

机械制造方面的力学问题及科学技术进步

К.В.Фролов

机械制造方面的最重大成就，很少是逐步改进以前制造的结构的结果。技术的进步，基本上取决于各个科学分支取得的新的重大成果。技术发展水平的这种与加强采用新科学成果的依赖关系越来越得到加强。目前，基础问题方面的研究，越来越经常是为了满足工业方面高速高效地利用已获得的研究成果的需求。与此同时，许多有用的科研成果却在企盼着得到采用或者得到一定程度的利用。造成这种情况的原因多种多样：工业方面的人们对新的科学思想了解不够；工业方面对于认识原理上新颖的技术解决办法准备不够，尤其当要求几个部门共同努力时更是如此；对于放弃传统的解决办法和工艺不感兴趣；对于学习把研究成果转化成试验样机和宣传自己的成就不够积极。下面讨论力学各分支的一些最重要的问题，它们的解决在很大程度上决定着机械制造方面的技术的进步^[1,2]。

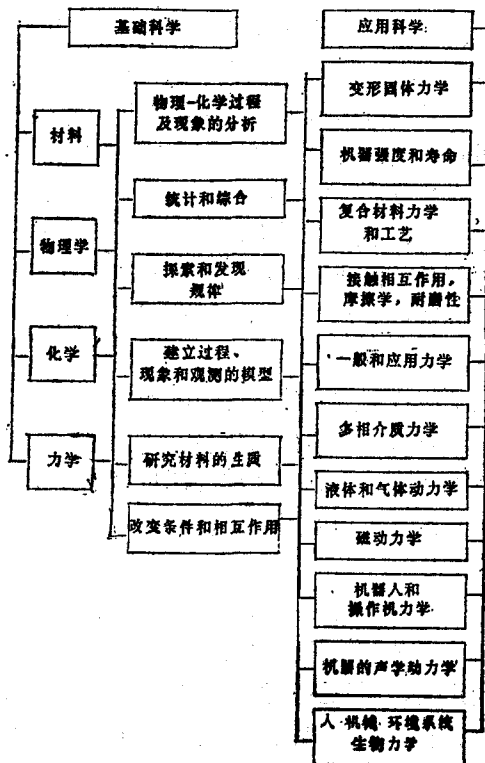


图1

1 变形固体力学

变形固体力学，以及实验力学、金属物理、复合材料力学等基础分支和应用分支的成就，是解决机器强度和寿命的迫切问题的基础（图1），同时还可降低机械的能耗及材料消耗^[3,4]。在这些问题当中，要获得

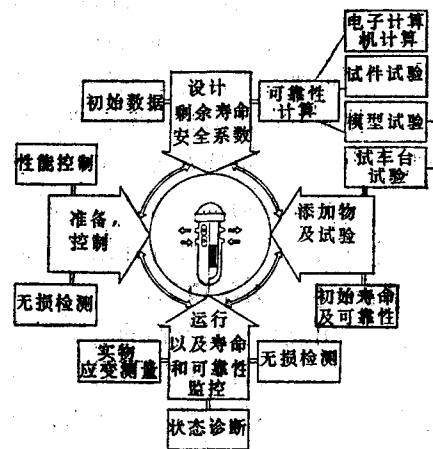


图2

* 作者的内容更详细的一篇文章为Механика и решение проблем машиностроения. Успехи мех., 11, 1-2 (1988): 141-184. —译者

应力-应变状况和极限状况的计算-设计评价,要进行各种环境(高温及极低温,磁场,辐射条件)中模型和实物的研究,借助于安装在机械上的具有状态分析器的电子计算机经常检验加载历史来确定各个机械的残余寿命,利用准则判别法来确定设计及真实运行条件时的寿命。下面这些方面的工作有重要的意义:建立和应用新的强化材料和加工材料的方法,包括磁脉冲法,爆炸法,超声法,电物理法,激光法,金刚石法,等离子体枪法,镀层法,加筋法等。

