

# 电子设备振动分析

[美] DAVE S. STEINBERG 著

鲁守来 季馨译

南京工学院 241 教研组

1983.7

赠阅

★  
请交换

# 序 言

电子设备正在日益为人们提供舒适、安全、方便的条件，丰富人们的娱乐活动和进行疾病治疗。其中许多设备在应用时难免要处在强烈振动环境下，这种环境能显著地降低设备性能甚至引起严重的损坏。电视机有了故障，仅仅带来不方便。而在飞机、火车和船舶这些大量载人的运输工具中，电子设备有了故障常常意味着许多人的生命受到了威胁。

在遇到强烈振动环境的电子系统中，疲劳破坏是十分常见的。这种破坏经常以电线折断、元件引线断裂、铸件破损、焊接损坏和螺丝松脱的形式出现。

当我目睹这些损坏并分析了造成损坏的原因之后，我明显的感到许多工程师需要更好地了解振动基本原理。在许多情况下，他们并不化费时间和金钱分析电子支承结构以确定危险的动力载荷路径。工程中的大部分时间和金钱用于电路系统方面，这是符合逻辑的，因为电子系统在实际应用场合是带电运行的。除非系统设计时使它能在动态环境下工作，否则就会出现许多结构上的问题，这将要求重新作大量的设计和试验。

一台精心设计的电子机箱本来应该很容易通过振动合格试验，然而它在试验中却出现了故障，这种情况是屡见不鲜的。判断振动试验夹具时，常常发现在机箱共振频率附近，存在着夹具的剧烈共振。在这种情况下，机箱能产生很大的加速度，这将导致结构疲劳破坏。

因为机箱和夹具同时发生共振将会迅速地增大加速度。通过避免同时发生共振，可以把许多振动降至最低限度。对现有的振动书籍和文献资料研究表明：这个课题已有十分详细地论述，对于许多不同形式的结构已导出典型的频率公式。可是没有一份已经出版的文献认真探讨了实际元器件和结构件的基本分析方法，而这些元器件和结构件已被用于今天很复杂的电子系统，本书企图填补这个空白。

作者假设读者已基本掌握了初等力学和材料力学，除对某些重要的公式进行推导外，书中尽量简明扼要。本书重点放在目前电子工业中正在制造的元器件和结构件。

本书前两章扼要介绍了振动的基本原理和有关定义，随后的两章是为研究具有多个集中弹簧、质量和阻尼的振动系统打基础的。这种方法在用高速数字计算机分析复杂的电子系统时是十分方便的。在第八章中给出这类问题的例题。

本书中有许多近似方法。这些方法已通过考虑各种参数在很大范围内变化的试验和分析全部得到了验证。其中有些方法就我所知可以认为是非传统的，因为它们在任何其他文献中尚未出现过。

虽然我力图避免错误，但在一本新书中错误在所难免，假如读者发现错误，请告知我们以便尽快得到修正。

Dave S. Steinberg

# 目 录

<b>第一章 绪 论</b> .....	(1)
1.1 振 源.....	(1)
1.2 定 义.....	(1)
1.3 振动表示方法.....	(2)
1.4 自 由 度.....	(3)
1.5 振 型.....	(4)
1.6 振动的结点.....	(5)
1.7 耦 合 型.....	(5)
1.8 紧 固 件.....	(6)
1.9 飞机和导弹上的电子设备.....	(8)
1.10 船和潜水艇上的电子设备.....	(10)
1.11 汽车、卡车和火车上的电子设备.....	(11)
<b>第二章 简单系统的振动</b> .....	(15)
2.1 无阻尼弹簧质量系统.....	(15)
2.2 例 题.....	(16)
2.3 力平衡法.....	(17)
2.4 单自由度扭转系统.....	(18)
2.5 例 题.....	(19)
2.6 振动体作为扭转系统.....	(20)
2.7 例 题.....	(21)
2.8 单 摆.....	(21)
2.9 串联和并联弹簧.....	(22)
2.10 例 题.....	(23)
2.11 频率和加速度与位移的关系.....	(24)
2.12 例 题.....	(25)
2.13 具有粘性阻尼的自由振动.....	(27)
2.14 阻尼自由振动方程.....	(28)
2.15 具有粘性阻尼的强迫振动.....	(29)
2.16 例 题.....	(31)
2.17 作为频率函数的传递率.....	(32)
2.18 例 题.....	(32)

2.19	无阻尼多个弹簧质量系统	(33)
2.20	例 题	(34)
<b>第三章</b>	<b>集中质量的系统</b>	<b>(36)</b>
3.1	集中载荷的叠加	(36)
3.2	邓柯莱法	(43)
3.3	影响系数和矩陈叠代	(44)
3.4	惯性力平衡法	(49)
3.5	一般运动方程	(59)
3.6	强迫振动运动方程	(61)
3.7	拉格朗日方程	(63)
3.8	弹簧中的力	(65)
3.9	例 题	(69)
<b>第四章</b>	<b>梁和悬挂式电子元件</b>	<b>(74)</b>
4.1	悬挂式电子元件	(74)
4.2	例 题	(76)
4.3	均匀梁的固有频率	(80)
4.4	具有端部质量的悬浮梁	(87)
4.5	例 题	(90)
4.6	变截面梁	(91)
4.7	例 题	(96)
4.8	复 合 梁	(97)
<b>第五章</b>	<b>电子组件、骨架和环</b>	<b>(101)</b>
5.1	安装线路板上的电子组件	(101)
5.2	具有固定端和承受垂直载荷的弯头	(103)
5.3	具有铰支端和承受端弯矩的弯头	(105)
5.4	由情况 1 和情况 2 所产生的复合应力和复合挠度	(108)
5.5	例 题	(109)
5.6	具有固定端和承受侧向载荷的弯头	(113)
5.7	具有固定端并承受横向载荷的弯头	(117)
5.8	高频谐振时的末端条件	(122)
5.9	具有铰支端并承受垂向载荷的弯头	(123)
5.10	具有铰支端和承受侧向载荷的弯头	(124)
5.11	具有铰支端的封闭框架	(125)
5.12	积木组件	(127)
5.13	例 题	(132)
5.14	焊接点的应力	(135)
5.15	增加积木夹板的厚度	(137)
5.16	具有铰支端并承受侧向均布载荷的弯头	(138)

