

当代科技重要著作·交通领域

项海帆 等著

# 现代桥梁 抗风理论与实践

Modern  
Theory and Practice on  
Bridge Wind Resistance



人民交通出版社  
China Communications Press

当代科技重要著作

U442.5  
14

# 现代桥梁 抗风理论与实践

项海帆

葛耀君 朱乐东 陈艾荣 著  
林志兴 顾明 肖汝诚

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书为国家“九五”重大科研项目以及近年来作者在桥梁抗风研究中所取得成果的全面总结。共分十二章,内容包括绪论、近地边界层风特性及其风洞模拟技术、桥梁风振理论的精细化、桥梁构件的气动参数识别、斜拉桥拉索风雨激振及其控制、桥梁颤振机理及气动控制措施、桥梁风振的概率性评价与可靠性分析、CFD技术及其在桥梁气动弹性数值模拟中的运用、斜风作用下桥梁抖振响应分析与实测案例研究、桥梁等效风荷载理论、大跨度桥梁的静风稳定性、总结与展望。

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教学参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代桥梁抗风理论与实践/项海帆等著. —北京:人民交通出版社,2005.11

ISBN 7-114-05821-7

I. 现... II. 项... III. 桥梁工程-抗风结构-结构设计 IV. U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 124897 号

书 名: 现代桥梁抗风理论与实践

著 作 者: 项海帆 等

责任编辑: 沈鸿雁

出版发行: 人民交通出版社

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)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 29

字 数: 720 千

版 次: 2005 年 11 月第 1 版

印 次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05821-7

印 数: 0001-3000 册

定 价: 70.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前言

## FOREWORD

同济大学的桥梁抗风研究自 1979 年接受上海泖港大桥的风洞试验任务算起已经渡过了二十六个春秋。

在已故李国豪教授的领导下,我们经历了第一个十年的“学习和追赶”阶段,大家努力学习国外在 20 世纪 60 年代奠基的桥梁风振理论和风洞试验技术,终于在 80 年代后期抓住了上海南浦大桥建设和建立国家重点实验室的机遇,迈出了重要的一步,逐步建成了中国第一家拥有三座边界层风洞的建筑风洞群。

自 1987 年参加了在德国亚琛的第七届国际风工程大会以来,同济大学的风工程研究群体积极参加了历次的国际和地区性风工程会议,逐渐成为代表中国风工程界的一支重要力量,引起了国际风工程界的关注。

进入 20 世纪 90 年代以后,同济大学在完成上海南浦大桥和杨浦大桥的抗风研究和风洞试验的基础上进入了第二个十年的“提高和跟踪”阶段。为了缩小与先进国家的差距,我们努力跟踪所有前沿课题,并且特别关注世界风工程强国中一些著名学者的研究动态。通过组织学习和讨论,开发了自主的软件,同时利用中国大规模桥梁建设的有利形势,在工程实际应用中加以检验和改进,使同济大学桥梁风工程的研究水平得到很大的提高。到 20 世纪末,我们的队伍也从最初的三人小组发展成一支来自土木、机械、航空、力学、工程物理各专业组成的近 20 人的综合研究群体,成长为国内桥梁风工程研究的中心之一。

90 年代末,我们又遇到了两次重要的机遇:一是主持国家自然科学基金的重大项目;二是桥梁工程学科继获得全国重点学科后又被选为上海市重中之重学科。我们利用重大项目中有桥梁风工程的专题经费组织了重点攻关,同时在上海重中之重学科建设经费的资助下提高了试验装备水平,购置了用于数值模拟的超级计算机及图形显示设备,又兴建了用于风振机理研究的第四座边界层风洞和相关设备,为今后的基础理论研究创造了条件。

进入 21 世纪后,我们将在前 20 年学习和跟踪的基础上开始一个“创新和超越”的新阶段。希望通过不懈的努力,在若干国际风工程研究的前沿热点上有所突破,用创新的成果实现局部的超越,并为 21 世纪的跨海大桥建设作出贡献。

本书由本人负责确定各章节内容、制订全书大纲以及编写第一章和第十二章内容,学科组成员分工撰写了其它章节的内容,其中葛耀君编写第三、六、七



章;朱乐东编写第四和第九章;陈艾荣编写第八和第十章;林志兴编写第二和第五(第6和7节)章;顾明编写第五章(1至5节);肖汝诚编写第十一章。全书由本人统稿和修改。另外,风洞试验室年轻一代留校工作的博士们(程进、周志勇、丁泉顺、曹丰产、郭震山、杨詠昕、赵林和马如进等)也积极参与了部分初稿的准备工作,有些内容直接来自于他们的博士学位论文。

本书可说是一本近十年来同济大学桥梁风工程群体在理论和实践方面的研究总结,主要内容都来自在国内外所发表的论文,希望能对读者有所裨益。错误和不当之处还望国内外同仁批评指正。

