

振动工程大全

上册

[日] 《振动工程大全》编辑委员会编

谷口修主编

机械工业出版社

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、航空等为对象，论述了振动的理论基础，振动与冲击的测量、数据处理和实验，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、随机振动等等。

本书可供从事机械、土木、建筑、船舶、航空等部门的工程技术人员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。上册为前十一章，下册为第十二章到全书末。

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

(上 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)

重庆印制一厂印刷

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 $21^{3/4}$ ·字数570千字

1983年2月重庆第一版·1983年2月重庆第一次印刷

印数0,001—7,100·定价2.65元

*

统一书号: 15033·5221

作者一覽表

田村	章義	東京工業大學教授、工學博士	(2,3,6.4 章)
高橋	伸	山形大學教授、工學博士	(4 章)
小堀	与一	金沢大學教授、工學博士	(5 章)
遠藤	満	東京工業大學、工學博士	(6.1 章)
菊地	勝昭	日立制作所	(6.2 章)
長松	昭男	東京工業大學副教授、工學博士	(6.3 章)
坂田	勝	東京工業大學教授、工學博士	(7 章)
小林	啓美	東京工業大學教授、工學博士	(8 章)
瀬尾	和大	東京工業大學	(8 章)
前澤	成一郎	山梨大學教授、工學博士	(9 章)
得丸	英勝	京都大學教授、工學博士	(10 章)
下郷	太郎	慶応義塾大學教授、工學博士	(11 章)
三浦	武雄	日立制作所、工學博士	(12 章)
古川	英一	中央大學教授、工學博士	(13,17.2 章)
尾上	賢	明石制作所	(14 章)
白木	万博	三菱重工業公司、工學博士	(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	労働省労働衛生研究所、 工學博士	(18 章)
国枝	正春	石川島播磨重工業公司、 工學博士	(19 章)
松平	精	石川島播磨重工業公司、 工學博士	(19 章)
太田	博	名古屋大學副教授、工學博士	(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	日本电信电话公社电气通讯研 究所、工学博士	(21.2 章)
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 壽芳	東京大学教授、工学博士	(24.1~3 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)

编辑干事

谷口 修 田村 章義 坂田 勝

译 者 序

在我国，振动工程问题已引起了科技界、各机械工业部门、一些高等院校的关注。并且，振动问题，如噪声等作为公害，与人民生活的关系十分密切。在向四个现代化进军过程中，振动工程已成为不可忽视的重要工程问题之一，需要广大科技人员去研究它、解决它、发展它。

我们所见到的国外振动工程巨著是为数不多的，将其译成中文出版的就更少了。日文《振动工程大全》是一部综合性的、紧密结合工程实际的名著，其理论依据充分，举例分析实际，论述振动问题较全面、系统。参加编写的作者是日本科学界、工业界从事第一线工作的教授、博士，此书既反映了他们每个人的专长，也反映了他们（近四十人）集体的智慧。我们感到：翻译此书对加速我国振动工程问题的研究与发展、促进中日两国科学技术的交流是有益的。

尽管我们在翻译、校对的过程中作了很大的努力，但由于水平有限，难免有不妥或错误之处，恳请读者批评、指正。

1979年9月

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，振动工程不断发展，也发表了许多论文、著作，日本大部分的大专院校都开设了振动工程的课程。在研究方面，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、复杂化方面的急速发展，使得振动问题不仅没有减少，反而明显地增加了。而且振动问题不仅是工业本身的问题，作为公害，与人民生活也是密切相关的。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、操作现场等各方面去。

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，到现在各种专门的领域也都已有专门的手册出版，并在各自的方面大力进行了科学技术的普及。然而，在振动工程的范围内，还没有一部很合用的手册。这些背景构成了编写这本振动工程学手册的动机。

本书以土木、建筑、船舶、飞行器为对象，把它们作为机械和结构物，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，研究解决问题的措施以及论述近代特别突出的各种振动问题，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手册问世，那将是可喜的。

编写的方针如下：

(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，尽量汇集成容易利用的公式、数据和图表等。读者若需要了解更深一些内容，可参阅每章的参考文献。

(3) 术语原则上采用日本工业标准 JIS-B0153 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，尽管已做了很大的努力，但不免一些重要的项目仍有遗漏，或者有重复及不完备之处，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谨表感谢。

