

斜拉桥的 拉索振动与控制

Cable Vibrations
in Cable-Stayed Bridges

[葡] 埃尔莎·德·萨·卡埃塔诺 著
张德祥 译
罗世东 校

中国建筑工业出版社

斜拉桥的 拉索振动与控制

Cable Vibrations
in Cable-Stayed Bridges

[葡] 埃尔莎·德·萨·卡埃塔诺 著
张德祥 译
罗世东 校

常州大学图书馆
藏书章

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2011-3461号

图书在版编目(CIP)数据

斜拉桥的拉索振动与控制/(葡)卡埃塔诺著;张德祥译. —北京:中国建筑工业出版社, 2011.11

ISBN 978-7-112-13643-8

I. ①斜… II. ①卡…②张… III. ①斜拉桥-桥梁-振动-研究 IV. ①U448.27

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第204840号

Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges, Elsa de Sá Caetano/Copyright © 2007 by
International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form or by any means,
electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and
retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Reprinted in Chinese by China Architecture & Building Press (CABP)

Translation copyright © 2011 China Architecture & Building Press

本书经IABSE授权我社翻译出版

责任编辑:白玉美 率 琦

责任设计:赵明霞

责任校对:陈晶晶 赵 颖

斜拉桥的拉索振动与控制

Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges

[葡] 埃尔莎·德·萨·卡埃塔诺 著

张德祥 译

罗世东 校

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 10³/₄ 字数: 266千字

2012年4月第一版 2012年4月第一次印刷

定价: 36.00元

ISBN 978-7-112-13643-8

(21422)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

世界各地斜拉桥不同的拉索振动现象，使人们必须对这些现象进行了解并加以控制。在过去 20 多年间，人们已经进行了大量的研究，并在设计实践中应用，与此同时，国家科研机构、编制结构安全设计与评估规程规范的部门所进行的学术研究项目，也已建立了一个解决问题的框架。

本书对有关拉索振动既有的知识进行了综述，主要集中在振动控制因素、评估振动影响的方法，以及振动控制设备的设计。

很显然，将研究成果付诸实施，并从实践中学习，激励了有经验的设计和咨询人员，根据其所参与的特定项目进行论文写作。在此，我想对下述提供意义深远的、内容丰富的研究报告的作者深表谢意，他们是：Yves Bournand 博士（VSL 国际）、Chris Geurts（荷兰应用科学研究院，TNO）、Carl Hansvold（Johs.Holt 公司）、Allan Larsen（丹麦科威公司）和 Randall Poston（WDP 及其联合事务所）。

我还要感谢全世界许多研究人员的支持与提供的材料，对他们的工作表示敬意。我要特别提到的是：Yozo Fujino 教授、Hoang Nam 博士、Masaru Matsumoto 教授及 Hiroshi Tanaka 教授，他们仔细审核了原稿并提供了重要的研究报告。我还要感谢以下人士提供的资料和图片，他们是：Hiroki Yamaguchi 教授及 Steen Krenk、Shaohong Cheng 博士、Olivier Flamand、Christian Cremona 及 António Pinto da Costa、Craig Winters 先生和 Philippe Duflo。

最后，我想感谢国际桥梁与结构工程协会（IABSE）提供机会并支持出版本书，并感谢编委会主席 Geoff Taplin 博士，因为有了他的承诺，才使得本书成功出版。

埃尔莎·德·萨·卡埃塔诺
葡萄牙波尔图大学工程系
2007 年 8 月于波尔图

目 录

第 1 章 概述	1
第 2 章 正文的组成	2
第 3 章 斜拉桥建设简史	3
第 4 章 由风和雨直接引发的振动现象	9
4.1 斜拉索上的风荷载	9
4.1.1 浸入均匀流体中的固定圆柱体	9
4.1.2 浸入湍流中的固定圆柱体	13
4.1.3 浸入湍流中的移动圆柱体	15
4.1.4 线性化运动方程	16
4.2 抖振	17
4.3 涡激振动	18
4.3.1 基本特征	18
4.3.2 振动幅度	20
4.4 驰振	24
4.4.1 基本原理	24
4.4.2 预测及控制措施	27
4.5 尾流效应	28
4.5.1 抖振共振	28
4.5.2 涡激共振	29
4.5.3 干扰效应	29
4.6 风雨激振	33
4.6.1 现象的识别	33
4.6.2 实验观测	34
4.6.3 解析和设计模型	39
4.6.4 失稳机理	44
4.6.5 风雨激振的其他可变因素	46