同济大学

项海帆

二〇〇五年八月

# 目 录

## CONTENTS

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第一章 绪论                         | 1  |
| 第一节 桥梁风毁事件的回顾(1818 ~ 1940 年)   | 1  |
| 第二节 桥梁抗风基础理论的建立(1940 ~ 1980 年) | 3  |
| 第三节 现代桥梁抗风理论的发展(1980 ~ 2000 年) | 4  |
| 参考文献                           | 6  |
| 第二章 近地边界层风特性及其风洞模拟技术           | 7  |
| 第一节 概述                         | 7  |
| 第二节 强风平均风速剖面特性观测与分析            | 8  |
| 一、引言                           | 8  |
| 二、大气风廓线仪及其在平均风速剖面观测中的应用        | 8  |
| 三、台风大风的风速剖面特性                  | 9  |
| 四、冬季大风的风速剖面特性                  | 12 |
| 五、小结                           | 13 |
| 第三节 风速风向联合分布概型及其在极端风速估计中的应用    | 13 |
| 一、引言                           | 13 |
| 二、风速风向联合分布概型                   | 14 |
| 三、极端风速估计应用                     | 19 |
| 第四节 强风湍流特性观测与分析                | 21 |
| 一、引言                           | 21 |
| 二、强风湍流特性两种分析方法的比较              | 22 |
| 三、湍流积分尺度的分析方法                  | 24 |
| 四、台风的湍流特性观测与分析                 | 27 |
| 第五节 大气边界层风特性的风洞模拟技术            | 32 |
| 一、引言                           | 32 |
| 二、大气边界层风洞模拟技术                  | 33 |
| 三、尖劈和粗糙元被动式模拟技术的改进             | 36 |
| 四、振动尖劈主动模拟技术                   | 40 |
| 第六节 结语                         | 47 |
| 参考文献                           | 47 |
| 第三章 桥梁风振理论的精细化                 | 50 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第一节 概述 .....                       | 50  |
| 一、桥梁颤振研究 .....                     | 50  |
| 二、桥梁抖振研究 .....                     | 51  |
| 三、精细化实践 .....                      | 51  |
| 第二节 颤振频域分析的精确方法 .....              | 52  |
| 一、桥梁颤振理论发展 .....                   | 52  |
| 二、多模态法和全模态法 .....                  | 57  |
| 三、颤振算例分析 .....                     | 64  |
| 第三节 抖振频域分析的耦合方法 .....              | 71  |
| 一、桥梁抖振理论发展 .....                   | 71  |
| 二、多模态耦合方法 .....                    | 77  |
| 三、抖振算例分析 .....                     | 80  |
| 第四节 颤抖振时域分析的增量方法 .....             | 88  |
| 一、桥梁风振时域分析发展 .....                 | 88  |
| 二、非线性增量方法 .....                    | 89  |
| 三、颤抖振算例分析 .....                    | 97  |
| 第五节 结语 .....                       | 104 |
| 参考文献 .....                         | 105 |
| 第四章 桥梁构件的气动参数识别 .....              | 110 |
| 第一节 概述 .....                       | 110 |
| 第二节 气动导数识别方法综述 .....               | 111 |
| 一、竖向和扭转气动导数识别 .....                | 111 |
| 二、侧向气动导数识别 .....                   | 115 |
| 三、节段模型强迫振动法 .....                  | 116 |
| 四、紊流场中的气动导数识别 .....                | 118 |
| 第三节 基于节段模型试验的气动导数识别方法 .....        | 121 |
| 一、最小二乘法 .....                      | 121 |
| 二、耦合自由振动测压法 .....                  | 130 |
| 三、特征系统现实算法 .....                   | 133 |
| 四、紊流场气动导数识别的随机子空间法 .....           | 135 |
| 第四节 基于拉条模型和全桥气弹模型试验的气动导数识别方法 ..... | 139 |
| 一、基本原理 .....                       | 139 |
| 二、应用实例 .....                       | 141 |
| 第五节 桥梁断面气动导纳识别方法 .....             | 144 |
| 一、气动导纳及其识别方法综述 .....               | 144 |
| 二、基于紊流场节段模型试验的气动导纳系统辨识法 .....      | 148 |
| 第六节 结语 .....                       | 151 |
| 参考文献 .....                         | 152 |
| 第五章 斜拉桥拉索风雨激振及其控制 .....            | 157 |
| 第一节 概述 .....                       | 157 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第二节 模拟降雨条件下拉索风雨激振试验 .....       | 158 |
| 一、风洞、模拟降雨装置及试验工况 .....          | 158 |
| 二、风雨激振的主要特征及参数影响 .....          | 159 |
| 三、拉索空间姿态对上水线位置的影响 .....         | 162 |
| 第三节 拉索模型测压和测力试验 .....           | 163 |
| 一、用于测压试验的风洞设备和模型 .....          | 163 |
| 二、测压试验工况 .....                  | 165 |
| 三、气动力系数的定义 .....                | 165 |
| 四、测压试验结果 .....                  | 165 |
| 五、二维拉索模型测力风洞试验 .....            | 168 |
| 第四节 拉索风雨激振稳定性研究 .....           | 169 |
| 一、拉索风雨激振运动微分方程 .....            | 169 |
| 二、拉索风雨激振的稳定性判据 .....            | 171 |
| 三、拉索风雨激振稳定性分析 .....             | 173 |
| 四、试验研究 .....                    | 174 |
| 第五节 拉索风雨激振机理的一个新的解释 .....       | 175 |
| 一、理论公式 .....                    | 175 |
| 二、拉索风雨激振的特征与机制 .....            | 176 |
| 三、和试验结果的比较 .....                | 178 |
| 第六节 斜拉索风雨激振控制的气动措施研究 .....      | 178 |
| 一、风雨激振气动控制措施的试验研究 .....         | 179 |
| 二、风雨激振气动控制措施的理论研究 .....         | 186 |
| 第七节 机械阻尼器和辅助索对拉索风雨激振的抑制作用 ..... | 192 |
| 一、拉索模拟人工降雨下的机械阻尼减振作用 .....      | 193 |
| 二、机械阻尼器对风雨激振的抑制作用 .....         | 194 |
| 三、辅助索对风雨激振的抑制作用 .....           | 196 |
| 第八节 结语 .....                    | 201 |
| 参考文献 .....                      | 201 |
| 第六章 桥梁颤振机理及气动控制措施 .....         | 205 |
| 第一节 概述 .....                    | 205 |
| 第二节 二维三自由度耦合颤振分析 .....          | 206 |
| 一、二维颤振基本方程 .....                | 207 |
| 二、解耦扭转振动效应 .....                | 208 |
| 三、解耦竖向振动效应 .....                | 212 |
| 四、解耦侧向振动效应 .....                | 213 |
| 五、三自由度耦合振动分析 .....              | 214 |
| 第三节 典型断面颤振形态及驱动机理 .....         | 217 |
| 一、流线型平板断面 .....                 | 217 |
| 二、钝体矩形断面 .....                  | 221 |
| 三、闭口钢箱梁断面 .....                 | 225 |



