



中国建筑工程出版社
学术著作出版基金项目

工业工程振动控制关键技术

徐建 尹学军 陈骝 著

中国建筑工业出版社

第 1 章 振动控制技术概论

随着我国工业的发展,振动控制技术已经成为工业工程的关键技术。如果装备的振动控制不当,会影响机器装备的正常工作和使用年限,影响仪器仪表的正常测量,会影响工作人员和附近居住者的身体健康,严重时会影响工业建筑的寿命和安全。装备的振动控制,不仅仅取决于装备的本身,更重要的是装备的支撑结构和环境要满足振动控制的要求,振动控制已经成为工业工程设计和施工的重要环节。

工业工程振动控制是一个复杂的多领域交叉课题,是基于土木工程的多专业综合技术,还涉及机械、材料、自动化以及计算机等多个学科,通过对地基基础、建筑结构、工业装备等构成的复杂系统振动进行控制,为工业装备的正常运行和环境保护提供可靠的技术保障。

1.1 概 述

1.1.1 工程振动特征

地球表面的环境振动是引起工业工程振动的主要原因。地球表面的环境振动主要分为地面脉动和人类活动的干扰两种振动类型。

地面脉动主要分为两类:第一类地脉动,主要是由风暴、台风、海浪击岸、高压气流及冷热空气团交汇等自然界原因造成的,其他如雷暴、磁暴、冰雹、暴雨等也会产生地面脉动,但是不常见;此类地面脉动的振动频率为 $0.1\sim 0.5\text{Hz}$,甚至更低,振幅为 $0.1\sim 3\mu\text{m}$,振动加速度幅值可达 $10^{-7}\sim 10^{-5}g$ 。第二类地脉动,由交通运输、厂矿机械和人员活动等引起,在距离振源较近处表现为人类活动的干扰振动,距振源较远处表现为低频。第二类地面脉动,其振动频率一般大于 2Hz ,振幅为 $0.01\sim 10\mu\text{m}$,振动加速度幅值可达 $10^{-7}\sim 10^{-3}g$,其振动频率及振幅不仅与振源机制有关,而且与地质有密切关系,在坚硬的岩层上,振动频率较高,振幅较小,而在一般的土壤层上则反之。第二类地脉动是一种随机振动,是不容忽视的。

人类活动的干扰振动主要是由于人类以及所使用机械设备所造成的振动干扰,在近距离内的影响较地面脉动大得多。主要分为随机性振源、稳态性振源以及瞬态性振源。随机性振源包括交通运输方面的火车、汽车、拖拉机行驶与飞机起落等振动;稳态性振源包括厂矿的各种机械如锻锤、落锤、空气压缩机、制冷压缩机、冲床、通风机等运行时的振动;瞬态性振源如水爆清砂、爆炸、成型加工等引起的振动等等。该类振动有较宽的频率范围,振动幅值也较大,是必须考虑的振源。

工业工程振动控制所研究的对象包括精密装备、一般工业装备和大型工业装备。精密

装备振动控制的关注点是装备本身的振动防护问题，对环境产生振动干扰的主要是一般装备和大型装备。一般装备量大面广，经常紧邻办公区和居民区布置，对环境的影响很大。而大型装备的激励机理复杂，激励扰力大，振动控制的难度很高。

一般工业装备的振动控制技术比较成熟，随着工业装备向精密化和大型化发展，振动控制要求越来越高，难度越来越大，如精密装备控制精度为纳米级，大型装备冲击压力达数万吨，如图 1.1.1 所示。

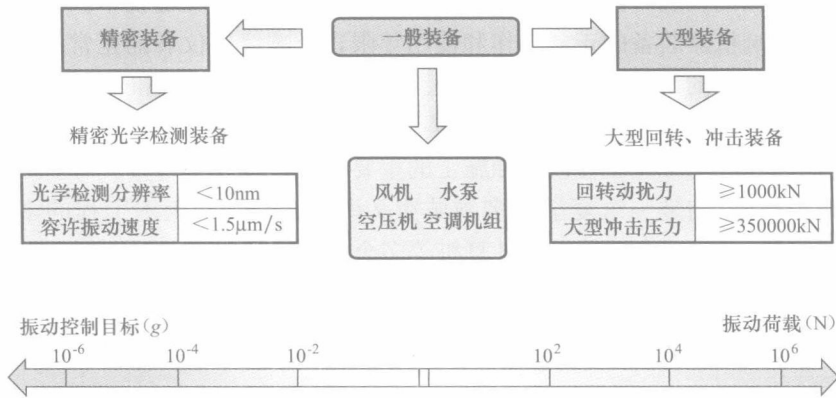


图 1.1.1 工业工程振动的特点

1.1.2 振动危害

1. 振动对工业装备本身的影响

微振动可能会降低精密仪器的加工精度。不同的机械设备，针对不同的加工精度，容许振动的要求是不尽相同的。一般精密机械设备容许振动速度控制指标一般在 0.05~0.5mm/s 的范围内。当外界的振动超过了机械的容许振动速度时，就会影响加工产品的光洁度、波纹度、垂直度或者尺寸精度，并导致累积误差的增大。实测结果表明，振动会使设备的加工精度降低一至二级，以至可能会造成最终产品的不合格。

微振动还会降低机器、仪器或工具的工作精度，严重时会造成精密仪器无法使用。例如，陕西某机床厂的激光录磁仪，由于没有采取微振动控制措施，造成磁头移动，设备倾斜，最终无法使用。

大型工业装备振动不容忽视，如果仅考虑装备产生的振动对周围环境的危害，而忽略装备自身振动，势必会导致设备及零部件因振动不断功能退化、老化，甚至引起设备提前破坏，影响工业装备正常运转，甚至造成安全事故。例如，在我国电力行业，发电机组在发电运行之前，其振动问题一直令设计和建设方担心。一旦产生振动问题，查找原因和解决问题往往非常困难且旷日持久。国内已有多个电厂因为振动超标，或延误投产发电，或多次停机检修改造，造成了较大的经济损失。此外，在大型锻压装备方面，如果设备本身的振动过大，也会影响装备的正常工作或生产效率。对于多工位冲压线，装备的振动还会影响工件的自动传输。

