



人行桥的振动

Vibration and Dynamic Design
of Footbridges

与动力设计

陈政清 华旭刚 编著



人民交通出版社
China Communications Press

Vibration and Dynamic Design of Footbridges
人行桥的振动与动力设计

陈政清 华旭刚 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

全书共分6章和一个附录。第一章绪论描述了人行桥振动问题的各个方面和典型振动事故。第二章和第三章阐述人行桥动力设计的基本原理和方法。第四章论述当前人行桥横向振动的主要理论。第五章系统总结了人行桥减振设计方法、原理和仿真技术。第六章以我国一个大跨度人行桥设计方案为例,示范了动力设计(含减振设计)的全过程。附录介绍德国2007年的设计指南(EN03)供参考。

本书可供人行桥设计、施工和建设人员以及相关科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

人行桥的振动与动力设计/陈政清,华旭刚编著. —北京:人民交通出版社,2009.8

ISBN 978-7-114-07856-9

I. 人… II. ①陈…②华… III. 人行桥-振动控制-设计 IV. U448.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第108255号

书 名:人行桥的振动与动力设计

著 作 者:陈政清 华旭刚

责任编辑:曾 嘉

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:18.25

字 数:348千

版 次:2009年10月 第1版

印 次:2009年10月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07856-9

定 价:45.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

人类最古老的桥是独木人行桥,最早感知的桥梁振动也是人致振动。“走一步来摇三摇”,就是独木桥人致振动的形象描述。人行桥的振动又是一个长期被忽视的问题,直到2000年英国千禧桥在开通当日即发生过度横向振动事件,并且发现其他桥上也有过同样的过度振动现象发生,才引起了前所未有的广泛重视。我国也有一些人行桥振动导致行人不适的问题发生。伴随着城市的大规模现代化进程,我国人行桥建设发展迅速,因此了解、重视人行桥的振动问题,掌握人行桥的动力设计与振动控制技术,是我国从事人行桥建设和研究的技术人员十分紧迫的任务。

土木工程结构广义的动力设计概念可以认为包括抗震设计、抗风设计以及车辆、行人和动力机械所致的环境振动的评估和减振设计,这里所说的环境振动包括结构自身和使用者的振动在内。狭义地讲,结构动力设计主要指结构动力特性分析和修改,减振措施可认为是结构动力特性修改的一部分和延伸。本书论述人行桥的人致振动评估方法和减振设计。

自2000年以来,人行桥的人致振动研究有很大的进展:分别于2002年、2005年和2008年召开了3次人行桥振动的国际会议,研究论文与日俱增;欧洲法、德等国重新修订了人行桥设计指南或规范。经过近10年的努力,桥梁界已达成共识:大跨度的人行桥必须通过动力设计以保证其动力使用性能,特别是横向动力稳定性能;减振设计应当视为结构设计的一部分而不是事后的补救措施。

我们一直关注人行桥振动问题,多年来搜集和阅读了大量的文献资料,并作了一些基础研究和应用研究,为本书的编著作了充分的准备。本书的写作原则是:设计与研究并重。前三章介绍了人行桥人致振动的基本原理和人行桥动力设计方法,为读者使用国外指南进行人行桥动力设计提供了必要的背景材料。人行桥存在横向动力失稳,即振幅突然增大的现象。如何解释和预测这一现象,是当前人行桥振动研究的热点。第四章尽可能详尽地介绍了若干学者有代表性的横向振动理论,以期推动我国在这一方面的研究。第五章系统介绍了人行桥减振的主要措施和设计方法。第六章以我们直接参与的一个大跨度人行桥设计为例,示范了人行桥动力设计和减振设计全过程。

