

机床振动学

徐耀值 编

14



江西高校出版社

振动学

徐耀值 编

13

江西高校出版社

内 容 简 介

《机床振动学》由华东交通大学徐耀信编著，它着重阐述了机械振动的基础理论，系统完整，逻辑推理清晰，分析论证均由浅入深，易于掌握。在此基础上论述机床振动的分类及鉴别方法，提出行之有效的减振措施，在生产中具有较大的实用性。书中还介绍了我国目前生产的多种类型的减振装置及其应用效果，便于选用。

本书可作大专院校机械专业学生的教材，也可供工厂、科研部门有关专业人员使用、参考。

机床振动学

徐耀信编著

江西高校出版社出版发行

南昌市北京西路77号

南昌市永和印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张9.125 字数210千字

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷 印数1—2,000册

ISBN7-81033-029-2/0·2 定价：4.40元

前 言

随着科学技术的发展,机械动力学在生产实际中的应用越来越广泛,发挥了重大的作用,使人们深刻地认识到掌握动力学知识的必要性。应用动态理论,深入分析机床振动的机理,提出切实可行的减振措施,是机床行业提高产品质量和工业环境保护的重要内容。

本书是根据多年的教学及科研实践而编写的,其初稿曾作讲义使用,效果较好。表明其体系、内容较适合于当前教学的要求,在目前众多阐述振动理论的书籍中颇具自有的特色。

本书力求系统完整,逻辑推理清楚。全书的分析论证均由浅入深,循序渐进,且公式推导清楚明白,并结合较多的例题来加深理解,因此易懂好学。对于机械振动基础理论作了较详尽的论述,例如对于多自由度的振动系统从最简单的两自由度入手,再推广到多于两自由度的系统来分析,便于理解和掌握。在深入分析主振型及它的正交性的基础上,介绍模态分析法,便能前后紧密结合、概念清晰。本书还提出机床振动的分类及鉴别法,减振的措施等。为紧密结合实际,还介绍了各种类型并在使用中能取得实效的减振装置。

本书适合高等院校机械专业学生及工厂、科研部门从事振动研究和有关行业人员的使用。

本书在撰写时,得到兄弟院校许多同志的大力支持,有关厂家提供了减振装置及其应用方面的宝贵资料,在此表示衷心

的感谢。

由于作者水平所限，本书不足和错误之处，望读者和同行们帮助、指正。

徐耀信

1991年1月

目 录

第一章 振动及其性质	(1)
§1-1 概述	(1)
一、振动的概念	(1)
二、振动的分类	(2)
三、振动系统	(4)
四、弹簧元件及组合	(7)
§1-2 简谐振动及其表示方法	(11)
一、简谐振动及其特性	(11)
二、简谐振动的表示方法	(12)
三、简谐振动的合成	(19)
§1-3 非简谐周期振动的谐波分析	(26)
第二章 单自由度系统的振动	(34)
§2-1 引言	(34)
§2-2 单自由度系统无阻尼自由振动	(37)
一、系统的动力学模型和运动微分方程	(37)
二、振动特性的讨论	(41)
三、扭转振动	(46)
四、计算系统固有频率的其它方法	(50)
§2-3 单自由度系统有阻尼自由振动	(61)
一、阻尼的作用与分类	(61)
二、系统的动力学模型和运动微分方程	(64)
三、振动特性的讨论	(69)
§2-4 单自由度系统受迫振动	(74)

一、受迫振动的概念	(74)
二、简谐激振力引起的受迫振动	(75)
三、阻尼理论	(97)
四、周期激振力引起的受迫振动	(103)
五、任意激振力引起的受迫振动	(106)
六、隔振原理	(114)
七、轴的临界转速	(121)
第三章 多自由度系统的振动	(127)
§3-1 概述	(127)
§3-2 两自由度系统振动	(128)
一、实例	(128)
二、两自由度系统的自由振动	(130)
三、两自由度系统的受迫振动	(138)
四、动力减振器	(144)
§3-3 多于两自由度系统的振动	(157)
一、系统运动方程的建立	(158)
二、固有频率和主振型	(178)
三、模态分析法	(198)
四、动力响应	(218)
五、计算固有频率的近似方法	(226)
第四章 机床振动	(237)
§4-1 概述	(237)
一、机床振动的形式	(237)
二、振动的来源和振动的利弊	(238)
§4-2 机床振动的特性	(239)
一、固有频率	(240)
二、阻尼率	(241)
三、当量静刚度	(241)
四、动刚度	(243)

