流固耦合效应等<sup>[3-5]</sup>.

(3) 大跨柔性索膜结构如空间索桁体系、索穹顶结构等,具有结构自重轻、柔度大、自振频率低且分布密集和阻尼小等结构特点.特别是在强/台风多发区如我国东南沿海地区,风荷载可达结构自重的10倍或以上,是结构设计的主要控制荷载.

(4) 对于钢筋混凝土薄壳和钢网壳等大跨刚性体系,其形状设计主要涉及重力荷载下结构几何形状优化<sup>[6]</sup>而较少考虑风荷载及风致效应的影响<sup>[7]</sup>.然而,对大跨空间索桁体系而言,设计合理的索系空间曲线形状及承风膜曲面形状可大大提高其抗风安全性,降低体系的设计初始预应力水平和工程造价.

## 1 现场实测研究现状

目前,结构抗风方面的研究逐渐形成了以现场实测、风洞实验和数值模拟等研究手段相结合的综合方法.现场实测相当于足尺气弹模型自然风场试验,可以避免缩尺气弹模型物理风洞实验的相似比畸变效应,对强/台风下大跨预内力柔性体系的风荷载和风致效应机理研究不可或缺.然而,现场实测亦存在来流风向风速不稳定、周期长、费用高和工程地点不易选择等问题.此外,风荷载计算流体力学(CFD)数值模拟可以与现场实测和风洞实验对比研究,其突出的优点是快速、无硬性成本和可视化流场演化特征等,且已有大型商业软件如ADINA和ANSYS13.0等可用.

国外学者主要对一般高度意义上的低矮房屋(高度小于24米,或七层以下房屋)非台风情况下的表面风压特性和近地风场特性进行现场实测研究,如英国Aylesbury实验楼、西尔斯试验楼,美国德克萨斯理工大学试验楼(TTU Building)等.大跨空间结构的现场实测较少,仅Appedey和Pitsis等<sup>[8-9]</sup>对悉尼Belmore与Caltex体育场悬挑屋盖进行了小规模风压实测.近年来,我国现场风压实测方面的研究也正逐步展开,成效显著.例如李秋胜、胡尚瑜等<sup>[10-11]</sup>在广东某海岸建造了一个可移动式的原型实测房(追风房),对比同体型比低矮房屋的风洞试验数据,分析并总结了不同风场环境下的屋面风压及体型系数的分布规律;朱丙虎、张其林等<sup>[12]</sup>对世博轴索膜结构表面风压进行了现场实测;黄鹏、顾明等<sup>[13]</sup>在浦东机场建造了一栋坡角可调的低矮房屋及测风塔,对东海边附近的风场特性及低矮建筑屋盖表面风压特性如非高斯分布偏度和峰度进行了研究(TJU Building).

上述开拓性研究表明,选取我国东南沿海地区典型大跨索膜结构—乐清“弯月”体育场(图1.2),进行现场风压风振实测,获得足尺结构在真实建筑风环境下的风荷载和风致效应,是研究大跨柔性体系强/台风致效应机理最为直接和有效的手段,测试数据也最具有科学研究和实际应用价值.



图1 乐清体育中心一场两馆效果图

## 2 测点布置

乐清“弯月”体育场现场已安装索力、钢结构应力应变、表面温度、加速度及风速风向(R. M.



图2 体育场施工进度

Young81000 型超声波和 R. M. Young 05305V 型机械式风速仪安装于角柱顶面) 等结构健康监测子系统. 在上海师范大学结构工程重点学科建设项目、上海市 085 内涵建设项目和浙江精工钢结构有限公司、乐清市中心区开发建设管理委员会等多方、多项经费支持下, 本文作者于 2012 年 12 月 25 日已启动乐清体育中心体育场膜表面整体风压实测研究. 预计将于 2013 年 4 月中旬开始安装、调试, 实测强/台风作用下风速、风向和风压数据将面向全世界公开. 该体育场主受力索系共有 38 榀索桁架, 其中角部各有 3 榀未铺设膜材围护. 依据刚性模型测压风洞实验结果和流场分离、演化一般规律, 膜表面风压测点布置如图 3、4 所示. 其中每个测点上下各安装一个风压传感器, 同步测量上下表面风压时程.