本书前四章由陈政清执笔,后两章由华旭刚执笔,全书内容由陈政清组织和审定。博士生李红利起草了第3.3节并承担了很多打印工作。湖南大学桥梁系的李寿英、张

志田两位副教授与风工程试验研究中心的王建辉高工也参与了部分工作。研究生邹云峰、何文飞、金志坚、胡海波、周帅、吕建国、刘震卿、唐必刚和强昌旭等参与了资料收集和试验工作。湖南大学刘光栋教授关心和鼓励本书的写作,亲自审核了部分章节,并对全书提出了很多好的建议。公式(4-5-4)的原作者回答了陈政清的质询并给出了校正后的公式。第六章工作得到了广州市政设计研究院杨勇高级工程师等多位技术人员的支持和协助。人民交通出版社张征宇主任及其同仁为本书出版也做了大量工作。作者向上述提及和未提及的所有帮助本书出版的单位和个人表示诚挚的谢意。书中取自他人研究论文的内容均标明了原研究者和相应的参考文献,以示尊重和谢意。

当前我国正处于城市化建设高潮之中,人行桥建设日益增多,在建人行桥最大跨度已达到 200m。作者希望本书的出版,可以进一步推动我国人行桥人致振动问题的研究,尽早编制我国专门的人行桥设计指南或规程。

作者 谨识于湖南大学
2009 年 6 月 25 日

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	1
1.1 英国伦敦千禧桥的教训	1
1.2 其他人行桥事故的回顾	5
1.3 人行桥振动的基本原理与研究内容	13
1.4 人行桥的发展与动力设计简介	17
第二章 行人脚步动荷载	20
2.1 行人脚步动荷载的分类和研究方法	20
2.2 脚步动荷载的测量	21
2.3 单人脚步荷载的数学模型	44
2.4 多人脚步动荷载的数学模型	57
第三章 行人激励的桥梁结构振动	74
3.1 人行桥结构的动力特性	74
3.2 动力设计的简化分析方法	85
3.3 人行桥人致振动精细算法	91
3.4 行人过桥的舒适度	98
3.5 国外大跨度人行桥动力设计实例	106
第四章 人行桥横向振动理论	116
4.1 概述	116
4.2 人行桥直接共振理论	118
4.3 人桥相互作用理论	121
4.4 人行桥参数共振理论	143
4.5 桥上人群移动的可压缩流体模型	150
第五章 人行桥的被动耗能减振设计	170
5.1 人行桥的减振	170
5.2 黏滞阻尼器减振设计	182
5.3 调谐质量阻尼器减振设计	196

5.4	调谐液体阻尼器减振设计·····	211
5.5	带减振系统的人行桥动力仿真分析·····	215
第六章	某人行曲线斜拉桥的动力设计与振动控制 ·····	227
6.1	工程概况·····	227
6.2	结构参数·····	228
6.3	原设计方案的人致振动分析·····	229
6.4	设置连杆的人行桥的动力设计·····	244
附录	德国人行桥设计指南(钢结构在人行荷载下的振动 EN03,2007) ·····	260



第一章 绪 论

1.1 英国伦敦千禧桥的教训

1.1.1 伦敦千禧桥关闭事件

2000 年,英国为庆祝进入 21 世纪而建的一项重要桥梁工程——伦敦千禧桥^[1-1] (图 1-1-1)开通仅三天就不得不关闭。这一事件受到了全世界异乎寻常的关注。



图 1-1-1 伦敦千禧桥(从桥面上向北望可见圣保罗大教堂)

千禧桥(The Millennium Bridge)是英国伦敦泰晤士河上新建的一座人行桥。该桥是一座结构新颖的扁平轻巧的悬索桥,是自伦敦塔桥 1894 年建成后约 100 年来在伦敦泰晤士河上首次修建大桥,它为两岸的圣保罗大教堂和新泰特现代艺术馆提供一个优雅从容的步行通道,如图 1-1-1、图 1-1-2 所示。所以,该桥从规划、设计以来备受

