

Theory of Cable Vibration, Dynamic
Detection and Vibration Control

拉索振动、动力检测与 振动控制理论

李国强 顾明 孙利民 著



科学出版社

拉索振动、动力检测与 振动控制理论

李国强 顾 明 孙利民 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了有关拉索振动的理论及新进展,其中关于拉索风雨激振的介绍,是目前国际研究前沿的内容;对于拉索动力检测理论,本书介绍了考虑索弯曲刚度、索支座转动约束和索支座横向弹性变形影响的新进展,可提高索力识别精度;对于拉索的振动控制理论,本书介绍了拉索端部横向和轴向被动和主动控制理论与方法研究的新成果,并经过了试验与工程实践的检验。

本书可供从事拉索振动理论研究与应用的科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的教师与研究生的教学和学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

拉索振动、动力检测与振动控制理论 / 李国强, 顾明, 孙利民著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-040273-8

I. ①拉… II. ①李… ②顾… ③孙… III. ①悬索结构 IV. ①TU351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 053413 号

责任编辑: 王 钰 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年5月第一版 开本: B5(720×1000)

2014年5月第一次印刷 印张: 23 1/4

字数: 447 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



前 言

索是建筑和桥梁结构的一个重要构件,广泛用于大跨度建筑结构、建筑玻璃幕墙结构,以及拱桥、斜拉桥和悬索桥结构。索的振动和索受力大小对含索结构的受力性能、安全性有重要影响。因此,准确确定索力值和控制索的振动具有重要的学术价值和工程应用价值。

尽管存在多种方法确定索力值,但均有一些局限性。例如:静力三点弯曲法,可测试索及索力的大小有限,且现场操作不很方便;磁力法现场操作方便,但索力测试结果的准确性还不十分稳定与可靠。而索力的动力检测方法,既现场操作方便,索力识别精度也较高。

拉索的风雨激振是斜拉桥结构的一个重要问题,涉及桥梁的安全,是目前国际学术研究的前沿。对索的振动进行控制,可减小索本身以及含索结构因素剧烈振动造成的破坏,是有关索振动的重要理论问题。

本书三位作者在同济大学长期从事建筑和桥梁有关振动问题研究,其中也涉及索的振动研究问题。在有关科研项目的资助下,结合研究生的培养,作者对拉索振动、索力振动检测和拉索振动控制开展了系统研究,本书即是在自己研究成果的基础上,结合国内外相关资料,加以总结、整理而成。

本书系统地介绍了索振动的基本理论——自由振动理论,并基于这一理论,介绍了仅利用索自由振动频率的测试结果识别索工作拉力的检测理论。与以前理论相比,本书介绍的理论可考虑拉索弯曲刚度、索端弹性转动约束以及索端弹性横向约束的影响,可使索力识别精度得以提高。

本书还介绍了我们对拉索风雨激振的部分研究成果。而关于索的振动控制,则对已在工程中应用的拉索振动端部横向被动控制理论,以及有潜在应用前景的拉索振动轴向约束被动控制和主动控制理论做了全面介绍,可作为这一索振动理论重要专题的参考资料。

本书共 15 章,其中第 1 章为拉索振动基本理论,第 2 章~第 8 章为索力振动检测理论,第 9 章为拉索风雨激振研究介绍,第 10 章~第 15 章为拉索振动控制理论。本书第 9 章由顾明执笔,第 10 章由孙利民执笔,其余各章由李国强执笔。

感谢国家自然科学基金委员会、科技部等给予本书有关研究的支持,感谢朱保兵、魏金波、姜健、张开莹、杜晓庆、刘彦等研究生对本书有关研究成果做出的贡献。由于我们水平和知识范围有限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2013年3月于同济四平路校区