2 强度和寿命

在设计阶段(图2),基本问题之一是,论证初始寿命确定的计算安全系数。计算是用电子计算机来进行,以便确定运行条件下的作用力、温度、应力和应变。再用万能试验机在很广阔的温度范围内对试件进行实验室的力学试验而予以补充。对于最复杂的部件及加载条件则进行模型试验。论证安全系数和寿命方面的工作量,可能达到总设计工作量的15—25%,应当认为花费这些工作量是值得的。

在制造机械和结构的阶段,要极大地注意从适应强度要求的观点,从一开始以及在以后要定期地检验材料和结构元件接头的力学性能。在这一阶段还要检测承载元件的实际缺陷,以便得到确定运行条件下的寿命、探伤范围和探伤时期等的原始资料。

为了使机械和结构顺利运行,对它们的现状进行检测,搞清楚现有的损伤并估计剩余的寿命,越来越受到巨大的注意。

为了保证机械有足够的强度和寿命,进行了一系列的研究来确定其极限状况的判据,并研究典型机械元件受载时的力学情况。持续地全面研究了静载荷、动载荷、热载荷下受重载荷时的结构及其元件的应力状况和强度。开展了确定由新型复合材料制成的承载机械零部件和结构元件的强度的研究工作。提出了对变温和高温下的应力和应变进行实验的方法和进行研究的手段。对机械和结构元件的高周疲劳和低周疲劳进行计算,对材料和结构元件的抗断裂性进行计算,具有特殊的意义。利用脆性光敏涂层、带刻度网络、复制光栅及云纹、全息术及应变测量术,发展研究应变的现代实验方法,对于保证机械可靠性起着巨大的作用。

由于必须保证强度和寿命以及安全运行,机械结构以及工艺和工作过程等参量的技术诊断大大增加了重要作用。对于现代的高载荷机械,如果诊断手段的费用占机械本身费用的10—15%,那就可以认为是非常正常的情况。在某些特别重要的情况中,例如,适用于动力设备的情况,可以采用针对各种工程项目的综合诊断法,包括根据超声、磁、电、辐射、声等作用原理来测量振动、压力脉动及温度脉动,以及进行多点实物应变测量、无损检测,借助于电子计算机、连续及脉冲作用的全息摄影系统来分析声发射的参量。

3 复合材料的力学和工艺

制造和采用复合材料方面的科学跟踪工作,是复合材料力学及工艺的主要任务。这项工作给了解、描述、预言和控制各种各样复合材料的各种结构性质奠定了基础。重要的是,要使这些研究的成果不仅能够最短期间提供给使用者,而且要以实际使用时最方便的形式提供出来。同时应当考虑到,直到目前,采用复合材料来制造典型机械零部件的还相当少。它们主要限于用作航空器和航天器特有的机体部件以及平坦的零部件。因此,在机械制造中广泛利用复合材料的条件,是预先解决如下的一系列新问题:得到具有特定性质(例如,抗摩擦性)的准确工作表面;得到基于复合材料以及金属制成的支承接头机座等构成的复合机体

部件结构，在复合材料表面镀上耐磨镀层及其他金属镀层；等等。

在机械制造中，有许多项目如果采用复合材料来减轻机器各个元件的重量，那就可能大大提高若干最新的指标。例如，在保持结构的刚度条件下采用复合材料来减轻机器人和操作机运动部分的重量，就能降低所使用的功率，从而减轻传动装置的重量。由于减轻运动部分的重量而带来的好处，随着由上一运动级过渡到下一运动级而累进地增加，因为上面那些级具有大量的载荷。减轻运动部分的重量还带来了增大速度的可能性，也就是说，提高了机器人技术装置的生产率。在运输机械、农业工程以及其他许多部门采用复合材料，也有同上面类似的效果。采用复合材料来制造高压气瓶、轴承、化学反应器壳体、飞行器、水下工程设备及超水深设备壳体、内燃机壳体及零部件、贮存及运送液体及气体产品的大型容器等，都可以把技术-经济指标大大提高到一个新的水平。

