



人致荷载与 人致结构振动

Human-induced load and structural vibration

陈隽 著



科学出版社

人致荷载与人致结构振动

陈 隽 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分两部分总结了近年来作者在人致荷载与人致结构振动方面的一些研究成果。人致荷载部分以步行荷载与跳跃荷载的试验以及荷载模型的建立为主,详述了基于三维步态分析技术的荷载试验方法,以及基于试验数据所建立的步行荷载与跳跃荷载的数学模型。人致结构振动部分首先介绍了国内外主要相关规范关于建筑楼盖振动舒适度的设计与分析方法;进而重点介绍了步行、跳跃荷载作用下大跨工程结构动力响应计算的加速度反应谱方法;最后,详细介绍了两个已建大跨楼盖的人致振动实测结果以及与现有规范评估结果的对比分析。

本书可供从事工程结构振动舒适度研究的学者、工程技术人员以及高等院校相关专业的研究生、教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

人致荷载与人致结构振动/陈隽著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-050294-0

I. ①人… II. ①陈… III. ①建筑结构-结构荷载-研究 ②建筑结构-结构振动-研究 IV. ①TU312 ②TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 258132 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 236 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部门电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750

版权所有, 侵权必究

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

前 言

使用者在完成步行、跳跃、奔跑、舞蹈、屈伸以及踏步等动作时对支撑结构所产生的动力作用称为人致荷载。由其引起的建筑楼盖、人行桥、体育场馆看台、悬挑结构、柔性楼梯等低频、大跨工程结构的振动称为人致结构振动。人致结构振动问题由来已久，近 20 年来更是随着英国千禧桥振动等事件重新受到了研究者和工程界的重视。伴随着工程结构“更高 (higher)、更长 (longer)、更轻 (lighter)”的发展大势，结构设计呈现出从承载力极限状态控制向正常使用极限状态控制发生转变的趋势，使用者对建筑品质和居住体验不断提升的要求更加速了这一过程。同时，随着我国经济的发展和城镇化进程的深入，城镇居民的改善型居住需求渐成主流，居民文化消费水平也持续高速增长，由此带动大户型、少分隔住宅以及大型文化、体育、休闲娱乐类开敞式公共建筑的大量兴建，大跨度结构体系广泛应用。从以上科学技术和社会经济的两方面的发展趋势，可以清晰地预见大跨工程结构中的人致结构振动问题会愈发普遍。实践经验业已表明，既有建筑结构中发生振动舒适问题后的社会影响恶劣、修复技术难度大、成本高。因此，需要从“一种新型灾害”的角度认识人致荷载及其引起的工程结构振动问题，并深入研究问题的机理以及针对性的结构分析与设计方法。

遵循上述认识，作者针对人致荷载与人致结构振动问题开展了系列研究工作，本书总结了作者多年努力的些许成果。绪论部分介绍了人致结构振动问题的由来、历史发展和现状，并系统总结了现有的步行荷载和跳跃荷载模型。本书上半部分（第 2~4 章）的重点是步行和跳跃两种最重要人致荷载的动力特性试验及数学模型的建立。其中，第 2 章论述了基于三维步态分析技术的人致荷载试验；第 3、4 章则分别介绍了步行荷载、跳跃荷载的动力特性分析与数学模型的建立。下半部分（第 5~7 章）的重点是工程应用。其中，第 5 章总结了现有的国内外相关规范中关于楼盖振动舒适度的设计要求和分析方法，并给出了应用范例；第 6 章论述了大跨结构人致振动响应分析的反应谱方法；第 7 章面向工程实践，首先详述了对一个典型的已建大跨工程楼盖的长期跟踪测试结果与分析，随后介绍了一个低频大跨混凝土楼盖的实际性能测试结果，并与现有规范的评估结果进行了对比分析。

本书的研究工作先后得到了国家自然科学基金、教育部新世纪优秀人才计划、土木工程防灾国家重点实验室、上海市自然科学基金、同济大学中央高校基本科研业务费研究人才培养计划、上海市高峰学科计划、光华同济大学土木工程学院基金学科交叉应用基础研究等项目的资助，作者在此一并表示衷心的感谢！

作者指导的研究生折雄雄、彭怡欣、王玲、叶艇、张梦诗、赵永磊、徐若天、刘伟、严世鑫、王浩祺、谭寰、丁国、徐骏飞、李果、王磊、楼佳悦、王晋平、韩紫平、潘子叶、汪明、赵春波及 William 等协助完成了人致荷载的实验与分析工作。与这些青春、热情洋溢的学生一起工作是非常愉快的经历，“Always inspired by these young and smart students”。感谢上海中医药大学附属曙光医院骨伤科研究所赵咏芳教授、詹红生教授、张旻医生以及上海交通大学医学院附属瑞金医院的陈博医生等对本书中人致荷载实验的帮助。

