

铁路桥梁减震

T IELU QIAOLIANG JIANZHEN SHEJI YU YINGYONG

设计与应用

[美]陈永祁 赵前进 马良喆 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路桥梁减震设计与应用

[美] 陈永祁 赵前进 马良喆 编著



中国铁道出版社

2018年·北京

北京市版权局著作权合同登记 图字 01-2018-2683 号

内 容 简 介

本书共五篇 16 章,首先概述了铁路桥梁减隔震现状、基本理论,基于性能的抗震设计方法以及阻尼器的选用分析等,然后采用多个工程案例介绍并分析了铁路桥梁用减震器的抗震设计、铁路桥梁刹车减震设计以及铁路桥梁横向振动控制,最后介绍了铁路桥梁用阻尼器的测试。全书工程案例丰富,分析数据翔实,对铁路桥梁抗震和减隔震的研究与设计具有很好的借鉴作用。书中介绍的关于消能减震装置的测试等相关内容,同样适用于建筑工程领域。

图书在版编目(CIP)数据

铁路桥梁减震设计与应用/(美)陈永祁,赵前进,
马良喆编著. —北京:中国铁道出版社,2018. 5
ISBN 978-7-113-24480-4

I. ①铁… II. ①陈…②赵…③马… III. ①铁路桥-
防震设计 IV. ①U448. 132. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 088481 号

书 名: 铁路桥梁减震设计与应用
作 者:[美] 陈永祁 赵前进 马良喆

策 划: 陈小刚
责任编辑: 陈小刚 编辑部电话: 010-51873193
封面设计: 王镜夷
责任校对: 胡明锋
责任印制: 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 中国铁道出版社印刷厂
版 次: 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 13 字数: 311 千
书 号: ISBN 978-7-113-24480-4
定 价: 58.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480



北京奇太总裁陈永祁博士（左一）与泰勒公司总裁 Douglas P. Taylor 合影



北京奇太总裁陈永祁博士（左一）与纽约州立大学布法罗分校
M. C. Constantinou 教授合影



北京奇太总裁陈永祁博士（右一）与美国泰勒公司副总裁 Alan Klembczyk 合影



北京奇太总裁陈永祁博士（右二）、中国专家和泰勒公司工作人员合影



天津至秦皇岛高速铁路桥

我国高烈度地震区超大减震工程，共安置 50 个泰勒锁定装置。



内蒙古乌锡铁路黄河特大桥

国内跨越黄河最长单线铁路桥，共安置 48 套阻尼器。



甘肃天水社棠渭河特大桥

首次采用 45° 放置控制纵横两方向减震作用，共安置 32 套黏滞阻尼器。



额定力 (kN)	4000
数量 (个)	12
冲程 (mm)	±150
锁定速度 (mm/s)	0.25
安全系数	1.8
长度 (mm)	2005
最大直径 (mm)	425.25
锁定位移 (mm)	±12
使用年限 (年)	75/50
保修年限 (年)	35



跨京沈高速公路匝道特大桥

石济铁路客运专线跨越黄河段为公铁两用四线特大桥，大桥长度为 1792km，主跨为 180m 的连续钢桁梁。



颍上矮塔斜拉桥

颍上特大桥新建铁路工程商丘至阜阳段上的一座混凝土双塔矮塔斜拉桥，安置 8 套泰勒液体黏滞阻尼器。（建设中）

阻尼器参数：

$F=3500\text{kN}$ $D=\pm 250\text{mm}$ $C=4000\text{kN}/(\text{m/s})^{0.3}$

东平水道特大桥

首次放置带（PVR）熔断的锁定装置控制日常通行荷载，安置 12 套黏滞阻尼器，4 套带熔断的锁定装置。阻尼器参数：

① $F=3600\text{kN}$ $D=\pm 150\text{mm}$ $C=7500\text{kN}/(\text{m/s})^{0.5}$

② $F=1800\text{kN}$ $D=\pm 100\text{mm}$ $C=3750\text{kN}/(\text{m/s})^{0.5}$

带泄压阀锁定装置参数：

$F=2500\text{kN}$ $D=\pm 150\text{mm}$ $E.S=225\text{kN/mm}$



云南玉溪至磨憨铁路项目景洪澜沧江大桥

新建玉磨铁路是泛亚铁路中线中的重要组成部分，起于云南玉溪，途经普洱、景洪，止于磨憨口岸的铁路项目。澜沧江上的景洪大桥、橄榄坝大桥和南溪河大桥共安置 8 套液体黏滞阻尼器，8 套锁定装置。

