

桥梁风洞试验指南

Guidelines for
Wind Tunnel Testing of Bridges

《桥梁风洞试验指南》编写组



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

桥梁风洞试验指南

Guidelines for
Wind Tunnel Testing of Bridges

《桥梁风洞试验指南》编写组



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是编写组近十年来在桥梁风洞试验理论方法和工程实践方面的研究总结,同时包含了土木工程防灾国家重点实验室1项自主课题和4项开放课题的研究成果。全书共分12章,内容包括:总则、术语和符号、基本规定、风洞试验设备、风场模拟、动力特性、桥梁风洞试验相似准则、节段模型测力试验、节段模型测振试验、桥塔自立状态测振试验、全桥气弹模型试验、斜拉索模型试验。

本书可供桥梁科研、设计及施工人员使用,也可供高等院校高年级本科生及研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁风洞试验指南 / 《桥梁风洞试验指南》编写组

编著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.7

ISBN 978-7-114-14704-3

I. ①桥… II. ①桥… III. ①桥梁试验—风洞试验—
指南 IV. ①U446.1-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第097677号

书 名:桥梁风洞试验指南

著 作 者:《桥梁风洞试验指南》编写组

责任编辑:李 喆

责任校对:刘 芹

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010) 59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:7

字 数:150千

版 次:2018年7月 第1版

印 次:2018年7月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14704-3

定 价:56.00元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

《桥梁风洞试验指南》编写组

主 编：葛耀君（同济大学）

编写人员：（以姓氏拼音为序）

曹丰产（同济大学）

李加武（长安大学）

刘庆宽（石家庄铁道大学）

马存明（西南交通大学）

杨詠昕（同济大学）

张志田（湖南大学）

赵 林（同济大学）

前 言

全世界公认的风工程研究和评价的最有效方法是风洞试验，加拿大、美国、日本等风工程研究强国基于坚实的理论研究和大量的风洞试验，先后编制出关于房屋和结构的风洞试验指南或规程。20世纪60年代，加拿大西安大略大学在建成了全世界最早的边界层风洞后，不断更新结构风洞试验方法和标准，形成了一整套结构风洞试验方法和规程——《Wind Tunnel Testing: a general outline》。美国土木工程师学会在1987年出版了《Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures》，对包括大跨桥梁、高层建筑等风敏感结构的风洞试验原理和方法进行了说明。日本建筑综合试验所在1988年出版了《建筑结构风洞试验手册》，日本建筑中心在1994年出版了《建筑物风洞试验指南》，对建筑结构的风力风压试验、气弹模型试验和风环境试验等的风洞试验方法提出了具体的规定。我国《建筑工程风洞试验方法标准》(JGJ/T 338—2014)于2014年颁布实施。

全世界范围内针对桥梁结构风洞试验方法的规范或说明很少，日本在研究设计本州四国连络桥时，由本州四国连络桥公团（现改制为本州四国连络高速道路株式会社）分别在1980年和1990制定了“本州四国连络风洞试验要领及说明”和“明石海峡大桥风洞试验要领及说明”。同时，日本道路协会在1991年出版了《道路桥抗风设计手册》。加拿大西安大略大学和美国土木工程师学会的建筑和结构风洞试验方法标准也被引用到桥梁风洞试验中。我国的同济大学、西南交通大学、湖南大学、长安大学和石家庄铁道大学等在大量桥梁结构风洞试验的基础上，形成了类似于加拿大西安大略大学边界层风洞实验室的方法和标准，用于指导和规范各自单位的桥梁风洞试验。

