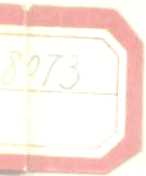


振 动 手 册

〔美〕 C. 格 林 编

《强度与环境》编辑部

1982年 北京



振 动 手 册

〔美〕 C. 格林编

王 凤 山 译

《强度与环境》编辑部

1982年 北京

Vibration Manual

Claude Green

NASA TM X-64669

内容简介 各类飞行器承受的激励不外乎机械、气动和声压三种。由此引起的振动环境对于飞行器结构疲劳和设备损伤可能是相当严重的。因此，振动专家的主要工作是怎样将飞行器的振动量值控制在不致危害人或结构的水平上，并且设计出能够承受这种环境的机械。对此，本手册从理论到试验，从分析到计算，进行了比较全面的叙述。

本书对从事振动、冲击和声学工作的研究人员，试验人员和设备研制人员具有使用价值，还可供高等学校有关专业的师生参考。

振 动 手 册

〔美〕C.格林 编

王 凤 山 译

《强度与环境》编辑部编辑 出版发行

北京市9200信箱72分箱

中国人民解放军空军第一研究所印刷厂印刷

1982年

定价 5 元

译 序

各类飞行器承受的激励不外乎机械、气动和声压三种。由此引起的振动环境对于飞行器结构疲劳和设备损伤可能是相当严重的。因此, 振动专家的主要工作是怎样将飞行器的振动量值控制在不会危害人或结构的水平上, 并且设计出能够承受这种环境的机械。对此, 本手册从理论到试验, 从分析到计算, 进行了比较全面地叙述。第一章是振源及其起因。第二章到第五章主要介绍用于测量振动、冲击和噪声的各种传感器、传声器的原理和性能, 以及固定和标定它们的方法。第六章到第八章介绍传递振动数据的三种方法, 记录数据的各种仪器以及怎样进行数据处理。第九章主要介绍振动数据的检验方法, 以及如何解释和应用这些数据。第十章是声学、振动和冲击试验。第十一章是振动试验标准。第十二章主要介绍其他的研究方法, 并包括有关振动分析方面的应用理论和数据统计的参考内容。第十三章为振动响应分析, 介绍确定结构动力响应的基本分析方法。这些方法是振动和噪声工程师进行结构分析的基本工具。第十四章介绍振动载荷的计算方法并讨论这些载荷在强度分析中的应用。最后的附录给出了一些术语的定义。本书对从事振动, 冲击和声学工作的研究人员、试验人员和设备研制人员具有使用价值, 还可供高等院校有关专业的师生参考。

译文承姚起杭、吴家驹、张维纲、杜德昌、傅 博、薛景川同志校对。在翻译和校对过程中对原文与公式中出现的明显错误已作了纠正。但由于该手册内容广、涉及的专业面宽, 再加之本人水平有限, 故难免有错, 殷切希望读者予以指正。

译 者

一九七九年八月

目 录

译 序.....	(i)
引 言.....	(1)
第一章 振 源.....	(2)
第一节 振源及其起因.....	(2)
一 声激励.....	(2)
二 气动激励.....	(2)
三 机械激励.....	(3)
第二节 完整的振动环境.....	(3)
第二章 加速度计.....	(5)
第一节 加速度计的考虑.....	(5)
第二节 加速度计的一般原理.....	(5)
第三节 压电(晶体)加速度计.....	(6)
第四节 应变桥式加速度计.....	(7)
第五节 压阻式加速度计.....	(8)
第六节 力平衡(伺服)加速度计.....	(9)
第七节 电位计式加速度计.....	(11)
第八节 各种加速度计的比较.....	(11)
第九节 一般加速度计的特性选择.....	(11)
第三章 传声器.....	(13)
第一节 电容式传声器.....	(13)
第二节 压电式传声器.....	(14)
第三节 调谐电路传声器.....	(15)
第四节 传声器的选择.....	(15)
第四章 振动传感器和传声器的固定.....	(18)
第一节 振动传感器的固定.....	(18)
一 固定块.....	(18)

