

江西中青年科技工作者
学术研究丛书



大跨度钢管拱桥


DAKUADU GANGGUAN GONGQIAO

XINGRENSHUSHI LILUNYUFENXI

行人舒适理论与分析

吴 飞 裴辉腾 彭爱红 主编



 江西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大跨度钢管拱桥行人舒适理论与分析 / 吴飞, 裴辉腾, 彭爱红主编. - 南昌: 江西科学技术出版社, 2021. 12

ISBN 978-7-5390-7968-4

I. ①大… II. ①吴… ②裴… ③彭… III. ①大跨度结构-钢管混凝土拱桥-行人-舒适性-研究 IV.

①U448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 218645 号

国际互联网(Internet)地址:

<http://www.jxkjcs.com>

选题序号:ZK2021208

图书代码:B21187-101

大跨度钢管拱桥行人舒适理论与分析 吴飞 裴辉腾 彭爱红 主编

出版 江西科学技术出版社
发行
社址 江西省南昌市蓼洲街2号附1号
邮编:330009 电话:(0791)86623491 86639342(传真)
印刷 南昌三联印务有限公司
经销 全国各地新华书店
开本 889mm×1194mm 1/32
字数 110千字
印张 5.75
版次 2021年12月第1版
印次 2021年12月第1次印刷
书号 ISBN 978-7-5390-7968-4
定价 32.80元

赣版权登字-03-2021-358

版权所有,侵权必究

(赣科版图书凡属印装错误,可向承印厂调换)



吴 飞 1987年2月生，江西鄱阳人。高级工程师，在读博士。现供职于江西省交通工程集团建设有限公司装配公司。主持、参与省级科技项目11项，参编省级标准3项、省部级工法3项。出版专著2部。获国家发明专利、实用新型专利6项，省部级科技奖励8项。个人荣获第三届江西公路优秀工程师称号。



裴辉腾 1989年5月生，江西丰城人。工程师，在读博士。现供职于江西省交通设计研究院有限责任公司桥隧设计研究所。2021年“科创中国”江西省企业创新达人优秀代表。负责、参与特大桥项目设计10余座；主持、参与江西省科技厅、江西省交通厅科研课题项目7项，获国家实用新型专利8项。

序 言

一般情况下,桥梁在设计建造时,主要关注的是桥跨在静载作用下的受力安全及动载作用下的结构稳定,而对活载激励作用下的行人舒适度考虑较少。

2000年,英国千禧桥在开放首日时,出现了明显的摇摆及振动,运营三天便被关闭停用。后来,花费两年多的时间,对该桥进行减振修复,相关费用接近原来总造价的30%。此后,桥上行人舒适度问题引发了桥梁工程界的广泛关注,国内外桥梁学者开始意识到桥梁结构行人舒适度问题不可忽略。

我国桥梁工程界对行人舒适度的研究起步较晚,相关专题研究较少,尚无国家规范或行业标准就车致振动对行人舒适度的影响做出说明或规定,也未建立统一的公路随机车流组织模型。

针对这个问题,《大跨度钢管拱桥行人舒适理论与分析》通过总结国内外关于桥梁行人舒适度研究成果,阐明了车桥耦合振动与人致振动的基本理论和求解方法,根据人行荷载的频率带宽较窄、车致振动下桥梁加速度峰值出现较为短暂等特点,提出了适用于不同荷载下的桥上行人舒适度评价指标,并对人一车混行下的耦合分析进行了研究讨论,提出用于桥上行人舒适度评价的随动加速度概念。

本书以江西高速公路史上第一座中承式拱桥——王安石抚河特大桥为重点案例,开展桥上行人舒适度研究,探索了路面粗糙度、车型、车速以及车辆行驶车道对行人舒适的影响;定性分析了不同结构参数(矢跨比、拱肋倾角、吊杆形式、桥面板类型等)下桥跨结构的动力效应变化情况,给出了在保证结构安全前提下控制该类型桥梁人行道的变形及加速度的专业建议,具有较好的工程研究价值和现实意义,可为同类桥梁设计建造提供积极的借鉴作用。