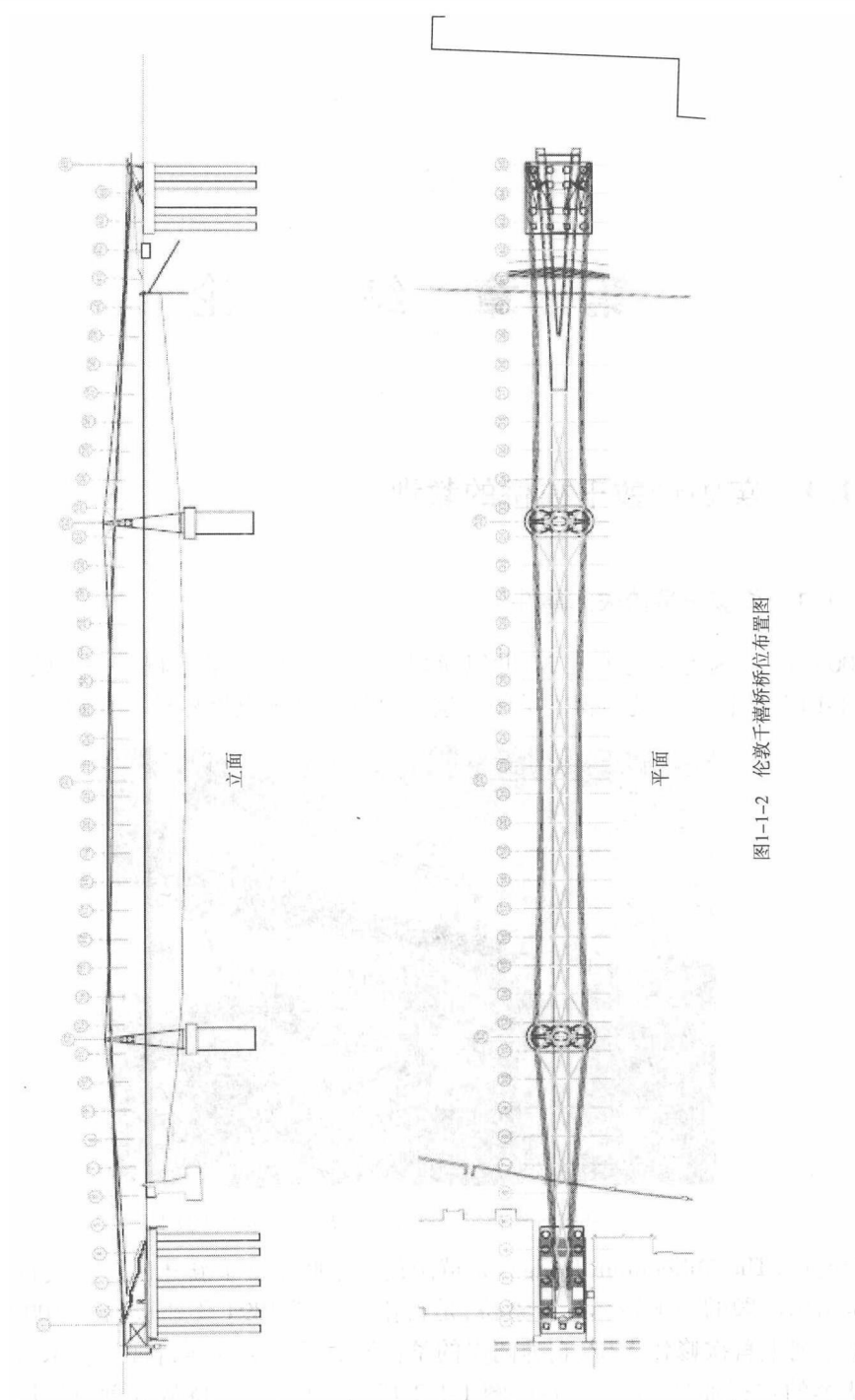


图1-1-2 伦敦千禧桥桥位布置图

关注。该桥于2000年6月10日开通,不幸的是,开放行人当日桥梁即发生过量的横向摇摆,在减少上桥人数仍发生过量横向摇摆的情况下,6月12日临时关闭该桥梁。这样一座事先大肆渲染,女王亲自剪彩,耗资达1800万英镑的新结构桥梁在开通三天后就不得不关闭的重大新闻立刻传遍了全世界。据统计,全世界有超过1000篇的专业文献和150家的媒体报道了千禧桥的过度振动问题。部分媒体甚至怀疑桥梁的安全问题,因而采用了有震撼力的标题。例如:那座摇摆不定的桥将长期关闭(BBC新闻);两百万英镑要用于加固这座摇摇晃晃的桥,明年春天前都不能开通(每日报);那座圆润柔美的桥在风中摇摆晃动如此厉害,以至于人们担心伦敦桥会倒塌(华盛顿邮报);我国学者也对这一事件做过分析和研究^[1-2]。

据估计,开放当天有80 000~100 000人通过了该桥。录像分析表明(图1-1-3),最高峰时约有2000人同时在桥上,人群密度达到1.3~1.5人/m²。

该桥有南跨、北跨和中跨,桥位如图1-1-2所示。其中大幅度侧向振动主要发生在南跨和中跨。南跨一阶侧向频率大约为0.8Hz,中跨的一阶侧向频率低于0.5Hz,二阶频率低于1.0Hz。北跨振动要小一些,振动频率略大于1.0Hz(北跨一阶侧向频率)。大幅度的振动并不是持续发生的,但是当大量行人在桥上行走时,振动就增大,而行人减少或停止行走时,振动就减小。根据目测估计南跨和中跨的最大侧向加速度为0.200~0.250g。在这样的加速度水平下,大量的行人行走困难,不得不停下来依靠栏杆保持身体平衡。没有观察到过大的竖向振动。

第二天控制行人流量的情况下振动仍然影响到正常行走,所以在6月12日决定关闭桥梁禁止通行并开始研究其振动产生的原因。



图1-1-3 行人走过千禧桥



1.1.2 千禧桥的结构特点 ▶▶