《振动工程大全》编辑委员会

主编 谷口 修

1976 年 10 月

目 录

译者序

序

第一章 机械振动与冲击术语	1
(1) 一般	1
(2) 机械振动	4
(3) 冲击	16
(4) 传感器	19
(5) 平衡	21
第二章 单自由度系统的自由振动	31
2.1 无阻尼的自由振动	31
2.1.1 弹簧质量系统	31
2.1.2 扭转振动系统	32
2.1.3 摆	32
2.1.4 振动的能量	33
2.2 有阻尼的自由振动	34
2.2.1 粘性阻尼	34
2.2.2 临界阻尼	35
2.2.3 过阻尼	35
2.2.4 对数阻尼率	35
2.2.5 干摩擦	36
2.2.6 有粘性阻尼和干摩擦作用的系统	37
2.3 机械系统和电气系统的对应	39
参考文献	46
第三章 多自由度系统的自由振动	47
3.1 集中系统的振动	47
3.1.1 自由振动和固有模态	47
3.1.2 正则模态(固有模态)的正交性	50

3.1.3	主座标 (正则座标)	51
3.1.4	二自由度系统的例子	55
3.1.5	三自由度系统的例子	57
3.2	刚体运动	61
3.2.1	刚体的角动量和动能	66
3.2.2	欧拉角	66
3.2.3	运动方程式的表示	67
3.2.4	具有固定点刚体的运动方程式	69
3.2.5	回转圆盘的陀螺力矩	71
3.2.6	刚体的平面运动	72
3.2.7	刚体的空间运动(刚体的弹性支持)	75
	附表	79
	参考文献	85
第四章	分布系统的自由振动	86
4.1	解析法	81
4.1.1	Lagrange 函数	86
4.1.2	Lagrange 函数, 振动方程式, 特征函数 (杆的纵向振动)	87
4.1.3	耦合系统, 连续条件, 边界值	90
4.1.4	变截面杆的纵向振动	92
4.2	弦、膜的振动	93
4.2.1	弦的振动	93
4.2.2	膜的振动	93
4.3	直杆的振动	96
4.3.1	扭转振动	96
4.3.2	横向振动	97
4.4	曲杆的振动	108
4.4.1	圆弧杆的面内振动	110
4.4.2	圆弧杆的面外振动	114
4.4.3	椭圆弧杆	115
4.5	耦合系统的弯曲振动	117
4.5.1	连续梁、带集中质量的杆、阶梯杆的振动	117
4.5.2	构架	123

4.6	板的振动	126
4.6.1	面内振动	127
4.6.2	弯曲振动	129
4.7	壳的振动	142
4.7.1	圆筒	142
4.7.2	圆锥壳的振动	148
4.7.3	结论	152
	参考文献	153
第五章	强迫振动	155
5.1	单自由度系统的强迫振动	155
5.1.1	力引起的强迫振动	155
5.1.2	位移引起的强迫振动	163
5.2	二自由度系统的强迫振动	170
5.2.1	无阻尼的二自由度系统的强迫振动	170
5.2.2	无阻尼的动力吸振器	171
5.2.3	离心摆式吸振器	174
5.2.4	位移引起的二自由度系统的强迫振动	175
5.2.5	二质量挠性轴系的强迫振动	176
5.2.6	粘性阻尼的二自由度系统的强迫振动	184
5.2.7	粘性阻尼动力吸振器的最佳阻尼	185
5.3	连续体的强迫振动	191
5.3.1	连续体的强迫振动解	192
5.3.2	移动载荷引起的振动	209
(A)	载荷为一定的情况	209
(B)	移动的周期性外力	211
(C)	桥的移动载荷引起的挠度	213
(D)	弹性基础上的梁的振动	214
	参考文献	216
第六章	复杂系统的振动分析	217
6.1	经典方法	217
6.1.1	Rayleigh-Ritz 方法	217
(A)	原理	217
(B)	结构元件的振动能量及其应用例子	220