本书共有六章,其中第一章编写人员为吴飞,第二章编写人员为吴飞、彭爱红、刘玉华、裴辉腾,第三章编写人员为裴辉腾、殷妮芳,第四章编写人为吴飞、裴辉腾、殷妮芳,第五章编写人员为裴辉腾、彭爱红、殷妮芳、王健,第六章编写人员为吴飞。全书由吴飞统稿,周晟、邓心蕊等人参与了整理工作。

由于作者水平所限,书中内容难免有错漏与不足之处,恳请读者批评指正。

吴飞

2021年9月

目 录

第一章 引言

- 1.1 桥上行人舒适度评价方法研究现状 / 3
- 1.2 研究思路 / 8
 - 1.2.1 以往研究中存在的不足 / 8
 - 1.2.2 研究思路 / 10

第二章 工程方案

- 2.1 案例一:某竖直拱肋飞燕式钢管混凝土系杆拱桥 / 11
 - 2.1.1 建设条件 / 11
 - 2.1.2 主要材料 / 24
 - 2.1.3 桥梁主要技术标准 / 31
 - 2.1.4 总体设计 / 32
 - 2.1.5 主桥设计 / 34
 - 2.1.6 主桥施工方案 / 40
- 2.2 案例二:外倾式拱肋钢系杆拱桥 / 42

第三章 理论模型的建立及舒适度评价指标的确定

- 3.1 案例一:竖直拱肋飞燕式钢管混凝土系杆拱桥 / 46
 - 3.1.1 桥梁有限元模型 / 46

- 3.1.2 结构动力特性分析 / 48
- 3.2 案例二:外倾式拱肋钢系杆拱桥有限元模型 / 49
 - 3.2.1 桥梁有限元模型 / 50
 - 3.2.2 结构动力特性分析 / 52
- 3.3 路面粗糙度模型 / 53
- 3.4 车辆荷载模型 / 57
 - 3.4.1 车辆物理模型 / 57
 - 3.4.2 车流模型 / 61
- 3.5 人行荷载模型 / 69
 - 3.5.1 单人步行力 / 69
 - 3.5.2 人群荷载 / 73
- 3.6 车桥耦合振动与人致振动的基本理论和求解方法 / 81
 - 3.6.1 基本理论 / 81
 - 3.6.2 求解方法 / 82
- 3.7 不同荷载作用下舒适度评价指标的讨论 / 83
- 3.8 小结 / 84

第四章 桥上行人舒适度研究

- 4.1 车致振动对行人舒适度影响的定性分析 / 86
 - 4.1.1 路面粗糙度对行人舒适度的影响 / 86
 - 4.1.2 车型对行人舒适度的影响 / 93
 - 4.1.3 车速对行人舒适度的影响 / 98
 - 4.1.4 行驶车道对行人舒适度的影响 / 102

- 4.2 用于桥上行人舒适度评价的随动加速度 / 105
- 4.3 随机荷载作用下行人舒适度评价 / 107
 - 4.3.1 随机车流作用下行人舒适度评价 / 107
 - 4.3.2 随机人群荷载作用下行人舒适度评价 / 127
 - 4.3.3 人—车混合通行时行人舒适度评价讨论 / 131
- 4.4 小结 / 135

第五章 基于行人舒适度的大跨度钢管拱桥设计参数研究

- 5.1 结构阻尼对行人舒适度的影响 / 137
 - 5.1.1 案例一 / 138
 - 5.1.2 案例二 / 140
- 5.2 拱上立柱和吊杆数量对行人舒适度的影响 / 142
- 5.3 拱肋平面倾角对行人舒适度的影响 / 145
 - 5.3.1 案例一 / 145
 - 5.3.2 案例二 / 149
- 5.4 吊杆布置形式对行人舒适度的影响 / 151
 - 5.4.1 案例一 / 151
 - 5.4.2 案例二 / 155
- 5.5 不同桥面板类型对行人舒适度的影响 / 157
- 5.6 钢端横梁刚度对行人舒适度的影响 / 160
- 5.7 钢横梁刚度对行人舒适度的影响 / 162
- 5.8 小结 / 165

