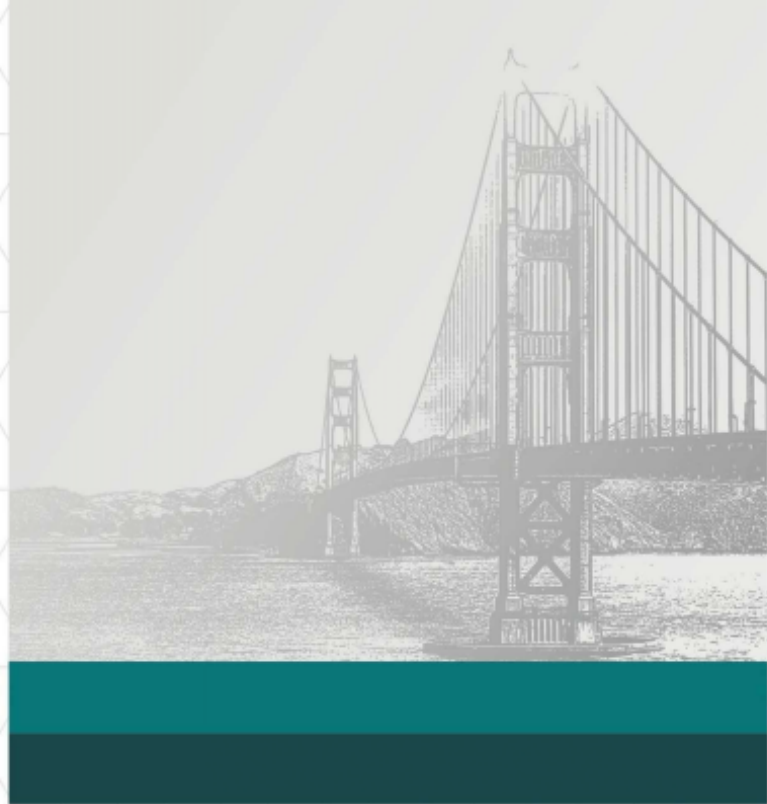




大跨度悬索桥

施工过程颤振稳定性分析及非线性影响因素探究

廖玉凤 王 伟 / 著

DAKUADU XUANSUOQIAO

SHIGONG GUOCHENG CHANZHEN

WENDINGXING FENXI JI FEIXIANXING YINGXIANG YINSU TANJIU



四川大学出版社

大跨度悬索桥

施工过程中颤振稳定性分析及非线性影响因素探究

—— 廖玉凤 王 伟 / 著 ——

DAKUADU XUANSUOQIAO

SHIGONG GUOCHENG CHANZHEN

WENDINGXING FENXI JI FEIXIANXING YINGXIANG YINSU TANJIU



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:蒋 琦
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

大跨度悬索桥施工过程颤振稳定性分析及非线性影响因素探究 / 廖玉凤, 王伟著. —成都: 四川大学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5690-1132-6

I. ①大… II. ①廖… ②王… III. ①长跨桥—悬索桥—桥梁施工—颤振—稳定性—影响因素
IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 218856 号

内容提要

本书主要内容包括大跨度悬索桥抗风发展历程、抗风研究方法与研究现状, 大气边界层风特性及其风洞试验技术, 大跨度悬索桥颤振分析理论, 某悬索桥三维颤振稳定性分析, 大跨度悬索桥静风稳定性非线性分析, 某悬索桥非线性颤振分析的参数化研究, 悬索桥施工过程提高颤振稳定性措施研究等。

本书可供大跨度悬索桥抗风稳定性研究的广大科技工作者和工程师学习使用, 也可供上述专业领域的高年级本科生及研究生学习参考。

书名 大跨度悬索桥施工过程颤振稳定性分析及非线性影响因素探究

著者 廖玉凤 王伟
出版 四川大学出版社
地址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发行 四川大学出版社
书号 ISBN 978-7-5690-1132-6
印刷 四川胜翔数码印务设计有限公司
成品尺寸 185 mm×260 mm
印张 10.25
字数 251 千字
版次 2017 年 9 月第 1 版
印次 2017 年 9 月第 1 次印刷
定价 36.00 元



- ◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。
电话: (028)85408408 / (028)85401670 /
(028)85408023 邮政编码: 610065
- ◆本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。
- ◆网址: <http://www.scupress.net>