二	胶 接.....	(19)
第二节	传声器的固定.....	(19)
一	机械隔振的传声器.....	(19)
二	电隔振的传声器.....	(20)
第三节	与传感器固定有关的各种因素.....	(20)
一	温度影响.....	(21)
二	电绝缘.....	(21)
三	电缆的走向.....	(22)
四	磁 场.....	(22)
五	传感器的位置.....	(22)
第五章	标 定.....	(23)
第一节	概 述.....	(23)
第二节	动力数据的性质.....	(23)
	正弦标定和数学关系式.....	(24)
第三节	传感器子系统的标定.....	(25)
一	加速度计子系统的标定.....	(25)
二	传声器的标定.....	(28)
第四节	数据传递和数据记录系统的标定.....	(30)
一	飞行试验.....	(30)
二	静态试验.....	(31)
第六章	数据的传递.....	(32)
第一节	基本的遥测系统.....	(32)
一	遥测信号处理器.....	(32)
二	发射器和接收器.....	(33)
三	当地信号处理器.....	(34)
第二节	振动数据使用的遥测系统.....	(34)
一	FM/FM.....	(34)
二	FM/FM/FM.....	(36)
三	SS/FM.....	(36)
四	时间分配.....	(38)
第三节	数据直接传递.....	(40)
一	传感器.....	(40)
二	阻抗匹配.....	(40)
三	传输电缆.....	(41)
四	整个系统的频率响应.....	(42)
第四节	系统的精确度.....	(42)

第七章 数据记录	(43)
第一节 磁带记录仪.....	(43)
一 磁带记录系统.....	(43)
二 记录方法.....	(44)
三 磁带的保管.....	(45)
第二节 录波仪.....	(45)
第三节 录波仪-磁带系统.....	(46)
第四节 X-Y 绘图仪.....	(47)
第五节 直接笔式记录仪.....	(47)
一 X-Y 伺服型.....	(47)
二 旋转带型.....	(47)
第六节 示波器和摄影机.....	(47)
第八章 数据处理	(48)
第一节 振动数据的基本特征.....	(48)
一 周期振动数据.....	(48)
二 随机振动数据.....	(49)
第二节 振动数据的具体描述.....	(51)
一 周期振动数据.....	(52)
二 随机振动数据.....	(52)
第三节 处理周期数据的一般方法.....	(58)
一 分析精度.....	(59)
二 分辨率.....	(59)
三 采样记录长度.....	(60)
四 平均时间.....	(61)
五 扫描率及分析时间.....	(61)
第四节 处理随机数据的一般方法.....	(61)
一 幅值概率密度分析.....	(62)
二 自相关分析.....	(66)
三 功率谱密度分析.....	(69)
四 联合幅值概率密度分析.....	(72)
五 互相关分析.....	(73)
六 互功率谱密度分析.....	(75)
第五节 等效带宽的确定.....	(76)
一 滤波器的等效带宽.....	(76)
二 噪声带宽标定方法.....	(77)
三 其它标定方法.....	(79)

四	随机讯号的噪声带宽.....	(80)
第六节	关于功率谱测量的实际考虑.....	(80)
第七节	多节滤波器型分析仪.....	(82)
第八节	功率谱密度分析用扫描滤波器分析仪或多节滤波器分析仪的方法.....	(82)
第九章	数据的描述和估计.....	(84)
第一节	随机性估计.....	(84)
一	随机性的定性检验.....	(85)
二	随机性的定量检验(方差检验).....	(87)
第二节	平稳性检验.....	(91)
一	同时检验随机性平稳性的方差检验.....	(92)
二	平稳性的非参数检验.....	(95)
第三节	数据等效性的确定.....	(98)
一	方差分析方法.....	(99)
二	计算例题.....	(104)
第四节	幅值概率密度函数的解释和应用.....	(107)
一	一阶概率密度函数.....	(107)
二	联合概率密度函数.....	(111)
三	条件概率密度函数.....	(112)
第五节	相关函数的解释和应用.....	(114)
一	自相关函数.....	(115)
二	互相关函数.....	(116)
三	应用.....	(117)
第六节	功率谱密度函数的解释和应用.....	(119)
一	理想结构的响应特性.....	(119)
二	经受运动激励的理想结构.....	(122)
三	自功率谱密度函数.....	(125)
四	互功率谱密度函数.....	(128)
五	相干函数.....	(131)
第十章	噪声、振动和冲击试验.....	(137)
第一节	噪声试验.....	(137)
一	飞行器声试验.....	(138)
二	试车试验.....	(138)
三	模型试验.....	(138)
四	混响室试验.....	(138)
五	壁板试验方法.....	(139)
六	火箭橇试验.....	(139)

