

应用机械振动学

[美]D. V. 哈通 著

机械工业出版社

应用机械振动学

[美]D. V. 哈通 著

桑杰扎布 姜衍礼 译



机械工业出版社

APPLIED MECHANICAL VIBRATIONS

David V. Hutton, Ph. D.

College of Engineering

Clemson University

* * *

应用机械振动学

[美]D. V. 哈通 著

桑杰扎布·姜衍礼 译

*

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 787×1092 1/32·印张13¹/₄·字数290千字

1985年10月北京第一版·1985年10月北京第一次印刷

印数 0.001—4,050·定价 3.15 元

*

统一书号：15033·6030

前 言

本书源自我在振动学方面的一本讲义，那本讲义曾被用作我在菲吉尼亚工业学院和州立大学讲授机械振动课程的基础。因此可以说这本书是我在振动分析领域里教学、研究和在工业上的实际经验的集成。我的主要目的是要严整有序地介绍振动的基础理论，并通过讨论、举例和学生练习题来体现这些理论的实际含义。为了有助于基本的理解，我作了一些详细的数学推理。不过，某种结论一旦建立，后面的相似性质，就采用类比法去解，以避免不必要的重复。本书不打算涉及振动的全部领域。但它包括了其中重要的并对有成效地研究某些专门的高级课题所必需的基本方面。

要想很好地用这本书，必须预先具备静力学、动力学、材料力学、微积分学和微分方程等方面的知识。本书可以作振动学的两段教程序列使用，它们分别适用于低等的和高等的程度。第二段教程可以作为高年级的选修或重设课，为高年级学生和研究生开设。

第一章是一维运动和二维运动牛顿力学的简要复习。我认为这种复习是必要的，因为学生正式的动力学课程可能已经过去有一年了。为了顺应公制化的趋势，本书兼用国际标准（SI）单位制和美国常用单位制。书中各处采用每一种单位制的例题和习题的数目大致相同。

第二章讨论常系数线性微分方程的基本解法。这部分材料是供工程专业的学生复习用的。在给工程技术专业高年级学生讲授振动学时，我感到这部分材料从头至尾对他们进行

复习。都是需要的。

第三章通过简谐振动阐明振动的基本理论。重点讲述固有频率与系统的物理参数之间的关系。另外，能量法的介绍，既提供了这种近似方法的知识，又说明了前面的无质量弹簧假设的效果。

第四章叙述了无阻尼单自由度系统对谐激振函数的响应。讨论了共振和拍运动。把无阻尼强迫振动单独进行讨论，是为了每次只引进一个新的概念。

第五章介绍机械系统中阻尼的概念，包括粘滞阻尼、结构阻尼和干摩擦阻尼。详细论述了粘滞阻尼系统的自由振动和强迫振动，以及等效粘滞阻尼的概念。另外，还包括了自激振动的简短论述。

第六章讲述旋转设备振动数据的现场测试与处理。目的是使学生接触到应用前面学过的理论，通过频率分析来识别振源的问题。本章还详细讨论了一般振动教科书中不常见的动态平衡过程，介绍了一种新的双平面平衡计算方法。

第七章论述了系统对非谐激振函数响应的分析方法。这些方法包括富里叶级数方法，卷积积分方法，拉普拉斯变换法和数值解法。

第八章介绍解两自由度系统的数学方法。介绍矩阵方法是为了使本章成为以后研究多自由度系统的基础。

第九章简要讲述电子模拟计算机的基本原理及其应用。我们假定读者以前没有这方面的知识，而且只限于介绍这种计算机在单自由度和两自由度系统中的应用。

第十章讨论多自由度系统的振动。重点是数字计算机解题的矩阵方法。讨论了FORTRAN矩阵运算程序，包括程序举例。

第十一章是连续系统的振动理论的引论。讨论了经典问题的精确解法，以及富里叶分析法和数值方法。

第一章到第七章的内容可做为第一阶段教程的基础。第八章到第十一章则可用作第二阶段教程。但是也可以根据课程的需要，采用几种选择方案。在有适宜设备的情况下，可以用第六章和第九章作为实际的实验室练习的基础，第八章可以取代第七章，作为第一阶段教程的内容，并不失连贯性。第八章、第十章和第十一章同样着重于学生使用数字计算机，在许多学程中，这几章的内容可以作为中等的或研究生程度的教程使用。