§4-3 机床的受迫振动及其影响	(244)
一、机床受迫振动的类型	(244)
二、机床受迫振动的特征	(246)
三、齿轮的振动	(247)
四、振动对加工表面波纹度的影响	(248)
§4-4 机床的颤振	(250)
一、颤振的种类	(251)
二、颤振的理论分析	(257)
§4-5 机床切削的稳定性	(258)
一、机床切削稳定性的概念	(258)
二、振型关联效应的稳定性分析	(260)
§4-6 机床的减振	(267)
一、重新安排振动主轴的方位	(268)
二、增加等效静刚度	(270)
三、增加等效阻尼	(271)
四、使用机床减振装置	(274)

第一章 振动及其性质

§ 1-1 概述

一、振动的概念

在日常生活中，我们把隔一定时间 τ 重复某种状态的运动叫做周期运动。周期运动是在自然界中经常看到的非常普遍的运动，行星绕太阳的旋转运动，地球的自转或摆的运动，活塞的往复运动等都是周期运动。

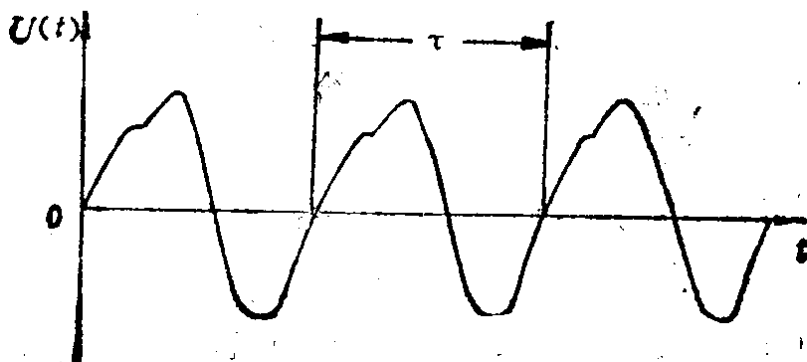
振动是指物体或某种状态随着时间往复变化的一种现象，它进行周期运动或近似于周期运动。在自然界，工程实际中广泛存在着。声音、光、电磁波，海浪等在广义上讲都是振动现象。

设某种状态为 U ，时间为 t ，周期为 τ ，则周期运动可用下式表示：

$$U(t) = U(t + \tau)$$

单位时间状态重复的次数为 f

$$f = 1/\tau$$



上图所示为周期运动的一个例子，图中取 t 为横坐标， $U(t)$ 为纵坐标。

机械振动也是这样一种特殊形式的运动，在运动过程中，机械系统将围绕平衡位置作往复运动，即周期运动。从运动学的观点看，机械振动是指机械系统的某些物理量（位移、速度、加速度），在某一数值附近随时间 t 的变化关系。它的存在，往往会造成一定的危害：振动会使机器的工作精度降低或根本无法工作，在工作过程中一些零部件过早的疲劳磨损、松动。振动还是机器产生噪声的根源，影响环境，危及人们的健康。

但是，振动也不是有害而无一益的，有许多机械利用振动现象实现其功能。例如：机械加工自动线中的一些上料和运输机构是利用振动理论设计的；铸造行业中的紧砂、落砂等工序是利用振动的机械来实现的；建筑、矿山等行业也都有许多利用振动进行工作的机械。

我们研究振动，就是要掌握它的规律，减少它的有害方面，利用它的有益方面，更好的利用振动为人类服务。

二、振动的分类

振动是一种复杂物理现象，具有多种形式，为了便于分析讨论，根据不同的特征作如下的分类：

1. 按振动系统能量输入与损耗情况分类：

(1) 自由振动：在运动开始时给振动系统一定的能量（初始速度、初始位移）后，在振动过程中再也没有能量的输入和损耗，依靠系统本身的弹性恢复力保持等幅的振动。

(2) 衰减振动：能量一次输入产生振动，在阻尼作用下，能量不断损耗，使振动逐步衰减。又叫阻尼振动或有阻尼自由振动。

(3) 受迫振动：在外界周期干扰力作用下，不断地给振动系统补充能量，使振动系统保持与干扰力同频率的等幅振动。

(4) 自激振动：在振动系统上不存在周期性的干扰力，维持振动的能量是由振动系统本身从固定能源中取得并加以调节，即系统具有非振荡性能源和反馈特性，从而引起一种稳定的周期性振动，如切削自激振动。