迄今为止，对复合材料所抱的许多期望并未实现。这表明，设计师们对复合材料的力学特性以及对工艺缺陷出现的危险性没有充分的估计。尽管在复合材料力学领域已有相当深入的基础知识，并且解决了广泛应用的问题，但是，还必须大大增加理论和实验研究工作，直到能够建立标准的方法和应用程序包，来计算工艺的及运行的应力和应变，优化工艺的和结构的参量，论证计及各种自然界物理场时在各种形式静载及动载作用下，典型结构中可以容许的缺陷。

4 接触相互作用力学和机械耐磨性的摩擦学问题

解决摩擦学的基础问题和应用问题，目的是提高摩擦部件的耐磨性和可靠性。这对于大载荷和高速度条件下运行的机械具有特别重要的意义。大家知道，克服摩擦力消耗了全世界能源的相当大部分。因此，降低摩擦损失，就成为降低机械的能耗指标的途径之一。机械的运动配合部分发生故障，80—90%就是由于磨损而引起的。

在研究摩擦处固体的表面破坏时，应当计及物理方面、化学方面和力学方面的情况，即接触的特性，相互接触物体几何形状随时间的变化，运动的运动学情况，表面层及近表面层的结构及成分，润滑层的状况等。要可靠地描述如此之复杂的现象，只可能以实验同数学模型建立的相结合为基础。而建立数学模型，需要利用物理-化学过程的理论、连续介质力学、热力学以及材料学方法。

摩擦学领域中的基础研究可以分成下列几个主要方向。第一个方向是研究摩擦处接触相互作用的力学以及伴生的各种过程，同时考虑材料在摩擦条件下以及具有润滑和其他因素的条件发生的物理状态剧烈变化。这个方向的工作是保证制造出用于摩擦对的新材料，保证挑选应用于指定条件下的摩擦对。

第二个方向是摩擦的高速流动过程的实验-理论热物理研究。这是为了制造制动器、联轴节、导架及其他类似用途的部件所必须进行的研究。

第三个方向是研究各种复杂情况下润滑边界层中进行的各种过程。

许多实际问题的解决是摩擦学领域的工作成果。要制出新的润滑材料和润滑剂供给法：水基润滑剂，气体润滑剂，基于磁活化液体及磁粉材料的润滑剂。最近已经能够用相当简单的方法，即改变摩擦区的磁场特性的方法，来移动摩擦区。已经开始利用选择性迁移效应，用所得的方法来大大降低摩擦系数，这就同时大大减小了磨损。要制造新的抗摩擦的耐磨镀层，这是由如下的一些现代物理学方法所带来的：真空法，离子-等离子体法，激光法，爆

轰法, 电子束法, 等等。在摩擦对中开始采用特殊的复合材料, 陶瓷, 粉末冶金法获得的材料等。

具有气体润滑的轴承组合件的特点是提高了使用寿命, 并且能够在 $-260 \sim +1000^{\circ}\text{C}$ 的温度范围中, 高辐射性条件下, 回转频率高达每分钟70万转的情况下工作。转换为磁粉润滑时, 根据磨损判定, 齿轮传动的工作寿命可能提高 10—20 倍, 摩擦部件的能量负荷可能提高 1.5—2 倍。摩擦学问题中也包括保证密封装置的工作能力和可靠性, 这些密封装置在许多情况中决定着机械的寿命和故障。要制出考虑到密封工作特性的密封力的新密封材料、精加工-硬化工艺和优选密封部件结构方法。