版权所有◆侵权必究

前 言

特大跨度悬索桥以其卓越的跨越能力以及轻型、美观等特点，从 20 世纪 90 年代中期开始在我国得到了迅速发展，期间先后建成了多座特大跨度的悬索桥。由于很多特大规模的跨江跨海工程正处于建设阶段，我国未来二三十年仍将维持大规模建设的高峰。可以预见，随着现代经济和交通运输的不断发展，大跨度缆索支承桥梁将会有着更为广阔的工程应用前景，其跨度也将越来越大。

随着悬索桥主跨跨度的不断增大，结构趋向柔性，对风的敏感性也随之增大。同时，这些大桥通常跨越较宽的江河或海峡，其所处地区的风速往往很大，甚至有可能出现遭受台风正面袭击的情况，使得风荷载通常成为桥梁设计的主要控制荷载。颤振作为桥梁结构风致振动重要的振动形式，其稳定性已成为控制桥梁施工与设计非常关键的因素。特别是在施工的初期，结构的刚度比成桥状态小很多，使得颤振临界风速也大幅下降，这就有可能引起桥梁构件的强度或疲劳破坏、施工过程中存在安全隐患等严重后果。

本书在研究了大气边界层风特性及其风洞试验技术、大跨度悬索桥颤振分析理论后，首先基于状态空间法推导了三维颤振运动方程，然后编程实现了颤振运动方程的求解，并以两个简单的例子验证程序的正确性；之后对某大跨度悬索桥进行了不同施工状态的颤振临界风速计算，同时探讨了不同主梁刚度折减和不同结构阻尼时颤振临界风速的变化规律；非线性因素对悬索桥颤振稳定性的影响随着跨度的增大而愈加不容忽视，因此本书还计算了考虑结构动力特性非线性变化和气动力非线性变化的某悬索桥的颤振临界风速，并探讨了不同非线性因素对颤振分析结果的影响程度；最后研究了采用辅助索和不对称施工对提高悬索桥施工过程中颤振稳定性的作用。

全书共 7 章：第 1 章绪论；第 2 章大气边界层风特性及其风洞试验技术；第 3 章大跨度悬索桥颤振分析理论；第 4 章某悬索桥三维颤振稳定性分析；第 5 章大跨度悬索桥静风稳定性非线性分析；第 6 章某悬索桥非线性颤振分析的参数化研究；第 7 章悬索桥施工过程提高颤振稳定性措施研究。

本书在编写过程中，参考了相关标准、图集及大量的著作与文献资料，在此谨

向这些文献的作者表示诚挚的谢意。同时，本书的编写也得到了各位同仁和出版社的指导，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之编写时间仓促，本书难免存在疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

著 者

2017 年 7 月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 大跨度悬索桥发展概况	(1)
1.2 大跨度悬索桥抗风发展历程	(5)
1.3 大跨度悬索桥抗风研究方法	(11)
1.4 大跨度悬索桥颤振特性研究的国内外现状	(16)
第 2 章 大气边界层风特性及其风洞试验技术	(19)
2.1 大气边界层风特性	(19)
2.2 风洞试验技术	(43)
第 3 章 大跨度悬索桥颤振分析理论	(66)
3.1 大跨度悬索桥颤振理论发展	(66)
3.2 大跨度悬索桥颤振时域分析方法	(75)
3.3 大跨度悬索桥颤振频域分析方法	(88)
3.4 三维多模态耦合颤振频域分析程序及分析思路	(99)
3.5 算例分析	(101)
第 4 章 某悬索桥三维颤振稳定性分析	(104)
4.1 工程背景	(104)
4.2 某悬索桥各施工阶段动力特性计算	(105)
4.3 某悬索桥各施工阶段颤振稳定性分析	(108)
4.4 某悬索桥颤振分析的参数化研究	(111)
4.5 关于悬索桥颤振分析的几点结论	(115)
第 5 章 大跨度悬索桥静风稳定性非线性分析	(116)
5.1 大跨度悬索桥静风稳定性分析概述	(116)
5.2 大跨度悬索桥静风稳定性非线性分析理论	(119)
5.3 大跨度悬索桥静风稳定性非线性分析方法	(134)
5.4 某悬索桥静风稳定性非线性颤振分析	(138)