4.6.6	风雨激振实例及预防措施	46
4.7	阻力危机	48
第 5 章	间接激励	49
5.1	概述	49
5.2	外部激励	50
5.2.1	线性模型	50
5.2.2	拉索的线性响应	51
5.2.3	非线性模型	52
5.3	参数激励	56
5.3.1	一般方程	56
5.3.2	在斜拉索上的应用	59
5.3.3	外部 / 参数激励实例	60
5.4	拉索与结构的相互作用	61
第 6 章	斜拉桥的振动控制	63
6.1	概述	63
6.2	振动控制系统	63
6.2.1	振动的气动控制	63
6.2.2	振动的结构控制	64
6.2.3	振动的机械控制	65
6.2.4	主动控制系统	68
6.3	最佳被动阻尼器设计	69
6.3.1	概述	69
6.3.2	最新研究	69
6.3.3	问题公式化	70
6.3.4	实际应用	90
第 7 章	案例报告	96
7.1	斯卡恩圣特大桥 (挪威)	97
7.2	普恩特皇家大桥 (西班牙巴达霍斯)	98
7.3	老兵纪念碑大桥和弗雷德哈尔曼大桥 (美国得克萨斯州)	100
7.4	伊拉兹马斯大桥 (荷兰鹿特丹)	104
7.5	汲水门大桥 (中国香港)	109
7.6	厄勒海峡大桥 (丹麦 - 瑞典)	112
7.7	乌德瓦拉布隆大桥 (瑞典)	114
7.8	摩擦阻尼器试验	116

附录 A	拉索的变形特征	119
A.1	目标	119
A.2	静态性状	119
A.2.1	一般假定：弹性悬链线	119
A.2.2	弹性抛物线	123
A.2.3	数值模型	124
附录 B	拉索动力学的基本原理	132
B.1	目标	132
B.2	水平－拉索振动的线性理论	132
B.2.1	基本假定和平衡方程	132
B.2.2	固有频率和模态振型	133
B.3	斜拉索的振动线性理论	137
B.3.1	简化法	137
B.3.2	渐近线法	137
B.4	弯曲刚度效应	141
B.4.1	紧拉弦法	141
B.4.2	简化的松垂拉索法	141
附录 C	拉索力和阻尼的评估	144
C.1	概述	144
C.2	力评估的方法	144
C.2.1	用张拉千斤顶直接测量应力	144
C.2.2	环测力传感器或应变仪在钢绞线上的应用	144
C.2.3	拉索伸长率的测量	145
C.2.4	地形测量	145
C.2.5	振动方法	145
C.3	基于振动方法的力和阻尼评估	146
C.3.1	振动弦理论	146
C.3.2	弯曲和松垂效应	147
C.3.3	拉索频率的测量	147
C.3.4	拉索阻尼的估算	148
C.3.5	实际应用	150
	参考文献	154

第1章 概述

斜拉桥在 20 世纪下半叶业已确立，是一种既经典又新型的桥型。与悬索桥相比刚度相对较大，适合于在软土中进行平衡法施工，并为大跨度和中等跨度的桥梁提供有经济优势与显著美学特征的结构解决方案，使得这种桥跨结构的建设在全世界有了巨大增长。很自然，伴随这种增长，带来的是逐渐大型化和更为纤细的结构重大技术开发。斜拉桥要承受多种动荷载作用，如：交通、风、行人和地震作用，要描述这些荷载的效应相当复杂。此外，斜拉索是一种很柔性的结构构件，通常具有阻尼系数较小的特性，所以，这些构件极易受到振动是不难理解的。

以前关于拉索振动的报告提到法国的布鲁东纳（Brotonne）桥，可追溯到 1976 年^[1]。根据斯蒂梅尔（Stiemer）等人的监测^[2]，振动如此之大，以至于几乎平行的拉索，中心相距 1957mm，最长拉索还是发生相互碰撞。尽管在当时还不了解这些振动源，但通过在靠近桥面锚固端安装黏滞性阻尼器，可以解决这一振动问题。至那时起，全世界在很多桥梁上都发现了许多振动问题，从而引发了对各种振动现象的深入研究。对拉索振动的最初研究可追溯到 20 世纪 80 年代，尽管对某些复杂现象的控制机理还未获得充分的了解，但有关各种振动源的重要信息，引起了桥梁设计人员的广泛兴趣，预测和控制振动的可能方法，均可在文献中找到。

考虑到这些问题，本书旨在系统总结对拉索振动各种现象的最新研究成果，以及当今对潜在的拉索振动现象进行各种可能预测的方法和各种有效控制振动的方法。本书还附有公认的桥梁设计研究人员的研究应用实例。在附录中，探讨了斜拉索动力学的一些最相关问题。