第六章 总结与展望

6.1 主要结论 / 168

6.2 展望 / 170

参考文献 / 171

第一章 引言

2000年,英国伦敦的千禧桥在通行当天就发生了严重的人致振动问题。以此为契机,学术界掀起了研究人行桥人致振动问题的热潮,桥上行人的舒适度问题越来越受到重视。城市的中小型桥梁多是人一车混合通行,为追求环境协调和美观,这些桥梁多采用轻质高强材料以满足独特结构体系的力学要求,结构刚度较小。在车辆荷载作用下,这些桥梁的动力响应将较为剧烈,桥上行人的舒适度成了桥梁设计的一个控制因素。

目前,国内外已有规范^[1,2]针对行人激励下人行桥振动问题做出设计说明。在实际操作中,主要有两种处理方式:频率调整法和动力响应分析法。频率调整法建议了一个结构基频下限值,认为当结构竖向振动基频大于该界限时人致振动下行人舒适度较差的情况不会发生,无须专门考虑。如英国 BS5400(1978年)、CEB(1993年)、EN(1990年)认为当竖向振动基频大于5Hz时可不考

虑人致振动问题,OHDBC(1983年)将该界限降低到 4Hz ^[3]。美国AASHTO规范和我国规范《城市人行天桥与人行地道技术规范》都要求竖向振动基频应大于 3Hz 。当人行桥无法满足上述基频限值时,须进行动力响应分析。这种方法通常是以共振情况下桥梁结构上所产生的最大响应来评估其振动使用性,确保在人行荷载作用下的桥梁振动响应不超过舒适度界限值。

实际上,对于人—车混合通行的桥梁,其人行道的振动大部分是车辆荷载贡献的。但是,尚没有规范就车致振动对行人舒适度的影响做出说明。故对于人—车混合通行的桥梁,即使其满足规范对人行桥的基频限值,也须进行车桥耦合振动分析,以计入车辆荷载对行人舒适度的影响,进而对运营过程中桥上行人舒适度做出正确评估。

如前文所述,对人—车混合同行的桥梁,在进行桥上行人舒适度研究时,应综合考虑人行荷载和车辆荷载的贡献。可见,进行桥上行人舒适度研究的几个关键点为桥梁结构、人行荷载、车辆荷载、车桥耦合振动计算以及舒适度评价指标。

相对混凝土结构而言,钢结构刚度较小,在荷载的作用下变形较大,对振动反应也较为敏感,而采用柔性吊杆的拱结构尤其如此。有限元分析表明,该桥第一阶、第二阶、第三阶自振频率分别为 0.875Hz 、 0.989Hz 、 1.396Hz ,结构刚度较小,不满足规范对人行桥基频的规定。在人行荷载和车辆荷载的作用下,结构可能产生较大动力效应,须通过计算对行人的舒适度做出评估,并在此基础

上对如何控制该类型桥梁人行道的变形及加速度,使其振动水平不致影响行人使用性和舒适性进行研究。

1.1 桥上行人舒适度评价方法研究现状

1.1.1 桥上行人舒适度研究现状

关于行人舒适度问题,国外研究起步较早。Wright 和 Green^[3]在 1959 年就开始注意到桥梁振动问题的复杂性,但由于条件限制,未能较好地就相关问题进行研究。1963 年,Wright 和 Green^[4]测量了 52 座桥梁在正常交通流量下的振动情况,发现桥梁振动的峰值一般是短暂出现的,认为直接用振动峰值进行舒适度评价是不合适的。1978 年,Irwin^[5]在总结前人研究的基础上,提出了用加速度的均方根值(*root-mean-square accelerations, RMS*)来描述桥上行人舒适度问题,并给出了相关限值。*RMS* 的概念对此后国外桥梁舒适度研究产生了较大的影响,并被较多规范采用。Pimentel、Pavic 和 Waldron 等^[6]对从设计上如何规避人行桥人致竖向振动问题进行了研究,认为现有设计规范提出的频率调整法是较为经济可靠的。Pachi 和 Ji^[7]对桥上行人的行走速度和步伐频率进行了实测统计。

