

振动工程大全

下 册

〔日〕《振动工程大全》编辑委员会编

谷 口 修 主编

ZHEN DONG GONG CHENG DA QUAN

本书是一部综合性的、紧密结合工程实际的名著。它以机械、土木、建筑、船舶、航空、航天等工程结构为对象，论述了振动的理论基础、振动与冲击的测量、数据处理与试验，分析了振动的影响，研究了解决措施以及阐述了近代特别突出的各种振动问题，如复杂系统的振动分析、非线性振动、随机振动等等。

本书可供从事机械、土木、建筑、船舶、航空、航天等部门工作的工程师和高等院校有关专业的教师学习、参考和使用。

全书共二十九章，分两册出版。上册为第一章至第十一章（已于1983年2月发行第一版），下册为第十二章至第二十九章。后面附有全书的索引和单位换算表。

振動工学ハンドブック

振動工学ハンドブック編集委員会編

代表者 東京工業大学名誉教授 工学博士

谷口修

東京 株式会社 養賢堂発行 1976

* * *

振 动 工 程 大 全

下 册

〔日〕《振动工程大全》编辑委员会 编

谷口修 主编

尹传家 译 黄怀德 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $30^{1/2}$ · 字数 797 千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 0,001—3,200 · 定价 8.65 元

*

统一书号：15033·6226

作 者 一 览 表

田村	章義	東京工业大学教授、工学博士	(2 , 3 , 6.4 章)
高橋	伸	山形大学教授、工学博士	(4 章)
小堀	与一	金沢大学教授、工学博士	(5 章)
遠藤	満	東京工业大学、工学博士	(6.1 章)
菊地	勝昭	日立制作所	(6.2 章)
長松	昭男	東京工业大学副教授、工学博士	(6.3 章)
坂田	勝	東京工业大学教授、工学博士	(7 章)
小林	啓美	東京工业大学教授、工学博士	(8 章)
瀬尾	和大	東京工业大学	(8 章)
前澤	成一郎	山梨大学教授、工学博士	(9 章)
得丸	英勝	京都大学教授、工学博士	(10 章)
下郷	太郎	慶応義塾大学教授、工学博士	(11 章)
三浦	武雄	日立制作所、工学博士	(12 章)
古川	英一	中央大学教授、工学博士	(13 , 17.2 章)
尾上	賢	明石制作所	(14 章)
白木	万博	三菱重工业公司副总工程师、工学博士	(15 章)
中村	円生	伊藤精機公司	(16 章)
鷺沢	忍	富士電機制造公司	(17.1 章)
三輪	俊輔	劳动省劳动卫生研究所、工学博士	(18 章)
国枝	正春	石川島播磨重工业公司、工学博士	(19 章)
松平	精	石川島播磨重工业公司、工学博士	(19 章)
太田	博	名古屋大学副教授、工学博士	(20.1 章)
三輪	修三	青山学院大学教授、工学博士	(20.2 章)
堀	幸夫	東京大学教授、工学博士	(21.1 章)
小野	京右	日本電信電話公社电气通讯研究所、工学博士	(21.2 章)

Ⅳ

五十嵐昭男	日本精工公司、工学博士	(21.3 章)
会田 俊夫	京都大学教授、工学博士	(21.4 章)
津田 公一	東京大学教授、工学博士	(22 章)
葉山 真治	東京大学副教授、工学博士	(23 章)
佐藤 寿芳	東京大学教授、工学博士	(24.1~24.3 章)
松崎 淳	日立制作所、工学博士	(24.4 章)
山川 新二	五十铃汽车公司	(25.1 章)
松井 信夫	東急車輛制造公司、工学博士	(25.2 章)
山原 浩	清水建设公司、工学博士	(26 章)
青木 松三	日本包装技术协会	(27 章)
中村 宏	川崎重工业公司、工学博士	(28 章)
井上 順吉	九州大学教授、工学博士	(29 章)

編輯干事

谷口 修 田村 章義 坂田勝

序

自从 Lord Rayleigh 奠定了振动的力学基础以来，已经将近 100 年了，在工程问题中的应用也已经历了相当长的时间。在此期间，振动工程得到了不断的发展，同时也发表了许多论文和著作，日本大部分大专院校都开设了振动工程的课程。在研究工作方面，振动工程已由基本的简单系统的研究转到以现代的复杂问题和庞大系统的处理为主的研究。