2. 振动对人体舒适度的危害

人们正常工作和生活环境的振动要求比操作区要严格得多。为保证正常的生产和操作

人员的身体健康，操作区的振动也应控制在一定的范围内。如果工作场所的振动较大，振动会使操作人员的视觉受到干扰、动作受到妨碍和精力难以集中等，往往会造成操作速度下降，生产效率降低，工人感到疲劳，并且可能出现质量事故，甚至安全事故。如果振动强度足够大，或者工人长期在相当强度振动环境中工作，则可能会对工人在神经系统、消化系统、心血管系统、内分泌系统、呼吸系统等方面造成危害或影响。

振动对民用建筑内的居民、工作者造成的影响主要为干扰其睡眠、休息以及正常工作。值得注意的是，若居民长期生活在振动干扰的环境中，由于长期心理上烦恼不堪，也会造成身心健康的危害。

3. 振动对建筑物的危害

工业装备所产生的振动施加于建筑物，由于振动强度和频率的不同，将会使得某些建筑物的结构受到破坏。常见的破坏现象表现为基础和墙壁龟裂、墙皮剥落、石块滑动、地基变形和下沉等，重者可使建筑物倒塌。当地下水位较高时，还可能造成地基局部液化，加大基础下沉或不均匀沉降。此外，工业装备产生的剧烈扰动会对地下交通、地下公共空间以及在建地下项目等建筑结构产生不良影响，会导致地下结构发生变形，严重的会导致坍塌事故等。

特别需要注意的是，由于古建筑年代久远，结构脆弱，环境振动会导致古建筑地基下沉、墙体开裂、寿命缩短或倒塌，而这种影响是不可逆转的，无法采取补救措施。

4. 振动产生噪声的危害

振动的物体可直接向空间辐射噪声，这就是空气声。振动也可以在土壤中传播，在传播过程中，又激起建筑物基础、墙体、梁柱、天花板、门窗、管道等振动，这些物体的振动会再次辐射噪声，这种噪声叫固体传声。显然，固体声加大了噪声的危害和影响。

1.1.3 振动控制的重要性

随着高新技术的快速发展，尤其是光学工业、感光化学、航空航天、半导体工业的发展，导致人们使用的机器设备功率日益增大，转速加快，而重量却不断减轻，刚度相对减小，精度要求越来越高，振动问题随之日益突现。大量工程实践表明，振敏型精密机械在生物科学、电子光学、精密机械加工、理化实验及其与研究相关的工厂中，振动控制不仅影响到机器设备的使用寿命、仪表器械的使用性能，操作人员的正常工作，还影响到精密加工最终产品的质量和可靠性。

微电子工业，集成电路线宽已精密到纳米级，线宽 $0.09\mu\text{m}$ (90nm, 16G DRAM) 集成电路产品已经面世，线宽 $0.07\mu\text{m}$ (70nm, 64G DRAM) 产品已进入实验室阶段，硅片加工中的光刻工序对微振动控制极为严格，已要求频域振动速度值不大于 $1\mu\text{m/s}$ 。声表面波器件、激光全息光栅、彩色显像管的阴罩等的加工、伺服磁盘的录磁等的生产，都需要提供一个微小振动的环境；在光栅刻线加工方面，3600 线/mm 的光栅刻线对微振动限制在时域振动速度不大于 $10\mu\text{m/s}$ ；在惯导技术方面，为提高导弹的打击精度，准确命中目标，需要对陀螺仪、加速度计及组合制导系统的精度提出更高的要求，这种高精度惯导系统的测试和检测已要求环境振动不大于 $1\times 10^{-8}g$ ；对于空间光学装置（可见光、红外、激光等）的地面精密检测，其光束在数十米光程的平行光管内不能有丝毫的抖动，对环境振动的限制苛刻；在海关的货物快速无损检查方面，特别是铁路货运列车的快速无损检

查,要求列车行驶通过检测站时,检测仪器不受列车振动影响必须将检测仪器安装在隔振台座上;其他诸如精密机械加工、光学器件加工、特种声学实验、理化实验、长度计量、精细加工、超薄金属箔材轧制等,都需要对微振动进行控制。

大型工业装备主要包括大型发电装备、大型锻压装备和大型精密装备,例如:1000MW 等级以上大型核电与 600MW 火电厂中的汽轮发电机组;锻造核电长叶片、大型高温合金航空发动机涡轮盘、大型飞机起落架锻件用的大型锻压机;汽车工业的大型车身冲压线,以及长度大于 10m 的大型精密数控轧辊磨床和三坐标测量机等。大型工业装备在整个国民经济和国防建设中具有举足轻重的作用,振动问题是影响这些设备能否正常工作的关键因素之一。

在制造业为主体的机械工厂中拥有大量一般装备,其装备的种类和数量庞大,分布的区域广泛。因此,一般装备的振动具有影响范围非常广的特点,往往与人们的社会生活息息相关,严重的也会危及结构安全和人们的生活起居及健康。正是由于一般装备的振动影响具有普遍性,其振动控制也是一个不容忽视的问题。

早期的工业装备比较简单,大部分以大块式基础,不需要考虑基础的弹性,基础不会发生共振,基础只要具有足够大的质量就行,也无需考虑环保扰民问题。随着科学技术的不断发展和进步,这些大型装备的结构越来越庞大,工作时产生的激振力也越来越大,而振动控制方面的要求却越来越严格。这是因为振动问题若得不到有效控制,会导致大型装备无法正常工作,加工和测量精度降低,设备故障率提高,影响整个制造业的技术水平,乃至影响整个国民经济的运转和中国产业升级换代的实现;除此之外,工业工程振动还会造成环境振动超标,影响人们的工作和生活质量,不利于环境保护和构建和谐社会。因此,对工业工程的大型装备进行振动控制的研究,是技术发展和社会进步的必然要求。