近年来,随着桥上行人舒适度问题逐渐被重视,国内较多学者也进行了相关研究。闫兴非等^[8]对人行桥人致振动问题的计算模型进行了对比分析,认为人行荷载采用简谐荷载模型可以较好地

模拟人行荷载中的某一阶振动分量引起的结构响应。孙利民等^[2]对人行桥人行激励振动及设计方法进行了研究,对人行荷载的形式和现有舒适度评价标准进行总结;对于竖向振动,建议参考英国规范的方法限制结构的峰值加速度以满足行人舒适度要求。何宗成等^[9]进行了大跨度人行天桥的振动影响测试与分析,认为引起该天桥振动的主要是道路行驶中的车辆,行人对天桥的振动影响较小。袁旭斌^[10]进行了人行桥人致振动特性研究,对现有人行荷载模型、人群荷载效应模型及舒适度评价方法进行了详细总结,提出了涵盖多规范条款的综合舒适度评价指标。简方梁等^[11]对上海虹桥火车站人行走廊人致振动问题进行了分析,采用 ISO10137 标准作为评价指标。冯鹏等^[12]进行了人行天桥结构振动舒适度量化与振动实测研究,认为人真实感受与人行桥峰值加速度之间的相关性很高。马如进等^[13]对悬挂式人行桥考虑车致振动效应的行人舒适性评价问题进行了研究,认为车致振动效应的对人行道行人舒适性评价的影响不容忽视。

1.1.2 部分现有舒适度评价指标

目前,在处理结构振动问题时,比较常用的舒适度评价指标是计权的均方根加速度(Weighted r. m. s. Acceleration,记为 *RMS*), ISO2631-1:1997^[14]和 ISO10137:2007^[15]均推荐采用。计权的均方根加速度计算式为:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

式中： $a_w(t)$ 是计权的加速度，是时间的函数； T 是持续时间，在 ISO10137:2007 中建议取 10s。在频域中计算时，有：

$$a_w = \left[\int G_a(f) \cdot W^2(f) df \right]^{1/2} \quad (1.2)$$

式中： $G_a(f)$ 是加速度的功率谱密度函数； $W(f)$ 为频率的计权函数。

频率计权函数描述了人对振动的感受与频率的关系，ISO2631-1:1997 给出了针对不同振动方向的频率计权函数(见图 1-1)。

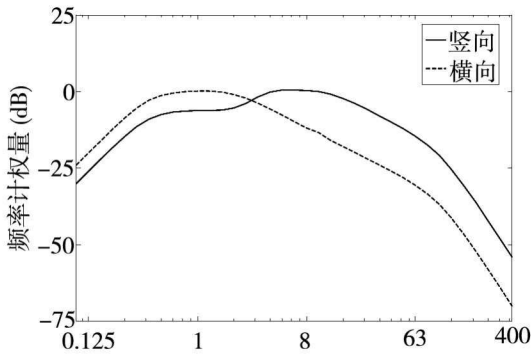


图 1-1 不同振动方向的频率计权函数

由于人对振动的感受是多方向振动的综合效应，故 ISO2631-1:1997 标准认为舒适度评价应采用各方向计权均方根加速度的组合结果：

$$a_w = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (1.3)$$

其中， k_x, k_y, k_z 为相乘系数，均可取为 1； a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} 分别为 x、y、z 方向的计权加速度均方根值。

ISO2631-1:1997 标准建议了计权的均方根加速度与人体舒适度的对应关系(见表 1-1)。

表 1-1 计权的均方根加速度与主观感受的关系

计权的均方根加速度(m/s^2)	舒适程度
<0.315	没有不舒适
0.315~0.63	稍有不舒适
0.5~1.0	比较不舒适
0.8~1.6	不舒适
1.25~2.5	非常不舒适
>2	极不舒适