第2章 正文的组成

本书分为 7 个章节，内容如下：

- 第 1 和第 2 章介绍斜拉桥的拉索振动问题，并提出了本书的目标和结构。
- 第 3 章简述了斜拉桥的历史。
- 第 4 章讲述了由风和（或）雨的直接作用引发的拉索振动现象，即：抖振，涡激振动，驰振，尾流干扰，风雨激振和最近发现的现象。
- 第 5 章讲述了间接激励现象，即：因拉索锚固端的振动在拉索上引发的振动现象。为方便研究起见，将这些问题分为两组，即所谓的外部激励和参数激励现象，并通过研究单根拉索来进行介绍。本章还探讨了拉索与结构的动力相互作用。
- 第 6 章专门讲述拉索的阻尼系统，并介绍被动阻尼器设计的简单方法。
- 第 7 章为世界上公认的桥梁设计人员完成的研究报告，主要针对特定桥梁上的具体振动问题及运用的解决方法。

正文之后有 3 个附录，其中所提出的一些理论和实际问题均论证了拉索振动研究。它们是：

- 拉索变形特征的说明（附录 A）。
- 拉索动力学的基本原理介绍（附录 B）。
- 拉索力和阻尼实用评估实验方法参考资料（附录 C）。

第3章 斜拉桥建设简史

用斜拉索支撑桥梁的概念始于 17 世纪，在此之前的应用建议还要归功于费冉提乌斯（Verantius）（意大利，1617 年）和罗旭德（Löscher）（德国，1784 年）^[3, 6]

整个 19 世纪，在文献中提到过铁链和钢丝绳形式的几项斜拉索应用。由于缺乏对斜拉桥结构性状的全面了解，并受当时技术工艺的局限，出现了一些破坏，还因为当时采用斜拉索的桥过于柔性而不安全，导致偏向于采用悬索桥。

在 19 世纪下半叶，修建了几座悬索桥。它们采用额外的斜拉索以加强桥梁结构，并提供抗风稳定性。著名的布鲁克林（Brooklyn）大桥（图 3.1）由罗布林（Roebing）设计，并于 1883 年完工，其总长 1059.9m，主跨 486.5m，为该类混合型斜拉桥的一个重要实例，并代表了桥梁建设史上的一座里程碑。需要特别指出的是：它是首次在大型结构上用钢做拉索来取代铁，而当时钢这种新材料（强度为铁的 2 倍）仅仅在英格兰用于修建铁路。

现代斜拉桥的开发可追溯到 20 世纪下半叶，主要归功于狄辛格（Dischinger），因为他采用了高强预应力拉索^[4]才得以实现更高的刚度和稳定性。利用计算机的计算功能将这些特性加以组合，才使得有可能进行系统结构分析，从而得到合理的设计及对拉索力的永久控制，有效地设计出这些斜拉桥结构。

于 1956 年开通运营的瑞典斯特罗姆松德（Stromsund）大桥，通常被认为是现代的第一座斜拉桥^[5]。从图 3.2 可以看出，该大桥由 3 跨组成，总长 332m，主跨为 182.6m，钢



图 3.1 布鲁克林大桥（美国，1883 年）（华盛顿特区国会图书馆）



图 3.2 斯特罗姆松德大桥 (瑞典, 1956 年) (Andreas Stedt 供图)

和混凝土桥面用 4 对对角斜拉索从各桥塔悬挂。

由于技术、经济及美学的需要,斜拉桥在战后重建的德国变得非常普遍,重要性与日俱增,由于其具有众多的创新解决方案,其应用迅速推广到全世界。

令人惊讶的是:在不到 50 年的短时期内,斜拉桥的设计经历了巨大的演变。马迪瓦 (Mathivat)^[8] 确定了所谓的第 3 代斜拉桥,各代均以其重大发展为特征。

第 1 代斜拉桥,如斯特罗姆松德大桥,采用了数量有限的斜拉索,通常主跨的斜拉索在 2~6 对之间。这些斜拉索的间隔距离较大,通常在 30~80m 之间变化,要求有较大的桥面抗弯刚度 (通常的高度在 3~4m 之间变化)^[7]。此外,由于拉索承受较高拉力,需用多股索组成各根拉索。这样,须使用复杂的锚头,从而导致明显的应力集中。此外,架设这些桥梁的困难是需要辅助结构。

