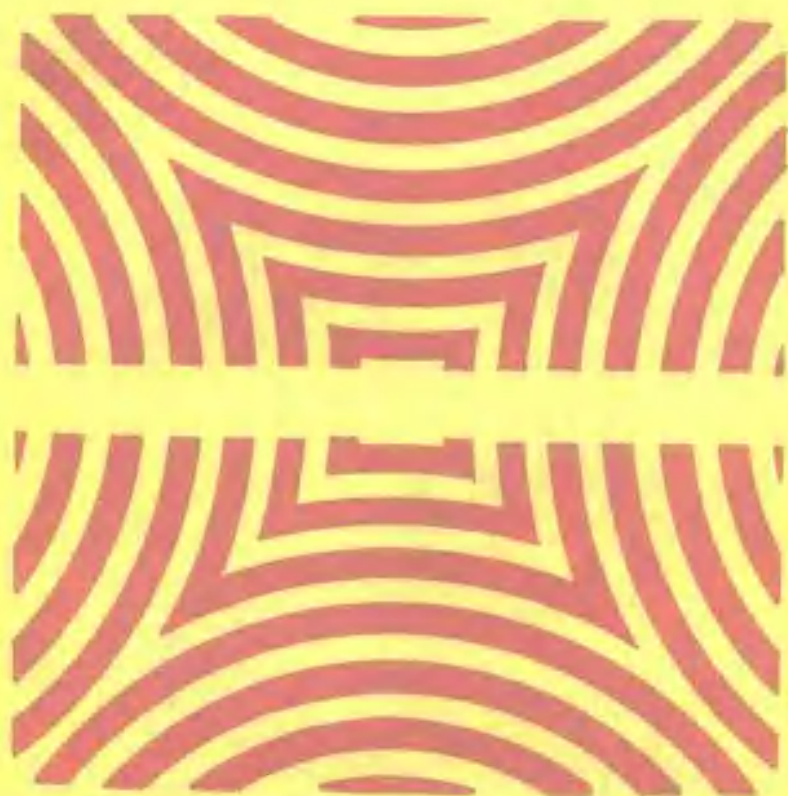


刘榛华 编著



粘弹阻尼减振降噪 应用技术

宇航出版社

71.54
857
=2

DG 62/08

粘弹阻尼减振降噪 应用 技 术

刘棣华 编著



4014210

内 容 提 要

本书为粘弹阻尼减振降噪应用技术的实验及工程设计实践的总结, 分别对振动控制的主要方法、粘弹阻尼技术概念、粘弹阻尼材料、结构阻尼设计计算、实验测试、制造工艺、阻尼减振应用设计、振动控制与电子设备的可靠性及小型化以及粘弹阻尼降噪应用设计等内容进行了介绍, 并列出了有关粘弹阻尼减振降噪方面的大量应用示例。

本书适合各科学技术部门和工业部门中从事减振降噪技术研究设计和生产的工程技术人员阅读, 也可供大专院校相应专业的师生参考。

粘弹阻尼减振降噪应用技术

刘禄华 编著

责任编辑: 王敬春

*

宇航出版社出版

北京市和平里滨河路1号

邮政编码100013

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.125 字数: 297千字

1990年4月第1版第1次印刷 印数: 1-1200册

ISBN 7-80034-309-X/TB·065 定价: 7.90元

7.90 7.90

序

随着现代科学技术的发展, 振动、冲击和噪声的控制日益成为一个复杂而迫切的问题。在极不相同的科学和技术部门都经常遇到, 因此对于减振降噪技术的研究, 引起了许多部门的普遍重视和关心。尤其是航海、航空和航天等技术的飞快进步, 舰艇、喷气飞机、火箭、航天飞机等系统的功率和速度都有极大的提高, 均会产生强烈的宽频带随机振动和噪声。宽带随机振源将会激发起舰艇、飞行器以及它们的机电控制设备的许多谐振峰, 使结构系统或电子设备所遇到的力学环境愈来愈复杂, 因谐振响应而产生的疲劳损坏和电子设备由于受到过大的加速度影响而失效的现象也愈加严重。若不妥善解决, 轻则将影响工作精度、缩短疲劳寿命, 重则还会引起严重损坏。