符号说明

a_{EI}	抗弯刚度对垂度的影响因子	H	动态拉力水平分量
A	截面面积	I	截面惯性矩
A_1	左支座线性谱幅值	I_k	k 阶单位矩阵
A_r	右支座线性谱幅值	k_d	垂跨比
A	系统的系数矩阵	K	刚度系数
B	系统的控制矩阵	K	刚度矩阵
C	阻尼系数	K^*	对角模态刚度矩阵
C	阻尼系数矩阵	K_1	左支承的弹性刚度
d	垂度	K_2	右支承的弹性刚度
d_x	测点与支座间的距离	K_r	弹性约束转动刚度
D	外力作用矩阵	K_g	拉索几何刚度
E	拉索弹性模量	K_e	拉索弹性刚度
\tilde{E}	目标函数	K_{eff}	拉索等效刚度
E_{eff}	等效弹性模量	l	跨度
E_K	弹性支承的弹性应变能	l_{eff}	索的等效长度
E_H	外荷势能	L	拉索锚固点之间的距离
E_I	惯性力虚功	L_e	索的长度
f	矢高; 频率; 激励作用	m	质量线密度
f_1	左支座振动	M_n	第 n 阶振型的广义质量
f_2	右支座振动	M	支座质量
f_n	自振频率	M	模态质量矩阵
f	激励作用向量	M^*	对角模态质量矩阵
F	广义力	O	系统的输出矩阵
F	广义力矩阵	P_{cr}	临界荷载
F_o	最优反馈增益矩阵	Q	广义反应状态向量加权矩阵
g	重力加速度	r	振动的控制限值
h	振动而产生的拉力水平分量	R	几何刚度和物理刚度的比值
h^a	从属运动产生的拉力水平分量	R	控制力向量加权矩阵
h^d	动态运动产生的拉力水平分量	S_1	左支座处的线性谱
H_s	静力平衡状态下拉力水平分量	S_r	右支座处的线性谱

\tilde{S}	由估计参数计算出的估计输入误差	Y	平面外水平运动各阶模态幅值向量
\hat{S}	修正后的估计输入误差	z	竖直平面横向坐标
ds	初始微元长度	z^*	竖直平面内横向振动广义位移
ds'	当前微元长度	z_0	静止时拉索在 z 方向产生的垂度方程
t	时间	Z_n	竖直平面内横向振动第 n 阶正弦波幅值
t_f	振动响应总时间	Z	平面外水平运动各阶模态幅值向量
T	动能	δ	变分符号
u	轴向振动运动分量	Δ_{total}	可动支座沿轴向发生的总位移
\tilde{u}	轴向振动振型函数	Δ_g	由于拉索几何变形而产生的支座位移
U_a	轴向主动控制力	Δ_e	由于拉索弹性伸长而产生的支座位移
U_a	轴向主动控制力向量	Δ_e	由于拉索弹性伸长而产生的支座位移
U_{out}	射流风速	ϵ	轴向应变
U_{in}	来流风速	ϵ_{total}	轴向总应变
v	水平平面内横向振动运动分量	ϵ^s	静态应变
\tilde{v}	水平平面内横向振动振型函数	ϵ^a	从属应变
V	势能	ϵ^d	动态应变
V^e	应变能	$\bar{\epsilon}$	残差向量
V_g	重力势能	Φ	振型矩阵
V^f	外力做功产生的势能	γ_r	橡胶的内摩擦系数
v	传感器输出向量	η_c	阻尼参数
V	模态矩阵	η_n	弹性支座影响系数
w	竖直平面内横向振动运动分量	η_{EI}	抗弯刚度影响系数
\tilde{w}	竖直平面内横向振动振型函数	η_μ	垂度影响系数
x	轴向坐标	η_G	几何非线性影响系数
x^*	轴向振动广义位移	φ	相位角
x_c	阻尼器安装点与拉索锚固点之间的距离	φ_k	第 k 阶相位角
X_n	轴向振动第 n 阶正弦波幅值	λ_i	特征值
y	水平平面横向坐标	λ_i^2	Irvine 参数
y^*	水平平面内横向振动广义位移	λ_L	Lagrangian 乘子函数向量
y	系统的输出向量	μ	Irvine 提出的无量纲参数
Y_n	水平平面内横向振动第 n 阶正弦波幅值		

