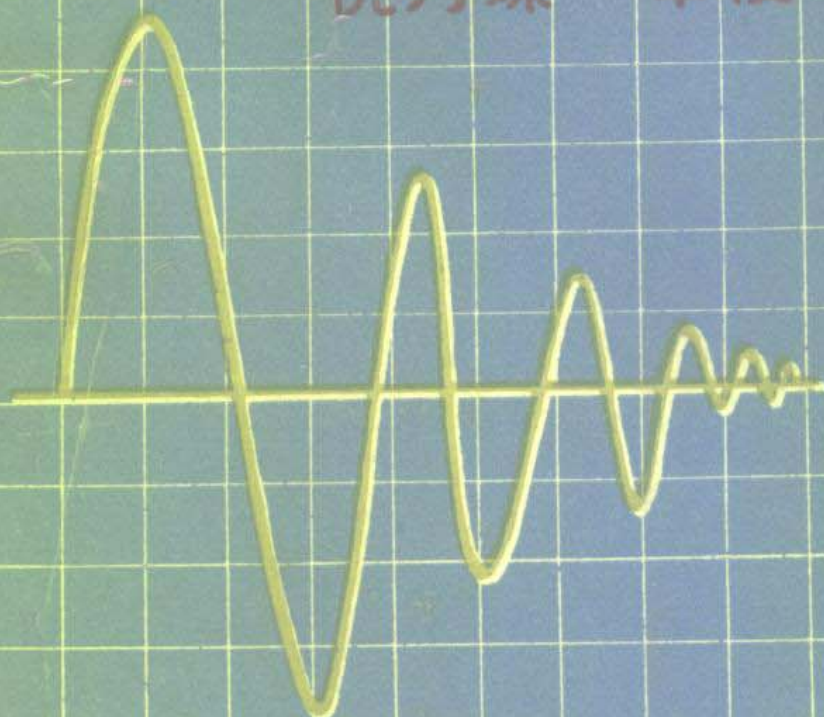


机械振动 和冲击测量

[丹] J.T. 勃劳希 教授 著

沈小白 石 沅 吴月明 译

倪乃琛 审校



同济大学出版社

机械振动和冲击测量

[丹] J. T. 勃劳希 著

沈小白 石 沅 吴月明 译

倪乃琛 审校

同济大学出版社

(沪)新登字204号

内 容 简 介

本书是 B&K 公司出版的物理测量和分析基础丛书中主要的一本,也是关于机械振动和冲击测量的一本颇有价值的参考书。

全书共分十二章:第一章是导论;第二章扼要复习了振动和冲击的特性;第三章介绍了机械系统对振动和冲击的响应;第四章讨论了振动和冲击对机械系统的影响,特别是对于疲劳作了较详细的讨论;第五章介绍了当前人们感兴趣的课题——振动和冲击对人体的影响;第六章详细地介绍了振动测量的仪器和测量技术;第七章是振动和冲击的频率分析技术的详细介绍;第八章讨论了机器正常状况的监测;第九章介绍了声发射;第十章题为振动和冲击试验,讨论了电动激振器的工作原理及其各种应用;第十一、十二章主要是关于隔振、减振的方法介绍,涉及旋转机器的平衡、隔振、动态吸收器及阻尼等问题的讨论。

本书可供高等学校有关专业师生和科技人员阅读参考。

责任编辑 顾敏健

封面设计 褚志浩

机械振动和冲击测量

沈小白、石沅、吴月明译

倪乃琛 审校

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

青浦任屯印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/13 印张: 15.75 字数: 400 千字

1993 年 8 月第 1 版 1993 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 16.50 元

ISBN7-5608-0336-0/TH·23

译者序

B & K 公司的振动及冲击测量设备, 长期以来在我国科研、生产等部门得到较为广泛的应用。如何更好地开发及使用这些测试、分析设备, 显然, 参阅有关的技术资料是必须的。也是最有帮助的, 这里, B & K 公司出版的《机械振动和冲击测量》一书为此提供了可能。继 1972 年 5 月之后, 该公司于 1984 年又修改、再版了这本书。

新版本中部分内容是在原有基础上修改而成, 但很大部分内容则系重新编写和新增加的。其中二、三、四、五章均与原版接近, 但分别在各章中增加了数字频率分析、非线性系统、有限元技术及统计能量分析等内容。由于近年来设备的更新与改进, 第六章关于仪器的选择是全新的。第七章关于冲击和振动频率分析, 分别以当前使用的数字式序列分析、实时分析替代了模拟式分析。机器的正常状况监测、声发射技术、冲击和振动控制技术等均属无损性监测技术, 在实用中具有较高的价值和效益, 本书第八、九、十二章分别对其进行了叙述。第十、十一章介绍了结构动力特性的测量方法及应用范围, 这在振动测量中也属较为实用的部分。书末附有英汉名词对照表, 并注明了该词所在的页数。

本书由沈小白副教授(译第一、二、三、四、五、十一章)、石沅副教授(译第六、七、八章)、吴月明副研究员(译九、十、十二章)合译。封面姓名顺序以翻译内容先后为序。

在整个翻译和出版过程中, 对倪乃琛教授热情、耐心的指导和帮助, 由衷致谢! 对 B & K 公司驻华首席代表施乃平先生的支持和帮助也在此一并由衷致谢!