5.17	具有固定端并承受侧向均布载荷的弯头	(140)
5.18	具有铰支端并承受垂向均布载荷的弯头	(142)
5.19	具有固定端并承受垂向均布载荷的弯头	(142)
5.20	铰支端的弯头的变形能	(143)
5.21	固定端的弯头的变形能	(145)
5.22	变形能法在圆弧形截面弯头中的应用	(149)
5.23	变形能法在具有铰支端的圆弧拱中的应用	(153)
5.24	变形能法在具有固定端的圆弧拱中的应用	(154)
5.25	变形能法在具有自由端的圆弧拱中的应用	(156)
5.26	具有侧向载荷和铰支端的圆弧拱	(158)
5.27	印刷电路板的边缘导向器弹簧	(159)
5.28	陀螺的柔性导线	(166)
5.29	例 题	(170)
5.30	弯头和拱的固有频率	(171)
<b>第六章</b>	<b>印刷电路板和平板</b>	<b>(175)</b>
6.1	各种形式的印刷电路板	(175)
6.2	电路板边界条件的改变	(177)
6.3	估算印刷电路板的传递率	(179)
6.4	用三角级数求固有频率	(181)
6.5	用多项式求固有频率	(184)
6.6	例 题	(187)
6.7	用瑞利法求固有频率方程	(188)
6.8	引线的应力	(192)
6.9	引线中的累积疲劳破坏	(201)
6.10	电路板的动应力	(203)
6.11	带肋的印刷电路板	(206)
6.12	肋用螺钉固定安装在电路板上	(210)
6.13	双向带肋的印刷电路板	(213)
6.14	正确地用肋加强平板和电路板	(213)
6.15	估计电路板的最大容许挠度	(214)
6.16	例 题	(215)
6.17	求电阻最大容许加速度G值的曲线	(215)
6.18	应用电阻曲线的实例	(218)
<b>第七章</b>	<b>电子机箱</b>	<b>(220)</b>
7.1	初步的调查研究	(220)
7.2	不同的安装形式	(220)
7.3	初步的动力分析	(222)
7.4	螺栓连接的盖板	(223)

7.5	耦 合 型	(226)
7.6	机箱的动载荷	(228)
7.7	机箱的弯曲应力	(231)
7.8	弯曲应力的屈曲应力比	(232)
7.9	机箱中的扭转应力	(233)
7.10	剪切应力引起的屈曲应力比	(235)
7.11	屈曲的安全系数	(236)
7.12	机箱上安装凸耳处的动载荷	(237)
7.13	疲劳安全系数	(239)
7.14	铆钉的支承应力	(240)
7.15	重心安装	(240)
7.16	封闭式电子机箱	(242)
7.17	倍频程规则	(243)
<b>第八章</b>	<b>数学模型</b>	<b>(245)</b>
8.1	建立数学模型应考虑的问题	(245)
8.2	扭转模态	(246)
8.3	将电子机箱分解为集中单元	(246)
8.4	模拟为七个质量的电子机箱的振动分析	(250)
8.5	集中质量	(251)
8.6	机架在Y轴方向上的弹簧刚度	(252)
8.7	电源装置在Y轴方向上的弹簧刚度	(253)
8.8	印刷电路板在Y轴方向上的弹簧刚度	(253)
8.9	记忆磁芯外壳在Y轴方向上的弹簧刚度	(254)
8.10	记忆磁芯座在Y轴方向上的弹簧刚度	(254)
8.11	机架在Y轴方向上的阻尼系数	(255)
8.12	电源部分的阻尼系数	(255)
8.13	线路板的阻尼系数	(256)
8.14	记忆磁芯积木组件的阻尼系数	(256)
8.15	沿Y轴方向振动时的物理参数汇总	(257)
8.16	沿Y轴方向振动时的运动微分方程	(257)
8.17	拉格朗日方程	(260)
8.18	应用电子计算机确定频率响应特性	(263)
8.19	弹簧中的动载荷	(266)
8.20	弹簧中的动应力	(269)
8.21	预测疲劳寿命	(271)
8.22	数学模型的扩展	(273)
8.23	红外扫描辐射仪的数学模型	(274)
<b>第九章</b>	<b>振动装置和振动试验</b>	<b>(276)</b>

9.1	振动模拟装置	(276)
9.2	振动台的安装	(276)
9.3	振动试验夹具	(277)
9.4	夹具设计的基础知识	(278)
9.5	螺栓的有效质簧刚度	(279)
9.6	预加扭矩的螺栓	(280)
9.7	摇摆模式和倾覆力矩	(281)
9.8	油膜滑块试验台	(282)
9.9	振动夹具的平衡重量	(283)
9.10	良好夹具设计提要	(284)
9.11	悬挂系统	(284)
9.12	机械保险	(285)
9.13	弯曲模式和摇摆模式的区别	(286)
9.14	推杆连接	(286)
9.15	滑板的纵向谐振	(290)
9.16	激振器加速度的输出能力	(291)
9.17	随动控制加速度计的安装	(291)
<b>第十章</b>	<b>结构疲劳</b>	<b>(293)</b>
10.1	疲劳机理	(293)
10.2	设计和分析中应考虑的事项	(293)
10.3	持久极限和疲劳寿命	(295)
10.4	S-N 曲线	(296)
10.5	古德曼曲线	(297)
10.6	应力集中	(298)
10.7	例 题	(300)
10.8	腐蚀疲劳	(302)
10.9	累积疲劳损坏	(303)
10.10	例 题	(304)
10.11	疲劳曲线	(305)

# 第一章 绪 论

## 1.1 振 源

所有电子设备在使用期限内会受到不同形式的振动，其振动频率和振动加速度变化范围较宽。即使仪器本身不产生振动，设备也可能从制造厂商送到买主的过程中，由于机械结构设计和包装设计考虑不周，而在装卸和运输中受到不同形式的振动或冲击而遭受不同程度的损坏。

