

vibration



主编◎王 林

振动与振动病防治



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

振动与振动病防治

主 编 王 林

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书共 11 章,介绍了生产场所振动的物理学基础、测量评价方法、对机体健康的影响,振动与其他职业因素的联合作用,振动职业危害的预防和控制措施。作者结合自己的调查研究成果和国内外研究进展,比较系统深入地介绍了振动职业危害(主要是手臂振动病)的流行病学、临床表现、诊断标准、发病机制、研究方法和治疗处理措施等提供了有关手臂振动的国际标准,并附录我国相关的国家法规和职业卫生标准。每章后列有主要的参考文献。

这是一部兼具学术性和实用性的跨学科综合性专著。可作为劳动保护、安全生产、职业病防治、疾病和环境监测以及高等院校、科研机构、医疗保健、厂矿企业等有关专业人员的参考书、工具书,也可为预防医学、环境科学、机械工程等相关专业本科生、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

振动与振动病防治 / 王林主编. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037322-9

I. 振… II. 王… III. 职业病-振动病-防治 IV. R598.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 077318 号

责任编辑:杨小玲 / 责任校对:宣 慧

责任印制:肖 兴 / 封面设计:范璧合

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 8 月第一次印刷 印张:21 1/2 插页:2

字数:498 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《振动与振动病防治》编写人员

主 编 王 林

编著者 (以编写章节先后为序)

刘长春(山东省职业卫生与职业病防治研究院 研究员)

肖建民(吉林省安全科学技术研究院 研究员)

王 林(济宁医学院职业卫生与环境医学研究所 教授)

曾晓立(济宁医学院生命科学实验中心 高级实验师)

马来记(美国国家环境卫生科学研究所神经生物学部 研究员)

张春之(济宁医学院公共卫生学院 教授)

张 凯(济宁医学院法医学与医学检验学院 教授)

张 强(济宁医学院临床学院 教授)

前田節雄(日本近畿大学総合社会学部 教授)

序

物理因素如电离辐射、电磁辐射、噪声、高温、低温、高气压、低气压等所致的疾病防治,一直是职业医学的薄弱环节,明显滞后于其他学科,且对我国国民经济和科技事业发展产生不良影响。有关“振动”及“振动病”的研究与其他物理因素一样,虽然起步较晚,但发展较快,在保障我国相关职业人群的身体健康和疾病防治中发挥了重要作用。在众多从事振动病防治、研究的专家中,王林教授尤其功不可没!

王林教授在20世纪70年代初极端困难的条件下开展了振动与振动病的调查研究,初步摸清了情况,建立了方法,积累了经验,并于1984年编著出版了《振动病》一书。这是我国第一部有关振动病的专著,对于总结当时的研究成果,反映国内外的相关进展,促进我国振动病防治研究和对外交流,起到了积极作用。近40年来,王林教授初衷不改,带领团队一直潜心于振动和振动病的研究,硕果累累,成绩斐然,他们在大量研究工作的基础上,在国内首先提出并确立了“振动性神经病(vibration-induced neuropathy)”这一临床新概念及其诊断指标,突破了“振动性白指”的狭隘研究范畴,通过现场、临床和实验研究,证明“振动性神经病”是振动职业危害一个独立的临床类型,且常早于振动性白指的发生,成为国内该研究领域的一项标志性成果;在振动的测试和评价、振动职业危害的识别、振动病检查方法学等研究中,也获得了有价值的成果。这些研究成果先后获得了1978年全国科学大会重大成果奖和多项国家级、省(部)级科技进步奖、优秀成果奖;受国家卫生技术标准委员会委托,他还负责起草、修订了国家职业卫生标准——“职业性手臂振动病诊断标准(GBZ7—2002)”,由卫生部发布实施。

现在,王林教授在多年研究成果和工作经验的基础上,又邀请长期从事振动危害控制的工学专家和研究职业卫生的医学专家,包括日本、美国同行,共同编著了《振动与振动病防治》一书,并获得国家科学技术学术著作出版基金的资助。该书从振动及其职业损伤的物理学基础入手,深入讨论了工作场所振动的测量与评价、振动对机体健康的影响、振动与其他职业因素的联合作用以及职业性手臂(局部)振动病的流行病学、临床表现、发病机制、治疗措施、处理原则、预防及控制等实际问题,介绍了振动职业危害调查研究的方法学,是一本学科

