

机械振动学

〔日〕井町 勇 编著

科学出版社

机 械 振 动 学

〔日〕井町 勇 编著

尹传家 黄怀德 译

科 学 出 版 社

1 9 7 9

内 容 简 介

本书系统地论述了机械振动的基本理论和分析方法，并结合实际介绍了它在各方面的应用。

全书共分十三章，首先介绍振动的数学基础，接着详细地论述了一自由度、多自由度以及弹性体的线性振动理论和分析方法。此外，对非线性振动、自激振动、冲击和缓冲等问题的分析方法也作了介绍，尤其对统计理论应用于机械振动作了仔细的分析。专门论述了往复机械和旋转机械的振动。最后，详细地介绍了振动测量的原理和方法。

本书可供物理、力学、电学、机械工程等方面的研究工作者，工程技术人员以及高等院校有关这方面专业的教师和学生参考。

井町 勇编著

機 械 振 動 学

朝倉書店，1964 年

*

机 械 振 动 学

〔日〕井町 勇 编著

尹传家 黄怀德 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

上海商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 5 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1979 年 5 月 第一次印刷 印张：15

印数：0001—39,400 字数：341,000

统一书号：15031·204

本社书号：1262·15—3

定 价：1.55 元

译者的话

本书是由井町 勇等七人编著的日文“机械振动学”一书译成中文的，它系统地论述了机械振动的基本理论和分析方法，并结合实际介绍了它在各方面的应用。

尽管过去已有相同书名的机械振动学的中译本，然而，这本日文机械振动学有它的独特之处，它反映了近代机械振动学方面发展的新水平。其特点是：基本概念明确，各章节写得紧凑严密，又是一个有机的整体；既有理论阐述，又有试验方法的介绍。读者既可系统地阅读，又可有选择性地阅读其中的某一章节，每一章均可视为一部独立的著作。另外，这本书既可作为教学上的参考书，也可作为工程应用的参考书。

本书对了解、研究机械学、电学、物理学中出现的振动问题提供了足够的基本知识，这些基本知识与工程实践相结合，对解决、掌握工程中的机械振动问题将起到它的应有的作用。

尽管译者在翻译过程中，力求保持原文风格，又要照顾中文的习惯以及使工程术语统一，但由于译者的专业技术水平和日文水平所限，肯定会有不少缺点和错误之处，衷心地希望读者批评指正。

一九七六年五月

目 录

绪论	井町 勇	1
关于振动问题		1
自由振动		1
强迫振动		2
自激振动		3
波动与冲击		3
第一章 振动的数学基础	市川邦彦	5
§ 1.1 振动问题的微分方程式		5
§ 1.2 常系数线性常微分方程式的解法		6
§ 1.3 解微分方程式的示例		8
§ 1.4 权函数		12
§ 1.5 拉普拉斯变换法		14
§ 1.6 用拉普拉斯变换解微分方程式		16
§ 1.7 拉普拉斯逆变换		18
§ 1.8 传递函数		20
§ 1.9 频率响应		21
第二章 一自由度的振动系统	井町 勇	25
§ 2.1 运动方程式		25
§ 2.2 保守场的自由振动		26
2.2.1 不属于振动问题的振动		26
2.2.2 保守场的含义		27
2.2.3 具有线性恢复力时的解的形式和振动特性		27
2.2.4 例		29
2.2.5 具有非线性恢复力的自由振动		34
2.2.6 动能是 u 的函数的一般的力学系统		38

