

前 言

多年来，在飞机、桥梁、压力容器等许多工程领域中，逐渐形成了相当成熟的设计程序。设计师遵循这些原则和程序就能得到所要求的最终产品。只在某些问题上要用数学法校验一下载荷、应力和容限等等。通常施加静（无运动）的假想输入进行校验。

在振动夹具设计中，要对试验性设计的动态（带运动）特性进行数学上的试验（若用计算机就比较省力），或直观上的试验（这时工作经验很有帮助）。如果结果不好，再研制和试验另一个试验性设计。因此设计的形成就是一个反复过程。希望一个设计能满足重量、尺寸、足够高的自然频率等互相矛盾的要求或者能最大限度地满足这些要求。

设计的数学上检验包括把一个复杂结构模型化成一组简单结构：集中质量、集中弹簧、集中阻尼（全都理想化）、分布重量、分布弹簧、分布阻尼等等。所有这样的数学模型都要求分析家做出许多简化假设。例如：什么是板的有效宽度或长度？什么是螺栓的有效长度？设想一个四边全都焊接的板是否可以假设为固支—固支梁？只有做了这些假设，设计才能从数学上进行试验。计算机可以使我们用较少的简化假设进行更为复杂（可能更为真实）的模型的数学性试验，而且用适当的时间处理极为复杂的数学运算。

复杂结构（比如振动试验夹具）的动态性能一般同计算结果有差别，而且时常差别很大。一个有经验的设计师很难将动态性能的频率容差预示到 $\pm 10\%$ 之内，除非他的计算是具有个人经验作基础。实际上，许多有经验的设计师大多都越过这些步骤，他们几乎是很自然地一次设计成功。

个人经验包括严重的沉痛的错误和从这些错误中得到的有益的经验。这些经验并不很严密或是唯一的，它很难写成文件。然而我们认为：某些有经验的设计师的经验可以向有关读者或学生传授。这就是本书的目的。每个夹具设计师不必要再作伤脑筋的“重新尝试”，至少本书能帮助读者了解在设计振动、冲击夹具的艺术或科学中面临的问题。他们可以从设计一个夹具中受到专门的教育，在设备制成之后，他们亲自用激振器、加速度计、曲线描绘仪等对该夹具进行动态的鉴定。可作些修改，重复一下过程，这种重复过程是实际的教育，并对将来的问题有用。

希望夹具设计师在学习了本书之后（特别是初学者，不过有经验的工程师也可得到许多有用的概念），能设计较好的试验夹具。其实验质量将会提高，而且能节省财力和时间。试验将能较快进行。整个夹具的费用将减少，激振器的寿命将得到延长；各个实验室做的实验将变得更为相同。

除夹具设计师以外，本书对使用夹具的实验工程师和技术员也有所帮助；也对振动、冲击试验规范书写者有所帮助；还对生产夹具厂商的技术规格制定者有所帮助；还对必须着手和调整复杂动态试验的质量评定和可靠性工程师有所帮助。本书的许多部份可帮助经受振动、冲击破坏产品的设计师了解他们的困难并作出消除共振的设计方案。

你在开始读本书之前最好先研究一下“目录”。如果你只对夹具设计有兴趣，你就可

能认为某些章节是多余的，你可能对振动分析，测量所用的仪表或者对评定你所设计的夹具所用的自动激振器控制部份没有兴趣，如果是这样的话，就可跳过第五、六、十一章。如果你对随机振动没有兴趣，就可以跳过第十四、十五章。如果对冲击试验没有兴趣就可以跳过第十六章。

除了查目录外，还建议你读一下每一章的引言以得到每一章内容的概念。

本书是为Tustin理工学院听讲振动、冲击试验课程的这些学生编写的，因为这些学生一致要求“是否可以得到一本有关夹具设计的通俗书籍”？本书也可在许多短训班中作为教科书。

B. J. klee

D. V. kimball

Wayne Tustin

75年5月1日

振动、冲击术语解释

加速度：加速度是速度随时间的变化率（用 $\frac{dv}{dt}$ 或 \dot{v} 或 \ddot{x} 或 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 表示）。通常是沿着一个指定的轴向。用“g”或重力单位表示。它也可适用于角运动。

精度：精度是仪器达到真值的能力，不能同不精确性相混淆（不精确性是指滞后、非线性、零漂、温度影响之总和），也不同于重复性。

幅度：一个变化量离开它零值的大小称之为幅度，它经常带一个诸如峰、均方根、平均等修饰词，也可用于位移、速度或加速度。如果这个量是位移，那么或者用峰值幅度X，或者用D（双倍幅度）等于2X（峰—峰值）表示。D也称为振幅。

角频率：角频率（亦称为圆频率 ω ）是以周/秒或赫芝表示的频率乘以 2π ，用每秒弧度表示。

平均：参阅电气工程学教科书，在正弦波的特定情况下，平均值为峰值的0.636倍。

平衡：是调整机械旋转部件质量分布的一种方法，使由于旋转产生的振动力达到最小。

拍：拍是因为同时存在两个正弦量（频率为 f_1 和 f_2 ）而引起的周期性的变化。拍的强度周期性变化频率为 $|f_1 - f_2|$ 。

校准：校准（用于振动传感器）是确定灵敏度为频率、温度、振幅等的函数关系的有规律的方法。从它可获得离开固有值的偏差，然后用它从指示值推算出真值。校准还可以称为调整仪器到偏差最小的过程。

顺性：刚度的倒数或反逆。

临界频率：临界频率是一个特殊的共振频率（参见“共振”），在此频率上，可能发生设备的破坏或性能变坏。

循环：一个循环是周期事态瞬态值的完整过程。这个过程是在一个周期内发生的。

阻尼：阻尼是振荡或振动能量随着运动或随着时间的消耗。临界阻尼是在无过冲时对阶跃函数产生最快响应的阻尼值。

十进制：十进制是两频率之间的间隔为10:1。

分贝：以分贝或dB表示的比值。所以它的大小是用参照某一基准的比值的对数（以10为底）来表示。例如：在声学中 $dB = 10 \lg_{10} \frac{P_1}{P_2}$ ， P_1 、 P_2 是声功率级，多半用瓦表示， P_2 的考级通常称之为0 dB。

自由度：用来描述系统复杂性的词组。

定值振动：定值振动是一种在任何未来时间的瞬态值均可用精确的数学式预示的振动。正弦振动是一个简单例子。复合振动是一个复杂例子（二个或二个以上的正弦振动）。

位移：位移是位置变化。一般从平均位置或静止位置量起。位移可以用于角运动，但

通常用于线运动。

失真：在力学上，失真是一些不希望有的运动。例如假定一个正弦运动，那么在基频上出现的任何谐波、分谐波运动或任何机械杂波（由于零件碰撞）均称之为失真。失真在电和电子测量上的定义也是一样，例如放大器常常在输入讯号上产生不希望有的谐波讯号。