跨度很大,研究资料丰富,具有很强实用性的学术专著,它不仅是对国内外振动病研究和实践的经验总结,更是对此领域最新进展和发展趋势的概括,满足了新形势下有关振动和振动病防治实际工作和调查研究的迫切需要,是职业医学界值得庆贺的喜事。

于该书即将出版之际,谨祝这部兼顾学术水平和应用价值的科学著作,发行顺利成功,以早日惠及读者,尽快造福大众。

赵金垣

于北京大学第三医院职业病研究中心

2013年1月

前 言

振动作为物质运动的一种形式,广泛存在于自然界,存在于人类的生产、生活、环境以及人体自身之中。可以说,从微观粒子到浩瀚宇宙,振动无处不在。它与人类的生存、生命质量、身心健康有着非常密切的关系。它是生命和健康不可缺少的因素,人们可以利用和开发振动对人体的有利作用,但在一定条件下,又能造成危害。

振动又是一种职业因素,普遍分布在矿山开采、机械制造、土木建筑、交通运输、道路修建、林业采伐、木业生产、航空航天、水下作业、化工制药、医疗保健等许多行业的生产过程和生产环境之中,是劳动者职业活动和职业生活质量的重要因素之一。长期接触超过允许限值的振动,会发生职业危害,甚至引起职业性疾患和职业病。振动病便是振动这种职业有害因素所致的疾病。振动病是一种常见的、多发的职业病,我国和其他许多国家,以及国际劳工组织(ILO)等,早就把本病列入法定职业病名单。可以说,振动病是一种随着工业化的进程出现的、全球性的职业病。随着生产、生活的现代化和科学技术的进步,振动作业也在发生着日新月异的变化,传统的和新兴的工艺导致生产过程的振动危害也在不断出现新情况和新问题。

毋庸置疑,振动接触(暴露)者是非常庞大的人群。有人估计,在各国的职业人群中,约有上亿人。我国未见确切的统计数据,部分行业的估计也以数百万计。如涉及交通运输和生活中驾驶、乘坐等振动的影响,接触振动的人员越来越多。当然,生活中和短时间的振动接触,在多数情况下是不至于造成健康危害的。但在生产条件下的许多振动作业,由于振动的强度较大,接触时间较长,又多同时伴有其他职业有害因素(如噪声、毒物、不良气象条件等),对作业者身心健康的影响和职业性损伤是不容忽视的。

从20世纪70年代初开始,我们在非常困难的条件下一直坚持振动病防治的调查研究工作,率先进行了若干振动作业的现场调查和振动职业危害的流行病学研究,进行了振动病的临床观察和振动危害的特殊检查、实验研究,探讨了评价指标,提出了诊断标准,获得了一系列的有意义的成果。1978年,我们的“振动病防治研究”获得了全国科学大会“重大成果奖”。这对我们是一个极大的鼓舞和鞭策,也奠定了我们在这一领域继续进行探讨和研究的基础。之后,我们参与发起并积极开展了“全国十省市振动病防治协作研究”;相继承担了国家卫生部、机械工业部、省科委等下达的研究课题;参与了国家攻关协作和国际合作科研项目;先后获国家级、省(部)级科研成果6项、厅(市)级科研成果奖20余项,积累了一些振动病防治研究的工作经验和科学资料。

受国家有关部门的委托,我们还主持和参与了多项有关国家标准和国家职业卫生标准的研制、修订工作。也在国内外学术刊物发表了较多的科研论文,参加了一系列国际和全国性学术交流。

该书共分11章,主要介绍了振动及其损伤的物理学基础,全身振动和局部(手传)振动对人体健康的影响,振动与其他职业因素对机体影响的联合作用,振动病的流行病学、临床表现、发病机制、治疗和处理方法,工作场所振动的测量和评价,振动病防治研究的医学检查方法,振动职业危害的预防和控制措施及有关国际标准等;附录有我国职业病防治法和有关

职业卫生标准。每章后列有主要的参考文献。

在编写过程中,我们希望努力做到:从实际出发,立足国情,为控制我国振动职业危害服务,同时又尽可能地反映国外的最新进展;按照科学性、先进性、实用性的要求,使本书成为一部跨学科、综合性、理论探讨与实际应用相结合的专著,使其作为劳动保护、安全生产、卫生防疫、职业病防治、疾病和环境监测,以及高等院校、科研机构、医疗保健、厂矿企业等有关专业人员和预防医学、环境科学、机械工程等有关专业本科生、研究生的一部参考书、工具书。

我们不应该忘记,在我国早期振动病的调查研究和防治工作中做出贡献的前辈、专家、学者。例如,董起嵘主任医师、周德林教授、陈力教授、丁道芳教授、姚安子研究员、魏祥林研究员、张寿林研究员、赵笏工程师、乔玲研究员、许真主任医师、丁宏启所长、钟振鸿主任医师、林瑞存主任医师、马永魁主任医师等,以及其他努力工作在第一线的同行们,正是由于他们的出色工作,才得以不断开拓我国这一领域研究,取得新进展。我们的研究工作也得到了他们中许多人的帮助和支持,他们的部分研究成果和实践经验也被引用在本书的内容之中。在此,对他们表示衷心的感谢!