1992 年 9 月 10 日

教师节 于同济大学

序

《机械振动和冲击测量》这本书长期以来是 Brüel & Kjær 公司出版的物理测量和分析基础丛书中的主要支柱。自从1972年5月 Jens Trampe Broch 教授最后修改该书以来,尽管基本理论仍然有效,但其他内容已有了极大的发展,因而在1979年作者决定将该书进行全面更新。其中部分系修改后的材料,部分则增加了新的有关章节;并决定尽可能地接近 Broch 教授的原著,而且 Broch 本人也赞同这种修改。即便如此,说明现在在这本书中多少内容系取自原著,多少内容则完全是新的,可能是必要的。

第二章由 Bob Randall 修改,并且同原著十分接近。数字频率分析是最近几年中迅速发展起来的一个领域,书中已增添了一些内容。

第三章由 Joëlle Courrech 修改,而且也同原著很接近。非线性系统的讨论已有某种扩展,除了由 Broch 教授给出的连续结构振动的精确处理外,对近年来已经增强了其重要性的两种近似方法——有限元技术和统计能量分析——也作了概要的介绍。

原来的第四章被分为两个部分,且均由 John Hassall 进行修改。第四章包括原先考虑的振动和冲击对于机械系统影响的部分,而第五章则讨论了振动和冲击对于人(人体振动)的影响这个截然不同的课题。这两章都包括了两个领域中的某些新的发展。例如第四章中的平均应力效应和声疲劳,以及第五章中的关于手-臂振动的比较详细的资料,但其他的内容则仍以原书为基础。

第六章关于仪器的选择完全是新的,由 David Redfern 撰写。不仅原书所叙述的仪器中极少还有用,而且设备的可用范围也有了很大的扩展。实践性题目的基本讨论,例如加速度计的安装方法,以及电荷-电压前置放大器系根据原书修改的。

第七章关于冲击和振动的频率分析是完全新的,由 Bob Randall 撰写。重点主要放在当前被认为最有关联的两个课题上:一个是对用电池供电的便携式设备进行模拟序列分析;另一个是数字实时分析,它现在已替代了实验室中的模拟分析。

第八章是新增加的,它讨论了一个迅速发展的振动测量和分析应用领域,即机器正常状况的监测。它由 Hans Hørsk-Møller 撰写。文章给出了如何从运转中机器的系统性介绍以及(或者)通过其振动的永久性评估中得到最佳经济效益的指导。

第九章中所论述的声发射,就经典意义上讲并不是机械的振动。之所以被收录在这里,是因为它同第八章有联系。它代表了另一种非破坏性试验技术,虽然在静应力状态下的研究中,它的用途要更为广泛,例如在压力容器方面,而非旋转的机器。Torben Licht, Hans Jørgen Rindorf 和 David Redfern 对本章均作出了贡献。

第十章和第十一章包括了原书中曾经讨论过的课题,但在前后安排上有所变动。这两章由 Jonathan Wort 和 Philip Hollingbery 改写。第十章讨论利用电动激振器对物理结构施加振动和冲击信号所进行的耐久性试验及其动力特性的测量。它基本上包括了原书中关于振动和冲击试验的 §7-3 和 §7-4 以及 §8-1 关于机械阻抗和导纳的同一个主题。第十一章介绍了用于振动控制的方法——平衡,它是根据原书 §4-2 和 §7-5 的材料进行修改的,但包括了现场平衡和特殊用途平衡机器这两个方面的讨论。

第十二章讨论了冲击和振动控制的其他方法,即原书中的 §7-1 和 §7-2 的隔振和阻尼,它是由 John Hassall 修改的,并且非常接近原书。

最后,涉及到主要内容的一些附录是由 Bob Randall 或 Joëlle Courrech 修改的。附录 E 关于电子积分已被发展到包括脉冲以及连续信号的积分。原来的附录 F 和 G 被删去,因为首先(关于最低可测振动级的)这种信息可从现有的更宽范围的设备所得到的数据中找到(如果图 6.5 还不足以包括的话);其次,(关于脉冲的频率分析)该题目已被列入第七章,并在 B & K 出版的《频率分析》一书中有更为详细的介绍。

或许值得一提的是互相关、互谱密度和相干这些主题(原书的 § 8-2) 未被列入,因为在 B&K 的《频率分析》一书中,已进行了详细的讨论。同样,动应变这个主题也未被涉及,因为在 B&K 的《应变测量》一书中包括了该题目。