因此，在大多数情况下，振动是不希望有的。然而，人们有时却有意识地利用振动来实现某种目的。例如振动在超声波中得到了成功的应用，人们利用超声波来清洗医疗仪器，测量壁的厚度和寻找铸件中的缺陷。人们还利用振动把不同尺寸的岩石通过由几种不同等级孔洞组成的振动筛来分类。

当第一架喷气式飞机投入使用时，起初它使用的是原先应用于活塞发动机和螺旋桨飞机上的标准电子仪器。但这些仪器在喷气机上使用时往往会被卡住而不能正常工作。这种差异是由于带有螺旋桨的发动机能产生低频振动引起的。为了使这些仪器在第一架喷气式飞机上能正常工作，不得不在仪器面板上安装小的振动器。

机械振动可以由许多不同振源引起。在家用产品中，例如搅拌器和洗衣机，振动是由于转动和滚动产生的不平衡引起的。在车辆中，例如汽车、卡车和火车中，大多数的振动是由于这些车辆行驶在较粗糙的路面上引起的。在船舶和潜水艇上，振动是由于发动机和水的冲击引起的。在飞机、导弹和火箭中，振动是由于喷射和火箭发动机以及气动冲击引起的。在导弹中，在亚音速飞行期间，大多数的振动是由火箭发动机声场引起的，这声场是由火箭发动机尾喷管向后喷射所产生的强烈湍流引起的。

## 1.2 定 义

振动就其广义来说是指某种结构或物体的往复运动。

例如，在一定时间间隔以后，运动的每个特性都全部重复，这称为周期性运动。这种运动可能是非常复杂的，但是只要它本身是重复的，它仍然是周期性的。假定一个连续的运动它本身决不重复，这就叫随机运动。简谐运动是最简单的一种周期性运动，它经常用位移—时间图表上的正弦波来表示。如图 1.2 所示。

周期的倒数称为振动频率，用周每秒表示，为了纪念第一位无线电波实验者德国人赫芝，也可以用赫芝 (HZ) 来表示。最大位移称为振动的振幅。

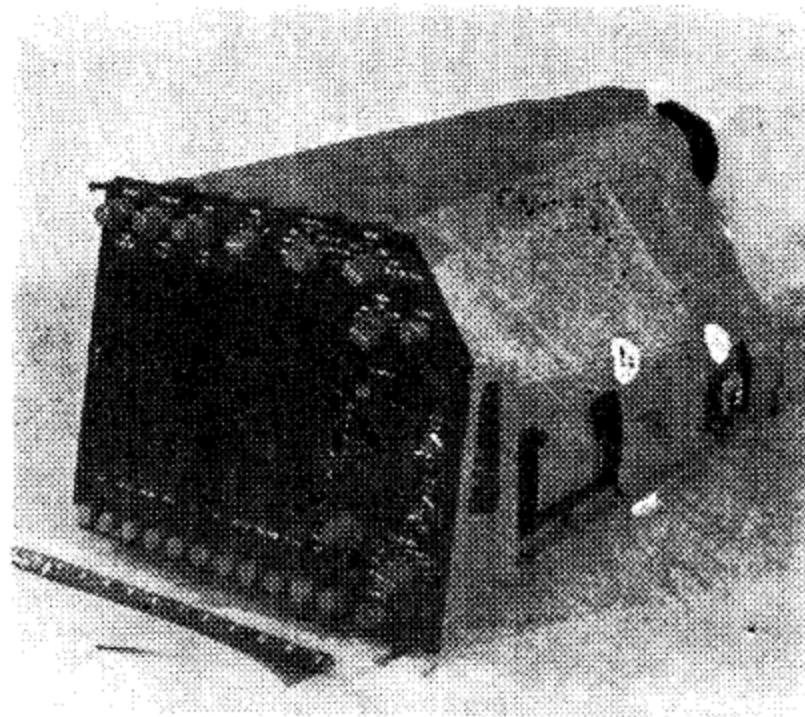


图 1.1 一台空用电子仪器带有阴极射线显示器，它用放在仪器后面的抽风风扇冷却

Crede[2.3]\* 把冲击定义为：由于突然加上的力、力的增量，以及由于速度矢量值或速度方向突然改变而使系统的平衡受到扰动时所产生的短暂情况。

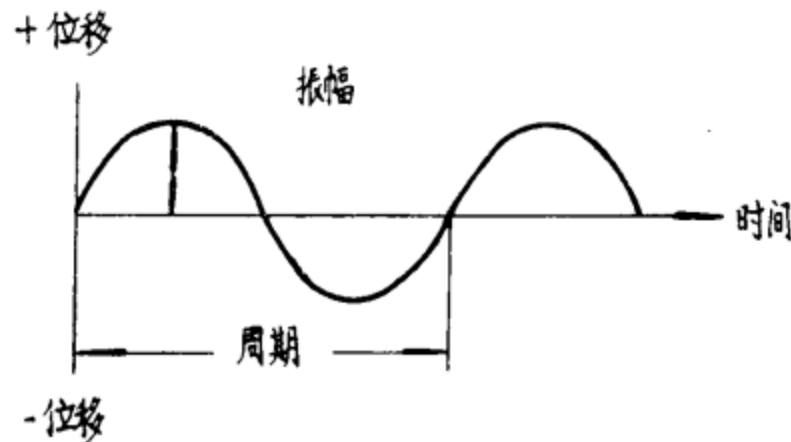


图 1.2 简谐运动

在比较轻的构架结构（一般用于飞机和导弹）中，冲击是不容易传播的。冲击力经常导致暂态振动，振动受到构架固有频率的影响。

本书仅考虑与线性弹簧有关的稳态线性振动。所谓线性弹簧就是位移与施加的力成正比，即力增加一倍，位移也增加一倍，但对任何材料而言，其应力均不允许超过其弹性极限。本书不考虑应力超过屈服极限而导致永久变形的情况。