第二节	冲击和振动试验	(139)
一	冲击试验机	(140)
二	电动振动台	(141)
三	正弦扫描试验	(143)
四	随机振动试验	(143)
第十一章	振动、环境及试验标准	(145)
第一节	级及飞行器的振动冲击标准	(145)
第二节	有效载荷的振动和冲击标准	(148)
第十二章	理论考虑	(150)
第一节	振动术语—它们的含义和应用	(150)
一	位移、速度和加速度	(150)
二	小结	(151)
三	非正弦振动	(152)
第二节	随机过程和概率分布	(152)
一	联合概率分布	(155)
二	条件概率分布	(155)
第三节	振动分析中的随机过程	(157)
第四节	随机噪声的幅值和频率分布	(158)
频率和功率性质		(160)
第五节	振动激励源	(162)
一	随机力 $F(t)$ 的统计性质	(163)
二	$F(t)$ 统计平均的解释	(168)
第六节	数字振动分析	(174)
一	基本统计分析	(175)
二	傅立叶级数表达式	(177)
三	自相关函数	(179)
四	功率谱密度函数	(180)
五	两个记录的联合统计分析	(181)
六	互相关函数	(182)
七	互功率谱密度函数	(182)
八	线性系统的传递函数	(184)
九	相干函数	(184)
十	联合和条件概率分布	(185)
十一	对两个记录的函数的小结	(187)
十二	数字计算机程序流程图	(188)
十三	计算机时间估计	(188)

十四 时间细节.....	(188)
第十三章 振动响应分析.....	(195)
第一节 基本内容的回顾.....	(195)
一 保守力场.....	(195)
二 自然频率和响应.....	(196)
三 简谐运动.....	(196)
四 线性系统.....	(196)
五 随机表示法.....	(197)
第二节 稳态运动方程.....	(199)
一 牛顿定律.....	(199)
二 能量方程.....	(203)
三 拉格朗日方程.....	(204)
四 影响系数.....	(208)
五 矩阵法.....	(209)
六 坐标耦合.....	(211)
七 板.....	(212)
第三节 瞬态运动方程.....	(214)
一 杜哈莫积分—运动方程.....	(214)
二 杜哈莫积分—迭加.....	(215)
三 瞬态—稳态的关系.....	(216)
第四节 声激励的运动方程.....	(216)
一 响应方程的推导.....	(216)
二 受随机噪声激励的板响应.....	(218)
第五节 直接稳态力的应用和例.....	(222)
一 集中参数系统.....	(222)
二 分布参数系统.....	(223)
三 用试验来确定厚壁圆筒的系统参数.....	(226)
四 用于试验室试验中的局部结构的试验确定.....	(230)
第六节 等效系统.....	(233)
一 等效原理.....	(233)
二 阻抗和导纳.....	(234)
三 等效的一般讨论.....	(235)
第七节 非线性振动.....	(237)
一 绪 论.....	(237)
二 由非线性引起的现象.....	(238)
三 非线性恢复力.....	(238)
四 保守系统的能量曲线(相平面).....	(238)

五	相位面—有限周期	(240)
六	利纳尔法面	(240)
七	迭代法—响应曲线	(240)
八	阻尼—跳跃现象的迭代法	(241)
九	分谐响应	(242)
第八节	基础数学	(244)
一	无穷级数	(244)
二	拉普拉斯变换	(245)
三	矢 量	(246)
四	矩 阵	(249)
五	正交原理	(253)
六	张 量	(253)
第十四章	振动设计	(255)
第一节	振动载荷分析方法	(255)
一	数学模型	(255)
二	阻 尼	(256)
三	环境选择	(258)
四	振动载荷分析示例	(258)
第二节	振动载荷在强度分析中的应用	(267)
一	设计载荷和置信度	(267)
二	等效静载荷	(268)
三	组合载荷	(269)
第三节	振动损伤	(270)
一	积累损伤理论	(270)
二	损伤理论的应用	(271)
第四节	马歇尔空间飞行中心的环境文件	(272)
一	适当环境的选择	(272)
二	振动和冲击环境	(273)
三	声环境	(273)
四	重量衰减	(273)
五	预计环境	(275)
第五节	有用的关系式	(275)
一	振动环境谱型	(275)
二	有用的环境关系式	(276)
附录	术语的定义	(278)
	参考文献	(286)
	著作目录	(291)