综上所述,航空航天和国防军工高端装备的研制和试验环境,电子信息和电力工程的生产和运行环境,锻压装备对周边环境的影响,都需要提供振动控制技术保障。

1.2 工业工程振动控制技术研究现状

1.2.1 国内研究现状

我国对微振动控制技术的研究及工程实践始于 20 世纪 60 年代初期。1963 年到 1965 年中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研发了国内首套具有高灵敏度 ($10^{-6}g$) 的微振动测试系统。并针对电子工业厂房、机床及精密设备进行了大量实测分析,制定了《多层厂房楼盖抗微振设计规范》、《电子工业多层厂房楼层振动设计准则》,并在工程实践中建立冲床振动的计算理论,得到振动工程界的广泛认可,沿用至今。1968 年,空气弹簧首次应用于我国精密设备微振动控制。1975 年,中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研制了国内第一套系列化金属弹簧隔振器产品;1978 年,研发了高密度结构模态识别软件,为我国结构模态识别提供了有力工具;1982 年,研制了 JYKT 系列 8 个型号的空气弹簧隔振装置,是国内首套系列化用于微振控制的空气弹簧隔振装置。1984 年,青岛橡胶工业研究所研制了 $\Phi 113$ -II 型自由式橡胶空气弹簧装置。1985 年,中国科学院高

能物理研究所发展了一种用于音叉式引力波天线的气缸-薄膜型空气弹簧，并用最小二乘法对试验数据进行拟合，得到该种空气弹簧刚度的半经验公式。同年，中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研制了成套空气弹簧隔振系统，并成功应用于成都 773 厂机刻光栅刻线机隔振工程。这是我国拥有自主知识产权的成套空气弹簧隔振系统的最早应用。1985 年之后，以成套空气弹簧隔振系统为主的被动隔振系统被广泛地应用于惯导系统测试、集成电路光刻、空间光学装置检测、铁路货运列车快速无损检查、激光实验、光栅刻线及超薄金属箔材轧制、理化试验及军用装备检测等方面的防微振问题。1995 年，中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研制了我国第一台超长型光学测试隔振台座，台座长 15.5m，重 38t。2005 年，研制了单向等刚度系列化用于振动控制的 ZYM 系列空气弹簧隔振装置。该系列空气弹簧隔振装置承载力达到 14.7~250kN，是国内首创的高承载力隔振器。2015 年建设中试平台 (DZYFW-140009-CG)，隔振性能满足较高要求。

近年来，国内对于隔振平台振动主动控制的制动器，如磁致伸缩材料、压电材料、电流变和磁流变液体等新型材料的隔振装置进行了一定研究。清华大学的徐登锋对超精密系统中的主被动隔振技术及相关隔振性能展开了讨论，分析指出主动隔振平台隔振效果较好；曹志彤等利用稀土-铁系功能材料进行超磁致微位移直线驱动器的研究设计，通过有限元分析其可行性；南航的顾仲权等研究了磁致伸缩材料作用器在振动主动控制中的应用；哈尔滨工业大学的盖玉先等研究了以 GMA 为作动器，采用人工模糊神经网络控制的超精密机床隔振系统，哈尔滨工业大学精密工程研究所研制的 HCM-I 亚微米超精密车床通过微制造平台混合隔振系统设计，有空气弹簧和橡胶层作为被动隔振元件，并通过超磁致伸缩制动器进行主动控制，测试结果表明振动衰减达到 80%。

在我国于 1980 年首次在河南登封电厂汽轮发电机基础中应用了弹簧隔振，该基础已运行了 20 多年，目前运行效果良好。相继选用弹簧隔振汽轮发电机基础的有 350MW 的鸭河口电厂、350MW 的合肥第二发电厂、200MW 的北京第一热电厂、600MW 的大别山电厂、1000MW 的田湾核电站等等，但均为国外公司设计。

汽轮发电机弹簧隔振基础在我国虽然有了一定的发展，但由于技术上的研究不够成熟，弹簧隔振基础的设计最初是由国外设计，在我国还没有这方面的规范，使业主认识不到弹簧隔振的先进性、必要性；使土建设计人员、热机设计人员在设计上没有导则遵循，从而阻碍了汽轮发电机弹簧隔振基础的发展。为此在 2008 年中国电力工程顾问集团确立了“汽轮发电机组弹簧隔振技术应用研究”的技术课题，由华东电力设计院负责与中南电力设计院、西北电力设计院、华北电力设计院联合，并与隔而固（青岛）振动控制有限公司协同进行该项课题的研究。经过几年的研究、开发及运用，使得这项技术在大型汽轮发电机振动控制领域中迅速发展起来，目前国内大型核电中 82% 的机组、火电中有 10 多台机组均采用了该项技术。

20 世纪 70 年代，有限元分析技术开始在国内应用，但受到计算机技术的限制，在实际振动控制工程设计中应用较为罕见，仅有少数几个小型专用有限元软件在电力设计院内使用，工程设计主要还是按照经典力学方法进行简化计算与设计。

国家标准《动力机器基础设计规范》(GB 50040) 于 1997 年开始执行，规范对常规动力设备基础设计的一般规定、构造要求和静、动力计算都有具体规定，但是规范规定的动力计算，仅限于对扰力取值及振动控制限值等做了规定，而对影响设备运行的其他基础动

力特性，如基础动刚度、静变位等没有涉及，特别是没有关于弹簧隔振汽轮发电机组基础设计方面的内容。

该阶段的工业设备基础，如大型锻造设备、压力机、大型精密、超长设备等基础的工程设计，主要为大块式常规基础设计，仅从构造、承载力等方面进行考虑，无法进行基础的详细动力计算，更无法进行弹簧阻尼支承的弹簧基础设计。振动传递到周围工作区与居民区，无法满足节能环保和谐社会的要求。对其他大型精密、超长设备的基础，如轧辊磨床基础，因无法考虑基础的动力特性，基础设计只能停留在制作一个用于安装设备的混凝土基础。总体来说，该阶段对动力设备基础的设计刚刚起步，特别是对隔振基础的设计，基本处于学习照搬阶段，国内无隔振设计理论基础与实践经验。

这一时期，国内某些厂家开始提供不同形式的隔振器来适应和满足隔振的需要。如空气阻尼式隔振器，由锥形螺旋钢弹簧与橡胶气囊组成，通过橡胶气囊在压缩和伸张过程中气孔吸入和排出空气产生摩擦而获得阻尼。但这种隔振器寿命较短。橡胶隔振垫有一定的阻尼性能，可以吸收高频振动能量，安装也较为方便。但暴露在高温、多油、露天环境中时，容易老化失效。这些隔振器能够部分隔离振动，但受性能限制，无法达到令人满意的隔振效果。