R·B·Randall

目 录

第一章 导论	1
§ 1-1 一般参考书目.....	3
第二章 振动和冲击的特性	5
§ 2-1 周期振动.....	5
§ 2-2 平稳随机振动.....	9
§ 2-3 瞬态现象和冲击	13
§ 2-4 非平稳随机振动	15
§ 2-5 参考文献	16
第三章 机械系统对振动和冲击的响应	18
§ 3-1 线性机械系统对振动的响应 共振.....	18
§ 3-2 非线性系统的某些响应特性	22
§ 3-3 旋转振动和扭转振动	25
§ 3-4 机械系统对平稳随机振动的响应	27
§ 3-5 冲击响应和冲击谱	28
§ 3-6 结构中的振动 机械波	30
§ 3-7 利用有限元技术分析冲击和振动	33
§ 3-8 统计能量分析	35
§ 3-9 参考文献	35
第四章 振动和冲击对机械系统的影响	38
§ 4-1 振动的破坏效应 机械疲劳	38
§ 4-1-1 平均应力效应	41
§ 4-1-2 声疲劳.....	42
§ 4-2 冲击和瞬态的破坏效应	44
§ 4-3 参考文献	44
第五章 振动和冲击对人的影响	46
§ 5-1 整体振动	46
§ 5-2 手-臂振动.....	50
§ 5-3 参考文献	52
第六章 振动测量仪器和测量技术	54
§ 6-1 一般测量的考虑	54
§ 6-2 加速度计的选择	55
§ 6-2-1 环境条件	60
§ 6-3 加速度计前置放大器的选择	63
§ 6-4 校准和系统性能检验	65
§ 6-5 力和阻抗传感器	68
§ 6-6 安装加速度计时的实际考虑	69
§ 6-7 携带式电池供电的仪器	74
§ 6-7-1 通用的振动计.....	74

§6-7-2 声级计用作振动计	76
§6-7-3 在测振工作中的磁带记录仪	79
§6-7-4 用频闪作运动分析	81
§6-7-5 波形研究	81
§6-7-6 机械碰撞和冲击的监测	84
§6-7-7 便携式电平记录仪	85
§6-8 适用于实验室的交流供电的仪器	85
§6-8-1 测量放大器	85
§6-8-2 分离式滤波器	86
§6-8-3 频率分析仪	87
§6-8-4 实时分析仪	89
§6-8-5 数字化数据记录	91
§6-8-6 图示记录仪(交流供电)	91
§6-9 总结	92
§6-10 参考文献	93
第七章 振动和冲击的频率分析	94
§7-1 前言	94
§7-1-1 滤波器、检波器和记录仪的响应特性	94
§7-1-2 数字滤波器	93
§7-1-3 FFT 分析	96
§7-1-4 带宽、频率标度和幅值标度的选择	99
§7-2 平稳信号的序列分析	101
§7-2-1 平均时间的选择	102
§7-2-2 分析速度的选择	102
§7-3 平稳和瞬态信号的实时分析	104
§7-3-1 平稳信号的 FFT 分析	104
§7-3-2 平稳信号的数字滤波器分析	108
§7-3-3 用FFT和数字滤波器技术进行脉冲分析	111
§7-4 非平稳信号的分析	114
§7-4-1 分析参量的选择	115
§7-4-2 实例	116
§7-5 参考文献	117
第八章 用于监视机器正常状况的振动测量	118
§8-1 基本考虑	118
§8-2 力-振动的关系	118
§8-3 频率范围、动态范围和参量	120
§8-4 在维修中利用振动测量	122
§8-4-1 维修系统	122
§8-4-2 维修人员	123
§8-4-3 用于按状况维修的仪器	123
§8-4-4 永久性监测	124
§8-4-5 成本效果	126
§8-5 参考文献	126
第九章 声发射	128
§9-1 前言	128
§9-2 定义	128

§ 9-3 声发射源	128
§ 9-4 传播	129
§ 9-5 声发射传感器的原理和校准	130
§ 9-6 信号放大	132
§ 9-7 数据分析和表示	133
§ 9-8 声发射源的定位	135
§ 9-9 应用领域	135
§ 9-9-1 优点和局限性	136
§ 9-10 应用实例	137
§ 9-10-1 黄铜试件的拉伸试验	137
§ 9-10-2 碳纤维织带的拉伸试验	138
§ 9-10-3 压力容器试验	139
§ 9-10-4 压力容器上声发射源的定位	140
§ 9-10-5 利用两个测量通道的声发射源定位	141
§ 9-11 参考文献	143
第十章 振动和冲击试验	145
§ 10-1 振动试验	145
§ 10-1-1 激振器	146
§ 10-1-2 电动激振器的特性	146
§ 10-1-3 谐振对振动信号的影响	148
§ 10-1-4 正弦激振	149
§ 10-1-5 随机振动试验	152
§ 10-1-6 力试验和结构响应	154
§ 10-2 冲击试验	157
§ 10-2-1 实验室试验	157
§ 10-2-2 检修试验	161
§ 10-3 参考文献	162
第十一章 旋转机器的平衡	166
§ 11-1 前言	166
§ 11-2 刚性转子的不平衡	166
§ 11-3 转子支承系统	167
§ 11-4 建立标准	169
§ 11-5 平衡机	172
§ 11-6 现场平衡	173
§ 11-7 困难的平衡作业	178
§ 11-7-1 精确平衡	178
§ 11-7-2 柔性转子	179
§ 11-7-3 曲轴平衡	180
§ 11-7-4 多跨轴	180
§ 11-8 参考文献	181
第十二章 冲击和振动控制的基本原理	181
§ 12-1 振动和冲击的隔离	181
§ 12-1-1 振动的隔离	181
§ 12-1-2 冲击的隔离	189
§ 12-2 动态振动控制和振动阻尼	194