(C) 静挠度的方法	235
6.1.2 Galerkin 方法	237
6.1.3 频率合成法	240
(A) Southwell 方法(位能合成法)	240
(B) Southwell 方法(质量合成法)	243
(C) 串联结合形合成法	244
(D) 组合合成法	246
6.1.4 图解法	250
(A) 根据静挠度方法的情况	250
(B) 根据 Stodola 方法的情况	254
6.1.5 Holzer 方法	256
6.2 传递矩阵法	261
6.2.1 传递矩阵法的概念	262
(A) 状态向量	262
(B) 传递矩阵	263
(C) 传递矩阵的表示法	265
(D) 传递矩阵的结合	269
(E) 边界条件的应用	270
(F) 频率方程式	272
(G) 左端未知量的确定	272
(H) 各分割点状态量的确定	273
6.2.2 传递矩阵的推导方法	279
(A) 场传递矩阵	279
(B) 点传递矩阵	285
6.2.3 数值算法	287
(A) 传递矩阵的乘法	287
(B) 传递矩阵的归并	290
(C) 传递矩阵的无量纲化	291
(D) 频率方程式的解法	292
6.2.4 中间支点和分支系统	296
(A) 分支系统	296
(B) 多层系统	301
(C) 刚支点	303

6.3	有限元法	313
6.3.1	序	313
6.3.2	运动方程式的建立	314
(A)	连续系统的离散化表示	314
(B)	元素特性	316
(C)	强迫位移的运动方程式	319
6.3.3	构架结构	320
(A)	桁架(二元和三元)	320
(B)	均匀截面的直梁	324
6.3.4	平面问题	328
(A)	三角形元	328
(B)	矩形元	329
(C)	元素特性的组合例子	331
6.3.5	轴对称问题	335
6.3.6	三元问题	339
6.3.7	平板弯曲	341
(A)	矩形板元	341
(B)	三角形元	349
(C)	复合板	351
6.3.8	薄壳	352
(A)	轴对称壳	353
(B)	一般壳的平面元近似	354
6.3.9	特征值问题	356
(A)	以前的解法	356
(B)	同时迭代法和子空间迭代法	358
(C)	大自由度系统的简化	360
(D)	集中质量矩阵的应用	362
6.3.10	衰减振动系统的模态分析	363
(A)	自由振动	363
(B)	稳态强迫振动	364
(C)	响应	365
6.3.11	衰减系统的振动分析	365
(A)	阻尼矩阵	366

(B) 衰减振动的模态分析	367
6.3.12 逐次积分法	368
6.3.13 程序实例(一端固定的矩形平板的特征对分析)	369
6.4 导纳法	382
6.4.1 元素的机械阻抗和导纳	382
6.4.2 机械系统的等效电路	383
(A) 导纳的串联连接	383
(B) 导纳的并联连接	383
6.4.3 定理和应用例子	386
(A) Kirchhoff 定律	386
(B) 叠加定理	388
(C) 互易定理	389
(D) Ho-Thévenin 等效系统	390
6.4.4 等效的 π 系统和等效的 T 系统	392
6.4.5 四端网络参数	394
参考文献	395
第七章 瞬态响应	398
7.1 瞬态响应的分析方法	398
7.1.1 运动方程式	398
(A) 无阻尼系统的运动方程式	398
(B) 有阻尼系统的运动方程式	400
7.1.2 Laplace 变换	401
(A) Laplace 变换的定义	401
(B) Laplace 逆变换的定义	401
(C) Laplace 变换的基本性质	402
(D) Laplace 变换的公式表	405
7.1.3 单自由度系统的冲击响应和阶跃响应	417
(A) 冲击响应函数和传递函数	417
(B) 频率响应函数	419
(C) 单位阶跃响应	419
7.1.4 单自由度系统的瞬态响应	420
7.1.5 系统受基础激振的瞬态响应	422
7.1.6 冲击谱	422

7.1.7	图解法(δ 法)	426
7.2	瞬态响应的资料	428
7.2.1	满足初始条件的单自由度系统的瞬态响应	428
7.2.2	无阻尼单自由度系统的瞬态响应	429
(A)	冲击脉冲响应	430
(B)	对阶跃输入的响应	438
(C)	定速度或者定加速度输入	440
7.2.3	有阻尼的单自由度系统的瞬态响应	442
(A)	冲击脉冲响应	442
(B)	阶跃响应	445
(C)	有余弦力作用时的瞬态响应	445
(D)	通过共振点	446
7.2.4	多自由度集中系统和分布系统的瞬态响应	447
	参考文献	452
第八章	波动	453
8.1	波动的基本概念	453
8.2	弹性体的波动理论	454
8.2.1	应力	454
8.2.2	变形	455
8.2.3	应力和变形	456
8.2.4	弹性体的运动方程式	457
8.3	弹性体波	458
8.3.1	平面波和球面波	458
8.3.2	P波和S波	458
8.4	平面波的反射与折射	459
8.5	S波的多层反射	463
8.6	弹性表面波	468
8.6.1	Rayleigh波	469
8.6.2	Love波	471
8.7	表面波的频散	472
8.8	波动在传播过程中的衰减	474
8.8.1	波动的扩散引起的衰减	474
8.8.2	波动通过层边界面引起的外部衰减	474