近三、四十年来, 不少工业发达国家都在进行利用粘弹阻尼技术控制振动、冲击和噪声的研究实验工作, 并取得了很大进展。利用粘弹阻尼技术减振降噪是一项新的技术措施, 尤其对于宽频带随机振动和噪声的控制具有特殊的设计效果。到目前为止, 粘弹阻尼技术已发展成为一项专门的技术, 成为控制振动、冲击和噪声的主要技术手段。在现代科学技术领域中, 它具有不可忽视的作用。

粘弹阻尼技术包括粘弹阻尼材料的研制、结构阻尼设计处理和正确合理的应用研究等两个方面的内容。

性能良好的阻尼材料, 通过合理的结构阻尼设计处理, 可以成功地、广泛地应用于现代航空、航海、航天、建筑、车辆、工程机械、医疗器械、家用电器等方面。实践证明, 应用粘弹阻尼

技术减振降噪，可以提高产品的疲劳寿命、工作精度和可靠性。还可以大大改善工作环境。

本书根据研究实验结果和工程设计及使用实践，并参考一部分国内外有关的文献，经总结综合而写成的。全书共分为七章，分别对振动控制、阻尼减振、粘弹阻尼材料、结构阻尼设计计算、制造工艺、阻尼减振应用设计、振动控制与电子设备的可靠性及轻小型化以及粘弹阻尼降噪声应用设计等内容进行了比较系统的介绍。由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，希望从事这方面研究、设计、使用的同行和有关人员提出宝贵意见。

作 者

1987.6.

目 录

第一章 振动控制	(1)
1.1 振动激励的起因	(1)
1.1.1 声激励	(2)
1.1.2 气动激励	(2)
1.1.3 机械激励	(2)
1.2 振动激励的性质	(4)
1.3 振动对结构系统造成的破坏	(10)
1.3.1 破坏准则	(10)
1.3.2 累积损伤理论	(12)
1.3.3 损伤理论的应用	(11)
1.4 振动控制	(15)
1.4.1 刚化	(16)
1.4.2 解调	(16)
1.4.3 去耦	(17)
1.4.4 普通振动隔离	(18)
1.4.5 大阻尼隔振	(27)
1.4.6 动态振动吸振	(31)
1.4.7 结构阻尼减振	(36)
第二章 阻尼技术	(38)
2.1 阻尼减振	(38)
2.2 阻尼机理	(43)
2.2.1 材料的内摩擦	(43)
2.2.2 摩擦	(44)
2.2.3 能量传输	(45)
2.2.4 机械能与电能的转换效应	(45)
2.2.5 频率转换	(45)

2.3 阻尼材料	(46)
2.3.1 粘弹阻尼材料	(47)
2.3.2 粘弹阻尼材料动态力学性能	(49)
2.4 结构阻尼	(53)
2.4.1 设计思想	(54)
2.4.2 结构阻尼形式	(57)
2.4.3 阻尼元件	(65)
2.5 粘弹阻尼技术应用	(68)
2.5.1 锯片约束阻尼层处理	(69)
2.5.2 地铁车轮阻尼带处理	(69)
2.5.3 油船甲板约束阻尼处理	(70)
2.5.4 高压电器阻尼处理	(71)
2.5.5 网球拍的阻尼处理	(71)
第三章 粘弹阻尼材料	(73)
3.1 粘弹阻尼材料性能评定及环境因素影响	(74)
3.1.1 粘弹阻尼材料的性能评定	(75)
3.1.2 环境因素对粘弹阻尼材料性能的影响	(77)
3.1.3 粘弹阻尼材料动态力学性能主曲线图	(79)
3.1.4 粘弹阻尼材料动态力学性能总曲线图(诺莫图)	(83)
3.1.5 粘弹阻尼材料性能数据的计算机处理及经验公式	(84)
3.2 粘弹阻尼材料动态力学性能的测试方法及测试设备	(96)
3.2.1 正弦力激励法	(96)
3.2.2 谐振试验法	(99)
3.2.3 自由衰减法	(101)
3.2.4 振动梁试验	(105)
3.3 粘弹阻尼材料介绍	(108)
3.3.1 国外阻尼材料介绍	(109)
3.3.2 国内阻尼材料介绍	(118)
第四章 结构阻尼设计计算	(129)
4.1 结构阻尼的物理概念	(130)
4.1.1 单自由度的阻尼振动	(130)
4.1.2 能量法表示结构阻尼	(132)