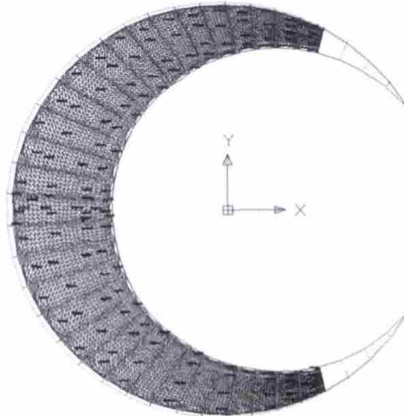


图3 风压测点布置平面图

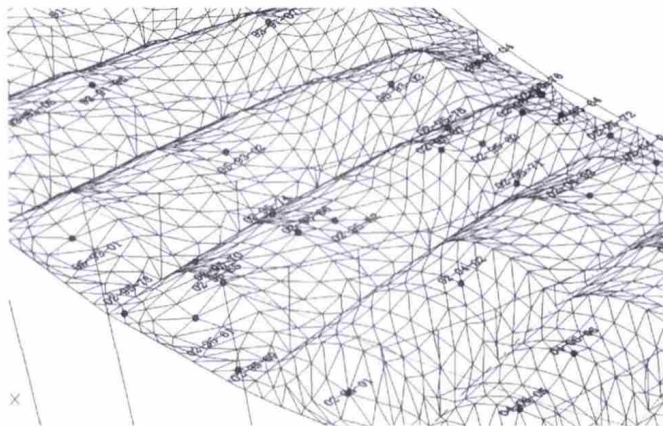


图4 风压测点三维布置示意图(初步方案)

### 3 测试系统设计

测试系统如表1所示.具体采样系统技术要求:系统须保证256通道不低于100Hz风压数据同步、长期(>1年)稳定采集.预留模块升级接口,增加该模块后可实现系统无人值守,无线远程控制,人工智能自我故障诊断,远程自动报警等功能.具体技术要求如下:(1)自动采集和记录传感器实际测量值;(2)采集时间间隔,根据需要自行设置;每通道最大采样数据不小于3K;(3)通道数:256路;(4)根据传感器数量,设置通道数,设置相应测试时间等;(5)可设置参数:采集通道、采样间隔、采样频率等;(6)采集后自动保存记录成文本文件(或EXCEL格式);系统主要部件要求:(1)配套传感器CYG1721/CYG1722输入电压:24V;输出电流:4~20mA(2)线性电源24VDC/2A(四个朝阳线性电源)(3)256通道信号防雷模块,三级防雷,10000V/5000A(4)采样转换板,电流信号转电压信号,带低通滤波(4)AD卡,总线形式:PCI,分辨率:16位(Bit),总通道数:256路单端/卡,单通道最高采样速率:3KS/s,输入阻抗:100MΩ/10pF(关);100MΩ/100pF(关).专用导气屏蔽电缆技术要求:护套PU,外皮为白色,内部为黑色,防水耐候,耐紫外线,寿命不小于5年,护套材料抗拉耐磨,护套厚度不小于1.3mm,内带内孔Φ1.2mm导气管,电缆外径(7±0.1)mm,额定电压600V,工作温区:-25~85℃,Φ0.12mm镀锌铜丝屏蔽编制密度大于80%.

表1 表面风压监测系统

设备名称	型号/规格	数量	单位
防雷型风雨荷载传感器 CYG1721(上表面)和防雷型微差压风荷载传感器 CYG1722(下表面)	CYG1721/1722 - ±3KPa/精度等级:0.5%FS; 输出:4-20mA; 供电电源:24VDC; 安装接口:Φ54×16mm	124	对
256通道采样仪	SQCSCP-256:系统主要仪器箱、线性电源、256通道信号防雷模块(必须有防雷认证证书)、信号采样转换板、A/D板、连接器、工业控制计算机及测控软件等组成,构成256路测试系统.	1	台
屏蔽导气防水电缆	屏蔽导气防水电缆,2芯导体线芯颜色红、白,单芯导体电阻小于94.6Ω,	50000	m

### 4 结 语

简单介绍了正在推进的乐清“弯月”体育场现场风压、风振实测研究的前期准备工作,鉴于论文篇幅限制及测试结果尚未处理完成,相关数据分析和研究内容暂不展开论述.