这里还要提到,在我们长期的研究工作中,得到吴执中教授、何凤生院士、顾学萁教授、刘世杰教授等前辈的支持、指导,我们深深地怀念他们;还曾先后得到日本名古屋大学山田信也教授、熊本大学二塚信教授,加拿大 Brramer AJ 教授、英国 Tayler W 教授以及日本劳动科学研究所、瑞典职业生命研究所(Institute for Working Life)、美国国家职业安全与卫生研究所(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)的学术支持和研究协作;特别是本人早年作为公派高级访问学者,在日本研究振动病期间得到了日本同行的许多帮助,开展了愉快的合作,在此也要表示我诚恳的谢意。

在本书的编写和出版过程中,得到济宁医学院院长、博士生导师白波教授和中华医学会儿行为医学专业委员会主任委员、《中华行为医学与脑科学杂志》总编辑杨志寅教授的关心和支持,得到各作者所在单位领导的重视和同事的帮助,得到北京大学公共卫生学院王生教授、何丽华教授,复旦大学公共卫生学院金锡鹏教授、夏昭林教授,泰山医学院张一鸣教授等同行专家的热情支持,特别是北京大学第三医院职业病研究中心、全国职业病诊断鉴定技术指导委员会副主任委员赵金垣教授,在百忙中为本书撰写序言,支持、鼓励之词,让我深受感动。在此一并致以诚挚的谢意!另外,济宁医学院曾晓立高级实验师除撰写部分书稿外,还协助制作部分图表,对她的辛勤劳动,我们也心存感激。

应该特别指出的是,在本书草成以后,由于种种原因,未能及时出版。现在,经过同行专家的推荐、评审,我们非常荣幸地得到了 2012 年度国家科学技术学术著作出版基金的资助,得到科学出版社医药卫生出版分社领导、编辑的支持。正是由于国家的这种政策和措施,本书才得以与读者见面。这深深地感动和激励着我们,促使我们在初稿的基础上进行补充、修订。本书的出版发行,如能对读者有所启示,对振动病防治研究、振动危害控制有所参考,对振动作业人群的劳动保护和医疗保健工作有所借鉴,就是我们最大的欣慰,也是我们对上述所有支持和帮助的最好回报!但是,我们深知,由于自己的水平、能力所限,书中的不足和不妥之处在所难免,还望海内外的专家、学者不吝赐教,望广大读者批评指正。

王 林

2013 年 1 月于济宁医学院

目 录

第一章 振动及其职业损伤的物理学基础	(1)
第一节 振动的定义和分类	(1)
第二节 振动的物理参量及其相互关系	(5)
第三节 振动频谱及其分析	(8)
第四节 固有频率和共振	(10)
第五节 振动物理参量与生物学效应的关系	(11)
第六节 影响人体健康的两种主要振动形式	(13)
第七节 振动对建筑物的影响	(24)
第二章 工作场所振动的测量与评价	(28)
第一节 工作场所中机械振动(冲击)常用术语	(28)
第二节 工作场所的机械振动(冲击)产生的原因及分类	(33)
第三节 工作场所接触手传振动的机械及作业	(36)
第四节 工作场所接触全身振动的机器设备及作业	(39)
第五节 手传振动的测量与评价	(40)
第六节 全身振动的测量与评价	(55)
第三章 振动对机体健康的影响	(68)
第一节 振动在人体组织的传播	(68)
第二节 人体对振动的主观感觉	(71)
第三节 局部振动对人体健康的影响	(73)
第四节 全身振动对人体健康的影响	(95)
第四章 振动与其他职业因素对人体健康影响的联合作用	(102)
第一节 振动与寒冷的联合作用	(102)
第二节 振动与噪声的联合作用	(107)
第三节 振动与化学因素的联合作用	(111)
第四节 振动与高温、体力劳动的联合作用	(114)
第五节 振动与工效学因素的联合作用	(115)
第五章 振动病的职业流行病学	(122)
第一节 振动病的研究简史和名称演变	(122)
第二节 手臂振动病危险因素的主要作业	(125)
第三节 职业性手臂振动病的工种和地区分布	(128)
第四节 关于素质性白指	(136)
第五节 手传振动职业危害的剂量-反应关系	(138)
第六节 影响职业性手臂振动病发生和流行的因素	(143)
第七节 手臂振动职业危害的流行病学调查	(151)