|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 四、分离双主梁断面 .....                          | 226        |
| 五、桥梁断面颤振机理 .....                         | 227        |
| 第四节 气动措施的颤振控制作用 .....                    | 228        |
| 一、边缘风嘴措施 .....                           | 229        |
| 二、中央开槽措施 .....                           | 231        |
| 三、中央稳定板措施 .....                          | 237        |
| 第五节 结语 .....                             | 241        |
| 参考文献 .....                               | 242        |
| <b>第七章 桥梁风振的概率性评价与可靠性分析 .....</b>        | <b>246</b> |
| 第一节 概述 .....                             | 246        |
| 一、桥梁结构组成 .....                           | 246        |
| 二、抗风设计要求 .....                           | 247        |
| 三、桥梁风振分析 .....                           | 247        |
| 第二节 风振可靠性系统和分析方法 .....                   | 248        |
| 一、风振可靠性系统 .....                          | 248        |
| 二、风振可靠性计算 .....                          | 249        |
| 第三节 颤振稳定失效概率性评价 .....                    | 250        |
| 一、桥梁颤振评价 .....                           | 250        |
| 二、颤振稳定失效模式 .....                         | 253        |
| 三、一次二阶矩理论 .....                          | 255        |
| 四、中心点法 .....                             | 257        |
| 五、验算点法 .....                             | 260        |
| 六、概率性评价算例 .....                          | 263        |
| 第四节 抖振安全失效可靠性分析 .....                    | 266        |
| 一、首次超越失效模式 .....                         | 266        |
| 二、基于超越时间方法 .....                         | 268        |
| 三、基于超越极值方法 .....                         | 272        |
| 四、抖振可靠性分析步骤 .....                        | 274        |
| 五、抖振可靠性分析算例 .....                        | 277        |
| 第五节 涡振刚度失效概率性评价 .....                    | 282        |
| 一、涡振锁定风速 .....                           | 282        |
| 二、累计涡振时间 .....                           | 285        |
| 三、首次涡振概率 .....                           | 290        |
| 第六节 结语 .....                             | 295        |
| 参考文献 .....                               | 295        |
| <b>第八章 CFD 技术及其在桥梁气动弹性数值模拟中的运用 .....</b> | <b>297</b> |
| 第一节 概述 .....                             | 297        |
| 第二节 流体动力学的基本理论和计算方法 .....                | 297        |
| 一、流体流动的基本方程及湍流的直接模拟 .....                | 298        |
| 二、湍流的雷诺时均模拟 .....                        | 299        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 三、湍流的大涡模拟 .....                     | 301 |
| 四、流体动力学离散数值计算的基本方法 .....            | 301 |
| 第三节 有限单元法计算二维桥梁断面的气动弹性问题 .....      | 303 |
| 一、二维任意变形区域内流体的控制方程 .....            | 303 |
| 二、平面刚体运动区域内流体的控制方程 .....            | 305 |
| 三、控制方程的有限单元法求解 .....                | 305 |
| 四、桥梁断面气动导数和颤振临界风速的计算 .....          | 307 |
| 第四节 离散涡方法计算二维桥梁断面的气动弹性问题 .....      | 312 |
| 一、涡方法求解流体与运动刚性物体动力耦合问题的控制方程 .....   | 313 |
| 二、粘性流体与运动刚体动力耦合问题的涡量边界条件 .....      | 314 |
| 三、涡量场的对流及扩散计算 .....                 | 319 |
| 四、气动力的计算 .....                      | 321 |
| 第五节 离散涡方法在桥梁气动弹性分析中的运用 .....        | 321 |
| 一、典型桥梁主梁断面气动力计算 .....               | 321 |