从上述过程来看，振动问题似乎已大体上解决了，但是，实际上，随着近代机械在高速化、轻量化、大型化、复杂化方面的迅速发展，振动问题不仅没有减少，反而明显地增加了。振动问题不仅是工业本身的问题，而且作为公害也与人民生活密切相关。虽说振动工程有了相当的发展，但仍然产生这些情况，其原因之一是这些知识未能全部渗透到机械设计、制造和安装、工作现场等各方面中去。

工程手册之类的书籍具有两个重要的作用：一是作为解决工程学、工业问题的捷径；二是作为工程学、工业上的备忘录。机械工程手册的编写是从综合性手册开始的。迄今，各种专门领域也都已出版了专门的手册，并在各自方面大力地进行了科学技术的普及。然而，在振动工程的范围内，还没有一部很适用的手册。这些背景构成了编写这部振动工程学手册的动机。

本书以机械、土木、建筑、船舶、地面交通工具、飞行器等结构为对象，论述振动的基础理论、振动冲击的测量和数据处理，分析振动的影响，研究解决的措施以及论述近代特别突出的各种振动问题，将上述这些内容分成二十九章进行阐述。本书由科学界、工业界第一线的各方面的著名人士负责编写。诚然，本手册若能作为一部权威性的著作问世，那将是可喜的。

Ⅵ

本书的编写方针如下:

(1) 适合于大专院校毕业的科技人员。其内容针对科技人员的工作实际,并作为他们实用的座右铭。

(2) 省略了公式的推导等,尽可能地汇集容易利用的公式、数据和图表等。读者欲知更进一步的内容,可参阅每章的参考文献。

(3) 原则上采用日本工业标准 JIS-B0153 中的机械振动、冲击术语。由于考虑到国际标准 SI 单位的全面推广使用还为时过早,所以,仍沿用机械工程上的惯用单位。

在编写过程中,尽管我们已做了很多的努力,但不免一些重要项目仍有遗漏,或者有重复和不完善之处,在此谨向读者深表歉意。由于以后还要修订再版,希望读者多加批评指正。

最后,在本书出版之际,向为本书出版作出很多努力的養賢堂以及川清先生表示感谢。

《振动工程大全》编辑委员会

主编 谷口 修

1976 年 10 月

目 录

序

第十二章 模拟计算机的应用	1
12.1 模拟计算机的概况	1
12.1.1 模拟计算机与数字计算机	1
12.1.2 模拟计算机的分类	2
(A) 按程序型式分类	3
(B) 按结构分类	4
(C) 按混合型式分类	5
(D) 按运算控制型式分类	6
12.1.3 模拟计算机的结构	7
(A) 运算器部分	8
(B) 连接部分	10
(C) 控制部分	10
(D) 解的显示记录部分	11
12.1.4 运算器的原理	13
(A) 运算放大器与运算阻抗器所组成的基本运算器的原理	13
(B) 符号变换器	13
(C) 系数器	13
(D) 加法器	14
(E) 积分器	15
(F) 乘法器	17
12.2 模拟计算机的程序	17
12.2.1 程序的规定	18
12.2.2 比例尺变换	18
12.2.3 运算电路图的作法	19
(A) 积分运算	19
(B) 一阶微分方程	20

(C) 二阶微分方程	21
(D) 高阶微分方程	22
12.2.4 二阶非线性微分方程的程序例子	23
12.2.5 常微分方程的其它解法	26
12.2.6 传递函数法	31
12.2.7 偏微分方程的解法	32
(A) 变换成差分方程的方法	32
(B) 解析法	34
12.2.8 梁的振动	36
12.3 模拟计算机的应用	38
12.3.1 实时计算 (汽车振动)	38
12.3.2 超高速模拟计算机的应用例子	43
12.3.3 自动运算模拟计算机的应用例子	44
(A) 求具有非线性恢复力的振动周期条件的问题	46
(B) 梁的固有振动分析	47
12.3.4 混合式计算机的应用	50
(A) 分配计算与数字计算时间	51
(B) 应用最大原理的解法	53
(C) 管型反应槽的问题	54
(D) 曲线拟合问题	57
(E) 飞行器的运动 (混合式并行计算)	59
参考文献	62
第十三章 振动测量	63
13.1 振动测量原理	63
13.1.1 基础振动计的理论	64
13.1.2 加速度计	66
13.1.3 位移计	70
13.1.4 速度计	73
13.1.5 瞬态振动的测量	74
(A) 冲击加速度的测量	74
(B) 冲击位移的测量	77
13.2 变换器	79