第八节 手臂振动职业危害流行病学研究动向之管见	(156)
第六章 手臂振动病的临床表现	(163)
第一节 手臂振动病的症状、体征	(163)
第二节 临床检查所见	(171)
第三节 几种定量检查方法的敏感性和特异性	(191)
第七章 手臂振动病的诊断标准和发病机制	(195)
第一节 手臂振动病的诊断原则	(195)
第二节 我国手臂(局部)振动病诊断标准	(196)
第三节 国外的诊断标准和诊断分级	(203)
第四节 手臂振动病的鉴别诊断	(208)
第五节 病理变化与发病机制	(210)
第八章 几种检查方法在振动职业危害防治研究中的应用	(220)
第一节 外周循环功能障碍的检查	(220)
第二节 神经功能障碍的检查	(239)
第三节 骨关节和运动功能障碍的检查	(265)
第九章 振动病的治疗措施和处理原则	(269)
第一节 振动病治疗和处理的指导方针	(269)
第二节 振动病的治疗措施	(270)
第三节 对手臂振动病患者日常生活的指导和劝告	(276)
第四节 手臂振动病的预后评估	(280)
第十章 工作场所振动危害的预防及控制	(284)
第一节 工作场所振动危害控制的一般原则	(284)
第二节 手传振动危害的预防及控制	(285)
第三节 全身振动危害的预防及控制	(297)
第十一章 关于手臂振动的国际标准(英文)	(304)
附录一 中华人民共和国职业病防治法	(319)
附录二 中华人民共和国职业卫生标准:职业性手臂振动病诊断标准 GBZ7—2002	(330)

微波以及可见光都是振动着的磁场和电场。所以无线电的调谐电路和引进了微波能量的封闭金属腔也能发生电磁形式的振动。因此,这两种振动是类似的,即力学的和电磁学的振动都是由相同的基本的数学方程来描述。

二、振动的分类

振动可大致分为两大类,即定形的振动和无规则的振动,在这两类下面又可具体分类。详见图 1-1。

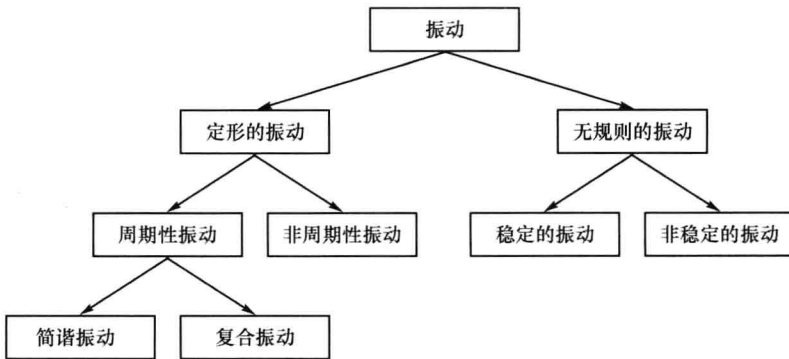


图 1-1 振动的分类

(一) 周期性振动

任何在相等时间间隔内重复自身的运动都叫做周期性运动,也就是作周期运动的质点在同一路线上来回往复运动。

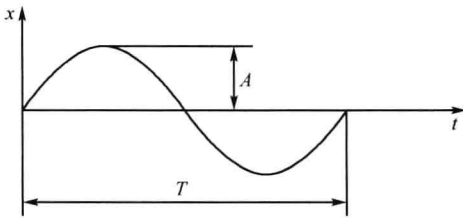


图 1-2 正弦振动

周期性振动又分为简谐振动(正弦波振动)和复合振动。

1. 简谐振动

在周期运动中,质点的位移总可用正弦函数和余弦函数来表示。因为“谐”这个词可被用在含有这些函数的表示式,所以周期运动常称谐运动。谐运动(振动)是指围绕一个平衡位置或参考位置作来回运动(振动),如图 1-2 和图 1-3 所示。