持续时间：一个冲击脉冲的持续时间就是它持续的时间多少，通常用大于峰值幅度10%的两个瞬时值之间的间隔作为时间的度量。

滤波器：滤波器是一种能无损地通过某些频率（通带）但对其它频率则造成很大损失而衰减（阻带）或不能有效通过的电子设备。滤波器可以分成低通（高阻），高通（低阻）和带通（阻止通带上下的频率）。

滤过讯号：当电讯号通过滤波器后信息被去掉，则电讯号认为是滤过讯号。

强迫振动：如果系统由于某些机械激振而引起振动，那么该系统的振动运动称之为强迫的。如果激振是周期的和连续的则这个运动被称之为稳态的。

自由振动：当簧片被弹拨一下之后，振动能在没有外力下进行，称之为自由振动。

频率：周期函数的频率是周期的倒数（ $\frac{1}{T}$ ）。最被公认的单位是赫芝（Hz）。但是许多作者使用每秒多少周（CPS）或每分多少周（CPM）。

频响：在规定的振幅误差限度内，设备可复盖的频谱部份。

基频：一个复杂的但是周期性的运动，它的最低频率成分的每秒周数（参见谐波和次谐波频率）。

频谱：描述各频率分量的解，即给出每个分量的幅值（有时也给出相位）。

固有频率：是一个振动系统的自由振荡频率，也是任何正常振型的频率。

振动的基本振型：系统的基本振型就是最低自然频率的振型。

g：量“g”是地心引力所产生的加速度。国际规定一个重力单位的值选为980.665厘米/秒²=386.087吋/秒²=32.1739呎/秒²。

g 单位或重力单位：用重力常数表示加速度强度的常用方法，等于加速度吋/秒/秒除以386.087吋/秒/秒。

谐波：谐波是具有基频（ X_1 ）整数倍频率（ X_1, X_2, X_3 ）的正弦量。

撞击：撞击是质量之间（其中至少有一个在运动）的碰撞。

冲量：是力在一段时间间隔内的积分。

诱导环境：诱导环境是由于结构或设备某些动作造成的与自然环境相反的环境。

输入：输入可以是作用于机械系统的机械运动力或能量，比如振动从振动台输入到试件。它也可以是电讯号，比如从振荡器输入到推动激振器的功率放大器。

输入控制讯号：输入控制讯号是由一个加速度计发出，有时选用二个或几个加速度平均。这个讯号用来调节激振器产生的激振强度（这个讯号在力控振动试验中由力传感器发出）。

强度：振动或冲击的严重性。接近前面“幅度”的意义，但不确切，没有明确的涵义或度量。

隔振：隔振就是减少振动的严重性，一般适当使用有弹性的支承就能达到隔振。冲击架或缓冲器是用来使系统免受冲击运动。振动架或隔振器是用来衰减稳态振动，从而使系

统隔振。

突跳 (Jerk)：突跳系指加速度随时间的变化率（通常标志成 da/dt , \dot{a} , \ddot{v} , \ddot{x} ）。

线性系统：如果系统的每个零件的响应正比于激振力，那么系统是线性的。

质量：表示由已知力产生的加速度的物理性，可从重量除以重力加速度计算出来。普通的物体由于包括反作用元素，如弹簧、阻尼，这物体不是纯质量。

平均：被考虑的量之间的中间值。因为振动台上不存在稳态加速度，因此振动台上振动加速度的平均值一定是0。但是在一个飞行器上，因为存在稳态加速度，平均不是0。

机械阻抗：在振动工作中，机械阻抗是力同速度之比，其中速度只是由于该力产生的。

振型：振型是振动系统中的一个特征形态。此时所有各点都达到它们的最大位移。

自然环境：自然环境是自然界发生的情况，它的影响不管设备是静止的，还是工作的，都能觉察到。

噪音：噪音是测量系统中所有干扰源的总和，它与讯号存在无关。

倍频程：频差为2:1的二个频率之间的间隔。

振荡：振荡是一个量（比如力、应力、压力、位移、速度、加速度或突跳）随时间的变化。一般是规则的（比如正弦或复合的振动）。

峰值：变量的极值。由零或平均值量起。

峰—峰值：振动量的峰—峰值是极值之间的代数差。比如在正弦振动中的D或倍幅是单幅“X”的2倍，即 $D = 2X$ 。

周期：周期性振动的周期是振动本身重复的最小时间间隔。

周期振动：（参见定值性振动）振动波形以一定时间间隔重复。可与概率振动相比。

相位：周期量的相位是参考时间（比如振幅等于0）和特定时间之间的周期的一部分或者是具有相同基频的两个运动或两个电讯号之间的周期的一部分。

拾振器：（参见“传感器”）。

压电性：压电性是某些非对称性晶体材料具有正比于应变的电极化特性，比如压电加速度计。逆压电性是它的应变正比于外加电场，如压电激振器。

压电传感器：压电传感器是这样的传感器，它的敏感元件变形可以产生电荷和电压。敏感元件是具有压电特性的晶体或陶瓷元件。许多现用的加速度计是压电的。

压阻传感器：由于压阻传感器的敏感元件变形而改变元件的电阻。敏感元件可以用金属导线，但是某些半导体在同样变形下要比导线电阻变化大。（参见“应变传感器”）。

功率谱密度 (PSD)：用每单位频率的均方加速度描述随机振动强度的专用词，单位用 g^2/Hz 或 g^2/cps 。有时也用加速度密度一词，但不太普遍。

精度：能够区分的最小增量，几乎和分辨率意义相同。精度与测量系统可能有的性能和设计性能有关。

概率振动：概率振动（与定值振动比较）是一种在任何未来时间内不能精确确定的振动，它本身不再完全重复，只能用概率分布函数（在统计基础上）给出在总时间或者部分时间内某一范围的幅值。

正交运动：正交运动（或称侧向运动，亦称横向运动或串相）是垂直于参考轴的任何

运动。这个词特别专用于假设具有零正交运动的振动台。

正交灵敏度：振动传感器的正交灵敏度（亦称侧向、横相、串相灵敏度）是垂直于传感器主轴方向的灵敏度。通常用占主轴灵敏度的百分数表示。

随机振动：（参见“概率振动”）如果随机振动的瞬态值是以高斯分布出现的，那么就称“高斯随机振动”。随机振动可以是宽带，即复盖宽的连续频带，也可以是狭带，即复盖相当狭频带，没有周期或定值性分量。