从首次接触到振动舒适度问题至今已近 15 年，越深入其中，越感觉问题有趣且富有挑战性。本书主要总结了作者关于人致荷载及人致结构振动问题的阶段性研究成果，论述中涉及他人的研究成果都尽可能详尽地做了标注和说明，以示尊重。作为一个还在发展中的研究方向，行文中作者也不揣简陋提出了对振动舒适度问题研究的一些认识与看法，不足之处，谨请读者批评指正。

作 者

2016 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 人致荷载与人致结构振动	1
1.2 人致荷载动力特性	4
1.2.1 人致荷载的分类	4
1.2.2 步行荷载试验	4
1.2.3 跳跃荷载试验	9
1.3 步行荷载模型	13
1.3.1 时域模型	13
1.3.2 频域模型	17
1.4 跳跃荷载模型	20
1.4.1 确定性荷载模型：单次跳跃荷载模型	20
1.4.2 确定性荷载模型：傅里叶级数模型	21
1.4.3 随机模型	23
1.4.4 规范模型	24
1.5 其他人致荷载类型	25
1.6 本书的内容安排	26
参考文献	27
第 2 章 人致荷载动力特性试验	31
2.1 基于三维步态分析技术的人致荷载试验	31
2.1.1 三维步态分析试验方法简介	31
2.1.2 试验装置	31
2.2 试验过程和内容	33
2.2.1 步行试验部分	33
2.2.2 跳跃荷载试验	38
2.3 步行荷载特征参数的变化范围	40
2.3.1 步态时空参数的统计	41
2.3.2 荷载峰值因子	44
2.3.3 单步持续时间	46

2.4	步行曲线的时程拓展方法	47
2.4.1	复步拓展方法	47
2.4.2	单步落足时程拓展方法	48
2.4.3	各种拓展方法的效果比较与参数选择	49
2.5	跳跃荷载特征参数的变化范围	51
2.5.1	Marker 点运动轨迹数据	51
2.5.2	测力板跳跃时程数据	51
2.6	测力板数据处理	53
2.6.1	数据质量检验	53
2.6.2	数据滤波	54
2.6.3	单次跳跃荷载曲线及其控制参数	55
2.7	控制参数特性与变化范围	58
	参考文献	60
第3章	单人步行荷载模型	62
3.1	引言	62
3.2	三向单步步行荷载模型	62
3.2.1	单步荷载的实测曲线	62
3.2.2	单步荷载的傅里叶级数表达式	64
3.2.3	模型阶数的确定	64
3.2.4	模型常数项取值	65
3.2.5	动载因子的取值	65
3.2.6	相位角的取值	69
3.3	连续步行荷载主次谐波模型	69
3.3.1	主次谐波傅里叶级数模型	69
3.3.2	动载因子计算方法	70
3.3.3	主次谐波模型阶数的确定原则	72
3.4	三向连续步行荷载主次谐波模型参数取值	73
3.4.1	动载因子的取值	73
3.4.2	相位角的取值	78
3.5	不同连续步行荷载模型的比较	78
	参考文献	81
第4章	单人跳跃荷载模型	82
4.1	引言	82
4.2	单次跳跃荷载的修正半正弦平方模型	82

4.2.1 修正半正弦平方模型	82
4.2.2 模型控制参数概率分布特性	84
4.2.3 模型参数的相关性	88
4.2.4 跳跃荷载模型的仿真步骤	92
4.2.5 应用实例	93
4.3 跳跃激励的傅里叶级数模型	96
4.3.1 傅里叶级数模型	96
4.3.2 模型参数的取值	97
4.3.3 傅里叶级数模型的对比	105
参考文献	106
第 5 章 国内外有关大跨结构振动舒适度的设计方法	107
5.1 美国及加拿大标准	107
5.1.1 AISC 标准	107
5.1.2 PCI 标准	109
5.2 英国标准	110
5.2.1 CCIP-016 标准	111
5.2.2 CSTR43 标准	118
5.2.3 舒适度评价标准	120
5.3 EN03 人行桥设计标准	121
5.4 中国标准	123
5.4.1 混凝土结构设计规范 (GB50010—2010)	123
5.4.2 高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ3—2010)	123
5.5 应用算例	123
5.5.1 简支板算例	123
5.5.2 实例 1: 体育训练馆混凝土楼盖	130
5.5.3 实例 2: 火车站候车厅楼盖	132
参考文献	134
第 6 章 人致荷载作用下大跨结构动力响应的反应谱分析方法	135
6.1 引言	135
6.2 薄板振动分析基础	135
6.3 步行荷载的标准加速度均方根反应谱	137
6.3.1 步行荷载曲线的扩展	137
6.3.2 计算步骤	138
6.3.3 标准 10s 加速度均方根值反应谱	139