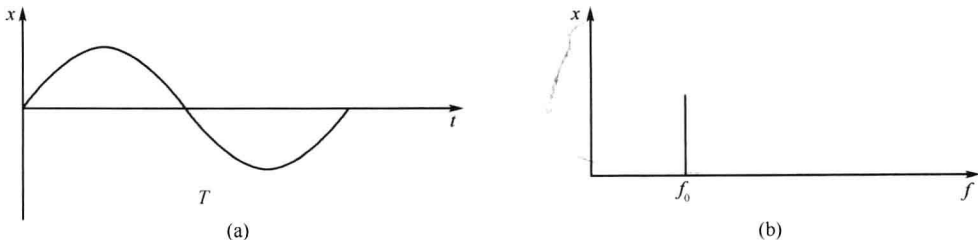


图 1-3 正弦波(a)及正弦波频谱(b)

2. 复合振动

国际标准化组织(ISO)所规定的手臂振动 1/3 倍频程中心频率覆盖范围为 6.3 ~ 1250Hz(ISO2001),而实际振动作业场所的振动频率范围更为宽阔,上限频率可达 5000Hz,甚至 10 000Hz,所以振动能量的总值是各频率值合成而成。根据傅立叶数学分析,任何周期函数可以分解为若干正弦波作用的总和(或称为复合波),可表示如下式

$$f(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega t) + a_2 \sin(2\omega t) + \cdots + a_n \sin(n\omega t) + b_1 \cos(\omega_1 t) + b_2 \cos(\omega_2 t) + \cdots + b_n \cos(\omega_n t) \quad \text{公式(1-1)}$$

式中 a_1 到 a_n 和 b_1 到 b_n 规定了在所给的频谱中相对应的振动频率 ω_1 到 ω_n 中的幅值,和正弦项或余弦项相结合给出了相关频率范围和相应相位的实际振动成分。傅立叶频谱给出的频率都是有能量存在的频率。可由图 1-4 与图 1-5 表示。

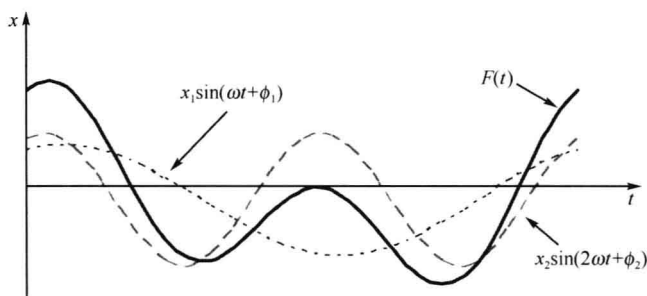


图 1-4 复合波的分解

(二) 非周期性振动

1. 冲击

这种振动常发生在碰撞的一瞬间,例如飞机着陆、汽车刹车、冲床和落锤工作时往往都是突然的冲击而引起的瞬间振动。利用前面提到的傅立叶分析式也可以描述冲击谱,如图 1-6 所示。

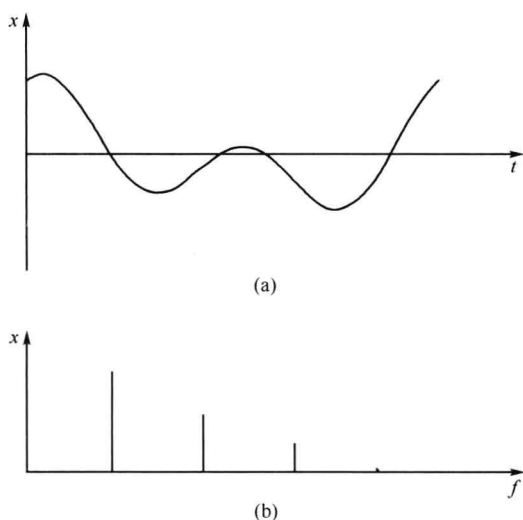


图 1-5 复合波(a)及复合波频谱(b)

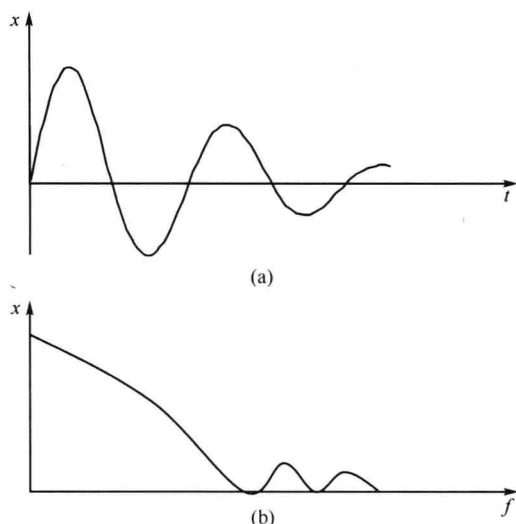


图 1-6 冲击波(a)及冲击波频谱(b)