第 2 代斜拉桥以采用部分悬挂系统为特征,其中桥面由桥塔刚性支撑,并由众多间隔距离较近的斜拉索悬挂。采用这种布置较多拉索类型的悬挂系统主要有两个目的,即:采用具有适当柔度的桥面,考虑利用拉索提供弹性支撑,以减少施加到桥面的集中应力,并可采用更简单的锚固,避免加强靠近拉索锚固端的梁。在施工阶段小间隔的桥面锚固端最大好处是可以采用简单的悬臂施工。第 2 代首座斜拉桥是 1967 年建于德国的弗里德里希·艾伯特 (Friedrich Ebert) 大桥。1977 年建于法国的布鲁东纳大桥 (图 3.3),主跨 320m,是在混凝土斜拉桥中首次采用较多的拉索系统,现在被看作是第 2 代斜拉桥的原型。

当时紧随着大型斜拉桥的发展,导致了第2代斜拉桥向所谓的第3代斜拉桥过渡,从而确立了第3代斜拉桥。第3代斜拉桥的特征是大量采用间隔距离较近的斜拉索[根据莱恩哈特(Leonhardt)和泽尔纳(Zellner)^[7]对桥面支撑的研究是8~15m]。采用此种斜拉索形式,出现了一种新的结构性能类型,桥面可起到由斜拉索在桥塔上悬挂的桁架抗压弦作用。由于梁弯矩非常小,使得桥面梁高度几乎不受主跨长度的制约,抗弯安全度控制纵向弯曲刚度,只需限制集中活荷载作用下的局部变形。

1978年建于美国的帕斯科-肯纳威克(Pasco-Kennewick)大桥(图3.4),由阿维德·格兰特(Arvid Grant)联合一家咨询公司即莱恩哈特与昂德拉合伙公

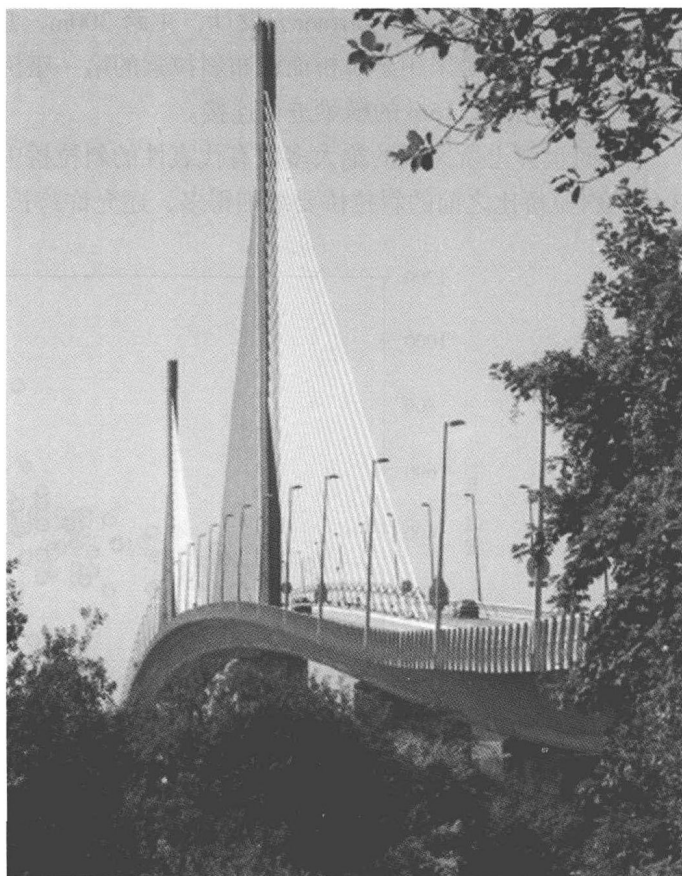


图 3.3 布鲁东纳大桥(法国, 1977年)(Philip Bourret 供图, 出自 www.Structurae.net)



图 3.4 帕斯科-肯纳威克大桥(美国, 1978年)(Patrick S.O' Donnell 供图, 出自 www.Bridgemeister.com)

司（Leonhardt, Andra & Partner）设计，主跨 300m，总长 548m，为美国始建的第一座混凝土斜拉桥，也是采用全桥桥面密布斜拉索的第一座桥。该桥面梁由两片外形为三角形的箱梁组成，用高 2.15m 的横梁进行连接。