§ 2.3	阻尼和有阻尼的自由振动	40
2.3.1	阻尼的种类	40
2.3.2	粘性阻尼的振动(外部阻力)	41
2.3.3	粘性阻尼的振动(弹性机构的内部阻力)	42
2.3.4	具有常对数衰减率的阻尼振动	43
2.3.5	具有固体摩擦的阻尼振动	44
2.3.6	与速度的平方成正比的阻力——近似解法	44
2.3.7	按斜角坐标图示阻尼振动	47
§ 2.4	强迫振动	49
2.4.1	序	49
2.4.2	具有粘性阻尼的振动系统的强迫振动	50
2.4.3	具有常对数衰减率的振动系统的情况	55
2.4.4	具有固体摩擦的情况	56
2.4.5	考虑等效粘性阻力的近似方法	61
2.4.6	过渡响应问题和共振的扩大	62
2.4.7	非线性弹性系统的强迫振动	63
§ 2.5	自激振动	68
2.5.1	恢复力的滞后作用	68
2.5.2	恢复力, 还有与位移成正比的外力, 其相位差 90°	69
2.5.3	松弛振动	70
2.5.4	实际的固体摩擦	71
第三章	多自由度系统的振动	池谷和夫 73
§ 3.1	振动的自由度	73
§ 3.2	自由振动	73
§ 3.3	正则振型和广义坐标	76
§ 3.4	强迫振动	77
§ 3.5	拉格朗日方程式	80
§ 3.6	电路模拟	83
§ 3.7	机械回路及其元件	85
§ 3.8	旋转振动系统	89
§ 3.9	声响回路及其元件	90
第四章	弹性体的振动	西村 融 96

§ 4.1 弦、索的振动	96
4.1.1 从多自由度系统到连续体	96
4.1.2 弦或索的运动方程式	102
4.1.3 近似计算	106
§ 4.2 直杆振动	110
4.2.1 直杆的纵向振动	110
4.2.2 直杆的扭转振动	113
§ 4.3 直杆的横向振动	115
4.3.1 直杆的横向振动	115
4.3.2 直杆的瞬态横向振动	119
§ 4.4 固有频率的近似计算方法	122
4.4.1 里茨方法	122
4.4.2 变剖面杆的横向振动	124
§ 4.5 杆的耦合振动	126
§ 4.6 膜和平板的振动	129
4.6.1 膜的振动	129
4.6.2 平板的弯曲振动	131
§ 4.7 强迫振动	137
§ 4.8 剪切力和转动惯性的影响	140
第五章 振动的一般理论 滝沢英一	143
§ 5.1 振动和波动	143
§ 5.2 拉格朗日运动方程式和哈密尔顿正则方程式	146
§ 5.3 平衡点附近的振动	166
§ 5.4 振动方程式的一般形式和格林函数	176
§ 5.5 传递函数的方法	182
§ 5.6 线性弹性链的振动	189
§ 5.7 参数共振	197
§ 5.8 受随机外力作用的振动系统	203
第六章 往复机械的振动 杉山善幸	211
§ 6.1 活塞-曲柄机构的动力学	212
§ 6.2 直立式发动机的平衡	220

§ 6.3	曲柄轴的扭转振动	225
§ 6.4	扭转振动阻尼器	237
第七章	回转机械的振动	山本敏男 244
§ 7.1	回转轴的临界速度	244
§ 7.2	回转体的失衡及回转机械的均衡	247
§ 7.3	回转运动和平移运动的对比	253
§ 7.4	回转体力学	253
§ 7.5	由轴承座的刚度引起的振动	263
§ 7.6	由滚珠轴承引起的各种振动	265
§ 7.7	偏平轴的振动, 运动的稳定性	268
§ 7.8	转速的周期性变化所引起的振动	273
§ 7.9	由轴刚度的非线性引起的振动	275
§ 7.10	由自激振动引起回转轴的振动	277
7.10.1	由轴的材料滞后现象引起的回旋运动	280
7.10.2	油膜振动	282
7.10.3	由轴瓦内面与轴之间的干摩擦引起的振动	282
第八章	非线性振动	滝沢英一 284
§ 8.1	非线性振动与线性振动	284
§ 8.2	关于非线性振动系统的近似解法	286
§ 8.3	摄动法	288
§ 8.4	WKB 法	294
§ 8.5	PLK 法	297
§ 8.6	KBM 法	307
§ 8.7	振动的稳定与不稳定	314
§ 8.8	庞特里雅金的最大原理	325
第九章	自激振动	井町 勇 333
§ 9.1	序	333
§ 9.2	一自由度振动系统的自激振动	334
9.2.1	负阻尼项	334
9.2.2	受恢复力作用的时间滞后——关于车床的振动	335
9.2.3	有相位差的恢复力	336

