钢拱桥刚性细长吊杆风致振动、疲劳与控制

汪志昊　赵洋　徐宙元　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

钢拱桥刚性细长吊杆风致振动、疲劳与控制

汪志昊　赵洋　徐宙元　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

本书介绍了刚性吊杆的风致振动理论和疲劳性能评估方法，介绍了刚性吊杆风致振动控制用辅助索的参数分析与减振设计方法，阐述了刚性吊杆-辅助索耦合系统的弯曲与扭转振动动力特性的求解方法，综合数值计算、有限元模拟和风洞试验验证了辅助索的减振效果。研究成果可为刚性吊杆风致振动用辅助索的设计与工程应用提供指导。

本书可供从事桥梁结构风致振动控制研究的科研人员和工程技术人员参考，也可作为高等院校教师和研究生的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

钢拱桥刚性细长吊杆风致振动、疲劳与控制 / 汪志昊，赵洋，徐宙元著. -- 北京 : 中国水利水电出版社，2020.5

ISBN 978-7-5170-8567-6

Ⅰ. ①钢… Ⅱ. ①汪… ②赵… ③徐… Ⅲ. ①钢桥－系杆拱桥－吊杆－风致振动－振动控制②钢桥－系杆拱桥－吊杆－疲劳寿命－评估 Ⅳ. ①U448.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第081965号

书　　名	**钢拱桥刚性细长吊杆风致振动、疲劳与控制** GANGGONGQIAO GANGXING XICHANG DIAOGAN FENGZHI ZHENDONG，PILAO YU KONGZHI
作　　者	汪志昊　赵洋　徐宙元　著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座　100038） 网址：www. waterpub. com. cn E－mail：sales@ waterpub. com. cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	清淞永业（天津）印刷有限公司
规　　格	184mm×260mm　16 开本　10.75 印张　260 千字
版　　次	2020 年 5 月第 1 版　2020 年 5 月第 1 次印刷
定　　价	**60. 00** 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前　言

刚性吊杆作为钢拱桥吊杆的一种主要形式，在国内外均有广泛的工程应用，特别是当前我国正在大力推广装配式钢结构，刚性吊杆预计会有更广泛的应用。但是，刚性吊杆多为典型的钝体断面，具有长细比大、阻尼小、频率低的特点，风荷载作用下易产生发散性的颤振和驰振以及限幅涡激共振等。国内外已发生了多起H型吊杆风致振动病害的工程案例，严重影响桥梁结构的安全使用。因此，开展刚性吊杆的风致振动控制与疲劳评估研究，对确保钢拱桥的运营安全具有重要意义。

本书在刚性吊杆风致振动和疲劳性能评估的基础上，系统介绍了刚性吊杆风致振动控制用辅助索的参数分析与减振设计方法，阐述了刚性吊杆–辅助索耦合系统的弯曲与扭转振动动力特性的求解方法，综合数值计算、有限元模拟和风洞试验验证了辅助索的减振效果，并讨论了设置辅助索对H型刚性吊杆抖振响应和疲劳性能的影响。研究表明，设置水平辅助索是一种切实有效的刚性吊杆风振控制措施。

全书共7章。第1章主要介绍了刚性吊杆的构造与应用、风致振动的控制研究与应用现状；第2章主要介绍了刚性吊杆的风振理论与风振评估方法；第3章主要介绍了刚性吊杆的风致振动疲劳评估；第4章主要介绍了刚性吊杆的辅助索参数分析与减振设计；第5章和第6章分别介绍了H型刚性吊杆–辅助索耦合系统的扭转和弯曲振动特性分析；第7章主要介绍了安装辅助索对H型刚性吊杆抖振响应的影响。

