

928847

高等学校教材

# 电子设备振动 分析与实验

赵惇 刘明治



东南大学出版社

## 前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子工业部“电子机械”教材编审委员会无线电设备结构设计教材编审小组评选审定为全国统编教材。本书责任编辑委为编审组组长叶尚辉教授。

本教材由西安电子科技大学主编,西北工业大学李智炜担任主审。

本课程的参考学时数为80学时。全书内容共分六章。第一章绪论,简单介绍电子设备的机械环境、振动、冲击对电子设备的危害及振动冲击的控制。第二章介绍振动的基础理论。第三章主要对机箱、印制版、悬挂类元件、门型结构、轴系等典型电子设备结构进行振动分析。为了预估装于飞机、火箭、卫星等上的电子设备在高频宽带随机激励下的响应,第四章简单介绍统计能量分析法的基本原理、解题过程及发展动态。第五章从隔振、动力吸振、阻尼减振、缓冲、振动的主动控制等方面阐明振动控制的基本原理、方法及如何进行防振设计。第六章简单介绍振动实验的基本原理、常用仪器仪表及基本的实验技术、技巧。

本书是在西安电子科技大学电子机械系多年来各有关教师的教学和科研实践的基础上编写而成的,第一章由赵博受编写,第二至六章由刘明治编写。

限于编者水平,书中疏漏及错误之处在所难免,请读者不吝指正。

编 者

1990年2月于

西安电子科技大学

# 目 录

## 第一章 绪论

- § 1.1 电子设备的机械环境..... ( 1 )
- § 1.2 振动与冲击对电子设备的危害..... ( 4 )
- § 1.3 振动与冲击的控制..... ( 6 )
- § 1.4 弹性系统的模型化..... ( 8 )

## 第二章 振动基础

- § 2.1 振动基本概念..... ( 14 )
  - 2.1.1 简谐振动及其表示法 ..... ( 14 )
  - 2.1.2 振动运动方程的建立 ..... ( 17 )
  - 2.1.3 周期振动及其谱分析 ..... ( 20 )
  - 2.1.4 非周期振动及其谱分析 ..... ( 21 )
- § 2.2 单自由度自由振动..... ( 21 )
  - 2.2.1 无阻尼自由振动 ..... ( 21 )
  - 2.2.2 有阻尼自由振动 ..... ( 25 )
- § 2.3 单自由度受迫振动..... ( 29 )
  - 2.3.1 概 述 ..... ( 29 )
  - 2.3.2 简谐激励力作用下的响应 ..... ( 30 )
  - 2.3.3 基础简谐激励下的响应 ..... ( 40 )
  - 2.3.4 任意周期载荷作用下的响应 ..... ( 44 )
  - 2.3.5 一般激励力下的响应 ..... ( 43 )
- § 2.4 多自由度系统的振动分析..... ( 53 )
  - 2.4.1 多自由度系统的运动方程 ..... ( 53 )
  - 2.4.2 结构特性矩阵的确定 ..... ( 57 )

2.4.3	多自由度系统的自由振动	( 70 )
2.4.4	多自由度系统的受迫振动	( 78 )
§ 2.5	非线性振动	( 81 )
2.5.1	非线性系统自由振动的定性分析方法	( 81 )
2.5.2	非线性系统自由振动的近似分析方法	( 83 )
2.5.3	非线性系统的受迫振动	( 86 )
2.5.4	非线性系统振动响应的数值计算	( 91 )
§ 2.6	随机振动	( 95 )
2.6.1	线性单自由度系统的随机响应	( 96 )
2.6.2	线性多自由度系统的随机响应	( 101 )

### 第三章 电子设备的振动分析

§ 3.1	电子机箱的振动分析	( 105 )
3.1.1	直梁的弯曲自由振动	( 106 )
3.1.2	轴向力作用下直梁的弯曲自由振动	( 116 )
3.1.3	梁的固有振型的正交性	( 119 )
3.1.4	直梁的弯曲受迫振动	( 121 )
3.1.5	机箱的弯、扭耦合振动	( 123 )
3.1.6	用能量法求梁的固有频率	( 126 )
§ 3.2	印制电路板的振动分析	( 128 )
3.2.1	矩形板的固有频率	( 130 )
3.2.2	圆板的固有频率	( 136 )
3.2.3	带肋平板的固有频率	( 137 )
§ 3.3	门型结构的振动分析	( 138 )
3.3.1	门型结构的弯曲振动	( 140 )
3.3.2	门型结构的纵向振动	( 143 )
3.3.3	门型结构的横向振动	( 144 )
3.3.4	简支门型结构的固有频率	( 145 )
3.3.5	圆弧形门型结构的固有频率	( 145 )