为了满足桥梁工程师们的要求，推动大跨度桥梁的发展，保证桥梁风洞试验方法的规范性和结果的可靠性，同济大学先后联合长安大学、湖南大学、西南交通大学和石家庄铁道大学等桥梁风洞试验研究单位，于2011年联合成立了《桥梁风洞试验指南》编写组。编写组成员在同济大学土木工程防灾国家重点实验室5个课题共240万元经费的资助下开展研究工作，项目包括：“桥梁结构风洞试验关键相似条件及应用指南”（2010~2014年，120万元，课题负责人葛耀君）、“典型桥梁结构断面节段模型风洞试验及振动特性研究”（2011~2015年，30万元，课题负责人李加武）、“全桥气弹模型风洞试验相似理论与方法”（2011~2015年，30万元，课题负责人张志田）、“桥塔模型风洞试验相似理论与方法”（2012~2017年，30万元，课题负责人马存明）、“斜拉索气动力及其雷诺数效应研究”（2013~2017年，30万元，课题负责人刘庆宽）。

编写组从2011年1月~2017年9月先后在同济大学（4次）、长安大学（2次）、湖南大学（1次）、西南交通大学（1次）和石家庄铁道大学（1次）召开了9次研讨

会，9次修改本指南内容。2018年1月，编写组邀请了中国土木工程学会桥梁及结构工程分会风工程委员会的主任、副主任和委员，同济大学朱乐东教授、西南交通大学李明水教授、中国交通建设股份有限公司技术中心鲍卫刚教授级高级工程师、中铁大桥勘测设计院有限公司李龙安教授级高级工程师、中南大学何旭辉教授、湖南大学华旭刚教授和中交公路规划设计院有限公司刘天成教授级高级工程师等在广西柳州召开了专家咨询会。在充分吸收咨询专家书面意见、个人发言和集体讨论的基础上，编写组作了最后的修改、调整和完善，形成了现在的《桥梁风洞试验指南》。

本书是在国内外现有桥梁风洞试验研究的基础上编著的专门针对各种桥梁风洞试验的指南，全书共分四个部分。第一部分是指南正文——条文，包括总则、术语和符号、基本规定、风洞试验设备、风场模拟、动力特性、桥梁风洞试验相似准则、节段模型测力试验、节段模型测振试验、桥塔自立状态测振试验、全桥气弹模型试验和斜拉索模型试验，共12章，具体规定和建议了桥梁风洞试验方法；第二部分是指南附件——条文说明，与正文一一对应，也是12章，对指南条文逐一进行了解释，给出了依据，限定了条件；第三部分是指南附录——4个附录，分别是附录A桥梁结构阻尼规范值和实测值、附录B桥塔自立状态测振风洞试验方法、附录C全桥气弹模型风洞试验方法和附录D斜拉索模型风洞试验方法，附录主要是对条文说明中的阻尼进行了补充说明，并给出了桥塔模型、全桥模型和拉索模型的风洞试验示例；第四部分是参考文献，作为对条文说明和附录的支撑材料。

我们真诚地希望读者在阅读和使用《桥梁风洞试验指南》的过程中，不吝提出意见和建议，通过试用和质疑，使我们再对一些相关问题进行深入研究，为早日制定我国桥梁结构风洞试验标准而共同努力。

《桥梁风洞试验指南》编写组
2018年3月

目次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
3.1	试验方法	5
3.2	试验要求	5
3.3	数据处理	6
3.4	试验报告	6
4	风洞试验设备	8
4.1	风洞设备	8
4.2	流场品质	8
4.3	测试设备	9
5	风场模拟	10
5.1	均匀风场模拟	10
5.2	边界层风场模拟	10
5.3	风场校验	12
6	动力特性	13
6.1	一般规定	13
6.2	典型主梁断面	13
6.3	主梁力学模型	14
6.4	其他构件计算模型	14
6.5	连接与约束	14
6.6	桥梁结构阻尼	15
7	桥梁风洞试验相似准则	16
7.1	几何相似	16
7.2	运动相似	16
7.3	动力相似	17
7.4	相似条件放宽	19
8	节段模型测力试验	20
8.1	模型设计	20