6.4	反应谱参数取值	141
6.4.1	各平台段取值	141
6.4.2	曲线下降段统计分布及拟合	144
6.4.3	反应谱完整表达式	144
6.5	反应谱影响参数与谱值修正分析	145
6.5.1	高阶振型及边界条件	145
6.5.2	计算跨度	146
6.5.3	步幅影响	147
6.5.4	峰值加速度	147
6.6	利用反应谱方法计算步行荷载下结构响应的步骤	147
6.7	跳跃荷载作用下结构动力响应的反应谱方法	148
6.7.1	测试者的代表性反应谱曲线	148
6.7.2	设计反应谱形状	149
6.7.3	设计反应谱参数取值	150
6.7.4	设计反应谱表达式与转换关系	151
6.7.5	反应谱计算步骤	151
6.8	应用实例	152
6.8.1	试验模型	152
6.8.2	实际楼盖	154
	参考文献	156
第7章	大跨楼盖动力特性实测与振动舒适度分析	157
7.1	实例1: 预应力混凝土梁楼盖实测	157
7.1.1	结构概况	157
7.1.2	测试概况	158
7.1.3	模态参数识别	161
7.1.4	脉动测试结果与分析	163
7.1.5	行人荷载测试结果与分析	172
7.2	实例2: 某火车站张弦梁混凝土楼盖	176
7.2.1	工程概况	176
7.2.2	测试步骤与工况	177
7.2.3	楼盖竖向自振频率结果	178
7.2.4	正常使用状态下楼盖的振动响应	179
7.2.5	模拟人致荷载下楼盖的振动响应	180
7.2.6	实测值与规范评估结果的对比	182
	参考文献	186

第 1 章 绪 论

1.1 人致荷载与人致结构振动

使用者在完成步行、跳跃、奔跑、舞蹈、踏步、瞬时起立或坐下、屈伸运动以及拍手等动作时对支撑结构所产生的动力作用统称为人致动力荷载,简称人致荷载(human-induced load),由此引起的工程结构的振动称为人致结构振动(human-induced structural vibration)。人致结构振动一般影响结构的正常使用性能,严重时则可能威胁结构的安全性。

对于大跨度楼盖、人行桥、空中连廊、体育场(馆)看台、长悬臂结构、柔性楼梯等大跨工程结构,当人致结构振动的幅度超过一定的限值后,结构上的使用者会出现对振动有感、注意力下降等现象,严重时会有头晕、心慌、身体不适等不舒适感觉,甚至可能造成人群的恐慌而诱发公共安全事件,上述现象一般称为人致结构振动的舒适度问题(vibration serviceability issue)。对于拥有振动敏感设备的高科技厂房、医院及精密试验室等场所,人致结构振动可能造成仪器的定位精度下降、生产效率降低、废品率增加或精密仪器无法正常工作等经济损失。此外,当人致结构振动的幅度过大时,也可能会造成结构局部构件破坏、地基或基础破坏甚至结构的整体破坏等安全性问题。

人致结构振动问题在土木工程领域由来已久,在许多大跨度结构上都曾出现过。早在 19 世纪已有人群过桥造成桥梁破坏,导致人员伤亡的事件^[1]。例如,1825 年的德国,一座位于 Saale 河上跨度 78m 的悬索桥,由于人群过桥而造成破坏^[1]。1831 年,英国曼彻斯特附近的 Broughton 悬索桥,由于 60 人的军队齐步行进过桥,引起桥梁的剧烈振动而造成破坏。此类由于人群活动造成结构破坏的事件到了 20 世纪仍有发生。1981 年,美国堪萨斯的 Hyatt Regency 酒店在举行一个舞会期间,横跨大厅的人行步道桥倒塌,导致 113 人死亡。根据文献统计^[1],在欧美地区,人致荷载造成桥梁毁坏的事故在 19 世纪有 14 例,在 20 世纪有 25 例。近 20 年中最典型的人行桥振动舒适度事故无疑是英国伦敦千禧桥事件^[2]。该桥位于伦敦泰晤士河上,在 2000 年 5 月开放的第一天,伴随着大量人流过桥,该桥产生了意料之外的大幅侧向振动。此后的录像分析表明千禧桥南跨侧向位移达 50mm,中跨侧向位移达 70mm,千禧桥被迫于 3 天后关闭。该桥的设计师——英国建筑界泰斗级人物诺曼·福斯特因此受到了民众和媒体的猛烈批评,不得不在电视上向全体英国民众公开道歉。工程师们又花费了近两年、500 万英镑的代价寻找振动原因及减轻振动的方法。随后有学者对千禧桥事故的原因进行了分析,并发表在