§ 3.4	悬挂式元件的振动分析 .....	( 146 )
3.4.1	带有集中质量的无质量梁的固有频率 .....	( 147 )
3.4.2	变截面梁的固有频率 .....	( 148 )
3.4.3	复合梁的固有频率 .....	( 150 )
3.4.4	印制板上安装的变压器的扭转振动 .....	( 153 )
§ 3.5	轴系的振动分析 .....	( 155 )

## 第四章 统计能量分析法

§ 4.1	引言 .....	( 164 )
§ 4.2	统计能量分析法的基本原理 .....	( 167 )
§ 4.3	统计能量分析法预估响应的过程 .....	( 174 )
4.3.1	模型化 .....	( 175 )
4.3.2	确定统计能量参数 .....	( 177 )
4.3.3	输入功率的确定 .....	( 181 )
4.3.4	建立并求解统计能量平衡方程式组 .....	( 182 )
4.3.5	响应估计 .....	( 182 )
§ 4.4	统计能量分析法的进展 .....	( 183 )

## 第五章 振动控制与振动设计

§ 5.1	引言 .....	( 185 )
§ 5.2	振动隔离 .....	( 188 )
5.2.1	隔振概述 .....	( 188 )
5.2.2	单自由度系统的隔振 .....	( 188 )
5.2.3	多自由度系统的隔振 .....	( 194 )
5.2.4	隔振设计及隔振器 .....	( 199 )
§ 5.3	动力吸振 .....	( 205 )
5.3.1	引言 .....	( 205 )
5.3.2	单自由度主系统下的单自由度吸振器 .....	( 207 )
5.3.3	随机动力吸振器的优化设计 .....	( 215 )

§ 5.4 阻尼减振 .....	( 221 )
5.4.1 概 述 .....	( 221 )
5.4.2 粘弹性阻尼特性 .....	( 222 )
5.4.3 粘弹性阻尼系统的振动分析 .....	( 226 )
5.4.4 粘弹性阻尼减振结构的形式 .....	( 227 )
5.4.5 粘弹性阻尼减振结构设计 .....	( 232 )
§ 5.5 冲击隔离 .....	( 233 )
5.5.1 概 述 .....	( 233 )
5.5.2 冲击荷载反应的近似分析 .....	( 236 )
5.5.3 冲击的隔离——缓冲 .....	( 238 )
5.5.4 缓冲器 .....	( 246 )
5.5.5 包 装 .....	( 256 )
§ 5.6 振动的主动控制 .....	( 262 )
5.6.1 概 述 .....	( 262 )
5.6.2 振动响应的动态控制 .....	( 266 )

## 第六章 振动测试

§ 6.1 振动用传感器的基本原理 .....	( 275 )
§ 6.2 系统特性参数的测定 .....	( 278 )
§ 6.3 响应的测定及标定技术 .....	( 291 )
§ 6.4 实 例 .....	( 296 )
§ 6.5 振动测试的仪器及设备 .....	( 298 )
§ 6.6 用电动振动台作振动、冲击例行试验 .....	( 300 )
主要参考文献 .....	( 304 )

# 第一章 绪论

电子设备在工作、运输与贮存过程中，将受到各种机械力——振动、冲击、离心力及运动产生的摩擦力的作用。其中振动与冲击对设备的危害最大。设备受振动作用产生共振时，振动加速度若超过设备的极限加速度，则将导致设备破坏。如果冲击引起的冲击力超过设备的强度极限，也将导致设备的损坏。若设备长期受振动或冲击作用，会产生疲劳损坏，电参数漂移，元器件引线或焊点断裂，元器件及引线位移或变形使设备或元器件分布参数发生变化，引起电回路失谐等。为保证电子设备的工作可靠性，必须对电子设备的工作环境(包括机械环境)进行认真的调查研究和分析，提出相应的机械防护措施：减弱和消除振源、去谐、去耦、阻尼、小型化、刚性化、隔振与缓冲等，确保设备正常工作。