量程：仪器满意工作的上下极限。

重复性：（1）离开在相同条件下取得的诸数据点的平均值的最大偏差。（2）在相同的重复激励下输出的最大差值，（其他条件不变）请不要同“精度”混淆。

响应：响应是机械系统因为某些机械输入而引起的力或能量的振动运动。

响应讯号：用传感器测量机械系统的机械响应，比如用加速度计测量运动响应，来自传感器的讯号称为“响应讯号”。

分辨率：分辨率是使仪器输出产生可辨认出的变化的最小输入变化。与“精度”不同点在于辨认变化时包括有人的能力。

共振：在强迫振动中，当激励频率发生任何变化而形成它的响应下降时存在着一个真实单自由度系统的共振。（参见临界频率）。因此，在频率改变而输入力保持不变的情况下，共振表示弹簧质量响应的最大值。如果在同一频率下输入力变化，驱动单元的运动减弱，这时可以说驱动单元在反共振。

响铃效应：在去掉外力或激励力之后的继续振荡。例如弹一下吉他弦。

均方根或RMS：参考电工技术教科书。在正弦波的特定情况下，均方根是峰值的0.707倍。

灵敏度：机—电传感器或拾振器的灵敏度是电讯号（输出）和机械量（输入）之间的比值。

自感振动：自感振动也称自激振动，是非振荡能量变成的振动。如风吹电话线形成的机械振动。

冲击机：冲击机或冲击试验机是一种让系统承受一个可控制的，重复的机械冲击脉冲的设备。

冲击脉冲：冲击脉冲是在极短的时间内（与系统的自然周期相比）将动能传递给系统，接着就是振荡运动的自由衰减。冲击脉冲一般用加速度对时间的曲线显示。

冲击谱（或响应谱）：冲击谱是单自由度系统对它固有频率，在冲击作用下的最大响应图。

讯号调节器：通常是一种放大器，放在传感器或拾振器之后，使讯号与后面的放大器、发射机、读出设备等相适应。

简谐运动：这是一种时间正弦函数的周期振动。

稳态振动：统计的测量特性（比如峰值、平均、均方根、中间值）不随时间变化的周期振动。

平稳性：概率振动的一种特性，即它的PSD和概率分布不随时间变化。

应变式传感器：应变式传感器（比如简单的应变片）是靠敏感元件的变形改变电阻值。拉伸应变丝电阻增大。在不同胶接的应变加速度计中，由一排应变丝支承的质量的惯

性效应使得电阻值变化正比于加速度。

刚度：刚度是力（或扭矩）变化同弹簧元件变形之比如： $K = W/\delta$ 。

次谐波：次谐波是一种正弦量，它的频率是基频（X）的整分数，比如 $\frac{1}{2}X, \frac{1}{3}X, \dots$ 。

传感器（或拾振器）：传感器是一种设备，它可把振动或冲击运动变成电讯号，这些电讯号是实验运动中某些参数（比如位移、速度、加速度）的函数。

瞬态振动：瞬态振动是机械系统的短暂的持续振动。

传递性：在稳态振动中，传递性是响应运动和输入运动的无量纲之比。比值可以是两个振幅，两个速度或两个加速度。时常把最大值称为系统的机械“Q”。在共振时，传递性最大。

速度：通常速度定义为沿指定轴向的位移随时间的变化率。通常用 $\frac{dx}{dt}$ 或 \dot{x} 表示。还可以和直线运动一样用在角运动。

振动：振动是围绕平衡参考点的机械振荡或运动。

振动机（或激振器）：振动机是机械系统、部件、结构作振动试验时，进行控制和产生重复机械振动的机器。

振动表：振动表是用来测量来自传感器或拾振器的电讯号的设备。一般有电放大器，检波器和读数表，可以读出位移，速度或加速度。

重量：重量是一种物体的重力，并以一定尺度衡量的物体特性。

白色随机振动：PSD在宽广的频率范围内是常数的一种宽带随机振动。

第一章 共振特性

引言

作为一个振动和冲击试验的夹具设计者来说，必须了解振动以及当它们振动时那些结构是怎样工作的知识。具体地说，必须具有某些关于共振的知识。在讨论振动和冲击试验以及夹具时，其他的术语，如传递性和隔振也是有用的。本章我们将研究这些术语及一些其它问题。

一、试验夹具的用途

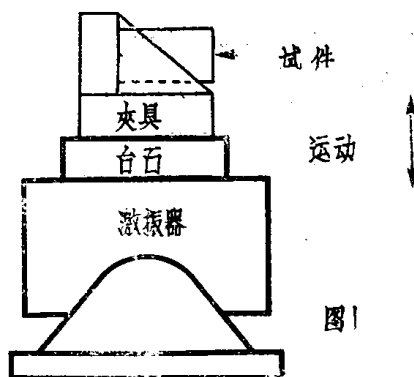
为了了解试验夹具的功能，一般说，我们应对于振动试验的设备作一初步研究。请看图1，振动台的运动部分通常称为台面，有时称为动圈。在工作台面上有一些连接点，即固定在台上的标准 $3/8''-24$ 的螺纹孔；通常是使用凹头盖螺钉，把夹具牢固地连接在这些孔上。

为了把试件连接到台面上，夹具是很需要的，其理由如下：

1. 为了使试件的孔型与台面上的孔型相匹配，这就需要中间零件。

2. 试件常常要几个方向固定，这是因为试验条件通常要求试件在几个方向上进行振动。

试件是用来作振动或冲击试验的物体。试件的运动通常由试验条件来描述。技术条件中给出这样一些数据：如运动的振幅、速度和加速度；还给出改变频率的扫描速度。在冲击试验情况下，技术条件中给出了不同的要求，但意图是与振动相同的。



二、为什么需要了解共振

了解共振特性，对于试验夹具的设计者为什么需要呢？因为共振影响可能出现在振动台动圈上，或出现在夹具本身，或出现在试件上。而无论它出现在那里，都影响试验的完成。一般说它是不希望有的。在试验频率范围内（一般为 $10-2000\text{Hz}$ ），振动台动圈应该避免发生共振。旧式的振动台动圈固有频率低于 1000Hz ，如果没有其它理由，比如无法控制的一些因素所产生的影响，我们必须找出共振的影响。

理想的情况是在试验的频率范围上不存在试件的共振影响。如果试件很小并且很硬，

这样它的固有频率就很高,如果加些阻尼材料来减小共振影响,那么设计者就达到了目的。

你将看到:很难弄清楚实际使用安装状态下的共振特性。因此也很难在你的夹具上复现它。由于这种指标很难高攀,所以我们通常采用刚性安装以达到试验目的。因此理想的夹具是在试验条件下不出现共振影响,这就是我们的设计目的。