### 1.3 振动表示方法

我们可以用一个旋转矢量来描述挂在螺旋弹簧上的单质量的简谐振动的运动（图 1.3）矢量  $Y$ 。以  $\Omega$  弧度每秒角速度反时针方向旋转。矢量在垂直轴上的投影表示质量上下振

\* 注意： 括号中的数目指的是书后面的参考文献编号

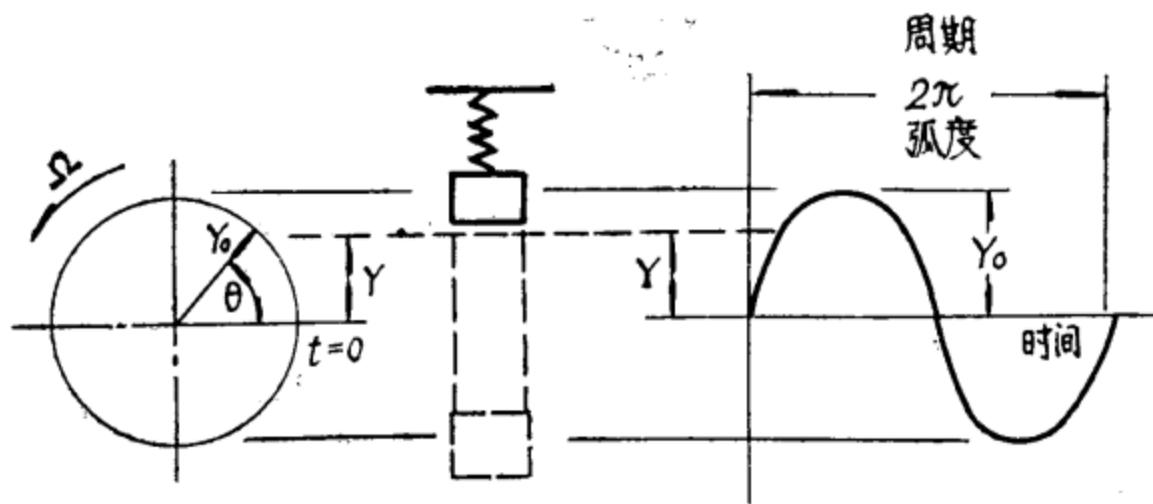


图 1.3 旋转矢量模拟单自由度系统

动的瞬时位移，可以写成

$$Y = Y_0 \sin \Omega t \quad (1.1)$$

矢量转了一圈绕过  $360^\circ$  角 ( $2\pi$  弧度)。角速度用弧度每秒来度量，而频率用周每秒度量，因此得到关系式

$$\Omega = 2\pi f \quad (1.2)$$

#### 1.4 自由度

一个振动系统要求用若干坐标来描述系统中若干元素的位置。假使在一个系统中仅有一个元素，该系统受到约束只能沿一个坐标轴方向移动。假如仅仅需要一维就可以确定任意瞬间元素对于某一初始点的位置，那它就是单自由度系统。

这对于扭转系统同样是正确的。如果只有一个元素，它受到约束时只能绕一根轴旋转，因此只要一维就可以定出该元素在任何瞬时对于某初始点的位置，这就是单自由度系统。具有一个自由度系统的某些实例，如图 1.4 所示。