感谢我的很多同事和以前的学生，他们在不同程度上提出的批评和建议，对于本书的成书和改进都是很有帮助的。尤其感激Vicky Trump夫人为我打印了大部分草稿，还有Jeen Tulli夫人为我打印了最后的手稿。临末，感谢我的家人在我花很多时间写作本书时对我的耐心帮助和鼓励。

David V. Hutton

目 录

前言

第一章 引论	1
1.1 牛顿运动定律	1
1.2 质点运动; 牛顿第二定律	2
1.3 刚体的平面运动	4
1.4 刚体绕固定轴的转动	5
1.5 作为动力学过程的振动	7
1.6 单位制	8
第二章 二阶常系数常微分方程	11
2.1 齐次方程, $f(t)=0$	11
2.2 非齐次方程, $f(t)\neq 0$	17
2.3 求特解的方法	18
2.4 完全解和初始条件	21
2.5 结尾附言	24
习题	24
第三章 无阻尼单自由度系统的自由振动	25
3.1 简谐振动	25
3.2 解的物理意义	28
3.3 刚体的角振动	32
3.4 稳定条件	36
3.5 弹性轴的扭转振动	39
3.6 等价弹簧常数	41
3.7 能量法	44
习题	48
第四章 无阻尼单自由度系统的强迫振动	55

4.1 弹簧—质量系统对谐激振函数的响应	55
4.2 解的物理意义	57
4.3 共振	61
4.4 拍	63
4.5 刚体的强迫角振动	65
习题	68
第五章 有阻尼单自由度系统的振动	71
5.1 能量耗散元件	71
5.2 具有粘滞阻尼的自由振动	73
5.3 对数减缩率	78
5.4 结构阻尼	80
5.5 库伦阻尼	83
5.6 具有粘滞阻尼的强迫振动	86
5.7 频率比与阻尼因数对稳态响应的影响	91
5.8 力的传递与隔振	93
5.9 旋转件的不平衡	96
5.10 基础激振	99
5.11 自激振动	102
习题	103
第六章 旋转设备的振动分析	114
6.1 振动分析仪器	114
6.2 工况监视与频率分析	117
6.3 单平面平衡	121
6.4 单平面平衡的相向量计算方法	127
6.5 双平面平衡	130
习题	138
第七章 非谐激振函数的响应	141
7.1 周期函数的富里叶级数展开	141
7.2 对非谐周期性激振函数的响应	144

7.3	对单位冲量的响应	147
7.4	一般激振函数; 卷积积分	149
7.5	拉普拉斯变换方法	152
7.6	数值方法	156
	习题	160
第八章	两自由度系统的振动	165
8.1	无阻尼自由振动	165
8.2	主振型	168
8.3	通解和初始条件	173
8.4	耦合; 主坐标	179
8.5	有阻尼自由振动	185
8.6	无阻尼系统的强迫振动	193
8.7	无阻尼振动减振器	197
8.8	有阻尼两自由度系统的谐激振强迫振动	200
8.9	粘滞阻尼减振器	205
	习题	209
第九章	振动分析中的模拟计算机方法	219
9.1	运算放大器的特性	220
9.2	运算放大器的数学功能	221
9.3	系数分压器	231
9.4	解题电路图	235
9.5	计算机的定标	243
9.6	在两自由度系统中的应用	255
	习题	259
第十章	多自由度系统的数字计算机方法	264
10.1	运动方程——直接法	264
10.2	广义坐标	266
10.3	拉格朗日方程	269
10.4	微分方程的矩阵形式	275