4.1.3	多元素系统的结构损耗因子	(132)
4.2	粘弹阻尼结构设计计算	(134)
4.2.1	用能量耗损机理求组合结构损耗因子	(134)
4.2.2	自由阻尼层结构设计计算	(137)
4.2.3	约束阻尼层结构设计计算	(153)
4.2.4	自由阻尼层结构与约束阻尼层结构对比	(177)
4.3	对称约束阻尼夹层结构参数及优化	(179)
4.3.1	对称约束阻尼夹层结构的损耗因子 η	(179)
4.3.2	最佳设计参数 ($\frac{G'}{f}$)	(187)
4.3.3	阻尼结构的谐振频率 f_n	(190)
4.3.4	影响结构阻尼的主要因素	(192)
4.3.5	阻尼结构梁的使用温度范围和频率范围的加宽	(195)
4.4	夹层阻尼结构设计方法	(197)
4.4.1	设计原理	(198)
4.4.2	设计程序	(200)
4.4.3	设计准则	(203)
4.4.4	几种典型的对称夹层阻尼结构	(205)
4.5	夹层阻尼结构的制造工艺	(206)
4.5.1	粘弹夹层阻尼结构技术要求	(206)
4.5.2	粘合剂的选择	(207)
4.5.3	粘合工艺过程	(209)
4.6	粘弹夹层阻尼结构的正确使用及保管	(210)
4.6.1	粘弹夹层阻尼结构与其适用温度范围及 频率域的一致性	(210)
4.6.2	安装固定形式	(210)
4.6.3	粘弹夹层阻尼结构的正确使用	(212)
4.6.4	粘弹阻尼结构的保管与运输	(213)
4.7	大阻尼减振器设计	(214)
4.7.1	大阻尼隔振设计原理	(214)
4.7.2	阻尼垫设计	(220)
第五章	粘弹阻尼减振应用设计	(225)

6.1 阻尼减振在电子设备中的应用	(225)
5.1.1 矩形阻尼结构底板一级阻尼减振系统	(226)
5.1.2 四耳型阻尼结构底板与泡沫型阻尼材料构成的多级阻 尼减振系统	(228)
5.1.3 阻尼垫减振系统	(229)
5.1.4 综合应用系统	(232)
5.2 阻尼减振在多种电子设备的共用托架及支撑上的应用	(235)
5.2.1 仪器共用托板的阻尼处理	(235)
5.2.2 电子设备共用支撑的阻尼处理	(236)
5.2.3 局部阻尼处理的仪器盘	(238)
5.2.4 粘弹阻尼与减震器隔振综合处理结构——仪器托架 ...	(238)
5.2.5 自由阻尼结构仪器主托架	(240)
5.3 现代电子设备局部构件的典型阻尼处理形式	(241)
5.3.1 大阻尼结构仪器底板	(241)
5.3.2 阻尼处理印刷电路板	(243)
5.3.3 继电器安装板的阻尼处理形式	(250)
5.3.4 惯性平台结构的阻尼处理	(253)
5.4 阻尼减振在其它设备中的应用	(257)
5.4.1 喷气发动机风扇叶片的阻尼处理	(257)
5.4.2 粘弹阻尼结构太阳能电池板	(258)
5.4.3 遥控罗盘传感器阻尼板	(259)
5.4.4 飞机分配器阻尼处理	(260)
5.4.5 脉冲转发器阻尼处理	(261)
第六章 振动控制与电子设备可靠性及轻小型化	(262)
6.1 电子设备可靠性及轻小型化设计途径	(262)
6.2 电子设备可靠性、轻小型化与振动控制设计	(267)
6.2.1 振动控制设计的必要性	(264)
6.2.2 振动控制设计与可靠性及轻小型化	(265)
6.3 振动防护设计	(267)
6.3.1 掌握振动环境	(267)
6.3.2 电子元件的抗振设计	(267)
6.3.3 采用分频段方法提高电子元器件的抗振能力	(276)