为了从桥面上可以完整地看到圣保罗大教堂,同时考虑通航高度的要求,千禧桥选择了很薄的带状桥型。

建成的桥梁结构为浅悬索桥,主缆垂度只有 2.3m,垂跨比约为 $1/63$,比通常悬索桥的垂跨比 $1/8 \sim 1/12$ 小很多。为了便于从桥上观看风景,缆索尽量布置得低于桥面。两组四根直径 120mm 的主缆连接两岸桥台和河中两桥墩,形成三跨连续结构:北边跨 81m,中跨 144m 和南边跨 108m。千禧桥没有吊杆,竖向高度和横向宽度都不等的 U 形横梁直接固定在主缆上,使每边四根主缆处于同一水平面上。同时,主缆水平中心距也不是常数,在 $10 \sim 13.4\text{m}$ 之间变化。横梁每隔 8m 一道,纵梁为两根圆钢管,直接与横梁两边焊接。

$1/63$ 的极小垂跨比导致主缆产生很大的张力。桥梁恒载为 20kN/m ,恒载引起拉索的张力为 22.5MN 。千禧桥竖向和水平刚度均来自于拉索的张拉刚度,故其竖向和侧向刚度一致,因此不需要任何附加的结构来抵抗风荷载。千禧桥的动力特性证明它的侧向刚度与其他跨度类似的人行桥刚度在同一范围之内,因此,过量振动与该桥的新结构形式无关。

两主缆之间的水平距离是桥面宽度的 $2.5 \sim 3.5$ 倍,如此可以增大桥梁的抗扭刚度。这样的几何形状有两个优点:首先可以使由于横方向不对称活载产生的扭转角最小;另外,抗扭刚度的增加有助于分离结构的扭转和弯曲振动频率,这改善了结构的空气动力特性。

桥面板宽 4m,长 16m,是蜂窝状轻型铝板。桥面板之间为铰结滑动联结方式,直接铺设在纵横梁结构之上,不参与全桥结构受力。

1.1.3 千禧桥的减振措施 ▶▶

事后的实验室研究和现场研究证明,千禧桥的竖向及横向频率正好在步行力的频率范围之内,当行人很多时,就不可避免地会产生人桥共振效应。显然,限制过桥人数是违背建桥初衷的。因此,减振措施要达到的指标被设定为 2人/m^2 的高密度条件下桥梁振动在行人可接受的范围之内。