9.2.4	由实际的固体摩擦引起的自激振动	336
9.2.5	在流体中物体颤振的例子	336
9.2.6	可变长度的单摆	337
9.2.7	用二阶线性微分方程式表示的运动稳定性	340
§ 9.3	多自由度的自激振动	341
9.3.1	二自由度的理论基础	341
9.3.2	自行车的方向稳定性问题	343
9.3.3	对板颤振的初步处理	346
9.3.4	对板颤振的进一步处理	348
9.3.5	直升飞机——旋翼的地面共振	350
第十章	运动的稳定问题	山本敏男 355
§ 10.1	运动的稳定、不稳定	355
§ 10.2	运动的稳定、不稳定的判别	362
§ 10.3	不稳定振动的例子	364
10.3.1	鼓风机的振动	364
10.3.2	调速机的振动	367
第十一章	振动的统计处理	市川邦彦 370
§ 11.1	序	370
§ 11.2	全程试验	371
§ 11.3	统计理论	375
11.3.1	随机过程	375
11.3.2	自相关函数	378
11.3.3	功率谱密度	381
§ 11.4	统计理论的应用	387
11.4.1	频率分析	387
11.4.2	对道路好坏程度的衡量	390
第十二章	冲击与缓冲	井町 勇 392
§ 12.1	序	392
12.1.1	固体的碰撞	392
§ 12.2	对一自由度振动系统的冲击	393
12.2.1	对一自由度振动系统的外力冲击	395
12.2.2	支撑点的强迫位移, 带有弹簧的冲击	397

12.2.3	质量冲击	398
§ 12.3	对均匀杆的纵向冲击(附张紧的弦的横向冲击)	400
§ 12.4	杆的纵向冲击与失稳	403
§ 12.5	均匀杆的横向质量冲击	406
§ 12.6	缓冲	408
12.6.1	缓冲和防振	408
12.6.2	无阻尼器的系统的缓冲	409
12.6.3	阻尼的效果	410
12.6.4	形状以及塑性变形的影响	413
12.6.5	对下落物体的缓冲和缓冲效率	414
第十三章	振动测量方法和试验方法	池谷和夫 416
§ 13.1	振动测量	416
§ 13.2	振动变换器	418
13.2.1	可变电抗、可变电阻变换器	418
13.2.2	主动型变换器	423
§ 13.3	振动测量装置的特性	424
13.3.1	灵敏度	424
13.3.2	最小工作值	425
13.3.3	线性范围	425
13.3.4	使用频率范围	425
13.3.5	相移特性	426
13.3.6	环境条件	427
13.3.7	物理性质	427
§ 13.4	机内振动仪	427
13.4.1	示振仪	428
13.4.2	示振计	429
13.4.3	簧片式频率计	432
13.4.4	其它	433
§ 13.5	可变电容变换器	434
13.5.1	变换器元件	434
13.5.2	电路	437
§ 13.6	电感变换器	441

13.6.1	电动形变换器	441
13.6.2	电磁形变换器	443
13.6.3	涡电流形变换器	444
13.6.4	磁致伸缩形变换器	445
13.6.5	互感形变换器	446
13.6.6	差动式变换器	446
13.6.7	可变磁阻变换器	447
§ 13.7	压电型交换器	448
13.7.1	压电形加速度计	449
13.7.2	压敏电阻式加速度计	452
§ 13.8	应变片式变换器	454
13.8.1	应变片	454
13.8.2	应变片的安装	456
13.8.3	电路	457
§ 13.9	其它形式的变换器及振动测量方法	460
13.9.1	可变电位计式变换器	460
13.9.2	电化学变换器	460
13.9.3	电子管式变换器	463
13.9.4	光导发光元件	464
13.9.5	光干涉仪方法	464
13.9.6	微波、超声波方法	465
§ 13.10	振动频率分析和记录	466
13.10.1	频率分析仪	467
13.10.2	磁带录音机	467
13.10.3	高速电平记录仪	468