θ	系统参数的真值	ω'	考虑轴向力作用的固有频率
$\tilde{\theta}$	系统参数的估计值	ω_{sn}	考虑弹性支承的振动频率
$\Delta\theta$	系统参数的估计偏差	ω_{dn}	考虑垂度的固有频率
Θ_a	拉索锚固率	Ω^2	柔性张紧拉索固有频率矩阵
ρ	密度	ξ	阻尼比
σ^2	方差	$\tilde{\xi}$	自然坐标
τ	振动拉伸产生的切向动拉力	ξ_y	模态阻尼比矩阵
ω_{DI}	简谐集中荷载频率		
ω_k	横向自由振动固有频率		

目 录

前言

符号说明

第 1 章 拉索自由振动理论	1
1.1 索的定义	1
1.2 拉索的静力分析	1
1.2.1 忽略抗弯刚度时拉索的静力分析	1
1.2.2 考虑抗弯刚度时拉索的静力分析	5
1.3 拉索的自由振动分析	6
1.3.1 线性振动理论	10
1.3.2 非线性振动理论	16
1.3.3 拉索频率计算公式的仿真分析	18
1.4 各种因素对拉索单阶模态振动的影响	19
1.4.1 忽略抗弯刚度的定量判定	19
1.4.2 忽略垂度的定量判定	22
1.4.3 忽略几何非线性的定量判定	23
1.5 模态耦合对拉索振动的影响	24
1.5.1 面内外一阶模态耦合振动分析	24
1.5.2 面内前三阶模态耦合振动分析	29
1.6 本章小结	31
参考文献	31
第 2 章 不考虑支座振动时索力动力检测理论	32
2.1 垂度的影响	32
2.2 索的抛物线形状和抗弯刚度的影响	34
2.3 索力实用计算公式推导	36
2.4 索力识别过程	40
2.5 试验验证	41
2.5.1 试验构件	41
2.5.2 试验结果	42
2.5.3 试验结果讨论	43
2.6 本章小结	44

参考文献	44
第 3 章 考虑弹性支承影响的索力检测方法	45
3.1 考虑弹性支承柔性索的动力反应	45
3.2 实用计算公式推导	47
3.3 奇偶阶频率交替的条件	54
3.4 索力和边界条件的识别	55
3.5 数值分析	56
3.5.1 数值方程的建立	56
3.5.2 算例	59
3.6 本章小结	68
参考文献	69
第 4 章 考虑抗弯刚度和弹性支承影响的索力检测方法	70
4.1 考虑抗弯刚度和支座振动影响的索的动力反应	70
4.2 实用计算公式推导	73
4.3 奇偶阶频率交替的条件	82
4.4 索力和边界条件的识别	83
4.5 数值分析	84
4.6 本章小结	96
参考文献	97
第 5 章 考虑抗弯刚度、弹性嵌固和弹性支承影响的索力检测方法	98
5.1 索的动力反应	98
5.2 实用计算公式推导	103
5.2.1 反对称振动	103
5.2.2 对称振动	105
5.3 索力识别过程	106
5.4 边界条件的识别	107
5.5 误差敏感性分析	109
5.6 本章小结	117
参考文献	117
第 6 章 索力的系统识别方法	118
6.1 不考虑支座振动的系统参数识别	118
6.1.1 考虑索抗弯刚度的拉索振动理论	118
6.1.2 边界弹性约束的识别	120
6.1.3 拉索的模态参数识别	120
6.1.4 算法收敛性的证明	123