10.5	无阻尼自由振动的固有频率	280
10.6	主振型的正交性	285
10.7	瑞利(Rayleigh)方法	288
10.8	FORTRAN矩阵运算程序	293
10.9	初值问题	305
10.10	模态矩阵的正则化	308
10.11	无阻尼系统的强迫振动	311
10.12	有粘滞阻尼的系统	317
	习题	320
第十一章 连续介质的振动		327
11.1	波动方程	327
11.2	纵向振动	335
11.3	扭转振动	340
11.4	梁的横向振动	343
11.5	富里叶分析	349
11.6	近似方法	355
	习题	360
附录A 数学知识		366
A.1	转动惯量	366
A.2	平行移轴定理	367
A.3	拍运动方程的推导	371
A.4	富里叶级数	371
A.5	拉普拉斯变换表	376
A.6	拉普拉斯变换的部分分式展开	377
A.7	矩阵代数	380
A.8	四次方程的根	388
附录B FORTRAN 程序		389
B.1	QUAD子程序	390
B.2	CUBIC子程序	391

X

B. 3	QUART子程序	393
B. 4	MMULT子程序	395
B. 5	MTSP子程序	395
B. 6	ATBA子程序.....	396
B. 7	SIMUL子程序	397
B. 8	EIGEN1子程序	399
B. 9	EIGEN2子程序	401
B.10	NORMAL子程序	404
B.11	MPRNT子程序	404
B.12	MAIN1模态分析程序	406
B.13	MAIN2模态分析程序	408
B.14	FREVIB程序	410
	参考文献	413

第一章 引 论

设备和机器的构件由于其固有的柔性，当受到内力系或外力系的作用时，就会发生相对运动。如果这种运动的性质是往复振荡的，就把这种运动称之为**振动**。虽然在振动起有益作用的场合可加以利用，但一般地说，振动是人们所不期望的，因为它会加速构件（例如轴承和齿轮）的磨损，产生过度的噪声，并把不希望有的力和（或）运动传递给其它设备。

1.1 牛顿运动定律

振动是一种动力学过程，因此，研究振动这种运动的基础是由牛顿（1642~1727）阐述的基本运动定律。牛顿基本定律可叙述如下：

第一定律 如果作用在质点上的合力为零，则原来静止的质点仍保持静止，而原来运动着的质点将继续做匀速直线运动。

第二定律 如果作用在质点上的合力不为零，则质点作加速运动，加速度的大小与合力的大小成正比，方向与合力的方向相同。

第三定律 两个质点之间的相互作用力大小相等，方向相反，作用在同一条直线上。

牛顿运动定律适用于质点，而质点被定义为，就物理意义而言其实际尺寸小到可认为只占有空间中一个点的质量单元。就很严格的意义来说，这相当大地限制了牛顿运动定律

在工程系统中的应用。但是，用于研究较大的有限尺寸物体的动力学特性的那些原理，仍是质点运动基本定律的扩充或改进。本章后面几节就来讲述刚体运动的原理。

1.2 质点运动；牛顿第二定律

牛顿第二定律的数学形式可以写成

$$\mathbf{R} = m\mathbf{a} \quad (1.1)$$

式中 $\mathbf{R}$ 是作用在质点上的合外力， m 是这个质点的质量，而 $\mathbf{a}$ 是质点的绝对加速度。因为力和加速度是向量，所以，牛顿第二定律是一个向量方程，处理这些量的时候必须严格注意它们的大小和方向。

如图1.1所示，假定质量为 m 的质点在平面内运动，图中为讨论方便起见，加上了直角坐标系。该质点受有力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 和 $\mathbf{F}_3$ 的作用，其合力为 $\mathbf{R}$ ，它的方向由从 x 轴开始量取的夹角 θ 决定（如图所示）。根据牛顿第二定律，质点加速度的方向应与合力的方向相同（示如图）。