| 二、CFD 技术在苏通大桥初步设计中的应用 .....         | 324 |
| 三、稳定板提高 $\Pi$ 形板梁颤振临界风速及其机理分析 ..... | 327 |
| 第六节 结语 .....                        | 336 |
| 参考文献 .....                          | 337 |
| 第九章 斜风作用下桥梁抖振响应分析与实测案例研究 .....      | 340 |
| 第一节 概述 .....                        | 340 |
| 第二节 斜风作用下桥梁抖振响应分析理论框架 .....         | 342 |
| 一、基本假设 .....                        | 342 |
| 二、基本步骤 .....                        | 342 |
| 三、抖振力模型 .....                       | 344 |
| 四、自激力模型 .....                       | 350 |
| 五、抖振运动方程及其求解 .....                  | 351 |
| 第三节 青马大桥及 WASHMS 系统简介 .....         | 355 |
| 一、青马大桥概况 .....                      | 355 |
| 二、WASHMS 系统简介 .....                 | 356 |
| 三、WASHMS 风速测量数据预处理 .....            | 357 |
| 第四节 斜风作用下桥梁构件截面气动参数风洞试验 .....       | 359 |
| 一、主梁截面六分量气动力系数 .....                | 359 |
| 二、桥塔构件气动力系数 .....                   | 361 |
| 三、桥梁构件截面气动导数 .....                  | 363 |
| 第五节 青马大桥风特性与抖振响应现场实测 .....          | 365 |
| 一、台风 Sam 登陆香港前夕的实测自然风特性 .....       | 365 |
| 二、实测抖振加速度响应 .....                   | 368 |
| 三、实测模态阻尼比 .....                     | 373 |
| 第六节 青马大桥抖振响应分析及与实测结果比较 .....        | 373 |
| 一、输入参数 .....                        | 373 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 二、主梁抖振加速度响应 .....                  | 376 |
| 三、主缆加速度响应 .....                    | 380 |
| 第七节 结语 .....                       | 383 |
| 参考文献 .....                         | 383 |
| <b>第十章 桥梁等效风荷载理论</b> .....         | 387 |
| 第一节 概述 .....                       | 387 |
| 第二节 桥梁等效风荷载计算的基本理论和方法 .....        | 388 |
| 一、平均风荷载 .....                      | 390 |
| 二、背景响应风荷载计算 .....                  | 390 |
| 三、惯性风荷载 .....                      | 391 |
| 第三节 实用的等效风荷载计算方法 .....             | 393 |
| 一、等效风荷载计算方法 .....                  | 393 |
| 二、计算共振响应的准则 .....                  | 394 |
| 第四节 大跨斜拉桥等效风荷载简化公式 .....           | 395 |
| 一、最大单悬臂状态 .....                    | 396 |
| 二、最大双悬臂状态 .....                    | 401 |
| 三、成桥状态等效风荷载 .....                  | 404 |
| 四、不同响应简化公式 .....                   | 405 |
| 第五节 苏通大桥计算实例 .....                 | 406 |
| 一、基本资料 .....                       | 406 |
| 二、风荷载效应分析比较 .....                  | 407 |
| 第六节 结语 .....                       | 410 |
| 参考文献 .....                         | 411 |
| <b>第十一章 大跨度桥梁的静风稳定性</b> .....      | 413 |
| 第一节 概述 .....                       | 413 |
| 第二节 三维非线性空气静力稳定性分析方法与程序实现 .....    | 414 |
| 一、静风荷载非线性的计算方法 .....               | 414 |
| 二、结构平衡方程及求解策略 .....                | 415 |
| 三、程序实现 .....                       | 416 |
| 第三节 缆索承重桥梁非线性空气静力稳定性分析 .....       | 417 |
| 一、缆索承重桥梁非线性静风稳定性全过程分析 .....        | 417 |
| 二、空气静力失稳机理研究 .....                 | 419 |
| 三、两种特殊现象的解释 .....                  | 420 |
| 四、非线性因素影响及参数分析 .....               | 422 |
| 五、缆索承重桥梁空气静力失稳与动力失稳(颤振)的比较分析 ..... | 426 |
| 第四节 静风荷载作用下大跨度钢拱桥稳定性分析 .....       | 426 |
| 一、静风荷载作用下大跨度钢拱桥极限承载力分析 .....       | 426 |
| 二、静风荷载作用下大跨度钢拱桥施工稳定性分析 .....       | 433 |
| 第五节 悬索桥非线性空气静力稳定性实用方法 .....        | 439 |
| 一、引言 .....                         | 439 |