三、共振的意义

共振这个术语意味着什么呢?假设你带着小孩到公园去,小孩要去打秋千。那么你给秋千一个推力,在你点香烟的时候它就停下来了。你再给它一个推力,那么为了照顾另一个小孩它又停下来了。这就是说它不能达到很大的运动振幅。这是因为你的外力频率或者说激励频率太低。

在另一个极端情况下,假设你给秋千以每秒十次的推力。那么可以使小孩摆动起来,但仍不能达到很大的运动振幅。这是因为外力频率太高的缘故。

通过试验我们可以知道:达到很大运动振幅的途径是加一个能量到系统中去,而且要以十分准确的外力频率和相位加进去,只有这样作的时候,才会得到最大的运动振幅或者说得到共振。也就是说外力频率与运动系统的固有频率相一致。

四、自由振动

让我们详细地研究一下共振和共振特性。让我们用图2来进行说明。它不是小孩站在秋千上,而是称作单自由度系统的力学概念图。它与我们实际生活中所遇到的实际机械系统相比作了很多简化,但它对研究弹簧、弹簧常数、重量、质量、阻尼、阻尼系数、传递性、隔振等概念的意义解释和应用都是非常有用的。

这个系统包括一个重量 W ,一个刚度为 K 的弹簧和一个阻尼系数为 C 的粘性阻尼器。 K 一般称作弹簧常数, K 磅负载使弹簧恰好偏移(静偏移)1吋。导向系统约束重量 W 只作

垂直平动。这样的系统在实际生活中不常看到,但很多系统在小的频率范围上都类似于图2所示的系统。如果没有重量 W ,则弹簧的长度为 l ,当弹簧支承重量 W 时,则它的长度为 $l+\delta$ 。 δ 称作静偏移,还可以通过 W/K 计算出 l ;这就是虎克定律及其对于线性弹簧的应用。

现在让我们来讨论自由振动和固有频率的概念。假设我们把重量 W 向下拉一个比较短的距离,然后放开它。那么这个系统将以一定的频率振荡。这个情况就称为“自由振动”。如果我们忽略图2中所示的阻尼器的影响,那么我们这个系统将永远振动下去。(某些类似于汽车上的缓冲器,它把系统的振动能量转化为热,这样振荡就消失了)。重量 W 将以每秒一定的周数作上下运动。在忽略阻尼的影响时,这个“固有频率”用如下公式给出:

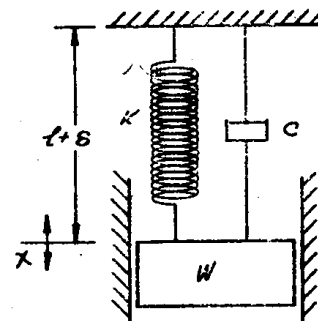


图2

(单位是Hz或CPS)

$$f_N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Kg}{W}} = \frac{3.13}{\sqrt{\delta}}$$

g 是通过国际协议承认的一个常数, 数值为386.087吋/秒²或32.1739呎/秒² (物理学中遇到这个常数为32.2呎/秒², 这是物体在真空中朝地球落下的加速度)。在实际工程中, 使用以磅为单位的重量 W 比使用以磅一秒²/吋为单位的的质量 M 为好。

五、强 迫 振 动

现在让我们来讨论强迫振动的概念。假设图 2 顶部的支承是按照一恒定的峰—峰振幅如 1 吋进行振动的。而它的振动频率是可以变化的。试问, 重量 W 将经受多大的振幅? 在这个输入时, 重量 W 的共振是什么? 答案取决于下列两条:

- (1) 输入振动的频率。
- (2) 系统的固有频率和阻尼。

我们假设这个系统的固有频率为 1 Hz。我们以 0.1 Hz 频率振动这个系统 (比固有频率低得多), 我们将发现重量 W 具有与输入运动大约相同的运动。振幅在 1 吋峰—峰值周围。这个情况就是图 3 的零点, 传递性或振动响应与振动输入比为 1/1 或简化为 1。

如果我们增加振动频率, 将发现重物 W 的振幅增加, 增加多少决定于系统阻尼值。如果系统具有轻微阻尼, 那么最大可增加到 10 倍。当输入振动达到 1 Hz 时, (恰好是固有频率时), 那么重物 W 具有大约 10 吋的峰—峰运动; 这个响应大约是输入运动的十倍。在这个最大响应频率时, 我们说系统处于共振状态; 也就是激励频率与负载的固有响应频率相同。如果我们进一步增加激励频率, (见图 3) 将发现响应减小。例如, 在固有频率的 1.414 倍或说 1.414 Hz 时, 响应降落到这种程度, 以至于重物 W 的运动又是 1 吋 (但此时的运动将不是在 0.1 Hz 时输入运动所具有的相位了)。如果再进一步增加激励频率, 那么响应将进一步减小。在激励频率为 2 Hz 时, 响应将下降到大约 0.3 吋; 在激励频率为 3 Hz 时, 响应将下降到大约 0.13 吋。

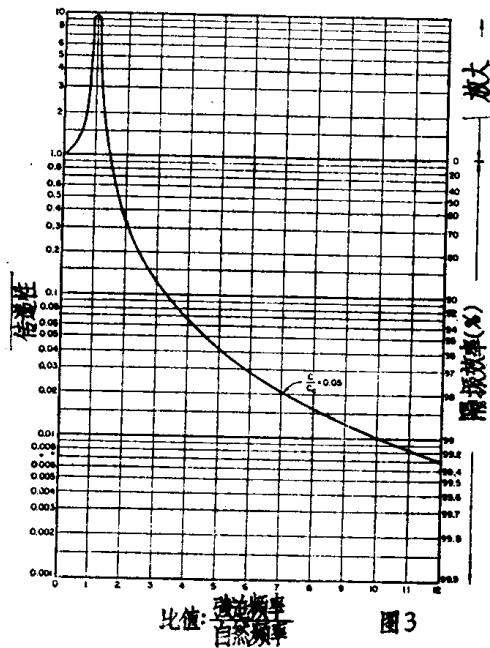


图 3

请注意, 图 3 的横座标是标准化的, 所以同样的曲线可应用到当激励频率为 1, 10, 14.14, 20 及 30 Hz 时, 固有频率为 10 Hz 的系统中去。

六、数 字 例 题

举个数字例题是有益处的。假设我们有一个类似于图 2 的系统, 用 K 等于 500 磅/吋的

弹簧支承一个50磅的重物。那么静偏移为：

$$\delta = \frac{W}{K} = \frac{50}{500} = 0.1 \text{吋}^*$$

$$f_N = \frac{3.13}{\sqrt{\delta}} = \frac{3.13}{\sqrt{0.1}} = 9.8 \text{Hz}$$

固有频率 f_N 通过 δ 被确定（或说通过 $\frac{W}{K}$ 的比确定）。具有这个静偏移 δ 的任何这样的系统都将具有9.8Hz的固有频率。

七、隔 振

在固有频率的1.414倍以上的区域称为隔振区，也就是说，重物 W 具有比输入为小的振动，也可说成隔去支承的振动或与支承振动不耦合。类似地，一个很柔软的振动台动圈不会把振动传到夹具上去。同样一个很柔软的夹具也不会把振动传到试件上去。出现了隔振或不耦合就不能满足振动试验条件，特别是在高频振动试验时。

八、附 加 自 由 度

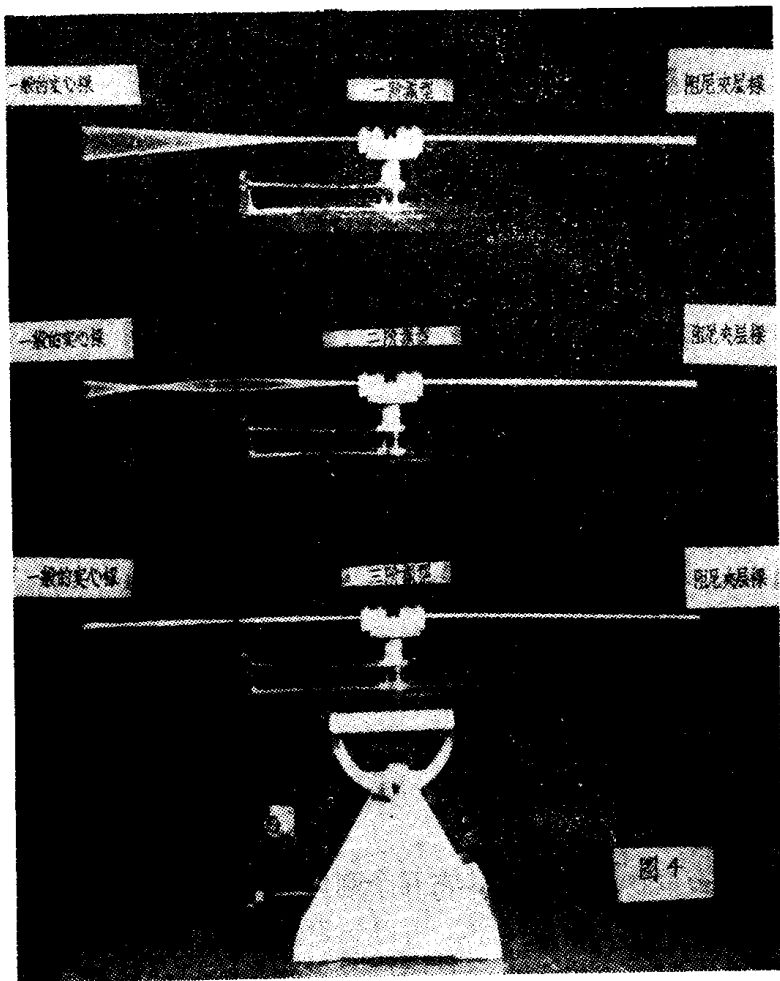
如果图2中的重物 W 没有导向，那么重物应能够在其它五个刚体运动方向上运动，也就是有五个附加自由度，五个附加固有频率。以此类推，可得到附加质量，弹簧和阻尼以及附加自由度……。现在研究一下连续的梁或板，也就是质量，弹簧和阻尼的特性是分布的而不是集中的。这样就有无限多个可能的运动，它的自然频率除了刚体运动以外还有相对变形。这些特性取决于激励频率、质量、刚度和阻尼的分布；振动力作用点是单点还是多点。

幸好，只在某些适当的频率范围才出现少量的这些运动。在第九节中，我们示出的悬臂单梁三个模态或振型就是从这种运动中选出的。极简单的结构才作弯曲和扭转运动。要对单梁或单板的弯曲和扭转运动进行全面的分析，其数学知识也是极广的。建议感兴趣的读者参考振动理论方面的经典课本。诸如船身、导弹结构和机身这样结构的弯曲和扭转响应运动计算是极其复杂的，必须借助计算机才能研究各种可能的振型。然后使用带有控制的振动能源进行试验研究，以便证实计算振型并去掉任何怀疑。在大量的振动工作中，特别需要的仅是一次近似结果。因此，在单自由度系统进行较简单计算是有用的，正如第十章所指出的那样。

九、连 续 系 统

现研究图4。图中在一小的电磁振动台上头顶头地装上两个悬臂梁。在最大的试验频

* 这个方法一般是用来校核刚度的计算值的；应用一个已知的重量，测量出它引起的偏移，然后从 $\frac{W}{\delta}$ 计算出刚度 K 来。



率上具有明显的小的振幅。但是，在三个特殊的线频上，出现三个振动模态（振型）。注意振型的复杂程度随振型的阶数提高而提高。当振动台的激励频率与试件的任何固有频率相一致时，则引起共振。沿梁具有最小振幅的点称为波节，而具有最大振幅的点称为波腹。如果我们借助于频率闪光仪来观察运动，那么，我们应看到一个慢运动。它的所有点都同相运动或反相运动。从波节的一边到另一边相位改变 180° 。

右边的梁为什么振幅响应较小呢？这是因为它具有较大的阻尼，即较大的弯曲摩擦，也就是弯曲转换成热。右边梁具有较大阻力的原因是因它具有多层结构。如图 5 所示。夹

具设计者必须明了任何材料都具有某种阻尼，通常称为滞后阻尼；如果没有这一点，振动的铃将永远振下去。阻尼还有其它形式，如：

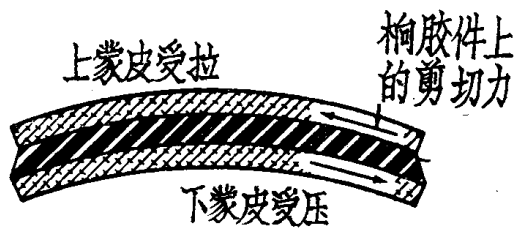


图 5

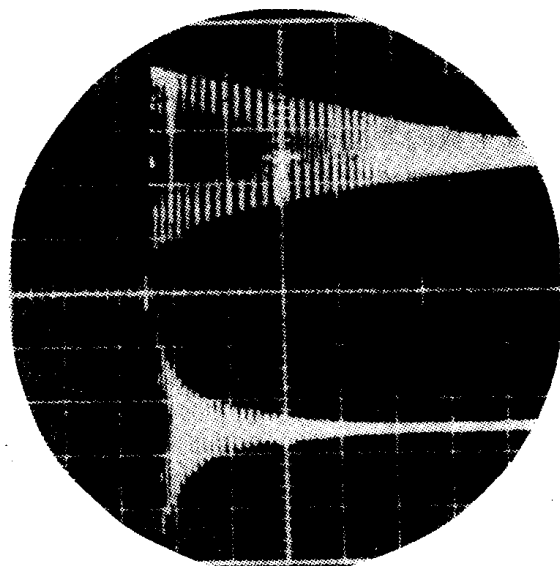


图 6

1. 通过周围的介质可引起阻尼。例如一个铃在真空比在空气中振的时间长。浸在水里振的时间也短。
2. 由界面的摩擦引起阻尼。如螺栓的连接处。
3. 辅助缓冲筒，如高级大门上的阻尼器，或汽车上的缓冲器。

现用图 6（见右）表示阻尼对自由振动的影响。假设在图 4 中的加速度计被安装在二个梁的端点上并使梁起振。那么所引起的振动在夹层梁上将比实心梁上衰减的快。

十、振动能量与频谱

以上我们所讨论的仅是正弦振动，在正弦振动中，运动的力和能量只在单一频率上。（如图 7 所示），测量这种运动的加速度计将产生一个正弦电信号，并且我们可以在示波器上观察到。

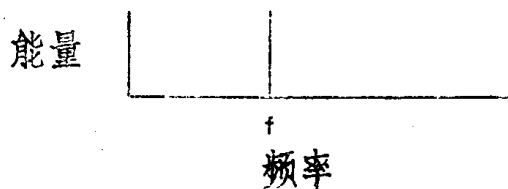


图 7

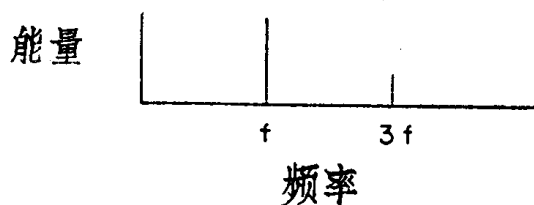
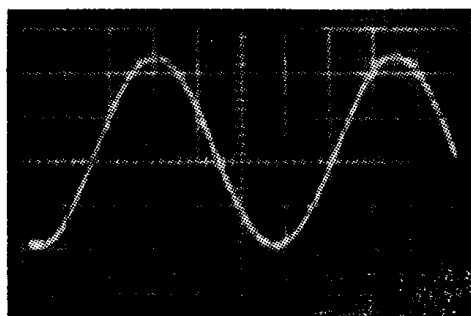
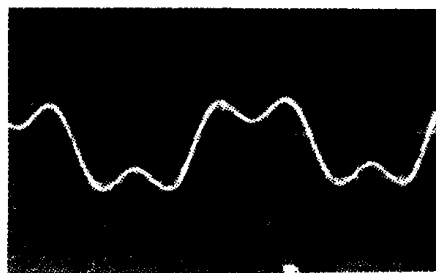


图 8



但是，一般振动不完全是正弦振动。通常有其他频率出现，如图 8 所示。在这个例子中，具有一个基频 f ，并附加有其它分量，即为基频三倍的谐波（三次谐波）。测量这种运动的加速度计将产生一个非正弦电信号，并在示波器上观察到。当试验频率在高放大率机械共振频率的三分之一，时常出现图 8 所示的运动。这种高放大率的机械共振常称为高 Q 共振。这将影响试验结果，而且在电磁激振器上经常发生。在第二章、第十一章和第十二章中将进一步讨论这个问题。在试验期间和计算夹具时，夹具设计者必须防止非正弦运动的出现。夹具设计者感兴趣的另一种振动类型是随机振动，虽然对于夹具设计者来说，它与正弦振动几乎毫无区别。所有的频率与相位变化关系是同时出现的，并且振幅是所有这些频率的振幅瞬时和。图 9 所示曲线表明，运动的波形是观察不到的，并且振动的能量存在于一个连续的频谱上。关于随机振动问题的详细说明见第十四章与第十五章。

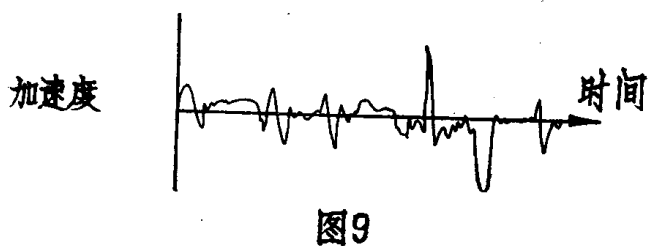
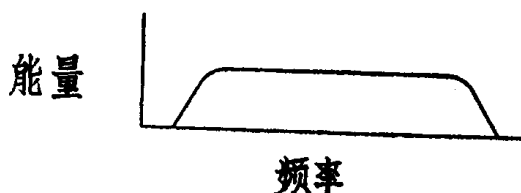


图 9



十一、阻尼对响应曲线的影响

本章最后要讲一讲结构在振动频率只有一个但这个频率是变化的振动情况下（如扫频振动试验情况）的特性。从最低频率开始，我们将发现系统的所有零件象一个构件那样运动，其振动具有相同的振幅及相位。这个低频特性如图 3 左端所给出的那样，在这里传递性等于 1。

如果激振频率升高，那么系统不再象一个物件那样运动了，并且某些零件开始显示共振放大。最大的放大值常称为系统的机械 Q。从图 10 可以看出，阻尼越小，则 Q 值越高，反之，阻尼越大则 Q 值越小。

如果激振频率进一步升高，会出现隔振问题。从图 10 中看到：阻尼达到最大，隔振的量是最小；这对夹具设计极有帮助。在结构上感兴趣的某些点显示出比输入振幅小。对于单自由度系统，这个响应可越来越小。但实际机械系统不能这样工作。在某些频率上，各种零件由于系统其它零件的振动会再次发生共振放大。这些放大都是运动系统的高阶振型响应。如图 4 所示。

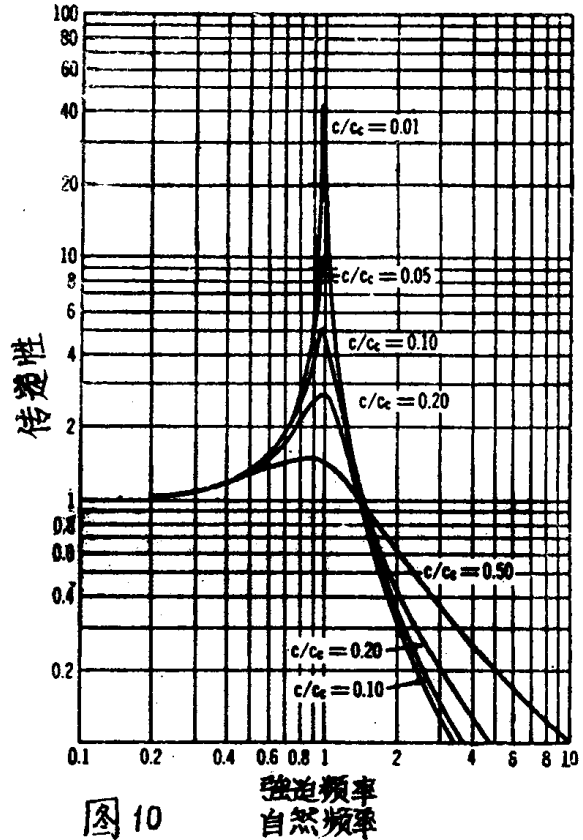


图 10

十二、小 结

本文讨论的材料，当应用到振动台动圈时，我们希望它的第一阶共振在试验频率范围之外，但这不是总能作到的，这将在第二章第六节中讨论。若应用到试件上，以及你所设计的夹具上，一般希望设计夹具的最低共振频率在试验频率范围之外，但同样也不是总能达到这个目的，这将在第三章中讨论。

第二章 振动试验设备的类型

引言

“夹具设计者为什么需要知道振动台呢”？

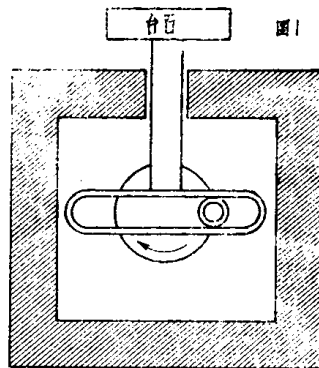
我们在第一章里已经讨论了夹具可以被认为是试件和振动台之间的连接装置。因此夹具设计者必须十分清楚承担试验的试验室的各种振动台，因为它们需要专用的夹具。对于夹具设计者来说不在于了解如何操作振动台，而在于了解如下几个方面：

1. 安装夹具的振动台台面详图，即台面上孔和螺栓尺寸及螺纹的详图。
2. 在不会引起损坏的情况下，可以附加到振动台台面上的总重量。
3. 在振动台额定值内的有效推力。
4. 台面与夹具之间所需的预紧力。

如果需要更详细地了解振动台的性能，可参考各振动台制造厂所发行的文献，及振动台操作维修手册。

在本章中，我们将讨论三类主要的振动台：

1. 全机械型振动台，
 - ① 直接驱动台面，
 - ② 反作用力驱动台面；
2. 电液振动台；
3. 电磁振动台。



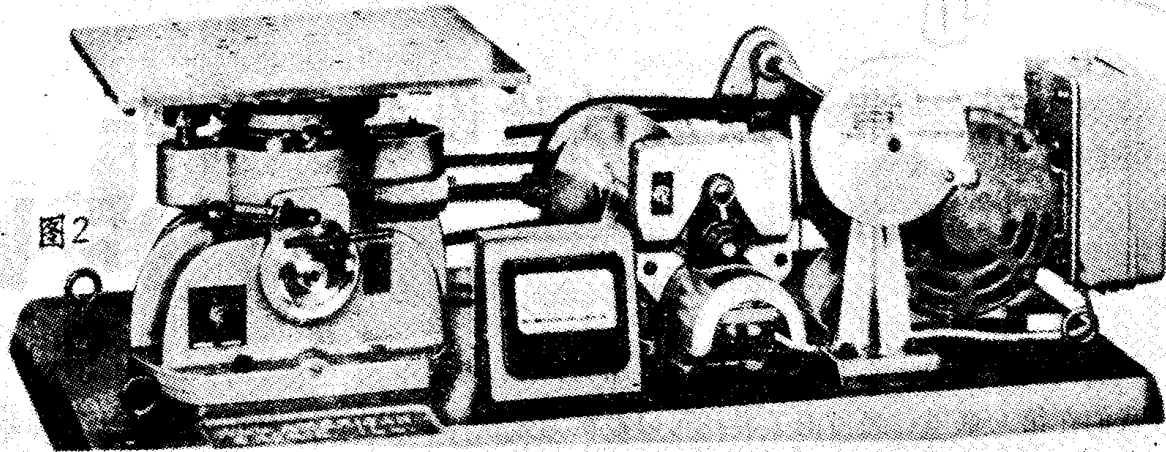
一、全机械振动台——直接驱动型

在大多数情况下，最简单、最可靠的振动台就是全机械结构的振动台。这种振动台的夹具设计通常是十分简单的。因为这些台子很少用来作50或60 Hz以上的试验。我们下面将首先研究直接驱动型。图1表示一个“刹轭”机构，即一个转动的驱动飞轮带一个曲柄销，并推动轭架，使台面运动。

图2表示一个直接驱动振动台的实例。旋转部分和联动装置迫使机器座与台面之间产生一位移，这个机器称为恒位移机。如果机座是刚性的并且不移动，那么这个机器在所有的试验频率上都保持恒定的峰—峰振幅。纯正弦运动是很少达到的；速度波形特别是加速度波形可以失真到看不清的程度。

对于共振研究性试验，运动的纯波形是需要的。（操作者必须始终用传感器和示波器监视加速度波形，不让这些波形过分欠载或过分超载。）在直接驱动机中，非恒定运动及波形失真是非常令人讨厌的，并且限制这种振动台在低频试验中使用。