1.2.2 国外研究现状

国外对于精密和超精密加工设备的环境微振动影响研究开展较早，以欧美和日本等发达国家为主，大多从环境振源相关的理论推导和解析模型来分析，研究微振动在介质中的传播规律，包括地基土的动力特性及其对振动波传播的影响，振动传播途径和相关隔振理论及隔振措施等问题。

20世纪50年代，Pontryagin和Bellman奠定了冲击和振动最佳控制的现代理论基础。20世纪60年代，日本富成襄提出伺服阻尼器，通过控制液压缸上附加质量来提高振动控制的能力。20世纪70年代，Kolovshii采用非线性力学方法研究隔振系统的力学特性，并对不同用途、力学结构对减振器进行分类，同时对不同的振源也进行了分类。20世纪80年代开始，振动主动控制技术逐步实际应用于精密设备或精密产品加工中的微振动控制中。1988年，T. Takagami等人用空气弹簧实现台体的振动主动控制，空气弹簧本身起到被动支承台体的作用。通过汽缸控制主气室中空气的流入、流出，实现主动控制；阻尼由连接主气室和辅助气室之间的节流孔产生。仿真和实验表明，对于地面干扰，振幅衰减了70%以上，减振效果较明显。1992年，T. Fujita等学者提出了控制平台的概念，用于微振动的隔离，即在建筑物楼面板上安装减振平台，并在平台和楼板中间安装液压作动器，对建筑物和作动器进行一体化建模和振动控制，并且针对不用设备的使用精度要求采取不同水平的微振控制。1994年，Z. Jason Geng等人采用鲁棒自适应滤波控制算法，对6个磁致伸缩制动器组成的Stewart平台进行六自由度振动主动控制实验研究，反馈信号为加速度和力。实验结果表明，对于56.2Hz的干扰，采用主动控制可获得30dB的减振效果。1996年，K. Watanabe等人采用4个电磁制动器形成一磁悬浮隔振系统，结合PI控制算法对竖向的振动进行控制，振动加速度衰减了90%，取得了较好的减振效果。1997年，Kajiwara等人研究了用压电制动器对半导体加工装置台体的振动进行主动控制，控制后的微平版印刷精度由原来的 $0.2\mu\text{m}$ 提高到 $0.1\mu\text{m}$ 。1999年，Y. Nakamura等人对尺寸为

2m×1.4m×0.23m 质量为 2000kg 的钢制平台采用 8 个超磁致伸缩制动器和 4 个空气弹簧进行了六自由度微振动主动控制实验研究。采用 6 个伺服加速度计获取平台的振动信号用于控制,控制方法也是模态匹配法。实验结果表明,在 3.0~20Hz 频率范围内,振动加速度衰减到地面振动的 1/10~1/3,达到了 $8 \times 10^{-6} g$ 。2005 年,Carsten 等通过实验证实了压电堆栈式作动器在主动控制系统中的可行性。2008 年,Y. L. Xu 等人做了电子厂房的三维缩尺振动实验,研究位于厂房二层的主动控制隔振台的隔振性能。实验证明,厂房二层地面的微振动水平为 V-C 曲线中 residential day (ISO) 水平,安装主动控制隔振台后,台面微振动水平降低为 V-C 曲线中 VC-A 水平。2012 年,Farshidianfar 等通过数值计算,模拟光学超精密仪器在混合振动控制系统下的反馈,结果表明采用鲁棒 H_{∞} 主动控制方法,能够克服模型和外界干扰的不确定性,达到良好的系统稳定性和振动控制精度。

国外在微振控制产品研发方面起步较早。日本的仓敷化工和特许机器株式会社均是从 20 世纪 60 年代开始从事微振动控制产品的研发和生产的。美国比较有名的从事微振动控制产品生产的公司有 TMC 公司和 Newport 公司等。其中 TMC 公司成立于 1969 年,比 Newport 公司进入微振动控制领域早一些。除了日本和美国这两个起步较早的国家,德国公司在 80 年代后期也逐渐进入微振动控制产品的研发与生产领域,BILZ 公司和 IDE 公司分别成立于 1985 年和 1990 年。

国外的动力设备基础设计技术,特别是弹簧隔振基础设计等振动控制技术,已经成功应用于各行各业的工程实践,如电力领域中的汽轮发电机组、工业领域中的锻造设备等。

在 2000 年以前,随着工程设计的不断深入,国外逐渐形成了一套整体的、系统的设计规范,从测试、设计、构造等各方面对基础设计进行指导和约束。例如电力行业:先后颁布了基础振动评估标准 ISO10816 系列,机器转子动平衡等级标准 ISO1940/1 和 ISO11342,机器轴振系列标准 ISO7919,汽轮发电机组柔性结构基础和刚性基础设计的基础 DIN 4024。在机器转子动平衡等级、基础设计与振动评估三方面标准的基础上,借助于大型有限元程序的静动力分析,欧洲汽轮发电机组基础设计、特别对弹簧阻尼支承的汽轮发电机组基础设计,已经形成一套较成熟完善的体系。同样,美国与日本的制造厂家对刚性基础设计,也有一整套成熟并完善的体系。

1.2.3 振动控制中的关键技术

随着我国工业化的发展,涉及工业装备、航空航天、国防军工、天文通信、生物工程等领域的大型装备和精密装备对振动的要求越来越严格,振动控制已经成为工业工程建设的核心技术。如果振动控制不满足要求,不仅装备和仪器无法正常工作,也会影响环境保护和人员健康。工业工程振动控制的关键技术包括:

(1) 微振动工程控制理论、设计方法、隔振装置和测试技术。涉及振源机理与振动控制标准体系、微振动控制工程理论体系、复杂振源条件下微振动隔振装置和控制系统、微振动测试技术和评估体系、微振动工程技术集成及应用等五个方面的内容。