改善桥梁动力特性有两种普遍可采用的方法。第一种就是增大桥梁的刚度,使侧向固有频率不在侧向激励的频率范围内。第二种就是提高桥梁的阻尼来减少共振响应。

最困难的是增大中跨频率,它的一阶固有频率只有 0.49Hz 。固有频率增加三倍,理论上侧向刚度要增加九倍,而且要保证增加刚度的同时质量不增加。事实上,任何涉及刚度增加的方法都会增加质量,因此刚度要求增加十倍以上。

主跨的所有刚度几乎都是拉索的几何刚度提供的。即使桥面完全由最外边的两排

钢管支撑,中跨的一阶侧向频率也仅仅只增加百分之几。如果没有相当多的附属设施,刚度不可能增加到十倍,其中包括成本很高且会严重影响桥梁美观的一些设施。即使中跨的一阶侧向频率达到 1.3Hz 以上,某些阶数的侧向扭转频率还是会小于 1Hz,而这只能通过提高结构的竖向刚度或扭转刚度,且增加的倍数与侧向相同。需要增加一些附属设施来提高刚度,而它们又会影响现有桥梁的活载容量。

因此,提高桥梁刚度几乎是不可行的,减振途径只能是提高结构阻尼,要求由原结构 0.4% 的阻尼比提高到 20%,以提供足够的阻尼来确保人群密度为 $2 \text{ 人}/\text{m}^2$ 时结构的动力稳定性。侧向阻尼主要由黏滞阻尼器提供,总共 7 种不同类型的 37 个阻尼器被安放到桥梁上。中跨还另外增加 4 对侧向 TMD 阻尼器来提供侧向阻尼。每个阻尼器重 2.5t。竖向阻尼主要由竖向 TMD 阻尼器提供。在桥梁的三跨上总共安装了 26 对竖向 TMD 阻尼器。这些阻尼器的质量为 1~3t,由压缩弹簧支撑。

改造安装工程由 Cleveland Bridge UK 承包。黏滞阻尼器由美国 Taylor Devices 公司生产,TMD 阻尼器由德国 Gerb Schwingungsisolierungen 公司生产。减振工程于 2001 年 5 月初动工,2001 年底完工。2002 年元月 30 号组织了两千人过桥的现场试验,平均行人密度达到 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$,是 2000 年 6 月开通当日的最高行人密度。现场试验测试结果表明,动力响应较以前下降了 40 倍,桥梁没有共振现象产生,行人也没有任何不适应的报告。2002 年 2 月 22 号,在经过 8 个多月的关闭之后,千禧桥正式向行人开放,并获得媒体一致好评^[1-3]。

1.1.4 千禧桥事件的教训 ▶▶

这一事件表明:

(1) 虽然生物力学和桥梁专家在人致桥梁振动的机理方面进行了很多研究,但现有成果还远不能满足设计要求。特别是千禧桥事件以前,横向振动研究很少。千禧桥事件激发了世界范围内对人行桥振动问题的重视,成为了当前研究的一个热点。2002 年、2005 年和 2008 年已连续召开了三次人行桥振动的国际会议。

(2) 人行桥振动的敏感频率范围是,横向 1.2Hz 以下,竖向 1.5~5.0Hz。大跨度的人行桥,无论取何种结构形式,其结构基频均难以保证在步行力的影响频率范围之上,而且提高频率往往是很不经济的。因此对这类人行桥而言,减振设计应当成为结构设计的一部分。

1.2 其他人行桥事故的回顾

1.2.1 与行人有关的桥梁垮塌事故 ▶▶

早期有关人群引起桥梁垮塌的记录不很清楚。但有文献提到 1154 年英国约克郡



奥斯(Ouse)河上一座人行木桥因人群聚集于桥上欢迎威廉大主教返回约克郡而垮塌。文章没有关于人群超载使这座木桥垮塌的细节,但记载了落水者被救之类的事情。作为纪念,此事也记载在约克郡大教堂的彩色玻璃上。