汪志昊教授制定了本书编写大纲并编写第1章，徐宙元博士编写第2、3章，赵洋副教授编写第4~7章，全书由汪志昊审定。此外，课题组其他成

员对本书的研究成果也做出了贡献，未能一一列出，在此对所有参与课题研究的人员以及对课题研究和本书编撰提供指导的专家同行表示由衷的感谢。

由于作者的水平和经验有限，书中不足和疏漏之处在所难免，恳请同行与读者批评指正。

作者　谨识于华北水利水电大学

2019 年 12 月

目　录

前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　研究背景及意义 …… 1

1.2　研究现状 …… 4

1.3　工程背景 …… 18

1.4　本书主要内容 …… 18

1.5　研究技术路线 …… 20

参考文献 …… 21

第 2 章　刚性吊杆的风致振动理论 …… 30

2.1　引言 …… 30

2.2　刚性吊杆的风致振动形式 …… 31

2.3　H 型刚性吊杆风致振动的评估 …… 40

2.4　矩形刚性吊杆风致振动的评估 …… 46

2.5　本章小结 …… 50

参考文献 …… 51

第 3 章　H 型刚性细长吊杆风致振动疲劳评估 …… 53

3.1　引言 …… 53

3.2　疲劳评估方法 …… 53

3.3　吊杆的扭转计算 …… 62

3.4　吊杆扭转仿真计算 …… 72

3.5　实例分析 …… 76

3.6　本章小结 …… 84

参考文献 …… 84

第 4 章　刚性吊杆的辅助索参数分析与减振设计 …… 86
4.1　引言 …… 86
4.2　H 型吊杆的辅助索参数分析 …… 86
4.3　矩形吊杆的辅助索参数分析 …… 93
4.4　本章小结 …… 97
参考文献 …… 97
第 5 章　H 型刚性吊杆–辅助索耦合系统扭转振动动力特性分析 …… 99
5.1　引言 …… 99
5.2　开口薄壁杆件约束扭转理论 …… 99
5.3　H 型吊杆–辅助索耦合系统扭转振动理论模型 …… 102
5.4　H 型吊杆–辅助索耦合系统扭转振动的有限元模型验证 …… 110
5.5　H 型吊杆–辅助索耦合系统扭转振动特性的试验验证 …… 113
5.6　辅助索位置与刚度参数对 H 型吊杆扭转自振特性的影响规律 …… 115
5.7　本章小结 …… 119
参考文献 …… 120
第 6 章　刚性吊杆–辅助索耦合系统弯曲振动动力特性分析 …… 121
6.1　引言 …… 121
6.2　吊杆–辅助索耦合系统弯曲振动理论模型 …… 121
6.3　吊杆–辅助索耦合系统弯曲振动特性的验证 …… 126
6.4　辅助索位置与刚度参数影响因素分析 …… 130
6.5　本章小结 …… 133
参考文献 …… 133
第 7 章　安装辅助索对 H 型吊杆抖振响应的影响 …… 134
7.1　引言 …… 134
7.2　基于谐波合成法的脉动风场数值模拟 …… 134
7.3　静力三分力系数 …… 141
7.4　吊杆上作用的风荷载 …… 143
7.5　风速风向联合分布的概率 …… 147
7.6　H 型吊杆的时域抖振响应 …… 149
7.7　风车共同作用下吊杆的疲劳评估 …… 162
7.8　本章小结 …… 163
参考文献 …… 164

第 1 章

绪　论

1.1　研究背景及意义

钢拱桥是一种应用时间较短的拱桥，早期主要在美国、欧洲和日本等应用。第一座钢拱桥为 1874 年建成的跨越美国圣路易斯州密西西比（Mississippi）河的伊兹（Eads）桥[1]，该桥是一座三跨（153m＋158m＋153m）的公轨两用双层桥面钢桁肋拱桥，采用悬臂架设法施工，极大地推动了钢拱桥在世界范围内的快速发展。1916 年美国修建了纽约狱门桥（主跨 298m），1931 年美国建成了培虹（Bayonne）桥（主跨 504m），1932 年澳大利亚建成了悉尼港（Sydney Harbor）桥（主跨 503m），1977 年美国建成了新河谷（New River Gorge）桥（主跨 518m）[2]。我国钢拱桥起步较晚，但是 2000 年以后，得到较快发展，截至 2016 年修建了 80 余座[3]。2003 年建成的上海卢浦大桥（主跨 550m）刷新了当时钢拱桥跨径的世界纪录，如图 1.1 所示。2009 年建成了主跨 552m 的重庆朝天门大桥（图 1.2），是目前世界上跨径最大的钢拱桥。2019 年建成了秭归长江大桥（跨径 531m）[4]，广州明珠湾大桥（主跨 436m）[5]计划于 2021 年建成通车。表 1.1 列出了世界前十大跨钢拱桥，其中我国占 7 座。近年来，我国大力推广应用装配式钢结构，钢拱桥获得快速发展。



图 1.1　上海卢浦大桥

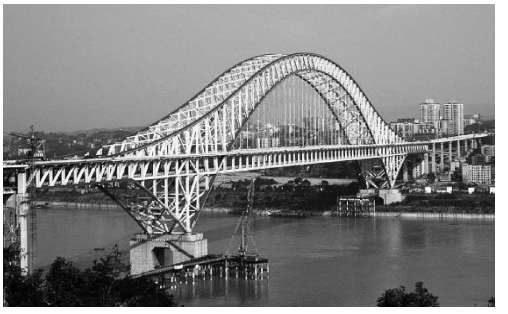


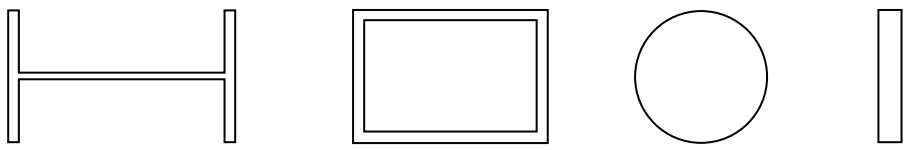
图 1.2　重庆朝天门大桥

吊杆是中、下承式钢拱桥的重要传力构件，其可靠性、耐久性和适应性直接关系到桥梁结构的安全和正常运营。拱桥吊杆根据刚度大小分为柔性吊杆和刚性吊杆。多数拱桥采用钢丝或钢绞线柔性吊杆，但刚性吊杆由于制作安装与养护方便、整体刚度大、受力