## § 1.1 电子设备的机械环境

电子设备的机械环境应从装卸、运输、贮存及工作的全过程进行分析与研究。它可能遇到的机械环境有：周期振动、随机振动、冲击、恒加速度、离心加速度以及声振动等。

### 一、飞机和导弹上的电子设备

飞机和导弹上的机械环境取决于机型、导弹类型及设备的安装位置等。

飞机的振动频带从 3 Hz 至 1000 Hz，相应的加速度约为 1g 至 5g。垂直方向的振动较其它方向的振动强度大。最大加速发生在

与飞行路径相垂直的方向上，而最低加速度发生在水平方向上。

涡轮喷气式飞机的振源是喷气涡轮的高速旋转产生的高频振动。高强度噪声激起的随机振动，机翼、尾翼和机身的周期性的空气动力弹性振动，飞机到达超声速飞行时的瞬时大振动。飞机滑行和着陆时的冲击，飞机作机动飞行时，除振动外还要叠加 $10g$ 左右的恒加速度作用。

直升飞机的振动由发动机、减速齿轮系统、万向节及转翼引起的。振动频带从 $3\text{Hz}$ 至 $500\text{Hz}$ ，加速度值从 $0.5g$ 至 $4g$ ，最大加速度发生在垂直方向。直升飞机的着陆冲击和机动飞行的恒加速度约为 $2g$ 。直升飞机存在低频大振动。

导弹上的振动主要为随机振动，其激振源有：声激励、气动激励和机械激励等三种。在导弹实施转弯和加速飞行时将产生很大的恒加速度。在同一导弹内，设备离弹体重心和轴线越远，所受的恒加速度就越大。

## 二、舰船上的电子设备

舰船上的振动和冲击与舰船的类型、海浪级别、航速及设备的安装位置有关。其主要振源是发动机螺旋桨的叶频振动和轴频振动。引起舰船用柴油机产生振动的主要扰动是往复惯性力及惯性力矩、离心力及其力矩和颠复力矩的不平衡简谐分量、旋转机械的不平衡等。

舰船上电子设备离发动机越远，振动越弱。桅杆区振动最强，尾区最弱。舰体垂直方向的振动比其它方向振动强烈。

军用舰船上，各种武器的发射及爆炸是冲击的一个重要因素。

舰船的振动频带从 $1\sim 50\text{Hz}$ ，常见的是 $12\sim 33\text{Hz}$ ，在此范围内的最大加速度值为 $1g$ 。

## 三、汽车、火车上的电子设备

汽车的振动和冲击，与汽车类型、载重量、速度及路面状况



等有关，其振动频率可分为四段：

1. 2~5Hz，取决于前后支撑弹簧系统的固有频率，它与弹簧刚度及载荷有关，而与路面无关。

2. 6~14Hz，取决于车轮及轮轴系统。

3. 10~300Hz，是发动机产生的振动，振幅较小，易隔离。

4. 10~几百Hz，是车架及车箱的振动，也是由冲击激励引起的自由振动。由于结构阻尼的作用，此振动将很快衰减。垂直方向的振动较其它方向的振动强度大。

汽车在不平坦的路面上行驶时，将产生较大的冲击，并且直接传给电子设备。

表 1-1 各种运输工具上的冲击加速度

名称	运输状态	最大加速度 (g)	名称	运输状态	最大加速度 (g)
飞机	正常飞行	4~8	火车	正常运行	3.5; 10~50ms
	非正常飞行 进行战斗和武器发射	25~30 50~75		恶劣状态运行	高频时为25~30
汽车	正常行驶	5~7	船	正常工作	5~6
	参加战斗	数百g; 10ms		参加战斗和武器发射时	数百g

表 1-2 各种运输工具的振动

名称	频率 (Hz)	最大振幅 (mm)	最大加速度 (g)	名称	频率 (Hz)	最大振幅 (mm)	最大加速度 (g)
自行车 (路面条件恶劣、有载重)	~10	—	5.4	火车	2~10	33	1.25
二轮摩托车 (路面条件恶劣、有载重)	3~5	—	6.1	活塞式飞机	0~100	0.25	5
三轮摩托车 (路面条件恶劣、有载重)	3~20	—	2.5	涡轮式飞机	0~500	0.025	1.8
小型汽车 (路面条件恶劣、有载重)	2~20	—	1.6	喷气式飞机	0~500	0.025	12.5
载客汽车	1~20	153	0.3	快艇	70~480	0.3	6.4
载重汽车	4~80	127	4.1	船	0~300	0.76	0.8