橄榄坝澜沧江大桥

作者简介

陈永祁 男,美国国籍。1966年毕业于北京工业大学土木建筑系结构专业。1968年~1978年先后就职于第一机械工业部陕西三线工厂和纺织工业部设计院,从事设计、施工工作八年,担任设计工程师两年。1978年进入中国建筑科学研究院研究生院学习,1981年毕业并获得硕士学位后开始在建研院抗震所工作。1986年在美国纽约州立大学布法罗分校土木建筑系攻读博士学位。1989年~1993年在美国设计核电站公司先后担任工程师、高级工程师。1991年创办美国蓝湖国际公司,1998年任美国 Taylor 公司中国代理、高级工程师,2005年创办北京奇太振控科技发展有限公司。自1998年以来,完成了北京银泰中心、北京盘古大观、天津国贸中心等20多个建筑阻尼器工程,苏通长江大桥、西堠门跨海大桥、印度尼西亚马都拉跨海大桥、云南龙江特大桥等48个桥梁阻尼器工程,并获得四项相关专利。截至目前,已出版《桥梁工程液体黏滞阻尼器设计与施工》《结构保护系统的应用与发展》《桥梁地震保护系统》等专著,发表土木工程领域的论文60余篇。

赵前进 男,1974年出生。1997年毕业于长沙铁道学院土木工程系桥梁工程专业,大学本科,获工学学士学位。2013年获西南交通大学工程硕士学位。1997年~2005年,就职于中铁二院昆明公司担任设计工程师。2005年进入昆明铁路局项目管理中心工作,高级工程师职称,现任昆明铁路局滇南铁路建设指挥部总工程师兼铁路总公司建设工程专家、昆明铁路局建设工程专家。曾获得中国铁道学会铁道科技奖二等奖两项,在省部级及以上刊物公开发表过多篇论文。

马良喆 男,1973年出生。1996年毕业于吉林建筑工程学院土木工程系土木工程专业。2001年进入哈尔滨工业大学土木工程学院攻读硕士学位,从事结构耗能减震方面的研究工作。2005年前,先后就职于北京市建筑工程研究院检测所和中国电子工程设计院,分别从事建筑材料检测、结构构件桩基检测以及工业建筑结构设计等工作。2005年进入北京奇太振控科技发展有限公司,负责耗能减振技术的应用开发,陆续参与了多项高层建筑、大跨桥梁结构的抗震抗风计算分析及现场工作。截至目前,在土木工程领域发表论文20余篇。

前 言

作为中国经济高速发展的一张名片,高速铁路已经成为我国国力和科技发展的重要标志。随着高速铁路建设的快速发展,采用阻尼器对高速铁路桥梁进行减震控制正成为一项重要的工程技术手段。一方面,阻尼器减震技术对铁路桥梁地震作用下的位移、受力控制作用显著,由于阻尼器的应用,从根本上已经提高和改善铁路桥梁的抗震能力,可以说这是铁路桥梁建设史上的一次重大飞跃;另一方面,阻尼器极大地减轻了桥梁在高铁运行过程中的受到的冲击作用,提高了铁路桥梁的整体耐久性和桥梁附属结构的使用寿命。当前,如何把我国这项技术提高到世界最先进的技术水平上并有效地广泛应用于铁路工程领域,是我们铁路工程建设者们应该给予重视和解决的问题。

