



# 机械振动与冲击测量

国防工业出版社

78.113

187

# 机械振动与冲击测量

[丹麦] J. T. 布罗彻 著

西北机器厂情报室 译



0612 / 14

## 内 容 简 介

本书原名为《B & K设备在机械振动与冲击测量中的应用》。书中简要地阐述了振动和冲击的基本特性；讨论了振动与冲击的测量、分析、试验及控制技术；介绍了一些测试仪器（B & K公司生产）的工作原理、结构特点、仪器选配、操作方法及设计上的考虑；提出了一些先进的测试技术，如用电动式振动机作冲击试验、随机讯号的实时分析、机械阻抗和转移的测量以及互相关和交错频谱密度与几率密度的测量等。

Mechanical Vibration and Shock Measurements

J. T. Broch

1972年5月

\*

机械振动与冲击测量

西北机器厂情报室 译

(只限国内发行)

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1/32</sup> 印张 8<sup>1/2</sup> 213千字

1975年6月第一版 1975年6月第一次印刷 印数：00,001—10,000册

统一书号：15034·1423 定价：1.10元

# 目 录

前言 .....	6
第一章 摘要 .....	7
第二章 振动和冲击的特性 .....	14
§2-1 周期振动 .....	14
§2-2 稳态随机振动 .....	19
§2-3 瞬变现象和冲击 .....	25
§2-4 非稳态随机振动 .....	28
第三章 机械系统对振动和冲击的响应 .....	31
§3-1 线性机械系统对振动的响应、谐振 .....	31
§3-2 非线性系统的一些响应特性 .....	36
§3-3 旋转和扭转振动 .....	40
§3-4 机械系统对稳态随机振动的响应 .....	41
§3-5 冲击响应和冲击频谱 .....	43
§3-6 结构中的振动、机械波 .....	46
第四章 振动和冲击对机械系统和人体的影响 .....	52
§4-1 振动的破坏效应、机械疲劳 .....	52
§4-2 旋转体的振动、平衡质量 .....	57
§4-3 振动和冲击对人体的影响 .....	61
第五章 振动测量仪器和测量技术 .....	70
§5-1 一般考虑 .....	70
§5-2 一些基本测量系统 .....	71
§5-3 加速度计的选择 .....	79
§5-4 前置放大器的选择 .....	86
§5-5 分析仪和读出的选择、数据表示 .....	90
§5-6 校准和性能检验 .....	101
§5-7 一些实际加速度计应用的考虑、安装技术 .....	104
§5-8 通用测量方案 .....	109

第六章 冲击测量和分析 .....	113
§6-1 一般测量考虑 .....	113
§6-2 一些基本冲击测量系统 .....	117
§6-3 冲击脉冲的频率分析(傅里叶分析) .....	119
第七章 冲击和振动控制的一些方法 .....	127
§7-1 振动和冲击隔离 .....	127
§7-2 动态振动控制和振动阻尼 .....	148
§7-3 振动试验 .....	164
§7-4 冲击试验 .....	186
§7-5 旋转机的平衡 .....	196
第八章 一些先进的测量方法 .....	208
§8-1 机械阻抗与转移 .....	208
§8-2 互相关和交错频谱密度的测量 .....	218
§8-3 几率密度的测量与说明 .....	227
附录 .....	237
附录 A 关于有效值的统计说明 .....	237
附录 B 线性、单自由度系统对激励的响应特性 .....	239
附录 C 关于非线性机械系统中的波形畸变 .....	242
附录 D 冲击脉冲的傅里叶频谱与残余冲击频谱之间的关系 .....	245
附录 E 加速度计输出讯号的电积分 .....	246
附录 F 最低可测振级 .....	251
附录 G 冲击脉冲的频率分析 .....	251
附录 H 换算图表、表格等 .....	256
附录 I 关于分贝的使用 .....	261
附录 J 关于振动和冲击测量的标准 .....	265