2. 稳定的无规则运动

它是所有频率轴上的正弦波连续分布组成的,理论上需要作无限长时间的测量,这当然是不可能的。其振幅和相角以无法预知的方式随时变化。但是知道此值存在于某一些值范围内的概率,见图 1-7。

3. 非稳定的无规则振动

这类振动发生在火箭、导弹、宇航中,拖拉机座椅也属于此类振动。可以把振动数据取几段平稳的加以处理,即当成稳定的无规则振动加以处理,如图 1-8 所示。

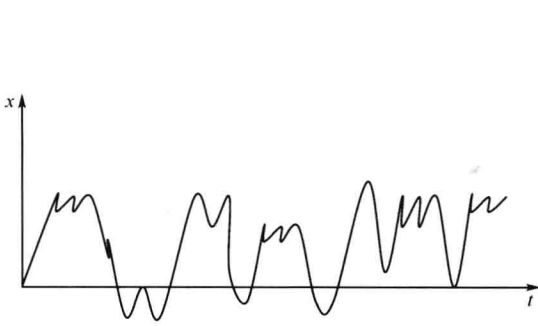


图 1-7 稳定无规则运动

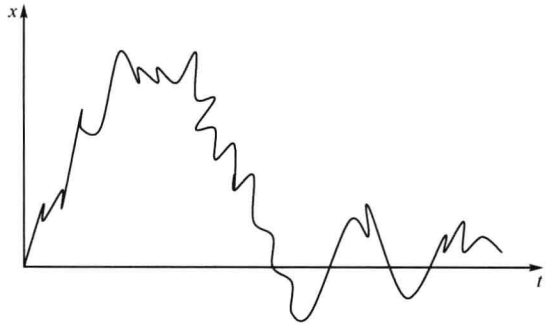


图 1-8 非稳定的随机振动

三、生产性振动的来源

(一) 振动产生的原因

在生产过程中,产生振动的原因,主要有:①平衡物体的转动;②旋转物体的扭转和弯曲;③活塞运动;④物体的冲击;⑤物体的摩擦。

(二) 工农业生产中的振动作业

工农业生产中最常见的振动作业,有以下几类:①使用风动工具,如铆钉机、捣固机、凿岩机、除锈机、风铲、风锤、风钻等;②使用电动工具,如电锯、电锤、电钻、电捣固机等;③接触高速旋转的机械,如砂轮机、钻孔机、抛光机等;④驾驶和乘用车辆(蒸汽、内燃、电力、燃气轮)、船舶、汽车、飞机等,还有农业用的拖拉机、联合收割机、脱粒机、摩托车、汽艇等。

当前,对人体健康影响较大、研究较多,也是可引起职业性手臂振动病的振动作业,是长时间使用振动性工具的作业。

表 1-1 介绍几种常用的振动性工具的振动物理参数,这些风动工具以及电锯等产生的振动是造成手臂振动病的主体物理因素。尽管这些风动工具已有变化,与当前出产的风动工具、型号可能有些不同,但在振动参数和对人体的影响方面仍有一定参考价值。

表 1-1 几种常用风动工具的物理参数

机械名称	频率/Hz	振幅/mm	噪声/dB(A)
除锈机	37 ~ 54	0.5 ~ 3.1	94 ~ 108
C-3 型风铲	30 ~ 45	0.25 ~ 2.1	104 ~ 110
风锤	24 ~ 34	0.43 ~ 2.5	84 ~ 114
铆钉机	19 ~ 27	0.13 ~ 1.63	110 ~ 124
电动凿岩机(6A-100M)	28 ~ 29	0.05 ~ 2.0	122
仰式凿岩机(01-43)	25	0.25 ~ 6.0	114.5
水平凿岩机(OM-506)	23 ~ 24	0.25 ~ 4.5	114

第二节 振动的物理参量及其相互关系

振动的基本参量有四个:位移、频率、速度和加速度,它们彼此相互关联。对单一频率的振动来讲,知道这四个参量中的两个,便可推算出另外两个。

一、位 移

当振动为简谐振动时,位移(X)的表达式为

$$X(t) = X \sin(\omega t) \quad \text{公式(1-2)}$$

式中 X 为位移的峰值(振动质点离开平衡位置最大的距离),单位为米(m)。 ω 为角频率(也称圆频率,指单位时间内运动的角度),单位为弧度/秒。 t 为时间,单位为秒(s)。