8.2	试验内容	20
8.3	试验要求	21
9	节段模型测振试验	22
9.1	模型设计	22
9.2	试验内容	23
9.3	试验要求	23
10	桥塔自立状态测振试验	24
10.1	桥塔模型设计	24
10.2	试验内容	25
10.3	试验要求	25
11	全桥气弹模型试验	26
11.1	全桥模型设计	26
11.2	试验内容	27
11.3	试验要求	28
12	斜拉索模型试验	29
12.1	斜拉索模型设计	29
12.2	试验内容	29
12.3	试验要求	29
附件	《桥梁风洞试验指南》条文说明	31
1	总则	33
2	术语和符号	34
3	基本规定	35
4	风洞试验设备	36
5	风场模拟	41
6	动力特性	43
7	桥梁风洞试验相似准则	45
8	节段模型测力试验	47
9	节段模型测振试验	49
10	桥塔自立状态测振试验	52
11	全桥气弹模型试验	55
12	斜拉索模型试验	60
附录 A	桥梁结构阻尼规范值和实测值	62
附录 B	桥塔自立状态测振风洞试验方法	67
附录 C	全桥气弹模型风洞试验方法	80
附录 D	斜拉索模型风洞试验方法	96
	参考文献	103

1 总则

1.0.1 为保证桥梁风洞试验方法的规范性和结果的可靠性，制定本指南。

1.0.2 本指南适用的桥梁类型是悬索桥和斜拉桥，也可供拱式桥和梁式桥及其组合形式的桥梁风洞试验参考。

1.0.3 本指南适用于热带气旋和季候风等引起的桥梁结构风效应的试验研究。

1.0.4 桥梁风洞试验，除应满足本指南外，尚应符合国家现行有关标准或规范的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 大气边界层 atmospheric boundary layer