当时世界上所完成的绝大多数有代表性的斜拉桥中，就一些跨长而言，不仅第 2 和第 3 代的斜拉桥比之前的斜拉桥要纤细得多，还允许跨长逐渐增加，如图 3.5 所示。

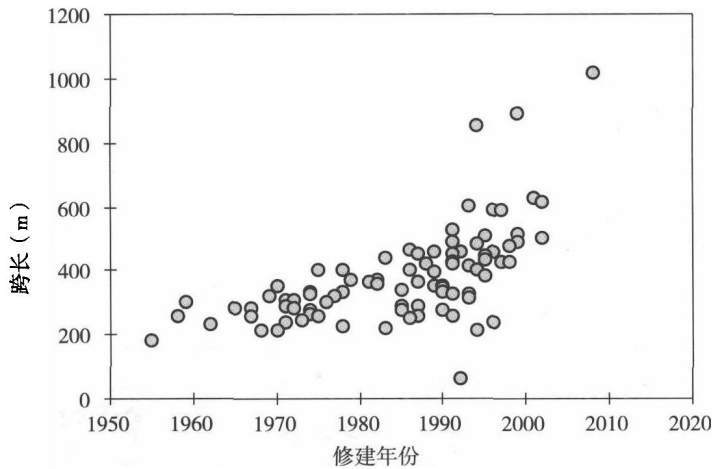


图 3.5 随斜拉桥完成年份的跨长演化。根据参考文献^[9]修改

随着法国于 1994 年诺曼底（Normandy）大桥的完工，总长 2141m、密布拉索的斜拉桥破纪录的 856m 主跨（图 3.6）证明了斜拉桥可以成功用到更大跨度，而不仅仅是最初认为的最大只能做到 150~500m 的跨度，而且更具有经济优势。日本多多罗（Tatara）大桥（图 3.7），1999 年建成，主跨 890m，是该类桥梁的进一步佐证。

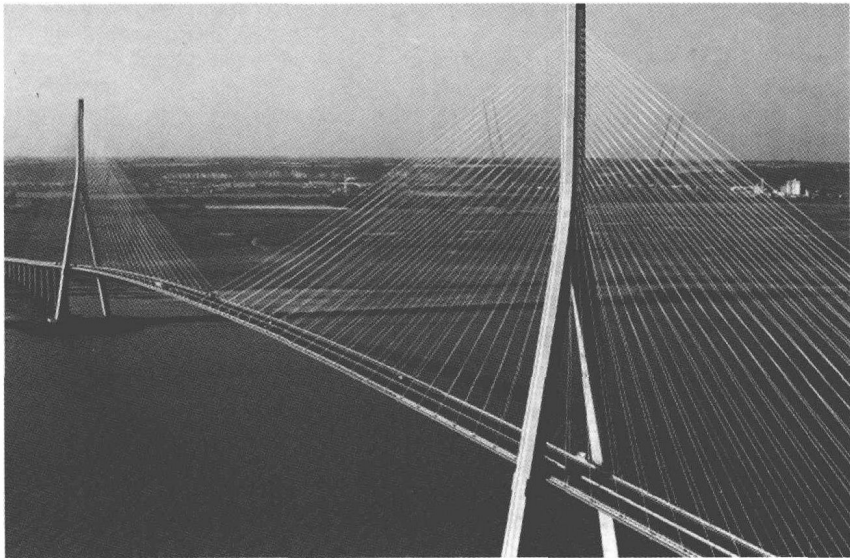


图 3.6 诺曼底大桥全视图（法国，1994 年）（Bouygues 工程公司供图）

那么，现在的问题是：这样还可能走多远呢？

根据泰勒 (Taylor)^[10] 的研究，还没有任何桥梁的构件可以达到可行性阈值，而且因为成本与跨度比并未表现出随跨度增加而急剧增加的情况，所以仍有可能期待跨度范围的增加。之前提出斜拉桥主跨大于 1000m 的建议实际已有 20 多年了，而中国香港一个正在进行的斜拉桥项目主跨有 1018m，总长有 1596m，即昂船洲 (Stonecutters) 大桥 (图 3.8)

斜拉桥的跨度增加，最大的限制与斜拉索施加到桥面上的高压力的有关。根据马迪瓦^[11] 的研究，把主跨长度限制在约 1500m。超出该长度后，通常认为最好的解决方案是经典悬索桥，因为悬索桥主缆锚固在地上。

但是，即使在那些大跨度悬索桥中，斜拉索也能发挥重要作用。事实上，在桥塔附近将斜拉索加到悬索桥上，为桥梁提供了更大的整体刚度，不仅具有更好的抗风稳定性，还能很好地控制桥梁的静态变形，特别是在铁路桥梁中显得更加重要。根据罗布林^[6] 的研究，这种混合体系应用在实践中，已多次在最近的桥梁施工中采用，但现代实际桥梁的应用尚未可知。