角频率也可表达为

$$\omega = 2\pi f \quad \text{或} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{公式(1-3)}$$

式中 π (常数) = 3.1416, f 为频率(周/s 或 Hz)。

二、频 率

频率(f)代表每秒完成振动的周数。例如,一个物体以每秒 10 周在振动,它的频率为 10 周/s 或 10Hz。振动周期为

$$t = \frac{1}{f} \quad \text{公式(1-4)}$$

式中 t 单位为秒,周期代表振动物体(质点)完成一个完全振动(来回一次)所需要的时间。

三、速 度

对位移进行一次微分便得到速度 $V(t)$:

$$V(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \omega x \cos(\omega t) \quad \text{公式(1-5)}$$

式中 ωx 是峰值速度或最大速度 (m/s), 速度也可以写为

$$V(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \omega x \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad \text{公式(1-6)}$$

从式(1-6)可以看出速度相位超前位移 90° 。

四、加 速 度

加速度(a)是对位移两次求导的结果。

$$a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = \frac{dv(t)}{dt} = -\omega^2 x \sin(\omega t) \quad \text{公式(1-7)}$$

式中 $\omega^2 x$ 为峰值加速度或最大加速度 (m/s²)。加速度也可以表示为

$$a(t) = \omega^2 x \sin(\omega t + \pi) \quad \text{公式(1-8)}$$

从公式(1-8)可以看出加速度在相位上超前速度 90° , 超前位移 180° , 见图 1-9。

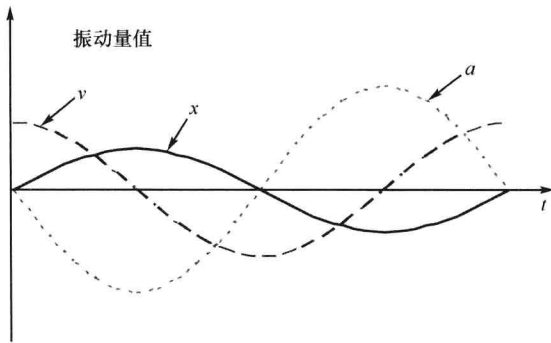


图 1-9 振动量值 x, v, a 的相位关系

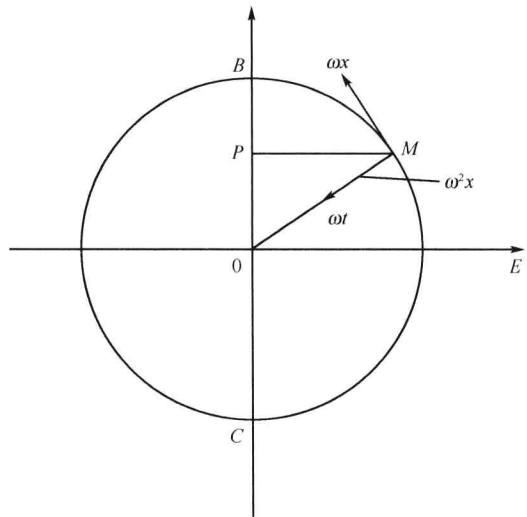


图 1-10 质点谐振动参考图

为了更直观地理解上述三个参量的函数表达式[公式(2)、(6)、(8)]以及振动过程和实质,现就图 1-10 所示质点谐振动参考图来进行详细描述。设有质点 M 以角速度 ω 在半径为 x 的圆周上运动,那么它在直径 BC 上的投影 P 点就在 BC 上来回运动。设 $t=0$ 时, M 点在横轴 OE 上,经过时间 t 后 M 点到达 M 处,半径 OM 和 OE 之间夹角为 ωt ,这时投影 P 点离开圆心的位移是

$$X(t) = X \sin(\omega t)$$

因为 M 点的角速度是 ω ,半径是 x ,所以它的加速度为 $\omega^2 x$ 指向圆心。P 点即是在 BC 上的投影。可知 P 为速度 v 和加速度 a 对 M 点的速度和加速度在 BC 上的分量,即

$$v = \omega x \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a = \omega^2 x \sin(\omega t + \pi)$$

