高等学校教材

振动分析与控制系统动力学

〔英〕C·F·比尔兹 著
宋筱平 译
宋庆国 校译
姚德源 审译

兵器工业出版社

振动分析与控制

系统动力学

（英）C.F.比尔兹 著 宋筱平 译

宋庆国 校译 姚德源 审译

兵器工业出版社

振动分析与控制系统动力学

〔英〕C.F.比尔兹著　宋筱平　译

宋庆国　校译　　姚德源　审译

•

兵器工业出版社　出版

（北京市海淀区车道沟10号）

新华书店北京科技发行所发行

国营五三一印刷厂印装

•

开本：787×1092 1/32　印张：7.19　字数：160千字

印数：1500册　　定价：1.45元

1989年6月第1版　1989年6月第1次印刷

ISBN 7-80038-055-6　/O·5（课）

内 容 简 介

本书是英国 Ellis Horwood Limited 出版的工程技术丛书之一。

书中抓住振动分析理论与自动控制系统动力学中的共同点，利用大量实例，以较小的篇幅介绍了这两门学科的基本理论，强调了它们之间的紧密联系。读者可通过对本书的学习全面掌握振动分析和控制系统动力学的基本理论，为这两门学科的进一步研究建立起坚实的理论基础。

本书可作为机械工程、建筑工程等有关专业高年级大学生和研究生的教科书和参考书，亦可供从事振动与控制方面工作的工程技术人员学习参考。

原作者序

当前，材料、土地及其它资源不但价格高，而且来源有限，加之分析方法和制造方法日益复杂化，促使轻型结构、高级能源和微调控制系统不断涌现，噪音、振动和控制系统的问题也随之越来越多。由于对性能水平的需求永无止境，所以将来这种趋势必然会更加明显。

因此，所有从事实际工作的工程师和科学家以及理工科大学生都应懂得：（1）预测结构中的振幅、动态应力和噪声级的动态分析方法；（2）确定控制系统特性的方法。掌握这一领域中的现有知识并对其有所研究也很重要。

由于控制系统动力学和弹性系统的振动分析有着不可分割的联系，所以把振动分析和控制系统动力学放在一起进行学习、从一本书中获得这种知识大有好处。在很多情况下，控制系统中的运动方程和振动分析中的运动方程相同，故用于一种系统的分析方法也可以用于另一种系统，反之亦然。并且，对一种系统的分析结果也适用于另一种系统。

本书旨在帮助从事实际工作的工程师和科学家以及理工科大学生全面了解振动分析和控制系统动力学中的有关原理，并为进一步的研究建立坚实的理论基础。书中例举了许多实例。

C.F.比尔兹

目　录

第一章　绪　　论

在大多数机械和结构中都不希望发生振动，因为振动不仅会产生不利于机械和结构正常工作的运动、噪声和动态应力，还会导致结构的疲劳和损坏、能量损失和性能降低。大量资料指出，各种构件发生过度振动都可能引起系统失效。由于振动会对机械和结构产生上述破坏作用，所以在机械和结构的设计过程中必须进行振动分析。这样，当需要消除或尽可能减少振动时，则很容易对设计方案进行某些修改。如果在设计之后再对产品样机进行改进，则往往花费多，且难以实现，一般不能得到令人满意的结果。目前，随着轻型结构和高速机械的不断涌现，振动分析日益重要，对振动分析的要求也在不断提高。

另一方面，自动控制系统所面临的要求也在不断提高。不管系统的功能如何，从人造卫星示踪，到轧钢机控制板厚，欲使系统更为便宜、更为紧凑，则必须针对其性能的改善做出不懈的努力。为了分析所提出的修改方案对系统响应的影响，以及预测新系统设计方案的响应，就要运用控制系统动力学进行严密的分析。

把振动分析和控制系统动力学放在一起进行学习，其理由如下：一方面，我们需要考虑的是与机械工程有关且使用机械模拟的控制问题，而不是作为电器工程中专门独立分支的控制问题；另一方面，描述振动系统特性和控制系统特性