最早关于人行桥振动的文章可能是 1821 年 Stevenson 所写的。他在文中提到军队行军过桥时,会发生严重的振动,建议在桥梁设计中应该考虑人行荷载。在 Stevenson 论文发表 10 年后,60 名士兵行军过桥导致英国布劳顿桥倒塌,用一个悲剧验证了他的预言。这也是最早报道的由于行人动力荷载导致人行桥倒塌的案例。经过这件事以后,很多桥上都贴了通告,要求军队过桥的时候走乱步伐。美国尼亚加拉大瀑布的一座铁路悬索桥上贴有一则通告如下:

在桥上列队前进或跟随音乐整齐迈步都将处以 20 ~ 100 美元的罚款。乐队除非坐在马车上,否则禁止在过桥的时候奏音乐。

19 世纪 70 年代后期英国利兹大学的一份研究报告,记录了 19 世纪初到 1978 年之间全球范围内的桥梁垮塌事故。在这份报告中,他们鉴别了一些桥梁和桥墩的事故,其中也涉及与人群有关的垮塌事故。文献[1-4]还调查了发生在利兹大学报告之后的桥梁垮塌事故。因此,总计 39 例事故得以鉴别、分类和讨论,见表 1-2-1。表中记录的第一个事故发生于 1825 年,为德国萨勒河上一座跨径 78m 的悬索桥。从桥梁垮塌事故的报告中可以发现,防止不理智的人群行为有多么重要。9 例事故中,人群当时正在观看河中的景观。其中有 1 例就是英国最为悲惨的桥梁垮塌事故,当时 400 人聚集在桥面的一侧,观看 4 只鹅在河里拖着一个载有小丑的浴缸前进,桥的垮塌共造成 113 人丧生。1830 年,位于苏格兰福法尔郡南爱斯克河上的蒙特拉斯吊桥不幸垮塌,当时有 700 多名观众在桥上观看比赛。当赛船从桥下经过时,桥上的人群也随之跑向桥面的另一侧,造成桥梁跨塌,许多人丧生。类似的事故于 1864 年发生在来哲(Lessor),还于 1926 年发生在西弗吉尼亚,只是伤亡人数少得多。有 7 例事故是人群正在参加一些宗教活动,人群的行为不尽相同,而且也没有超载。最惨的一例于 1972 年发生在菲律宾,一座位于拿加(Naga)市,有 20 年历史的木桥垮塌了,共造成 138 人丧生。当时,作为宗教节日活动的一部分,有近 500 人在桥上看水中船队。1949 年,在相同的地点,一座木桥的垮塌也夺去了许多人的生命。另外 8 例事故中,人群站在桥上观看表演或是列队等待。其中 1 例是人群排长队到桥的另一端缴纳通行税。另 1 例发生在加利福尼亚的 Long Beach,造成 35 人死亡,当时人们正在一座桥上等待从另一端进入会场。距现在最近的英国该类事故发生于 1952 年,位于 Bury 的 Knowsley Street Station 的一座人行桥垮塌,造成 1 人死亡,174 人受伤。当时约 200 名球迷正在等候火车,导致桥上的人群越聚越多。该木桥已使用了大约 70 年,其竖杆通过榫头连接在下弦两侧,且还有锻铁箍围绕下弦。发生事故的原因是不便检查到的锻铁箍受到了腐蚀。此前例行检查时,未发现木材有腐朽迹象,适当人流时桥显得很坚固。垮塌

当天,人群的超载作用使得竖杆连接下弦杆的短樨头被拔出了,彻底破坏了桁架结构。1977年,莫斯科附近一火车站的跨线桥发生了坍塌,造成至少10人丧生。还有4起与骑兵或士兵过桥有关的吊桥垮塌事故。在3起事故中是新桥——美国位于堪萨斯城的希尔顿大饭店的人行天桥、美国的一座预应力混凝土桥以及墨西哥的步行桥。吊杆是希尔顿大饭店的人行天桥的一个薄弱部位,不大的人群荷载使它垮塌了。