对宽大河流和跨海的桥梁另一解决方案是基于斜拉索多跨的概念。于 2004 年完工的两个大型项目，法国的米约 (Millau) 大桥和希腊的利翁·安提利翁 (Rion Antirion) 大桥，均为不同的斜拉索多跨方案^[12]。

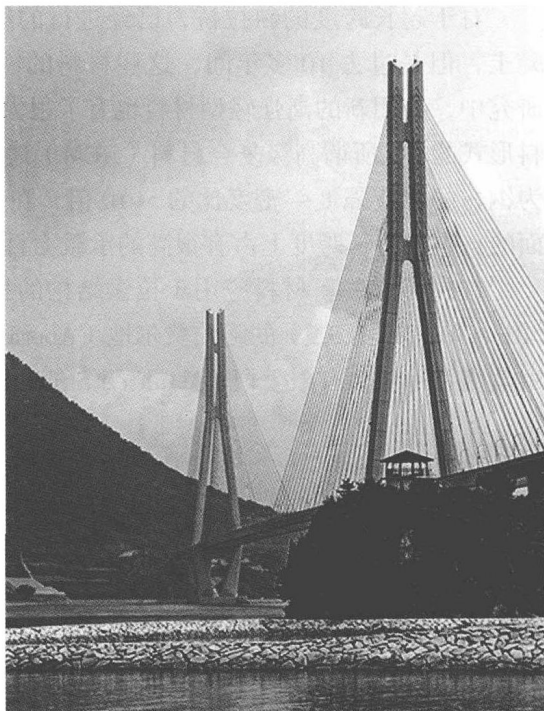


图 3.7 多多罗大桥全视图 (日本, 1999 年)
(metropol2 供图, 2005 年)

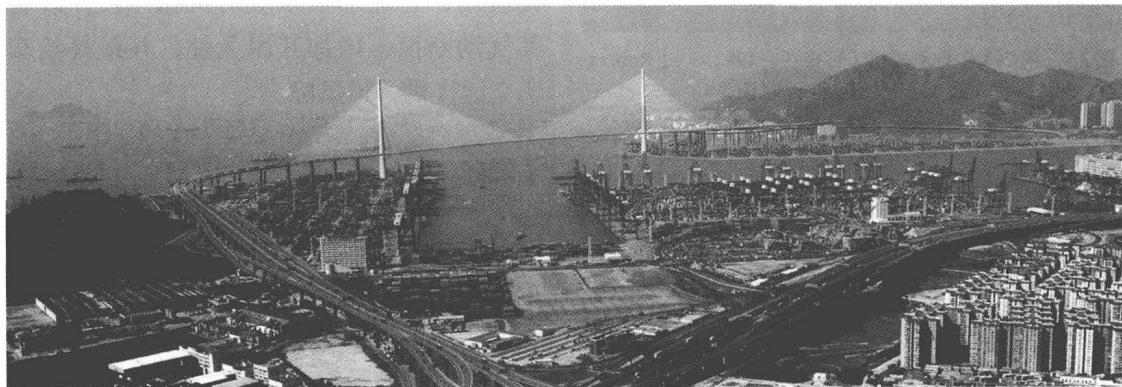


图 3.8 昂船洲大桥预览 (中国香港, 2004~2008 年) (中国香港特别行政区路政署供图)

对于超长跨度的斜拉桥，已经进行的绝大多数研究均是基于采用传统材料，钢和混凝土，但是过去 10 多年间，这些材料的特性已经有了很大改善。而且，在过去几年的研究中，应用新的高强轻型材料也有了很大进步。一些小跨度梁桥已经采用以碳纤维和塑料形式的^[13]所谓高级复合材料（ACM）建造。这种高级复合材料的强度 - 密度比，大约为钢材的相应强度 - 密度比的 5~10 倍，在大跨度斜拉桥的应用中有着巨大潜力，因为桥面的自重 in 超长跨度上占有很高的承载力百分比。

首次将这些新材料应用于拉索结构的报道是在苏格兰的小型人行天桥上，即跨泰河（River Tay）（图 3.9）的阿伯费尔地（Aberfeldy）桥（1992）。总长 113m，主跨 63m。该桥由茂盛结构塑料有限公司（Maunsell Structural Plastics）设计，施工未用吊车，而且是由敦