(2) 大型装备高端振动控制技术。包括大型回转装备、大型冲击装备等振动控制系统的动力分析技术,建立集装备、基础和振动控制装置为整体的动力分析方法,解决大型冲击装备动荷载激励准确量化模拟的难题,研制大型装备振动控制装置。

(3) 振动控制的相关标准。编制了《隔振设计规范》和《建筑工程容许振动标准》等

多部国家标准，构建振动控制标准体系，为振动控制技术推广应用提供了有力支撑。

1.3 工业装备振动控制特点

1.3.1 精密装备振动控制特点

精密装备对生产和试验过程中的环境要求促使环境控制学迅猛发展，微振动环境控制作为现代科技发展前沿学科的一项重要分支，逐渐受到重点关注。微振动环境控制工程是一项系统工程，它具有需求领域广、控制要求严、技术难度高及综合性强等特征，具有高、精、尖、难等特点，成为精密装备振动控制领域中的一项尖端技术。

1. 需求领域广

随着现代产业的发展，对微振动环境保障要求较高的精密装备所处的领域越来越广，按照使用领域来分精密装备可以分为精密加工类、精密检测类和精密科学实验类等，行业领域覆盖机械、电子、航空、航天、冶金、精密制造、精密光学、天文、船舰、军工及文物保护等领域。

2. 控制要求严

随着高新技术的迅速发展，微振动控制也有了更高的要求。如美国高级惯导测试实验室（AGTF），要求测试转台等高精度装备底部微振动值在1~100Hz频段的频域幅值不大于 $1 \times 10^{-9}g$ 。

3. 技术难度高

由于微振动控制要求严，而外界振动环境复杂多样，因此，微振动环境控制具有难度高、风险大等特点。

4. 具有实时检验性

振动控制工程的效果在设备运行过程中可以立刻得到检验。

5. 措施综合性强

采用一种措施不能够达到微振动控制要求，工程中通常采用多级隔振方法，从厂区选址、设备车间布局、传递路径隔振、设备隔振等多种途径进行减振隔振。

6. 学科交叉性强

精密设备的防微振设计技术属于多学科交叉领域，是结构工程、机械制造、仪器仪表、测试技术、控制技术及数据处理等多学科的综合。同时，微振动控制还与洁净度、温湿度、电磁、噪声等环境保障系统密切相关。

1.3.2 大型回转装备振动控制特点

目前在大型回转装备中最具有代表性的是大容量汽轮发电机组。该装备的回转转速为3000r/min，转动部分的重量最大可达1300多吨，占非转动部分重量的30%。这就意味着引起振动的扰力很大，有的大容量核电机组单点扰力最大已达到60kN，有些机组理论上整个轴系扰力的线性总和超过了1000kN。由于大型回转装备的轴系长度可以达到近60m，分布着多段（6或7段）转子，各转子扰力大小不同，相位也不同，从而

使该装备的振动更加复杂。不仅如此，由于装备的重要性、精密性，尽管机组的扰力（振动输入）较大，但要求振动的响应（振动输出）却极为严格，对于全速机转子轴承座要求小于 $17.1\mu\text{m}$ ，对于半速机要求小于 $25.2\mu\text{m}$ 。这些就构成了大型回转装备振动控制具有以下特点：

(1) 多个扰力点组成，多达 8~9 个；

(2) 扰力点分布广，分布长度达到 60m 左右；

(3) 支承装备的基础结构庞大，如某基础长达 70 多米，高达 20 多米，自重超过 8000 多吨；

(4) 振动响应要求严格，全速机振动线位移控制在 $17.1\mu\text{m}$ ，半速机振动速度有效值控制在 2.8mm/s 。

1.3.3 大型冲击装备振动控制特点

冲击式装备可分为锻锤及压力机两种类型。

锻锤是利用传动机构使下落部分产生运动并积累动能，在打击锻件时瞬间释放，下落部分的速度由原来的下行速度突然停止并产生一定的向上反弹的速度，使下落部分的动量突然改变，此动能在极短时间内施加给工件，使之获得塑性变形。同时工件与砧座以一定的速度下行，进而将所获得的动量传递给基础和地基，激起基础和地基的振动。

压力机是通过滑块对工件施加作用力使工件被切断或产生冲击变形。该作用力封闭于机身。对工件的加工过程，也是机身变形随加工力变化而变化的过程。在加工过程结束时，作用力瞬间消失，此时机身所积蓄的弹性变形势能瞬间释放，使机身及其基础产生振动并通过基础传递给地基，从而激起环境的振动。

大型冲击装备对环境的振动影响很大，尽管扰力的形式有所不同，但均可近似为瞬态撞击型振源。打击时引起的振动能量很大且传得很远，影响范围较广，对精密仪器的加工使用，居民及办公人员产生一定的干扰和影响。

大型冲击装备振动控制具有以下特点：

(1) 一般为单个振源组成，振源分布集中；

(2) 打击能量和冲击力大且具有往复性，锻锤的额定吨位发展到了 20t；

(3) 支承装备的基础结构庞大，如某基础的尺寸长 14m、宽 13m、高 7m，基础坑的尺寸长 18m、宽 17m、深 10m；

(4) 环境振动响应要求比较严格，近距离的精密设备要求控制在 $0.2\sim 0.3\text{mm/s}$ 。

1.3.4 一般装备振动控制特点

从振动控制的观点出发，一般装备可分为强振设备和振敏设备两大类型。

在一般装备中的强振设备是指产生振动的振源装置，如锻锤、压力机、汽轮机、压缩机、轧钢机、破碎机、振动筛、磨机、离心机、振动试验装置、发动机试验台架、水泵、空调机组等。

在一般装备中的振敏设备是指对环境振动有要求的装置，如三坐标测量机、数控机床、测量仪器等。

一般工业装备振动控制是指那些没有包括在精密装备微振动控制和大型工业装备振动控制之内的、其他工业装备的振动控制问题。一般工业装备是在工业建筑中使用得最多，范围最广的机械设备，也存在大量振动问题。