地球表面受地表粗糙度影响的平均风和脉动风等随高度明显变化的大气层部分。

2.1.2 风洞 wind tunnel

在按一定要求设计的管道系统内，使用动力装置驱动可控制的气流，进行各种空气动力试验的设备。

2.1.3 大气边界层风洞 atmospheric boundary layer wind tunnel

可以模拟大气边界层流场特性——平均风和脉动风的管道状试验设备。

2.1.4 风洞试验 wind tunnel test

在风洞中研究空气流经结构的流动现象和气动效应的试验。

2.1.5 节段模型测力试验 force balance test of sectional model

在风洞中测量桥梁构件刚性节段模型受力的试验，一般指测量模型静力三分力的风洞试验。

2.1.6 节段模型测振试验 aerodynamic test of sectional model

在风洞中测量桥梁构件的弹性悬挂刚性节段模型振动的试验，一般指测量模型非定常气动力和气动响应的风洞试验。

2.1.7 桥塔自立状态测振试验 aerodynamic test of free-standing pylon

在风洞中测量桥塔自立状态模型气动响应的试验，一般指测量多自由度桥塔模型气动响应的风洞试验。

2.1.8 全桥气弹模型试验 aeroelastic model test of full bridge

在风洞中测量全桥气弹模型气动响应的试验。

2.1.9 斜拉索模型风雨振试验 rain-wind induced vibration test of stay cable model

在模拟风雨环境的风洞中测量斜拉索模型气动响应的试验。

2.1.10 风剖面 wind profile

大气边界层中风场参数大小随高度变化的形态，主要包括平均风速剖面和紊流强度剖面。

2.1.11 紊流强度 turbulence intensity

一定时距内，脉动风速均方根与平均风速的比值，又称紊流度或湍流度。

2.1.12 紊流积分尺度 turbulence integral scale

引起风速脉动的旋涡沿某一指定方向平均尺寸的量度。

2.1.13 风向角 wind directional angle

风向与水平面的夹角（风攻角）和竖直面的夹角（风偏角）的统称。

2.1.14 几何缩尺比 geometric scale

试验模型与结构原型几何尺寸的比值。

2.2 符号

η ——动压稳定系数；

$\frac{dC_p}{dx}$ ——轴向静压梯度；

ξ ——风速平均偏差系数；

$\Delta\alpha$ ——试验段横截面气流竖直方向角；

$\Delta\beta$ ——试验段横截面气流水平方向角；

v_z —— z 高度处的平均风速；

z_g ——梯度风高度；

z_b ——截断高度；

α ——风攻角；

β ——风偏角；

α_0 ——平均风剖面指数；

σ_u 、 σ_v 、 σ_w ——顺风向、水平横风向和竖向脉动风速标准差；

l_u 、 l_v 、 l_w ——顺风向、水平横风向和竖向的脉动风紊流强度；

L_u^x 、 L_u^y ——顺风向和水平横风向的顺风向紊流积分尺度；

A_c ——风洞试验段横截面面积；

- A_m ——试验模型在试验段横截面的最大投影面积；
 γ ——阻塞比；
 f ——频率；
 L ——特征尺寸；
 S_u ——紊流来流纵向分量自功率谱；
 Re ——雷诺数；
 μ ——空气动力黏性系数；
 Fr ——弗劳德数；
 g ——重力加速度；
 Eu ——欧拉数；
 p ——空气压力；
 Ca ——柯西数；
 E ——弹性模量；
 A ——构件横截面面积；
 I ——构件横截面抗弯惯性矩；
 J_d ——构件横截面自由扭转惯性矩；
 J_w ——构件横截面约束扭转惯性矩；
 m ——单位长度质量；
 I_m ——单位长度质量惯性矩；
 λ ——模型和原型对应物理量缩尺比；
 t ——时间；
 T ——张力；
 G ——剪切模量；
 δ ——结构阻尼对数衰减率；
 F_D 、 F_L 、 M_Z ——风轴坐标系下单位长度阻力、升力和升力矩；
 F_H 、 F_V 、 M_Z ——体轴坐标系下单位长度顺风向力、横风向力和升力矩；
 C_D 、 C_L 、 C_M ——风轴坐标系下阻力系数、升力系数和升力矩系数；
 C_H 、 C_V 、 C_M ——体轴坐标系下顺风向力系数、横风向力系数和升力矩系数；
 H ——节段模型特征高度；
 B ——节段模型特征宽度；
 Sc ——Scruton 数；
 ρ ——空气密度；
 v ——风速；
 ζ ——阻尼比；
 z_0 ——地面粗糙高度；
 z_g ——梯度风高度。