著名的《自然》(*Nature*)杂志上,从一个侧面反映了此事件的重要影响^[3]。事实上,早在千禧桥事件之前,日本的一座连接体育场的人行桥(T桥)就发生过大量观众过桥引起桥梁显著振动的情况^[4]。

在我国,1957年我国自行设计建造的武汉长江大桥建成通车时,发生了大量欢庆的群众涌上桥导致桥梁振动的情况,引起了当时学术界和工程界的警觉^[5]。类似的工程振动问题散见于各类媒体的报道。例如,建成于1993年的杭州某百货大楼外的人行天桥,曾是华东地区最大跨度的钢箱梁结构城市天桥,由于自振频率偏低,自建成使用之日起就饱受“晃动”的争议,行走在此桥上被形容为如“云端漫步”;尽管先后两次全面检测均指出桥梁的安全性没有问题,但长期影响行人感觉的振动问题还是导致此桥于2012年4月被拆除。此外,北京站东街南裱糊胡同南侧人行天桥就因为振幅过大引起行人和媒体的关注,最后通过在天桥上部增加两道钢拱结构进行加固才解决了问题^[6]。广州广武酒店附近某临时人行天桥也出现了行人作用下振动过大的现象,通过在梁底增焊了一块通长的厚钢板后才基本控制住^[7]。2013年,我国庐山景区两座连接游客码头的桥梁由于大量人群涌上而断裂,造成数十名游客受伤。

体育场馆方面,由于使用功能的要求,主要是受到跳跃、跑动、突然起立以及屈伸等荷载的影响,其中屈伸(Bounce)是指双脚不离开地面的身体上下往复运动形式,常见于体育比赛或演唱会中观众的欢庆动作。据上海建筑设计研究院的档案资料,早在1951年设计建造上海虹口体育场(现已拆除)时,设计人员就曾讨论过是否需要考虑观众的忽然起立、跺脚等欢庆动作对结构的影响,由于缺乏数据资料,最终采用在静力荷载的基础上乘以放大系数的方式来处理。1985年瑞典的Nya Ullevi体育场在举行音乐会时,看台上观众随着音乐的节奏性跳跃引起体育场地基的振动,在400m外都可感受到,造成体育场基础的严重损坏^[8]。然而,由于缺乏对于跳跃这类荷载特性的认识,一直未对建筑结构进行特别的处理,甚至在2009年媒体报道当地建筑专家给出的解决方案仍然是要求观众“在体育比赛中停止跳动”。1992年日本东京Dome体育场在举行演唱会期间,场馆周边监测到了有感振动,300m以外的一幢高层建筑振感强烈,同时还发现观众行为、演出曲目和所测到的振动频率之间具有相关性^[9]。1992年法国科西嘉岛的一座临时性看台在举行比赛时倒塌,造成了13人死亡、1300多人受伤的严重后果。此外,在一个叫Lincoln的地方举行音乐会时,一座临时看台倒塌,主要是因为观众随着音乐同步摇摆使结构产生了过大的振动^[10]。2007年,我国国家游泳中心的临时看台钢结构设计中专门考虑了人群欢庆动作引起的结构振动影响^[11]。2014年1月,美式橄榄球队Seahawks的球迷在庆祝比赛胜利时的跳跃及跺脚等欢庆动作,引起结构和场地振动,附近的一个地震台站测到了相当于1~2级地震的地面振动。而早在3年前,球迷庆祝活动引起类似小型地震的事情就曾在Lynch的比赛中发生过。

由于人群荷载引起体育类建筑的大幅振动、结构破坏,甚至人员伤亡的事件在

巴西、英国、法国、韩国等地也都有发生,特别是在那些为体育比赛或演唱会等临时搭建的看台上,设计人员也采用了不同的措施来避免此类问题。如巴西的 Morumbi 体育场,结构设计人员试图通过安装阻尼器来减少看台在人群作用下的振动,但由于对人致荷载的特性认识不足,减振效果有限。英国很多体育场在举行临时音乐会前,都要求对结构在人群作用下的安全性进行评估,或者采取临时加固措施。例如,Cardiff Millennium 体育场在举行大型音乐会之前要安装临时支撑;利物浦的 Anfield 体育馆要求增加额外的钢柱来增强结构的整体刚度;著名的英国曼彻斯特 Old Trafford 体育馆则采用严格的人群管理来降低人群的动力效应影响;伦敦的 Arsenal's Highbury 体育场通过安装调谐质量阻尼器来减小结构振动。