绪 论

关于振动问题

所谓振动，就是物体或某种状态随着时间往复变化的现象。这种类型的运动现象有其本身自然引起的，也有从其它方面强迫引起的。这些现象在自然界中，都非常广泛地存在着。声、光、电磁波等等，就是在广泛意义上的振动现象。它们使我们在各个方面受到了益处，然而，其反面，例如地震、波浪、机械和运输机的振动等等，它们在多数场合是有害的，给予我们不舒适感，使机械的性能和精度受到损失，还有，由于疲劳，使机械强度下降，不但如此，只要物体引起强烈振动就会立即导致破坏。

在某些场合，我们可把这样的振动，有效地加以利用，或者，在某些场合，防止这样的振动使其变为无害。这样做在多数情形下是必要的，而且，不论从哪一方面讲，关于振动问题应阐明其力学原理，研究其力学内容，使它造福于人类。这都是非常重要的，从而，它成了各种工程领域中的特别重要的课题。

自由振动

在自然界中存在着能量，在力学中存在着稳定状态，这都是很有趣的事情，从这两方面可引出丰富多彩的力学现象。假如没有稳定的平衡状态，那末，我们眼前的世界就成了持续变

化的完全不同的世界了。然而，具有能量的力学系统也不可能总是处于静止的平稳状态，换句话说，力学系统存在运动。当力学系统运动时，力系就有了所谓的动能。此外，当力系离开平衡状态的位置时，力系的状态具有向平衡状态的位置移动的性质，这种性质可看作是力系中存在的潜在势力，把这种势力称为势能。

为了深入讨论自然现象，就需具备关于物质和质量的定义，还需有关于热的、电磁的、化学的能量等等各种能量形态的知识。而本书主要研究机械振动，因此，这里仅就机械振动进行讨论。某一物体从其平衡位置偏移时，假如其平衡状态是稳定的，那末，就有力作用，想把物体恢复到平衡位置。其结果物体确能恢复到平衡位置，不过，这时物体由于获得了动能，物体就不能在平衡位置静止，而是越过平衡位置（称为平衡点）继续运行，即运行到相对于平衡点的反方向的位置，接着，力系又受向着平衡点的力作用，力系又开始按反方向运动。这样的运动就是自由振动。这种振动现象就是由上述两个性质所引起的，它们不仅在各工程学领域中，也在各种各样的领域中存在着，并处于稳定平衡状态，这些已成为经常看到的力学现象了。这种振动被称为自由振动或自然振动。

强迫振动

人类的特征是能创造良好的旋转机构，这种说法也许有点奇特吧。诚然，在自然界中，存在天体的旋转现象，但并没有见到有旋转轴。动物的身体是如此地精巧，不论手脚，还是心脏，构成了往复运动的力学系统。人类发明了绕轴旋转而又效率高的机构，可以毫不夸张地说，它们奠定了今日的机械文明的基础。而这样的机构不同于前面所述的自由振动，它

是另一种振动问题。它们大部分构成了强迫振动的振源，也就是说，假如把旋转体置于水平，其中有一点作旋转运动，当该旋转体的质量分布不均匀时，则产生激振力。前面所述的自由振动系统当受到激振力作用时，由此，就产生了另一种感兴趣的振动现象。当激振力是从系统之外作用于系统时，则产生系统的强迫振动，这时的振动称为强迫振动。