解决制造合理的无级传动结构及其在工业中推广的问题, 很大程度上取决于进行具有摩擦流体时的研究, 这种摩擦流体可以在最小的磨损情况下提高摩擦接触中的摩擦系数。

要进行在摩擦表面喷镀来提高部件耐磨性的各种镀层的多种多样喷镀方法, 这些方法在维修(修复)磨损零部件时也有广泛的应用。

5 一般和应用力学

在一般和应用力学领域中, 首先应当着重研究振动理论。最近已大力开展非线性振动理论各新分支的研究。详细研究了应用非线性力学及 Марков 过程理论的渐近法的方法, 用以分析受白噪声型随机力作用下粘弹性系统的随机振动。建立了研究具有自由面液体、含空洞物体及部分充液物体的非线性振动的方法。创立了外部振动对非线性力学系统作用的理论。大大发展了振位移移理论, 具有有界激励振动系统理论, 结构阻尼理论, 振动导电性理论, 振动流变学, 振动对浆体及悬浮体作用的理论。这些研究成果使我们能够从原理上阐明振动机械和工艺领域中一系列新的设计和工艺工作, 包括振动分离器, 振动式传送带, 振动粉碎机和破碎机, 振动式发动机, 等等, 其中许多设备已在工业中采用^[5,8]。

特别是建立了振动式传送系统, 用来沿水平表面或稍微倾斜表面, 或沿螺旋载物表面运送货物, 这些都是利用小振幅振动式运动来完成的。根据同样的原理进行工作的振动式传送带, 在车间内运输方面, 在零部件的自动组装和分选方面得到了应用。装有某些不太复杂的附加设备的传送装置, 在一定状况下工作时, 可以在传送零部件的同时剔除其废品并使其定向, 这就大大简化了传送装置同机器人技术系统的连接。在采用振动式传送带来运输散体材料时, 可以在进行运输过程的同时进行干燥、粉碎及其他一些工艺操作。

在特殊选配的细颗粒材料(金刚砂, 河沙等)的振动流化床中进行产品的热处理具有很高的效率。这种工艺不仅使过程得到强化, 而且使过程容易加以控制。在连续浇注钢铁的装置中可以利用振动式结晶槽。在这类振动式结晶槽中产生的振动作用, 可以大大减小结晶槽中材料的运动阻力, 改善传热和传质条件, 并且在提高金属的力学性能的同时得到提高装置的生产率的结果。

振动技术在强化车削、钻孔、磨削、破碎、粉碎、破坏岩土和冻土等等方面都有广泛的应用。利用振动工艺, 可以清除腐蚀, 除去毛刺, 倒圆锐边, 进行立体研磨及抛光, 使表面硬化, 展平表面层中的应力, 在进行电镀及油漆前清理表面, 进行表面最后装饰加工。为此, 零部件或毛坯是在自由状态或固定状态下置于有填料及工作液体的舱室内, 利用振动的作用来强烈进行搅拌。

在大载荷下(可表现出弹塑性或粘弹性的流变特性)工作的威力强大的工程振动机械,

其效率的大大提高（达若干倍），可以直至转变成共振的工况。这类工况的存在及其效率的估计，首先根据理论分析得到，同时要提出保证系统能够共振调谐的设计参量和工艺参量。实际上，共振工况是现实存在的，例如，在破碎岩石的机械中，在超声波加工工作机床中，以及在振动试验台中。

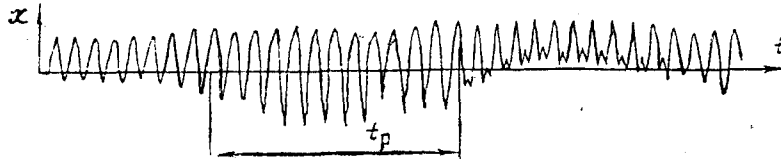


图3

图3画出了用振动破碎机进行岩石破碎过程的波形图。图中 x 是破碎机构的振幅， t 是时间， t_p 是对应于共振工况的周期段。可以看出，当系统中实现共振工况时，破碎机构的振幅将比空转时的增大若干倍。如果岩石保持为恒定的最佳水平，则共振工况或接近于共振的工况将保持为稳定的。可是，更有效的却是利用带有反馈电路的由自共振激励来控制的稳定维持共振工况的系统（图4）。