§12-2-1 动态振动吸收器.....	195
§12-2-2 阻尼处理的应用.....	199
§ 12-3 参考文献	203
附 录	206
附录 A 关于有效值的统计阐明.....	206
附录 B 线性单自由度系统对激励特性的响应.....	208
附录 C 关于非线性机械系统中的波形畸变.....	211
附录 D 冲击脉冲的富里叶谱和残余冲击谱之间的联系.....	214
附录 E 加速度计输出信号的电子积分.....	216
附录 F 关于分贝的使用	220
附录 G 换算图、表等	223
附录 H 关于振动和冲击测量的标准.....	227
索 引	234

第一章 导 论

机械振动和冲击是一种动态现象——亦即它们的强度随时间而变化。然而，最大的强度以及强度随时间的变化率都分布在宽广的测量范围内，为了对它们进行精确的测定，往往需要高度专门化的设备。例如由远方的地震(或爆炸)所产生的地面运动可能几乎觉察不到，而由巨大的燃烧发动机所产生的振动则会造成严重的机械疲劳破坏。

虽然在大多数情况中，机械冲击和振动是伴随着有用的过程所产生的一种不希望有的副产品，并且要化很大的努力来减小它们的影响，而有些振动则是有目的地产生的。典型的例子是由运输机和筛机、机械锤以及超声清洗池等等所产生的振动；而在铆接锤和打桩机中则产生人们所希望的冲击效应。

一般来说，由于应用相同的叙述和测量，而不考虑这些被描述的振动或冲击究竟是需要的还是不需要的，因此本书各部分将不给出明确的区别。书中各章的安排主要是为了描述表征振动和冲击的测量数据和量测技术的需要，以及评价它们对响应介质的影响。关于理论方面更完整的论述，读者可参阅标准教科书以及在文献中所援引的著作。

第二章扼要地回顾了机械振动和冲击的基本特性，以及描述了它们的各种量。§2-1涉及了周期(离散频率)信号，而§2-2则将讨论扩展到必须用统计参量加以描述的平稳随机函数。在这两种情况中，可以看到利用有效值(均方根值)进行描述的优点，因为有效值与振动的功率含量有关；以及如何利用富里叶变换确定功率的分布。§2-3描述了如何将富里叶变换技术同样地应用于瞬态现象和冲击，虽然这时的沿用“能量”而不是用“功率”来表示。最后，§2-4介绍了非平稳数据的概念，并且给出了某些典型的例子。

第三章涉及机械系统对振动和冲击的响应，先从单自由度开始，然后再将讨论扩展到更为普遍的情况。首先，§3-1指出，对于确定性激励，系统的响应在频域中可简化为激励谱和系统频率响应的乘积；与此相应，在时域中则为激励信号和系统脉冲响应的卷积。该节引入了共振概念，它同系统的自由度数目有关。

在§3-2中，讨论了各类非线性以及它们对于由线性系统获得的比较简单的结果的影响。对弹簧元件中非线性的最通常的情况作了最详细的讨论。§3-3的讨论证实了同横向振动直接模拟的扭转振动。§3-4*还表明将§3-1的基本原理同样运用于平稳随机信号，可以获得作为输入谱和频率响应函数(的幅值平方)两者乘积的响应功率谱。

§3-5介绍了描述冲击响应的另一种方法，即所谓的冲击响应谱，它与富里叶谱是不同的。在系统平稳前，对被激励结构的阻尼以及最大的响应作了某些考虑。附录D清楚地阐明了它们之间的联系。

§3-6、§3-7和§3-8全部讨论了基本原理对于在实践中经常遇到的连续结构的延伸。§3-6考虑了运动的精确方程，这些方程仅在一些理想情况下才存在精确解，例如简单的杆、梁和板。§3-7介绍有限元技术，它将实际结构模化为一些分离单元的总合，从而获得了实际问题的数值解。而§3-8扼要地指出，在存在很高的模态密度的情况下，甚至可作较大的简化，而不必要再去确定各个模态，只要对一些模数进行平均，并且再作空间平均就已足够。