位于美国纽约州布法罗城的泰勒公司是世界上专业生产阻尼器的佼佼者。从1955年成立以来,公司就引领了美国吸能减震领域的先进技术,为航天飞机、航天飞船(如阿波罗号登月飞船)、导弹、大炮、枪弹等军工产品设计并生产了减震装置。泰勒公司在世界上也首次成功地把其先进的液体黏滞阻尼器应用到工程中,如在美国、加拿大、英国、日本等国家均有成功的工程案例。1998年,泰勒阻尼器进入中国市场,并成功应用于北京站加固工程中,随后又陆陆续续安置在一些国家重点工程中,如苏通大桥、北京银泰中心等。

泰勒公司有着非常不同的经营理念。公司将撰写的论文和试验报告完整地公开于门户网站上,供工程技术人员、在校师生下载参考。论文内容主要包括产品特色、产品内部的基本构造,以及产品在加工制造过程中的细节处理,如:采用性能稳定的二甲基硅油,而不采用温度稳定性差的胶泥作为介质;采用小孔射流技术代替性能不稳定的阀门产品;提示阻尼器需要足够的功率来消耗所产生的热量,从而避免漏油。其中,泰勒阻尼器的几张小孔激流图片甚至成为了结构工程研究生教材的范本。

泰勒公司凭借着技术优势,获得了国际工程界的认可。2015年5月19日,在世界高层都市建筑学会(CTBUH)召开的阻尼专家组会议上,泰勒公司成为唯一被邀请的减震装置厂家代表,并被委托撰写学会专题论文,以及提供北京银泰中心、北京盘古大观、天津国际贸易中心、武汉保利大厦、重庆朝天门工程等多个座

超高层建筑的案例研究。

自 1998 年以来,随着泰勒公司进入中国市场,我国阻尼器行业也获得了极大的发展,目前我国已经发布了《桥梁用黏滞流体阻尼器》(JT/T 926)、《建筑消能减震技术规范》(JGJ 297)两项行业标准。如果阻尼器完全按照行业标准进行认真严格测试(特别是《桥梁用黏滞流体阻尼器》中阻尼器的内压测试),那么阻尼器的质量应该是可以得到保证的。作为承担铁路桥梁重要保护作用的阻尼器,其重要性不言而喻,必须有经得起时间考验的、严格的产品质量判别标准。笔者认为,从应用和耐久性等方面来看,适用于铁路桥梁的阻尼器应具有如下几点特征:

其一,参数可以准确地定量。铁路桥梁上经优化并准确定量计算得到的阻尼器参数,必须在真实环境(即各种复杂条件)下都能满足理论计算所用到的本构关系。参数中所要求的速度指数在 0.2~2.0 之间,是由设计者优化结果指定的速度指数。

其二,不设阀门和油库。三十年前,世界很多阻尼器厂家都在设备外(或内)设置储能器、储油库以及控制阀门,设有这种阀门、油库的阻尼器存在耐久性较差、过载后引起副作用、具有频率相关性以及不能进行缩尺试验、由于连接间隙造成微小振动盲区等诸多问题。这种技术落后的产品,容易在振动时损坏。此类阻尼器的缺陷,可以通过严格检测,特别是大量试件的超载测试、本构关系测试和长期使用的观测后被发现。

其三,需要实现不漏油。不可否认,液体阻尼器的漏油问题一直存在,这一问题有时甚至影响到设计人员对是否使用减震技术的最终决定。一些厂家仅仅以普通的液压技术处理阻尼器的密封问题,而实质上阻尼器和各种油泵的技术完全不同。真正解决漏油问题,需要采用先进的设计理念,以及精密的加工、检验。采用上百万次以上的循环试验可以较为快速地模拟阻尼器在真实情况下的运行情况,同时通过测试阻尼器腔体的内压以量化阻尼器漏油情况,进而评估其密封性能,分辨出漏油产品。

其四,低速性能表现良好。铁路桥梁日常主要承受车辆动力荷载和风荷载,阻尼器安置于桥梁后一般情况下以很低的速度持续地工作,应始终按本构关系正常发挥其减震功效。阻尼器的摩阻力在一般设计计算中可能没有涉及,但如果过大会影响到阻尼器的基本性能。实现较小的阻尼器内摩擦是阻尼器的关键技术。总之,在大荷载、大冲程、短时间或小荷载、小冲程、长时间的情况下,阻尼器应该都能有效地工作。