火车的振动与冲击，主要由发动机、铁轨不平、铁轨接缝、车轮不圆、车厢挂接、启动和停车引起。其中以启动、停车时的振动和冲击的幅值最大。

表 1-1 是各种运输工具的冲击加速度值，表 1-2 是各种运输工具的振动数据。

## § 1.2 振动与冲击对电子设备的危害

几种电子元器件的相对耐振与耐冲击的性能如图 1-1 所示。印制电路板上的电子元器件承受振动与冲击的能力取决于印制板的固有频率、惯性力、固定方法、元器件的安装位置、导线的应变形式、金属化孔质量、焊接质量以及元器件的尺寸和质量等。

当振动频率在 500 Hz、加速度在 10~15g 以上时，继电器将失效。晶体管、电阻器、电容器及双列直插式集成电路等元件具有刚度好、质量轻的特点，可以承受 15g 的振动。

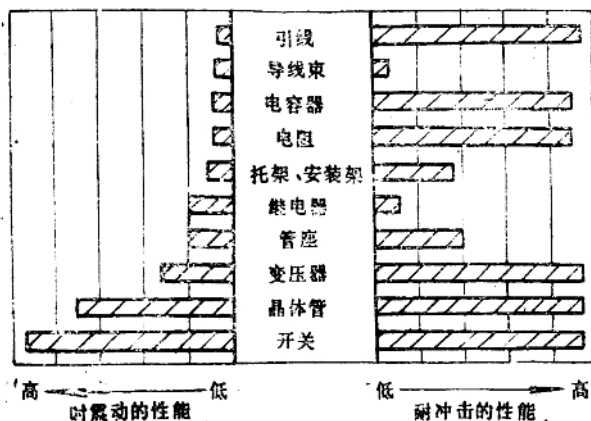


图 1-1 电子元器件耐振动、冲击性能

当垂直于印制板的轴向有振动时，惯性力将使印制板发生翘曲。往复弯曲时，固定在印制板上的元器件及引线将受到弯曲应力，易在引线弯曲处失效(断裂)，焊接点断裂等。

接线柱、开关、变压器、电路断路器在冲击与振动时，由于支架和压紧机构设计不当而失效。

振动与冲击对电子设备的危害主要有：

(1) 当元器件的固有频率与激振频率相同时，将产生共振现象。例如可变电容器片子共振时，使电容量发生周期性变化；振动使调谐电感的铁芯移动，电感量发生变化，造成回路失谐，工作状态破坏。

(2) 振动引起弹性零件变形，使具有触点的元件(如波段开关、继电器、插头插座)产生接触不良或完全开路。

(3) 导线发生变形或位移，引起分布参数的变化，从而使电容或电感耦合发生变化。

(4) 螺钉、螺母等紧固件松开甚至脱落，并撞击其它零部件，造成电路短路或损坏。

(5) 指示灯忽亮忽暗，仪表指针抖动，使观察人员读数不准，视力疲劳。

(6) 防潮和密封结构受到损坏。

(7) 机壳、底板变形、脆性材料(如玻璃、陶瓷、胶木、聚苯乙烯等)断裂。

(8) 对于成型的元器件，若在成型过程中存在微小裂纹，长期振动会产生裂纹断裂。

在计算机中振动失效的发生是冲击失效的4倍。很多元器件或子系统能承受75g的冲击，但不能经受2g的振动。有时设备机底在振动频率为2000 Hz，加速度为5g时发生故障，但在受到50g，6ms的冲击时，仅产生变形，不发生故障。可见振动试验和冲击试验两者不能互相代替。

## § 1.3 振动与冲击的控制

对电子设备进行振动分析，一方面是为了使设备能适应各种振动与冲击环境，从设备和性能上采取措施，提高设备的耐振动和抗冲击能力，提高设备的工作可靠性。另一方面是如何改善振动与冲击的环境条件，如何控制振动和冲击，使它们对设备的影响减至最小。