6.2 考虑支座振动时的系统参数识别	125
6.2.1 索的有限单元模型	125
6.2.2 索力识别	131
6.3 索力识别的近似计算公式	134
6.3.1 索的动力反应	134
6.3.2 索力识别实用计算公式推导	136
6.3.3 索的系统参数识别	136
6.4 本章小结	139
参考文献	140
第7章 索力的序列二次规划识别方法	141
7.1 索振动理论	141
7.2 SQP法基本原理	142
7.3 优化数学模型	144
7.4 SQP法的适用性	148
7.5 本章小结	148
参考文献	148
第8章 索力识别的试验和数值验证	149
8.1 试验验证	149
8.1.1 试验模型	149
8.1.2 试验过程	151
8.1.3 试验结果	152
8.1.4 试验结果分析	155
8.2 数值算例验证	155
8.3 本章小结	158
参考文献	158
第9章 拉索风雨激振	159
9.1 拉索风雨激振简介	159
9.1.1 斜拉桥拉索风雨激振现象	159
9.1.2 斜拉桥拉索风雨激振研究状况	159
9.1.3 斜拉桥拉索风致振动的控制	165
9.2 拉索人工降雨试验装置及试验工况	167
9.2.1 试验设备	167
9.2.2 试验模型及参数	171
9.2.3 试验工况	172
9.3 拉索风雨激振的特性	172

9.3.1	主要试验现象	172
9.3.2	风速的影响	173
9.3.3	索倾角的影响	175
9.3.4	拉索风向角的影响	178
9.3.5	拉索空间姿态对上水线位置的影响	180
9.3.6	拉索振动频率的影响	182
9.4	拉索风雨激振的振动控制	182
9.4.1	拉索风雨激振时气动阻尼的测量	182
9.4.2	结构阻尼对拉索风雨激振的影响	184
9.4.3	表面缠绕螺旋线对拉索风雨激振的影响	185
9.5	本章小结	190
	参考文献	191
第 10 章	拉索端部横向约束振动控制理论	193
10.1	拉索的阻尼减振装置种类与性能	193
10.1.1	引言	193
10.1.2	拉索减振阻尼器	194
10.1.3	半主动控制、主动控制方法	203
10.1.4	小结	203
10.2	附加黏滞性阻尼器拉索的分析原理	204
10.2.1	引言	204
10.2.2	附加阻尼器拉索的振动方程	206
10.2.3	拉索的自由振动	208
10.2.4	拉索的模态阻尼	209
10.2.5	黏滞剪切型阻尼器的斜拉索减振设计	211
10.3	实索试验验证	213
10.3.1	试验仪器布置	213
10.3.2	阻尼器安装方案	214
10.3.3	试验结果	215
10.4	本章小结	224
	参考文献	225
第 11 章	拉索端部轴向弹性约束振动控制理论	227
11.1	拉索-弹性约束系统的振动特性	227
11.1.1	拉索-弹性约束系统振动方程及求解	227
11.1.2	拉索-弹性约束系统振动特性的仿真分析	231
11.2	弹性约束的优化设计	234

11.2.1 拉索-弹性约束系统振动方程的无量纲化	234
11.2.2 最优阻尼参数的经验公式	235
11.3 本章小结	241
参考文献	241
第 12 章 拉索端部轴向弹性约束振动控制试验	242
12.1 试验模型及仪器	242
12.2 无弹性约束的拉索自由振动试验	243
12.3 弹性约束参数的测定	246
12.3.1 弹性约束弹簧刚度的测定	247
12.3.2 弹性约束阻尼系数的测定	248
12.4 拉索-弹性约束系统振动特性试验	250
12.4.1 弹性可动支座对拉索振动频率的影响	250
12.4.2 弹性约束减振效果的验证	251
12.4.3 阻尼系数和弹簧刚度对减振效果的影响	253
12.4.4 试验结果与理论研究的对比验证	255
12.5 本章小结	256
参考文献	257
第 13 章 小垂度拉索振动主动控制理论	258
13.1 考虑支座移动情况下小垂度拉索运动模态方程的建立	258
13.1.1 小垂度拉索运动产生的位移-应变关系	258
13.1.2 等效模量的概念	259
13.1.3 小垂度拉索运动的分类	261
13.1.4 小垂度拉索运动产生的轴向拉力	263
13.1.5 Lagrange 方程的建立	265
13.1.6 小垂度拉索运动的模态方程	266
13.2 状态空间里的主动控制模型	269
13.2.1 面外单模态状态方程的建立	269
13.2.2 面内单模态状态方程的建立	270
13.2.3 面外多模态状态方程的建立	270
13.2.4 面内多模态状态方程的建立	272
13.3 主动单模态控制的数值仿真	273
13.3.1 自由振动情况下	274
13.3.2 简谐集中荷载作用下	275
13.3.3 随机荷载作用下	275
13.4 主动多模态控制的数值仿真	277