第四章讨论振动和冲击对机械系统的某些效应，特别是对于疲劳的效应。它表明如何将由正弦激励而获得的金属疲劳寿命的结果扩展到随机激励，但是同时提示我们，在实践中使用随机信号实际上所产生的数据可能更为可靠。有一节是关于平均应力效应，因为大多数结构元件除了承受动荷载之外还必须承受静荷载；而另外一节则简要地涉及强烈声激励的情况，已经发现，强烈的声激励的情况是引起宇航和其他结构破坏的原因。§4-2简单地讨论冲击和瞬态的破坏效应，它们可以引起与疲劳破坏相对立的突发性脆性破

* 原文误为 3-3 节——译注

坏。

第五章总结了振动和冲击对于人体的最重要的效应,它的频率范围从运动病不到1 Hz的范围,到整个躯体振动,频率在1—80 Hz范围内,包括手-臂的振动,在8—1000 Hz范围内。在有关的标准中包括了某些评价标准。

第六章详细指导了正确选择振动和冲击测量以及评价的设备。在§6-1的简单介绍之后,§6-2和§6-3提供了对加速度计和前置放大器作出最优选择的必要的信息。加速度计现已广泛地被采用为最全面的振动传感器,甚至可以测量除加速度以外的其他参量。§6-4、§6-5、§6-6分别叙述了包括校准传感器、力传感器和阻抗传感器的选择以及加速度计安装方法等实际问题。

§6-7讨论了便携式电池供电仪器的选择,这些仪器包括振动计、调谐式滤波器、图示记录仪、磁带记录仪、运输冲击或“碰撞”记录仪以及频闪仪和波形分析仪。磁带记录仪常用于现场记录信号,这些信号将用§6-8中所讨论的复杂的交流电供电的设备仔细地进行分析。这种可能性包括使用扫描的或者顺序的滤波器分析仪,以及以FFT(快速富里叶变换)或数字滤波器为基础的数字实时分析仪。分析的结果可以在XY记录仪上由图象写出,或为日后处理而以数字形式存储在数字盒式记录仪中,或者使用台式计算机或计算机进行大规模的处理。

第七章给出了如何对振动和冲击信号进行最佳频率分析的专门资料,已经表明这是最重要的分析技术。§7-1介绍了模拟和数字两种典型分析系统的工作模式,以及如何选择基本的分析参量,例如带宽和对数——线性标度。§7-2涉及平稳信号的序列分析,集中在或许是最重要的保留应用领域,亦即使用便携式电池供电设备进行现场分析。另一方面,§7-3讨论使用实时数字分析仪对平稳信号、以及冲击和瞬态进行更详细的分析。最后,§7-4讨论通过一种移动时间窗口的方法分析非平稳信号,对于处理诸如非平稳的速度变化(例如起转和渐停),以及诸如往复式机器振动中信号本身由分离脉冲所组成的情况,这种方法是有用的。

第八章所讨论的是前面述及的测量和分析方法中一个迅速发展的领域,即在机器正常状况监测方面的应用。这里,振动信号基本上被看作为运转机器内部状况的信息载体,但是可以确定系统在其中建立的方式,而不论过程是否产生结果。本章集中在关于如何避免易犯的错误的信息,后者妨碍了某些人实现这些过程的全部的潜在可能性。

第九章包含了一个多少有关的题目,它代表了另一种无损评价技术,即声发射。基本的区别是它通常提供静应力条件下的信息,例如在压力容器中的信息,这同第八章中所讨论的运转中机器的情况恰好相反。因为声发射是较新的题目,为它已经设计了专门化的设备。这一章是独立的,它提供了背景材料、用于信号适调和评价的换能器和仪器的细节,以及应用领域方面包括典型例子的资料。

第十章讨论了用于各种目的的主动产生振动和冲击的电动激振器的应用。§10-1内容是振动的产生,它用于环境试验,以及用于确定材料和结构的动态特性。在讨论了激振器及其控制设备的基本特性后,分析了正弦与随机激振的有关的优点。最后介绍了测量机械阻抗和导纳的基本原理以及测量的典型系统。§10-2涉及了应用电动激振器和其他方法进行的冲击试验,并且用对第六章所介绍的碰撞记录仪作进一步的讨论作为结束。

第十一章是以“旋转机器的平衡”命名的,并且作为减小振动方法的一种介绍。首先介绍了刚性转子的静态和动态不平衡的概念,由此可以理解轴承支座“硬”或“软”的重要性。在叙述了容许残余不平衡等级的有关标准后,讨论了如何实现平衡,可以利用具有辅助电子设备的特殊设计的通用平衡机器,或者甚至在现场利用便携式设备(现场平衡)。在后一种情况中,所涉及的计算目前可以通过预编程序的袖珍计算器有效地完成(至少对于迄今所假定的刚性转子是这样)。这章最后扼要地讨论了比较难于平衡的作业,即精密的平衡、柔性转子的平衡(高于临界转速运行)、多跨轴,以及往复式机器的曲轴平衡。