二、大跨径悬索桥静风扭转发散的实用方法 ..... 440

三、计算大跨径悬索桥侧向静风载效应的实用方法 ..... 442

第六节 结语 ..... 445

参考文献 ..... 446

第十二章 总结与展望 ..... 448

# 绪 论

1940 年 11 月 7 日,美国华盛顿州建成才四个月的塔科马 (Tacoma) 峡谷悬索桥在不到 20m/s 的八级大风作用下发生强烈的风致振动,桥面经历了 70min 振幅不断增大的反对称扭转振动,当桥面的 1/4 点达到  $\pm 35^\circ$  的扭转角时吊索被逐根拉断,并最终导致桥面折断坠落到峡谷中(图 1-1)。

在 1940 年 7 月 1 日通车后,该桥就多次发生竖向的风致弯曲振动。这一异常现象引起了当地华盛顿州立大学法库哈森 (Farquharson) 教授的注意,曾专门派人进行了监视,并且在事故发生当天用摄影机完整地记录下了风毁的全过程。这部珍贵的影片后来成为美国联邦公路局调查事故原因的重要资料,也是桥梁抗风研究的起点。

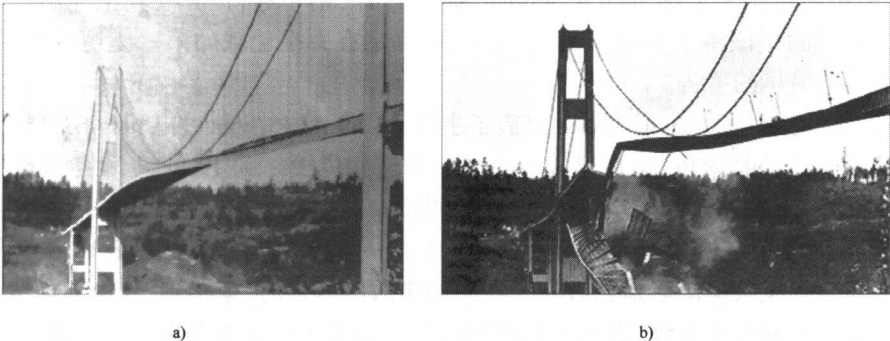


图 1-1 塔科马峡谷悬索桥的风毁  
a) 风致扭转振动; b) 桥面折断坠落

## 第一节 桥梁风毁事件的回顾(1818 ~ 1940 年)

在塔科马悬索桥风毁以前的很长时间内,人们都把风对结构的作用看成是一种由风压所形成的静力作用,在设计中仅考虑静力风荷载的作用。然而,在为调查事故原因而收集有关桥梁风毁的历史资料中,人们发现,从 1818 年起,至少已有 11 座悬索桥毁于强风(表 1-1)。而且从目击者所描述的风毁景象中可以明显地感到,事故的原因大部分是风引起的强烈振动,虽然对于这种风致振动的机理在风毁当时还不可能作出科学的解释。

遭 风 毁 的 桥 梁 表 1-1

| 风毁年份   | 桥 名            | 桥 址 | 主跨(ft) | 设 计 者              |
|--------|----------------|-----|--------|--------------------|
| 1818 年 | Dryburgh Abbey | 苏格兰 | 260    | John&William Smith |
| 1821 年 | Union          | 英格兰 | 449    | Sir Samuel Brown   |
| 1834 年 | Nassau         | 德国  | 245    | Lossen & Wolf      |

续上表

| 风毁年份   | 桥 名                 | 桥 址 | 主跨(ft) | 设 计 者            |
|--------|---------------------|-----|--------|------------------|
| 1836 年 | Brighton Chair Pier | 英格兰 | 255    | Sir Samuel Brown |
| 1838 年 | Montrose            | 苏格兰 | 432    | Sir Samuel Brown |
| 1839 年 | Menai Strait        | 威尔士 | 580    | Thomas Telford   |
| 1852 年 | Roche-Beruard       | 法国  | 641    | Le Blanc         |
| 1854 年 | Wheeling            | 美国  | 1010   | Charles Ellet    |
| 1864 年 | Lewiston-Queenston  | 美国  | 1041   | Edward Serrell   |
| 1889 年 | Nigara-Clifton      | 美国  | 1260   | Samuel Keefer    |
| 1940 年 | Tacoma Narrows      | 美国  | 2800   | Leon Moisseiff   |

西方国家的悬索桥最早出现于 18 世纪。根据世界科技史家、英国李约瑟博士的推断:铁(链)索桥(Iron Chain Bridge)起源于中国,通过 17 世纪《徐霞客游记》和法国传教士的《中国奇迹览胜》两本书中对中国铁索桥的描述直接导致了西方人进行建造悬索桥的尝试。

英国和美国在 18 世纪后半叶开始建造了最初的悬索桥,一种没有加劲梁的柔性悬索桥,跨度从 70ft(21.34m)起逐渐增大,到 19 世纪初建成了主跨 260ft(79.25m)的苏格兰 Dryburgh Abbey 桥。该桥由英国工程师 John & William Smith 设计,用于通行马车,其主缆用熟铁锻造的眼杆组成。不幸的是该桥于 1818 年毁于大风,这也是有文字记载的第一座遭风毁的悬索桥,它向人们发出了最早的警告。