2. 按振动的规律分类：

(1) 简谐振动——能用一项正弦或余弦函数表达其运动规律的周期性振动。

(2) 非简谐振动——不能用一项正弦或余弦函数表达其运动规律的周期性振动，可用谐波分析的方法展开为一系列简谐振动的叠加。

(3) 随机振动——不能用简单函数或这些简单函数的简单组合来表达其运动规律，而只能用概率统计方法来研究的非周期振动。

(4) 瞬态振动——振动量为时间的非周期性函数，通常只在一定的时间内存在。

3. 按振动系统的自由度数目分类：

(1) 单自由度系统振动——确定系统在振动过程中任何瞬时的几何位置只需要一个独立坐标的振动。

(2) 多自由度系统振动——确定系统在振动过程中任何瞬时的几何位置需要多个独立坐标的振动。

(3) 无限多自由度系统的振动——即连续弹性体的振动。

4. 按振动系统的结构参数的特性分类：

(1) 线性振动——系统的惯性力，阻尼力、弹性恢复力分别与加速度、速度、位移成线性关系，能用常系数线性微分方程描述的振动。工程上绝大多数振动系统都可简化成线性振动

系统。

(2) 非线性振动——系统的阻尼力或弹性恢复力具有非线性性质，只能用非线性微分方程描述的振动。研究非线性振动较线性振动复杂得多，现已成为振动研究的一个独立分支。

5. 按振动位移的特征分类：

(1) 横向振动——振动体上的质点只作垂直轴线方向的振动，如各种轴、梁的振动。

(2) 纵向振动——振动体上的质点只作沿轴线方向的振动，如钢丝绳，房屋柱子的振动。

(3) 扭转振动——振动体上的质点只作绕轴线的振动，如曲轴的扭振、轮系的扭振等。

横向振动与纵向振动又可统称为直线振动。

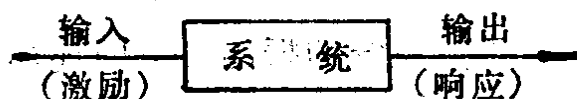
6. 按所选参考坐标系分类：

(1) 绝对振动——参考坐标选在地球上，振动体相对地球的振动称绝对振动。

(2) 相对振动——参考坐标选在运动的物体上，振动体相对参考坐标的振动称相对振动。

三、振动系统

振动问题所研究的对象，无论是机械产品，工程结构或者零部件等，都可以理解为下面框图所示的系统，通常称为振动系统或机械系统，它表征系统本身的振动特性。



外界对于系统的输入，包括初始干扰，外激振力等统称为激励，系统在输入下产生的输出，通常称为系统的动态响应，简称响应。在工程技术问题中最普遍的振动问题属于振动设

计, 即在已知输入情况下, 设计系统的振动特性, 使得它的动态响应能满足一定的要求。此外, 还有通过已知的输入和输出来研究系统的特性, 称为系统识别, 已知系统的特性和输出来研究输入, 称为环境预测。

振动的研究, 除了考虑振动系统本身的结构外, 还要考虑其边界约束及其它影响因素。为了便于应用力学基本定律及数学工具对机械结构的动力学特性进行分析, 需要对实际系统做一定程度的简化, 把一个系统, 离散化为一些理想化的元件构成。

1. 三类基本元件

系统中的振动体, 具有质量, 亦即具有惯性, 因此用一些理想化的质量元件来表示系统的质量, 把这些质量元件看成绝对刚体, 不考虑其弹性, 用符号 $\boxed{m}$ 表示。

从系统产生振动的内因讲, 除质量外, 系统存在一定的弹性, 即存在弹性恢复作用, 在系统离开平衡位置后, 有一种企图回到原来平衡位置的趋势。为此, 用一种只具有弹性而无质量的弹簧元件来表示系统的这种恢复作用, 用 k 表示。