33起灾难中死亡的总人数已经超过800人。另外几座桥梁没有死亡人数的确切数字,但肯定有不少人死亡。

与人群有关的桥梁垮塌事故^[1-5]

表 1-2-1

序号	地理位置	事故年份	桥龄	用途*	形式*	跨径 (m)	宽度 (m)	垮桥前 状态**	人群 状况	人群 行为#	伤亡 (人)
1	德国萨勒河畔 尼恩堡	1825	1年	b	cidi	78.0		S	多		
2	英国南艾斯克 河畔芒特罗兹	1830	1年	a		129.6			约700人	d	多
3	英格兰诺森伯 兰郡莫珀斯堡	1830			c		5.6	C	拥挤		
4	英格兰曼彻斯 特的布劳顿	1831	2年	a	c	44.3		C	60人	f	
5	印度马德拉斯 Chintadripet 桥	1840			c		6.0	S		f	(30+)
6	英格兰大雅茅 斯 North Quay 桥	1845	16年	a	cidt	26.2		S	>300人	c	>113
7	孟加拉杰索尔 附近 Jinguruchy	1846	2年		cidic		7.2	C	>500人	c	约100
8	法国昂热 Basse-Chaine 桥	1850	11年	a	c	102				f	
9	苏格兰 Langholm 的 Boatford 桥	1871	0		c	53.3	2.4	O	60人		(1~2)
10	英格兰巴 兹 Widcombe	1877	15年	b	dt	24.4			>100人	e	约11
11	英格兰索尔 塔什	1877	老		dt		7.1	C	>200人		0
12	捷克共和国 M ährisch-Ostau	1886	35年			66		O	>30人	f	6



续上表

序号	地理位置	事故年份	桥龄	用途*	形式+	跨径(m)	宽度(m)	跨桥前状态++	人群状况	人群行为#	伤亡(人)
13	美国西弗吉尼亚韦斯顿	1896			c				拥挤		(2)
14	美国西弗吉尼亚利特尔顿	1896			c			O	拥挤		2
15	美国奥克莱尔 Madison St 桥	1903		c		13		O	约 200 人	b	(40)
16	美国威斯康星 Oconto Falls	1906	老	b				M	12 人		1
17	美国俄亥俄州 Findlay	1907		b	c			O	>100 人	a	(4)
18	美国加州长滩 Pier approach	1913		c	dt			T	多	e	35
19	加拿大安大略 Port Dover	1913	老		dt			SR	>60 人	e	(20)
20	美国宾夕法尼亚州切斯特 Norman's Creek	1913			dt	21.3		R	24 人		
21	美国俄亥俄州 Division St. Youngstown	1913	临时	b	dt			S	>40 人	b	
22	美国宾夕法尼亚州切斯特第三大街	1921	35 年	c	ds		1.5	S	>75 人	c	24
23	美国西弗吉尼亚 Whitesville	1926	13 年	b	cs	65.2		O	>100 人	d	6
24	德国科布伦次摩泽尔河	1930		b	dt			SR			>40
25	菲律宾那加城	1949			dt		2.2	M			多
26	英格兰贝里市诺斯利街车站	1952	70 年	b	dt	22.1	7.9	SR	约 200 人	e	1(174)
27	菲律宾那加城	1972	20 年	c	dt	120.1	1.5		约 500 人		138