伴随建筑材料轻质高强度以及建筑使用功能日益多元化的趋势,大跨度开敞式楼盖结构在演艺中心、博览中心、体育中心、会议中心、交通枢纽、商业综合体等各类公共建筑设计中日趋流行。如青岛体育中心综合训练馆预应力混凝土楼盖尺寸为 $72\text{m} \times 42\text{m}$ ^[12];北京奥林匹克会议中心钢-混凝土组合楼盖尺寸达到 $80\text{m} \times 61\text{m}$;黑龙江省博物馆新馆楼盖跨度达到了近 39m ;温州火车站站厅局部采用体外预应力混凝土结构,楼盖跨度达到 30m ,体外预应力部分的混凝土板厚仅 400mm ,极为轻薄^[13]。对于此类大跨度楼盖结构,人致荷载下的振动舒适度问题已超越承载力要求成为结构设计的控制因素。此外,对于大跨度或复杂楼梯,如国家体育场(鸟巢)大跨楼梯^[14]、世博阳光谷大跨度悬吊楼梯^[15]等,确保其在密集人流下的安全性和舒适性也非常重要。

与一般认识不同,人群的活动也会引起高层建筑的显著振动。香港科技大学 Kenny Kwok 教授曾做过一个有趣的试验:请数十名学生在香港一栋高层的顶楼按照结构自振频率一起有节奏地推动结构的剪力墙,振动监测仪器记录到了大于平时脉动振幅的结构振动。2011年7月5日,韩国首尔的一座39层高楼突然“摇摆”了10min左右,致使大楼中数百人在恐慌中逃离。专家实地调查后认为,当天该楼12层健身房内的健身者在集体完成一种称为“Taebo”的运动时,频率和大楼的基频接近产生了共振,造成了结构的振动。为证实此判断,研究者还原了当日的场景,让17名中年人重现当时的动作,大楼随之产生摇摆^[16]。

除去振动舒适度问题外,人致荷载所引起的小幅/微幅振动也会对结构的正常使用造成影响。例如,在安装有对振动敏感的精密仪器的医院或试验室建筑中,对楼板振动幅度的要求相当严格^[11]。英国 Exeter 大学 James Brownjohn 教授曾处理过很多人致结构振动对精密设备影响的工程问题。英国一家医院进行眼部手术的一台仪器固定在钢-混凝土组合楼盖上,使用过程中,由周围行人走动所引起的楼盖微振动多次造成该仪器无法精确定位的事故,形成了潜在的手术风险。经过实测分析,最终通过重新浇筑混凝土面层以增加楼盖厚度的方式来解决。此外,在新加坡的一家电脑硬盘生产厂,芯片的组装由工业机器人自动完成,然而由于现场其他工人的走动引起楼板振动,造成了工业机器人的安装精度下降,废品率升高,经济损失很大。此后通过在机器人与楼板连接处增加隔振装置的方式来减

少人致振动影响。

需要特别指出,以往由于缺乏对人致结构振动问题的认识和工程分析手段,已建建筑中发生振动舒适度问题后往往被简单地归结为管理等其他非结构因素的影响,特别是在体育场馆、商业中心和展览厅等公共建筑中。作者也曾经协助处理过若干已建结构中出现的振动舒适度问题,设计人员与业主出于各种原因不愿意公开报道此类问题。因此,实际工程中所存在的人致结构振动问题要远远高于文献记录的数量。伴随着工程结构“更高、更长、更轻”的发展方向,以及工程设计控制因素从承载力极限状态向正常使用极限状态转变的趋势,可以预见大跨工程结构中的人致振动问题会越发普遍,需要学术界和工程界从“一种新型灾害”的角度重视人致荷载及其引起的结构振动问题。

1.2 人致荷载动力特性

人致结构振动问题的研究大致沿着荷载模型、结构分析和评估标准这三个方向展开,前两个方向的研究历史和成果比较丰富,评估标准的研究相对滞后。本节叙述人致荷载的分类以及荷载试验和荷载模型的发展概况,有关结构分析和评估标准的内容将在本书的第二部分介绍。

1.2.1 人致荷载的分类

人致荷载可根据不同的原则进行分类,针对工程设计目的,目前常用的是接触形式、是否有外部节奏引导两种分类方式。

根据双足是否始终接触地面,可把人致荷载分为连续型和非连续型两类。前者包括步行、屈伸运动、突然起立(坐下)、原地踏步等,后者包括跳跃、跑动、舞蹈等。

根据是否有音乐、口令等外部引导因素,人致荷载可分为无外部节奏引导的一般荷载和有外部节奏引导的节奏性荷载两类。前者的典型情形为建筑楼盖、人行桥等结构上行人的步行荷载,后者的典型情形为音乐会或体育比赛中观众的节奏性运动。