3 基本规定

3.1 试验方法

3.1.1 桥梁风洞试验过程主要由试验设备选择、试验风场模拟、动力特性分析、模型设计制作、模型风洞试验、测试数据处理和试验报告撰写等部分组成。

3.1.2 桥梁风洞试验类型主要包括节段模型测力试验、节段模型测振试验、桥塔自立状态测振试验、全桥气弹模型试验和斜拉索模型试验等。

3.1.3 节段模型测力试验主要采用力传感器测量桥梁构件刚性节段模型的静气动力系数。

3.1.4 节段模型测振试验主要采用位移、加速度等传感器测量桥梁构件刚性节段模型的非定常气动力系数和气动响应。

3.1.5 桥塔自立状态模型测振试验主要采用位移、加速度等传感器测量桥塔自立状态气弹模型的气动响应。

3.1.6 全桥气弹模型试验主要采用位移、加速度等传感器测量全桥气弹模型的气动响应。

3.1.7 斜拉索模型试验主要采用力、位移、加速度传感器和降雨模拟装置等设备测量斜拉索刚性节段模型的气动力系数和振动响应。

3.2 试验要求

3.2.1 边界层风洞应符合第4章所规定的流场品质要求。

3.2.2 风洞试验的风场应符合第5章的相关规定。

3.2.3 除测力试验外，其余风洞试验应依据结构动力特性设计模型。

3.2.4 模型设计应按照第7章的规定确定相应的相似准则，并根据模型类型参照相应规定确保模型品质。

3.2.5 模型风洞试验的风速应根据模型试验内容、测量仪器精度和频率、相似准则等因素确定。

3.2.6 模型风洞试验时，应保持试验风速稳定。模型姿态改变后，应待风速稳定后再进行数据采集。

3.3 数据处理

3.3.1 参考风速的测量位置，应避免受到模型和洞壁的影响。

3.3.2 信号采集时，应保证设备性能良好并避免干扰。

3.3.3 对于信号采样的时间长度，应保证统计结果的稳定性和有效性。

3.3.4 随机测试信号的极值计算可采用峰值因子法或极值统计法，并保证信号的真实性。

3.4 试验报告

3.4.1 桥梁风洞试验报告的内容应包括试验对象、试验目的、试验内容和主要结论，以及试验照片。

3.4.2 应描述试验对象——被试验桥梁的设计概况和关键参数，以及模型误差。

3.4.3 应表明当前试验的目的，如检验结构风致稳定性、使用性能，确定风荷载等。

3.4.4 应列出为达到试验目的而开展的各项研究内容，如桥位风特性分析、结构动力特性分析、风洞试验、理论分析等。

3.4.5 在桥位风特性分析中，应说明桥位基本风速和风场类型，并给出各项设计基准风速和检验风速。

3.4.6 在动力特性分析中，应说明有限元建模的力学模型、基本参数、分析方法，并列主要振型的频率、振型图和等效质量（质量惯性矩）。

3.4.7 风洞试验内容应说明模型设计和安装、风场模拟、试验工况等主要情况，并列出生试验的主要发现、结果及其分析。

3.4.8 理论分析内容应说明建模过程、主要参数选取、分析方法，并列出生主要分析结果。

3.4.9 在总结各项试验结果的基础上，应针对试验目的提出明确的结论。

4 风洞试验设备

4.1 风洞设备

4.1.1 适用于桥梁风洞试验的风洞，一般为低速风洞（忽略空气压缩），按照风洞洞体的结构形式可分为直流吹式风洞、直流吸式风洞、回流卧式风洞和回流立式风洞。

4.1.2 风洞试验段截面尺寸应根据模型试验所要求达到的最大模型尺寸选取。

4.1.3 风洞正式投入使用前应进行流场校测和验收。

4.2 流场品质

4.2.1 风洞流场品质参数主要包括气流稳定性、紊流强度、轴向静压梯度、风速均匀性和风向均匀性等。

4.2.2 气流稳定性一般用动压稳定系数来衡量，动压稳定系数应满足 $\eta \leq 1.0\%$ 。

4.2.3 气流紊流强度一般用气流纵向紊流强度来衡量，试验段截面气流紊流强度应满足 $I_u \leq 2.0\%$ 。

4.2.4 轴向静压梯度应满足 $\frac{d\bar{C}_p}{dx} \leq 0.01/m$ 。

4.2.5 风速均匀性一般用试验段截面风速平均偏差系数来衡量，试验段截面风速平均偏差系数应满足 $\xi \leq 1.0\%$ 。

4.2.6 风向均匀性一般用气流竖直和水平风向角来衡量，试验段截面气流竖直方向角 $|\Delta\alpha| \leq 1.0^\circ$ ，水平风向角 $|\Delta\beta| \leq 1.5^\circ$ 。

4.3 测试设备

4.3.1 桥梁风洞试验常用测试设备包括气流测试设备、结构测振设备和测力设备。

4.3.2 风洞测试设备应具有合格证书或校测报告，自主研发的风洞测试设备应具备表明其性能指标的相关文件。

4.3.3 风洞测试设备的量程、精度和采样频率等应满足相应风洞试验的测量需求。

4.3.4 风洞测试设备应具备操作规程，定期进行保养和校准，确保试验时处于正常工作状态。