13.4.1	自由振动情况下	277
13.4.2	简谐集中荷载作用下	279
13.4.3	随机荷载作用下	285
13.5	主动多模态控制的参数分析	288
13.5.1	小垂度拉索质量的影响	288
13.5.2	小垂度拉索初始预拉力的影响	289
13.6	本章小结	291
	参考文献	291
第 14 章	刚性拉索振动的主动控制理论	292
14.1	刚性拉索振动的主动控制模型	292
14.1.1	梁的横向振动方程	292
14.1.2	轴向力对梁横向振动的影响	294
14.1.3	等效模态方法	295
14.1.4	等效模态方法的应用	298
14.2	状态空间里的主动控制模型	301
14.2.1	单模态状态方程的建立	301
14.2.2	多模态状态方程的建立	301
14.3	主动单模态控制的数值仿真	303
14.3.1	自由振动情况下	304
14.3.2	简谐集中荷载作用下	304
14.3.3	随机荷载作用下	305
14.4	主动多模态控制的数值仿真	306
14.4.1	自由振动情况下	307
14.4.2	简谐集中荷载作用下	308
14.4.3	随机荷载作用下	314
14.5	主动 D-V-I Bang-Bang 控制理论及数值仿真	316
14.5.1	主动 D-V-I Bang-Bang 控制理论的提出	316
14.5.2	主动 D-V-I Bang-Bang 控制的数值仿真	318
14.5.3	随机荷载作用下	327
14.6	主动多模态 LQR 和主动 D-V-I Bang-Bang 控制效果的比较	329
14.7	本章小结	331
	参考文献	331
第 15 章	拉索振动主动控制的试验研究	332
15.1	动圈式液压伺服主动控制装置的研发	332
15.1.1	液压伺服控制系统概述	332

15.1.2	液压伺服控制原理及其特点	333
15.1.3	动圈式液压伺服作动器	335
15.1.4	液压动力供应-动圈式液压伺服液压站	337
15.1.5	动圈式液压伺服作动器工作原理	339
15.1.6	动圈式液压伺服主动控制装置现场调试试验	341
15.2	拉索振动主动控制试验方案	342
15.2.1	模型拉索参数的确定	342
15.2.2	试验原理及现场布置	343
15.2.3	试验仪器	344
15.2.4	传感器的测点布置	346
15.2.5	试验方法	347
15.2.6	试验工况	348
15.3	拉索自由振动试验	348
15.3.1	拉索自由振动试验结果	348
15.3.2	拉索自由振动试验结果分析	348
15.4	拉索参数激振试验	349
15.4.1	拉索参数激振的 Simulink 实现	349
15.4.2	拉索参数激振的试验结果	350
15.4.3	拉索参数激振试验结果分析	351
15.5	拉索振动的主动 Bang-Bang 控制试验	351
15.5.1	主动 Bang-Bang 控制策略的 Simulink 实现	351
15.5.2	主动 Bang-Bang 控制试验结果	351
15.5.3	主动 Bang-Bang 控制试验结果分析	353
15.6	本章小结	354
	参考文献	354

第 1 章 拉索自由振动理论

1.1 索的定义

索抵抗横向变形的刚度由两部分组成：一部分是物理刚度，即抗弯刚度 EI ；另一部分是因张力 H_s 产生的几何刚度。对于大部分正常使用中的索，几何刚度明显大于物理刚度；但对于施工中索力还不是很大的索，或者较短较粗的索，物理刚度的影响就不应被忽略。本书给索一个量化的定义：当结构构件因张力产生的几何刚度大于物理刚度时，该构件被定义为索；反之该构件被定义为梁。