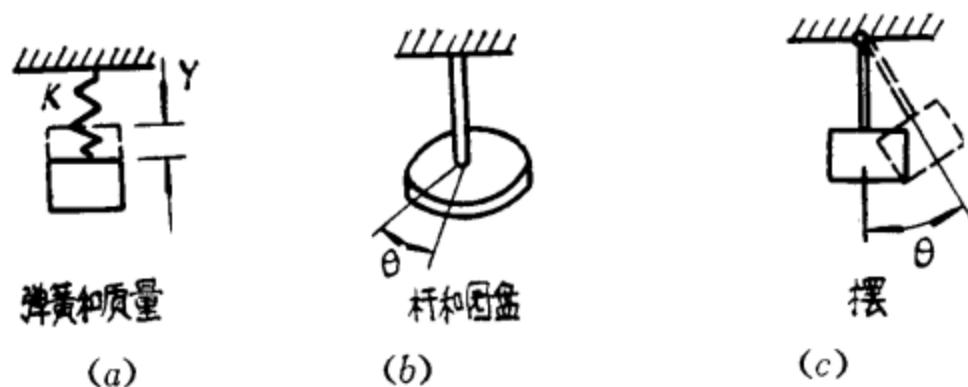


图 1.4 单自由度系统

两个自由度系统需要用两个坐标去描述元素的位置。

具有两个自由度系统的某些例子，见图 1.5。

现在考虑刚体力学，一个单质体可以有六个自由度。它可以沿着三个互相垂直的  $X$ 、 $Y$ 、

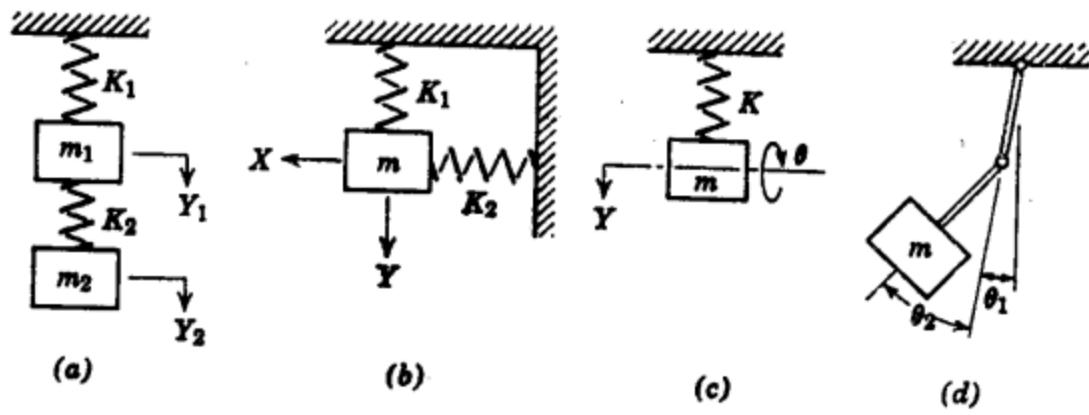


图 1.5 两个自由度系统

Z轴平移和绕着这三个轴旋转，如图 1.6 所示。

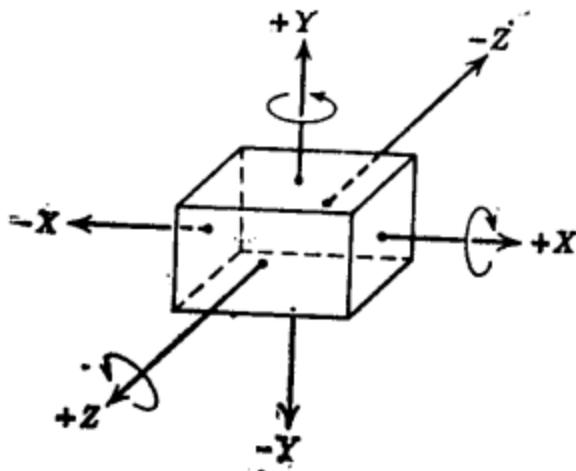


图 1.6 有六个自由度的单质体

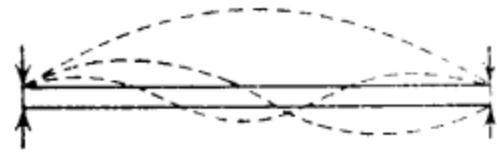


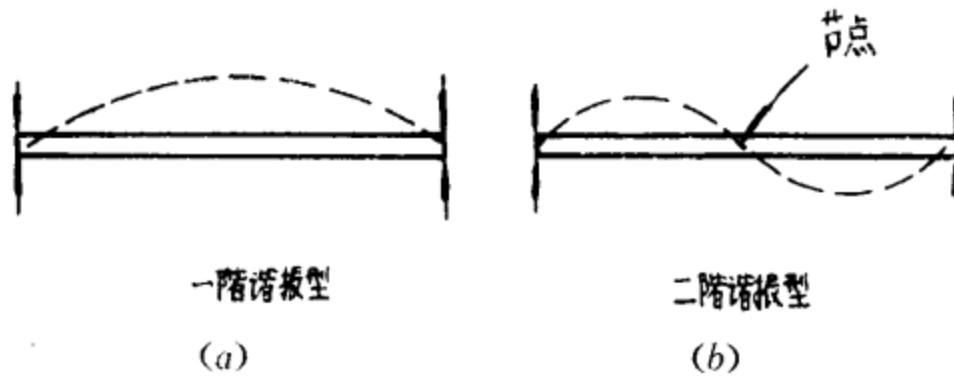
图 1.7 表示若干自由度的简支梁

一个典型的梁可以无穷多自由度，它能够弯曲成无限多个形状(即振型)如图 1.7 所示。

### 1.5 振型

一个特定的系统正在以一种形式振动，这种形式就称为振型，每一振型与特定的固有频率有关，而且每一振型代表一个自由度。单自由度系统仅有一个振型和一个共振频率。在图 1.6 中所表示的六个自由度系统有六个振型和六个共振的频率。在图 1.7 中所表示的简支梁可以有无穷多的振型。这就是说梁对应于它的每一个共振有一个形状，对应于无穷多个共振就有无穷多个形状。

振动系统的基本的振型常常称作固有频率或系统的共振频率，有时也称为系统的第一



一阶谐波型

二阶谐波型

(a)

(b)

图 1.8 简支梁第一和第二谐波型

谐振型。例如，简单支承的均布梁振动在其基本共振频率时应该是半正弦波的形状，如图 1.8a 所示。当这个梁在它的第二固有频率即第二谐振型振动时，它应该是全正弦波形状，如图 1.8b 所示。

一个系统的第一谐振型（即最低的固有频率）是基本共振型。它有最大的振幅，而且常常应力最大。第二谐振型（或第二阶共振）比第一谐振型位移小，所以应力也常常比较小。对于较高的振型其位移继续减小。

### 1.6 振动的节点

振动的节点是振动物体上面的非支承点，但位移为零。节点经常与弯曲或扭转振型有关。梁在一阶弯曲谐振型时没有节点存在。二阶谐振型时有一个节点，三阶谐振型有两个节点等等。图 1.8a 表示没有节点的振动着的梁的弯曲振型，而图 1.8b 表示有一个节点的梁。

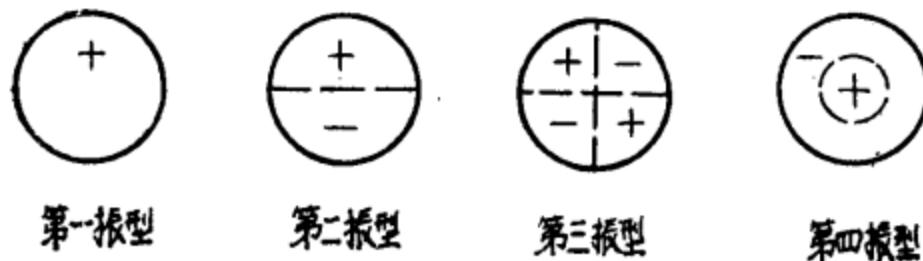


图 1.9 圆形薄膜前四阶谐振型



图 1.10 方板前三阶谐振型

振动的平板可有直线形的弯曲节点和圆形的弯曲节点，在图 1.9 中表示了圆形薄膜前四阶谐振型。

图中加号（+）表示正位移，而减号（-）表示负位移，虚线表示零位移的节点位置。带有自由边的方板的前三阶弯曲谐振型如图 1.10 所示。

### 1.7 耦合型

在两个或更多的自由度的系统中，一个自由度的振型常常要影响另一个自由度的振型。例如在图 1.5a 中，假定质量 2 被刚性固定，而质量 1 在垂直方向移动，质量 1 将上下振荡。现在假定质量 2 的固定被解除，质量 1 的运动将要作用在质量 2 上，因此质量 2 将要开始上下振荡，因为质量 1 的运动直接影响质量 2 的运动，这两种振型被规定为耦合的。在耦