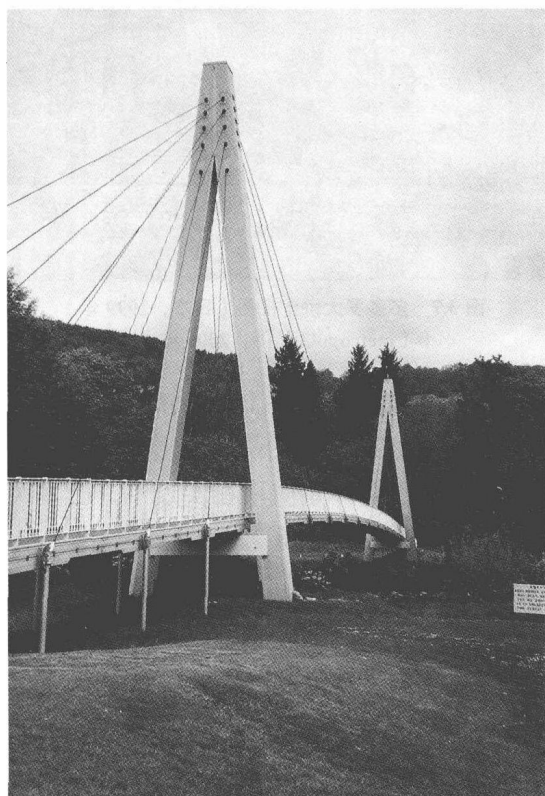


图 3.9 阿伯费尔地斜拉桥（苏格兰，1992 年）（Robert Cortright/Bridge Ink 供图）

提（Dundee）大学即将毕业的桥梁工程专业的学生所建，材料用的是玻璃加筋做成的超高分子聚合物（GRP）及帕拉菲尔聚酯纤维拉索。最近，一座主跨为 137m 的斜拉桥已在美国圣迭戈（San Diego）^[14]开始设计和研究。该桥由两个非对称的桥跨和一座桥塔组成，并采用了混凝土充填碳与环氧树脂管作为边梁和桥塔，以及由具有聚丙烯纤维加筋混凝土的玻璃—碳与乙烯酯树脂做成的空心横梁。而且，一些斜拉索由碳与环氧树脂材料做成。挤拉碳—纤维环氧树脂杆件最近也已应用在了法国拉胡安市（Laroin）的斜拉人行桥的施工中。该人行桥只有一个钢与混凝土跨，长 110m，由 16 根碳—纤维拉索悬挂，而背索为传统的绞索束^[15]。采用纤维加筋材料作为长大跨度钢—混凝土桥梁的外壳构成了另外一种应用，它能加强系统的抗扭刚度，改善其气动断面，增加其耐久性，并最终给车辆交通提供一道风障^[16]。

第4章 由风和雨直接引发的振动现象

风是设计斜拉桥特别是斜拉索最关键性的因素之一。斜拉索既承受风雨沿表面作用的直接激励，又承受来自桥面和桥塔的间接激励，正是这些作用导致了在斜拉索支撑处的振动。

通常，研究风的影响是通过分离静态分量来进行的，静态分量既与平均风速、动力分量有关，也与涡激振动和大气湍流有关。本章简要介绍了作用于斜拉索上的风荷载，重点放在相应的动力分量的影响上。介绍了特殊振动现象，即：抖振，涡激振动，驰振，气动干扰，风雨激振和一些新发现的振动现象，如：干驰振和阻力危机现象。根据当前理论和抑制或减少振动可采用的技术，对控制这些现象的机理进行了阐述。

4.1 斜拉索上的风荷载

风是一种流体，当与结构工程发生关联时，可分解为三个相互垂直与时间相关的速度分量 $U(t)$ 、 $V(t)$ 和 $W(t)$ 。这些分量不仅取决于平均风速 U ，具有主导性的水平风向，还取决于波动分量 $u(t)$ 、 $v(t)$ 和 $w(t)$ ，根据：

$$\begin{aligned}U(t) &= U + u(t) \\V(t) &= v(t) \\W(t) &= w(t)\end{aligned}\tag{4.1}$$

将一个物体（一根斜拉索）浸入风这类流体中，会产生表面风压。如果该物体是固定的，所产生的风压则取决于流体的特点和物体的几何形状。如果物体可以自由振动，正如斜拉索的振动就会修正所产生的风压。这样，一个相互作用的激励就产生了，它被称作气动弹性激励。

实际上，尽管这些风的影响是相关的，但为简化起见，常常将它们单独进行分析。

假定用浸入二维流体中的无限长非圆柱体表示斜拉索，在下列条件下，根据整个柱体所产生的表面风压，可计算出单位长度入射力：(a) 浸入均匀流体中的固定圆柱体；(b) 浸入湍流中的固定圆柱体；(c) 浸入湍流中的移动圆柱体。这些独立的条件可以认识和探讨围绕物体的流体特征，比如形状系数和其随雷诺（Reynolds）数的变化，以及在尾流中旋涡的形成和气动阻尼的演变。