人致荷载的数学模型和荷载取值是进行工程结构人致振动分析的基本前提,对此国内外学者开展了大量的试验研究工作,主要集中在步行和跳跃这两种最典型的荷载类型上。

1.2.2 步行荷载试验

通过试验记录步行荷载并分析其动力特性与影响要素,是步行荷载建模的重要步骤和先决条件。试验方案的设置与试验装置的选择决定了数据记录的可靠性以及荷载模型的合理性。目前主要有直接测试方法和间接测试方法两大类。

1. 直接测试试验

直接测试试验指直接记录测试者行走过程中足底与刚性地面之间的接触反力,在生物医学领域一般称为地反力(ground reaction force, GRF)。试验主要采用测力板及测力跑步机两种装置,各有利弊。

行人在步行过程中对地面施加的作用力包括竖向 F_z 、左右侧向 F_y 及前进方向 F_x 三个方向的地反力,如图 1.1 所示。早期的测力板只能测试单向(竖向)的地反力,而现代的测力板可以记录三向地反力。由于步行运动具有时空变化的特性,直接测试法所获得的步行记录的步数和长度取决于测力板的数量,目前的试验以单步测试为主。1961 年 Harper^[17]采用测力板完成了土木工程领域里最早的步行荷载试验,指出步行荷载曲线呈现 M 形的双峰特点,与步行行为的单足脚跟着地至脚尖离地的物理过程对应。其后, Galbraith 与 Barton^[18]、Ohlsson 等^[19]、Kerr^[20, 21]等研究者在不同时期的试验中,均采用测力板记录单步步行荷载时程。Galbraith 与 Barton^[18]试验的主要目的是确定步速、鞋子类型、地表面等因素对步行力的影响,测试样本为 3 人,分别以从慢到快的三种步速、三种不同的鞋子类型及在三种不同的地表面做步行荷载试验,对不同情况下的步行力时程做了对比分析(图 1.2)。

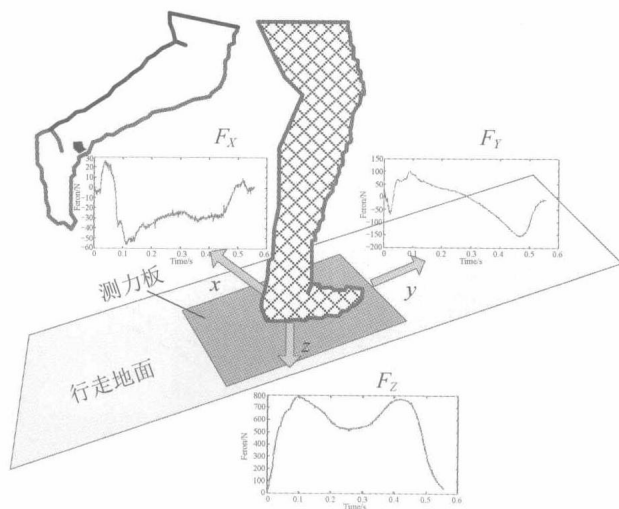
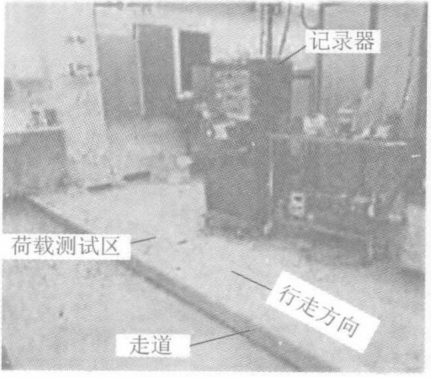
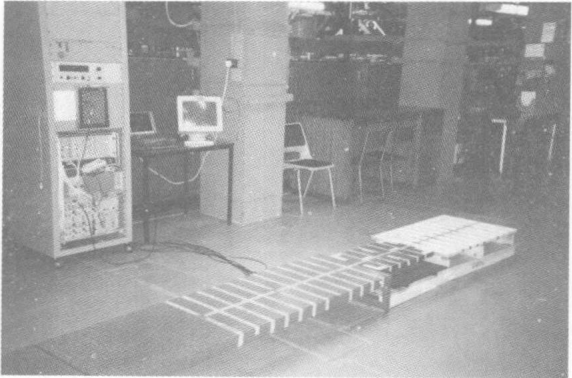


图 1.1 步行力三个方向的定义

Kerr^[20, 21]研究行人在楼梯以及平面上步行时的荷载差异,采用测力板进行了两种条件下的试验。楼梯测试组有 25 位测试者,获得了超过 500 组的数据。每位测试者以自选步频完成上下楼梯的动作,每组测试需要测试者报告哪一组步频最为舒适。平面测试组有 40 位测试者,步频 1~3Hz,总共记录了超过 1000 组数据。