# 机械振动与冲击测量

[丹麦] J. T. 布罗彻 著  
西北机器厂情报室 译

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书原名为《B & K设备在机械振动与冲击测量中的应用》。书中简要地阐述了振动和冲击的基本特性；讨论了振动与冲击的测量、分析、试验及控制技术；介绍了一些测试仪器(B & K公司生产)的工作原理、结构特点、仪器选配、操作方法及设计上的考虑；提出了一些先进的测试技术，如用电动式振动机作冲击试验、随机讯号的实时分析、机械阻抗和转移的测量以及互相关和交错频谱密度与几率密度的测量等。

Mechanical Vibration and Shock Measurements

J. T. Broch

1972年5月

\*

机械振动与冲击测量

西北机器厂情报室 译

(只限国内发行)

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 8<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 213千字

1975年6月第一版 1975年6月第一次印刷 印数：00,001—10,000册

统一书号：15034·1423 定价：1.10元

## 译者的话

遵照伟大领袖毛主席关于洋为中用的教导，为适应科研、生产的需要，我们翻译了《机械振动与冲击测量》（原名B & K设备在机械振动与冲击测量中的应用）一书。

此译本系一九七二年五月份修订本，比一九六九年版内容有较大幅度的增加，如增添了实时分析法及分析仪器；可更换头电动式激振器以及机械阻抗和转移的测量；互相关和交错频谱密度的测量；几率密度的测量等一些先进的测量技术。

本书简要地介绍了机械振动与冲击测量的基本概念和基础理论，它着重从实际应用出发，介绍了振动与冲击测量的仪器和方法以及振动与冲击的控制方法，对从事有关测量和试验工作的工程技术人员有一定的参考价值。

本书由白荣宗、杜群喜、周德富、段振环等译，严石高校。由于水平所限，时间仓猝，难免有错误和缺点，敬请读者批评指正。



# 目 录

前言 .....	6
第一章 摘要 .....	7
第二章 振动和冲击的特性 .....	14
§2-1 周期振动 .....	14
§2-2 稳态随机振动 .....	19
§2-3 瞬变现象和冲击 .....	25
§2-4 非稳态随机振动 .....	28
第三章 机械系统对振动和冲击的响应 .....	31
§3-1 线性机械系统对振动的响应、谐振 .....	31
§3-2 非线性系统的一些响应特性 .....	36
§3-3 旋转和扭转振动 .....	40
§3-4 机械系统对稳态随机振动的响应 .....	41
§3-5 冲击响应和冲击频谱 .....	43
§3-6 结构中的振动、机械波 .....	46
第四章 振动和冲击对机械系统和人体的影响 .....	52
§4-1 振动的破坏效应、机械疲劳 .....	52
§4-2 旋转体的振动、平衡质量 .....	57
§4-3 振动和冲击对人体的影响 .....	61
第五章 振动测量仪器和测量技术 .....	70
§5-1 一般考虑 .....	70
§5-2 一些基本测量系统 .....	71
§5-3 加速度计的选择 .....	79
§5-4 前置放大器的选择 .....	86
§5-5 分析仪和读出的选择、数据表示 .....	90
§5-6 校准和性能检验 .....	101
§5-7 一些实际加速度计应用的考虑、安装技术 .....	104
§5-8 通用测量方案 .....	109

第六章	冲击测量和分析 .....	113
§6-1	一般测量考虑 .....	113
§6-2	一些基本冲击测量系统 .....	117
§6-3	冲击脉冲的频率分析(傅里叶分析) .....	119
第七章	冲击和振动控制的一些方法 .....	127
§7-1	振动和冲击隔离 .....	127
§7-2	动态振动控制和振动阻尼 .....	148
§7-3	振动试验 .....	164
§7-4	冲击试验 .....	186
§7-5	旋转机的平衡 .....	196
第八章	一些先进的测量方法 .....	208
§8-1	机械阻抗与转移 .....	208
§8-2	互相关和交错频谱密度的测量 .....	218
§8-3	几率密度的测量与说明 .....	227
附录	.....	237
附录 A	关于有效值的统计说明 .....	237
附录 B	线性、单自由度系统对激励的响应特性 .....	239
附录 C	关于非线性机械系统中的波形畸变 .....	242
附录 D	冲击脉冲的傅里叶频谱与残余冲击频谱之间的关系 .....	245
附录 E	加速度计输出讯号的电积分 .....	246
附录 F	最低可测振级 .....	251
附录 G	冲击脉冲的频率分析 .....	251
附录 H	换算图表、表格等 .....	256
附录 I	关于分贝的使用 .....	261
附录 J	关于振动和冲击测量的标准 .....	265