表 1.1 世界前十大跨钢拱桥[1-10]

序 号	桥 名	跨径/m	桥 型	所在国家	建成年份
1	重庆朝天门大桥	552	中承式钢桁拱	中国	2009
2	上海卢浦大桥	550	中承式钢箱拱	中国	2003
3	秭归长江大桥	531	中承式钢桁拱	中国	2019
4	新河谷大桥	518	上承式钢桁拱	美国	1977
5	培虹桥	504	中承式钢桁拱	美国	1931
6	悉尼港大桥	503	中承式钢桁拱	澳大利亚	1932
7	宁波甬江大桥	450	中承式钢箱拱	中国	2011
8	明珠湾大桥	436	中承式钢桁拱	中国	建设中
9	广州新光大桥	428	中承式钢桁拱	中国	2006
10	菜园坝大桥	420	中承式钢桁拱	中国	2007

均匀、使用寿命长、梁端转角小等优点，在国内外均有广泛应用[11]。钢拱桥刚性吊杆主要有 H 型、箱形、圆形和板式 4 种截面形式，如图 1.3 所示。美国、日本和加拿大等主要采用 H 型吊杆，德国铁路钢拱桥多采用钢板吊杆，而我国 H 型、箱形和圆形钢吊杆均有较多应用。



（a）H型 （b）箱形（矩形） （c）圆形 （d）板式

图 1.3 钢拱桥刚性吊杆的截面形式

H 型刚性吊杆是非流线型钝体截面杆件，其长细比大、阻尼小、气动稳定性差[12,13]，在风荷载作用下易产生风致振动问题，严重影响桥梁结构寿命，甚至危及桥梁结构安全[14-17]。风对刚性吊杆的作用受到风特性、吊杆形状和动力特性以及风与吊杆相互作用三方面的制约[18,19]。当风绕过具有钝体断面的吊杆时，会产生漩涡和流动的分离，形成复杂的空气作用力，使吊杆产生风致振动问题，影响桥梁结构的舒适性和安全性[20,21]。

1929 年，美国 Tacony-Palmyra 桥建成后仅 3 个月，在一次两昼夜的暴风中，多根较长 H 型吊杆发生风致振动而造成端部开裂。20 世纪 30 年代，丹麦 Storeström 桥上部分 H 型吊杆发生严重风振，导致吊杆与桥面连接处发生破坏。1964 年美国 Fire Island 桥通车后不久，该桥 H 型吊杆就出现了风致振动现象，最后在吊杆翼板加设波形板，通过增大刚度与改变气动外形的方式抑制风振[22,23]。加拿大 Peace River 桥[1]是一座两跨系杆拱桥，1967 年在第一跨施工完成后不久，桥上最长圆形吊杆在低于 4.5m/s 的风速下发生大幅振动，在吊杆与桥面连接处有发生疲劳破坏的危险，最终通过设置纵向钢索将吊杆两

两相连，抑制吊杆振动，此制振措施为Swedish和Czech桥提供了实践经验。1973年，施工中的美国Commodore Barry桥遭受一次大风（阵风风速为29m/s）侵袭，致使9根H型竖杆和斜杆发生强烈振动，造成这些杆件两端翼板几乎完全断裂（图1.4），事后将断裂的翼缘板拼接并用临时钢缆将各吊杆串联抑制振动，并设置了TMD（tuned mass damper调谐质量阻尼器）减振抑振。

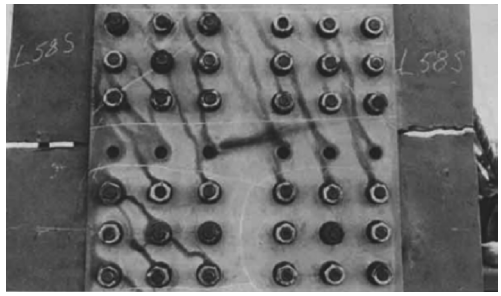


图1.4 Commodore Barry桥风毁后的H型构件

1974年，加拿大Bras d'Or桥上H型吊杆在该桥通车后不久也产生了风振病害，最后在吊杆上安装TMD阻尼器进行抑振；1978年6月该桥在8.9m/s风速作用下，最长26m的H型吊杆产生振幅为127mm的弱轴弯曲涡振。此外，关于H型细长杆件的风振实例还有很多，日本、捷克、斯洛伐克、澳大利亚、英国等国家的钢拱桥均有风振疲劳破坏实例的报道[24]。