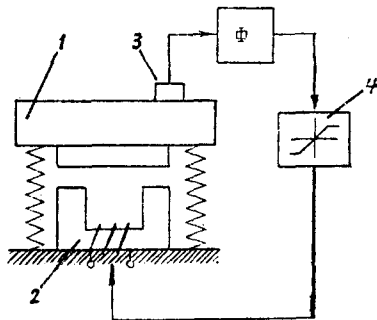


图4 带有电磁激励器的自共振振动机

- 1 振动系统 2 激励器 3 振动传感器
4 非线性放大器 Φ 移相元件

已出现了新的一类带有若干自动同步振

动激励器的振动机械。这些自动同步振动激励器是根据安装在同一基础上的一些旋转非平衡转子的自动同步理论制出的。这种类型的振动机械不仅结构和控制都更为简单，而且所消耗的功率也更小。带有自动同步振动激励器的一系列振动机械的使用许可证，已向美国、日本以及其他一些国家的公司出售。然而可以断定，正如自动同步效应的潜力尚未得到充分利用那样，这振动机械的潜力至今远未得到充分的利用。

6 多相系统力学

多相系统力学的新方向之一，是研究固体颗粒、液滴或气泡在液体中以及在液体、气体或蒸汽流动中形成的悬浮体内激发出波运动的机理。目前，在这一方向的范围内，已经阐明了对实践非常有用的一系列基本效应。

已经确定，如果有外部振动的影响，则在一定的条件下，可能发生杂质相对于液体的单向运动，发生杂质沿封闭轨线的稳定周期运动，发生杂质在一定的有界区域内的集中。周期运动形式的存在条件及其稳定性，决定于外部作用的振幅和频率，决定于系统的几何参量和物理参量。特别有意义的事实是，在运动过程中发生系统的参量自动微调到共振值，在这些共振值下，维持波运动只需要最小的能耗。

上述这些运动形式已经在工业装置中实现，它们是运送、分离和混合悬浮液、乳浊液和饱含气体的液体的崭新高效工艺。这些工艺的效率超过已知的超声工艺和振动工艺。为了在

国民经济中采用这些工艺，已经在机械学研究所（ИМАЛЛ）建立了专门的机械与仪器的综合设备。

多相介质流动中的波动过程（例如，在管道中），可能由外部的作用而形成，但可能具有自振的性质，即由于液体，气体或蒸汽的定常流动的失稳而发生。特别是由管道壁确定弹性阻尼性质的参量所确定，而在管道壁处扰动稳定下来，或相反相受到抑制。在研究过程中，泵工作时所引起的或管道截面堵塞时所发生的声扰动的传播机理，作为降低各种用途的

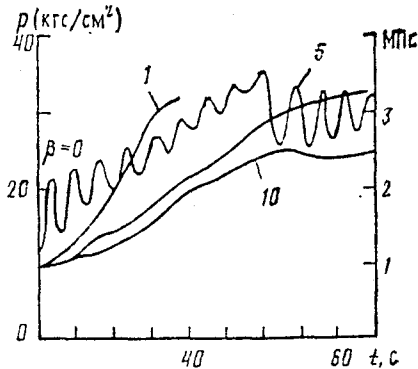


图5 稳定器控制参量 β 不同值情况下，管道截面堵塞位置附近管道中压强变化曲线

管道中压力和流量脉动程度的通用手段的波动过程，假定是稳定的。这些用途包括运输石油产品的管道，汽车电站的蒸汽管道，运输石油及天然气的干线管道。稳定器在干线管道堵塞时对干管的作用示于图5。图5示出，在管道堵塞截面附近处压强 p 随时间 t 的变化情况。曲线 $\beta=0$ 表征管道中无稳定器时的过程，其余的曲线表征有稳定器时各控制参量值下的过程。可以看出，在具有稳定器时，振动大大减小，管道的可靠性得到提高。

7 液体和气体动力学

液体和气体动力学的方法与正在迅速发展中的数值方法一起，越来越广泛地应用于对各种各样装置尤其是动力装置中进行的过程建立数学模型。这时已无必要利用简化表示法和描述法，这在研究例如涡轮机的流动部分中的过程时非常重要。模型分析的可能性不仅在稳态过程中出现，而且也在瞬变过程中出现，这使我们有可能进行研究来确定涡轮机叶片上，飞机机翼上以及其他构件上的非正常载荷。