引 言

振动工程师的主要工作是将空间飞行器的振动量值保持在不致危害人或设备的程度上，并设计出能够承受这种环境的设备。空间飞行器的主要振源是火箭发动机在很宽频带上产生振动能和声能。由此导致的振动环境对飞行器结构疲劳和设备损伤可能非常严重。

为确保飞行器系统的结构和功能的完善，必须确定飞行器或其部件的振动环境。这种环境，可以用分析法近似估计，或者通过与类似飞行器的已知振动量值相比较加以预计。如果飞行器已制成，则可以通过静态试车和飞行试验来确定其振动环境。

在实验室内可以近似复现或者模拟已知的振动环境，以便改进飞行器或其部件的设计，或者证明它们满足要求，静态试车和飞行试验可看作是获得飞行器振动环境的手段，也可看作是飞行器的环境试验。

本报告介绍了怎样由静态试车及飞行试验数据的分析和计算，得到制定环境试验振动规范所需的资料。

本报告有助于把从事振动研究的各单位所使用的术语、概念和方法联系起来，并促进所有把本报告用作振动指南的各单位之间更好地了解和协作。

第一章 振 源

了解空间飞行器的振动问题,必须对引起这些振动的振源有全面的认识。本章简单介绍一下这些振源及其起因,不作深入讨论。对振源问题的进一步说明见本书第十四章,而参考文献〔1-3〕对振源问题作了全面的综述。

第一节 振源及其起因

空间飞行器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。这三种振源中究竟谁主谁次则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。

一 声 激 励

声致振动的激励能量是由声场提供的,各种声场又可以以多种方式产生。火箭发动机本身产生的声场就是由火箭发动机因活动部件、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,它们沿着发动机排气平面顺流而下。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严重,当飞行器在大气层中作亚音速飞行时,它就成了飞行器的最主要振源。

发动机排气产生的紊乱尾流声场引起结构振动。对声压(或气动压力)敏感的结构有蒙皮壁板,蒙皮加强筋和隔框^{〔1〕}。

声致结构振动的程度取决于激励声压的频谱、幅值和空间相关,以及结构的机械阻抗^{〔2〕}。

二 气动激励

存在着若干与大气层中高速飞行有关的气动现象,它们提供了使飞行器振动的激励能量。引起飞行器振动的一些气动效应如下: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舵面或壁板在气流中的颤振;在大气层飞行中,因气流流过飞行器凸出部位所产生的紊流;凹槽和空腔上方的气流;附着在飞行器表面上的振荡冲击波;当附面层气流不得不流过尖角时所产生的扰动气流分离;通过导管的高速气流。

通常,气动激励在马赫数等于1附近以及最大动压($q_{m,1}$)值下达到最大值。

三 机械激励

机械振源起源于直接的机械激励；主要的机械激励一般是由发动机及其它有关设备如泵、马达、压缩器和发电机产生的。

这些振源起因于运动部件的加速运动以及气体力、电力和其他力的周期性变化。

上述机械振动力既可作为设备内部的力也可以作为外力^[8]。在外层空间，当飞船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，此种振动在发动机附近区域最为严重，而在距发动机较远处，则由于飞行器结构中固有的阻尼和阻抗的不匹配而减小。

发动机点火与关机时的快速压力变化产生了高幅度的瞬态振动量值，后者又构成了对结构的瞬态激励。这种瞬态振动的持续时间很短，以毫秒为单位计量。

其他一些机械振源如下：飞行器从一地运输到另一地；利用爆炸螺栓或某种快速释放装置将飞行器从发射台上机械释放；发动机的万向支架；由于不稳定燃烧产生的推力变化；以机械方式进行级间分离，诸如采用爆炸分离、制动火箭及气垫增压火箭；可回收飞行器着陆时的撞击；推进剂的晃动。