当振动信号的峰值因数(Crest Factors)大于 9 时,ISO2631-1:1997 建议引入附加的评价指标,即最大瞬时振动值(MTVV)和四次方振动剂量值(VDV)。峰值因数定义为:

$$\text{峰值因数} = \frac{\text{计权信号的峰值}}{\text{计权信号的均方根值}} \quad (1.4)$$

最大瞬时振动值定义为:

$$MTVV = \max \left\{ \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \{a_w(t)\}^2 dt \right]^{1/2} \right\} \quad (1.5)$$

式中, t_0 为某瞬时时刻, τ 为运行平均的积分段,建议取 1s。

振动剂量值表达式为:

$$VDV = \left(\int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{1/4} \quad (1.6)$$

ISO10137:2007 建议当振动信号的峰值因数大于 6 时,就应引入四次方振动剂量值进行舒适度评价,并给出了振动剂量值与人主观感受的关系(见表 1-2)。

表 1-2 VDV 与人主观感受的关系

VDV($\text{m/s}^{1.75}$)	主观感受
0.2~0.4	负面评价可能性小
0.4~0.8	负面评价可能性中
0.6~1.6	负面评价可能性大

ISO10137:2007 对结构人行道的舒适度问题做了单独的说明,并对计权加速度在某持续 1s 时间内的均方根值做出了限定,给出了 z 轴(从脚到头方向)加速度的基本限值曲线(见图 1-2)。在一般的分析中,要求该 *RMS* 不超过给定值的 60 倍。

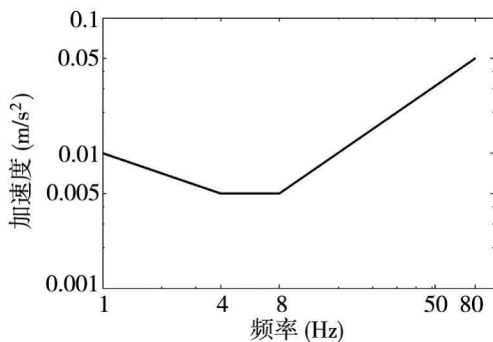


图 1-2 结构竖向振动加速度基本曲线

ISO2631-1:1997 认为,对于一些具有偶然冲击现象振动信号,即使峰值因数不大于 9,用计权的均方根加速度进行舒适度评价仍可能低估振动对人的影响。故建议在式(1.7)、(1.8)所示情况下,仍应列出附加评价指标的计算结果。

$$\frac{MTVV}{a_w} \geq 1.5 \quad (1.7)$$

$$\frac{VDV}{a_w T^{1/4}} \geq 1.75 \quad (1.8)$$

在结构振动舒适度评价方面还有其他一些重要的标准,如英国的 BS6472-1:2008、Design of Floors for Vibration: A New Approach^[17],美国的 AISC Design Guide 11,加拿大的 NBCC:2005 等,其推荐的评价指标主要为 VDV 、 RMS 。

国内部分学者^[2,11,14]倾向于采用英国规范 BS5400 中限制结构加速度峰值的舒适度评价方法。该规范认为结构加速峰值应:

$$a_{lim} < 0.5\sqrt{f_v} \quad (1.9)$$

式中: f_v 为结构振动频率,取为结构基频。

英国规范 BS5400 中加速度峰值 a_{lim} 应按行人通过结构主跨计算得到,且行人的步频等于结构基频、步长为 0.9m,步行力为一简谐波,幅值为 180N。该规范认为,当结构基频超过 5Hz 时,行人舒适度一般较好,无须专门考虑。该规范对应的是人行桥人致振动,且只考虑结构按基频振动的情况。

1.2 研究思路

1.2.1 以往研究中存在的不足

1.2.1.1 荷载模型

对人—车混合通行的桥梁,车辆对行人舒适度的影响不容忽视,进行舒适度评价需计入人行荷载和车辆荷载两个部分。单人