系统在振动过程中, 由于周围介质, 本身结构、材料的内摩擦等, 总会产生一定的阻力, 不断消耗输入系统的能量, 若无新的能量补充, 振动就会逐渐衰减, 这种阻力作用叫阻尼。为此, 用不考虑其质量和弹性的阻尼元件来表示阻力的阻尼作用, 用符号 $\text{---}\overset{c}{\text{---}}$ 表示。

2. 振动系统的自由度

系统在振动过程中, 要确定全部质量的位置所必需的独立坐标, 就称这个系统的自由度。如图 1-1(a) 所示, 悬挂在细绳上的重锤 m , 相当于单摆, 只要一个独立角坐标 θ 就能确定系统的位置。(b) 所示的弹簧质量系统, 质量 m 作为一个质点在空间有三个自由度, 但如果它只在垂直方向作上下振动, 则

在振动过程中任何瞬时，系统的几何位置便只需要用一个独立坐标 x 就可以完全确定，成为单自由度系统。

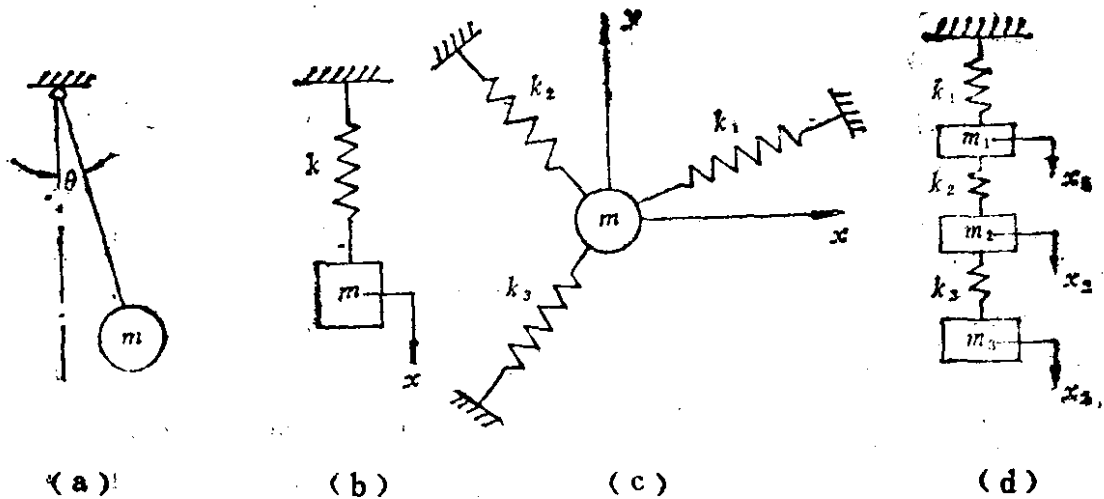


图 1-1

图 1-1(c) 表示在平面内用三个方向的弹簧固定的重物 m ，在平面内运动时，用两个坐标 x 和 y 就可确定其位置，系统有两个自由度。图 1-1(d) 所示，三个质量 m_1 ， m_2 ， m_3 分别与三个弹簧串联， k_1 弹簧上端固定，确定 m_1 ， m_2 ， m_3 的位置，则需三个独立坐标 x_1 ， x_2 ， x_3 才能描述系统沿铅垂方向振动时的运动状态，这个系统具有三个自由度。系统自由度数多于一时，即称为多自由度系统。

3. 动力学模型

机械系统的振动特性，主要取决于系统本身的惯性、弹性和阻尼。实际机械或结构的这些性质都是比较复杂的，为了能运用数学工具对它们的振动特性进行分析计算，需要将实际系统作一定程度的简化，忽略次要的因素。简化三类基本元件，即质量 m ，刚度 k ，阻尼 c 等参数的性质（如线性化）和分布规律（如离散化），建立起既能反映实际系统的动力学特性又有可能进行分析计算的动力学模型。

根据实际系统的复杂程度和所采用的简化方法，动力学模型大致可分为三类：集中参数模型、有限单元模型和连续弹性体模型。集中参数模型，由只有惯性元件（集中质量、刚体、圆盘），只有弹性的弹性元件（弹簧、弹性梁、弹性轴段）和只有阻尼的阻尼元件（阻尼器）等离散元件构成。有限单元模型是由有限个离散的单元组成，而每个单元则是连续的。连续弹性体模型是将实际结构简化为质量和刚度均匀分布或按简单规律分布的弹性体。前两类模型属于离散系统，其自由度数是有限的，系统的运动状态用常微分方程来表达。连续弹性体模型属于连续系统，其自由度数是无限的，它的运动状态需用偏微分方程来表达。