高幅值和长时间的机械振动可能引起接触面磨损、设备失灵、空勤人员不适，并且最重要的是，可能引起结构疲劳。

第二节 完整的振动环境

飞行器的完整振动环境包括从制造到完成其使命经受到的全部振动。飞行器首先必须从制造厂地运输到适当的静态试车场地。运输期间振动环境的严重程度取决于其运输方式和运载工具。飞行器在此阶段经受的振动与其设计飞行环境中的振动可能区别极大。在飞行器到达试验场地之后，要进行一次或更多次静态试车，以便在交付发射场地前检查飞行器系统的情况。通常最严重的振动环境之一是由静态试车期间所产生的排气紊流引起的。一般在点火后的头几秒钟内排气紊流的振动量值逐渐增大，然后，在整个静态试车过程中保持不变。另外，飞行器还经受到局部机械振动、万向支架效应以及在静态试车前后的地面操作影响。完成静态试车后，当把飞行器运往它的固定存放基地、发射场或临时放置地点（如果是机动发射火箭的话）时，它又再次受到运输振动。飞行器到达发射场地后，可能还要做一次短时间的静态试车，以进行系统检查。在系统检查通过之后，飞行器即处于可飞行状态。

当助推发动机发出推力而尚未离开发射台时，由排气气流形成的紊流再次成为主要振源。到目前为止，所有证据都表明这种紊流是最严重的振动激励源。飞行器在发射之前不仅有这种最严重的振动源存在，而且飞行器在发射台上的位置以及发射架附近存在的其它结构还会使此种紊流声场受到反射或者改变其辐射图案。地面反射，使飞行器的声压级增加，直到至少等于喷嘴直径 50 倍的高度都明显存在，而在更高的高度便逐渐消失。当飞行器处于运动状态并且前进速度增加时，噪声环境将逐渐降低^[2]。其原因为：压力随高度增加而减小，噪声从导弹后部气流中的声源向前传播所需要的时间增加了；喷气流和大气层之间的相对速

度减小。直到飞行器升入空中之前声场通常是半球形的，而后，随着飞行器进一步升高，发射区的反射效应逐渐消失，就慢慢变成球形声场。飞行器在发射台上经受的声压取决于排气偏转的类型和消声器的效率。直到飞行器速度超过声速或离开大气层之前，上述发动机排气噪声将持续影响其振动量值，但噪声强度则逐渐变小。

当飞行器仍处于大气层中时，其他一些气动力效应如：颤振、压力脉动和抖振都可能发生；超越声速时所产生的冲击波还将引起很高量值的瞬态振动。

飞行器通过声速后，排气产生的声源便不再影响飞行器的振动，而一旦飞出大气层就不再存在声源和外部气动力振源。此时，只有机械振源能继续引起振动。再入大气层时又将产生能激起高量值瞬态振动的气动冲击波，并且飞行器将再次经受气动压力、紊流、抖振和颤振效应。最后，在对飞行器进行完整的振动环境分析时，还必须考虑飞行器经受的、由着陆撞击引起的振动和冲击。

第二章 加速度计

本章的目的是介绍一下马歇尔空间飞行中心测量振动和冲击用的加速度计及其原理、特性和应用。这对选择测量特定环境的加速度计的一般型式有帮助,但不是选择具体加速度计的指南。关于振动和冲击测量以及加速度计理论方面的进一步介绍,可以查阅本书末尾列出的参考文献。而有关具体加速度计选择的详细资料,应查询加速度计制造厂的文献和技术规范,以及实验室的测试结果^[4-9]。

第一节 加速度计的考虑

加速度计是一种换能器,它把所接受的加速度输入信号转换为与该加速度成比例的输出量。加速度计有许多形式并获得广泛的应用。它不仅用于振动和冲击测量,而且还用于飞机和导弹的导航系统。对不同用途的传感器其要求也不同。飞行器导航系统中应用的传感器应当在低频范围内具有很高的灵敏度,而振动和冲击研究中应用的传感器则必须能够感受频率和幅值范围很宽的运动。

实际上,冲击和振动测量用的所有加速度计都是机-电换能器(传感器或感受器),即仪器的输出量是电信号。将运动转换成电信号的原因是电信号的传输距离可以很长(见第六章),并且还可用作数据记录和处理用的放大器、滤波器、分析仪和记录仪的输入(见第七、八两章)。因此,电信号的时间历程不仅可用以给出振幅信息,而且还可以提供有关振动频率和波形的信息(见第九章)。

