

楼板体系振动 舒适度设计

娄宇 黄健 吕佐超 著



科学出版社



楼板体系振动舒适度设计

娄宇 黄健 吕佐超 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面、系统地研究了楼板体系振动舒适度控制的理论、标准、设计方法，给出了部分工程应用实例。本书共7章，主要内容包括楼板振动的基本概念、国内外舒适度设计标准研究、人行走引起的舒适度控制标准和设计方法、有节奏运动引起的舒适度控制标准和设计方法、人行天桥舒适度控制标准和设计方法、楼板体系振动问题评估与加固、北京银泰中心楼板舒适度设计等。

本书可供建筑工程、市政工程等领域的工程结构设计人员阅读，也可供高等院校、科研院所的教师、研究生和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

楼板体系振动舒适度设计/娄宇, 黄健, 吕佐超著.
—北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033465-7

I. ①楼… II. ①娄… ②黄… ③吕… III. ①混凝土楼板—设计
IV. ①TU375.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 016796 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 刘玉靖
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

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 2 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 240 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154 (BA08)

版权所有, 侵权必究

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

前 言

近年来，随着轻质和高强材料的运用、结构分析和设计技术的进步、施工技术的发展，许多轻质楼板体系以及大跨度楼盖结构在公共建筑及住宅建筑中得到了广泛的应用，使得现代建筑的楼板结构更轻、更柔、跨度更大。轻质楼板体系以及大跨度结构在办公室、商场、体育馆、车站、展览馆等公共场所运用时，由于楼板体系的竖向自振频率越来越低，质量和阻尼也越来越小等，在人的正常活动下，楼板体系就很容易发生振动，这种振动达到一定程度时，会让生活和工作在楼中的人感觉不舒服。随着社会经济的发展和人民生活水平的提高，人们对生活品质的要求也越来越高，楼板振动舒适度问题越来越为人们所关注，也成为结构工程师在设计中常常要面对的问题。

我们在 2001 年进行北京银泰中心项目设计时，开始涉及楼板振动舒适度问题，该项目当时是北京市第一高楼（主楼 249.9m 高），主楼采用钢结构（框架-核心筒结构，外围框架和核心筒皆采用钢结构），是国内超高层建筑中最早采用全钢结构的建筑之一。该建筑主梁跨度 12m 左右，钢梁高 450mm；次梁跨度 5m，钢梁高 250mm；楼板高 125mm（包括闭口型压型钢板）。由于该楼盖体系刚度较小且重量较轻，楼板振动的舒适度问题是设计必须面对的问题。当时国内在这方面研究还不是很多，相关的规范内容也很少，不能满足设计需要。该项目从 2001 年 9 月开始进行初步设计，到 2003 年 6 月通过了全国超限高层建筑工程抗震设防专项审查委员会的超限审查，期间设计团队对楼板振动的舒适度设计有了一定了解，也使我们进一步认识到楼板振动控制的重要性和紧迫性，从而进行了一系列的学习和研究。

近年来，随着工程中遇到的楼板振动舒适度的问题越来越多，现行的国家规范《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3—2010）、《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2010）以及中国工程建设协会标准《组合楼板设计与施工规范》（CECS 273：2010）均对楼板体系舒适度提出了要求，但是由于各规范和标准中对计算公式的参数没有明确说

明，目前各种计算方法各执一词，尚无统一的体系。因此，本书从基本概念、标准、设计方法、评估和加固等方面系统阐述了楼板体系的振动舒适度问题，以期能统一楼板体系振动舒适度设计。书中部分重要公式序号用黑体表示。

在本书的撰写过程中，黄健高级工程师对国内外有关舒适度的标准进行了大量的收集、整理和分析工作，这些工作成为本书内容的重要支撑；吕佐超高级工程师与我进行了逐章逐节的讨论，并具体整理了每个章节；中国科学研究院力学所申仲翰教授审阅了部分章节，提出了很多宝贵的意见和建议，在此一并致谢。

尽管我们科研团队在振动控制和舒适度设计方面的学习和研究已有近 10 年时间，其间也得到了北京市自然科学基金的资助，但鉴于作者水平和经验有限，虽诚惶诚恐认真对待每一章每一节的撰写，书中仍难免有疏漏和不足之处，恳切希望同行专家和广大读者批评指正。

 于中国电子工程设计院

2011 年 11 月 18 日

目 录

前言

主要符号

第 1 章 概论	1
1.1 楼板振动控制的必要性和意义	1
1.2 振动与舒适度	4
1.3 楼板体系振动舒适度研究概况	6
1.3.1 振动舒适度的实验研究	6
1.3.2 振动舒适度的荷载函数研究	9
1.3.3 国内外楼板振动舒适度的研究	10
参考文献	11
第 2 章 楼板振动的基本概念	13
2.1 人行激励的荷载模型	13
2.1.1 人行走的荷载模型	14
2.1.2 有节奏运动的荷载模型	16
2.2 楼板体系的舒适度动力特性	18
2.2.1 质量	18
2.2.2 自振频率	19
2.2.3 阻尼	21
2.3 楼板体系的分析模型	23
2.3.1 共振模型	23
2.3.2 局部变形模型	25
2.4 楼板振动舒适度的分析方法	25
2.4.1 简化算法	25
2.4.2 有限元分析法	26
参考文献	28
第 3 章 国内外舒适度设计标准简介	29
3.1 楼板结构的舒适度设计标准简介	30
3.1.1 挠度控制	30
3.1.2 频率控制	30
3.1.3 加速度控制	31

3.1.4 其他控制标准	33
3.2 人行天桥的舒适度设计标准简介	36
3.2.1 挠度控制	36
3.2.2 频率控制	37
3.2.3 加速度控制	39
3.2.4 其他控制标准	45
参考文献	45
第4章 楼板结构振动舒适度设计	47
4.1 引言	47
4.2 楼板结构自振频率计算	48
4.2.1 楼板的类型	48
4.2.2 楼板结构的自振频率计算	53
4.3 楼板振动加速度计算	56
4.3.1 单阶荷载下楼板振动加速度计算	56
4.3.2 多阶荷载下楼板振动加速度计算	59
4.4 人行走引起的楼板结构舒适度设计	61
4.4.1 舒适度设计标准	61
4.4.2 简化算法	62
4.4.3 有限元分析法	75
4.4.4 舒适度的影响因素	77
4.5 有节奏运动引起的楼板结构舒适度设计	79
4.5.1 舒适度设计标准	79
4.5.2 简化算法	80
4.5.3 有限元分析法	88
4.5.4 舒适度的影响因素	90
参考文献	91
第5章 人行天桥振动舒适度设计	93
5.1 引言	93
5.2 舒适度设计标准	94
5.3 舒适度设计	95
5.3.1 简化算法	96
5.3.2 有限元分析法	102
5.4 舒适度的影响因素	104
5.5 工程案例	109
参考文献	115

第 6 章 楼板体系振动问题评估与加固	117
6.1 振动评估的步骤	117
6.2 振动评估的方法	118
6.2.1 理论计算	118
6.2.2 楼板性能实验	118
6.2.3 动力特性测试	118
6.3 加固	119
6.3.1 楼板结构的加固	119
6.3.2 人行天桥的加固	120
6.4 工程案例	123
参考文献	130
第 7 章 北京银泰中心楼板舒适度设计	131
7.1 工程概况	131
7.1.1 塔楼 A 结构概况	132
7.1.2 塔楼 B、C 结构概况	134
7.2 风荷载作用下的舒适度设计	135
7.2.1 塔楼 A 风荷载作用下的舒适度设计	136
7.2.2 塔楼 B、C 风荷载作用下的舒适度设计	140
7.3 塔楼 A 的楼板结构振动舒适度设计	141
7.3.1 人行走引起的楼板结构舒适度设计	141
7.3.2 有节奏运动引起的楼板结构舒适度设计	152
7.4 塔楼 B、C 的楼板结构振动舒适度设计	158
7.5 楼板结构舒适度测试	169
7.5.1 测试分析仪器	169
7.5.2 振源状况	170
7.5.3 测点布置	171
7.5.4 实测结果	171
7.6 计算与实测结果对比	174
参考文献	176
附录 1 热轧 H 型钢规格表	177
附录 2 美国 H 型钢 (W 系列) 规格表	180

主要符号

- a_p ——振动峰值加速度
 a_{pi} ——第 i 阶荷载频率对应的振动峰值加速度
 a_{pm} ——有效最大加速度
 a_{mq} ——区间加速度最大值
 a_r ——横风向顶点最大加速度
 a_w ——顺风向顶点最大加速度
 a_H ——人行天桥柱的横向振动加速度
 A ——梁的截面面积
 A_0 ——最大位移幅值
 A_g ——主梁的截面面积
 A_j ——次梁的截面面积
 B_g ——主梁楼板体系的有效宽度
 B_j ——次梁楼板体系的有效宽度
 B_q ——桥面宽度
 B_w ——垂直次梁跨度方向的楼板宽度
 B_l ——垂直主梁跨度方向的楼板宽度
 c ——阻尼
 C ——频率系数
 $[C]$ ——阻尼矩阵
 C_g ——主次梁连接节点的影响系数
 C_j ——次梁楼板体系的边界条件影响系数
 C_s ——挠度系数
 d_c ——组合楼板的折算厚度
 D_{avail} ——楼板结构的有效阻尼
 D_g ——单位宽度的主梁惯性矩
 D_j ——单位宽度的次梁惯性矩
 D_{reqd} ——楼板结构的需求阻尼
 D_s ——单位宽度的楼板惯性矩
 E_c ——混凝土的弹性模量
 E_s ——钢材的弹性模量
 f ——单自由度体系的自振频率
 \bar{f} ——荷载频率
 f_1 ——第一阶竖向自振频率

- f_1 ——第一阶荷载频率
 f_c ——柱的竖向自振频率
 f_g ——主梁楼板体系的竖向自振频率
 \bar{f}_i ——第 i 阶荷载频率
 f_j ——次梁楼板体系的竖向自振频率
 f_s ——板的竖向自振频率
 f_H ——人行天桥柱的横向自振频率
 F_0 ——荷载幅值
 F_p ——共振时人行走产生的作用力
 $F(t)$ ——人行走的荷载函数
 g ——重力加速度
 h ——楼板厚度
 H ——双向板的长边跨度
 I ——惯性矩
 I_g ——主梁的惯性矩
 I_j ——次梁的惯性矩
 k ——刚度
 $[K]$ ——刚度矩阵
 K_r ——系数
 L ——单向板的跨度或双向板的短边跨度
 L_g ——主梁的跨度
 L_j ——次梁的跨度
 m ——质量
 $[M]$ ——质量矩阵
 N_{eff} ——梁的有效数量
 P_0 ——人的重量
 $P(t)$ ——有节奏运动的荷载函数
 P_{wi} ——对应于荷载频率 \bar{f}_i 的有节奏运动的荷载幅值
 q_r ——人行天桥的人群线荷载
 R ——Wiss-Parmelee 比例因子
 s_p ——位移幅值
 S_g ——主梁的间距
 S_j ——次梁的间距
 t ——时间
 T ——荷载周期

- v_p ——位移幅值
 w ——均布荷载
 w_{gk} ——主梁分担的均布荷载标准值
 w_{jk} ——次梁分担的均布荷载标准值
 w_p ——人的等效均布荷载
 W ——振动有效重量
 W_g ——主梁楼板体系的振动有效重量
 W_j ——次梁楼板体系的振动有效重量
 $y(t)$ ——位移
 $\dot{y}(t)$ ——速度
 $\ddot{y}(t)$ ——加速度
 α ——动力因子
 α_i ——第 i 阶荷载频率的动力因子
 β ——阻尼比
 β'_i ——对应于荷载频率 f_i 的等效阻尼系数
 γ ——模态系数
 δ ——连续性系数
 Δ ——梁的最大挠度
 Δ_c ——柱的变形
 Δ_g ——主梁的最大挠度
 Δ_j ——次梁的最大挠度
 Δ_s ——板的挠度
 μ ——动力放大系数
 μ_i ——第 i 阶荷载频率对应的动力放大系数
 ν ——泊松比
 ξ ——荷载频率与自振频率的比值
 ξ_i ——第 i 阶荷载频率与自振频率的比值
 ρ ——系数
 φ ——第 i 阶荷载频率的相位角
 ω ——自振圆周频率
 ω_1 ——第一阶自振圆周频率
 $\bar{\omega}$ ——荷载圆周频率
 $\bar{\omega}_a$ ——加速度达到最大值时的荷载频率
 $\bar{\omega}_i$ ——第 i 阶荷载圆周频率
 $\bar{\omega}_s$ ——位移达到最大值时的荷载频率
 $\bar{\omega}_v$ ——速度达到最大值时的荷载频率

第 1 章 概 论

1.1 楼板振动控制的必要性和意义

楼板的振动，一般是指由人的步行、舞蹈或其他有节奏的运动等所产生。有关人行产生的楼板振动对结构安全的影响，早在 18 世纪中叶人类就有所认知。当时，法国昂热市一座 102m 长的大桥上有一队士兵经过，当他们在指挥官的口令下迈着整齐的步伐过桥时，桥梁突然断裂，造成 226 名官兵和行人丧生。究其原因是因为大队士兵迈正步走的频率正好与大桥的固有频率一致，使桥的振动加强，当它的振幅达到最大以至超过桥梁的承载能力时，桥就发生断裂。类似的事件还发生在俄国和美国等地。鉴于成队士兵正步走过桥时容易造成桥的共振，所以后来各国都规定大队人马过桥时，要解散便步通过，以免造成人桥共振问题。共振造成的建筑倒塌还曾发生于体育场馆建筑和歌舞厅建筑。1902 年，在英国格拉斯格的阿布罗足球场，英格兰队和苏格兰队正在激烈角逐，狂热的球迷不断进行有节奏的跺脚呐喊以助声势，看台突然倒塌，造成 25 人死亡、517 人受伤。还有 2006 年新西兰惠灵顿某舞厅在大家跳舞时发生了舞厅地板倒塌事故。

上述事故的致因就是人们有节奏的运动导致楼板（或桥板）发生共振。共振问题可以说存在于我们生活的各个方面，任何物体产生振动后，由于其本身的构成、大小、形状等物理特性，原先以多种频率开始的振动，渐渐会固定在某一频率上振动，这个频率叫做该物体的“固有频率”，与该物体的物理特性有关。当人们从外界再给这个物体加上一个振动（称为策动）时，如果策动力的频率与该物体的固有频率正好相同，物体振动的振幅达到最大，这种现象叫做“共振”。物体产生共振时，由于它能从外界的策动源处取得最多的能量，往往会产生一些意想不到的后果。

在我国的史籍中也有不少生活中的共振记载。唐朝开元年间，洛阳有一个姓刘的和尚，他的房间内挂着一幅磬，他常敲磬解烦。有一天，刘和尚没有敲磬，磬却自动响起来了。这使他大为惊奇，终于惊扰成疾。他的一位好朋友曹绍夔是宫廷的乐令，不但能弹一手好琵琶，而且精通音律（即通晓声学理论），闻讯前来探望刘和尚。经过一番观察，他发现每当寺院里的钟响起来时，和尚房里的磬也跟着响了。于是曹绍夔拿出刀来把磬磨去几处，从此以后就不再自鸣了。他告诉刘和尚，这磬的音律（即现在所谓的固有频率）和寺院的钟的音律一致，敲钟



图 1.1 韩国 TechnoMart 的购物大楼

时由于共振，磬也就响了。将磬磨去几处就是改变它的音律，这样就不会引起共鸣。和尚恍然大悟，病也随之痊愈了。同样，目前世界上所有登山运动员登山时都严禁大声喊叫，因为喊叫声中某一频率若正好与山上积雪的固有频率相吻合，就会因共振引起雪崩，其后果十分严重。

在韩国首都广津区，有一座名为“TechnoMart”的购物大楼（图 1.1），共 39 层，在 12 层设有健身房。2011 年 7 月 5 日，健身房内有 17 名中年人随着音乐在楼内跳起“跆拳道”健身操，其有节奏的跳动和楼板结构产生共振，导致购物中心大楼出现短时间晃动，“摇摆”长达 10min，数百人惊慌逃离。

当然，人类也通过努力解决了许多工程的振动问题，包括桥梁的共振问题。世界著名的伦敦千禧桥，是伦敦为了迎接千禧年建造的一座钢结构步行桥。为了避免大桥在人行走过程中产生共振，千禧桥应用了调谐质量阻尼减振器，将桥梁的共振响应控制在特定范围，8 个水平和 50 个垂直调谐质量阻尼减振器隐藏于桥体结构中，几乎难以觉察。水平 TMD 为单摆悬挂的 2.5t 钢块，对任何桥体的运动都有反应，并传递给内置式黏滞阻尼器。50 个垂直 TMD 重为 1~2t 的钢板，每个用 4 根螺旋弹簧支撑，以与水平 TMD 相同的方式控制阻尼器的运动（图 1.2）。



图 1.2 伦敦千禧桥

建筑和桥梁楼板系统的振动，绝大多数情况下对结构并不造成安全问题，而是给工作、生活在该建筑里的人们带来很多烦恼和不适。随着社会经济和人民生活水平的提高，人们不仅仅考虑楼板振动带来的结构安全性，而且也开始逐步考虑到生活在该建筑里的人们的舒适性问题。目前，由于新的结构分析和设计技术的进步、施工技术的发展、新的高强轻质材料的运用、结构质量和阻尼的减少以及大空间结构在办公室、商场、体育馆、车站、展览馆等公共场所的运用，导致了现代建筑楼板结构更轻、更柔，跨度更大，整体结构在水平方向自振频率和楼板体系的竖向自振频率越来越低。整体结构在外界各种作用例如风、机械振动的作用下，很容易产生较为显著的动力响应，这些动力响应将给人的工作、休息乃至身体健康带来巨大的影响；大跨度楼板结构在人的正常活动下，楼板体系很容易振动，而这些楼板振动将导致一些居住者的不舒适感，极大影响了建筑的使用功能。近几年来，越来越多的工程由于这种原因而导致建筑物难以正常使用、出租和销售，个别建筑物进行了重新加固或改造甚至完全拆除。例如，文献 [1] 中就给出了一个新建公寓因为不舒适的振动被迫关闭的工程案例；文献 [2] 中给出了一座新的办公楼由于人行导致的楼板振动引起了人的不舒适，导致不得不改变办公地点的案例。

当然，现在越来越多的项目在设计阶段就充分考虑楼板刚度太弱带来的振动舒适度问题，比如在北京一个非常著名的工程项目——北京银泰中心项目设计中（图 1.3），由于该工程的三个塔楼楼板都是采用钢梁+压型钢板+混凝土的组合楼盖，且建筑层高和净高的限制非常严格，钢主梁的截面尺寸较小且两端都是铰接，楼板刚度与阻尼都较一般建筑较弱，楼板系统由竖向振动所引起的不舒适问题就尤其备受关注。在塔楼 A 中的标准层、健身中心，塔楼 B、C 中的奇、偶数两个标准层都存在未来使用中的舒适度问题，因此在设计时就考虑了人行和有节奏运动的楼板振动问题，以确保将来的正常使用。



图 1.3 北京银泰中心

目前在各国结构设计及可靠性分析中，结构的极限状态一般划分为两类，即承载能力极限状态和正常使用极限状态。现阶段各国对承载能力极限状态可靠度的研究已相当深入，很多研究成果已普遍应用，一些国家的结构设计规范已依据

可靠性理论进行了修订。但是，在结构正常使用极限状态的分析中，结构的许多容许限值具有很大的模糊性，并且对于结构振动带来的舒适度问题，在结构设计中普遍考虑得还比较少；对由于建筑结构楼板振动引起的舒适度问题，在我国广大设计人员中也缺乏足够的重视，这其中一方面是规范体系尚不完善，另一方面也是市场上缺乏辅助图书供大家学习。

1.2 振动与舒适度

众所周知，由人行走、跳跃等行为引起楼板结构的振动以及人行走引起人行天桥的振动，会给居住者和行人带来不适和不舒服感，但是目前世界各国对于舒适度的评判标准并不统一，因此有必要首先介绍一下振动与舒适度。

人体对环境振动的反应研究可以追溯到 1879 年以前，德国著名生理心理学家 Wilhelm Wundt 首先比较系统地研究了人对振动的感受。然而，人对振动的反应特性运用到产品设计、环境评价中去，并使这些研究成为现代新兴学科之一——人机工程学的一个研究领域，却开始于 20 世纪初，其标志性的研究成果是 1931 年 Reier 和 Meister 的试验研究。在随后几十年的时间里，英、德、美等国家的学者先后进行了大量的实验室实验和现场实验，在实验手段、实验方法、评价体系和实验数据等方面获得了大量成果，这些成果逐步地体现到一系列国际标准中，例如英国国家标准局发布的 BS 系列标准、德国的 DIN 系列标准和 VDI 系列标准、ISO 发布的 ISO 系列标准等，已广泛应用到汽车、机械、航空、航天、船舶和土木工程等领域^[3]。

现代人机工程学主要从以下三个角度考虑振动对人的影响：

(1) 振动与舒适感。对于建筑物来说，舒适感主要是指人在绝大部分时间内感受不到建筑物的振动。因此，满足振动舒适度要求的振动加速度水平往往和振感阈值有关，振感阈值给出了大多数建筑物发生不可接受的振动加速度水平的下限，对于可接受振动加速度水平的上限则在一倍到几倍振感阈值范围内变化，一个合理的上限取值依赖于振动的特性、持续时间、人在建筑物中所从事的活动和其他视觉、听觉诱导因素。在 ISO 标准、英国的 BS 标准和德国的 DIN、VDI 标准中，都以不同的形式给出了振感阈值和一定的振动持续时间下对应的振动加速度水平的限值，这些限值通常称为舒适度限值，主要用于建筑振动舒适性的评价。

(2) 振动与操作活动。对于建筑物来说，影响人正常操作活动的主要是一些低频振动。有感觉的低频振动往往带来较大的位移响应，从而导致人丧失方向感和平衡。这些效应对人所从事的工作究竟影响程度如何尚难以量化，对此问题可获得的资料并不多。对于固定海洋平台结构，ISO 6897 根据一些相关数据给

出了“在较恶劣环境条件下从事工作”的振动限度，这个限值主要适用于海上生产作业。

(3) 振动与人体健康。尽管有很多振动可以导致人的生理受损，但是在建筑物中能直接导致人生理损伤的振动尚为罕见。建筑物振动对人体生理的影响往往是间接的，例如影响到人的心理健康和情绪状态从而间接地影响到人的生理健康，但是这些效应在实践中是很难预测的。对于能直接影响到人的生理健康的振动水平，有关标准用暴露极限来描述。显然，对于绝大多数建筑结构来说，是没有必要考虑暴露极限的。

从人机工程学的角度来看，振动按信号的频率可以划分为两大类，即低频振动和低频振动。根据 ISO 标准和 BS 标准，低频振动主要是指 1Hz 以下的振动，这些振动往往对应较大的位移响应，例如高层建筑在风作用下的振动，海洋平台结构在海冰和波浪作用下的振动等就属于此类。高频振动主要是指 1~80Hz 的振动，由机器、交通、人的行走引起的振动属于此类。对于频率高于 80Hz 的振动激励，一般不会引起人的全身振感，因此分析建筑物中人对建筑振动的反应时，一般不考虑频率高于 80Hz 的振动问题。高频振动和低频振动对人体的影响是不相同的，在 ISO 标准和 BS 标准中，这两类振动对人体影响的评价指标和方法是分别予以规定的。对于建筑物，评价低频振动的国际标准主要是 ISO 6897 和 BS 6611，而评价高频振动的主要标准是 ISO 2631-2 和 BS 6472^[4-6]。

从生理学上讲，当人暴露在振动环境下，人体对环境振动的反应，其频率范围应控制在 100Hz 以下^[7-11]。同时，大量的研究表明：人体由软组织构成的内脏器官（比如胸腔、腹腔）在竖向振动下，其系统对振动比较敏感。对于坐着的人来说，第一共振频率在 4~6Hz，对于站立的人来说，共振发生在 5~12Hz，也就是说，人体作为一个动力系统，发生共振的频率范围为 3~12Hz^[12]。这个范围也正是一般的办公建筑楼板结构的自振频率。

人类对于楼板振动的感觉是一种复杂的现象，这与振动的种类、周围的环境和人的敏感度有关。比如连续的振动比瞬时的振动更令人烦恼，安静的空间比喧闹的公共空间要求要高；在同等的振动环境下，一个住在 15 层的老人与一个住在二层公寓的年轻人对振动的感觉有很大的区别。人们对于振动的反应还依赖于人们的活动状态，比如对于办公的人与运动的人对振动的感觉明显不一样。另外，对于振动的感觉与处于振动下的暴露时间、离震源的距离等也是有关系的。人类活动引起的结构振动问题很早就得到国外研究人员的关注，绝大多数研究集中在人走动引起的楼板振动舒适度问题上^[13]。尽管目前已经获得了大量的振动人机工程学、结构分析方面的知识，但是由于不同知识体系之间的隔阂，缺乏有效的分析工具以及工程教育环节的疏忽，这些知识并没有能够充分地结合在一起应用到工程实践中去。这些问题已经在具体工程中突出地体现出来，

例如某音乐厅楼板上的附属结构在一次摇滚音乐会中振动加速度超过了 $0.3g$ ，引起了人们的惊恐；某商厦的大跨度楼梯刚建成，就因振动过大而无法使用^[14]。这些问题的存在，说明结构振动给人们生产、生活带来的麻烦是普遍存在的，这些问题需要工程师把振动人机工程学和结构分析的知识结合在一起来解决。

总的来说，楼板振动带来的人体感知的舒适问题，是一种不同于结构强度的现象，它与人对振动的生理和心理反应有关。但目前各国标准规范还主要是通过限制楼板振动在一定的幅度内，以减少人的烦恼，从而达到满足或改善舒适度的目的。

1.3 楼板体系振动舒适度研究概况^[15]

其实，楼板振动舒适度的问题在很久以前就引起了研究人员的关注。早在 1928 年，Tredgold 提出了第一个楼板的刚度标准，指出对于木结构的梁应该做的更高一些，以防止人行走时引起楼板的振动^[16]。但是迄今为止，与人的活动有关的楼板振动舒适度问题仍然是一个没有能够妥善解决的问题，此问题涉及结构力学、心理学、人机工程学、模糊数学、可靠度理论和优化理论等诸多学科。

楼板的振动由很多不确定的因素引起，从而导致对其的分析也较为复杂。在分析人的活动引起楼板动力响应之前，应首先研究人对振动的感觉、人类活动产生力的函数、楼板自身的特性、舒适度评价标准等。

1.3.1 振动舒适度的实验研究

研究人对振动的感觉时，往往采用询问表或调查表来衡量振动的干扰程度或者人的感觉程度，大多用无振感、轻振感、中等振感、强振感、无法忍受 5 个等级来描述人的主观反应。整个调查过程，实际上是人感知到振动，并依据某种标准对自己的感觉做出判断的过程。由于人对振动感受的差异性和主观判断时采用的判断标准的差异性，大量的现场实验和室内实验研究表明，人体对振动的感受程度受振动的平稳特性、频率、振动持续时间、住户在建筑物内所从事的活动以及现场在听觉、视觉上的诱导因素等多种条件的影响，而且由于被调查对象的性别、年龄、职业、健康状况的不同，不同的人对振动刺激的感受程度并不一样，具有很强的随机性。同时，由于描述人主观反应的标准，例如轻振感、强振感等概念并没有一个清晰的界限，即使是同一个人，对自己感受的判断也并不是十分肯定。从 1931 年以来，国际上有很多振动舒适度的实验，下面对一些比较著名的实验数据进行简单的归纳和整理，见表 1.1。

表 1.1 主要振动舒适度实验和研究成果

研究者	主观反应描述	峰值加速度/(mm/s ²)
Reiher and Meister (1931) ^[13]	感觉不到	1.8
	轻微感觉到	2.9
	容易感觉到	12.5
	强烈感觉到	110
	不舒适	600
	十分不舒适	1000
Jacklin and Liddell (1933) ^[17]	可以感觉到	30
	有干扰	3000
	不舒服	8000
Helberg and Sperling (1941) ^[18]	勉强感觉到	10
	肯定感觉到	220
	无法忍受	800
Lippert (1946) ^[19]	感觉不到	<20
	勉强感觉到	20
	明显感觉到	90
	略微不满	250
	不满	800
	非常不满	2500
Goldman (1948) ^[20]	感觉阈值	60
	烦恼阈值	1000
	忍受限度	4000
Dieckmann (1955) ^[21]	感觉阈值	30
	可以感觉到	300
	感觉不舒服	3000
Chang (1967) ^[22]	感觉不到	50
	可以感觉到	50~150
	感觉烦恼	150~500
	非常烦恼	500~1500
	无法忍受	>1500

注：除了 Chang 数据的频率在 0.1~0.25 Hz 范围内以外，其余数据的频率范围为 1~2 Hz。

表 1.1 中提到“感觉阈值”和“烦恼阈值”，其中，“感觉阈值”指人刚好能够感觉到的振动强度，从心理物理学来说，在此振动强度下，能够感觉到振动的人数和不能感觉到振动的人数各占 50%；“烦恼阈值”指某一特定刺激强度，当

强度小于该特定强度的刺激时,认为是可以接受的,否则为不可接受的,从心理物理学来说,在此刺激强度下,认为刺激可接受的人数和刺激不可接受的人数各占 50%。由于各研究者对于人的主观感受采用不同的描述方式,很难对数据进行一一对应,但是如果将人对振动的感觉划分为五大类,可以将以上研究成果大致归类,如表 1.2 所示。

表 1.2 振动舒适度实验峰值加速度 (mm/s^2) 归纳

研究者	状态				
	感觉不到	可以感觉到	明显感觉到	感觉不舒服	感觉无法忍受
Reiher and Meister (1931) ^[13]	<1.8	12.5	110	600	1000
Jacklin and Liddell (1933) ^[17]	<30	30	—	3000	8000
Helberg and Sperling (1941) ^[18]	<10	—	220	—	800
Lippert (1946) ^[19]	<20	—	90	250	2500
Goldman (1948) ^[20]	<60	—	—	1000	4000
Dieckmann (1955) ^[21]	<30	300	—	3000	—
Chang (1967) ^[22]	<50	50~150	—	150~500	>1500

从表 1.2 可以看出,对于不同的情况,人对振动的感觉是有差异的。就峰值加速度而言,“感觉不到”的上限最大值为 60mm/s^2 ;“可以感觉到”在 $12.5\sim300\text{mm/s}^2$ 之间;“明显感觉到”在 $90\sim220\text{mm/s}^2$ 之间;“感觉不舒服”在 $150\sim3000\text{mm/s}^2$ 之间;“感觉无法忍受”的下限值为 800mm/s^2 。综合以上数据可以看出,以人对振动峰值加速度的敏感性来区分,舒适度的实验数据可以概括为表 1.3。

表 1.3 人对振动峰值加速度的敏感性

状态	峰值加速度/ (mm/s^2)	状态	峰值加速度/ (mm/s^2)
感觉不到	<12.5	感觉不舒服	150~800
可以感觉到	12.5~90	感觉无法忍受	>800
明显感觉到	90~150		

人对振动的感觉与振源的性质、建筑结构的自振频率、振动的时间、振动的环境、人的状态以及年龄和性别等都有关系。当振动频率与建筑物自振频率相同或接近时,振感更明显;振动加速度越大,人的感觉越明显;振动时间越长,建筑物内人的舒适感越差,偶尔的较大振动与长时间的较小振动相比,后者更让人难以忍受;振动环境嘈杂时,人对振动敏感性降低,在安静的环境里,人对振动较敏感;人躺着比站立或坐着时,对竖向振动更敏感;女性比男性对振动更敏感

一些；相对于年轻人来说，年纪大的人对振动舒适度的要求也会更高。因此，要综合考虑振源特性、振动环境和人的状态等因素，对不同建筑类别、不同的活动状态，选择不同的振动舒适度要求。一般来说，可以将人的活动状态分为两大类：一类为行走，涉及的建筑类别一般为医院、居民楼、办公楼、教堂、商场、餐厅及人行天桥等，人们活动以正常行走为主；另一类为有节奏运动，涉及的建筑类别一般包括健身房、体育馆、舞厅、音乐厅和俱乐部等。

建筑物内从事不同活动的人，对于在行走荷载作用下的舒适度要求也不同。医院手术室中的医生和其他类似的敏感度较高的职业的人群，对振动加速度要求较严格，一般应控制在“感觉不到”的范围以内；当人们坐在办公室或居民楼里时对振动较敏感，可以控制在“可以感觉到”的范围以内；在餐厅就餐的人，由于环境嘈杂，对振动舒适度要求更低，峰值加速度可以在“明显感觉到”的范围以内；人行天桥上的行人，由于振动对人的影响是短暂的，对峰值加速度的敏感性也较低，对于“感觉不舒服”的振动加速度也可以接受。因此，需要根据不同的建筑类别、人的不同的活动状态等因素，选择不同的振动舒适度要求。进行有节奏运动时，由于环境一般很嘈杂，例如在舞厅跳舞的人、在体育馆内为运动员呐喊助威的人、在健身房内进行有氧操活动的人，对振动敏感度明显降低，对“感觉不舒服”的峰值加速度也是可以接受的；当健身房的大开间中，部分为有氧活动区，部分为器械健身时，进行器械健身的人对振动敏感度相比有氧活动的人要高一些，因此舒适度要求较高。

1.3.2 振动舒适度的荷载函数研究

人的活动可以引起各种动荷载，可以是周期性的（如行走、跑动、跳跃、跳舞等），也可以是非周期性的（如从高处跳下）。人的活动引起的楼板振动对结构和人的影响有很大不同，对结构整体而言，这种振动很少会影响结构的安全，但是对结构的使用性即人的舒适性影响很大，还有可能影响到人的健康。

国外对人的活动如何用函数描述进行了大量研究。1972年 Jacobs 首先研究了人走动引起的楼板竖向振动，并得到了人走动产生的激振力；Harper 等为了研究楼板表面的摩擦力和滑移，通过单足落步测定了水平和垂直方向的行走激励；后来 Galbraith、Barton、Blanchard、Ohlsson、Kerr 及其他研究人员对垂直行走激励也进行了研究，结果与 Harper 等的研究成果类似；Andriacchi 等测定了横向、垂直方向以及沿板跨三个方向的单足落步行走激励，并提出行走速度增加可以增大步幅和峰值激励；Ellingwood 和 Bishop 对单足落步曲线也进行了测定；1978年 Matsumoto 进行了大量的落足实验，得出人行走的步频平均值为 1.9Hz、方差为 0.2Hz 的结论；Allen 和 Rainer 对单人和多人连续行走产生的动力荷载进行了实测，认为人行走产生的力可以通过一系列的简谐波来组成，这个

简谐波随着频率的增加, 振幅逐渐减小, 可以用傅里叶级数表示^[3,23,24]。

1.3.3 国内外楼板振动舒适度的研究

当前国内外对楼板振动舒适度的研究主要集中在楼板振动的分析计算方法、楼板振动的人体舒适度预测、基于舒适度的楼板正常使用极限状态的设计、基于舒适度要求的楼板优化计算分析等几个方面, 且绝大多数研究集中在人走动引起的楼板振动舒适度问题^[25]。

国外在 20 世纪初就开始了楼板振动舒适度的研究^[26]。Wiss 和 Parmelee 进行了人对瞬态振动的反应的实验, 研究了不同频率、振幅、阻尼的楼板结构, 采用综合考虑频率、振幅和阻尼的动力反应因子 R 来反映人对振动的感觉, 他们通过研究发现, 相对于结构的频率和振幅来说, 阻尼对人的振动具有较明显的影响。Murray 在 1981 年通过对 100 个钢-混凝土组合楼板的测试和分析, 用频率和跨中最大位移的乘积来评价楼板振动的舒适度, 后来根据 91 个实验的数据, 提出采用需求阻尼的评价方法。Ellingwood 和 Tallin 在 1984 年研究了行走产生的楼板动力反应, 提出了通过计算结构振幅和结构频率来评判楼板舒适性的方法, 并给出了各种居住环境下稳态振动和瞬态振动的加速度限值。Allen 和 Murry 研究了在行走荷载作用下钢结构的动力反应, 在 1993 年提出当结构自振频率小于 9Hz 时, 对人行天桥、商场和办公室等可用峰值加速度来表征振动舒适度^[3,23,24]。

国内对楼板振动舒适度的研究起步较晚。近年来, 由于新的结构材料、结构体系、施工方法和新的结构分析方法的采用, 现代工程结构变得更轻、更柔、跨度更大, 人的活动引起的楼板振动舒适度问题开始引起了国内研究人员的关注。宋志刚^[3]提出了基于烦恼率的结构振动舒适度设计理论模型, 探讨了大跨度梁板结构和海洋平台的振动舒适度问题; 陆春华等^[27]通过对人行荷载作用下楼板结构振动加速度响应的分析, 给出了采用频率加权均方根加速度作为评价指标的分析方法, 并以楼板自振基频为设计参数, 分析了结构竖向振动强度随基频的变化规律, 提出了考虑舒适度要求的楼板基频设计建议值; 何浩祥等^[28]根据 ISO 5982 标准规定的不同姿势下的竖向人体动力模型, 把人体等效为具有多自由度的质量、刚度和阻尼系统模型, 并将该模型与原有结构进行耦合形成具有非经典阻尼的人与结构耦合的动力学模型, 提出了由小波包变换求得频带能量, 进而评价人体舒适度的方法; 阳升^[23]选用行走和跳跃的荷载工况, 利用有限元分析方法对武汉火车站楼面结构进行了振动舒适度分析; 谢伟平等^[29]对两层预应力混合结构的武汉商业服务学院体育馆进行了舒适度实测研究, 采集了团体操 (20 人) 和打篮球 (10 人) 时楼板和看台的 5 个位置的振动加速度, 并根据 ISO 2631—1997 对实测数据进行了分析; 韩小雷等^[30]编制了人行荷载时程生成程

序,对人群行走进行了仿真模拟,并就该技术应用于多个工程实例,得到了基于多自由度模型的楼板振动加速度反应谱的计算公式;李爱群等^[31]建立了起立、行走和跳跃等动力荷载的模拟方法,提出了考虑行人起步相位角随机分布的随机人群荷载模拟方法,并结合大跨楼盖振动特点,采用多点输入时程分析方法比较了多重调谐质量阻尼器(MTMD)对舒适度的影响;法永生等^[32]将烦恼率引入人行天桥的舒适度分析,参考ISO 2631-1997的方法,提出了用总乘坐值评价人行天桥竖向与侧向的耦合振动;孙道远等^[33]采用基于实测数据的频谱分析以及模态分析的方法对某三跨等截面连续箱梁人行天桥的振动问题进行了分析,给出了人行走和地面通行车辆对人行天桥振动影响的定性分析。

随着我国社会和经济的发展,人民生活水平的提高,人们对生产、生活环境质量的要求也不断提高,这就使得由于楼板振动导致的人体舒适性问题逐步显现出来。另外,由于住房制度的改革,使得人们对住房这项固定资产的关注程度大大提高,国外的研究也表明,由于对资产关注程度的不同,自有房屋的居住者比租赁房屋的居住者更容易抱怨楼板振动引起的舒适度问题。国内对振动舒适度的研究起步较晚,实验数据较少,因此本书在借鉴传统分析手段的基础上,对国内外在该问题上的最新研究成果进行归纳总结,去粗取精,建立起国内的楼板振动舒适度标准,同时提出切实可行的楼板振动舒适度的分析方法。

参 考 文 献

- [1] Ellingwood B, Tallin A. Structural Serviceability: Floor Vibrations [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110 (10): 2424—2437.
- [2] Kerr S. C, Bishop N. W. M. Human Induced Loading on Flexible Staircases [J]. *Engineering Structures*, 2001, (23): 37—45.
- [3] 宋志刚. 基于烦恼率模型的工程结构振动舒适度设计理论 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [4] 金伟良, 宋志刚. 振动人机工程学在结构工程中的应用 [J]. *建筑科学*, 2002, 18 (2): 1—6.
- [5] 赖维铁. 高层建筑风振动的人体工学分析 [J]. *广东工学院学报*, 1993, 10 (2): 33—40.
- [6] 赖维铁. 人机工程学. 第二版 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1997.
- [7] 中华人民共和国国家标准. 城市区域环境振动标准 (GB 10070—88) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [8] ISO 8041. Human Response to Vibration—Measuring Instrumentation [S], 2005.
- [9] ISO 2631—2. Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration—Part 2: Continuous and Shock Induced Vibration in Buildings (1to80Hz) [S], 1989.
- [10] ANSI S3. 29. Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings [S]. American National Standard Institute, USA, 1983.
- [11] ANSI S3. 18. Guide for Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration [S]. American National Standard Institute, 1979.
- [12] Fredrik Ljunggren, Junye Wang, Anders Agren. Human Vibration Perception from Single-anddual-

- frequency Components [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, (300): 13—24.
- [13] Letherwood, et al. A Design Tool for Estimating Passenger Ride Discomfort Within Complex Ride Environments [J]. Human Factors, 1980; 291—298.
- [14] Mahmoud Mohamad Said Khoncarly. Dynamic Response of Floor Systems to Footfall-induced Vibrations [D]. Case Western Reserve University, 1997.
- [15] 姜宇, 吕佐超, 黄健. 楼板振动舒适度控制的标准研究 [J]. 特种结构, 2011, 28 (3): 1—4, 8.
- [16] Tredgold T. Elementary Principles of Carpentry [M]. London: E & F. N. Spon, 1824.
- [17] Jacklin H M, Liddell G J. Riding Comfort Analysis [D], Purdue University, 1933.
- [18] Helberg W, Sperling E. Critical Appraisal of the Riding Properties of Railway Vehicles [M]. Org. Fortschr Eisenbahnwesens, 1941, 96 (12).
- [19] Lippert S. Vibration Standards Proposed [J]. SAE Journal, 1946, (55): 32—34.
- [20] Goldman D E. A Review of the Subjective Response to Vibratory Motion of the Human Body in the Frequency Range 1 to 70 cycles Per Second [M]. U. S. Naval Medical Research Institute, 1948.
- [21] Dieckmann D. The Effect of Mechanical Vibration Upon Man—a Review and Summary of Research to date [R], 1955.
- [22] Chang F K. Human Response to Motion in Tall Buildings [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, June, 1973, 99 (ST6): 1259—1272.
- [23] 阳升. 行走跳跃激励下大跨度楼面结构振动舒适度分析 [D]. 北京: 北京科技大学, 2008.
- [24] 吴建霞. 新型钢承板截面优化及舒适度设计 [D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
- [25] 折雄雄, 陈隽. 大跨度楼盖振动舒适度研究综述 [J]. 结构工程师, 2009, 25 (6): 144—149.
- [26] Griffin M J. Handbook of Human Vibration [M]. London: Academic Press, 1994.
- [27] 陆春华, 金伟良, 宋志刚. 基于振动舒适度要求的混凝土楼板自振频率分析 [J]. 建筑科学, 2010, 26 (7): 43—46.
- [28] 何浩祥, 闫维明, 张爱林, 王卓. 竖向环境振动下人与结构相互作用及舒适度研究 [J]. 振动工程学报, 2008, 21 (5): 446—451.
- [29] 谢伟平, 洪文林, 李霆. 某体育馆楼板振动舒适度研究 [J]. 噪声与振动控制, 2010, (2): 80—83.
- [30] 韩小雷, 陈学伟, 毛贵牛, 郑宜, 季静. 基于人群行走仿真的楼板振动分析方法及反应谱公式推导 [J]. 建筑科学, 2009, 25 (5): 4—9.
- [31] 李爱群, 陈鑫, 张志强. 大跨楼盖结构减振设计与分析 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31 (6): 160—170.
- [32] 法永生, 李东, 孙翠华. 人行桥随机人行荷载下的振动分析及其舒适度评价的新方法 [J]. 振动与冲击, 2008, 27 (1): 119—123.
- [33] 孙道远, 李东. 某大跨度钢结构人行天桥的振动特性分析与研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35 (3): 152—155.

第 2 章 楼板振动的基本概念

振动是自然界最普遍的现象之一，大到宇宙、小至亚原子粒子，无不存在振动。人们的生活离不开振动，如心脏的搏动、耳膜和声带的振动，行走、跑动、跳跃引起的振动等。工程领域中，振动现象也比比皆是，机床和刀具加工时的振动、各种动力机械的振动、桥梁和建筑物在风和地震激励下的振动等。振动有积极的一面，例如振动是通信、广播、电视和雷达等工作的基础；振动也有消极的一面，例如振动会影响精密仪器设备的功能，降低加工精度，引起结构的破坏，还会给人的心理和生理带来消极的影响。

本书讨论楼板体系的振动舒适度问题，楼板体系包括建筑结构中的楼板和人行天桥。在建筑和人行天桥等结构中，楼板振动主要由机械设备振动和人的活动引起的。其中，人的活动是经常发生且不可避免的，这里主要考虑人行激励对楼板振动的影响。振动源产生的激励可以通过基础、柱、墙、楼板等结构构件传递，把振动源处的激励变成了接收者处的振动响应，而传播介质的动力特性，如刚度、质量和阻尼等又会影响到振动响应的大小。在楼板体系的振动中，人既是楼板体系振动的激励者，也是楼板体系振动的接收者。

下面将结合楼板振动对舒适度的影响，对荷载模型、楼板体系的动力特性、分析模型以及分析方法进行详细的阐述。

2.1 人行激励的荷载模型

振动是一个非常广阔的学科领域，按引起振动的原因可以分为自由振动、强迫振动和自激振动；按振动的规律可分为简谐振动、周期性振动、瞬态振动和随机振动；按描述系统运动的微分方程可分为线性振动和非线性振动^[1,2]。楼板振动只是振动的小分支，本书讨论的楼板振动的振源主要是人的日常活动，包括行走、跑动、跳跃、跳舞或有氧健身操等活动，通常称为人行激励。人行激励下楼板的振动为强迫振动，又由于人行激励较小，楼板体系处于弹性状态，振动属于线性振动。

由于人行激励不是静态的，这种荷载可能由单人行走，也可能由很多人共同活动引起的，荷载作用点不断改变，作用位置与步频、体重等因素有关，因此为了评价楼板振动的舒适性，就必须对人行激励的荷载模型进行研究。下面将重点阐述常见的人行走和有节奏运动的荷载模型。

2.1.1 人行走的荷载模型

大量研究发现,人沿直线行走时,重心总是不断地下降和上升,上下波动的距离大约为 35mm,并且在行走过程中,地面所受的力并不是一直等于人的体重,而是波动的,在一些步态中总是或多或少的大于人的体重,但整个行走过程的平均力等于人的体重。对于楼板振动而言,主要关注人行走过程中的竖向力,这与人的落脚轻重、体重、性别和年龄等有关,其研究的切入点是人的单步落足曲线。

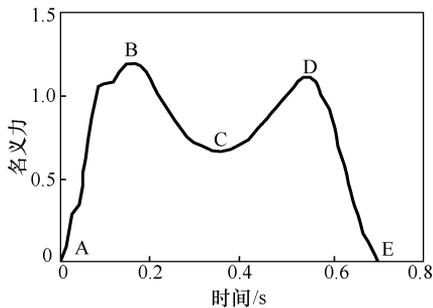


图 2.1 单步落足示意图

单步落足曲线一般以单足作用在地面上的竖向作用力和落足时间的形式给出。根据大量的实验结果,单步落足曲线一般有两个峰值,典型的单步落足曲线,如图 2.1 所示^[3]。纵坐标为名义力,即为竖向作用力与人体重的比值,是一个无量纲的量。图 2.1 中坐标原点 A 表示人的足跟开始接触地面,然后随人体重心的转移曲线逐渐升高,曲线高度达到 1.2~1.25 倍人的体重时,达到第

一个峰值点 B,该峰值包括了人的体重和由于运动产生的惯性力的总和,随后随着人屈膝、摆动另一条腿和重心的转移,该曲线将逐步下降至 C 点,C 点的力一般要小于人的体重,接着人的脚掌蹬地,使得曲线再次升高至 D 点,D 点作用力的大小约为人体重的 1.15 倍,D 点以后,曲线迅速下降直至 E 点,此时人的足尖完全离开地面。

步频是行走荷载的基频,指单位时间内人走动的步数,是人行走曲线的一个重要参数。实验研究表明,一般人的自然走动频率在 1.5~2.5Hz 之间变化。人行走时会因为步速、步幅不同,导致步频不同,步速、步幅和步频之间的关系见表 2.1。

表 2.1 步速、步幅和步频的关系

行人运动状态	速度/(m/s)	步幅/m	频率/Hz
慢速行走	1.10	0.60	1.70
正常行走	1.50	0.75	2.00
快速行走	2.20	1.00	2.30

根据单步落足曲线,假定人左右两脚产生的单步落足曲线相同,就可以定义出一条完整的行走激励的时程曲线。实验证明,连续两段单步落足曲线在时间上

有一定的重叠。Ellingwood 认为重叠时间大约为 0.1s，但是根据 Bishop 的实验数据，重叠时间与步频有关，步频越低，单步落足曲线时间越长，重叠的时间也越长。由于重叠效应，在整个行走过程中这两个时间段上的竖向作用力要发生叠加，引起整个行走时程作用力的大小、频率成分发生显著的变化。

尽管可以通过实测的方法来获得人的步行曲线，但是实测的步行曲线很难用于工程设计，因此必须将实际的步行曲线进行数学简化。历史上出现了各种各样的简化的步行曲线，这些步行曲线在简化和假设上各有不同。通常，荷载函数可以简化成傅里叶级数或一系列的三角函数，Mouring 发现，10 个傅里叶级数能很好的表示落步曲线。Allen 和 Rainer 对单人和多人连续行走产生的动力荷载进行了实测，认为人行走产生的力可以通过一系列的简谐波表示^[3~5]为

$$F(t) = P_0 \left[1 + \sum \alpha \cos(2\pi \bar{f}_i t + \varphi) \right] \quad (2.1)$$

式中， P_0 ——人的重量，一般取 0.7kN；

α ——第 i 阶荷载频率的动力因子；

\bar{f}_i ——第 i 阶荷载频率；

t ——时间；

φ ——第 i 阶荷载频率的相位角。

对于动力因子，许多研究者进行了楼板实测，其中 Reiner 和 Allen 在 1988 年给出了实验数据如图 2.2 所示^[6]。

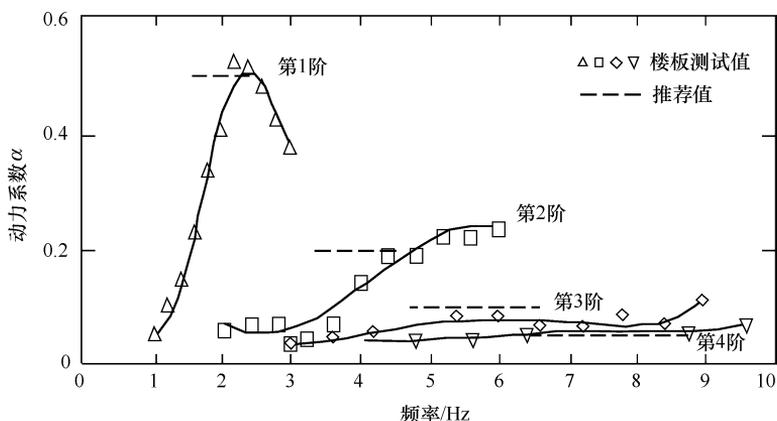


图 2.2 人行走各阶荷载频率对应的动力因子

式 (2.1) 中各参数取值如表 2.2 所示。由表 2.2 的参数可以看出，该简谐波随着频率的增加，振幅逐渐减少，前三个或四个简谐波组成了动力荷载的绝大部分。

表 2.2 人行走简谐波的模型参数

荷载频率阶数 i	人的行走		
	\bar{f}_i/Hz	α_i	φ_i
1	1.6~2.2	0.5	0
2	3.2~4.4	0.2	$\pi/2$
3	4.8~6.6	0.1	$\pi/2$
4	6.4~8.8	0.05	$\pi/2$

对于结构平面布置规则、质量分布均匀的楼板体系，可以只考虑一阶荷载频率，忽略静荷载的影响，采用简化计算得到行走激励下的动力响应。当第 i 阶荷载频率 \bar{f}_i 与楼板竖向自振频率相等或相近时，楼板振动最大，荷载函数可以简化为

$$F_i(t) = \alpha P_0 \cos(2\pi \bar{f}_i t) \quad (2.2)$$

当结构平面布置和楼板边界条件复杂时，需要采用有限元分析法进行楼板体系的动力响应分析，行走荷载可以考虑前三阶荷载频率的影响，荷载函数可采用

$$F(t) = \sum_{i=1}^3 \alpha P_0 \cos(2\pi \bar{f}_i t + \varphi) \quad (2.3)$$

2.1.2 有节奏运动的荷载模型

在健身房、体育馆内进行的有氧健身操、健美操和器械健身等健身活动，以及舞厅的跳舞等均为有节奏运动。另外，在体育馆或体育场举行比赛或大型音乐会时，观看比赛和节目的观众会进行有节奏活动来呐喊助威，这些也包含在有节奏运动的范畴内。随着国内公共建筑跨度的增大，有节奏运动对楼板振动舒适度的影响不容忽视，但是目前国内对有节奏运动引起的楼板结构舒适度设计研究较少。

参与有节奏运动的人一般较多，与人行走荷载有较大差异，不能用单个集中荷载来模拟。传统上，一般用等效均布动荷载来反映其对楼板体系振动的影响。等效均布动荷载的大小取决于参与有节奏运动的人数，参照《美国道路通行能力手册》(HCM 2000)，单位面积的人数对应于不同的活动状态，见表 2.3。

表 2.3 人行道服务水平标准

服务水平	单位面积的人数/(人/m ²)	活动状态描述
A 级	<0.3	可以完全自由活动，可横向穿越与选择行走路线
B 级	0.3~0.5	准自由状态（偶有降速需要），反向与横穿行走要适当降低步行速度

续表

服务水平	单位面积的人数/(人/m ²)	活动状态描述
C级	0.5~0.8	个人尚舒适,部分行人活动受约束,选择步行速度与超越他人有一定的限制,反向与横穿行走常发生冲突,为免于挤擦碰撞,有时要变更步速和行走路线
D级	0.8~2	行走不便,大部分处于受约束状态,正常步速受到限制,有时需调整步幅、速度与线路,超越、反向和横穿十分困难,有时产生阻塞或中断
E级	>2	完全处于排队前进,“跟着走”,个人无行动自由,经常发生堵塞或中断,反向与横穿绝不可能

对于典型的有节奏运动,例如跳舞、音乐会、有氧健身操等,依照表 2.3 的状态描述可以得到单位面积上的人数,见表 2.4。

表 2.4 单位面积上的人数 (人/m²)

活动类别	跳舞	音乐会或体育活动	有氧健身操	混合使用
单位面积的人数	0.8	2	0.3	0.2

注:混合使用是指一个房间里同时进行有氧健身操和其他健身活动。

由表 2.4,可以根据人的体重和单位面积的人数得到等效均布动荷载。与行走的荷载函数类似,有节奏运动产生的力也可用一系列的简谐波来表示,荷载函数 $P(t)$ 可表示为^[7]

$$P(t) = w_p [1 + \sum \alpha \cos(2\pi f_i t + \varphi)] \quad (2.4)$$

式中, w_p ——人的等效均布荷载;

α ——第 i 阶荷载频率的动力因子;

f_i ——第 i 阶荷载频率;

φ ——第 i 阶荷载频率的相位角。

对于有节奏运动的动力因子取值,很多研究者进行了实验实测,其中 Allen 对有氧健身操运动进行了实测,实验数据如图 2.3 所示^[8]。

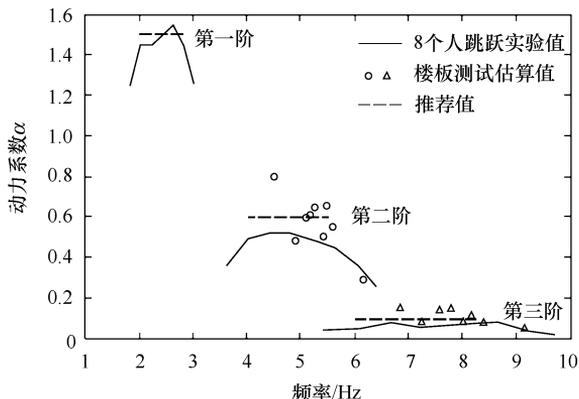


图 2.3 有氧健身操各阶荷载频率对应的动力因子

通过大量的实测数据, 可得到跳舞、有氧健身操和体育活动等的荷载频率和动力因子见表 2.5^[9,10]。

表 2.5 有节奏运动作用下的荷载频率和动力因子

荷载频率阶数 i	跳舞		有氧健身操		音乐会或运动会	
	\bar{f}_i/Hz	α_i	\bar{f}_i/Hz	α_i	\bar{f}_i/Hz	α_i
1	1.5~3	0.5	2.0~2.75	1.5	1.5~3.0	0.25 (0.4)
2	—	—	4.0~5.5	0.6	3.0~5.0	0.05 (0.15)
3	—	—	6.0~8.25	0.1	—	—

注: 假定座位是固定的, 对于无固定座位的情况, 采用括号内数值; 混合使用的动力因子与有氧健身操相同。

进行楼板结构的振动响应计算时, 可以忽略式 (2.4) 中静荷载的影响, 荷载函数 $P(t)$ 可简化为

$$P(t) = w_p \sum \alpha_i \cos(2\pi \bar{f}_i t + \varphi) \quad (2.5)$$

2.2 楼板体系的舒适度动力特性

由振动学可知, 构成振动系统并决定其振动性质的基本要素是物体的惯性、复原性和阻尼三项。惯性产生的惯性力能使物体离开系统的平衡位置, 维持物体的运动状态; 复原性产生的恢复力能使物体恢复到系统的平衡位置。惯性力与复原力交替作用的结果, 就使物体产生振动。阻尼使振动不能无休止地振动下去, 起着阻碍物体运动的阻抗作用。对于楼板振动而言, 惯性、复原性可以用质量和刚度来表征, 因此质量、刚度和阻尼是楼板体系动力特性的三大要素。

就楼板振动舒适度而言, 质量的取值至关重要, 其区别于一般的结构设计。另外, 质量和刚度的综合影响集中体现在楼板体系的自振频率上, 因此自振频率也是楼板体系舒适度动力特性的一大要素, 下面将根据楼板振动舒适度的特点, 对楼板体系的质量、自振频率和阻尼进行详细论述。

2.2.1 质量

楼板体系的质量取决于其上的荷载取值, 就楼板振动舒适度而言, 人行激励不同, 则荷载取值不同。对于人行走, 需要考虑恒荷载和有效均布活荷载; 对于有节奏运动, 除了需要考虑恒荷载和有效均布活荷载外, 还需要计及参与活动的人的等效均布荷载^[9,10]。

一般来说, 楼板结构的恒荷载包括楼板自重、面层、隔墙、吊挂和装修等重量, 这里的恒荷载应取用实际楼板体系上的荷载, 不同于设计恒荷载。当隔墙位置或装修形式尚未确定时, 隔墙或装修等荷载取值不能超过实际荷载的数值。当某项荷载数值很小时, 可以不考虑该项荷载的影响。人行天桥的恒荷载包括桥面板、桥面梁、面层、桥面支撑梁系统和栏杆等荷载。当面层材料、栏杆等尚未确定时, 面层、栏杆等荷载取值不能超过实际荷载的数值。当某项荷载数值很小时, 可以不考虑该项荷载的影响。

有效均布活荷载指楼板上随机摆放的家具、桌椅等的均布重量。就手术室来说, 主要考虑设备、仪器等的重量, 可取 $0.5\text{kN}/\text{m}^2$; 就办公楼来说, 主要考虑桌椅、文件柜、档案柜等的重量, 一般取 $0.5\text{kN}/\text{m}^2$; 就居民楼来说, 主要考虑家具等的重量, 相对较轻, 通常取 $0.3\text{kN}/\text{m}^2$; 而对于商场、教堂、健身房等大空间建筑来说, 由于空间大, 家具等较少, 有效均布活荷载的数值较小, 可不计有效均布活荷载的影响。对于人行天桥而言, 由于附加荷载很小, 一般情况下可以不考虑有效均布活荷载的影响。

参与活动的人的等效均布荷载与有节奏运动的类别有关。一般地, 当有氧健身操和器械健身操或其他健身操同时存在时, 人均面积较大, 人的等效均布荷载较小, 可取 $0.12\text{kN}/\text{m}^2$; 只有有氧健身操时, 人均面积稍小一点, 人的等效均布荷载可取 $0.2\text{kN}/\text{m}^2$; 跳舞时人均面积大约为 1.2m^2 , 人的等效均布荷载可取 $0.6\text{kN}/\text{m}^2$; 音乐厅举行音乐会或体育场进行体育比赛时, 观众较多, 人均面积较小, 人的等效均布荷载可取 $1.5\text{kN}/\text{m}^2$ 。对于人行天桥而言, 由于禁止在天桥上进行有节奏的运动, 人行天桥振动响应不需要考虑有节奏运动的影响。

在行走激励下楼板振动舒适度分析中, 恒荷载取值要比结构设计的设计恒荷载要小, 有效均布活荷载也不同于结构的均布活荷载, 数值也要小很多, 有节奏运动中人的等效均布荷载是一个全新的概念, 这些荷载的定义都与舒适度设计密切相关, 取值大小直接影响楼板体系的自振频率, 并进而影响楼板振动的加速度响应, 因此需要慎重取用。

2.2.2 自振频率

单自由度体系受到某种外界干扰后会产生位移或速度, 外界干扰消失后系统仍将在平衡位置附近继续振动, 这种振动称为自由振动。自由振动时的频率称为系统的自振频率, 相应的振动形状称为振动模态或振型。对于多自由度体系来说, 其自由振动是由多个基本振动形式叠加而成的, 数值最小的自振频率称为第一自振频率或称基本频率, 相应的振动形式称为第一振型或称基本振型。按自振频率递增顺序还可得到第二、第三振型等, 统称为振动的高