自 激 振 动

按初等力学考虑，某种定常的因素影响，对于力学系统就有一种定常的结果体现出来。例如，用乐弓从静态拉小提琴的弦，由于摩擦力的作用，可以想象的弦略微只往侧向呈“<”字形张紧，但事实不是按想象那样，弦由振动而发出了声音。静态的乌云，从空降雨，不是均匀地而是呈粒状下雨，这不能只用水份的过饱和这样的事实来说明。说明“金平糖”的多角状，单从热传导或蒸发理论也显得不够。这些例子，从一点点因素开始，而后，复杂地纠缠一起，最后，影响到系统的性质有大的变化。对于系统，仅仅有一点点干扰的迹象就引起大振动现象的发生，这种振动现象称为自激振动，较合适的说法，把它称为不稳定振动为好，它成为重要的振动问题之一。

波 动 与 冲 击

对在介质中引起干扰造成波，并在介质中传播的波动现象，或者打击物体，或者用其它方法，把急剧的影响给予冲击情形下的振动系统的做法，或者对防止冲击结果恶化的方法，即缓冲现象等等，都是与振动有关的待研究的问题。

振动学的内容，一般说来，就是如上所述的内容，但它在

机械力学、流体力学、声学、电学、自动控制等各个领域中有比较重要的地位,并且人们只对这些方面有较大的兴趣。

井町 勇

第一章 振动的数学基础

§ 1.1 振动问题的微分方程式

在图 1.1, 质量 M 支持在弹簧(弹簧常数为 K)和阻尼器(阻尼系数为 D)之间. 取平衡位置作为基准, 质量向下位移为 x , 当力 $f(t)$ 作用于质量时, 下列方程式成立.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + Kx = f(t) \quad (1.1)$$

$f(t)$ 称为强迫力, $f(t) = 0$ 时的振动称为自由振动. $f(t)$ 表示为正弦波 $F \cos \omega t$ 的振动称为强迫振动.

在图 1.2 的电路中, 设驱动电压为 $v(t)$, 回路电流为 i , 得如下方程式

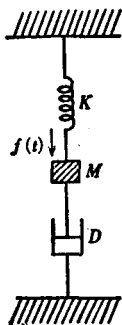


图 1.1

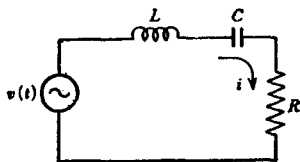


图 1.2

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = v(t) \quad (1.2)$$

如果, 电容 C 的充电量为 q , 由于 $i = dq/dt$, 则(1.2)式表示为

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = v(t) \quad (1.3)$$

对图 1.3,

$$L \frac{di}{dt} + Ri = v(t) \quad (1.4)$$

成立.

对图 1.4,

$$Ri + \frac{1}{C} \int i dt = v(t) \quad (1.5)$$

成立.

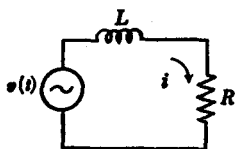


图 1.3

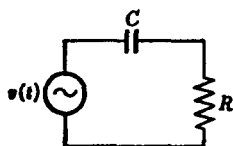


图 1.4

我们知道, 上述问题均可表达为具有常系数的线性常微分方程式. 线性常微分方程式的解由两部分组成. 其一表示为 Xe^{pt} 形式的项, 称为过渡项. 微分方程式为 n 阶时, 特殊情况除外, 过渡项变成 $\sum_{i=1}^n X_i e^{p_i t}$ 的形式. 其二, 与右边的强迫力具有相同的时间函数形式, 称为平稳项.

§ 1.2 常系数线性常微分方程式的解法

过渡项满足微分方程式的右边为零的方程式. 例如, 以 $x = X_i e^{p_i t}$ 代入(1.1)式的右边为零的方程式, 则

$$(M p_i^2 + D p_i + K) X_i e^{p_i t} = 0 \quad (1.6)$$

成立. 若 X_i 不为零, 对任何的 t 值, 要(1.6)式成立, 必定

$$M p_i^2 + D p_i + K = 0 \quad (1.7)$$