第 6 章 某悬索桥非线性颤振分析的参数化研究…………… (140)

6.1 非线性因素对颤振临界风速的影响 …………… (140)

6.2 初始攻角对颤振临界风速的影响 …………… (146)

6.3 非线性颤振分析参数化研究的几点结论 …………… (148)

第 7 章 悬索桥施工过程提高颤振稳定性措施研究…………… (149)

7.1 大跨度悬索桥风致振动控制措施 …………… (149)

7.2 某悬索桥施工过程提高颤振稳定性的措施 …………… (151)

参考文献…………… (157)

第 1 章 绪 论

悬索桥也称吊桥，是以受拉主缆为主要承重构件的桥梁结构。其主要构造有桥塔（包括基础）、主缆（也称大缆）、加劲梁、锚碇、吊索（也称吊杆）、鞍座及桥面结构等。由于悬索桥是以高强钢丝作为主要承拉结构，所以具有跨越能力大、受力合理、最能发挥材料强度等优点。另外，悬索桥还具有整体造型流畅美观和施工安全快捷等优势。在桥梁设计时，当所需要的跨度超过 1 000 m 时，悬索桥总是备受推崇的经典桥型。

1.1 大跨度悬索桥发展概况

悬索桥的历史是古老的。据说最早悬索桥的构思来源于猴桥，它是由若干强壮的猴子组成一条悬链来让病猴或年老力衰的猴子通过的桥梁。而早期热带原始人，曾利用森林中的藤、竹、树茎做成悬索桥以渡小溪，使用的悬索有竖直的、斜拉的，还有两者混合的，这就是最早的悬索桥雏形。我国四川省都江堰市早在千年之前就出现了竹索桥，而铁链悬索桥开始于 17 世纪，我国四川省大渡河上由 9 条铁链组成的泸定桥是在 1706 年建成的，1741 年英国建成了跨度为 21.34 m 的铁链悬索桥，使用了 61 年。到 19 世纪，悬索桥又发展成为采用眼杆与销铰做悬链的桥梁。英国 1826 年建成的跨度为 177 m 的麦地海峡桥和 1864 年建成的跨度为 214 m 的克利夫顿桥都属于这种形式，这两座古老的悬索桥至今尚在使用。利用钢缆绳、钢绞线和钢丝等现代钢材来建造的悬索桥基本上是进入 20 世纪后才出现的。

现代悬索桥的发展迄今出现了四次高峰。在第一次与第二次高峰之间的 20 世纪 40 年代，因美国塔科马海峡（Tacoma Narrows）大桥的风毁事故，大跨度悬索桥的修建停顿了约有 10 年之久。但在此期间，由于悬索桥的抗风设计引入了风洞试验而使悬索桥的发展在 20 世纪 50 年代得到复苏，并分别在 60 年代与 80 年代进入第二次与第三次高峰。进入 20 世纪 90 年代之后，包括中国在内的在全球范围内又出现新的建设高峰，即目前的第四次高峰。

1.1.1 国外发展概况

国外悬索桥的发展形成了以英国为代表的英派悬索桥风格和以美国为代表的美派悬索桥风格。日本近代悬索桥发展势头迅猛，后来居上。下面分别对欧洲、美国和日本的悬索桥发展作概略的叙述。

1. 欧洲悬索桥的建设

20 世纪欧洲悬索桥的建设发展迅速并有所创新。法国于 1959 年建成了主跨为 608 m 的坦卡维尔悬索桥，其创新之处为加劲桁梁连续，在塔墩处不断开，将主缆与加劲梁在主跨跨中点固结，桥塔为混凝土。

英国在 1964 年和 1966 年先后建成了主跨为 1 006 m 的福斯（Forth）公路悬索桥和主跨为 988 m 的塞文河（Seven）桥。Forth 桥基本上属于美国流派的悬索桥，主要技术是从美国引进的，其他方面有所改进。而 Seven 桥的建成则是悬索桥发展中的一个新里程碑，该桥的创新点体现在第一次采用了扁平纤细、截面具有良好抗风性能的全焊流线型钢箱梁，打破了钢桁架加劲梁一统天下的局面。另外，该桥还采用了斜吊索，以提高桥梁的抗风阻尼。