振动与冲击的控制方法包括减弱和消除振源、去谐、去耦、避免共振、阻尼减振、隔离振源、小型化和刚性化等。

### 一、减弱和消除振源

#### 1. 平衡运动质量

往复旋转运动机械的力或力矩的不平衡是产生机械振动的主要原因。应尽量减小或消除这种不平衡力或力矩。

2. 提高电子设备的组装工艺技术，改善运动部件的加工及装配精度，减少运动副的间隙，以便减小运动部件的振动。

#### 3. 平稳运动过程

设备在运转过程中的不平衡运行、不平衡接触、碰撞或撞击等，将引起振动或冲击。例如直升飞机的起飞和降落，动力源的迅速增速和降速过程，继电器的起动与脱开等，均能引起运动的不平稳，而此种不平稳，多数是由于设计、制造或使用不当等原因所引起的。因此，应尽可能地采取缓冲方法，来控制振源，减小其振动和冲击。

#### 4. 对振源进行隔离

隔离振源是控制振动与冲击，改善工作环境的一种重要手段。隔振(或缓冲)可按隔离对象分为积极隔离和消极隔离两种。当设备本身是振源时，为减小其对周围设备的影响而采取的隔离措施，称为积极隔离，其目的是要减小传到支撑结构上的振动

力。为了减小支撑结构(基础)的振动传到设备上而采取的隔离措施,称为消极隔离。这两种隔振原理是相似的。隔振设计的主要任务是选择或设计适当的减振器,并进行合理的布置,使系统的固有频率尽可能低于激振频率,并满足频率比(激振频率与固有频率之比) $\gamma > \sqrt{2}$ (一般取 $\gamma = 2.5 \sim 5$ )。

## 二、避免共振、减弱系统的响应

控制与减弱振动响应是振动控制的一个重要方法。电子设备在受到振动激励后,应有较小的振动响应,也就是系统设计成抗振结构,其主要技术有下列几种:

### 1. 合理设计结构刚度

加强薄弱环节的刚度,进行系统刚度的合理分配与平衡,提高结构的共振频率及降低振动的响应。

### 2. 去谐和去耦

应使系统的固有频率与电子元器件的固有频率分开,共振频率与激振源的主频率分开。共振频率的分配应进行优化处理。为了去谐,可以采用倍频定律——即使系统振动力学模型中的每一级频率是前一级的两倍,也可以使后一级的固有频率为前一级的二分之一。

振动的耦合是将振动的能量经振动系统传给产生响应的部件或元器件。去耦的目的是采取改变振动系统的参数,减少设备中谐振系统的数目,以便破坏能量传输的条件,达到减振的目的。

### 3. 阻尼减振

当共振不可避免时,可增加系统的阻尼,消耗共振时的能量,减小共振振幅。利用粘弹性阻尼材料的高阻尼特性,把机械能转变为热能耗散掉。采取的方法有:在机械结构的各个环节采用增加阻尼的涂层或阻尼夹层结构,提高接合面阻尼,附加阻尼消振器及阻尼动力消振器等。

### 4. 动力消振

在主振动系统上附加一个副振动系统，构成一个主、副系统的两自由度振动系统，使副振动系统的固有频率等于或接近主振动系统的干扰频率，这样就可以使主振动系统的振幅等于或接近于零，使两者的作用力大小相等、方向相反，合力为零，达到消振目的。

## § 1.4 弹性系统的模型化

电子设备的实际振动系统是很复杂的，完全按照实际情况进行振动分析计算是困难的，因此，对实际振动系统进行分析计算时，应抓住主要因素，略去次要因素，对其进行简化，建立计算模型。动力学模型就是在进行振动计算时，用来代替实际振动系统的经过简化了的模型。振动分析的精确度，取决于弹性系统模型化的正确程度。

计算的力学模型应满足下列基本要求：

- (1) 模型应反映实际振动系统的基本特性；
- (2) 模型应便于计算。

### 一、弹性系统模型化的基本原则

1. 各组成构件中刚度较大的质量，相对于弹性结构件而言，可假设为无弹性的刚性质量。
2. 质量较小的弹性构件，相对于大质量的刚体而言，可假设为无质量的弹簧；或者以部分(等级)质量附加于刚体的无质量弹簧。
3. 振动系统中力的变化及运动参数能够线性化的尽量线性化。例如弹性力与位移、阻尼力与速度、惯性力与加速度均为线性关系。不能线性化的，在小振动、小振幅范围内，以等效线性值代替非线性值。
4. 确定振动系统所必须的独立坐标数(自由度)时，以不影响