的基本方程并无差异，只是侧重点不同解的形式也不同罢了，但它们都是动力学系统。这两种系统互相促进，共同发展。

按下列三步进行动态分析最为方便：

第一步　建立系统的数学模型即物理模型；

第二步　根据模型写出运动方程；

第三步　计算系统对具体激励的响应。

下面，对这三步较为详细地予以解释。

第一步　数学模型

建立任何实际系统的模型，必然要做许多简化系统的假设。例如：分布质量可以作为集总质量来处理；计算共振频率时可以忽略系统中阻尼的影响；非线性弹簧可以作为线性弹簧来考虑；有些元件的作用很小就可以全部予以忽略。另外，通常将质量单元运动的方向约束在对分析有直接意义的方向上。

通常建立的模型是简单模型与复杂且逼真的模型之间的折衷方案。前者易于分析但不精确，后者难于分析但却能获得有价值的结果。以分析汽车前轮的振动为例。图 1.1 所示为典型的悬挂系统。图1.2（a）为该系统极为简单的模型，它仅考虑垂直方向上的平移运动。显然，这个模型易于分析，但不能得到十分有用的数据。图1.2（b）所示的模型增加了分析的工作量，能够得到一些有意义的结果，但分析仍然仅限于垂直方向上的运动。图1.2（c）所示为更接近实际情况的模型，它研究的是整个汽车，考虑了车身的平动和转动。

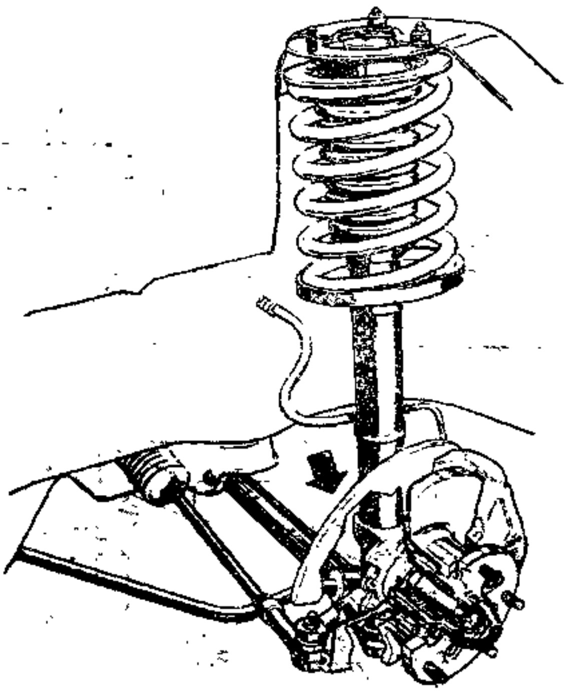
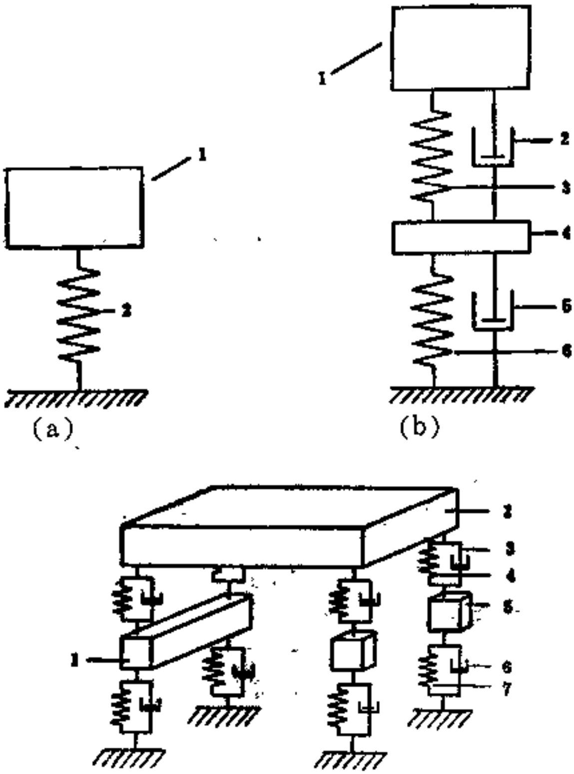