13.2.1	电动型传感器	80
(A)	工作原理	81
(B)	结构和特性	83
13.2.2	压电型传感器	88
(A)	工作原理	88
(B)	传感器结构	90
(C)	测量电路	92
(D)	频率特性	98
(E)	低频域特性与波形畸变	99
(F)	温度变化的影响	100
(G)	电缆噪声	102
(H)	基础变形灵敏度	103
(I)	小结	104
13.2.3	可变电阻型传感器	105
(A)	滑动电阻	105
(B)	电阻丝应变计	106
(C)	半导体应变计	109
13.2.4	可变电感型传感器	111
(A)	变空隙型敏感元件	111
(B)	差动变压器	112
13.2.5	伺服加速度计	113
13.2.6	振动传感器的安装	115
13.2.7	测量对象的影响	119
13.2.8	振动传感器的特性表示	121
(A)	型式	121
(B)	安装方法	121
(C)	方向	121
(D)	传感器的尺寸和重量	121
(E)	运动部分的位置	121
(F)	电缆	122
(G)	敏感元件	122
(H)	辅助装置	122
(I)	最大运动的界限	122

X

(J) 最小运动的界限	122
(K) 灵敏度	122
(L) 频率范围	123
(M) 相位特性	123
(N) 阻尼	123
(O) 横向灵敏度比	123
(P) 使用温度范围	123
(Q) 变形灵敏度	123
(R) 其它	124
13.3 振动测量仪及其校准	124
13.3.1 振动测量仪	124
(A) 振动显示仪	124
(B) 显示仪表	127
13.3.2 振动测量仪的校准	130
(A) 比较校准	130
(B) 绝对校准	138
参考文献	142
第十四章 振动试验	144
14.1 振动试验的目的	144
14.2 振动试验方法	145
14.2.1 振动环境的模拟	145
(A) 用正弦波模拟	146
(B) 用宽带随机波模拟	157
14.2.2 振动试验方法	158
14.2.3 振动试验规范	158
14.3 振动试验机	160
14.3.1 机械式振动台	161
(A) 不平衡重块式	161
(B) 凸轮式	162
14.3.2 电动液压式振动台	163
14.3.3 电动式振动台	167
14.3.4 高声强振动发生装置	173
14.3.5 辅助振动台	176

14.3.6 振动台的控制	178
(A) 正弦波振动的控制	179
(B) 功率谱密度的控制	180
(C) 非平稳随机波的波形再现	180
(D) 数控振动台	181
14.3.7 振动台的安装	182
14.4 机械阻抗的测量	183
参考文献	188
第十五章 振动数据处理	189
15.1 统计处理方法	189
15.1.1 振动数据的表示及其函数的基本形式	189
15.1.2 振幅的表示方法	191
15.1.3 周期函数的分析	193
(A) Fourier 级数	193
(B) Fourier 积分	194
(C) 周期函数的均方值	196
(D) 取样频率和取样定理	198
15.1.4 统计分析	201
(A) 随机函数的统计表示	201
(B) 概率密度函数和概率分布函数	202
15.2 频谱分析 (方法和装置)	207
15.2.1 功率谱密度	207
15.2.2 频率分析与功率谱密度的测量	209
(A) 滤波器特性	210
(B) 多节滤波器式频谱分析	213
(C) 扫描式频谱分析	214
(D) 时间压缩型频谱分析 (实时频谱分析)	215
(E) 随机数据的平均化	218
15.2.3 带宽和频率分辨率	221
15.2.4 权函数 (或窗函数)	222
15.3 相关分析 (方法和装置)	226
15.3.1 自相关函数	226
15.3.2 互相关函数	230