结果的准确度为原则，越少越好。

5. 对小阻尼振动系统，可以认为固有频率与阻尼无关，非共振区的振幅与阻尼无关。阻尼的作用是降低共振时的振幅和消耗振动与冲击的能量。

6. 在简单的振动系统中，可用往复振动的特性参数代替弯曲振动、扭转振动等，或者相互对应转换，但它们的运动方程必须相同。

## 二、简化实际振动系统时的假设

简化程度取决于系统组成的本身性质能不能简化，简化结果的精度允许范围以及可忽略的成分与要求结果的关系是不是次要的等。

电子设备在简化为计算力学模型时，应作以下几项具体假设：

### 1. 设备是刚体质量块

将设备看成一个完整的刚体质量块，完全符合刚体运动理论，没有变形，可以用集中质量表示设备的运动参数——位移、速度、加速度；以及对质量中心作用的弹性恢复力、阻尼力、惯性力和外界干扰力等，进行力的平衡。

### 2. 弹性支承是没有质量，仅有刚度和阻尼。

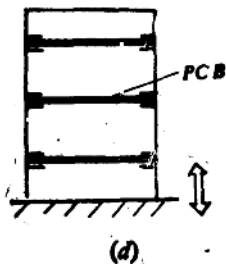
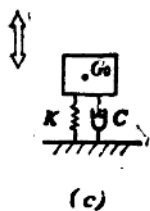
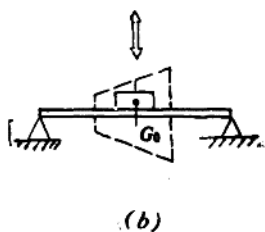
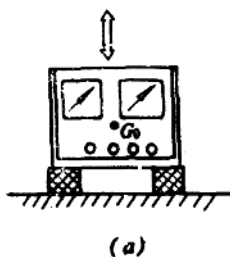
弹性支承通常认为是线性刚度和粘性阻尼，且与设备构成质量-弹簧-阻尼的弹性系统。

### 3. 基础是刚性的

弹性支承的基础视为质量无限大、刚度无限大的基础。则基础频率远远高于系统频率，它不参与振动，也不影响弹性系统的振动特性。由两自由度振动系统可以证明，在基础质量大于系统质量的情况下，若基础频率等于系统频率的三倍或三倍以上，即可符合基础是刚性的假设，一般这种假设是可以满足的。

图1.2是几种设备模型化的典型实例。图中(a)是一台电子设备装在弹性支承体上，(b)是集中质量梁的弯曲振动或转子的弯

曲振动,它们均可由单自由度振动系统的力学模型(c)来表示。图中(d)是电子设备中装有多块印制板组装件的情况,它可以简化成图(e)的多自由度振动力学模型。图(f)是多向弹性支承的电子设备,按照刚体空间运动规律,可以有六个自由度——三个沿坐标轴的直线运动和三个旋转运动,在模型化时,要考虑六个自由度的振动,将坐标原点取在重心上,其力学模型如图(g)所示。





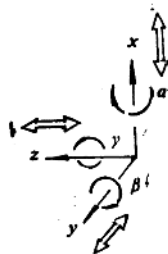
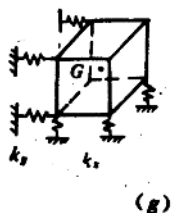
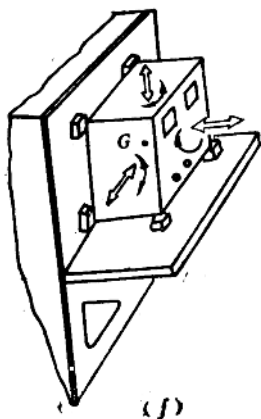
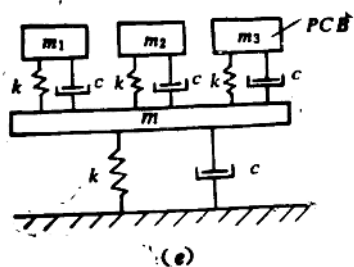


图 1-2 弹性系统的模型化