从公式(1-8)可以看出一个简单的公式计算振幅、加速度和频率:

$$x(\text{半幅}) = 250 \frac{a(g)}{f^2} (m) \quad \text{公式(1-9)}$$

上式是振幅 x (位移, m)、加速度 $a(g)$ (m/s^2) 和频率 f (Hz) 三者之间的关系。

五、位移、频率、速度和加速度之间相互关系

位移(振幅)、频率、速度、加速度 4 个物理量, 可以进行峰值换算, 知道其中两个, 即可求另外两个, 其换算关系见表 1-2。

表 1-2 位移(振幅)、频率、速度和加速度峰值换算

给定量	频率 f/Hz	位移 x/m	速度 $v/(m/s)$	加速度 $a/m/s^2$
$f \cdot x$			$2\pi f x$	$4\pi^2 f^2 x$
$f \cdot v$		$\frac{v}{2\pi f}$		$2\pi f v$
$f \cdot a$		$\frac{a}{4\pi^2 f^2}$	$\frac{a}{2\pi f}$	
$x \cdot v$	$\frac{v}{2\pi x}$			$\frac{v^2}{x}$
$x \cdot a$	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{x}}$		$\sqrt{a \cdot x}$	
$v \cdot a$	$\frac{a}{2\pi v}$	$\frac{v^2}{a}$		

注:①表中 x 、 v 、 a 所表示的均为峰值;②频率 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 或 $\omega = 2\pi f$ (弧度/s);③当加速度采用重力加速度 g 为单位时, 应按照 $g = 9.81 m/s^2$ 进行换算。

峰值是直接出现在振动方程中的, 如果被测物体是做简谐振动, 只要测出它的峰值 x 和频率 f , 物体的振动规律也就定下来了。所以在振动测量中峰值是十分有用的指示值。如果振动不是简谐振动, x 峰值只能说明周期振动的最大幅值(位移), 也就是振幅。

这 4 个物理量的实际意义可以概括如下:①位移在研究强度和变形时重要, 因为它直接与机械变形有关。在对人体的影响上, 位移常常看做是强度的指标。②加速度与作用力和载荷成正比, 在研究机械疲劳、冲击等问题上很重要。对人体也是一个重要冲击量。③速度决定了噪声大小及人体对机械振动的敏感程度。④频率则是寻找根源、分析振动的主要依据, 人体各部对不同频率有其不同的敏感性。

六、振动峰值、平均值和均方根值的概念

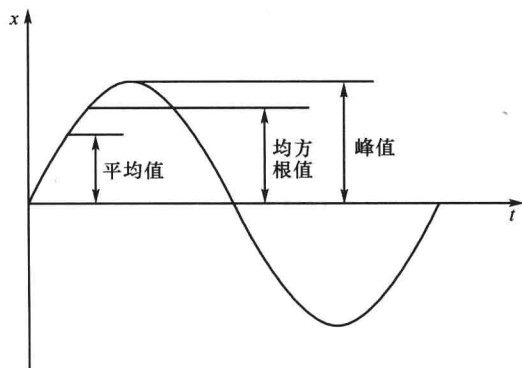


图 1-11 峰值、平均值和均方根值

振动峰值、平均值和均方根值:图 1-11 中可见峰值(最高)平均值(1/2)和均方根值(root mean square),其中均方根值可用下式表示

$$x(\text{均方根值}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad \text{公式(1-10)}$$

均方根值又称有效值。

$$\begin{aligned} x(\text{均方根值}) &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} x_{\text{平均值}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{峰值} \\ &= 0.707 \text{峰值} \quad \text{公式(1-11)} \end{aligned}$$

七、振动加速度级

近年来许多国家甚至国际标准都用振动加速度级来表示公害振动的程度,振动加速度级的表示式是

$$VAL = 20 \log \frac{a_{\text{有效}}}{a_0} \text{dB} \quad \text{公式(1-12)}$$

式中: $a_{\text{有效}}$ ——振动加速度的有效值(m/s^2)。

a_0 ——振动加速度的基准值(在 5Hz 条件下, 10^{-6}m/s^2)。

采用这个基准值,预计使人感到不快的振动大体在 60 ~ 70dB,对人体有害的振动大体在 80 ~ 90dB。

第三节 振动频谱及其分析

一、振动频谱的概念

振动的频谱是在特定情况下振动对频率的“指纹图谱”。振动频谱常常用计算机分析来获得。它的图形一般表示如下:

- (1) 水平轴表示频率(Hz)。
- (2) 垂直轴表示下列各项之一,加速度(m/s^2)、速度(m/s)、位移(m 、 cm 或 mm),或能量(J)。
- (3) 频谱垂直线的总和表示所测的频率范围内的频率数。
- (4) 每条垂直线的高度表示特定的项目的幅值。