我国至少有两座钢拱桥发生过严重的吊杆风致振动，导致吊杆翼板因扭转振动而开裂。1992年，九江长江大桥三大拱合龙后不久，各拱多数H型吊杆即在8m/s左右风速下发生了风致振动[20]，1996年该桥吊杆上安装了TMD减振装置。佛山东平大桥在2006年夏季的一次台风中桥上H型吊杆发生剧烈扭转颤振，个别吊杆与桥面连接处的翼缘板几乎完全断裂，严重危及桥梁安全，图1.5所示为该吊杆涡激振动后的典型破坏情形，吊桥翼缘板断裂[25]。其后东平大桥采用设置辅助索的方式作为永久性风振控制措施。实践证明，该风振控制措施效果良好，没有再出现过上述风致振动问题[19]。



图1.5 佛山东平大桥翼缘板断裂开裂情况

综上所述，H型钝体断面吊杆长细比较大，容易发生低风速下的涡激振动，尽管涡激振动具有限幅振动特征，不会像颤振和驰振那样导致杆件变形过大而产生突然破坏，但是较大的共振响应、过低的涡振起振风速以及较大的共振区间，使吊杆发振频率较高、杆端应力变化幅值趋大，容易引起吊杆连接部位的疲劳断裂。另外，抖振是普遍存在的

风振形式，会引起吊杆疲劳破坏[17]。因此，必须明确 H 型刚性吊杆的风致振动形式，有针对性地予以控制，提高吊杆的抗风性能。

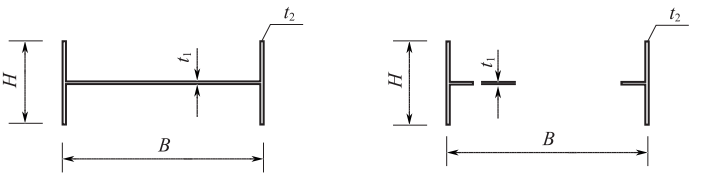
本书针对 H 型刚性吊杆减振抑振的辅助索，开展吊杆—辅助索耦合系统振动特性的理论研究，对辅助索进行参数分析与设计，明确辅助索对 H 型刚性吊杆抗风性能的影响，为钢拱桥刚性吊杆风致振动控制提供必要的理论与技术支持。

1.2 研 究 现 状

1.2.1 H 型和箱形刚性吊杆的构造与工程应用

1. H 型刚性吊杆

H 型刚性吊杆是非流线型钝体截面杆件，由腹板和翼缘板组成。其长细比大、阻尼小、气动稳定性差，在风荷载作用下易产生风致振动问题。工程上多采用腹板上开圆孔、多边形孔和椭圆形孔，有的还在翼缘板上开孔等气动措施以提高 H 型刚性吊杆的抗风性能。吊杆分节段接长，两端通过节点板用高强螺栓分别与拱肋和钢梁连接，其横断面构造如图 1.6 所示。



（a）不开孔H型吊杆　　（b）开孔H型吊杆

图 1.6 H 型吊杆横断面构造示意图

H 型吊杆在欧美国家应用较多，1929 年美国在 Delaware 河上建成的 Tacony Palmyra 桥[图 1.7（a)]、20 世纪 30 年代丹麦修建的 Storeström 桥、20 世纪 60 年代美国修建的 Fire Island桥和 Commodore Barry 桥都采用了 H 型刚性吊杆，加拿大 Bras d'Or 桥也采用了 H 型吊杆。我国已建的刚性吊杆钢拱桥也多采用 H 型吊杆：江西省九江长江大桥[图 1.7（b)]采用 H 型吊杆腹板开圆孔[26]；宜万铁路万州长江大桥［图 1.7（c)］全桥 25 对吊杆，吊杆长度为 8～55m，均采用焊接 H 型截面，截面宽度为 800mm，翼缘宽度为 700～920mm，分节段拼接接长，在吊杆腹板和翼板上开设长圆孔以解决吊杆风振问题[27]；佛山东平大桥［图 1.7（d)］的主拱下安装了 15 根 H 型刚性吊杆[28]；京珠高速汀泗河特大桥［图 1.7（e)］和福厦高速木兰溪特大桥［图 1.7（f)］均采用开孔 H 型吊杆。