在一般工业装备的振动控制技术中，通常可以分为两种情况：主动控制和被动控制。为了示意一般工业装备的振动传播形式和控制原理，可以参见图 1.3.1 所示的情形。

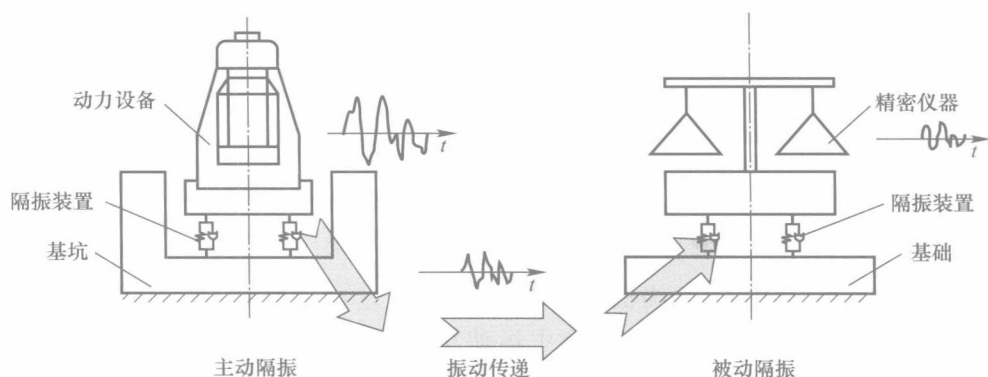


图 1.3.1 工程振动传播与控制示意图

一般工业装备的振动控制的特点有以下几个方面的内容：

1. 振动激励（输入）

(1) 激振的几何特征

- 1) 点振源激励：振动设备振动；
- 2) 线振源激励：公路铁路振动；
- 3) 面或体振源输入：环境振动问题。

(2) 激振的波形特征

- 1) 随机激励：道路模拟试验，环境振动等；
- 2) 瞬态激励：压力机，锻锤等；
- 3) 周期激励：电机，发动机，压缩机等。

(3) 激振的物理特征

- 1) 初始位移激励：压力机锻压阶段；
- 2) 初始速度激励：锻锤打击过程假定；
- 3) 激振力的作用：振动设备激振；
- 4) 基础位移输入：环境振动。

2. 振动系统（结构）

(1) 系统质量

- 1) 质点单元：表现为集中质量，如锻锤或压力机等设备的隔振基础模型；
- 2) 线质量单元：如建筑结构的梁、柱构件，具有连续分布质量的杆件；
- 3) 面质量单元：在建筑结构中的楼板，剪力墙，以及其他板构件等；
- 4) 体质量单元：对于连续分布的实体结构，如地基土，弹性半空间中的弹性介质等；
- 5) 刚体单元：为相对刚度较大的块状实体基础，如道路模拟试验机基础；
- 6) 荷载质量：建筑物中楼面或梁柱墙等构件上的恒载和活载。

(2) 弹性元件

- 1) 钢弹簧：钢弹簧隔振器中的弹簧元件；
- 2) 橡胶垫：橡胶隔振器的弹性性能；
- 3) 结构刚度：结构体系中的梁、板、柱、墙等结构构件的刚度；
- 4) 地基刚度：基础下地基土的等效刚度特性。

(3) 阻尼元件

- 1) 黏性阻尼：隔振器中的油阻尼器或高分子阻尼材料，橡胶隔振垫中的阻尼力等；
- 2) 结构阻尼：结构构件中的阻尼耗散作用；
- 3) 摩擦阻尼：结构接触面之间的摩擦阻尼力。

3. 振动响应（输出）

- (1) 振动位移响应；
- (2) 振动速度响应；
- (3) 振动加速度响应。

1.4 振动控制标准

1.4.1 振动控制标准化体系

1. 我国工程振动技术标准的现状

我国工程振动领域的标准中，有的是根据我国的科研成果和工程实践编制的，有的是借鉴原苏联标准编制的，有的是等效或等同采用 ISO 国际标准。

(1) 国家标准《动力机器基础设计规范》

在 20 世纪 50 年代一直借鉴苏联标准；1968 年编制了《动力机器基础设计规程》（草案）供内部发行使用；1979 年编制了《动力机器基础设计规范》（GBJ 40）获得了国家科技进步二等奖，这也是我国工程建设标准首次获得国家科技进步奖；1996 年编制了《动力机器基础设计规范》（GB 50040）一直使用至今。该标准目前还采用原苏联 20 世纪 50 年代提出的质量-弹簧-阻尼理论体系，基础设计的结果偏于保守且与国际标准不接轨。

(2) 国家标准《地基动力特性测试规范》

该标准是为确定动力机器基础和工程抗震等需要的地基动力特性参数而编写的，1997 年出版了《地基动力特性测试规范》（GB/T 50269）；标准经修订后，2015 版国家标准（GB/T 50269）已经颁布实施。

(3) 国家标准《隔振设计规范》

1991 年，原机械工业部出版了行业标准《隔振设计规范》（JB 22）；1990 年，原冶金工业部出版了行业标准《机器动荷载作用下的建筑物承重结构的振动计算与隔振设计规程》（YBJ 55）；2008 年出版了国家标准《隔振设计规范》（GB 50463）。

(4) 国家标准《多层厂房楼盖抗微振设计规范》

20 世纪 80 年代前，我国该类工程设计一直参照原苏联标准《动荷载机器作用下建筑

物承重结构设计及计算规程》(H 200); 1982 年原城乡建设环境保护部出版了《多层厂房机床上楼盖设计暂行规定》; 1993 年国家标准《多层厂房楼盖抗微振设计规范》(GB 50190) 出版发行。该标准采用的楼盖类型为大型屋面板, 仅适用于单跨和等跨不超过三跨的无吊车厂房, 适用范围比较窄。目前标准的修订工作正在进行当中。

(5) 国家标准《建筑工程容许振动标准》

该标准是 2009 年住房和城乡建设部下达的标准制订计划。在此之前, 我国有多本国家标准涉及容许振动标准问题, 但是各标准的规定不统一、不全面、甚至相互矛盾, 设计人员往往需参照国外标准或相关科研资料或设计手册。在所提出的容许振动标准中, 是时域还是频域? 是峰值还是均方根值? 测试方法和测点位置都没有做出明确规定。《建筑工程容许振动标准》(GB 50868) 标准的编制, 统一了我国建筑工程振动的容许标准, 方便了设计人员的使用。该标准于 2013 年正式实施。