最后一章为第十二章,讨论了当不可能在振源上消除振动时,减小振动和冲击传播的其余方法,它包括隔振、动态吸振器和阻尼。

振动隔离的基本原理在于为设备选择一个合适的弹簧装置,使弹簧-质量系统的固有频率远低于被隔离

系统的最低频率,同时保证不激发起共振。在 § 12-1 中,有关冲击隔离介绍是在冲击响应谱基础上加以处理的,并且应用类似的条件。然而,在这种情况下,由于装置的非线性特性,因此选择合适的阻尼就相当重要。

§ 12-2-1 讨论了动态吸振器的应用,它可被用于解调一个主要激励频率的共振。同适当的阻尼相结合,还可以设计成在一个宽的频率范围内具有有限响应(包括共振)而在高频还衰减的动态吸振器。

§ 12-2-2 讨论了阻尼处理的应用,当由于激励的共振为数众多而且相隔密集以致不可能加以避免时,就可利用这种方法。文章给出了如何从一个给定的处理量中获得最好结果,以及应用阻尼材料最佳方法的指导。最后讨论了用于确定材料阻尼特性的各种方法。

§ 1-1 一般参考书目

Books,

- BISHOP, R.E.D. and JOHNSON, D.C.: Mechanics of Vibration. Cambridge University Press, 1979.
- CREMER, L. and HECKL, M.: Körperschall Springer Verlag. Berlin/Heidelberg/New York 1967 Also English version Structure-Borne Sound, 1973
- Den HARTOG, J. P.: Mechanical Vibrations. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1956
- HARRIS, C.M. and CREDE, C.E.: Shock and Vibration Handbook. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1976
- JACOBSEN, L.S. and AYRE, R.S.: Engineering Vibrations. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1958
- MORROW, C.T.: Shock and Vibration Engineering. John Wiley and Sons, Inc. 1963
- MORSE, P.M.: Vibration and Sound McGraw-Hill Book Company, Inc. 1948.
- SNOWDON, J.C.: Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems. John Wiley and Sons, Inc 1968
- TIMOSHENKO, S.: Vibration Problems in Engineering. John Wiley and Son, 1974
- MEIROVITCH, L.: Elements of Vibration Analysis. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1975

Journals,

Acustica

Hirzel Verlag, Stuttgart

Akusticheskii Zhurnal

Published by the Academy of Science of the U.S.S.R. Moscow. (Also translated and published by the American Institute of Physics as, Soviet Physics, Acoustics)

Experimental Mechanics

Published by the Society of Experimental Stress Analysis, U.S.A

J.A.S.A.

(Journal of the Acoustical Society of America). Published by the American Institute of Physics, New York

Journal of Sound and Vibration

Published by Academic Press, Inc London

Journal of the

(Japanese) Published by the Acoustical Society of Japan,

Acoustical Society of Japan	University of Tokyo, Tokyo
Kampf dem Lärm	Published by Deutschen Arbeitsring für Lärmbekämpfung, E.V. Düsseldorf
Lärmbekämpfung	Verlag für angewandte Wissenschaften GmbH, Baden-Baden
Sound and Vibration	Published monthly by Acoustical Publications, Inc., Ohio, U.S.A.
The Shock and Vibration Bulletin	Published by The Shock and Vibration Information Center, Naval Research Laboratory, Washington, D.C.
The Shock and Vibration Digest	Published by The Shock and Vibration Information Center, Naval Research Laboratory, Washington, D.C.
Noise Control Engineering	Published by Ray W. Herrick Laboratories, Purdue University, West Lafayette, IN. 47907, U.S.A.

第二章 振动和冲击的特性

§ 2-1 周期振动

一个质点(或物体)相对于基准位置的振荡运动,在某一周期时间后本身能精确地重复,这种运动称为周期振动。周期振动最简单的形式是简谐运动,当把它按时间函数绘成曲线时,表示为图 2-1 中的正弦曲线。图中 T 是振动周期,即两个相继的完全相同的运动状态间的时间间隔。