为了将机械运动转换成等效的电信号,已经研制出许多不同类型的传感器。其中包括压电式、应变式、压阻式、力平衡(伺服)式、电位计式、电感式、电动式、磁致伸缩式、电容式以及永磁自供式等传感器。前五种传感器是马歇尔空间飞行中心最常用的。它们用于结构响应的测量,并在以下几节加以讨论。

第二节 加速度计的一般原理

本章讨论的所有加速度计都利用了一个基本的力学原理,即质量-弹簧系统的响应原理。质量-弹簧系统(地震仪)的底座或与它相当的部位被固定在需要测量其冲击和振动的点上,传感元件感受由质量(感振块)与底座的相对运动产生的加速力。加速度计的工作频带低于质量-弹簧系统的自然频率。如果被测点的振动频率高于质量-弹簧系统的自然频率,加速度计可以变为位移传感器或速度传感器,这取决于它所测量的是位移还是速度。图

1 示意的质量 - 弹簧换能器由一块质量通过一根弹簧悬挂在换能器壳上组成。质量在壳内的运动可以用粘性流体、电流、或其它装置加以阻尼，它们在图中是用阻尼器符号表示的。

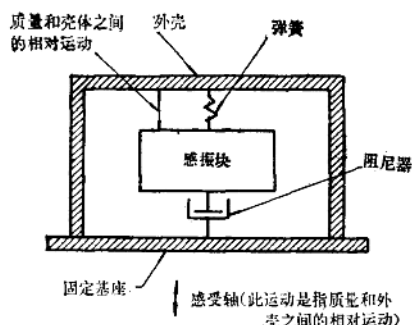


图1 质量 - 弹簧型振动换能器简

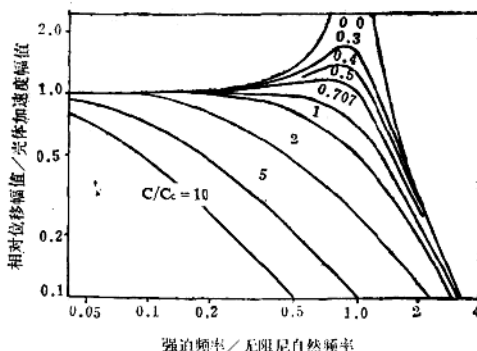


图2 线性二阶质量 - 弹簧系统对应各种阻尼值 C/C_c 的频率响应曲线（正弦输入）

质量和换能器壳体之间的相对位移幅值与壳体加速度幅值的比，已作为频率的函数按各种相对阻尼值绘于图2中。这种频率响应曲线表明在频率远低于系统自然频率时，壳体加速度值即与相对位移值成正比。这样，当振动频率比系统的自然频率低，并且位于响应曲线的平坦部分时，换能器即可作为加速度计使用。如果换能器是无阻尼的，则大约在0.2倍自然频率以下响应曲线基本上是平的，因此，当振动频率大致不超过系统自然频率的0.2倍时，可用无阻尼加速度计测量加速度。随着加速度计阻尼的增加，测量频带也相应增加，直至达到某一最佳阻尼值为止。当相对阻尼数接近0.65时，对于频率约为0.6倍加速度计自然频率的振动信号也能给出比较精确的测量结果。由此可见，一个加速度计的可用测量频带将随其自然频率增加而增加。

当振动加速度保持常数时，加速度计的输出灵敏度便与所感受参数有关。如果所感受参数是质量的位移，则换能器在高频时的电信号非常小，因为弹簧挠度与自然频率的平方成反比。然而压电式加速度计的优点之一就是它能够直接感受加速度，并且输出电信号相对于频率可以保持不变。

第三节 压电（晶体）加速度计

图3示出了一个不需要外部电源的自供式加速度计，其中的换能元件是一个压电材料小圆片。当压电材料经受机械应变时便产生电荷。压电元件是自然的或合成的晶体，或是陶瓷材料，例如钛酸钡之类。压电材料含有由于天然或人工极化而使之具有一定方向的许多晶体块，在载荷作用下，这些晶体块便发生轻微相对运动，从而产生了电荷。这类材料一般都呈现出很高的弹性刚度，通常用作质量 - 弹簧系统中的弹簧部分。图3所示的型式是一种压缩设计，其中，在弹簧和薄压电材料圆片之间的振动质量受压。质量所受的惯性力引起晶体中