随后，1970 年在丹麦建成的主跨为 600 m 的小贝尔特（Little belt）桥和 1973 年在土耳其建成的主跨为 1 074 m 的博斯普鲁斯（Bosporus）一桥，主要结构构思均与 Seven 桥相似，为扁平流线型加劲钢箱梁。1981 年，英国建成了如图 1.1 所示的恒伯尔（Humber）特大跨悬索桥，主跨为 1 410 m，也是扁平钢箱加劲梁，采用混凝土桥塔，为当时世界上第一大跨度桥梁。1988 年土耳其建成 Bosporus 二桥，主跨为 1 090 m，扁平钢箱加劲梁，采用直吊杆。1998 年，丹麦建成了如图 1.2 所示的大贝尔特（Great belt）悬索桥，主跨为 1 624 m，也为扁平钢箱加劲梁。



图 1.1 英国恒伯尔大桥



图 1.2 丹麦大贝尔特大桥

欧洲现代大跨悬索桥的修建确定了混凝土桥塔、扁平流线型全焊加劲钢箱梁悬索桥的优势，且比桁架式加劲梁节省工程投资费用 10% 左右。因为欧洲大部分悬索桥为英国人设计，所以形成了英国流派的悬索桥风格。

2. 美国悬索桥的建设

20 世纪初期, 美国大城市的兴起, 促进了大跨桥建设的发展。在 1920 年之前, 美国相继建成的悬索桥有匹兹堡桥、布鲁克林桥、威廉斯堡桥、曼哈顿桥等。1931 年, 美国在国际上率先建成跨度超过千米的乔治华盛顿 (George Washington) 大桥, 主跨达 1 067 m; 1937 年建成如图 1.3 所示的旧金山金门 (Golden Gate) 大桥, 主跨 1 280 m, 曾保持世界上最大桥跨纪录达 27 年之久, 使美国的悬索桥建设成就遥遥领先于其他国家。

1940 年, 美国发生了塔科马海峡 (Tacoma Narrows) 大桥的风毁事故, 悬索桥建设步伐放慢。专家们经过多方调查、风洞试验研究和科学分析, 认识到风对悬索桥涡流和颤振的动力作用, 即塔科马海峡大桥用下承式钢板梁作为加劲梁, 抗风可靠性极差, 并提出了相应的处治对策。通过此风毁事故的教训, 世界各国在较大跨悬索桥中不再使用钢板梁作为加劲梁。

20 世纪 50 年代, 美国的悬索桥又蓬勃发展起来, 其代表作为 1964 年建成的韦拉扎诺海峡 (Verrazzano Narrows) 桥, 主跨达 1 298 m, 双层桥面, 12 条车道, 创造了新的桥梁跨度世界纪录, 并保持 17 年之久。美国至今仍是世界上拥有悬索桥最多的国家, 在科研、设计和施工技术上形成了优势, 使悬索桥成为唯一超过千米的成熟桥型, 并形成了美国流派的悬索桥风格。

3. 日本悬索桥的建设

进入 20 世纪 90 年代, 世界悬索桥的发展中心已从欧美转移到亚洲。亚洲悬索桥的建设以日本悬索桥的建设为典型代表。日本 1962 年建成了主跨为 367 m 的若户大桥。随后主要在本州四国联络线中修建了 11 座特大跨度的悬索桥。较著名的悬索桥有: 主跨为 770 m 的因岛大桥, 主跨为 876 m 的大鸣门桥, 主跨为 940 m 的下津井濑户大桥, 主跨分别为 990 m 和 1 100 m 的北、南备赞大桥, 如图 1.4 所示的世界上第一大跨度达 1 990.8 m 的明石海峡大桥也于 1998 年建成。此外, 在日本的东京湾与北海道已分别建成主跨为 570 m 的彩虹 (Rainbow) 桥和主跨为 720 m 的白鸟大桥, 其中彩虹桥的荷载规模 (双层桥面, 共有 8 个高速车道与双线导轨式交通车) 与结构规模 (主缆直径 771 mm, 相当于千米大跨度桥) 都是相当巨大的。日本的悬索桥, 大部分为钢塔和钢桁加劲梁, 并且大多为公铁两用悬索桥。