1820 年,英国工程师 Samuel Brown 建造了主跨为 449ft(136.86m)的 Union 桥。这是英格兰第一座用眼杆建造的悬索桥,但在建成 6 个月后即遭到风毁。到 19 世纪 30 年代他又建成了几座悬索桥,为了汲取教训,增设了从塔顶辐射的拉索以提高刚度。但其中的两座:主跨 255ft(77.72m)的 Brighton Chain Pier 桥和主跨 432ft(131.67m)的 Montrose 桥分别于 1836 年和 1838 年又在经历了强烈的风致振动后遭到毁坏。在总结事故的教训时,他感到,仅由纵横梁排组成的过于柔性的桥面容易发生振动,提出了用抗扭较强的桁架作桥面的设想。应当说,这是一个正确的措施,但没有被人们充分理解和接受,对已建成的其他一些悬索桥也没有进行加固。1839 年,威尔士主跨达 580ft(176.78m)的 Menai 峡谷桥又发生了同样性质的风毁。

19 世纪的美国也建造了许多悬索桥,并且开始用钢丝绳做主缆代替熟铁眼杆,跨度超过 1000ft。不幸的是,英国的风毁教训并没有在美国得到重视。从 1854 年的 Wheeling 桥(跨度  $L = 1010\text{ft} \approx 307.85\text{m}$ )到 1889 年的 Nigara Clifton 桥(跨度  $L = 1260\text{ft} \approx 386.49\text{m}$ )发生了三次悬索桥的风毁(表 1-1)。

当美国工程师 John Roebling 在主持修复 Wheeling 桥和 Nigara Clifton 桥以及设计 19 世纪最大跨度的纽约 Brooklyn 桥(跨度  $L = 1595\text{ft} \approx 486.16\text{m}$ )时,他认识到采用桁架加劲梁和辅助斜拉索的必要性,虽然当时还不理解提高扭转刚度对抑制风振的作用。

在 20 世纪初,采用桁架加劲梁的悬索桥成为一种公认的抗风结构模式。1931 年 Othmar Ammann 设计的破千米记录的纽约华盛顿桥(跨度  $L = 1031\text{m}$ ),以及旧金山金门大桥(跨度  $L = 1280\text{m}$ , 1937)都是采用这种形式。

1888 年德国人 Melan 建立的悬索桥挠度理论逐渐传入美国。1909 年美国工程师 Moissieff 在设计纽约 Manhattan 桥时,首次采用了挠度理论并获得成功。他相信利用悬索桥的重力刚度可降低桥面的弯曲刚度,这就使设计人员放弃了桁架加劲梁,改用更为经济的板梁加劲梁。然



而,对扭转刚度的忽视导致了主梁高度和跨度比的急剧减小,这种设计思想使桥面质量减轻,刚度降低,断面气动性能恶化,最终造成了 Tacoma 桥的风毁。

## 第二节 桥梁抗风基础理论的建立(1940~1980 年)

在 Tacoma 桥风毁事故发生四个月,即组成了由 Farquharson 教授牵头,著名桥梁工程师 O.H. Ammann 和著名流体力学家 T. Von Karman 参加的委员会进行调查和分析,提出了五卷详细的报告,其中包括最早的节段模型试验,它重现了 Tacoma 桥的扭转发散振动。这份报告引起了许多学者的兴趣,从而开始了桥梁气动弹性理论研究的新时期。

在 20 世纪 30 年代,第一次世界大战后发展起来的航空空气动力学研究已经取得了不少重要的成果。1925 年 Wagner 最早提出了随时间变化的非定常气动力的概念,称为特征升力函数(Indicial lift function)。1935 年 Theodorsen 发表了著名的薄翼在非压缩流中的非定常气动力表达式,即 Theodorsen 函数。他的工作后来被证明和 Wagner 的工作有直接联系。不久,1936 年 Küssner 的论文奠定了与机翼颤振有关的非定常气动力以及阵风效应的理论基础。1938 年, Garrick 把上述理论中的有关函数用福里哀变换联系起来。

1941 年, Sears 发表了关于薄翼颤振及其在竖向正弦的脉动风中的行为的重要论文。在论文中,他定义了今天大家都熟知的 Sears 气动导纳的频域函数,为抖振分析奠定了基础。这样,在 20 世纪 40 年代初,空气弹性力学的理论基础已为实际工程应用做好了准备。第二次大战结束后,新一代的力学工作者终于可以利用这些空气弹性力学理论作为武器来解释 Tacoma 悬索桥风毁的原因了。

然而,在 Tacoma 桥风毁事故的调查报告中, Von Karman 却暗示迎风面主梁处的涡脱可能是风致振动的主要原因。因为在他和 Dunn 进行的节段试验中发现:如果去掉主梁,扭转发散振动就会消失。于是,在此后出版的一些重要著作如 Den Hartog 的《机械振动学》和冯元桢的《空气弹性理论引论》都认为 Karman 涡脱是 Tacoma 悬索桥风毁的主要原因,一些大学教科书也都沿用这一似是而非的解释。