(a) Galbraith 与 Barton^[18]



(b) Kerr^[20, 21]

图 1.2 步行荷载单步时程测试的试验设置

1996 年, Ebrahimpour^[22]等为研究小组人群的步行荷载, 设计了有 6 块测力板的试验装置 (图 1.3), 实测了单人、2 人小组、4 人小组的步行荷载。每组测试包括自由步行与规定步频两类工况。自由步行时, 要求测试者按日常步行的步频完成测试。规定步频则需要测试者按照外部节拍器的声音信号调整其步频, 完成了 1.5Hz、1.75Hz、2.0Hz、2.5Hz 四种不同步频的试验。采用多块测力板的好处是可以测得连续多步的荷载时程。

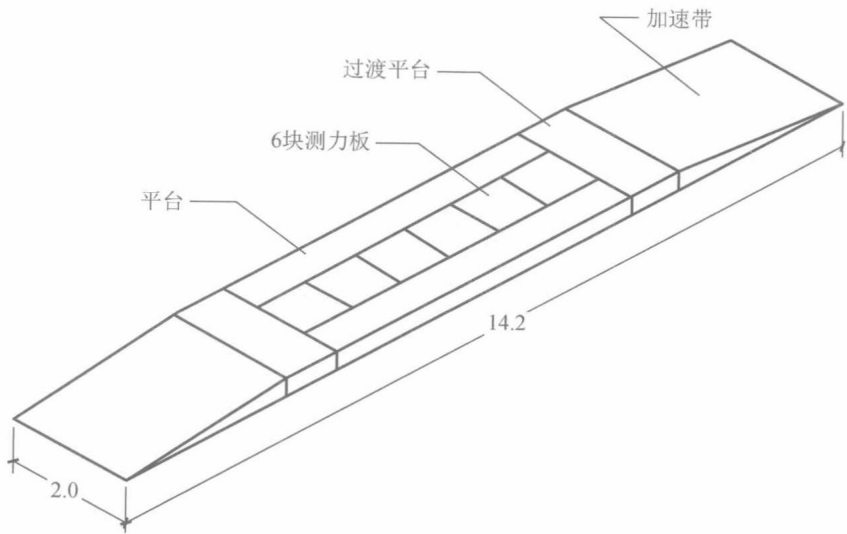


图 1.3 Ebrahimpour 等测力台简图及测力板截面图^[22] (单位: m)

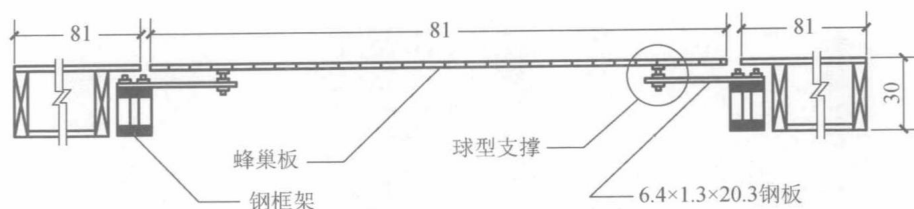


图 1.3 Ebrahimpour 等测力台简图及测力板截面图^[22] (单位: m) (续)

测力板的优势是测试者可以在比较接近自然步行的状态下进行试验,从而较好地模拟实际步行情形。然而,由于测力板数量的限制,一般测力板试验只能提供单步记录,同一步频需要多次单步记录以保证数据的可靠性。有研究者对测力板步行荷载数据的变异性及可靠性进行了研究,指出样本数必需足够大才能保证数据可以反映测试者的真实步行情况^[23]。一般认为,试验次数越多,测试者的表现越趋于平稳,但各研究者的结果有差异,所建议的稳定试验次数从 3 次到 20 次不等^[23, 24]。此外,由于测力板位置固定,试验中测试者往往要通过多次尝试才能准确踏上板面,完成有效测试,由此造成测试时间增加,且试验中存在测试者的“对准”心里,也会影响测试者步态。尽管增加测力板数量可获得连续多步的步行荷载,但将大大提高试验成本,同时还需要更大的试验空间,增加了测试难度。

测力跑步机 (instrumented force measuring treadmill, IFMT) 是一种将测力仪器与跑步机相结合的试验装置,不需要很大的试验空间就可以记录连续步行荷载,而且还可以方便地调整步行速度。此类装置文献中有多种不同的设计,包括在跑步机下装置一块测力板^[25] (图 1.4),多块测力板与跑步机形成多单元测试系统^[26, 27] (图 1.5),以及在跑步机下设置多向测力传感器^[28] (图 1.6) 等。英国谢菲尔德大学人致荷载研究小组利用测力跑步机装置完成了大量的步行荷载试验^[26],同济大学孙利民也曾设计制作了测力跑步机装置^[5] (图 1.7),开展步行荷载侧向分量的试验研究。