2. 箱形刚性吊杆

箱形刚性吊杆的截面通常为切角矩形或圆角矩形，钢板与钢板之间采用焊接连接，节段之间可以通过拼接板用高强螺栓连接，吊杆两端采用高强螺栓分别与拱肋和钢梁连



（a）Tacony Palmyra桥



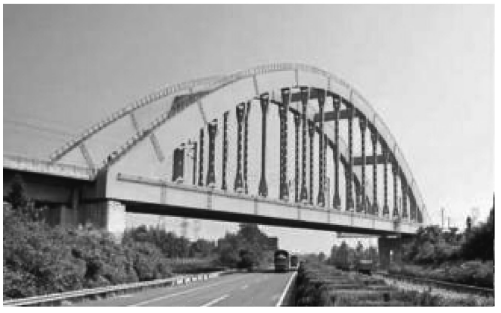
（b）九江长江大桥



（c）万州长江大桥



（d）佛山东平大桥



（e）汀泗河特大桥



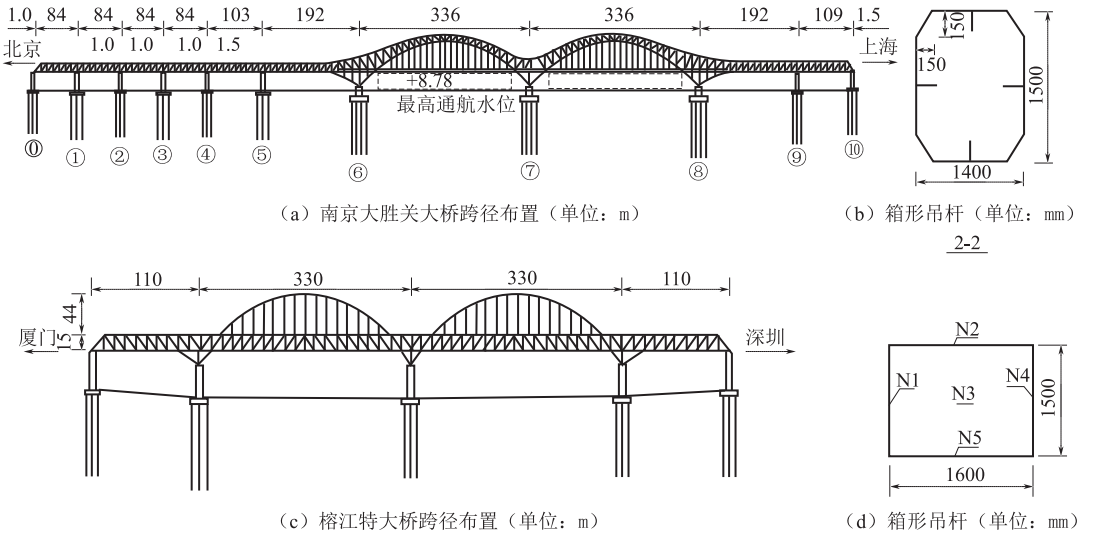
（f）木兰溪特大桥

图 1.7 典型 H 型吊杆钢拱桥

接。箱形吊杆整体刚度大，阻尼比较小，随着长度的增大，在常遇风速下仍然可能产生风致振动。

2011 年建成的南京大胜关大桥是一座铁路钢桁拱桥，吊杆采用切角八边形的箱形截面，提高了涡激振动的起振风速，最长吊杆长约 52m，分 3 段制造，工地拼装，并且在吊杆内部预留了阻尼器安装位置，如图 1.8（a）和（b）所示。

2013 年建成的榕江特大桥是一座铁路钢桁梁柔性钢拱桥，吊杆采用箱形截面，宽 800mm、高 1050mm、板厚 16mm，分段制造，工地拼装，全桥共15 对吊杆，最长 44m，最短 6.4m，如图 1.8（c）和（d）所示。



（a）南京大胜关大桥跨径布置（单位：m）　（b）箱形吊杆（单位：mm）

（c）榕江特大桥跨径布置（单位：m）　（d）箱形吊杆（单位：mm）

图 1.8　典型工程箱形吊杆

1.2.2　刚性吊杆的振动控制研究

吊杆的抗风性能可通过气动措施、机械措施及结构措施予以提高或改善。

1. 气动措施

气动措施是选择合理的吊杆气动外形或附加气动装置，改善吊杆气动性能，提高吊杆气动稳定性，避免或降低风振响应的措施，具体措施包括腹板、翼板开孔，加设波形板、导流板以及矩形吊杆四边切角等。例如，九江长江大桥、佛山东平大桥、瑞安飞云江五桥 H 型吊杆腹板开孔，美国 Fire Island 桥 H 型吊杆翼缘板增设波形板，南京大胜关长江大桥切角八边形箱形吊杆等。很多学者对钝体断面细长吊杆的气动性能进行了深入研究。

Mather 与 Wittig 通过节段模型与气弹模型风洞试验，探讨了导致 Commodore Barry 桥 H 型杆件风毁的原因，认为大幅弯曲及扭转涡激振动使得短时间内 H 型吊杆经历了数量足够多的应力循环，导致此桥 H 型构件的疲劳破坏和风毁，并进一步探讨了避免 H 型构件风害的方法，如腹板开孔或翼板开孔、加设辅助索或采用箱形截面抑制振动等。