1948 年, Bleich 最早提出将 Theodorsen 的平板颤振理论用于桥梁颤振分析,但是这一借鉴对于分析像 Tacoma 桥这样的非流线形桥面是不成功的。Pugsley 在对 Bleich 论文的评论中提出了具有预言性的建议:可以通过试验得到桥梁断面的气动导数。

1966 年,日本学者 Sakata 在国际桥梁会议上第一次发表了基于实测气动导数的桥梁颤振研究论文。与此同时,美国 Scanlan 也发表了类似的论文。随后,日本东京大学的 Ito 和 Tanaka 报告了用实测气动导数分析桥梁断面稳定性的论文。因此,在 1971 年第三届国际风工程会议(日本东京)上,有不少论文涉及桥梁颤振问题。其中特别重要的贡献当属上述的几位日本和美国学者。

1971 年, Scanlan 和 Tomko 发表了题为“机翼和桥面颤振导数(Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives)”的重要论文,文中对比了几种典型桥梁断面和机翼气动导数的本质差别,为建立不同于机翼颤振的桥梁颤振理论奠定了基础。同时,也为 Tacoma 桥的风毁找到了正确的科学解释——一种由负阻尼驱动的分流扭转颤振。Scanlan 指出: Tacoma 桥的扭转振动和涡脱频率完全无关,但他没有把实际存在的涡脱和气动阻尼从正变为负的现象联系起来加以考察。

1972 年, Scanlan 通过福里哀变换,在桥梁断面气动导数和相应的特征空气力函数(Indicial aerodynamic force functions)之间建立了联系,相当于机翼的 Wagner 函数和 Theodorsen 函数的关

系。到 20 世纪 70 年代末,理论分析的结果已得到节段模型风洞试验的有力验证。可以说,此时桥梁颤振理论已经有了坚实的基础。

最后,还应提到 Davenport 在 1962 年就提出了用准定常抖振力表达式辅以 Sears 气动导纳函数(使用 1952 年 Liepmann 提出的表达式)的修正来近似地估计桥梁的抖振响应,以及 Scanlan 在 1977 年对 Davenport 抖振分析方法的重要修正。Scanlan 认为在抖振分析中必须同时考虑平均风引起的自激力的作用,因为气动阻尼的参与将对抖振响应的结果产生不可忽视的影响。这一基于随机振动理论的频域方法仍是目前桥梁风致振动分析普遍采用的基本方法。

### 第三节 现代桥梁抗风理论的发展(1980~2000 年)

进入 20 世纪 80 年代后,一种大跨度新桥型——斜拉桥的跨度突破了 400m,抗风问题成了设计时需要重点考虑的因素。在应用适合悬索桥的二维颤振理论进行斜拉桥的气动稳定性分析时产生了一些争论:由于斜拉桥扭转变形和侧向弯曲变形的强烈耦合,存在以侧向弯曲为主带有少量扭转的振型和以扭转为主带有少量侧向弯曲的振型,如何选择主要的扭转振型是一个难以定夺的问题。为了解决这一难题,必须建立三维颤振理论,在求解中自动从全部模态中选择与颤振形态有关的扭转为主振型。同济大学率先提出并解决了这一问题,并发现了斜拉桥的多振型耦合颤振现象。

随着跨度的不断加大,侧向变形逐渐变成不可忽视的因素。在颤振分析中开始考虑与侧向位移有关的气动导数,使气动导数增加到 18 个,并且颤振和抖振分析也从独立的分开处理趋向统一的考虑。于是,在抖振分析中同时考虑自激力(气动阻尼和刚度)的作用,颤振分析中也应当考虑紊流风中脉动成分的影响,再加上各种耦合效应也十分重要,从而形成了完整的基于有限元法的三维颤抖振理论。

20 世纪 80 年代初美籍华人学者林幼堃(Y. K. Lin)用随机稳定性理论研究了紊流风场对颤振稳定性的影响,提出了紊流可能降低稳定性的论点,引起了风工程界的重视。Scanlan 系统地研究了紊流风场中的气动导数,和传统的在均匀风场中测得的值相比,确有明显的差别。然而,紊流风场的水平相关也相应减弱,总的来看,紊流风场既有不利的一面,也有有利的一面,临界风速仍要高于均匀风场中的值,而且发散的速度比较缓慢。因此,他认为颤振检验仍可以均匀风场中的试验值为准,理论分析所用的气动导数也可以在均匀流场中测定,大部分全桥气弹模型在两种风场中的对比试验也证实了这一点。Y. K. Lin 的研究也证明只有当紊流强度超过 20% 以上时,紊流使稳定性下降的趋势才变得明显,由于大跨度桥梁的桥面常高出水面 50~70m,而且在较高的颤振风速时的紊流强度也相对较小,因此,在抗风设计中把紊流作为提高稳定性的有利因素是符合实际情况的。