15.3.3	相关函数的计算	233
(A)	自相关函数的数值算法	233
(B)	模拟的方法	234
(C)	二、三种典型的运算框图	236
15.3.4	相干函数	237
15.3.5	快速 Fourier 变换 (FFT) 及其算法	239
(A)	离散的 Fourier 变换 (DFT)	239
(B)	Cooley-Tukey 的 FFT 算法	240
15.3.6	褶积积分	244
15.4	数据处理的例子	246
15.4.1	数据处理装置的例子	246
(A)	跟踪滤波器的例子	247
(B)	快速 Fourier 分析仪的一个例子	247
(C)	通用的振动数据处理系统	250
15.4.2	应用示例	251
(A)	频率分析和功率谱技术的应用	251
(B)	相关分析技术的应用	254
(C)	相干技术的应用	259
	参考文献	261
第十六章	冲击试验	263
16.1	冲击试验的目的	263
16.1.1	冲击试验的背景	263
16.1.2	冲击试验的目的	264
(A)	合格与否的试验	264
(B)	设计评价试验	265
16.2	冲击试验方法	266
16.2.1	按试验机所确定的试验方法	267
16.2.2	按冲击脉冲所确定的试验方法	268
(A)	确定冲击试验用的脉冲	268
(B)	确定脉冲的主要规范的试验方法	276
16.2.3	按冲击谱所确定的试验方法	283
16.2.4	其他	284
16.3	冲击试验设备	286

16.3.1	冲击试验设备的分类及其特性	286
16.3.2	规范上所规定的试验设备	288
16.3.3	产生冲击脉冲的试验设备	290
(A)	摆式	291
(B)	跌落式	292
(C)	其他形式的脉冲产生装置	299
16.3.4	冲击谱的产生装置	307
16.3.5	其他的试验装置	307
(A)	汽车安全试验装置	307
(B)	缓冲材料试验装置	307
(C)	包装试验装置	307
(D)	与振动组合的试验装置	308
	参考文献	308
第十七章 振动、冲击数据及其容许值		311
17.1	旋转机械、往复机械的振动容许值	311
17.1.1	制定容许值的目 的	311
17.1.2	历史的回顾	312
(A)	轴承振动	312
(B)	轴振动	312
17.1.3	判断的尺度 (测量单位)	313
(A)	位移振幅和振动烈度	313
17.1.4	测量点	315
17.1.5	测量条件	315
17.1.6	容许 (极限) 值 (以典型的标准为例)	316
(A)	轴承振动的容许值	316
(B)	轴振动的容许值	318
17.1.7	发现早期故障的手段	322
17.1.8	往复机械的振动	323
17.2	振动公害的容许值	324
	参考文献	329
第十八章 振动的环境评价		331
18.1	概述	331

XIV

18.2	振动感觉的产生	335
18.3	一般的振动感觉研究	337
18.4	振动的等感度曲线	339
18.5	IS-2631 存在的问题及其解决方法	345
18.6	复合正弦振动、随机振动等的评价法	346
18.7	测量全身振动用的测量仪器	349
18.8	超低频振动	352
18.9	手腕系的振动	353
	参考文献	356
第十九章 振动、冲击的隔离和阻尼		357
19.1	隔振理论	357
19.1.1	隔振的含义	357
19.1.2	振动传递率	357
19.1.3	防振橡胶的支承系统	359
19.1.4	阻尼器与弹簧组合的情形	360
19.1.5	弹簧颤动的影响	364
19.1.6	基础以弹簧支承的情形	365
19.1.7	基础是弹性体的情形	369
19.1.8	刚体的弹性支承的一般理论	370
19.1.9	非耦合支承	374
19.1.10	典型的弹性支承刚体的固有频率	375
	(A) 完全非耦合支承的情形	375
	(B) 弹性支承面在机械重心之下的情形	376
	(C) 倾斜支承	377
	(D) 惯性主轴相对于水平面倾斜的情形	380
	(E) 支承面倾斜的情形	382
19.1.11	机械防振支承的设计程序	383
19.2	防振橡胶	384
19.2.1	防振橡胶支承系统的特征	384
19.2.2	防振橡胶的选择	386
	(A) 形状的选择	386
	(B) 橡胶材料的选择	386