在气体和流体动力学同变形体力学的交界处建立了累积理论、物质的激波压缩和高速变形理论。超高压、超高速和超高温牢牢地进入了获取和制备材料的现代工艺之中。在炸药爆轰时，在利用脉冲磁场、电流体效应、混合气体爆炸等等时发生的激波作用，同静压作用的重大差别在于，介质由初始状态转变到压缩状态，是在极短的时间内发生的，这就导致材料的性能发生重大的变化。这种工艺过程很早以前就已经用来获得人造金刚石。在高速碰撞下，金属物体可能产生具有流体性质的强大金属流动，这就有可能利用这种效应来进行焊接和切割。根据冲击相互作用理论，已经建立起了一些先进的工艺（用爆炸进行焊接、切割、冲压及硬化金属），在冲击压缩下合成新的超硬材料的方法，爆轰镀层法，重要用途零部件的脉冲压制法及扩展法，铸件清除，等等。

8 磁动力学

这一方向属于力学同电动力学交界处的物理学的分支。电磁场与介质的力相互作用问题，电磁场对物体的远距作用问题，属于我们考虑的磁动力学问题的范围。这种作用的效率，可以根据1T磁通密度下足够高频电磁场对金属表面造成的电磁场等价于约4bar压强的力来判定。因此有可能制造出现代技术中以脉冲方式工作的电磁冲床。利用电磁场可以驱动大质量的物体。在最近的将来，完全可以实现利用机械中的电磁场来进行压力下的铸造，

进行金属的振动加工，金属的配量和分选。在更远的将来，可以进行悬浮状态的熔炼，导电固体的稳定悬浮，旋进的控制，物体的定向等。目前已经可以应用磁轴承悬挂，建造磁垫的试验车厢。可是应当指出，在实际中采用磁动力学领域的研究成果尚有很大困难，因为每一次都必须预先进行深入的理论分析工作。

9 机器人和操作机动力学

这一方向可以看成是具有多可动度刚体和变形体系统控制运动的力学的分支^[8]。这种系统的功能特性——已有成就的准确复制，快速动作，经济性，可靠性——很大程度上取决于它的力学性能和控制能力。研究机器人技术装置的驱动部分、传动部分和控制系统等的合理结构及合理参量的选取，属于这一力学分支的任务。

降低或改善机器人各个可动度彼此间的动力学相互影响是基本的问题之一。这使我们可以提高机器人构件运动的平稳度和准确度，降低传动功率，简化规则系统和控制系统。提出的目标是在最近研究运动的动力学隔离概念，保证用合理选定机器人的驱动系统、构件质量分布及机构中传动比，来消除机器人各可动度间的相互影响。我们指出，这一概念的意义将随着机器人快速动作的加速而加大，而这是有效地应用机器人的必要前提。

为了建立优化机器人程序运动的方法和算法，建立考虑结构元件弹性和传动性能时计算机人动力学的理论，建立计算能回收能量的快速动作周期机器人的理论和方法，已经进行了大量的工作。根据这些工作成果，提出并实现了按快速动作方式运行的工业机器人的优化，也制出了具有提高快速动作和降低能耗特点的新的周期机器人样机。

电子控制系统领域的大量成就，新材料和工艺的应用，使我们能够扩大各种类型传动装置（电的，液压的，气力的）的功能，在一定程度上调整好它们的工作特性。对每一具体情况选取合理的传动类型及其结构和参量的问题，可以用一般的传动理论来解决；这时可以保证带载荷传动装置的力和控制回路特性得到最好的配合。

目前应用的大多数机器人，要求外部介质是“刚性”组织的，也就是说，操纵的对象应当被足够准确地送到加载位置并相应地保持一定的方向，而机器人和服务于它的装置的动作则是同步的。利用通过特殊的传感装置来了解外部介质的性质和状况等信息的更加高度组织的机器人，就可以取消特殊的装备。这样的一代机器人称为灵敏的、自适应的、集成的、智能的机器人。这种机器人的控制应当在实时范围进行，也就是说，要在执行机构运动时间的极小一部分时间来进行信息处理。由此发生了研究自适应系统的问题，这与建立可靠而价廉的传感装置和具有大容量存储器的高速动作的数字控制技术密切相关。解决了这一问题，我们就能够把机器人不止应用于特殊的情况中，而可应用于天然的且经常变化着的生产情况中。