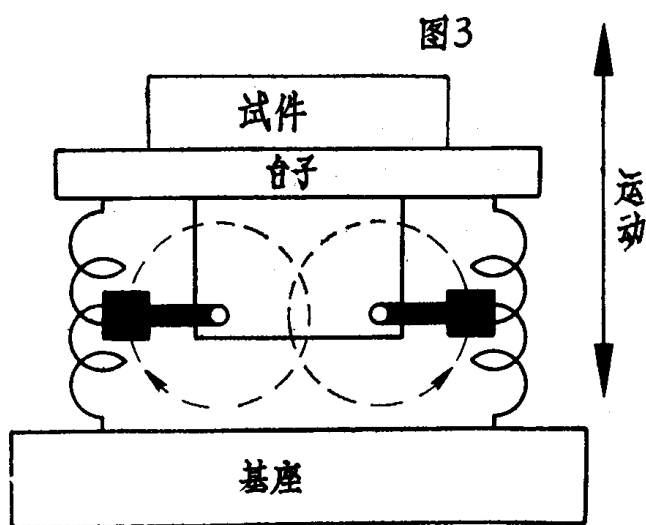
这类机器有时称为“蛮力机器”，因为它能产生运动所需要的任何力，甚至可达到破



坏零件或扭断转轴的程度。振幅是通过调整曲柄或凸轮的偏移来确定的。试验规范规定的典型峰—峰振幅为0.036吋。频率是在试验当中通过改变驱动飞轮的转速来调整的。

这种机械振动台的额定值是根据试件重量以及最大振幅、最大频率计算的。限制这个额定值的因素通常是轴承的承载能力。推力的计算式如下：

重量 (磅) $\times 0.0511 \times$ 频率的平方 \times 振幅 (吋)。



二、全机械振动台——反作用力型

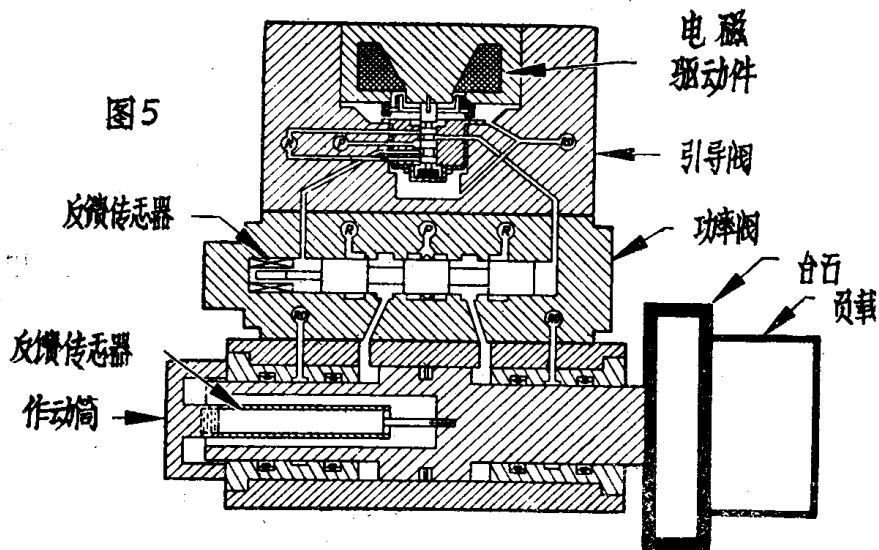
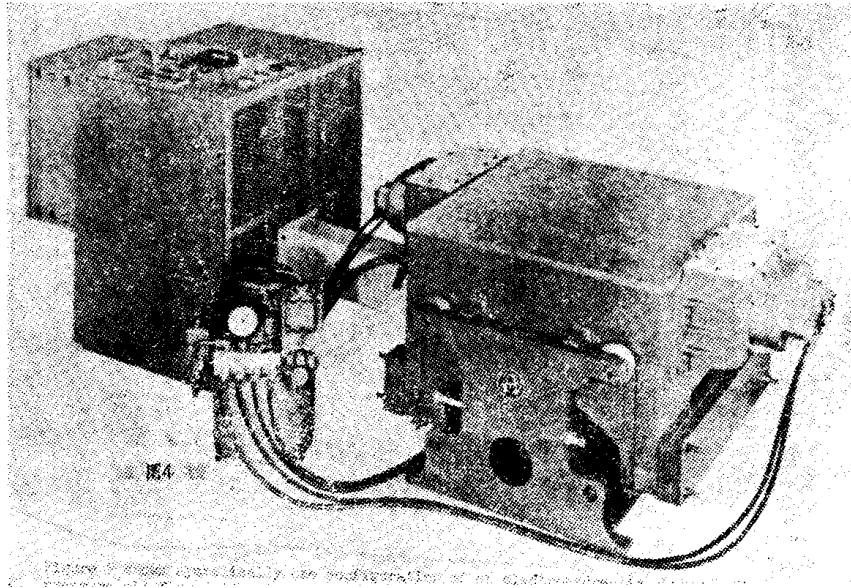
另一种机械振动台叫做反作用力型。最大量的是使用二个转动方向相反不平衡的重块，如图3所示。二重块重量相等，通过齿轮传动，并以相同的转速转动，轴向力相加而与轴向垂直的力相消。只要负载的重心被固定在台面中心上，就不会产生过大的横向振动，那么振动台就几乎是直线运动。

最常用的反作用力振动台如图4所示。这种类型的振动台可提供水平或垂直振动，支承弹簧允许一个方向运动而阻止其它方向运动。

三、电液振动台

此种振动台对夹具设计者提出了更多的要求，这是因为它有时用在较高的试验频率上，如200Hz或大于200Hz。通过一个独有的带螺纹连接件提供振动力。夹具设计者的问题是把力适当地传到试验负载上。

图5示出了电液台的一种示意外形图。高压油通过油泵把功率传到振动台的阀门上。可用相当长的管路把油泵连接到振动台上，但阀门必须很接近振动台，因为油具有很小的



可压缩性，只有管路很短才能达到适当的高频，所以阀门组件一般是安装在振动台边上。

图 5 所示的电磁驱动单元十分类似于电磁扬声器。用永久磁铁产生固定磁场。驱动单元前后推动引导阀门。引导阀门的运动引起油通过功率阀门，导致功率轴运动。最后油压以交替的方向作用于作动筒，使作动筒运动。

波形通常比直接驱动型机械振动台好，与反作用力型机械振动台大致相同。典型的波形失真是 5 %。与我们将要讨论的电磁振动台相比是比不上的。

电液振动台能产生较大的推力和较长的冲程，市场已有冲程 1 吋倍幅，推力达 10 万磅的系统。主机是一个 125 马力的电动机，它以 3000 磅/吋² 的压强驱动 70 加仑/小时的泵，在大约 3 Hz 上能达到 1 吋倍幅。但满推力（加速度）只是在重一吨的负载、频率大约 400 Hz 时才能获得。要驱动更重的负载，必须用重型反作用质量给以补偿。

图 6 表示连接到汽车上的四个振动台。为了进行模态研究和阻尼研究，可操作振动台作同相或反相的正弦运动，为了便于实现，从安装在每辆汽车的四个轮子上的加速度计得到的记录信号可以反馈到四个相应的振动台上；为了在试验室里鉴定车辆，那么这样所引起的振动就是一个很有用的“行驶模拟”。