6.3.4	部件与整机的抗振设计	(277)
6.4	冲击防护设计	(291)
6.4.1	冲击	(291)
6.4.2	冲击隔离	(292)
6.4.3	冲击响应及响应谱	(294)
6.4.4	冲击隔离系统设计	(299)
6.5	振动和冲击试验	(302)
第七章 粘弹阻尼降噪声		(304)
7.1	声音和噪声	(304)
7.1.1	声压、声强或声功率及方向系数	(305)
7.1.2	级和分贝	(307)
7.1.3	以分贝计的声功率级	(308)
7.1.4	以分贝计的声压级	(309)
7.1.5	声音的高度和响度	(311)
7.1.6	综合噪声级	(313)
7.2	振动和噪声	(316)
7.3	允许噪声级和标准	(318)
7.4	噪声的控制	(319)
7.4.1	听力保护法	(320)
7.4.2	工程控制法	(320)
7.4.3	行政控制法	(321)
7.5	粘弹阻尼降噪声应用设计	(321)
7.5.1	研究噪声的方法和条件	(321)
7.5.2	粘弹阻尼降噪声	(323)
7.5.3	机械噪声的抑制	(324)
7.5.4	空气动力噪声的抑制	(331)
7.5.5	噪声的隔绝	(334)

第一章 振动控制

设计制造在复杂振动条件下能正常工作的机器设备、电子仪器和各种机电设备等,振动控制应该是重点考虑的问题之一。随着现代交通运输、航海、航空、航天等技术的发展,车辆、机械、舰艇、喷气飞机、火箭、卫星等所处的振动、冲击、过载、噪声等力学环境更加复杂和恶劣。就振动环境而言,其频率范围之宽,加速度之大,足以使结构系统及它们的电子设备内部产生破坏应力,该应力轻则将影响工作精度、缩短疲劳寿命,重则还会引起严重故障。因此,复杂的振动环境已成为限制电子设备及机电设备的性能、寿命和可靠性的重要因素,在现代工程设计中,振动控制有着非常重要的意义。如果没有有效的振动控制措施,就不可能保证结构系统及各种电子设备在复杂和严厉的力学环境中正常工作,更谈不上工作精度和可靠性的提高。

如何进行振动控制呢?实践证明其方法是多种多样的。只要合理地改变结构系统及其电子设备的质量、刚度和阻尼特性,都能达到振动控制的一定目的,从而增强结构及电子设备的抗振能力,提高它们的工作精度和工作可靠性。

1.1 振动激励的起因

具有一定质量的弹性物体在一定的条件下都能产生振动。因此一切工程设施和设备都会经受不同类型、不同程度的振动作用。当激励振动频率与结构系统的一个固有频率相同时,系统就会发生谐振现象,可能形成强烈振荡而导致结构破坏,如桥梁、大厦、舰船、飞机、火箭、航天飞机等,在谐振情况下都有可能

发生可怕的损坏。

然而这些结构振动激励的起因是什么呢？由于这些结构系统所处的工作环境不同，因而引起它们振动的振源及其起因也各异。就空间飞行器而言，可能具有许多种振动起因，但是每一种起因可以用下列三种激励源之一表示：声激励、气动激励、机械激励。这三种振源中究竟哪一个为主，哪一个次之，则就完全取决于飞行器的设计、发射台的设计、飞行器的飞行阶段及其总的任务要求。

1.1.1 声激励

由声引起的振动其激励能量是声场提供的。各种声场又能够以多种方式产生。火箭发动机本身产生的声场是由发动机的活动部件、燃料流动和燃料燃烧而产生的声能所引起的。

火箭发动机排气紊流产生的声场具有紊流声源。发动机排气紊流在飞行器上产生的声场比发动机本身产生的声场还要厉害，当飞行器在大气层中作亚音速飞行时，它便成了飞行器的主要振源。

由声引起的结构振动的程度取决于激励声压的频谱、幅值和结构的机械阻抗。

1.1.2 气动激励

能够引起飞行器振动的一些气动效应通常认为有下述几点：飞行器周围的紊流附面层中的压力波动，由动不稳定性引起的壁板等在气流中的颤振，因气流流过飞行器表面凸出部位所产生的紊流，凹槽或空腔上方的气流，附着在飞行器表面上的振荡冲击波等。

气动激励通常在跨音速附近以及在最大压力值下达到最大值。这就是说，气动激励对于飞行器的影响是在马赫数为1时最突出。

1.1.3 机械激励

机械振源起源于直接的机械激励。主要的机械激励是由发动

机及其它有关设备产生的。

这些振源起因于运动部件的加速运动以及气动力、电动和其它力的周期性变化。

上述机械振动力既可作为设备内部的力又可作为外力。在外层空间，当火箭本身不再引起激励能时，火箭发动机工作却会不断激起机械耦合振动，这种振动对于处在发动机附近区域的结构或设备影响最为严重，而在距离发动机较远处，由于飞行器结构中固有的阻尼和阻抗的不匹配而减小。