10 机械的声学动力学

最近期间大大发展了机械的声学动力学，这是力学的一个新方向，是为了建立低噪声机械设计的科学基础而引进声学方法来研究机械的噪声和振动的。这个方向包括研究噪声源中声的形成及其诊断，研究声沿结构物的传播和向周围介质的辐射，研究降低机械的振动声学强度的方法。

目前，在了解许多机械的、空气动力的和液体动力的噪声源中声的生成方面，已经取得了很大的成绩。针对齿轮传动的情况，已经建立了计算由于加工和安装等工艺原因而引起振

动的方法。于是，我们就可以得到如何制造和运行齿轮传动装置的方法的一些建议，以保证其振动为最小，从而其噪声为最小。

应当指出，在转子平衡领域里的成就，与传统的方法一样，都是可能利用激光束（激光平衡法）的。

物体绕流过程的数值仿真，使我们能够了解涡旋和湍流产生的规律，确定作用在结构元件上的压力场，控制流动使这些作用为最小。

已经确定，许多结构相对于振动具有滤波的性能，因而可以利用这些结构来作为具有隔振作用特点的基础结构及座架结构。已经研制并在工业上生产出各种不同类型的隔振器，以及用橡胶类材料和聚合物材料制出的减振器和噪声吸收器。在被动防振手段不能解决的那些情况下，可以利用主动方法，其基础是用附加的声能源来补充声场，以及利用随时间变化参量的结构。

为了进行声信号测量，已经研制出了特殊的手段和仪器，如噪声计，强度计，压电陶瓷传感器，电阻应变传感器，光电传感器等。借助于激光技术（脉冲全息摄影术），进行了机械振动无接触测量新方法的研究。

最近应当予以解决的最重要的问题有，研究机械设计阶段计算预期的机械振动强度、振动声学强度的方法，出版考虑到声学性能判据时设计机械的指导性资料。尽可能迅速地采用关于机械振动强度的诊断、减小和控制等方面的科研成果，组织好用于实验研究机械噪声和振动的测量仪器的工业生产，也不是不重要的问题。

11 “人-机械-环境”系统的生物力学

在“人-机械-环境”系统的生物力学研究方面，已经得到了操作人员在振动作用条件下功能潜力的一系列研究成果，确定了建立控制防振系统的标准和方法。这一力学方向极其重要，

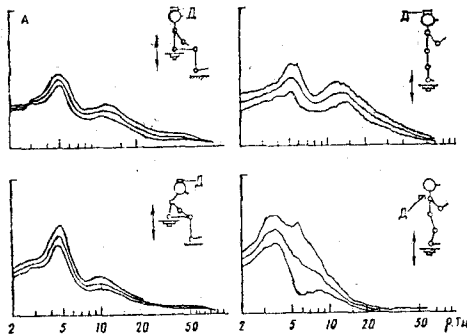


Fig. 6
图6

因为机械的可靠性、寿命和安全性，越来越大地取决于工作人员动作的可靠性。管理巨型设备和工程结构物的工作人员的失误，不仅可能严重影响这些设备和结构物功能作用的效率，而且会导致偏离正常的工况，导致发生具有生态恶果的事故。

高度可靠的机械应当符合人机工效学方面和生态纯洁性方面的一切要求。在实验上，在特殊的综合体确定之后，人体的良好响应性质实际上取决于他的姿势和位置（图6）。在所得到数据的基础上，可以建立统计上表示的人体数学模型，

此模型计及了人体测量的特征。根据这一模型，可以研究人体在振动作用条件下的行为，提出在对人体最安全频率范围内的有效防振措施的建议。

参考文献（6篇，略）

董务民译自：Машиностроение, 5 (1988) ; 3—13,