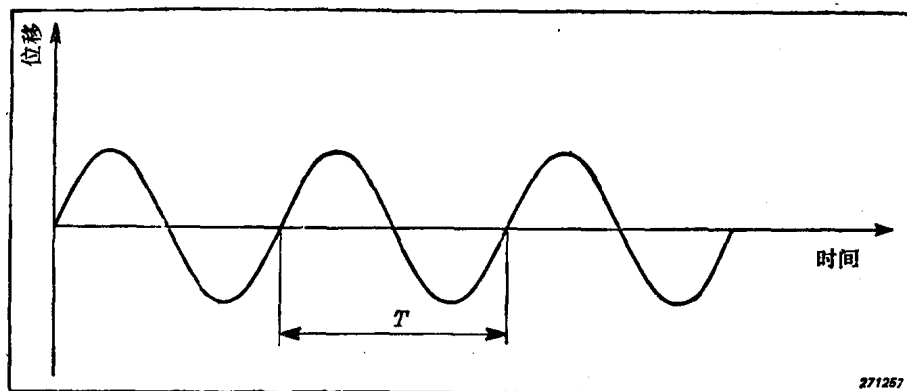


图 2.1 一个纯简谐(正弦)振动信号的例子

振动的频率为

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-1)$$

至于振动的量值,可用不同的量来描述,只要所考虑的是简谐运动,所有这些量之间就有确定的数学关系。

假如振动具有只沿一根(x)轴的纯直线振荡形式,则质点(或物体)离开基准位置的瞬时位移在数学上可用下列方程式描述

$$x = X_{\text{峰}} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{\text{峰}} \sin(2\pi ft) = X_{\text{峰}} \sin(\omega t) \quad (2-2)$$

式中 $\omega = 2\pi f$, 角频率;

$X_{\text{峰}}$ ——离开基准位置的最大位移;

t ——时间。

由于运动的质点(或物体)的速度是位移随时间的变化率,所以运动也可用速度(v)来描述

$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} = \omega X_{\text{峰}} \cos(\omega t) = V_{\text{峰}} \cos(\omega t) \\ &= V_{\text{峰}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2-3)$$

最后,运动的加速度(a)是速度随时间的变化率

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 X_{\text{峰}} \sin(\omega t) = -A_{\text{峰}} \sin(\omega t) \\ = A_{\text{峰}} \sin(\omega t + \pi) \quad (2-4)$$

从上述方程式中可看到,无论研究的是位移、速度还是加速度,其振动的形式和周期总保持不变。然而,速度超前位移 $90^\circ \left(\frac{\pi}{2} \right)$ 相角,而加速度又超前速度 $90^\circ \left(\frac{\pi}{2} \right)$ 相角。可采用峰值 $X_{\text{峰}}$ 、 $V_{\text{峰}}$ 和 $A_{\text{峰}}$ 作为描述振动大小的特征量。只要所研究的是纯简谐振动,用峰值的大小来描述它是非常有用的,因为它可直接应用在上述方程式中。另一方面,假如研究的是比较复杂的振动,则可以选择其他的描述量。其原因之一是峰值只描述运动的瞬时振动幅值的大小,而不考虑产生它的时间历程。

考虑时间历程的另一个描述量是平均绝对值,其定义为(见图 2.2)

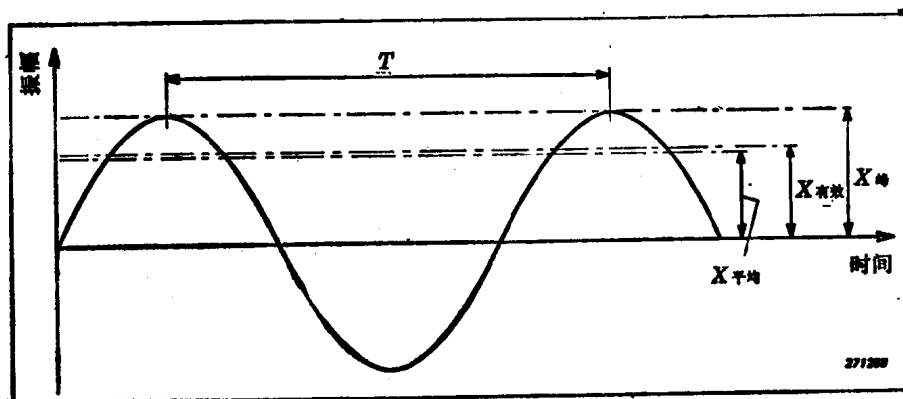


图 2.2 用峰值 有效值和平均绝对值表示的一个简谐振动信号的例子

$$X_{\text{平均}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt$$

这个量虽然考虑了一个周期(T)范围内的振动时间历程,但其实用价值是有限的。同样考虑时间历程的一种更为有用的描述量是有效(均方根)值,见图 2.2。

$$X_{\text{有效}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2-5)$$

有效值之所以作为一个重要的描述量,主要原因是由于它同振动功率的含量有简单的关系。

对于一个纯简谐运动来说,各量之间的关系是:

$$X_{\text{有效}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad X_{\text{平均}} = \frac{1}{\sqrt{2}} X_{\text{峰}}$$

这些关系的更通用的形式为

$$X_{\text{有效}} = F_f, X_{\text{平均}} = \frac{1}{F_o} X_{\text{峰}}$$

或

$$F_f = \frac{X_{\text{有效}}}{X_{\text{平均}}}, F_o = \frac{X_{\text{峰}}}{X_{\text{有效}}} \quad (2-6)$$