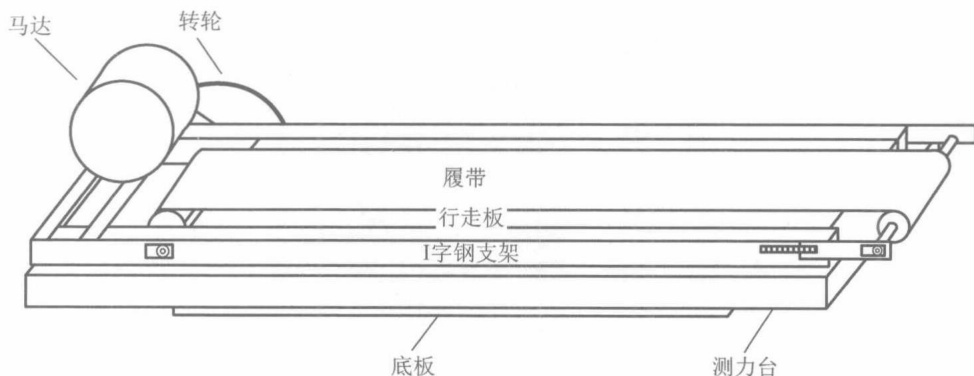


图 1.4 在跑步机下装置一块测力板^[25]

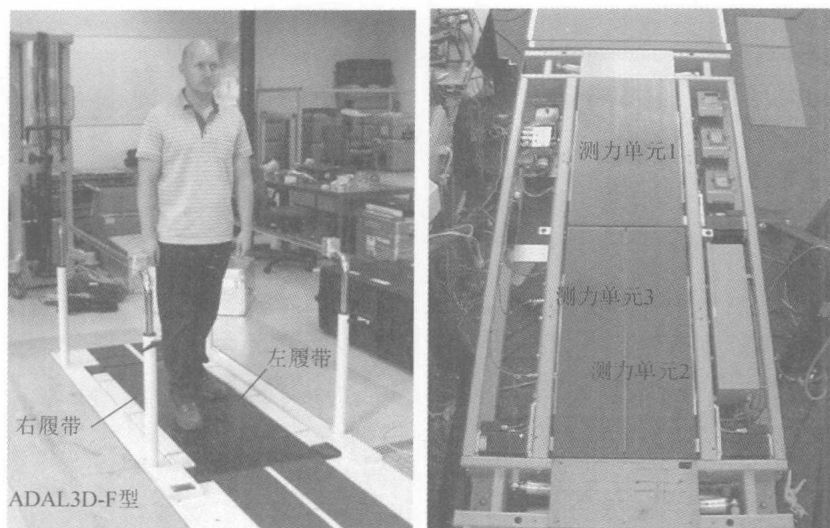


图 1.5 多个测力跑步机单元组成的测力跑步机装置^[26, 27]

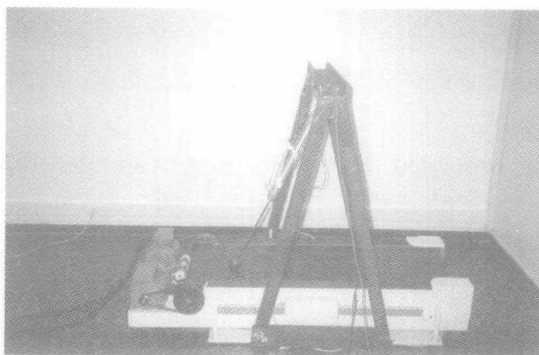


图 1.6 内置多个测力传感器的测力跑步机装置^[28]

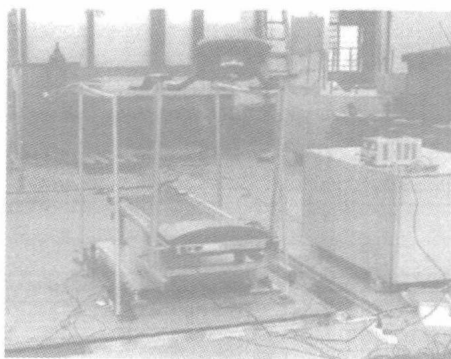


图 1.7 同济大学孙利民的测力跑步机试验装置^[5]

尽管测力跑步机有许多好处，但目前对其所获得的试验数据的代表性和可靠性还存有争论。一些试验研究表明，刚性地面上和跑步机上测得的步行地反力有