其五,具有足够高的安全系数。在超大地震发生时,阻尼器不应被破坏,能否

起到抗震作用至关重要。近几年来,在汶川、智利等超出设计范围的大震对结构造成了严重破坏。因此,具有足够高的安全系数是阻尼器耗能抗震、能抵御超强地震的必要条件。

一个好的阻尼器产品,应该能够满足工程需求,保护结构安全。因此,针对桥梁工程的不同需求,需要研发生产多种类型的阻尼器,如:可用于连续工作的金属密封的阻尼器,带限位的大型阻尼器,悬索桥应用的大运动量的阻尼器,特大受力、特大冲程的阻尼器等。

能合格应用 75 年以上的阻尼器产品在安装前一定要经过严格的检测。我们一直期望我国能实现像美国土木工程学会 20 世纪 90 年代组织进行的联合预检测,只可惜至今仍未实现。目前我国工程已经安置的阻尼器中,很多都没有经过预检测;一些国际上已被证实不适用于铁路工程的产品,在我国仍被使用。

时代在发展,社会在进步。阻尼器新技术的出现并获得成功,绝不能一蹴而就,新技术从研发到产品商业化,绝不是边研制、边生产的过程。如果仅靠新产品专家鉴定会评审意见,没有经过实际工程考验和多次、多方测试鉴定,就将产品广为推广和使用,既是一种不科学的态度,也是不负责任的行为。当前,在我国高铁快速发展的阶段,铁路桥梁正处于广泛应用阻尼器的初期,阻尼器用量庞大,因此必须严格把控产品质量。看到国家对结构减隔震技术的支持和鼓励,阻尼器行业在不断发展壮大,笔者甚感欣慰。

本书的出版,旨在向读者介绍阻尼器的特征和性能,向工程设计人员提供一些典型工程案例供参考。同时,也希望本书的出版能够进一步引导和鼓励阻尼器行业朝着健康有序的方向发展,造福人类,服务社会。在此,我要特别提及如下诸位同仁:

首先,我要感谢美国泰勒公司的 Douglas Taylor 总裁、Mr Alan 副总裁、Mr Robert Schneider 和 Mr Craig Winter 销售工程师,以及美国纽约州立大学布法罗分校 M. C. Constantinou 教授一直以来对我们工作的指导和帮助!

其次,本书的顺利出版与铁道部退休教授张红旭和李吉林处长的鼓励和支持密不可分。本书收集的实际工程算例大多取自我们参与的项目,没有铁一院、铁二院、铁三院和中铁工程设计咨询公司的陈克坚、杨正武、李凤琴、刘伟、陈频志、曾永平、陈思孝、颜志华、欧阳辉来、许振东、周岳武、雷小峰、鄢玉胜、艾智能、戴晓春、胡玉珠、杨熹文等领导和工程师们的合作帮助,我们是不能完成这些工作的,在此向他们表示感谢!本书部分内容是在燕山大学土木工程系郑久建教授的指导以及蒋超、申现龙、雷大根、张朋宇、刘晓丰的参与下完成的,再次向郑教授团队表

示感谢!

再次,美国阿拉斯加大学刘荷教授退休后来我公司工作,她严谨和精益求精的学术精神令人钦佩,她多次对本书各章节提出了宝贵的修改意见,在此对刘荷教授表示感谢!

最后,我还要介绍一些现在和过去的同僚,他们是吴福春、崔禹成、郑铭、楚志坚、曹铁柱等,本书的出版离不开他们出色的工作,在此向他们表示感谢!