图 1.3 美国旧金山金门大桥



图 1.4 日本明石海峡大桥

1.1.2 国内发展概况

中华人民共和国成立后，共建成了 70 多座悬索桥，但其结构形式都比较简洁，跨度不太大，工程规模较小。进入 20 世纪 90 年代，中国现代悬索桥的建设揭开了新的历史篇章，如图 1.5 所示的主跨为 452 m 的广东汕头海湾大桥被誉为中国第一座大跨度现代悬索桥，其主跨位居预应力混凝土加劲梁悬索桥世界第一。西陵长江大桥，主跨为 900 m，是国内自主设计制造的第一座全焊接钢箱加劲梁悬索桥。广东虎门大桥主航道悬索桥，主跨为 888 m，是中国第一座高速公路上的六车道悬索桥。香港青马大桥，是一座主跨为 1 377 m 的双跨钢桁加劲梁悬索桥。江苏江阴长江大桥，是一座主跨为 1 385 m 的钢箱加劲梁悬索桥。丰都长江大桥，是一座主跨为 450 m 的浅钢桁加劲梁式悬索桥。如图 1.6 所示的江苏润扬长江大桥，是一座主跨为 1 490 m 的扁平钢箱加劲梁悬索桥，其锚碇锚体浇筑混凝土近 6 万立方米，为国内第一大锚碇。如图 1.7 所示的浙江舟山西堠门大桥，是一座主跨为 1 650 m 的连续扁平钢箱加劲梁悬索桥，其跨度位居悬索桥世界第二。如图 1.8 所示的湖南湘西矮寨大桥，是一座主跨为 1 176 m 的钢桁加劲梁单跨峡谷悬索桥，该桥因桥位地形险要，施工技术难度大，创造了“四个世界第一”。目前，我国有多座悬索桥正在建设和筹划建设中。可以预见，随着我国桥梁科研、设计、施工队伍科技水平的不断提高，跨越中国辽阔大地上的江河湖泊、海峡港湾的悬索桥会修建得更多、更好。



图 1.5 广东汕头海湾大桥



图 1.6 江苏润扬长江大桥



图 1.7 浙江舟山西堠门大桥



图 1.8 湖南湘西矮寨大桥

综上所述，国内外悬索桥的建设一次次刷新了桥梁的跨度记录，并将在 21 世纪桥梁的建设中，继续显示出特大跨度悬索桥的勃勃生机。

1.2 大跨度悬索桥抗风发展历程

风对桥梁造成的危害是多方面的，桥面振动有可能导致交通中断或使行人丧失安全感，导致桥梁构件过早疲劳破坏，严重的还会造成桥毁人亡的惨剧。大跨度悬索桥的抗风性能研究就是针对各种风致桥梁危害提出来的。

1.2.1 桥梁风毁事故回顾

1940 年 11 月 7 日，美国华盛顿州才建成 4 个月的塔科马海峡（Tacoma Narrows）大桥在不到 20 m/s 的八级大风作用下发生强烈的风致扭转振动，桥面经历了如图 1.9（a）所示的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，如图 1.9（b）所示。塔科马海峡大桥刚通车运营，就表现出了在风的作用下发生强烈振动的倾向。运营初期发生的振动是竖向振动，振幅达 1.5 m，但达到最大振幅后尚可衰减下来。4 个月后，情况发生了灾难性的转变。随着中跨用于阻止加劲梁与主缆之间相对位移的斜拉索断裂，振型突然改变，变成了以一阶反对称扭转振型为主。在风速不大的情况下，扭转振动越来越激烈，主跨 1/4 断面以 $\pm 35^\circ$ 的幅度反复翻转。这种自激发散振动持续了 3~7 h，最后吊索疲劳断裂，大部分加劲梁坠入河中。幸运的是，这次事故没有人员伤亡，而且当时在现场的一位摄影师拍下了塔科马海峡大桥风毁的全过程，给桥梁抗风研究留下了宝贵的资料。



图 1.9 塔科马海峡大桥的风毁

在塔科马海峡大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，至少已有如表 1.1 所示的 11 座悬索桥毁于强风。同时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由风引起的强烈振动，但是对于这种风致振动的风毁机理在当时还不可能做出科学的解释。