4.1.1 浸入均匀流体中的固定圆柱体

作用于圆柱体上的合成风荷载用笛卡尔坐标系统表示为 (O, d, l) ，以便与风速矢量 U 相一致 [图 4.1 (a)]，其 d 轴由 x 轴的转动求得， x 轴通过由通用坐标系统 (O, x, y) 逆时针方向转动 β 角得到。

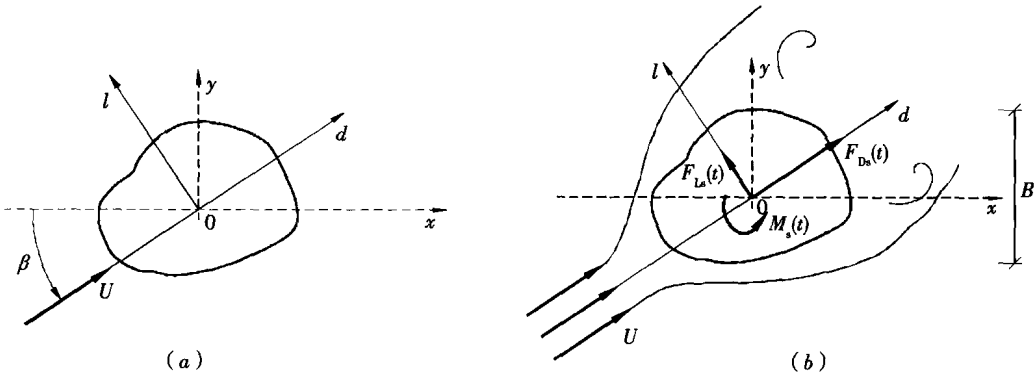


图 4.1 浸入光滑流体中的无限长固定刚性圆柱体
(a) 笛卡尔坐标系统和风速场; (b) 气动力

根据图 4.1 (b) 所示, 在顺流方向和竖向出现两个力分量 $F_{Ds}(t)$ 和 $F_{Ls}(t)$, 称为阻力和升力, 以及一个作用于物体 O 的弹性中心的升力矩 $M_s(t)$, 由下式确定:

$$F_{Ds}(t) = F_D + f_{Ds}(t) \quad (4.2a)$$

$$F_{Ls}(t) = F_L + f_{Ls}(t) \quad (4.2b)$$

$$M_s(t) = M + m_s(t) \quad (4.2c)$$

F_D , F_L 和 M 表示平均风荷载, 而 $f_{Ds}(t)$, $f_{Ls}(t)$ 和 $m_s(t)$ 为零平均波动。这些分量的值根据沿物体的惯性力和黏性力的平衡来确定, 对于圆柱体则通过雷诺数 Re 进行了量化, 确定为:

$$Re = \frac{UB}{\nu} \quad (4.3)$$

式中, B 为圆柱体的代表性量纲, U 为统一的风速, ν 为运动黏性, 在空气温度为 20°C 时, 其值为 $0.150\text{cm}^2/\text{s}$ [17]。

根据参考文献 [17], 对于直径为 D ($B=D$) 的圆柱体, 图 4.2 示出了流体随雷诺数增长的结构形态。

对于低风速 U , 即低雷诺数 ($Re \approx 1$), 黏性力起支配作用, 从而决定了流体将附着在整个圆周上 [图 4.2 (a)]。

通过增加流速, 雷诺数也增加。在 $Re \approx 20$ 时, 流体分离, 在圆柱体的后面形成两个对称分布的尾流旋涡 [图 4.2 (b)], 但仍停留在柱体下游表面附近。当雷诺数增加到 30 时, 对称旋涡破散, 并由循环交替的旋涡所替代, 这些旋涡在表面和底面交替地形成, 并被冲到下游形成旋涡尾流, 这被称为冯·卡门旋涡尾流 [图 4.2 (c)]。通过对放入水洞中的圆柱体释放染料 [17], 图 4.3 示出了该现象的图片。

随着雷诺数的增长, 在 $5000 \leq Re \leq 200000$ 范围内, 分离点上游附着的流体仍是层流, 分离点后的尾流逐步由层流向湍流过渡 [图 4.2 (d)], 而且, 雷诺数越小, 距圆柱体下游越远; 雷诺数越大, 而距圆柱体表面越近。最后, 当雷诺数非常大时, 即: $Re \geq 200000$, 尾流变窄, 这意味着: 作用在拉索上的力减小了 [图 4.2 (e)]。

风荷载静力三分量 F_D , F_L 和 M 通常由下式确定: