

“十二五”国家重点图书

高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书



中国轨道交通学术文库

高速铁路

振动及噪声测试技术

GAOSUTIELU
ZHENDONG JI ZAOSHENG CESHI JISHU

张 洁 林建辉 高品贤 编著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

“十二五”国家重点图书

高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书



中国轨道交通学术文库

高速铁路 振动及噪声测试技术

GAOSUTIELU
ZHENDONG JI ZAOSHENG CESHI JISHU

张 洁 林建辉 高品贤 编著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

内 容 提 要

本书系统地阐述了振动学与噪声学的基本原理、测试技术及其在高速列车状态监测与故障诊断中的应用。主要内容包括：单自由度、多自由度系统的振动理论，确定性振动、随机振动信号分析方法，振动测试设备与信号处理，振动试验与系统特征参数识别，高速铁路振动、噪声测试、评价与控制。

本书内容丰富，主题突出，由浅入深，实用性强，既可作为高等工科院校本科生和研究生的振动与噪声研究、测试、信号处理课程的教学用书，也适合从事机械、轨道交通、车辆、线路、测试和维修相关行业的工程技术人员在理论研究和实验研究工作中参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

高速铁路振动及噪声测试技术 / 张洁, 林建辉, 高品贤编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.6

(高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书. 中国轨道交通学术文库)

“十二五”国家重点图书

ISBN 978-7-5643-2401-8

I. ①高… II. ①张… ②林… ③高… III. ①高速铁路—列车振动②高速铁路—列车—噪声控制 IV. ①U260.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 139287 号

“十二五”国家重点图书

高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书

中国轨道交通学术文库

高速铁路振动及噪声测试技术

张 洁 林建辉 高品贤 编著

*

责任编辑 李芳芳

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川永先数码印刷有限公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 15.25

字数: 381 千字

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-2401-8

定价: 39.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

当前，我国的城市轨道交通、高速铁路等有轨交通迎来了历史性的发展机遇。随着动力结构向高速化、复杂化和轻量化方向发展，带来的工程振动和噪声问题更为突出。掌握工程振动与噪声测试技术的原理和方法，对于机械、车辆、土建等工业技术部门解决现代科学技术和工程实际问题中的振动和噪声问题是十分重要的。

本书在编写上，由浅入深地讲授基本理论和分析方法，加强对逻辑思维能力和解决问题能力的训练，同时，注重与实际相联系，紧跟世界高速铁路最新科学研究成果，反映学科新知识、新成就，全面介绍高速铁路振动及噪声测试技术的原理和方法、测试系统的组建和主要测试仪器的选用，以及振动、噪声信号的分析方法及故障诊断方法，具有较强的理论指导与实践应用价值。

本书共分 8 章：第 1 章简要介绍了振动与噪声的概念、危害、测试的意义和容许标准；第 2 章阐述了单自由度、多自由度系统的振动理论；第 3 章介绍了振动信号的分类与描述方法，针对确定性振动、平稳随机振动和非平稳随机振动，阐述了多种现代信号分析方法；第 4 章介绍了振动测试与信号处理设备，包括激振设备、传感器、数据采集、信号的变换与调理、测试系统的校准等实用知识；第 5 章介绍了振动系统特征参数测试方法；第 6 章重点讨论了高速铁路振动测试，包括高速铁路路

基、轨道、车辆-轨道耦合系统振动分析、车辆-轨道耦合系统振动性能评价标准、高速列车走行部振动测试、高速铁路振动状态监测、高速列车乘坐舒适度测试等内容；第7、8章介绍了高速铁路噪声测试与控制方法及仪器设备。

本书的主要内容已对西南交通大学机械工程学院、牵引动力国家重点实验室等有关专业的本科生和研究生讲授过多次，收到了良好效果。期望该书对读者能有一些启发和帮助。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大同行和读者指正。

编 者

2013年4月

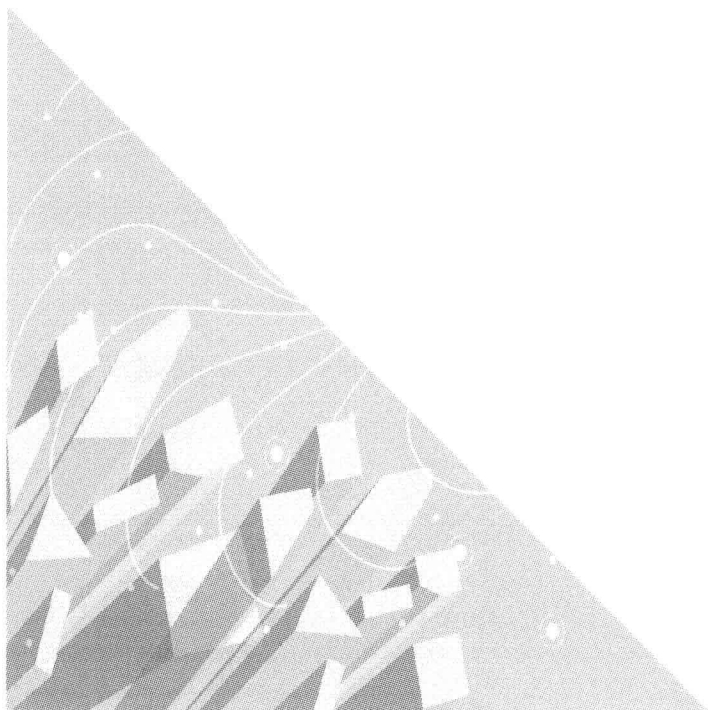


1 绪 论	1
1.1 概 述	3
1.2 高速铁路振动与噪声测试的意义	6
1.3 振动与噪声的危害及容许标准	6
2 振动测试的基本理论	15
2.1 单自由度系统	17
2.2 多自由度系统	23
2.3 系统的状态空间模型	31
2.4 系统参数模型	35
2.5 信号通过线性系统	37
3 振动信号描述与处理	39
3.1 振动信号的分类与描述	41
3.2 确定性振动	43
3.3 随机振动	51
4 振动测试设备	83
4.1 振动测试系统的基本特性	86
4.2 激振设备与激振方式	88
4.3 测振传感器	92
4.4 数据采集	115
4.5 信号的变换与调理	125
4.6 振动测试系统的校准	142
5 振动系统特征参数测试	147
5.1 振动试验基本内容	149

5.2	单自由度系统特征参数的测量	150
5.3	多自由度系统特征参数的测量	155
6	高速铁路振动测试	163
6.1	高速铁路路基	165
6.2	高速铁路轨道	168
6.3	车辆-轨道耦合系统振动分析	178
6.4	车辆-轨道耦合系统振动性能评价标准	182
6.5	高速列车走行部振动测试	187
6.6	高速铁路振动状态监测	189
6.7	高速列车乘坐舒适度测试	194
7	噪声测试	195
7.1	机械噪声概述	197
7.2	噪声特性参数	199
7.3	听觉与响度	200
7.4	噪声测量仪器	202
7.5	声学测量系统的校准	207
7.6	声场特性	211
7.7	噪声测量	215
7.8	声功率测量	220
7.9	声强测量	221
7.10	噪声诊断技术	224
8	高速铁路噪声控制	227
8.1	噪声控制概述	229
8.2	高速列车噪声声源识别	230
8.3	高速铁路环境噪声评价	232
8.4	高速铁路噪声控制措施	234
	参考文献	237

1

绪 论



铁路作为国民经济大动脉、国家重要基础设施和大众化交通工具,对于中国经济社会发展具有重要意义。发展高速铁路是国家为进一步提升铁路行业建设、制造、运营、维修、管理水平做出的战略决策。根据《中国铁路中长期发展规划》,到2020年,我国建设高速铁路将达1.6万千米以上,快速客运网将达5万千米以上,覆盖全国90%以上人口。京沪、京港、京哈、沿海通道、徐兰、沪昆、沪蓉、青太等高速铁路线路构成我国高速铁路网的基本构架,城际高速铁路覆盖环渤海、环鄱阳湖、长株潭、长三角、珠三角等经济圈。

中国是世界上高速铁路系统技术最全、运营里程最长、在建规模最大的国家。我国铁路引进技术、消化吸收、创新研发取得了丰硕的成果,中国的高铁速度代表了世界的高铁速度。

然而,随着动力结构向高速化、复杂化和轻量化方向的发展,带来的工程振动和噪声问题更为突出。振动与噪声测试技术是关系到高速铁路安全运营的关键技术之一,切实开展振动与噪声测试工作,优化结构,减振降噪,是高速铁路发展面临的重要任务。

1.1 概 述

振动(vibration)是指物体或结构相对于平衡位置所作的往复运动,通常用位移、速度或加速度来描述,也可以是一些物理量如力和应变等按上述方式变化的过程。

振动是物体运动的一种方式,振动的物体包括固体和流体,流体又分为液体和气体。广义上来说,物体的运动方式从一点看是振动,从空间整体看是波动,因而振动学和声学都可以视为物质的振动,只是振动的主体分别是固体和流体。

振动测试是指用试验方法测量运动机械或工程结构受外界激励(包括环境激励)或运行过程中重要部位的位移、速度、加速度等运动量,了解机械或结构的工作状态或动力学特性,如固有频率、振型、阻尼、刚度等特性参数。

1.1.1 振动测试与理论计算的关系

振动测试与理论计算是解决振动问题的相辅相成的两种手段。

研究结构的动态变形和内力是一个十分复杂的问题,不仅与动力载荷的性质、数量、大小、作用方式、变化规律以及结构本身的动力特性有关,还与结构的组成形式、材料性质等因素密切相关。在工程实际中遇到的问题往往很复杂,通过分析计算可以解决许多结构振动方面的问题,但所依据的模型和边界条件很难完全符合实际情况,尤其是对于复杂结构,或者牵涉较复杂的非线性机理时,仅靠现有的振动理论和计算方法来作分析判断往往是不够的。在研究结构产生振动的原因及其规律时,除了理论分析之外,进行振动测试是一个不可或缺的重要手段。

1.1.2 振动测试的基本内容

机械振动的研究可归结为机械系统的激励、响应和振动特性三个方面的问题。在已知其中两个方面的情况下可求解第三方面的问题。

(1) 已知激励和系统振动特性的情况下求响应,即振动量的测量。

测量机械系统某些选定点上的振幅(如位移、速度和加速度)、频率、相位、振动的时间历程和频谱等。这种测量通常在机械系统的工作状态下进行,通过对正在运转的机器设备进行监控并测量机器外部的振动信号,或者对非工作状态的机器进行激振试验,经分析得到相关信息,从而判断机器内部的故障原因及故障的性质。

(2) 已知激励和响应的情况下求系统的振动特性,即系统特征参数的测定,也称参数识别。

主要是应用机械阻抗测试技术,获得系统的特征参数如固有频率、阻尼、刚度、质量和振型等。工程中的结构和某些大型设备可以通过模态分析确定振动的各阶模态参数、振型和节点位置,这对解决这类结构或设备的优化设计和减振、防振非常重要。这种测定通常在机械系统的非工作状态或模型试验情况下进行,若在工作状态下进行,则称为在线识别。

(3) 已知系统的振动特性和响应的情况下求激励,即环境预测。

这种测试称为振动环境模拟试验。环境振动来源于多种多样的原因,传感器拾取的信号是各种振源信号的合成,利用实验与分析技术可以判断主要振源,以便采用有效措施进行减振和隔振,也用于研究或考核试验对象在强度、寿命和功能方面的抗振性。

1.1.3 振动测试的应用

振动测试综合了传感器、电子学、信号分析、结构振动理论等方面的研究成果,形成了自身的理论方法、实践技术和学科体系,在机械工程和工程结构部门有着广泛的应用。

(1) 动力强度试验。某些结构、设备往往要在振动环境中使用,因此,必须在符合实际使用环境所规定的振动条件下对产品设备进行试验,检查产品的耐振性、稳定性以及设计、制造、安装的合理性等,称之为动力强度试验。这对于航天、航空、航海、交通运输、机械、电子工业等部门有重要意义。

(2) 结构动力特性测试。对测试得到的振动激励信号和响应信号进行频域或时域分析,采用试验模态参数识别方法,求出结构的各阶固有频率、阻尼比及振型等模态参数估计值,进而评价结构性能,判别结构是否损伤的位置及程度,以便采取修补或加固措施。

(3) 振动疲劳试验。用低于破坏强度的载荷对被测物体进行长时间的振动加载,直至物体发生疲劳机械损坏。通过疲劳试验可以研究或检测被测物体材料的疲劳寿命,为设计长期处于振动环境中的结构或设备提供必要的依据。

(4) 振源识别。通过对结构的振动测试,识别振动源以及振动的传播途径和传播速率,

以便采取适当措施隔离或缓解振动的影响。

(5) 抗地震性能试验。对建筑结构模型、设备仪器等试件输入实际地震记录或根据抗震范围提供的反应谱生成的人工地震信号进行激励,测试结构或设备的振动响应,确定结构或设备抗地震的性能。尤其是对于核电站、水库大坝、特大桥梁、发射塔等重大工程设施,强震安全监测是非常重要的,是保障重大工程设施安全运转的重要手段。

(6) 隔振或减振性能测试。对设计制造出来的隔振或减振装置进行振动模拟试验,通过分析测试结果,研究装置的实际隔振或减振效果。

(7) 机械设备的状态监测和故障诊断。

振动是机械运行过程中的重要信息。运行机械和静止机械的一个重要区别在于运行过程中机械产生了振动。当机械出现异常时,相比于正常状态,其振动量波形和频率成分会发生变化,每一种引发异常振动的故障源都对设备施加不同的激励,因而产生的振动信号具有不同的特点,通过振动参数的变化特征可以判别设备的工作状态。噪声测试则是以噪声、声阻、声发射等为检测目标,通过分析声学信号的变化特征判别工况。

对机械设备某些部件的振动或噪声进行测试,运用信号处理技术,把反映故障的征兆分析诊断出来,及时采取预防和维护措施,可保证机械的正常运转,避免重大事故的发生。

振动测试由于具有在线性和无损性,能及时、准确地反映机器运行状态的变化和故障的起因、发展及程度,因而在状态监测与故障诊断领域得到了广泛应用。应用好这项技术,不仅可以极大地减少不必要的维修费用,延长机器设备运行的时间,增加设备的利用率,而且对提高企业的经济效益和现代化科学管理水平具有十分重要的意义。

1.1.4 振动的利用与抑制

振动是普遍存在的现象,任何一台动力机械、设备在运行过程中,都不可避免地会产生振动。在某些情况下,可以利用振动现象进行工作。比如利用振动原理制成的振动机械可用于输送给料、筛选分类、捣固夯实、清洗、时效、脱水等,这种情况下振动测试的目的在于确定所需要的振动效应。

多数情况下机械设备运转时发生的振动是消极有害的:振动使机械设备疲劳和磨损,使构件发生刚度和强度破坏,缩短机械设备的使用寿命;机械加工机床振动过大,会降低加工精度;工程结构振幅过大会造成应力过大,使结构早期损坏;车辆行驶中振动加速度过大,会影响车辆的平顺性,给乘员带来不适,危及所载货物的安全;飞机机翼的颤振、机轮的摆振和发动机的异常振动,会造成飞行事故;振动的物体会直接向空间辐射噪声,振动在固体中传播时,会再次辐射噪声,将加大噪声的危害和影响……在这些情况下,振动测试应着眼于振动抑制。

振动抑制最彻底的措施是抑制振源。振源是指激发振动的力源或运动源。机械系统的振源包括:

(1) 旋转质量的不平衡。机械设备中旋转部件的质量中心与其回转轴线不重合出现偏心时会产生离心力,离心力对设备构成谐波激振。

(2) 传动系统的缺陷或误差。制造或安装不良的齿轮、丝杆等传动机构会产生周期性的激振力；传动皮带的接缝通过皮带轮或张紧轮时会引起周期性的冲击；链轮等传动装置的工作原理本身就含有传动的不均匀性，也会引起周期性的激振力。结构刚度的各向异性、润滑不良及间隙等原因都将引起受力的变动。

(3) 工作载荷的波动。比如冲床、锻锤一类的设备，由于工作载荷的波动会产生冲击激励，每一次冲击之后会激起自由振动。

(4) 外界环境引起的激励。路面的不平对车辆悬挂系统的激励、海浪对船体的激励、风力对大型建筑的激励等，都属于此类。这类激励多属随机性的。

1.2 高速铁路振动与噪声测试的意义

1. 提高动车组运行的可靠性和安全性

现代动车组是一种技术先进、结构复杂的运输装备，必须具有很高的可靠性。这种可靠性一方面通过设备本身的可靠性来保证，另一方面则由测试系统来监控。振动与噪声测试系统可以迅速地识别和提示运行中发生的故障，从而采取措施及时排除故障，以保证动车组可靠运行，提高列车运营的安全性。

2. 为动车组维修提供重要信息

现代动车组的测试系统不但能够在运行中向司乘人员提供列车的运行状况、故障级别，提出排除故障措施的建议，而且还能将这些情况及时地向维修基地传送，以便在列车进入维修基地以前做好维修计划，准备好需要更换的配件，从而可以极大地缩短维修停时，提高动车组的可用性。

3. 为高速铁路系统的设计和改进提供依据

通过对振动与噪声测试数据进行综合分析，可以对车体、轨道、路基、桥梁等的动力学性能进行评估。在设计过程中，振动与噪声试验用于检验计算方法的可靠性或改进计算方法；在新设备建成后，通过振动与噪声测试可以鉴定其性能，建立动力学模型，为高速铁路系统的设计和改进提供重要依据。

1.3 振动与噪声的危害及容许标准

1.3.1 振动对人体的危害

人体可近似看成弹性体，骨骼近似为一般固体，但比较脆弱；肌肉比较柔软，有一定

弹性。人体的骨骼和肌肉构成许多空腔和诸如心、肝、肺、胃、肠等弹性系统。实验研究表明,人体各部分组织都有其固有频率,例如,人全身固有频率约为 6 Hz,腹腔约为 8 Hz,胸腔为 2~12 Hz,头部为 17~25 Hz。当外界激励振动频率与人体各部分组织的固有频率接近时,会引起人体的共振,使器官受到影响或损害。

人体对振动效应最敏感的部分是胸腹系统,胸腹系统对频率为 3~8 Hz 的振动有明显的共振响应,头、颈、肩部分的共振频率为 20~30 Hz,眼球为 60~90 Hz,下颚头盖骨为 100~200 Hz。30 Hz 以下的低频振动可能引起头晕、手肘和肩关节发生异变,30 Hz 以上的振动可能引起骨关节异变和血管痉挛。

除了振动频率以外,振动的幅度和加速度、振动作用于人体的时间及振动环境中人体姿势等都会影响振动的作用。

当振动频率较高时,对人体起危害作用的主要是振幅,例如,振动频率 40~100 Hz、振幅达到 0.05~1.3 mm 后,对人体全身有害,会引起末梢血管痉挛;当振动频率较低时,对人体起危害作用的主要是振动加速度,例如,频率为 15~20 Hz 的振动,加速度在 0.05 g 以下,对人体不会造成有害影响,随着振动加速度的增大,会引起前庭反应并使内脏、血管产生位移。

时间在 0.1 s 内,人体竖立向上能忍受的加速度为 16 g,向下运动为 10 g,水平运动则为 40 g。如果超出这些数值,将不同程度地造成皮肉青肿、骨折、器官破裂和脑震荡等。人体受振动的时间愈长,危害愈大。振动危害还与人的体姿有关。人在立位时,对垂直振动比较敏感,卧位时对水平振动比较敏感。人的神经组织和骨骼都是振动的良好导体。头部受振动会引起瞌睡。

在交通运输行业,驾驶员和乘务员长时间在振动的环境中工作;在矿山、工厂、水电等行业,有相当数量的工人从事振动作业,在工作中需要紧握强烈振动的工具与设备,如凿岩机、风钻、风铲等风动工具,电钻、链锯等电动工具,砂轮机、抛光机、研磨机等高速转动工具。长期工作在振动环境中,易患振动职业病,其症状一般是手麻、手无力、关节痛、白指、白手,并有头晕、头痛、耳鸣、周身不适等,重症者手指变形、下肢冠状动脉和脑血管扩张,引起阵发性脑晕、半晕厥状态以及丧失劳动能力及生活自理能力(如手捏不紧筷子等)。除此之外,振动还能造成听力损害。当振动频率在 125~250 Hz 时,长时间的振动会导致听力的下降。

1.3.2 噪声对人体的危害

噪声对人体的影响和危害是多方面的,强烈的噪声可造成耳聋,诱发各种疾病,影响人们的休息和工作,干扰语言交流和通信,掩蔽安全信息,造成生产事故,降低生产效率,影响设备的正常工作甚至造成破坏。

1. 噪声性耳聋

噪声对人体的危害最直接的是听力损害。对听觉的影响,是以人耳暴露在噪声环境前后的听觉灵敏度来衡量的,这种变化称为听力损失,即人耳在各频率的听阈升移。例如,当人从较安静的环境进入较强烈的噪声环境中,立即感到刺耳难受,甚至出现头痛和不舒服的感觉,停留一段时间再离开这里后,仍感觉耳鸣,马上(一般在 2 min 内)作听力测试,发现听力在某一频率下降约 20 dB,即听阈提高了 20 dB。如果噪声作用的时间不长,到安静的地方休息一段时间,再进行测试,该频率的听阈减少到零,这种现象叫作暂时听阈偏移,亦称听觉疲劳。听觉疲劳时,听觉器官并未受到器质性损害,但如果人们长期在强烈的噪声环境中工作,日积月累,内耳器官不断受噪声刺激,恢复不到暴露前的听阈,可发生器质性病变,成为永久性听阈偏移,这就是噪声性耳聋。国际标准化组织 1964 年规定,在 500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz 三个倍频程内听阈提高的平均值在 25 dB 以上时即认为听力受到损伤。噪声性耳聋与噪声的强度、频率及噪声的作用时间长短有关。

2. 噪声诱发疾病

强烈的噪声可诱发多种疾病。噪声作用于人的大脑中枢神经系统,可引起头痛、耳鸣、多梦、失眠、记忆力减退,造成全身疲乏无力;噪声作用于内耳腔的前庭,会使人眩晕、恶心、呕吐;噪声对心血管系统危害也很大,噪声使交感神经紧张,从而使心跳加快、心律不齐、血压升高,长期在高噪声环境下工作的人与在一般环境下工作的人相比,高血压、动脉硬化和冠心病的患病率要高 2~3 倍;噪声还会引起消化系统方面的疾病,噪声能使人消化机能减退,胃功能紊乱,消化系统分泌异常,胃酸度降低,以致造成消化不良、食欲不佳、患胃炎及胃溃疡等疾病,致使身体虚弱。

3. 噪声影响生活和工作

理想的睡眠环境是噪声级在 35 dB(A) 以下,高噪声会影响人的睡眠质量。人们通常谈话声音是 60 dB(A) 左右,当噪声在 65 dB(A) 以上时,会干扰人的正常谈话,如果噪声高达 90 dB(A),大喊大叫也很难听清楚。在噪声较高的环境下工作,易使人感觉烦恼、疲劳和不安,注意力分散,容易出现差错,降低工作效率。噪声还能掩蔽安全信号,如报警信号和车辆行驶信号,在噪声的混杂干扰下,人们不易察觉,容易造成工伤事故。

1.3.3 振动与噪声的容许标准

为了抑制振动与噪声的危害,国际国内有关专家经调查研究,编制了振动与噪声执行标准,作为振动与噪声控制的依据。

有关振动对人体或建筑物的影响评估,目前较常为工程界引用的标准分别是德国的

DIN4150、国际标准化组织的 ISO2631 以及美国联邦铁路管理局（FRA）提出的标准。

DIN4150 是根据振动特性，如振源形式、强度、频率分布、作用时间及居民生理和心理健康状况与居家环境等因素，建立的一套较严谨的评估规范，其限值见表 1.1。

表 1.1 DIN4150 最大容许振动限值

	频率（Hz）	区域振幅（inch）		
		住 宅	商 业	工 业
连续 振 动	10 及以下	0.000 5	0.001 0	0.002 2
	10～20	0.000 4	0.000 8	0.001 6
	20～30	0.000 3	0.000 5	0.001 0
	30～40	0.000 2	0.000 4	0.000 6
	40～50	0.000 1	0.000 3	0.000 5
	50～60	0.000 1	0.000 2	0.000 4
	60 以上	0.000 1	0.000 1	0.000 4
冲 击 振 动	频率（Hz）	区域振幅（inch）		
		住 宅	商 业	工 业
	10 及以下	0.001 0	0.002 0	0.004 4
	10～20	0.000 8	0.001 6	0.003 2
	20～30	0.000 6	0.001 0	0.002 0
	30～40	0.000 4	0.000 8	0.001 2
	40～50	0.000 2	0.000 6	0.001 0
	50～60	0.000 2	0.000 4	0.000 8
	60 以上	0.000 2	0.000 2	0.000 8

注：1 inch = 2.54 cm。

国际标准化组织 ISO2631 规定的人体对振动的各种反应评估指标见表 1.2。

表 1.2 ISO2631 建筑物对振动的反应评估指标

振度	振动 状态	最大振动 加速度（cm/s ² ）	受损伤的状况	振级 （dB）
0	无感觉	0.8 以下	人体没有感觉，振动计有记录	55
1	微 振	0.8～2.5	静止的人或对振动特别敏感的人会感觉到	55～65
2	轻 振	2.5～8	大部分人都可以感觉到，门会轻微振动	65～75
3	弱 振	8～25	住宅会轻摇，门会发出振动的声音，电灯会摇晃，水中可以看出振动的情形	75～85

美国联邦铁路管理局（FRA）根据建筑物的使用类型和列车的运营频率，规定了不同类型建筑的振动标准和二次结构噪声标准，如表 1.3 所示。

表 1.3 美国 FRA 不同类型建筑物的振动标准和二次结构噪声标准

受 振 区 域	振动标准 (dB)		噪声标准[dB(A)]	
	频发	非频发	频发	非频发
振动敏感建筑物	65	65	N/A	N/A
居民区或休息区	72	80	35	43
主要是白天使用的建筑物	75	83	40	48

注：1. 频发情况是指每天列车经过的趟数超过 70 次。
2. 非频发情况是指每天列车经过的趟数少于 70 次。
3. 此影响标准只应用于一般建筑物，对振动敏感建筑物和实验室需要进行详细的评估。
4. 振动敏感设备对二次结构噪声不敏感。

美国 FRA 振动评价标准选用的评价量是振动速度级，其计算公式为

$$L_v = 20 \times \lg \left(\frac{v}{v_{ref}} \right)$$

式中 L_v ——振动速度级；
 v ——均方根速度值；
 v_{ref} ——参考速度，美国标准中的参考速度为 2.54×10^{-8} m/s。

我国于 1988 年制定了《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)，如表 1.4 所示。

表 1.4 城市各类区域铅垂向 Z 振级标准值 单位：dB

适用地带范围	昼 间	夜 间
特殊住宅区	65	65
居民、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

评价标准中使用铅垂向 Z 振级，定义如下：

$$VL_z = 20 \lg(a'_{rms} / a_0), \quad a'_{rms} = \sqrt{\sum a_{frms}^2} \cdot 10^{0.1c_f}$$

式中 a_0 ——基准加速度， $a_0 = 10^{-6}$ m/s²；
 a'_{rms} ——修正的加速度有效值 (m/s²)；
 a_{frms} ——频率为 f 的振动加速度有效值；
 c_f ——垂直方向振动加速度的感觉修正值，具体取值见表 1.5。