表 1.1 遭风毁的桥梁

风毁年份	桥名	桥址	主跨（英尺，ft）	设计者
1818	Dryburgh Abbey	苏格兰	260	John 和 Willian Smith
1821	Union	英格兰	449	Samuel Brown
1834	Nassau	德国	245	Lossen 和 Wolf
1836	Brighton Chair Pier	英格兰	255	Samuel Brown
1838	Montrose	苏格兰	432	Samuel Brown
1839	Menai Strait	威尔士	580	Thomas Telford
1852	Roche Beruard	法国	641	Le Blanc
1854	Wheeling	美国	1 010	Charles Ellet
1864	Lewiston Queenston	美国	1 041	Edward Serrell
1889	Nigara Clifton	美国	1 260	Samuel Keefer
1940	Tacoma Narrows	美国	2 800	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》两本书中对中国的铁索桥的描述，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 70 ft（21.34 m）起逐渐增大，到 19 世纪初建成了主跨为 260 ft

(79.25 m)的苏格兰 Dryburgh Abbey 桥。该桥由英国工程师 John 和 Willian 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 449 ft (136.86 m) 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:主跨为 255 ft (77.72 m) 的 Brighton Chairn Pier 桥和主跨为 432 ft (131.67 m) 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,他认为仅由纵横梁组成的过于柔性的桥面容易发生振动,从而提出了用抗扭较强的桁架作为桥面的设想。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,主跨达 580 ft (176.78 m) 的威尔士 Menai Strait 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,并且开始用钢丝绳作主缆代替熟铁眼杆,跨度超过 1 000 ft。不幸的是,英国悬索桥的风毁教训并没有在美国得到重视。从 1854 年的 Wheeling 桥(跨度 $L=1\,010\text{ ft}\approx 307.85\text{ m}$)到 1889 年的 Nigara Clifton 桥(跨度 $L=1\,260\text{ ft}\approx 386.49\text{ m}$),发生了三次悬索桥的风毁事故。

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 $L=1\,595\text{ ft}\approx 486.16\text{ m}$)时,他认识到采用桁架加劲梁和辅助斜拉索的必要性,虽然当时他还不理解提高扭转刚度对抑制风致振动的作用。

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 $L=1\,031\text{ m}$),以及 1937 年 Joseph Strauss 设计的旧金山金门大桥(跨度 $L=1\,280\text{ m}$)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 Moisseiff 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,最终造成了塔科马海峡大桥的风毁。

1.2.2 桥梁抗风基础理论建立

在塔科马海峡大桥风毁事故发生 4 个月后,即组成了由 Farquharson 教授牵头,著名桥梁工程师 O. H. Ammann 和著名流体力学专家 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,它重现了塔科马海峡大桥的扭转发散振动。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, Theodorson 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 Theodorson 函数。他的工作后来被证明和 Wagner 的工作有直接联系。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傅里叶变换联系起来。

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。第二次世界大战结束后,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塔科马海峡大桥风毁的原因了。

然而,在塔科马海峡大桥风毁事故的调查报告中, T. 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,他在和 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 涡脱是塔科马海峡大桥风毁的主要原因,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 Theodorson 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塔科马海峡大桥这样的非流线型桥面是不成功的。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纳函数。

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纳函数的桥梁颤振研究论文。与此同时,美国学者 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和稳定性的论文。因此,1971 年在日本东京举办的第三届国际风工程会议上,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纳函数的本质区别,为建立不同机翼颤振的桥梁颤振理论奠定了基础。同时,也为塔科马海峡大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:塔科马海峡大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 通过傅里叶变换,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 Theodorson 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目前仍是桥梁风致振动分析普遍采用的基本方法。

1.2.3 现代桥梁抗风理论的发展

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 400 m,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,如何选择一个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,颤振分析中也应该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,确有明显的区别。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,大部分全桥气动弹性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% 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 50~70 m,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。

结构风致控制研究也是 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 20 世纪桥梁跨度记录的大桥——主跨为 1 990.8 m 的明石海峡悬索桥和主跨为 890 m 的多多罗斜拉桥开工兴建。丹麦也在完成了小贝尔特桥后开始建造主跨为 1 624 m 的大贝尔特桥。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了一个下泄的水道,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,并对其安全做出概率性评价。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,并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动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术已取得了初步的进展。1993 年,丹麦的 Walther 第一次用计算流体动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,又以丹麦大贝尔特桥为工程背景,解决了流线型桥面颤振的数值模拟。此后,世界各国纷纷效仿,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。