图1.1 典型的汽车前轮悬挂系统

如果在建立模型时不能把车身作为刚性质量来处理时，则有必要用有限元素法进行分析。

通常在分析控制系统时使用方框图模型。以图 1.3 所示的系统为例，该系统用来控制回转工作台围绕垂直轴所进行的回转运动及其位置。回转工作台可用于固定望远镜或火炮，也可作为机床的一部分用来装夹工件。图1.4所示就是用来分析该系统的方框图模型。



(c)

图1.2

（a） 最简单的模型——只能分析垂直方向的运动

1—车轮所支承的车身部分；2—弹簧

（b） 只能分析垂直方向的运动

1—车轮所支承的车身部分；2—阻尼器；3—弹簧；

4—非悬挂质量；5—车胎阻尼，6—轮胎刚度

（c） 能够分析垂直方向的运动、转动和倾斜度

1—后轴质量；2—车身质量；3—阻尼器；4—弹簧；

5—非悬挂质量（前轮），6—轮胎阻尼；7—轮胎刚度

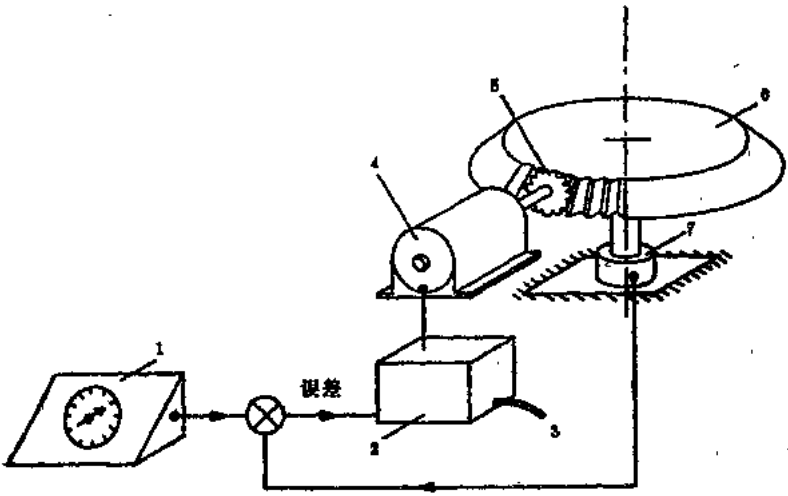


图1.3　回转工作台位置控制系统

1—期望位置选择器；2—放大器；3—电源；4—电动机；5—伞齿轮传动；6—回转工作台；7—位置传感器

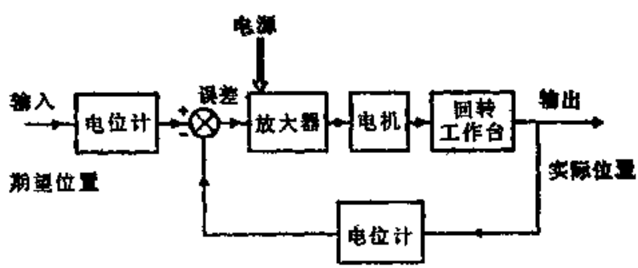


图1.4　回转工作台位置控置系统：方框图模型

模型参数

由于大多数模型是近似的，因而就可忽略微小影响，并

认为系统的运动与环境无关，所以通常对系统做常参数和线性假定。这意味着运动方程中的系数为常数，而方程本身为线性方程；这对简化分析很有帮助。分布质量常常用集总质量单元来代替，以便得到运动的常微分方程，而不是偏微分方程。通常参数的数值本质上可以从所分析的系统中直接获得。然而，模型中的系统参数有时也很难确定，这时需要进行直观估算，实质上是做工程裁决。

建立系统相应的数学模型不是一件容易的事情，但在着手进行分析的第二步之前，必须得到这种模型。后续章节中所介绍的大部分内容都是促使读者完成第二步、第三步所阐述的分析方法。充分了解这些分析方法，对建立第一步所提及的数学模型无疑会有极大的帮助。

第二步　运动方程

由数学模型获得运动方程的方法有数种，方法的选择常取决于具体模型和个人偏爱。例如，画出模型中各物体的自由体图进行分析，通常得到运动方程较快；但在某些情况下，使用能量法例如拉格朗日(Lagrange)方程可能更为有利。