8.8.3 由介质的粘性引起的衰减(粘弹性波)	475
8.9 波动的传播速度及其测定方法	475
8.9.1 直接求弹性波速度的方法	477
8.9.2 利用表面波频散曲线的方法	482
8.9.3 利用常时微动的周期特性的方法	482
8.9.4 利用采样资料的室内试验	483
8.10 地震波动	483
参考文献	486
第九章 非线性振动	487
9.1 概述	487
9.2 相平面的应用	493
(A) 由运动方程式的一次积分求轨道	494
(B) 等倾线法	496
(C) 相平面 δ 法	498
9.3 解析法	501
9.3.1 根据特殊函数的准确解	501
(A) 保守系统的自由振动	501
(B) 有阻尼振动系统的自由振动	507
(C) 强迫振动	508
9.3.2 迭代法	510
(A) Duffing 的方法	510
(B) Rauscher 的方法	511
9.3.3 摄动法	511
9.3.4 平均法	515
9.3.5 Bogoliuboff-Mitropolsky 的渐近法	523
9.3.6 谐波平衡法和 Ritz-Galerkin 法	530
9.3.7 等效线性化的方法	537
9.4 稳定性	539
9.4.1 自治系统中的奇异点的分类	539
9.4.2 Liapunov 的直接法	543
9.4.3 极限环的稳定性	543
9.4.4 非自治系统中的周期解及其稳定性	545
参考文献	551

第十章	自激振动	553
10.1	狭义的自激振动	553
10.1.1	常系数线性系统的稳定性	553
(A)	高阶微分方程式系统的稳定性	553
(B)	二阶系统的稳定性	555
(C)	常系数线性联立二阶系统的稳定性	556
(D)	联立一阶微分方程式系统的稳定性	558
10.1.2	极限环	560
(A)	极限环的存在	560
(B)	极限环的稳定性	563
(C)	准线性振动	564
(D)	张弛振动	567
(E)	高阶系统的极限环	571
10.1.3	自激系统的强迫振动	573
10.2	参数振动	575
10.2.1	参数振动的一般理论	576
10.2.2	Hill 型参数激振系统的稳定性	579
10.2.3	参数激振系统的绝对稳定	583
10.2.4	弹性系统的动稳定性	589
10.2.5	参数激振系统的强迫振动	591
	参考文献	594
第十一章	随机振动	595
11.1	作为概率过程的随机振动	595
11.1.1	随机振动	595
11.1.2	概率密度函数和矩	595
11.1.3	平稳各态历经过程	600
11.1.4	Gauss 随机过程	601
11.2	功率谱和相关函数	603
11.2.1	功率谱密度函数	603
11.2.2	自相关函数	606
11.2.3	互相关函数	610
11.3	线性系统的平稳随机振动	613
11.3.1	响应的自相关函数和功率谱密度函数	613

11.3.2	输入与输出之间的互相关函数和互功率谱密度函数	615
11.4	线性集中系统	617
11.4.1	线性单自由度系统的响应	617
11.4.2	振动隔离问题	620
11.4.3	紊流引起的振动	623
11.4.4	车轮的接地力	628
11.4.5	线性二自由度系统的响应	631
11.5	线性分布系统	633
11.5.1	支点激振的弹性梁	633
11.5.2	受集中载荷的弹性梁	637
11.5.3	具有外部阻尼的弹性梁	641
11.5.4	具有集中阻尼器的弹性梁	643
11.6	具有多个输入的线性系统	647
11.6.1	具有两个输入的线性系统的响应	647
11.6.2	具有两个输入的线性系统的输入与输出之间的相关性	652
11.6.3	具有 n 个输入的线性系统	654
11.7	防振支承系统	656
11.7.1	两点防振支承的刚体	656
11.7.2	两点防振支承的梁	660
11.8	具有分布输入的线性系统	668
	参考文献	678