马存明、廖海黎等[29]对万州长江大桥 H 型吊杆进行了风洞试验，研究了腹板或翼板开孔、加设风嘴等多种试验工况，综合评价了不同截面形式 H 型吊杆的涡激振动与驰振特性，认为 H 型吊杆是否开孔、开孔位置、开孔方式、开孔形状及开孔率对吊杆的涡激振动与驰振特性存在明显影响。

刘慕广、陈政清[30-33]通过节段模型风洞试验，以 7 个不同截面参数的 H 型吊杆为对象，系统研究了翼板开孔、腹板开孔和截面高宽比等参数分别对 H 型吊杆的颤振、驰振和涡振性能的影响。试验结果表明：高宽比$H/B=0.417$时，增大翼板开孔率可明显提高 H 型吊杆弱轴驰振临界风速，同时也会改善吊杆的涡振稳定性，但对扭转颤振和强轴驰振性能无明显作用；增大高宽比可同时提高 H 型吊杆弱轴向和强轴向的驰振临界风速，

也可显著影响颤振和涡振特性；腹板开孔不能改善 H 型断面的涡振特性，但可明显改善弱轴弯曲驰振性能。

詹昊、方秦汉等[34]对南京大胜关大桥箱形吊杆的不同切角对气动性能的影响进行了仿真和试验研究，认为切角箱形吊杆的气动性能优于不切角吊杆。李龙安等[35-37]分析了雷诺数、振动因子、应力大小及应力状态、边界条件和断面形状对钢拱桥吊杆风致振动的影响程度，指出吊杆振动因子是吊杆振动发生的重要因素。

综上可见，每座桥的桥址处环境各不相同，采取的气动措施也各不相同，需要验证吊杆不同开孔位置、开孔方式、开孔形状和开孔率以及矩形切角形状和尺寸等对吊杆气动性能的影响，但是节段试验或气弹模型试验的工况很多，而且风洞试验耗时长、资源占用多、费用高，气动措施减振效果有限，难以建立具有普适性的设计方法。因此，气动措施往往与其他抗风减振措施结合使用，见表 1.2。

表 1.2　　部分国内外桥梁刚性吊杆风致振动及减振措施

年份	桥梁名称	国家	桥梁形式	风振构件	减振措施
1929	Tacony Palmyra	美国	系杆拱	H 型吊杆	设辅助索
1960	Askerdfjord	瑞典	上承式拱	圆形立柱	灌砂
1964	Fired Island	美国	系杆拱	H 型吊杆	增设翼板波形板
1967	Peace River	加拿大	系杆拱	圆形吊杆	纵向钢缆
1973	Commodore Barry	美国	钢桁拱	H 型杆件	临时钢缆、TMD
1974	Bras d'Or	加拿大	钢拱	H 型杆件	TMD
1996	九江长江大桥	中国	钢桁拱	H 型吊杆	水平拉筋、TMD
2002	宜万铁路万州大桥	中国	钢桁拱	H 型吊杆	开孔
2006	佛山东平大桥	中国	钢桁拱	H 型吊杆	开孔、辅助索
2008	木兰溪特大桥	中国	钢拱	H 型吊杆	开孔
2009	汀泗河特大桥	中国	钢箱拱	H 型吊杆	开孔
2009	南京大胜关大桥	中国	钢桁拱	矩形吊杆	切角、TLMD
2013	榕江特大桥	中国	钢桁梁柔性拱	矩形吊杆	TMD
2016	飞云江五桥	中国	钢桁拱	H 型吊杆	开孔、PTMD

2. 机械措施

机械措施是通过附加阻尼来提高吊杆桥梁耗能效率，降低风振响应的措施，主要是安装调谐质量阻尼器（TMD）来提高吊杆等效阻尼，降低涡振振幅，具有很好的实用性。阻尼器有黏滞阻尼器（VD）[38,39]、黏性质量阻尼器（VMD）[40]、调谐质量阻尼器（TMD）[41-43]和磁流变阻尼器（MR）[44-47]，以及电涡流调谐质量阻尼器（ECTMD）[48]、高阻尼橡胶阻尼器（HDR）[40]、液体质量双调谐阻尼器（TLMD）[49]和多重调谐质量阻尼器（MTMD）[50]等，主要应用于斜拉桥拉索[51]和悬索桥吊索[52]的振动控制。根据振动控

制方式，阻尼器可以分为被动控制型、主动控制型和半主动控制型阻尼器[53]。被动控制型阻尼器，如VD，具有构造简单、易于安装、维护方便及减振效果良好等特点，但是由于受桥梁空间的限制，当阻尼器安装位置到拉索锚固端距离与索长之比很小（如小于2%）时，VD提供的阻尼比无法满足振动控制的要求，导致控制失效。主动控制阻尼器理论上可以达到最优的减振控制效果，但是存在需要能源多、设备价格高、制作及安装复杂、可靠性低等问题，从而使其应用和推广受到限制。半主动控制阻尼器，如MR的主要优点是所需的外加电源小、可供阻尼力大、易安装调节、反应灵敏、稳定性及减振效果好等，因而近年来基于MR阻尼器的半主动控制逐渐多起来。