(6) 国家标准《古建筑防工业振动技术规范》

2008 年住房和城乡建设部发布了《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T 50452), 这是我国第一本古建筑防振方面的国家标准。标准给出了砖石、木结构古建筑及石窟的容许振动标准, 并提出了工业振动对古建筑结构影响的评估方法和防振措施。

(7) 等效或等同采用 ISO 国际标准的国家标准

目前与建筑工程振动控制有关的主要有:

- 1) 《机械振动与冲击对建筑物振动影响的测量和评价基本方法及使用导则》(GB/T 14124);
- 2) 《关于固定结构特别是建筑物和海上结构的居住者对低频水平运动响应的评价导则》(GB/T 13921);
- 3) 《人体全身振动暴露的舒适性降低界限和评价准则》(GB/T 13442);
- 4) 国家标准《在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动》(GB/T 6075)。

(8) 关于环境振动控制方面的标准

- 1) 行业标准《机械工业环境保护设计规范》(JB/T 16);
- 2) 国家标准《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355);
- 3) 国家标准《城市区域环境振动标准》(GB 10070);
- 4) 国家标准《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071);
- 5) 行业标准《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ/T 169)。

(9) 交通振动控制方面的标准



图 1.4.1 工程振动技术标准体系总框图

- 1) 行业标准《城市轨道交通引起的建筑物振动与二次辐射噪声限制及测量方法标准》(GGJ/T 170);
- 2) 行业标准《环境影响评价技术导则: 城乡轨道交通》(HJ 453)。

2. 工程振动技术标准体系建议

(1) 工程振动技术标准体系总框图 (图 1.4.1)

三个层次的关系是: 上层标准的内容包括了以下各层标准的某个或某些方面的共性技术要求, 并指导下层标准,

共同成为综合标准的技术支撑。

(2) 工程振动技术基础标准 (表 1.4.1)

工程振动技术基础标准

表 1.4.1

编号	标准名称	现行相关标准	重要性
1.1	工程振动设计统一标准	准备编制	重要
1.2	工程振动术语与符号	正在编制	重要
1.3	建筑工程容许振动标准	已经实施	重要
1.4	工程振动荷载规范	正在编制	重要

1) 《工程振动设计统一标准》

该标准适用于工业与民用建筑、交通市政等工程振动控制的基本原则和设计准则，对振动荷载和容许振动确定的要求，包括了设计与施工要求等。

2) 《工程振动术语与符号》

该标准适用于工程振动设计与控制的基本术语及其符号。在术语中明确其定义和概念，包括中英文对照；在符号中明确定义与使用方法，明确其内涵与外延。

3) 《建筑工程容许振动标准》

该标准适用于建筑工程在工业和环境振动作用下的振动控制和振动影响评价，提出精密仪器和设备、动力机器基础、建筑物内人体舒适性和疲劳-工效降低、交通振动、建筑施工振动、声环境振动的容许振动标准。

目前编制的容许振动标准包括了交通振动对建筑工程的容许振动标准，没有包括对市政、路桥、机场、古建筑等的容许振动标准，没有包括随机振动如人行振动等。在下一版修订时进行增补。

4) 《工程振动荷载规范》

该标准适用于工业与民用建筑承受各种振动时荷载的取值，主要是确定各类动力机器设备产生的振动荷载，明确取值原则和方法，为工程振动设计时，正确的输入作用效应提供保证。

(3) 工程振动技术通用标准 (表 1.4.2)

工程振动技术通用标准

表 1.4.2

编号	标准名称	现行相关标准	重要性
2.1	动力机器基础设计规范	GB 50040	重要
2.2	地基动力特性测试规范	GB/T 50269	重要
2.3	建筑振动控制设计规范	待编	重要
2.4	构筑物振动控制设计规范	待编	重要
2.5	建筑动力特性测试规范	GB/T 19875	重要
2.6	工程隔振设计规范	GB 50463	重要
2.7	古建筑振动控制技术规范	GB/T 50452	重要
2.8	交通振动控制技术规范	待编	重要
2.9	建筑施工振动控制技术规范	待编	重要
2.10	环境振动控制技术规范	待编	重要
2.11	工程振动对居住区舒适性和生产操作区人员健康影响控制技术标准	待编	重要

1) 《动力机器基础设计规范》

该标准是在 GB 50040 的基础上进行修订。工程案例表明：采用 GB 50040 是安全的，但偏于保守，有一些工程采用其他设计方法比按 GB 50040 基础体积小得多，而且运行正常。GB 50040 采用的是原苏联 20 世纪 50 年代的质量-弹簧-阻尼体系，目前俄罗斯也对该体系进行了改进，该体系与国际标准也不接轨，规范的修订应该采用适合我国工程实际且方便设计人员使用的理论体系。

2) 《地基动力特性测试规范》

该标准在 GB/T 50269 的基础上进行修订。标准除了与《动力机器基础设计规范》及工程抗震设计配套外，还应按照目前工程建设需要，根据测试技术、分析手段、测试仪器的发展，提出先进适用的测试方法。

3) 《建筑振动控制技术规范》

目前与此相关的标准是《多层厂房楼盖抗微振设计规范》(GB 50190)。综前所述：该标准适用范围极窄，在工程中实际采用的很少。

该标准包括建筑工程在动力荷载作用下的振动控制设计，包括强振和微振，包括竖向和水平向振动。抗微振设计可以作为该标准的一个组成部分。

4) 《构筑物振动控制设计规范》

该标准适用于各种结构形式的广播电视塔、通信塔、微波塔、风力发电塔、输电高塔、石油化工塔、工业冷却塔、水塔、烟囱、运输机通廊等工程的振动控制。

5) 《建筑动力特性测试规范》

该标准是新制订标准，以前有一些手册和教科书可供工程振动控制时参考，但不能满足工程需要。

该标准针对目前常见的高层建筑、工业建筑、构筑物、交通工程、市政工程等动力特性提出测试和分析方法，为工程振动控制提供测试依据。

6) 《工程隔振设计规范》

该标准可在现行国家标准《隔振设计规范》(GB 50463) 的基础上修订，为了避免与机械、航空、船舶等机械设备本身隔振混淆，建议改为《工程隔振设计规范》。

标准的修订要注重工程隔振新理论、新技术、新材料，注重与国际标准的接轨。

7) 《古建筑振动控制技术规范》

该标准可在现行国家标准《古建筑防工业振动技术规范》(GB/T 50452) 的基础上进行编制。

标准修订时，要补充其他类型古建筑的容许振动值和结构动力特性与响应计算，补充其他振动对古建筑影响的分析，完善振动源沿水平向和竖向振动传播与衰减的分析方法，提出古建筑振动控制的综合治理方案（如振源减振，切断振动传播路径或降低振动传播效应，古建筑本身的隔振措施）。