19.2.3 防振橡胶的设计	388
(A) 一般注意事项	388
(B) 橡胶的硬度	388
(C) 动弹簧常数与静弹簧常数	388
(D) 形状系数	389
(E) 容许应力	390
(F) 容许变形	390
(G) 衰减特性	390
(H) 弹性减弱	391
(I) 以防振橡胶作为支承装置的设计程序	391
19.3 金属弹簧	392
19.3.1 金属弹簧支承系统的特征	392
19.3.2 金属弹簧的弹簧常数	392
19.4 空气弹簧	394
19.4.1 空气弹簧的应用	394
19.4.2 空气弹簧装置的标准结构和作用	394
19.4.3 空气弹簧的特征	396
19.4.4 类型和结构	397
19.4.5 载荷特性、弹簧常数的计算公式	399
19.4.6 空气弹簧与辅助箱之间节流孔的最佳直径的计算公式	400
19.4.7 空气弹簧支承系统的实际设计	401
(A) 气源	401
(B) 空气弹簧本体只承受垂直方向载荷的情形	401
(C) 辅助箱的必要内容	402
(D) 起振动衰减作用的节流孔的设计	402
(E) 空气弹簧本体也承受水平载荷的情形	403
(F) 在水平方向产生较大的恢复力时, 空气弹簧装置的设计	405
19.5 其它的防振材料	406
19.5.1 海绵橡胶	406
19.5.2 毛毡	406
19.5.3 软木	407
19.6 振动阻尼	408
19.6.1 阻尼的种类和阻尼量	408

XV

(A) 库伦摩擦	408
(B) 粘性阻力	408
(C) 速度平方阻力	410
(D) 内部摩擦	410
(E) 结构阻尼	411
(F) 等效粘性阻尼	411
19.6.2 阻尼的特征	413
19.6.3 阻尼的效果	413
(A) 自由振动	413
(B) 强迫振动	414
(C) 自激振动	417
19.7 动力吸振器	418
19.7.1 定频率动力吸振器	418
19.7.2 离心摆式动力吸振器	419
19.7.3 具有粘性阻尼的动力吸振器	419
19.7.4 Houde 阻尼器	420
19.7.5 Lanchester 阻尼器	421
19.8 二自由度振动系统的阻尼效果	421
19.8.1 PQ 点理论	421
19.8.2 油阻尼器与承梁弹簧组合的情形	422
19.8.3 油阻尼器与轴弹簧组合的情形	423
19.8.4 摩擦阻尼器与承梁弹簧组合的情形	424
19.9 油阻尼器	425
19.9.1 类型和结构	425
19.9.2 速度-阻尼力特性	426
(A) 定面积的阻尼孔	426
(B) 圆锥阀、平阀	427
(C) 速度比例阀 (切口阀)	428
(D) 组合形式	429
19.10 空气阻尼器	430
19.11 摩擦阻尼器	430
19.12 电磁阻尼器 (磁阻尼器)	432
19.13 跌落引起的冲击	432

19.13.1 无阻尼情况	432
19.13.2 有阻尼情况	433
19.14 冲击隔离	435
19.14.1 冲击与缓冲	435
19.14.2 冲击传递率	437
19.15 缓冲装置的理论	439
19.15.1 缓冲装置的特性	439
19.15.2 各种缓冲装置的性能比较	440
19.15.3 弹簧-油压式缓冲装置的设计 (水平碰撞的情形)	441
19.15.4 缓冲装置的实例	443
参考文献	446
第二十章 旋转机械的振动和平衡	447
20.1 转轴的振动和临界转速	447
20.1.1 轴的弓状回旋运动	448
(A) 回转体的横向位移和倾角互不耦合的轴的弓状回旋振动	448
(B) 当回转体的横向位移和倾角耦合时, 轴的弓状回旋振 动, 回转体的动力学特性	451
(C) 回转体的不平衡引起的强迫振动	457
(D) 等截面轴弯曲振动的固有圆频率	459
(E) Dunkerley 经验公式	461
(F) Rayleigh 近似法	464
(G) 静挠度曲线的数值计算法	466
(H) 传递矩阵法	470
(I) 其他的临界转速	477
(J) 转轴的自激弓状回旋振动	479
20.1.2 轴的扭转振动	482
(A) 带两个圆盘的轴的扭转振动	482
(B) 带齿轮的轴的扭转振动	483
(C) 带多圆盘的轴的扭转振动 (Holzer 法)	483
20.2 旋转机械的平衡、平衡试验机	487
20.2.1 刚性回转体的不平衡振动和平衡条件	487
(A) 不平衡	487