根据运动方程可获得特征方程，也就是频率方程，进而可求得固有频率、振型、一般响应以及稳定性的数据。

第三步　对具体激励的响应

分析的第二步虽然可以得到固有频率、响应和稳定性的许多有用数据，但却不能得出实际系统对具体激励的响应。要确定各种系统输入所产生的动态应力或噪声级这样一些数

据，就必须知道上述实际响应。系统输入一般是以谐波函数、阶跃函数及斜坡函数表示的力或运动。通过求解包含上述激励函数的运动方程，就可以达到上述目的。

记住：

第一步　模型；

第二步　方程；

第三步　激励。

到目前为止，我们讨论了建立实际系统模型的几个例子及其分析原理，很明显，如果我们要具备分析系统模型的能力，最为重要的是能够分析第二章所研究的单自由度系统、第三章中的多自由度系统，以及第四章中的连续系统。第五章讨论的是分析自动控制系统的内容，这是需要专门予以研究的，尤其是稳定性问题和系统频率响应问题。第六章是为读者准备的一些习题。

第二章　单自由度系统的振动

单自由度系统只需一个坐标便可完全描述系统的运动，因而最容易分析。实际系统中，有的系统振动方向与激励有关，但经激励后其振动可用一个坐标进行描述；有的系统本来就很简单，例如钟摆。这些系统都可以建立单自由度模型。另外，进行具体振型分析时经常需要建立复杂系统的单自由度模型。由此可知，分析单自由度系统是振动分析的重要内容。

2.1　无阻尼自由振动

2.1.1　直线振动

图2.1所示的系统中，质量为m的物体沿固定水平面做自由运动；刚度为k的弹簧，一端固定，另一端与物体相连。开始时，若把物体置于平衡位置的右边，则会产生向左的弹簧力（恢复力），此力使物体获得向左的加速度。当物体运动至平衡位置时，弹簧力变为

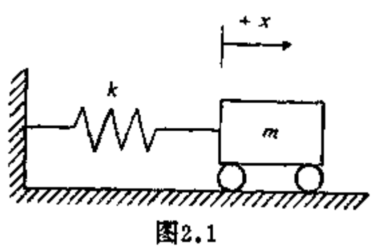


图2.1

零。由于具有一定的速度，物体将继续向左运动。这时，弹簧力向右，促使物体作减速运动。在这种弹簧力的作用下，物体停止运动，然后再向右运动，经过平衡位置返回初始位置。实

际上，系统中的阻尼会消耗一部分振动能量，所以物体不会完全回到初始位置。但如果阻尼很小，则其影响可以忽略不计。

若将物体向右移动距离x_0后释放，则一般位移x的自由体图见图2.2。

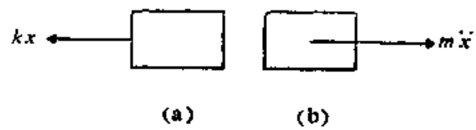


图2.2 （a）外力； （b）惯性力。

惯性力始终作用于x的正向上。当物体减速时，$\ddot{x}$将算出为负值。做下述假定：（1）物体的质量为常数——通常这是符合实际情况的，但正在燃烧燃料的火箭除外；(2)弹簧刚度k为常数——通常限于弹性极限之内(见2.1.3节)；(3)弹簧质量与物体质量相比可以忽略不计。

根据自由体图可知，系统的运动方程为

$$m\ddot{x} = -kx$$

或

$$\ddot{x}+\frac{k}{m}x=0 \qquad (2.1)$$

此式为简谐运动方程，其解为

$$x = A\cos\omega t + B\sin\omega t \qquad (2.2)$$

式中，A和B是可以通过初始条件求得的常数；ω为运动的圆频率。

将（2.2）式代入（2.1）式，有

$$-\omega^2(A\cos\omega t+B\sin\omega t)+\frac{k}{m}(A\cos\omega t+B\sin\omega t)=0$$

因为

$$A\cos\omega t+B\sin\omega t \neq 0 \text{（否则将不会有运动）}$$

所以