对实际机械或结构进行振动分析时，建立它的动力学模型是很重要的一步。但实际系统的情况十分复杂，而且，由于所要解决的问题不同，即使同一个实际的系统，也可以建立起不同的动力学模型。因此，动力学模型建立得是否合理准确，与我们计算结果的正确程度有着紧密的关系。

四、弹簧元件及组合

由上述可知，建立振动系统的动力学模型时，是将弹簧元件简化为一个无质量的弹簧，如图 1-2 所示。

当弹簧两端受沿弹簧轴线大小相等而方向相反的外力 P 作用时，

弹簧的变形量为 x ，在

弹性限度内，它们一般呈线性关系，可用公式：

$$P=kx$$

表示，即弹簧的形变（伸长或缩短）跟所受的外力的大小成正

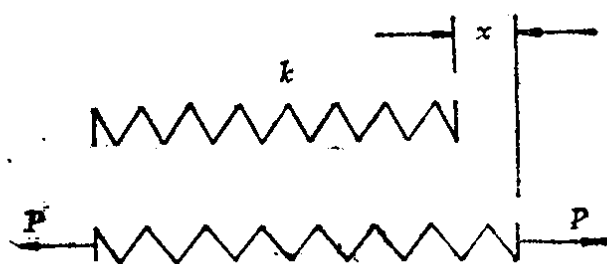


图 1-2

比, k 为比例系数, 是弹簧刚性大小的度量, 称为弹簧刚度, 对线性弹簧, 它是一个常数, 又称为弹簧常数。

弹簧在外力作用下改变形状的同时, 弹簧内部产生反抗外力企图恢复原来形状的弹性力, 根据虎克定律, 在弹性限度以内, 弹性力 f 和弹簧的伸长 (或压缩) 成正比, 即:

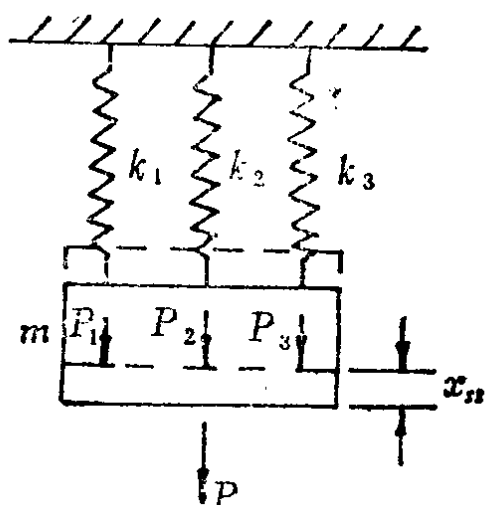
$$f = kx$$

即弹性恢复力与作用在弹簧上的外力大小相等, 方向相反。

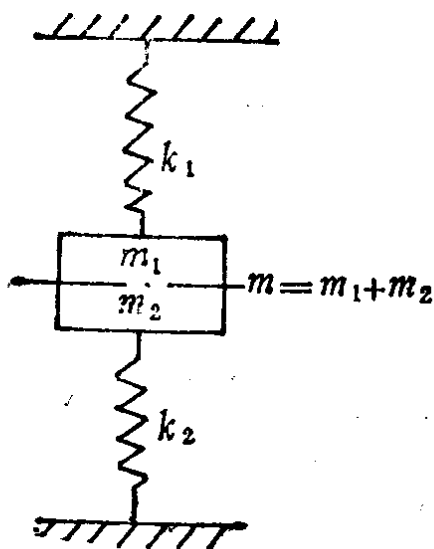
振动系统中, 往往不只一个弹簧, 它们彼此呈现相互并联, 串联或二者皆有的混联。在解振动系统时, 需要由各分弹簧常数来确定总体弹簧常数。

1. 弹簧的并联组合

如图 1-3(a) 所示, 物体的任何位移都引起所有分弹簧的等量伸长 (这里仅讨论单自由度振动系统, m 只作铅直方向的平动), 即在 P 力作用下, 弹簧伸长为 x_s , 三个并联弹簧, 弹簧常数分别为 k_1 , k_2 , k_3 , 也都伸长 x_s 。