合型中，一种振型不可能与另一种振型无关而单独发生。

耦合型可以发生在一个以上的自由度系统的平动、旋转或平动和旋转联合的时候。对于平动和旋转的耦合型，通过做简单的试验，常常可能决定这个系统是耦合的还是非耦合的。在振动系统物体的重心沿特定方向加一恒稳载荷。假设该物体沿加载方向移动而没有旋转运动，那末沿加载方向平动型和旋转型的运动不会耦合。

例如，考虑在图 1.11 中带有两个弹簧的质量，假定沿  $X$  方向在重心  $CG$  处加一个恒稳载荷，这个质量不仅沿  $X$  轴平动，同时也会旋转。这个试验表明，沿  $X$  轴振动时，平动型和旋转型将要耦合。

假如沿  $Y$  轴在重心  $CG$  处作用一个恒稳载荷，这个质量将沿  $Y$  轴平动而没有旋转。同样，假定质量重心处加一扭矩那末转动将会发生，而没有平动。这些试验表明，在沿  $Y$  轴的振动情况下，平动型不会和旋转型耦合。

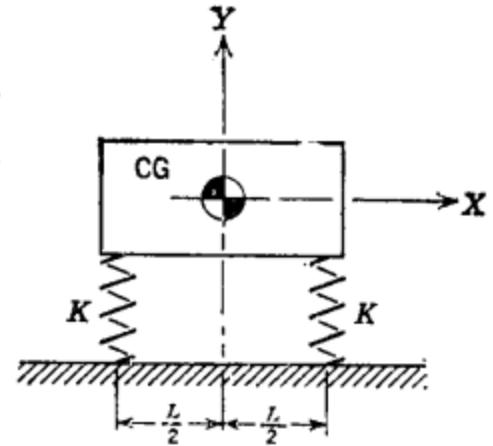


图 1.11 有两个弹簧的单一质量

## 1.8 紧固件

在电子设备中，使用了许多不同形式的紧固件。这些紧固件包括螺钉、螺母、铆钉、卡箍等。紧固件所造成的现场故障占很大百分比，在大多数冲击试验中，造成故障最大的原因是紧固件。虽然紧固件在电子设备中已大量地使用了许多年，但是大多数应用是以静态装配为基础来考虑的。紧固技术的一般特点是装配容易和成本低廉，但常常不适宜于剧烈的冲击和振动环境。一个起作用的因素是：紧固件是非常小的零件，而它们的用途非常普遍，所以它们的应用势必以半自动化为基础，而不考虑其实际的强度。机器螺钉的情况特别是如此，有时使用较大的螺丝，这往往是因为使用者是与汽车或飞机工业有关的，在这些部门小螺丝很少使用。

因为紧固件在电子设备总的可靠性方面起着重要的作用，故在选择时特别应当考虑以下几点。

1. 选择适当型式的紧固件(螺钉、铆钉等)，综合考虑环境、强度、维修保养、成本等；
2. 以动力载荷和结构的几何形状为基础，选择正确的紧固件尺寸和固定位置；
3. 选择适合于螺钉和螺母的正确的锁紧装置；
4. 选择正确的装配技术。

在生产过程中大多数电子制造商会选用螺钉和铆钉。假如他使用螺钉，他就根据公差和装配方便来选择尺寸和锁紧装置。在装配时，他随生产人员根据自己的见解决定紧固件正常的装配方法。这样做的结果会用错紧固件，用错尺寸，用错锁紧垫圈和使用不确当的装配扭矩。

一般说来，已经知道冷挤压轴向膨胀铆钉是十分满意的，在电子装配中应该更加经常地使用它，而且还知道，当使用螺钉时，它们应该比通常所考虑的尺寸大，而且要用较好的材料制作。许多常用的锁紧装置并不令人满意，其中有些常常是严重事故的根源。此外，在旋紧机器螺丝时，一个机械工所作的判断通常是有错误的。

电子设备中的许多损坏是由于螺栓松动造成的。设想当一只大的变压器松动而且在振

动期间向四周发出声音时，一架灵敏的电子设备会产生什么样的情况。

虽然用高速电影胶卷和应变计进行了许多调查，研究螺钉和螺帽的松动情况，但是出现这种情况的机理至今仍未搞清楚。然而，在动荷载作用下，螺栓似乎有轻微的伸长，因此螺栓表面的界面摩擦力突然急剧下降。因为在很短的时间间隔内，螺丝和螺母的螺纹势必恢复到原来的形状。这种几何形状的微小改变产生了激励力，使得螺钉和螺帽松动。

为了改善电子设备中紧固件的质量，下面提出一些具体的建议。

1. 所有螺钉紧固件应该采用钢的螺钉。钢的特性应该满足美国机动车工程师协会的 1010 (SAE1010) 所规定的最低要求。
2. 螺钉应该用扭矩装置旋紧，该装置可预调到要求的扭矩值。
3. 旋紧扭矩应该是扭断螺丝头所需要的扭矩值的 60~80%，表 1.1 [11] 给出钢螺钉的扭矩值。

表 1.1

螺丝尺寸	扭矩 (英寸·磅)	螺距尺寸	扭矩 (英寸·磅)
2—64	3—3.5	12—24	45—56
4—40	5—6.5	12—28	50—64
6—32	10—12	$\frac{1}{4}$ —20	65—80
8—32	20—24	$\frac{1}{4}$ —28	85—100
10—24	22—27	$\frac{3}{8}$ —16	250—320
10—32	34—42	$\frac{3}{8}$ —24	330—415

4. 螺丝头应该使用确实不会滑动的夹具作推动装置，同时螺丝头也应该经受得起这个推动力，在一般场合，似乎一个开槽六角形的机器螺丝是最令人满意的。

5. 在包括贯通孔在内的所有应用中，应该用锁紧螺帽代替锁紧垫圈，大多数标准钢的锁紧螺帽可以令人满意。

6. 假如可能的话，应该避免使用盲螺纹孔 (Blind-tapped holes)，必要的时候为了阻止螺钉在振动时松动，应该在螺丝头下面使用锁紧装置，例如锁紧垫圈。旋紧的扭矩要增加的量应该等于克服锁紧装置的摩擦扭矩这个量。