与斜拉桥拉索和悬索桥吊索相比，中、下承式拱桥吊杆的长度相对较短，吊杆多采用钢丝或钢绞线索，吊杆风致振动相对不是那么突出，阻尼器在拱桥吊杆上的应用要少些。吊杆风致振动控制的机械措施一般采用附加TMD，或在吊杆内部敷设约束阻尼层。九江长江大桥H型吊杆起初采用以位移为控制目标的TMD减振[54,55]，但随着运营时间的增长，TMD疲劳损伤较大，后期在修复既有TMD的基础上，又增设了新型液体双调谐质量阻尼器（TLMD）[56]，减振效率大幅提高，且未见阻尼器疲劳损伤现象。南京大胜关大桥吊杆也采用了类似的TLMD阻尼器减振抑振[57]。雷旭、牛华伟等[58]基于被动控制和电涡流耗能原理，采用等强度悬臂梁开发了一款耐疲劳、免维护的新型ECTMD用于改善吊杆风振性能，目前已在榕江特大桥矩形吊杆内部安装使用。吕江、汪正兴等[59]研究了飞云江五桥H型吊杆摆式电涡流调谐质量阻尼器抑制吊杆的弯曲和扭转涡振。汪志昊、陈政清等[60]给出了TMD对吊杆风振的减振理论设计方法，研制了刚度与阻尼分离，考虑摩擦影响的吊杆减振用小型电涡流TMD。刘慕广等[61]通过附加不同形式阻尼层的悬臂梁模型试验和对矩形吊杆内部敷设阻尼层的数值模拟，指出敷设阻尼层对矩形吊杆风致振动减振控制是可行的，能大幅提高结构阻尼比，但是约束阻尼层耐久性较差，费用较高，目前较少采用。

虽然TMD增大了吊杆的附加阻尼，对控制吊杆风致振动具有独特的优势，在安装质量比不高的情况下即可产生良好的减振效果，但是TMD成本较高，维护不便，在长期大幅振动状态下易产生疲劳损伤，影响自身使用寿命，削弱其减振效果，危及桥梁结构安全。吊杆张力的时变性使得吊杆自振频率发生改变，可能导致吊杆与TMD发生失谐，大幅降低吊杆TMD的减振效果。

此外，增加吊杆阻尼还可采用内部灌砂法，其主要发挥颗粒阻尼作用，表1.2中瑞典Askerdfjord桥的圆形立柱采用了该方法，国内未见采用。

3. 结构措施

吊杆风致振动控制的结构措施是通过增加结构的整体刚度来提高吊杆的气动稳定性，包括加设水平拉筋和辅助索。

水平拉筋、辅助索将吊杆沿纵桥向串联，对吊杆产生较强的刚度增强作用，减小吊杆自由长度，形成索杆耦合系统，提高吊杆弯曲、扭转自振频率，远离风致激励频率，避免发生共振。水平拉筋一般采用普通钢筋，刚度较大，为刚性辅助索。辅助索一般采

用钢绞线，属于柔性辅助索。

设置辅助索是一种重要的振动控制结构措施，包括采用普通钢筋的刚性索和采用钢绞线的柔性辅助索[62-64]。表 1.2 中九江长江大桥采用水平拉筋作为 H 型吊杆的临时抑振措施；佛山东平大桥（图 1.9）设置钢绞线辅助索抑制 H 型吊杆的扭转颤振；美国 Commodore Barry 桥（图 1.10）在施工中采用临时钢缆将各细长杆件两两串联抑制风振，Tacony Palmyra（图 1.11）桥上 H 型吊杆设置辅助索作为其永久制振措施；加拿大 Peace River 桥上的圆形吊杆也采用辅助索减振抑振[22]。