## 前 言

机械振动和冲击属于强度随时间变化的动态现象。然而，因为它们的最大强度和强度随时间的变化率分布在很宽的测量范围上，通常需要用专门化的设备才能对它们作精确的测定。例如，由远方地震（或爆炸）引起的地面运动小得几乎无法测定，而由大型发动机产生的振动却大得能造成严重的机械疲劳损坏。

虽然多数情况下，伴随有用过程产生的附加机械振动和冲击是无用的，常常需要花费很大的代价来减小它们的影响，但有些振动却是有意制造出来的。如传送机、分类机、机械锤及超声波清洗机等的振动即其典型的实例。同时，利用冲击效应还可制成铆钉机和打桩机。

一般说来，因为描述和测量它们的方法相同，所以全书不明显区分冲击和振动是有用的还是无用的。书内各章主要描述：表征振动和冲击所必需的测量数据及技术，并估价振动和冲击对响应介质的影响。如果读者需要进一步了解理论方面的论述，可参看一般教科书和本书引证的有关文献。

# 第一章 摘要

本章简要说明以后各章所论述的主要内容，以便帮助有经验的测振技术人员迅速地找到他所需要的图表和数据，帮助缺乏经验的技术人员易于找出他作研究所需要的文章。

第二章简要地论述机械振动和冲击的基本特性，并定义表征它们大小的各个量。对于稳态振动（周期性的和随机性的）来说，所要测定的最重要的一个量是有效值（均方根值），因为它与振动的能量含量有关：

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

虽然峰值加速度和总速度的变化（加速度对时间的积分）等量是描述冲击特性的有用数据，但似乎没有一个象有效值同等重要的简单量。实际上不可能从上述任一个简单量以适当的精度来预测振动和冲击在机械系统内造成的各种影响。要做到这一点，就必须利用另外的描述方法。目前最有效的方法之一是频率分析（傅里叶变换）法。

2-1节中简要叙述了周期讯号的频率分析，2-2节表明怎样使用频率分析法描述随机振动。而周期性讯号的频谱是由成谐波关系的离散振动分量组成的，这些分量可用其各自的有效值来表征，随机振动的频谱是连续的，最好用均方频谱密度（功率频谱密度）来描述：

$$w(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta f T} \int_0^T f_{\Delta f}^2(t) dt$$

2-3节说明怎样把傅里叶变换法应用到瞬变现象和冲击上，图2-13和2-14是这种分析的一些例子。

2-4节扼要地讨论了非稳态随机振动,图2-16例示了几种形式的非稳态振动。第三章讨论机械系统对振动和冲击的响应。3-1节讨论线性系统对确定的振动的响应。使用了通用的迭加原理,并叙述了谐振现象(图3-3和图3-4)。

3-2节扼要说明非线性系统的一些响应特性,图3-6示出了一些非线性弹簧特性。图3-7举例说明了这类非线性弹簧是怎样影响其谐振的(可能影响它的部分谐振)。这一节也提到不稳定性 and 产生分谐波这样一些典型的非线性现象。并对这种现象作了物理解释。

3-3节主要介绍集总参量系统中的旋转振动和扭转振动理论,并说明直线运动由力方程确定,旋转运动由力矩方程来确定。

3-4节导出了机械系统对稳态随机振动的响应,而3-5节讨论冲击响应并引入冲击响应频谱的概念。这是一种特殊的“频谱”,不应和强迫冲击脉冲的傅里叶频谱混为一谈。这一节对与冲击响应频谱有关的各个量下了定义,同时给出了无阻尼残余冲击频谱和冲击脉冲的傅里叶频谱之间的数学关系式。

3-6节扼要讨论结构对机械振动的响应。这里表明,此响应不仅是时间的函数,而且也是空间的函数,利用自然模式最能说明这个问题。线性结构内的“简单”压缩振动(波)在数学上可用二阶微分方程来处理,而要恰当地描述横向振动,需要用四个四阶微分方程。