为了便于数学运算，应将牛顿定律的向量形式改换成沿各坐标轴的等阶的数量方程。这种改换所依据的性质是：一个向量可以换成一组等价向量，如果这组向量的合向量与原向量相等。这样的一组等价向量就是原向量的分量。用这些相互垂直的向量分量（见图1.2）进行运算特别方便，这样，质点的合力和加速度都被分解成一对分别平行于相应坐标轴的向量分量，根据直角三角形计算公式，可得 $R_x = R\cos\theta$ ， $R_y = R\sin\theta$ ， $a_x = a\cos\theta$ 和 $a_y = a\sin\theta$ 。注意这里向量分量不必再用向量写法，因为这些分量的下标已经指明了这个分量的方向是平行于 x 轴还是平行于 y 轴，而且这个分量前的代数符号表明了这个分量是沿坐标轴的正方向还是负方向。

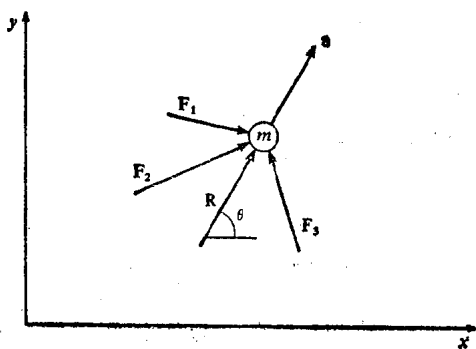


图 1.2

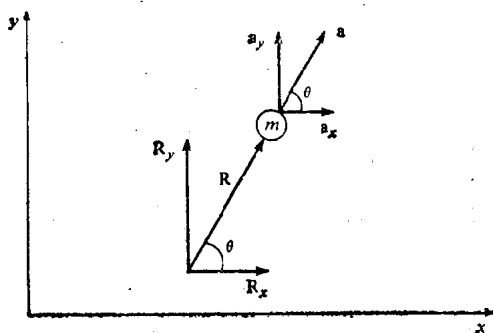


图 1.2

利用直角坐标分量，用于质点运动的牛顿第二定律可以写成如下两个数量方程

$$R_x = ma_x \quad (1.2)$$

和 $R_y = ma_y \quad (1.3)$

合力的大小与它的分量之间有如下关系

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (1.4)$$

类似地，对于加速度则有

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (1.5)$$

此外还有

$$\tan \theta = \frac{R_y}{R_x} = \frac{a_y}{a_x} \quad (1.6)$$

如果分量均为已知，则可用此式求出合力和加速度的方向。

1.3 刚体的平面运动

为了把有限尺寸的物体的运动同作用于物体的力系联系起来，必须用关于物体旋转运动的附加方程来补充牛顿第二定律。图1.3画出一个在外力 F_1 和 F_2 作用下进行平面一般运