应当指出,强/台风作用下大跨空间索桁体系的风致效应及机理复杂,不仅受控于风荷载的特性如湍流特征尺度、气流分离后涡脱的频率和流场演化等结构外在条件,而且与大跨空间索桁体系内在的非线性动力特性紧密相关,大跨柔性体系的抗风设计方法亦任重而道远.

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵林,朱乐东,葛耀君.“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.
- [3] 陈亚楠,周岱.风敏感空间结构风致耦合研究与分析述评[J].振动与冲击,2012,31(7):104-109.
- [4] 王春江,陈锋,周岱.风场中长单索结构流同耦合效应的动力学分析[J].力学季刊,2010,31(2):213-219.
- [5] 王伟亮,杨庆山.薄膜结构风致耦合作用数值初探[J].计算力学学报,2010,27(3):422-427.

- [6] BELLES P ,ORTEGA N ,ROSALES M. Shell form-finding: physical and numerical design tools [J]. Engineering Structures 2009 ,31:2656 – 2666.
- [7] TAKUZO Y ,TOMOHIKO K. Shape optimization of shell roofs subjected to strong wind using multigrid method and variable complexity model [J]. J Struct Constr Eng ,AIJ 2009 ,74( 636) :297 – 304.
- [8] APPERLEY L W ,PITSIS N. Model/full-scale pressure measurements on a grandstand [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,1986 23:199 – 259.
- [9] PIRSIS N G ,APPERLEY L W. Further full-scale and model pressure measurements on a cantilever grandstand [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,1991( 38) :439 – 448.
- [10] 胡尚瑜 李秋胜 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.
- [11] 李秋胜 胡尚瑜 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.
- [12] 朱丙虎 张其林. 世博轴索膜结构屋面风效应的监测分析 [J]. 华南理工大学学报:自然科学版 2012 40( 2) :13 – 18.
- [13] 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]. 震动与冲击 2012 31( 5) :176 – 182.
- [14] CONCI A ,GATTASS M. Natural approach for thin-walled beam-columns with elastic-plasticity [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering ,1990 29( 8) :1653 – 1679.

## Field measurement of wind pressure and wind-induced vibration of large-span spatial cable-truss system under strong wind or typhoon

ZHANG Zhihong<sup>1</sup> ,LIU Zhonghua<sup>2</sup> ,DONG Shilin<sup>3</sup>

( 1. College of Civil Engineering Shanghai Normal University ,Shanghai 200233 ,China; 2. Jinggong Steel Building Group , Shaoxing 312030 ,China; 3. College of Civil Engineering Zhejiang University ,Hangzhou 310027 ,China)

**Abstract:** In order to ensure wind-resistance safety of large-span pre-stressed flexible system in southeast coast area of China and to prepare something for revising of current codes of practice or technical standards ,the present paper conducts field measurement of wind pressure and wind-induced vibration of a practical and typical large-span spatial cable-truss system-lunar stadium in Yueqing city. Wind loading and wind effects on full-scale structure under strong wind or typhoon in real architectural environment can be obtained directly and effectively. Field measurement is the best way to investigate the wind loading property ,wind effects , and wind-structure interactions of large-span flexible system. Measured data will be highly valuable for scientific research and practical design. On the other hand ,it also provides the basis of wind-resistance safety design of this kind of tension structures. If any creative development ,it would dramatically improve the research level of large-span pre-stressed flexible system in our country.

**Key words:** spatial cable-truss system; field measurement; wind loading; wind effects

( 责任编辑:顾浩然)