图 1.9 佛山东平大桥辅助索

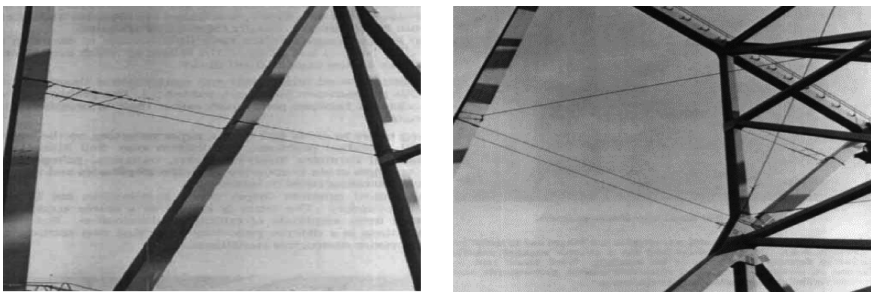


图 1.10 Commodore Barry 桥临时钢缆



图 1.11 美国 Tacony Palmyra 桥及其上的辅助索

黄继民、林志兴等[64]分析了辅助索的减振机理，并结合南京长江二桥初步探讨了斜拉桥辅助索的设计、验算与存在问题。魏建东等[65]研究了斜拉索布置水平辅助索和弧形辅助索两种方案，指出增加辅助索的阻尼可以抑制面内振动，弧形辅助索方案优于水平辅助索方案。周亚刚[66]针对斜拉索辅助索减振措施，研究了单索和索网结构动力特性的分析理论与方法，讨论了索网阻尼特性及其影响因素，并进行了模型试验验证，对辅助

索进行了参数研究和必要性分析。何永龙等[67]分别采用辅助索阻尼器、辅助索索端阻尼器及主索索端阻尼器提高辅助索的减振性能。周海俊、孙利民等[68,69]深入研究了索网-阻尼器-接地辅助索系统的振动特性，将辅助索简化为线性弹簧单元，基于弦理论推导了索网系统的复特征值方程，求得了阻尼和频率的数值解，讨论了弹簧刚度、安装位置对最大模态阻尼比、阻尼器的最优阻尼系数和相应振动频率的影响，得出了安装并联弹簧-阻尼器后拉索的模态阻尼比和模态频率均可明显提高的结论。田鑫[70]指出索网体系提高了斜拉索索面的整体刚度，但是设置辅助索不能提高索网体系的耗能能力，可以通过在辅助索端或辅助索与斜拉索连接处安装集中阻尼器提高索网体系的阻尼，改善减振效果。马如进等[71]提出采用竖直辅助索抑制悬索桥主梁的扭转振动，采用水平辅助索约束主缆顺桥向水平相对位移的减振方案，并探讨了两种方案相结合的减振方案。研究表明，水平辅助索可显著提高悬索桥的正对称扭转频率，竖直辅助索可显著提高反对称扭转频率，而两种辅助索同时作用时正对称和反对称扭转频率都能够得到显著的提高。陈政清等[72]基于理论分析和风洞试验确定了对悬索桥吊索采用分隔器减振的方案，并通过某大风天气下有无分隔器的两组吊索的实测数据结果对比，验证了分隔器减振方案的有效性。

李龙安、何友娣等[74]探讨了增设纵桥向水平拉筋的结构力学方法，指出增设一道或多道拉筋减振的加固方案，将同侧吊杆串联，形成平面网状弹性约束耦联体系，增加了单根吊杆的纵向刚度和扭转刚度，可提高吊杆发生弱轴弯曲涡振和扭转涡振的起振风速，在施工阶段采用此方法对抑制吊杆低风速下的涡振是有益的，但水平拉筋同时也改变了原吊杆的受力状态，由简单受力（二力杆）变为复杂受力（拉、压、弯、剪、扭的两种或多种组合），改变了吊杆的传力路径，使相邻吊杆之间产生附加激励，可能加剧吊杆间的相互振动。

陈政清、刘慕广[75-77]对佛山东平大桥H型吊杆钢绞线辅助索进行了气弹模型风洞试验，试验结果表明安装辅助索后，H型吊杆的扭转和弱轴弯曲振动频率提升明显，颤振临界风速超过了60m/s，远大于检验风速，满足规范要求。此风洞试验中辅助索参数已按相似比1∶16应用于东平大桥H型吊杆，并取得了良好的抗风减振效果。但是试验未对辅助索的位置、刚度、串联吊杆根数、锚固位置等参数进行深入研究。

综上所述，辅助索制作安装简单、张拉更换方便，工程实践已经验证了其良好的抗风减振效果。虽然已有诸多工程应用辅助索对吊杆进行减振抑振，但关于辅助索的减振研究主要集中在斜拉索辅助索减振[78-82]和悬索桥吊索分隔器减振[83]，对拱桥吊杆辅助索相关理论的研究很少。因此，有必要建立吊杆-辅助索耦合系统理论模型，深入研究吊杆-辅助索耦合系统的振动特性，进一步明确辅助索的振动控制效果。

1.2.3 吊杆-辅助索耦合系统振动理论研究现状

为研究实桥中吊杆-辅助索耦合系统的动力特性，需将耦合系统转化为理论力学模型，由力学模型建立数学偏微分方程表达的数学模型进行求解。本书中辅助索是工程中采用的预应力钢丝绳或钢绞线的柔性辅助索（本书统一简称为“辅助索”）。辅助索对吊杆的约束作用可看作附加给吊杆的刚度增强作用，两端张拉力使得辅助索产生弹性轴向