陳永印

目 录

第一篇 综 述	1
1 概 述	3
1.1 铁路桥梁抗震和减隔震现状	3
1.2 桥梁减隔震基本理论	5
1.3 桥梁用减隔震装置	6
1.4 国际减隔震装置生产商	10
2 基于性能的抗震设计方法	12
2.1 基于性能的地震工程第一代工具	12
2.2 基于性能的地震工程第二代工具	13
2.3 基于性能抗震设计的主要内容	14
2.4 我国桥梁抗震设计规范与基于性能的抗震思想	17
2.5 基于性能抗震设计方法	18
2.6 结 论	21
3 铁路桥梁用减震器装置选用	22
3.1 具有初始力桥梁阻尼器的适用性分析	22
3.2 速度指数为 0.1 的阻尼器适用性分析	24
3.3 铁路桥梁工程应用的阻尼器产品类型	26
3.4 天兴洲 MR 与黏滞阻尼器混合控制	31
3.5 黏滞阻尼器和摩擦摆配合使用	33
3.6 结 论	35
第二篇 铁路桥梁用减震器的抗震设计及应用	37
4 社棠渭河特大桥减隔震设计	39
4.1 概 述	39
4.2 模型的建立与阻尼器参数的选择	39
4.3 减震效果分析	43
4.4 结 论	48
5 津秦客专大跨度连续桥减震设计	49
5.1 概 述	49

5.2	速度锁定装置参数的选取	50
5.3	速度锁定装置减震效果分析	50
5.4	结 论	55
6	乌锡线黄河特大桥减震设计	56
6.1	引 言	56
6.2	结构特性及阻尼器的设置	56
6.3	地震作用下的结构控制效果	57
6.4	结 论	60
7	明月峡长江大桥消能减震设计	61
7.1	工程概况	61
7.2	结构模型及模态分析	64
7.3	阻尼器参数优化	66
7.4	阻尼参数选取	77
8	元江双线特大桥减震设计	78
8.1	概 述	78
8.2	结构的动力特性分析	79
8.3	基于黏滞阻尼器的减震分析	82
8.4	阻尼器参数优化结果及方案设计	93
8.5	非线性时程分析的减震效果	95
9	东平水道桥消能减震设计	99
9.1	结构体系和减震方案	99
9.2	结构模型和模态分析	100
9.3	地震作用下减震设计	102
9.4	熔断锁定装置和阻尼器性能	110
10	景洪澜沧江大桥抗震性能评估的 Pushover 分析	112
10.1	引 言	112
10.2	侧向荷载模式	113
10.3	实例分析	113
10.4	结果分析	116
10.5	结 论	120
第三篇	铁路桥梁刹车减震控制	121
11	概 述	123
11.1	引 言	123

11.2 铁路荷载的特殊性·····	124
11.3 铁路桥梁的振动控制·····	126
11.4 铁路桥梁用减震设备的特殊要求·····	130
11.5 工程实例简介·····	130
11.6 结 论·····	134
12 元江大跨铁路钢桁拱桥减震设计分析·····	135
12.1 引 言·····	135
12.2 控制刹车荷载用锁定装置方案·····	135
12.3 计算过程·····	136
12.4 锁定装置的减震效果·····	143
12.5 新型带熔断锁定装置·····	144
13 韩家沱长江大桥减震设计分析·····	145
13.1 引 言·····	145
13.2 韩家沱长江大桥减震设计·····	145
13.3 地震波的选择·····	146
13.4 阻尼器参数优化·····	147
13.5 韩家沱长江大桥制动荷载控制分析·····	149
13.6 结 论·····	152
第四篇 铁路桥梁横向振动控制 ·····	153
14 桥梁横向减隔震·····	155
14.1 桥梁设置横向减隔震措施的必要性·····	155
14.2 桥梁横向减隔震技术国内外发展概况·····	156
14.3 桥梁横向减隔震基本原理·····	157
14.4 横向激励·····	158
14.5 横向减隔震措施与装置·····	160
14.6 案例分析·····	162
14.7 展 望·····	165
第五篇 铁路桥梁用阻尼器测试 ·····	167
15 云南龙江大桥液体黏滞阻尼器测试·····	169
15.1 引 言·····	169
15.2 阻尼器的检验测试·····	169
15.3 龙江大桥阻尼器的检测·····	170
15.4 结论及建议·····	181

16 杜棠渭河特大桥阻尼器测试	182
16.1 阻尼器测试计划	182
16.2 阻尼器检测结果	182
16.3 结论及建议	186
参考文献	188

第一篇

综 述