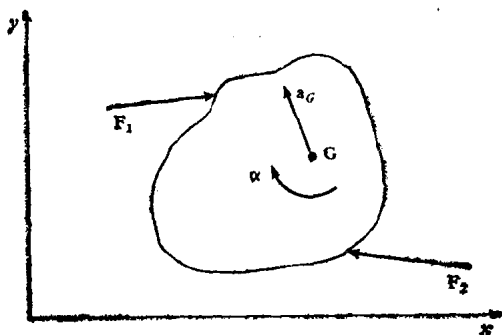


图 1.3

动的刚体。 G 是这个物体的质量中心（质心）。假定这个物体不受其它约束，故可在它所在的运动平面内自由地平移和旋转。

质心 G 的运动由牛顿第二定律决定如下

$$\Sigma \mathbf{F} = m \mathbf{a}_G \quad (1.7)$$

式中 a_G 是质心的绝对线加速度， m 是这个物体的总质量。

换句话说, 质心的运动等同于集中了物体总质量的质点在同样外力作用下的运动。用上一节的方法, 也可以把质心运动方程写成分量形式如下

$$\Sigma F_x = ma_{cx} \quad (1.8)$$

和 $\Sigma F_y = ma_{cy} \quad (1.9)$

一般地, 做无约束平面运动的物体, 既有平动也有转动。物体的平动已用方程 (1.7) 来描述, 而要确定其转动, 还需用另外的关系式。

正如任何一种大学生用动力学[⊖]教材中基本上表述的那样, 物体的旋转运动决定于

$$\Sigma M_O = I_O \alpha \quad (1.10)$$

式中 ΣM_O 是所有外力对质心的净力矩, I_O 是物体对其质心的转动惯量, α 是物体的角加速度。在平面运动中, 转动只可能是顺时针方向或逆时针方向, 所以只要采取适当的符号规定, 就可以用数量方程代替向量方程 (1.10)。

1.4 刚体绕固定轴的转动

刚体受有约束而绕固定轴的转动, 比一般平面运动具有更大的实际意义。图1.4a) 表示一刚体在外力 F_1 和 F_2 的作用下, 并被约束着绕一个过 C 点且垂直于运动平面的固定轴作转动。由于 C 点处的约束, 物体上每一点都作以 C 为圆心的圆周运动; 此时, 物体的运动称为纯转动。图1.4b) 所示为物体受力的自由体图 (分离体图), 它包含约束产生的未知反作用力 R_O 。应用上一节的方程得

⊖ 参见 F.P. Beer 和 E.R. Johnston, Jr., *Mechanics for Engineers*, vol. 2: *Dynamics*, 3d ed., Mc Graw-Hill, New York, 1976, Chap. 16.

$$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{R}_O = m\mathbf{a}_O \quad (1.11)$$

和 $\Sigma \mathbf{M}_O = I_O \alpha \quad (1.12)$

这表明原力系等价于由作用在质心上的单个力 $m\mathbf{a}_O$ 和单个力矩 $I_O \alpha$ 所组成的力系, 如图 1.4c) 所示。

利用向量可以由一组等价分量代换的原理, 我们把等价力 $m\mathbf{a}_O$ 分解成图 1.4d) 所示的两个分量。第一个分量 $m\mathbf{a}_G^n$ 从

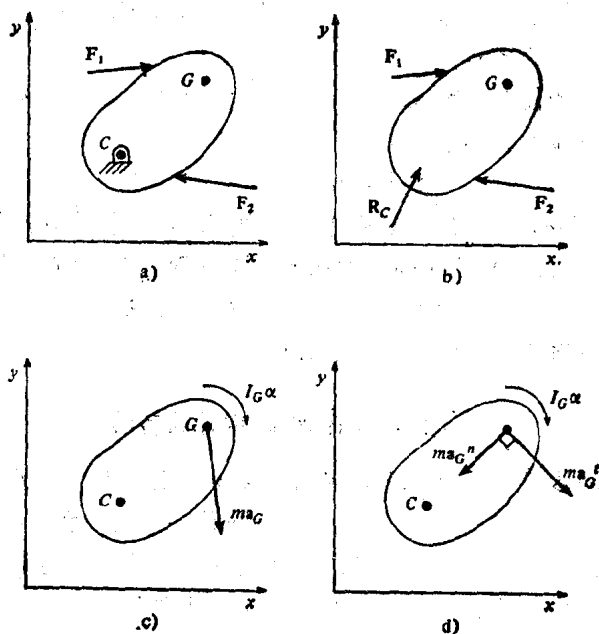


图 1.4

G 指向曲率中心 C 。分量 $\mathbf{a}_G^n$ 称为质心的法向加速度, 因为它的方向是法线方向, 即垂直于质心运动的轨迹。第二个分量 $\mathbf{a}_G^t$ 的方向沿 G 的运动轨迹的切线方向, 因此它垂直于 $\mathbf{a}_G^n$ 。分量 $\mathbf{a}_G^t$ 是质心的切向加速度。用 $R_O \alpha$ 表示转轴到质心的距