(a)



(b)

图 1-3

用力平衡条件:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1-1)$$

由变形相等条件:

$$x_{st} = \frac{P}{k} = \frac{P_1}{k_1} = \frac{P_2}{k_2} = \frac{P_3}{k_3} \quad (1-2)$$

将(1-2)式代入(1-1)式, 得到:

$$kx_{st} = k_1x_{st} + k_2x_{st} + k_3x_{st}$$

消去 x_{st} , 得到:

$$k = k_1 + k_2 + k_3 \quad (1-3)$$

推广到 n 个弹簧并联, 并给出通式:

$$k_{\text{并}} = \sum_{i=1}^n k_i \quad (1-4)$$

图 1-3(b) 所示系统仍属弹簧的并联组合, 虽然从几何观点看, 这些弹簧是串联的。如果将该物体 m 看成是由两个分物体 m_1 和 m_2 组成, 即 $m = m_1 + m_2$, 两个分块体分别与 k_1 和 k_2 连接, 这两个分系统的固有频率为: (固有频率的概念下面将会讲到)

$$\omega_{n1}^2 = \frac{k_1}{m_1} = \frac{k_1 g}{W_1}, \quad \omega_{n2}^2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_2 g}{W_2}$$

然而由于两个分块体是牢固地连接在一起的, 所以固有频率必须相等, 即 $\omega_{n1}^2 = \omega_{n2}^2 = \omega_n^2$ 从而得到:

$$\frac{k_1}{m_1} = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k}{m}$$

$$\text{或} \quad \frac{k_1 g}{W_1} = \frac{k_2 g}{W_2} = \frac{k g}{W}$$

由此得:

$$m_1 = m k_1 / k \quad m_2 = m k_2 / k$$

上面两式相加:

$$m_1 + m_2 = m(k_1/k + k_2/k)$$

$$m = m(k_1/k + k_2/k)$$

故得 $k = k_1 + k_2$

并联组合一般可以认为是所有弹簧的一端连接物体，而另一端为固定点的组合。

2. 弹簧的串联组合

如图 1-4 所示，三个弹簧串联后与物体 m 在 P 力作用下，位移为 x_{st} ，由力平衡及传递条件知，平衡时各弹簧的拉力是相等的，都等于 P 。

$$P = P_1 = P_2 = P_3 \quad (1-5)$$

由于弹簧总伸长等于各分弹簧伸长之和

$$\begin{aligned} x_{st} &= x_{st1} + x_{st2} + x_{st3} \\ &= \frac{P_1}{k_1} + \frac{P_2}{k_2} + \frac{P_3}{k_3} \end{aligned} \quad (1-6)$$

将(1-5)式代入(1-6)式：

$$\frac{P}{k} = \frac{P}{k_1} + \frac{P}{k_2} + \frac{P}{k_3} \quad (1-7)$$

消去 P ，得到：

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (1-8)$$

n 个弹簧串联，给出通式：

$$\frac{1}{k_{串}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (1-9)$$

由此式可求出：

$$k_{串} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} \quad (1-10)$$

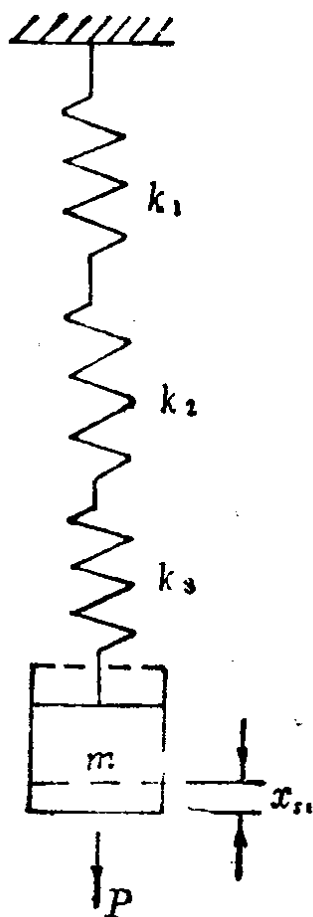


图 1-4

还有混联情况，可分解成串联或并联单一形式，然后进行综合。