1.2 拉索的静力分析

1.2.1 忽略抗弯刚度时拉索的静力分析

如图 1.1 所示，忽略拉索的抗弯刚度，拉索的静力平衡方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \left(T_s \frac{dx}{ds} \right) = 0 \\ \frac{d}{ds} \left(T_s \frac{dz}{ds} \right) + q = 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

式中， T_s 为索中拉力； q 为竖向均布荷载。

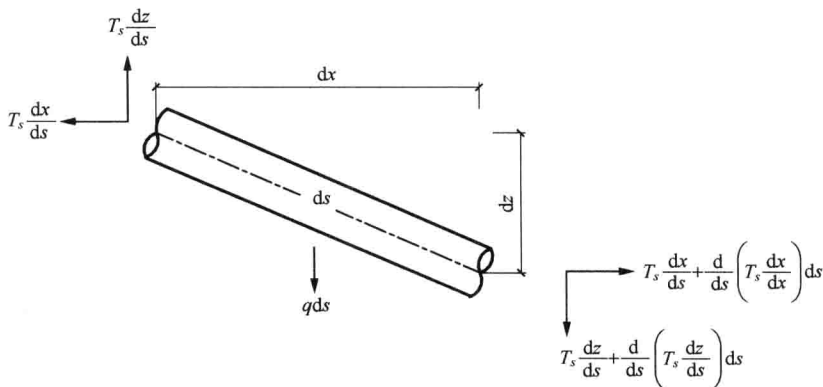


图 1.1 拉索单元体的静力平衡

情形一：质量沿索长均匀分布，令 m 为沿索长的单位长度质量，即 $q = mg$ ，代入方程(1.1)得

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \left(T_s \frac{dx}{ds} \right) = 0 \\ \frac{d}{ds} \left(T_s \frac{dz}{ds} \right) + mg = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

由几何关系 $\frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2}$ ， $H_s = T_s \frac{dx}{ds}$ ，方程(1.2)化简为

$$\begin{cases} \frac{dH_s}{dx} = 0 \\ \frac{d}{dx} \left(H_s \frac{dz}{dx} \right) + mg \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2} = 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

由方程(1.3)第一式得 $H_s = \text{常数}$ ，代入方程(1.3)第二式得

$$H_s \frac{d^2 z}{dx^2} + mg \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2} = 0 \quad (1.4)$$

如图 1.2 所示，由边界条件 $x=0$ 时， $z=0$ ； $x=l$ 时， $z=c$ 。求解式(1.4)可得拉索的曲线方程

$$z = \frac{H_s}{mg} \left[\text{ch}\alpha - \text{ch} \left(\frac{2\beta x}{l} - \alpha \right) \right] \quad (1.5)$$

式中， $\alpha = \text{arcsh} \left[\frac{\beta(c/l)}{\text{sh}\beta} \right] + \beta$ ； $\beta = \frac{mgl}{2H_s}$ 。

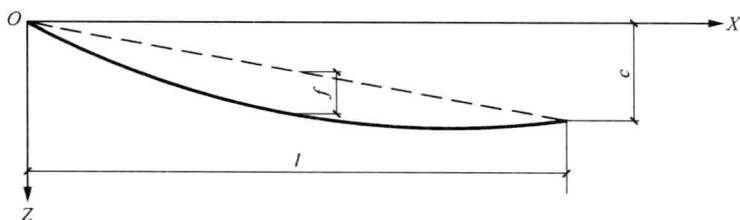


图 1.2 斜拉索的几何模型

当两端支座等高时， $c = 0$ ， $\alpha = \beta = \frac{mgl}{2H_s}$ ，代入式(1.5)得

$$z = \frac{H_s}{mg} \left[\text{ch}\alpha - \text{ch} \left(\frac{mgx}{H_s} - \alpha \right) \right] \quad (1.6)$$

上式即为拉索的悬链线方程。设跨中垂度为 d ，即当 $x = l/2$ 时， $z = d$ ，代入式(1.6)可得拉索水平拉力和垂度的关系为

$$d = \frac{mg}{H_s} (\text{ch}\alpha - 1) \quad (1.7)$$