图3-19和3-20是梁和方板的一些典型的振动模式的例子。

第四章主要说明振动和冲击对机械系统和人体的影响。其中4-1节从机械疲劳这个观点出发,详细地讨论周期性振动和随机振动的破坏效应。而4-2节讨论旋转机的平衡质量问题。图4-9中的曲线指出了与各种平衡等级相对应的最大残余不平衡。

在第四章的最后一节,即4-3节,综述了振动和冲击对人体的一些影响,图4-14示出振动承受的判据曲线,图4-15是人能经受冲击脉冲的忍耐力曲线。

第五章讨论振动测量仪器和振动测量技术的一些实际应用和理论性方面的问题。5-1节是振动测量的一般考虑；5-2节介绍了一些基本测量系统。说明怎样把B & K 2204型精密脉冲声级计当作一个直接读数的，电池式的振动计来使用，以及如何应用附加的外接滤波器组，作振动频谱的频率分析。也概述了使用恒带宽及恒百分比带宽分析设备的另一种形式的频率分析。要分析很低频率的振动时，建议利用7001型调频（FM）磁带记录仪作频率变换。

5-3节介绍现代加速度计的一些最重要特性，图5-20为B & K加速度计的典型频率特性。因为在某些情况下选择最合适的加速度计可能有点复杂，所以提供了图5-21的图表。该图表除了指出各种加速度计的主要应用领域外，对与它们的总性能有关的其它数据也作了说明。最后也提到了加速度计的电压灵敏度和电荷灵敏度之间的相互关系。

在5-4节，与选择合适的加速度计前置放大器结合起来，进一步讨论了这两种“型式”灵敏度的使用。为帮助读者作这种选择，又提供了一个图表5-29。

在5-5节，更加透彻地叙述了各种类型的分析仪和读出装置的使用，并说明了测量系统相位特性的重要性。图5-30是相位畸变的例子，而图5-31指出了典型振动测量系统的“理想”工作范围。在直接测量振动讯号波形时，测量设备的相位畸变很重要，而当问题仅限于决定有效值和频谱时，相位畸变可以忽略不计。另一方面，联系到随机振动的分析，统计误差的问题将变得很重要。有效值测量中的统计误差由下式给定：

$$\varepsilon = \frac{1}{2\sqrt{\Delta f T}}$$

式中  $\Delta f$ ——测量带宽（或谐振带宽），赫兹；

$T$ ——检测设备的有效平均时间。

图5-38、5-39和5-40是此关系式的具体说明。

5-6 节讨论测量装置的校准和性能检查。作快速性能检查时，可使用装在 4292 型前置放大器内的“简单”校准器；作精度更高的校准时，可利用 4291 型校准器和 4801+4815 组合校准仪。4290 型专用校准器主要用来作频率响应校准。

5-7 节讨论了加速度计的一些实用安装法；图 5-46 示出了六种安装方法。图 5-48 说明了安装方法对加速度计频率特性的影响。本节对加速度计在实际应用中的一些其它问题，如不合理的接地方式（图 5-50），电缆噪声及颤噪效应问题也作了论述。

本章以 5-8 节中的通用测量方案的建议为结尾，在建立和使用振动测量系统的时候，使用这个方案能帮助记忆一些最重要的测量因素，建议详细地阅读这一节。

第六章论述冲击脉冲的实际测量和分析。6-1 节简要介绍一些一般的测量考虑，并强调了测量设备的线性的频率响应和相位响应的重要性。频率响应界限的典型影响，示于图 6-1, 6-2, 6-3, 6-4, 6-5 及 6-6。可利用图 6-7 中的曲线，估计特殊冲击测量情况下所要求的频率响应。

6-2 节扼要说明一些典型的冲击测量系统，并指出在磁带上记录冲击脉冲的优点。

6-3 节稍详细地讨论了磁带记录冲击脉冲的实用频率（傅里叶）分析。一般说来，进行这种分析实际上有两种不同的方法。一种方法在于把脉冲讯号加到分析滤波器上，给每个滤波器加一次。第二种方法在于利用一个录有脉冲讯号的很短的闭合磁带环，周期性地重复脉冲。这节扼要地说明了涉及到的各个实际方面，并在图 6-12 中列举了根据这两种方法所获得的实际分析结果。