另外，发动机点火或关机时的快速压力变化皆会产生大幅度的瞬态振动量值，因而还会构成对结构的瞬态激励。当然还有其它一些机械振源，例如地面运输、空中利用爆炸螺栓分离、制动火箭以及回收着陆的撞击等。

高幅值和长时间的机械振动可加剧接触面部分的摩擦损伤，或者引起设备失灵，以及造成结构的疲劳破坏。

火箭在空间飞行时的振动激励因素示于图1-1。火箭外部结构的动态激励，是由于通过大气层传输的声压变化以及从发动机

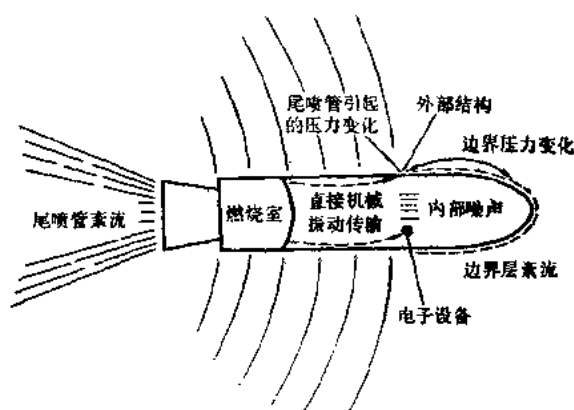


图1-1 火箭振动激励因素

而来的机械振动的直接传输所引起的。而尾喷管和边界层素流所引起的压力作用于火箭的外部结构时，也能引起火箭结构的机械

振动。当火箭以亚音速飞行时，引起这种振动的主要原因是来自尾喷管的压力变化；当它以超音速飞行时，引起外部结构振动的主要原因是紊流边界层所产生的压力变化。

火箭外部结构的剧烈振动，以声来传递或是通过箭体结构传递给其内部的感受部件，因而引起内部电子设备的动态激励。除此之外，箭体内部电子设备的振动激励也可能是由于发动机燃烧室直接传递机械振动所引起的。除了形态有所不同之外，现代高速喷气飞机电子设备的振动激励也是这样产生的。

随着现代高速飞机、火箭技术的迅速发展，它们所受到的振动激励更加复杂。这种振动不同于以往的正弦振动，也不同于复合振动，是一种新的振动类型。它很少包含离散频率。一般存在于一个很宽的、连续的频率范围，称为连续谱。其激励为一种随机波动。一般把这种频率范围很宽的激励振动称为宽频带随机振动，这种振动必须用新的仪器设备和新的技术来进行描述。

1.2 振动激励的性质

现代飞行器所呈现的振动激励在很宽的频率范围内具有极高的幅值。喷气飞机、火箭所产生的振动环境性质与一般机械振动环境的重大差别，不仅仅表现在振动强度和振动频率的宽度上，而且也表现在振动波形的复杂性上。简单机械的振动激励一般用周期波形或谐波波形近似地表示，然而对于现代高速飞行器的复杂的机械振动用随机波形表示该是最为恰当的。

图1-2表示周期振动形式最简单的谐和振动的例子。周期振动可以视作是一个质点或物体相对于一个基准位置的振荡运动。在一定的周期时间内运动自身还精确地重复着。周期振动的最简单形式就是通常所称的谐和振动，当把它按时间函数绘成曲线时，如图1-2的正弦曲线。图中 T 代表振动周期，即两个相邻的、完全相同的运动状态所经过的时间。

振动频率为

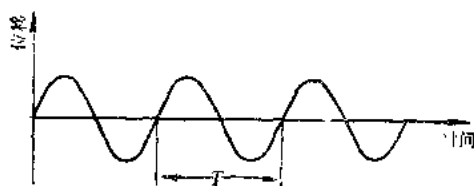


图1-2 谐和周期振动

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-1)$$

至于振动可以用不同的量值来表征，只要是谐和振动，各量值之间就有固定的数学关系。

若振动具有只沿着一轴线（ X 轴线）作纯直线振动的形式，那么这个质点或物体离开基准位置的瞬时位移可用下列方程进行描述

$$x = X \sin \omega t \quad (1-2)$$

式中 X ——离开基准位置的最大位移；

ω ——角频率， $\omega = 2\pi f$ ；

t ——时间。

由于运动质点（或物体）的速度是位移对时间的变化率，所以这种运动又可以用瞬时速度 v 来描述

$$\begin{aligned} v &= \frac{dx}{dt} = \omega X \cos \omega t = V \cos \omega t \\ &= V \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 V ——最大速度。