续上表

序号	地理位置	事故年份	桥龄	用途*	形式*	跨径 (m)	宽度 (m)	跨桥前 状态**	人群 状况	人群 行为#	伤亡 (人)
28	尼泊尔 Mahkali 河	1974	60 年		csdt	60.0		O	150 人		138
29	俄罗斯普施克诺	1977		b			1.0	S	很多		>10
30	西班牙爱尔那 尼 Uremea 河	1978	老	b	csdt	50.0			40 人		6
31	保加利亚的瓦 尔纳	1978	老		d		1.4	R	多		数个
32	墨西哥勒马河	1979	1d	b		40.0		R	400 人		7
33	日本九州	1980	11 年		c	114.0		O			7
34	美国堪萨斯州 凯悦酒店	1981		c	csds			R	>1 000 人		113 (186)
35	马来西亚巴特 沃思	1988		c			3		3000 人		30
36	西班牙马德里附 近阿兰胡埃斯镇	1996	31 年	b	csdt	40		M	11~52 人		2
37	以色列特拉维 夫附近雅孔河	1997	3 周	b	adt	20		O	>100 人		2
38	美国费城的特 拉华河	2000		c			48	O	>37 人		3
39	美国北卡罗来 纳州康可的罗维 斯赛道	2000	5 年	b	co	25		S			(107)

注：* 中：a = 路；b = 人行桥；c = 其他。+ 中：a = 铝；c = 链或索支承；co = 混凝土；d = 桥面结构；i = 铁；s = 钢；t = 木材。+ + 中：C = 骑兵或士兵；M = 体育运动集结；R = 宗教集结；S = 观看河上景观；T = 缴费受阻；O = 其他。# 中：a = 从桥的一端到另一端；b = 队伍行进；c = 人群聚集在桥面一侧；d = 人群从桥面一侧到另一侧；e = 排队等待；f = 骑兵、士兵或其他兵种的部队。

1.2.2 行人导致的桥梁过度振动的现象 ▶▶

与行人超载导致桥梁垮塌事件相比，行人激发的桥梁过度振动现象其实更为常见，只是因为人们习以为常，也就很少报道。

1957 年 10 月 15 日，我国第一座跨长江的大桥——武汉长江大桥建成通车。这是一座规模巨大的公铁两用桥，下层双线铁路，上层 4 个车行道和两个人行道，刚度很大。举行通车庆典时，五万群众“跟在汽车后面前进，他们兴奋地举着鲜花和头巾，如



同碧绿般的潮水一起一伏地从武昌流向汉阳”(引自 1957 年 10 月 16 日《长江日报》),结果激发了严重的横向摇摆振动,一度造成人群恐慌。已故桥梁专家李国豪院士事后研究了这一问题^[1-6],指出这不是桥梁横向稳定不足的问题。在正常情况下即行人只在人行道上行走时不会发生横向摇摆振动。西班牙和新西兰的两座大桥也有同样现象。1973 年西班牙博斯普鲁斯大桥(Bosporus Bridge)开放当天,估计有 60 000 ~ 100 000 人涌至主跨长 1 074 m 的悬索桥,同时还有 2 000 人/min 人流不断从桥两端涌入。当桥开始摇摆时,桥两端的人群就被禁止进入。《工程新闻记录》记载“根据设计,除车辆外该桥每次可承载 30 000 人,相当于 1 人/ m²。”据估计那天高峰时段,桥面被人群挤满了,桥面板承载多达 5 人/ m²(图 1-2-1)。新西兰奥克兰港口公路桥也发生了类似的情况。这是一座主跨 190m 的 4 车道公路桥。1975 年的一天临时封闭了一个方向的两个车道供举行示威游行的队伍通过,示威者有 2000 ~ 4000 人,过桥时产生了明显的横向振动。这一事件并有电视录像记录可考。



图 1-2-1 1973 年西班牙博斯普鲁斯大桥开通日的人群

既然上述规模巨大的桥梁都可以在拥挤人群条件下发生过度的振动,那么专用于行人通过的人行桥发生振动的几率就更大了。现有研究表明,只要基频低于 5Hz 的桥梁都有可能发生人桥共振现象。

乡村随处可见的跨越小河小溪的简易悬索桥,行人通过时几乎都有明显的振动产生,行人也不以为奇。但是,若是位于人口稠密的城市大型人行桥发生振动,就会造成市民恐慌,需要加以特别的注意。日本学者 Fujino 和 Nakamura 等人对日本两座人行