结构风振控制研究也是 20 世纪 80 年代的热点。在一些低阻尼的大跨度斜拉桥的钢桥塔和主梁中安装了被动阻尼器以抑制桥梁在施工过程中的风振或者在成桥运营阶段中的各类振动,取得了一定的效果。也有一些学者提出了许多采用主动控制装置的设想,但并未付诸实施。

进入 20 世纪 90 年代,日本的本四联络线工程进入最后阶段,两座代表本世纪桥梁跨度记录的大桥——主跨 1991m 的明石海峡悬索桥和主跨 890m 的多多罗斜拉桥开工兴建。丹麦也在完成了小海带桥后开始建造主跨 1624m 的大海带桥。在进行这些特大跨度桥梁的抗风研究和风洞试验中,日本和欧洲的风工程学者都发现现有的线性风振理论已不能适应这些在风载

作用下会发生较大侧向弯曲和扭转变形的柔性结构,应当跟踪变形后的结构状态来研究其风致振动,以消除线性理论带来的误差。为了考虑非线性效应,提出了抖振的时域分析方法,关键是将风速谱转换成脉动风的时域信号,以便形成抖振力的时程,同时,原来以气动导数表达的自激力也要转换成时间历程,最后通过不断修改系统的刚度和阻尼以及风荷载矩阵进行逐步的时程分析求得颤振和抖振的解。

大跨度斜拉桥的拉索风雨振动是 20 世纪 90 年代发现的新问题,强风和大雨使拉索表面出现一个下泄的水道,造成圆形表面的异化,从而激起类似于结冰电缆驰振的强烈的风雨振动。由于这种拉索振动的机理十分复杂,至今仍无明确的空气动力学解释。日本、德国、法国和中国都在通过风洞试验观察这种现象以探索其致振机理,同时寻找抑制这种振动的有效方法。

在 1991 年的第八届国际风工程会议上,Davenport 教授提出了用概率方法进行抗风设计的框架,以便和结构设计规范正在向基于可靠度的概率性设计过渡的进程相适应。迄今为止的抗风设计仍是确定性的模式,虽然在基本风速的确定中包含着一些概率性的因素,但气动参数和结构阻尼以及由此计算的颤振风速和风荷载都作为确定值,同时用一个综合的安全系数考虑各种参数的不确定性。随着桥梁的长大化,需要对一些具有交通枢纽作用的超大跨度桥梁按生命线工程进行防灾危险性分析,并对其安全作出概率性评价。为此必须深入研究各种风特性参数和结构气动参数的不确定性以获得统计值,以最终使结构的抗风设计过渡到概率方法,改变目前偏保守的估计和模糊的安全评价。

20 世纪 90 年代初,从航空领域引入土木结构的计算流体力学(CFD)技术已取得了初步的进展。1993 年丹麦的 Walther 第一次用计算流体力学方法算出了平板的气动导数,并进而算得二维颤振临界风速,迈出了“数值风洞”的重要一步。随后,又以丹麦大海带桥为工程背景,解决了流线型桥面颤振的数值模拟。此后,世界各国纷纷仿效,并在算法上进行改进。目前,在初步设计阶段,对大跨度桥梁的断面进行气动选型已成功地应用“数值风洞”的方法。然而,对于“数值风洞”在土木工程领域的应用前景仍有不同的看法:一方面用于计算分析模型的参数存在着不确定性,并且建筑钝体空气动力学在建立数学模型方面还存在理论上的困难;另一方面,风洞试验技术的进步使试验周期和费用相对于“数值风洞”仍具有竞争力,并且数值分析所需的结构气动参数有些还要依赖风洞试验的测定,因此,21 世纪的最初 20 年将可能还是以风洞试验为主,辅以数值模拟的时期。

1990 年英国的 Wyatt 和 Walshe 为纪念 Tacoma 桥风毁 50 周年发表文章指出,尽管现有的风振理论能够为桥梁的抗风安全提供可靠的依据,然而“流体和结构的相互作用机理仍然不是完全清楚的”,我们对于风振机理的研究仍是滞后的,其中也包括对 Tacoma 桥风毁的解释。1992 年,日本的 Matsumoto 在对 H 形断面颤振机理的试验研究中观察到脱落的旋涡沿桥面的飘移。此后,丹麦的 Walther 和 Larsen 采用离散涡方法用计算流体力学研究了 Tacoma 桥断面绕流时的涡脱和非定常气动力,并通过流态显示和振动响应的数值模拟来揭示流体和结构相互作用的全过程,研究证明:卡门涡脱可以引起有限的扭转振动,相应的流态也展现出旋涡沿桥面的飘移,但不是发散性扭转振动的主要原因。可以预期:计算流体力学(CFD)作为研究风致振动机理的有力手段将会发挥愈来愈重要的作用。

回顾桥梁风工程 60 年来的发展和所取得的成果,我们可以概括地说,在 20 世纪 60 年代奠基的桥梁颤振和抖振理论,经过不断的补充和完善,这些基于准定常假设、线性和频域的分析方法以及通过节段模型风洞试验识别气动参数和全模型试验进行检验的方法可以基本满足