运动的瞬时加速度 a 是速度对时间的变化率

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 X \sin \omega t = -A \sin \omega t \\ &= A \sin(\omega t + \pi) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 A ——最大加速度。

从上述方程中可以看出，不管讨论的是位移、速度或加速度，其振动的形式和周期总是一样的。然而速度超前位移 90° 相位角，而加速度又超前速度 90° ($\pi/2$) 相位角。峰值 X 、 V 和 A 可以作为其大小的特征值。只要研究的振动是简谐振动，则用峰值描述其大小是十分有用的。因为它可以直接用于上述方程中。但是，若研究更复杂的振动，则最好选择其它描述量。其原因之一是峰值只能描述瞬时振动的大小和方面，不管产生的时间过程^[4]。

考虑时间过程的进一步的描述量是平均绝对值，它定义为（见图1-3）

$$X_{|平均|} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad (1-5)$$

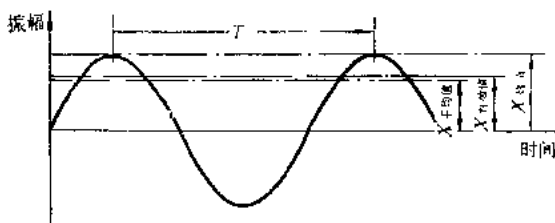


图1-3 具有峰值、有效值和平均绝对值表示的谐和周期振动

这个量虽然考虑了一个振动周期 T 的时间过程，但它的实用价值仍是有限的。而考虑到时间过程的一个更为有用的描述量是有效值，又称为均方根 (Rms) 值（见图1-3）

$$X_{有效} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1-6)$$

有效值之所以作为一个重要的描述量，主要是因为它和振动能量的含量有直接关系。

对于一个简谐振动来讲，各量值之间的关系为

$$\begin{aligned} X_{有效} &= 0.707 X_{峰}, & X_{|平均|} &= 0.637 X_{峰}, \\ X_{峰} &= 1.414 X_{有效}, & X_{有效} &= 1.11 X_{|平均|}, \end{aligned}$$

$X_{\text{平均}} = 0.9X_{\text{有效}}$ 。

实际上在人们日常生活中所遇到的绝大多数的振动并不是简谐振动，虽然它们当中有许多可以称为是周期性的，一般称这类振动为非谐和周期振动，如图1-4所示。

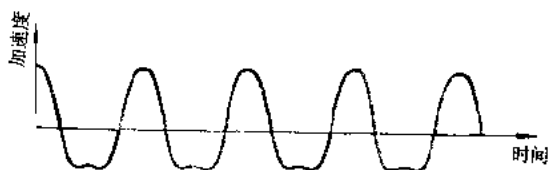


图1-4 非谐和周期振动

确定这种振动的峰值、有效值和平均值等参数，可以得到许多有用的信息，然而仅根据这种信息要想完全预示出振动在连接的构件中可能产生的各种影响来，实际上是不可能的，还必须采用其它的描述方法。而最有效的描述方法之一就是频率分析法。它以傅立叶公式表示的数学理论为基础，表明任何非谐和周期性曲线，不管如何复杂，都可以视为由许多频率成谐波关系的纯正弦曲线组成的。

$$F(t) = X_0 + X_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + X_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + X_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + X_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1-7)$$

当级数的项目愈多时，该级数就愈加接近于原始曲线。这些不同项构成了振动频谱。

在图1-5中把图1-4的非谐和周期振动及其频谱中的两条最重要的谐波曲线描绘在一起。而表示这种频谱的更方便的方法示于图1-6(b)，从图1-6中可以看出周期振动的特点，若用时间域描述周期振动的特点则是连续不断地经过一段相等的时间间隔而精确地重复一次。若用频率域表示时，它们的能量存在于有限的、离散的频率上，它们是由离散线条组成的。这和表示为连