7. 一个部件上的紧固件应该分散安装，以便某一个紧固件损坏时，不会使部件脱落引起故障，甚至对很小的组件也不应该少于两个紧固件。

在电子系统中应该仔细地使使用锁紧垫圈和螺丝锁紧衬垫。这些电子系统是用于无重力场 (0g) 外部空间环境中。在安装中，这两种装置通过夹紧金属产生结合摩擦。在这过程中常常会从螺钉上刮下金属微粒。假如不除去这些微粒，它们会在无重力场环境中到处漂浮，引起电的问题。用外星形锁紧垫圈嵌入 24 个螺钉后，计算实际上的金属微粒数目，求得的总数约为 1000 个。

十字凹形螺丝起子槽 (菲利普头) 也会被螺钉起子的作用力所切割。在安装螺钉，并扭

转螺钉起子时，螺钉起子常常会从槽中滑出来和从螺钉上落下金属碎屑。

许多电子公司使用液体粘结剂例如用 Loctite (商标名称)、Glyptal (商标名称) 来粘合螺丝，以避免在使用夹紧金属的装置时从螺丝上刮下金属微粒。某些公司在螺钉上用尼龙衬垫。在尼龙冷流动并减低结合扭矩之前，尼龙衬垫装上和取下可用十二次左右。

美国全国航空和宇宙航行局 (NASA) 不允许在宇宙飞船上的显示器和光学设备附近使用有挥发性的产品，因为这些产品势必在真空中散发出气体，然后沉积为一张薄膜，蒙在光学镜头上，阻碍灵敏的光学设备的使用。

## 1.9 飞机和导弹上的电子设备

用于飞机和导弹的电子机箱常常做成不规则的外形，这是为了在很挤的空间最大限度地使用一切可以利用的体积。由于体积和重量通常处在极限情况下，电子机箱的组装密度较高。密度值的正常范围约从 0.003 到 0.04 磅/英寸<sup>3</sup>，这取决于环境要求的严格程度，典型电子机箱的平均重量：小的约为 10 磅，大的约为 80 磅。

飞机的振动频谱约从 3 赫变化到 1000 赫，相应地加速度峰值范围约从 1G 到 5G。最大加速度  $G$  好象发生在垂直方向，其频率范围为 100—400 赫；在相同的频率范围内，最低的加速度  $G$  好象发生在纵向，其最大加速度值约为 1G。

直升飞机的频谱变化约从 3 赫到 500 赫，加速度约从 0.5 到 4G，最大加速度  $G$  似乎发生在近 500 赫的垂直方向。低频时的位移很大，在 1.0 赫附近双倍振幅值约为 0.20 英寸。

在这类值中，导弹的频率最高，一般可达 5000 赫，较低的频率极限约 3 赫，这似乎是构架结构的弯曲振型产生的。动力设备点火时，加速度峰值约 5 到 30G，其最大值发生在频率为 1000 赫以上。

就超音速飞机和导弹的振动环境的本质来说，随机振动比周期性振动更为主要。然而在这些运载工具中所使用的电子设备仍在利用正弦振动来评价和证明它们是否合格。

由于在飞机和导弹中的强迫频率太高，对于这种环境要想设计没有共振的电子系统实际上是不可能的，当然用某些膨胀硬型泡沫把整个电子机箱完全包起来总是可能的，对于小的机箱这种泡沫能够使共振频率大大超过 1000 赫（可以到 2000 赫）。然而，一般认为这是不切实际的，因为保养、排除故障和检修这个系统时所花费的费用太大。

明显的结论是：在飞机和导弹中所出现的强迫频率将在每一个电子机箱激起许多共振型。同样明显的是在设计和分析电子系统时必须特别当心，否则它们会被震坏。对电子组件而言，实际上必须将电子支承结构进行动力调整，以阻止同时发生共振，这种共振会迅速导致疲劳破坏。

当一个有经验的机械设计工程师面临一个严峻的振动技术条件时，他首先想到的是在振动隔离器上安装电子设备。毫无疑问正确地设计一组隔离器能够抑制冲击和振动。图 1.12 表示安装在振动隔离器上的空用电子机箱。在讨论隔离器支架时必须考虑下述四个主要因素：

1. 为了防止电子设备碰撞周围其他物体，必须提供一定的摇摆空隙，假如容积有限，在同样的容积内，用一个带有刚性支架的大型电子机箱去安放更多的电子仪器，也许更加实际些。

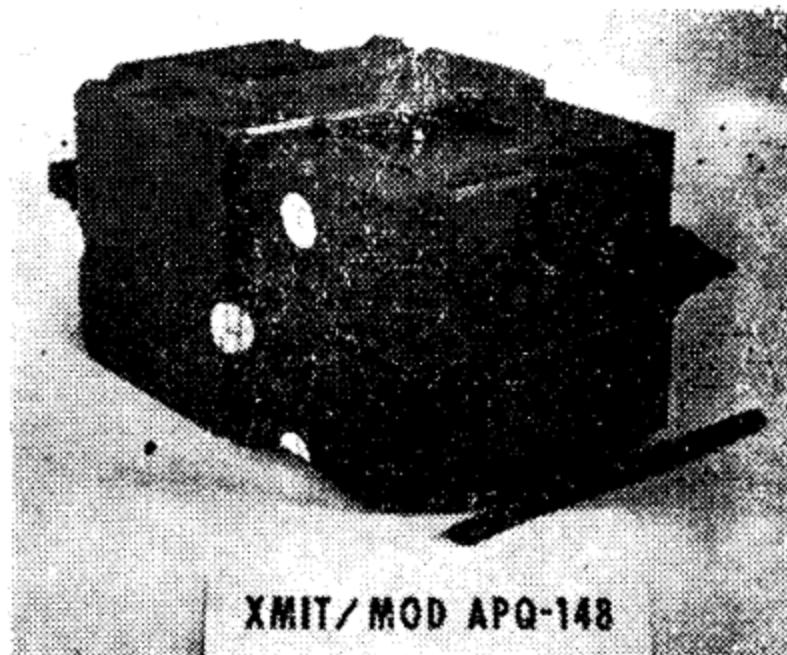


图 1.12 安装在振动隔离器上的空用电子机箱

2. 在电子结构中人们已愈来愈多地使用冷板来带走电子设备散发出来的热。假如使用隔离器，为了解决隔离器产生的大位移，在飞机构架结构和电子机箱之间必须使用若干可靠的挠性联轴节。因为假如一只联轴节失效，冷却效应就会急剧降低。