8) 《交通振动控制技术规范》

该标准涉及火车、城铁、地铁、汽车等振动对建筑物和市政公路桥梁、铁路桥梁影响的振动控制，包括对振源和控制对象的控制与分析。

9) 《建筑施工振动控制技术规范》

该标准涉及建筑施工中的爆破、打桩、强夯、振冲、吊装等对现在建筑物安全与环境

振动的影响，提出测试与分析方法，以及减少振动的措施。

10) 《环境振动控制技术规范》

该标准包括环境振动（地脉动、风振等）对建筑物、构筑物等影响的振动控制，提出振动评价和分析方法，减少环境振动影响的措施。

11) 《工程振动对居住区人员舒适性和生产操作区人员健康影响控制技术标准》

该标准包括在振动环境下，生产操作区人员健康和附近居住区舒适性影响的振动控制与评价，并提出减少振动影响的措施。

(4) 工程振动技术专用标准

1) 动力机器基础专用标准（表 1.4.3）

动力机器基础专用标准

表 1.4.3

编号	标准名称	现行相关标准	重要性
3.1.1	动力机器基础优化设计规范	待编	重要
3.1.2	压缩机基础设计规范	待编	重要
3.1.3	汽轮发电机基础设计规范	待编	重要
3.1.4	燃气轮发电机基础设计规范	待编	一般
3.1.5	冲击式机器基础设计规范	待编	一般
3.1.6	压力机基础设计规范	待编	一般
3.1.7	振动台基础设计规范	待编	一般
3.1.8	金属切削机床基础设计规范	待编	一般
3.1.9	电机基础设计规范	待编	一般
3.1.10	工业鼓风机基础设计规范	待编	一般
3.1.11	空压机基础设计规范	待编	一般

该专用标准是在通用标准《动力机器基础设计规范》的基础上进一步细化和补充的行业或协会标准，其中《动力机器基础优化设计规范》是在动力基础设计的多方案比较，设计参数的优化选择方面做出规定。

该专用标准也可以按照机器类型进行归类，或按照行业进行归类。

2) 地基动力特性测试专用标准（表 1.4.4）

地基动力特性测试专用标准

表 1.4.4

编号	标准名称	现行相关标准	重要性
3.2.1	地面振动与衰减测试标准	待编	一般
3.2.2	地基动力特性激振法测试规范	待编	一般
3.2.3	地基动力特性地脉动测试规范	待编	一般
3.2.4	地基动力特性波速测试规范	待编	一般
3.2.5	地基动力特性循环荷载板测试规范	待编	一般
3.2.6	地基动力特性振动三轴和共振柱测试规范	待编	一般
3.2.7	天然与复合地基承载力动力测试规范	待编	一般

该专用标准是在通用标准《地基动力特性测试规范》基础上，对各种测试方法进一步细化的行业标准或协会标准。

3) 建筑振动控制专用标准 (表 1.4.5)

建筑振动控制专用标准

表 1.4.5

编号	标准名称	现行相关标准	重要性
3.3.1	工业厂房在动力荷载作用下结构设计规范	待编	重要
3.3.2	工业建筑振动控制技术规范	待编	重要
3.3.3	多层厂房楼盖抗微振设计规范	GB 50190	重要
3.3.4	居住建筑振动控制技术规范	待编	重要
3.3.5	公共建筑振动控制技术规范	待编	重要
3.3.6	超高层建筑振动控制技术规范	待编	重要
3.3.7	大跨度建筑结构振动控制技术规范	待编	一般
3.3.8	多层织造厂房结构动力设计规范	FZJ 116	一般
3.3.9	电子工业防微振工程技术规范	GB 正在编制	重要

该专用标准是在通用标准《建筑振动控制设计规范》基础上制定的国家、行业或协会标准。

4) 建筑工程动力特性测试专用标准 (表 1.4.6)

建筑工程动力特性测试专用标准

表 1.4.6

编号	标准名称	现行相关标准	重要性
3.4.1	建筑工程动力特性脉动法测试规范	待编	一般
3.4.2	建筑工程动力特性激振法测试规范	待编	一般
3.4.3	高层建筑动力特性测试规范	待编	一般
3.4.4	工业建筑动力特性测试规范	待编	一般
3.4.5	塔桅建筑动力特性测试规范	待编	一般
3.4.6	桥梁结构动力特性测试规范	待编	一般
3.4.7	大跨度建筑动力特性测试规范	待编	一般

该专用标准是在通用标准《建筑动力特性测试规范》基础上制定的行业或协会标准，对测量仪器的要求可单列一本，亦可根据需要纳入该标准中。

5) 构筑物振动控制专用标准 (表 1.4.7)

构筑物振动控制专用标准

表 1.4.7

编号	标准名称	现行相关标准	重要性
3.5.1	构筑物在动力荷载作用下结构设计规范	待编	一般
3.5.2	构筑物动力特性测试规范	待编	一般
3.5.3	石油化工塔形设备基础振动控制技术规范	待编	一般
3.5.4	运输机通廊振动控制技术规范	待编	一般
3.5.5	电视塔振动控制技术规范	待编	一般
3.5.6	雷达站振动控制技术规范	待编	一般
3.5.7	大型压力容器基础振动控制技术规范	待编	一般

该专用标准是在通用标准《构筑物振动控制设计规范》基础上编制的行业或协会标准，可以根据需要进行补充。