F_f 和 F_o 因子分别被称为:“波形因数”和“峰值因数”,它们给出了所研究的振动波形的某些指示。

对于纯简谐运动,

$$F_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad (\approx 1 \text{ dB})$$

和

$$F_o = \sqrt{2} = 1.414 \quad (\approx 3 \text{ dB})$$

日常生活中所遇到的大多数振动都不是纯简谐运动，虽然其中许多振动具有周期的特性。图 2.3 中表示一个典型的非简谐周期运动的例子(一个内燃机活塞的加速度)。通过测定振动的峰值、平均绝对值和有效值，以及波形因数和峰值因数，获得了大量有用的信息，从而可清楚地得出结论：该运动是非简谐的。然而，根据这些信息来预先估计振动在联接结构元件中可能产生的所有各种影响，实际上是不可能的。因此必须采用其他的描述方法。

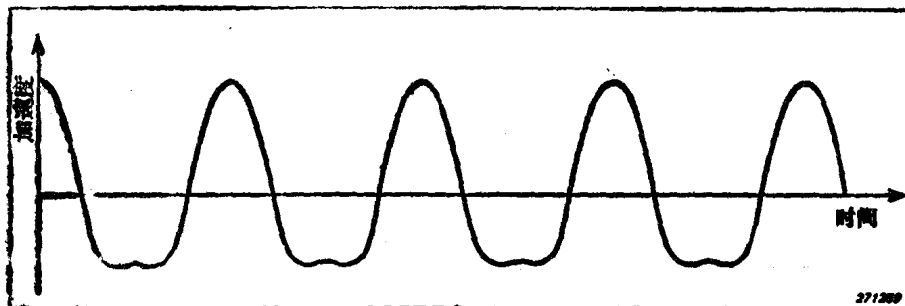


图 2.3 非简谐周期运动(内燃机活塞的加速度)的例子

最有效的描述方法之一是频率分析法。这个方法的数学理论是建立在由富里叶首次提出的公式的基础上的。它表明任何周期性曲线，不论它如何复杂，都可看成由一系列频率上成简谐关系的纯正弦曲线所组成的。

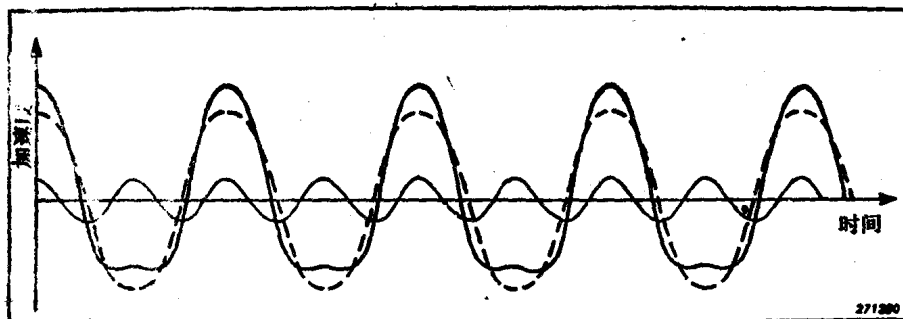


图 2.4 图 2.3 所示的波形被“分解”为具有简谐关系的正弦波之和

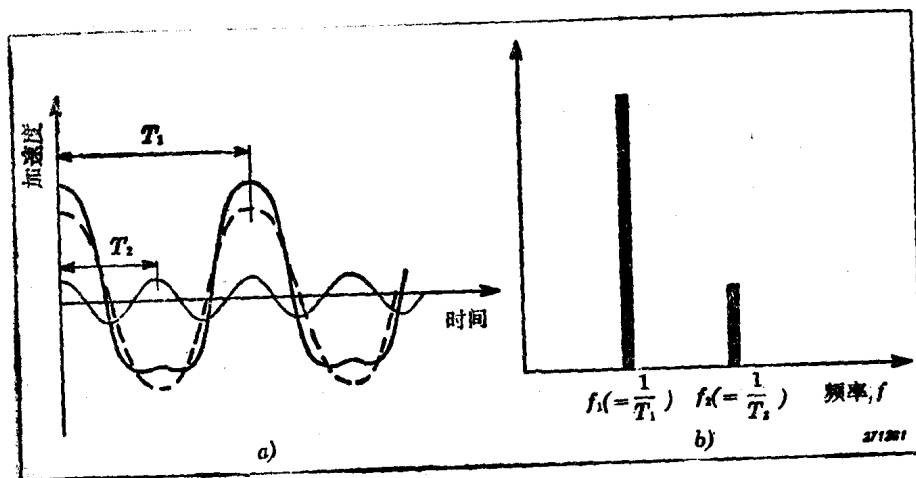


图 2.5 如何用频谱来描述图 2.3 中信号的图解

- a) 用时间域描述
- b) 用频率域描述