3. 必须用多股电缆和导线把标准的电子机箱连接到飞机或导弹上的主要的电子系统上去。因为隔离器需要有摇摆空隙，如果使用隔离器，这些电缆和导线会被迫经受大振幅。所以必须采取特殊的预防措施来阻止电缆和导线的疲劳破坏。

4. 一个好的振动隔离器常常是一个不好的冲击隔离器，反之亦然。设计得好的隔离器则应该满足振动和冲击两者的共同要求。

空用电子设备的冷板设计随着空气和液体的应用已经愈来愈完善了。空气热交换器广泛地使用多重散热片、波状散热片、树枝状散热片、柱状散热片，以便改善热传导特性。多重散热片常常用每英寸有22个散热片的浸镀黄铜的铝 (dip-brazed aluminum) 做成。这些散热片仅仅厚 0.006 英寸，但是在典型热交换器中，这些大量的散热片使得交换器刚性很好（这是与重量相比而言的）。飞机上广泛使用电子设备，其中空气冷却型的热交换器正好做成电子支承结构。把热交换器铆接、焊接或粘到电子机箱的主要结构构件上，因此热交换器本身成为该系统的主要 载荷支承构件，用于冷板的冷却空气取自飞机喷气 发动机内的压缩器第一级。在空气用于冷却之前，必须先调节空气，因为来自第一级的空气温度通常大于  $300^{\circ}\text{F}$ 。

液体冷却的冷板常常用来冷却宇宙飞船上或飞得很高的从事研究工作的各类飞机上的电子设备，冷却液常常是乙二醇和水，它类似汽车散热器在冬天使用的持久型防冻剂。

用液体冷却的冷板常由宇宙飞船结构的一部分制成，以代替电子机箱结构。当电子机箱必须从宇宙飞船中取走时，不必断开很难搞的流体的管路，因为冷板固定在结构上，由电子机箱中散发的热常常通过电子机壳安装表面上一个平的接触面传导给冷板，机壳与冷板保持密切接触。

商用和军用电子设备的发展趋势是采用系统替换单元 (LRU-line replaceable unit)，

用这个单元在几秒钟内就能替换正在航线上使用的有毛病的电子机箱。这种替换是通过电子机箱背后提供地一切必需的接口连接（包括机械和电的连接）来实现的。这种机箱同能够插入插座的印刷线路板相似。

假如在电子机箱后面有几个大的电气连接器，那未插入机箱以及正确接合电气连接器是十分困难的。在正确的接合情况下，某些连接器的每个插针可能需要 0.50 磅的力。当有 8 个连接器，每个连接器有 100 个插针，这样共有 800 个插针，故连接它们时要求有 400 磅的力。

插入式电子机箱通常通过机箱前面的某些机械装置接合并固定在位置上，由于连接器在箱子背后，这意味着要求接合连接器的力必需通箱子。当这种类型的电子机箱受到振动时，在许多场合必需把振动载荷加到设备载荷上，就可以求出作用在结构上的总载荷。为了得到可互换的标准电子部件，人们试图制定某些标准尺寸以使得军用和商用飞机上面电子设备标准化。然而这些可互换标准部件装在标准“空用（机载设备）固定托架”（air transport rack）上，该架提供若干后置定位销（rear-loaded dowel pin）、连接器以及在前面的快速锁紧装置。

## 1.10 船舶和潜水艇上的电子设备

由于船舶和潜水艇常常有比较多的空间可以利用，同时不严格限制重量，所以船和潜水艇一般利用支架型的橱柜去支承电子设备。电子组件通常安装在面板和滑动的抽屉内。面板一般用来支持刻度盘、仪表、人工控制机构和测试点，在面板上仅仅安装小的东西。因为它们是固定在橱柜的框架或支架上，所以它们不能经受大的动载荷。

抽屉常常用来支承更大的组件，例如，通常用于电源。抽屉安装在可以接近设备的伸缩滑道上，为了安全，抽屉通常固定在开和关的位置上。为了方便，抽屉也可以倾斜，以便在狭小的地方改善入口和提供方便。

船和潜水艇的振动频谱变化范围大约从 1 到 50 赫，但是最普遍的范围是从 12 到 33 赫。在这个范围内最大加速度值约为 1G，它是由于发动机和推进器的振动引起的。

在军用船只上，一般由于各种爆炸使冲击成为一个重要的因素。除非在设计和装置方面给以适当地考虑，否则爆炸会给电子设备造成严重的损坏。例如，用非常刚性的结构支承电子设备是不符合要求的，因为一个非常刚性的结构没有足够的变形来吸收许多应变能。从理论上说，当任何不变形的结构受到冲击载荷时将产生无限大的加速度。大的位移就可满足要求，因为它能明显地降低加速度  $G$  值。应把位移限制在结构内，或者必须使用防振架。无论那一种情况，在设计和装配时必需采取预防措施保证各部分不要碰撞，而且设备不要脱出 [36]。

假如使用冲击隔离器，应该将它们设计成有足够的变形以吸收冲击能量，不要把过大的载荷传递到电子设备上。冲击减振架应该有 25 赫 [2、5] 的共振频率。电子组件的理想共振频率至少应该是冲击隔离器的共振频率的两倍，但决不低于 60 赫。假如电子组件共振明显低于 60 赫，这会使它们进入最普通的振动强迫频率范围，如前面所提到的，是 33 赫，假如发生这种情况，电子组件会在接近它的共振频率处受到连续的激励同时会引起疲劳破坏。