第七章论及一些冲击和振动的控制方法。最重要的控制方法之一是振动和冲击的隔离，7-1 节对此作了一些讨论。虽然振动和冲击的隔离原理相似，但它们之间还存在着明显的差别。因此，为便于讨论起见，把该节分成：*a*) 振动隔离和 *b*) 冲击隔离。振动隔离的基本原理在于选择要隔离设备（机器）的安装弹簧，

以使得弹簧质量系统的自然频率远低于（譬如说低于3倍）所要隔离的最低频率分量。图7-2示出了具有各种阻尼比的弹簧-质量系统的典型谐振曲线。图7-6、7-7和7-8例举了解决实际振动隔离问题所需的测量。

关于冲击隔离是在冲击响应频谱的基础上加以讨论的，并强调了在隔离系统中选择适当的阻尼。显然，只有把冲击力变成运动才能实现有效的冲击力隔离。

7-2节简要地论述动态振动吸收器的理论和应用以及振动阻尼处理的使用。动态振动吸收器应用到谐振系统上的结果，表示在图7-21、7-22及7-23中，而图7-24和7-25给出了有用的设计曲线。

当振动控制归结为应用振动阻尼处理时，则可用几种方法实现。其中最简单的一种方法就是在振动结构的表面上喷一层具有高内耗的粘弹性材料（图7-30）。另一种方法在于设计如图7-31所示的各种类型的层状结构。本节结尾介绍测定阻尼材料内耗的各种不同方法。最重要的一种方法似乎是H. Oberst博士等人利用B & K 3930型复模量仪器所提出的方法。

7-3节说明机械设备的几种振动试验方法，过去几年对设备内谐振效应的这种试验和研究很普及，成果很显著，这节也简要地论述了频率扫描试验，以及宽频带随机和扫描随机振动试验。

7-4节对另一种机械试验，即冲击试验作了一些探讨。虽然今天所作多数冲击试验是在专门设计的冲击机上进行的，但在冲击和振动试验室内，利用电动式振动机作冲击谱试验的方法似乎逐渐普及开来，本节扼要地叙述了这两种冲击试验。

7-5节介绍旋转机平衡的基本问题，讨论了静态和动态平衡，并指出一些简单的平衡方法。

在本书的最后一章，第八章，简要地论述了机械阻抗和转移的概念，相关和交错频谱密度的测量以及随机振动几率密度数据的确定。



8-1节（机械阻抗及转移）和8-2节（相关和交错频谱密度测量），介绍了两通道型的测量仪的使用。本章的最后一节，8-3节（几率密度的测量）主要描述单通道测量仪的使用。本章指出了各种方法的应用和限制，并举出了应用的实例。

### 参 考 文 献

书：

- |   |   |
|---|---|
| BISHOP, R. E. D. and<br>JOHNSON, D. C.; | Mechanics of Vibration. Cambridge University Press, 1960.                               |
| CREMER, L. and<br>HECKL, M.;            | Körperschall. Springer Verlag. Berlin/Heidelberg/New York 1967.                         |
| Den HARTOG, J. P.;                      | Mechanical Vibrations, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1956.                             |
| HARRIS, C. M. and<br>CREDE, C. E.;      | Shock and Vibration Handbook. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1961.                      |
| JACOBSEN, L.S. and<br>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. D. Van Nostrand Company, Inc. Princeton, N. J. 1955. |
| Van SANTEN, G. W.;                      | Mechanical Vibration. Philips Technical Library, Eindhoven 1953.                        |

杂志：

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| <i>Acustica.</i>               | Hirzel Verlag, Stuttgart.  |
| <i>Akusticheskii Zhurnal.</i>  | 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.) |
| <i>Experimental Mechanics.</i> | Published by the Society of Experimental Stress Analysis, U. S. A.   |
| <i>J. A. S. A.</i>             | (Journal of the Acoustical Society of America.) Published by the American Institute of Physics, New York.  |