

机械动力学的发展与挑战

1. 前言

机械动力学是一门基于 Newton 力学，研究机械系统宏观动态行为的学科。该学科的研究对象包括几乎所有具有机械功能的系统，其研究范围涵盖了这类系统的建模与仿真、动力学分析与设计、动力学控制、运行状态监测和故障诊断等。该学科的主要任务是采用尽可能低的代价使产品在设计、研制、运行各阶段具有最佳的动力学品质。

新型飞行器、高速车辆、机器人、大型动力机械的发展不断向机械工程师提出新的动力学与控制问题，极大地促进了复杂机械系统和多体系统的动力学建模与仿真、非线性动力学分析与计算、动力学分析与设计、振动控制、状态监测和故障诊断等方面的发展^[1]。

近年来，随着信息科学和非线性科学的发展，机械动力学的研究内涵更加深入，其特征是：在系统的建模阶段计入各种重要而又复杂的非线性因素、柔性因素、边界与结合部效应，应用非线性动力学分析与仿真技术研究系统的大范围动力学特性，基于对系统动力学的深刻理解和采用最新的优化方法实现系统的动力学设计，对系统实施各种主动控制乃至智能控制来获得所需的运动，在研究机电一体化的受控系统时考虑动力学和控制的相互耦合问题，采用各种最新的信息提取和分析方法诊断系统的故障等。

本文将先就机械动力学所涉及的一般理论和方法进行评述，

介绍机械系统（乃至更广义的机电系统）的动力学建模、分析、设计、控制等方面的研究现状。然后，分别介绍转子系统动力学、齿轮传动系统动力学、弹性机构动力学、车辆系统动力学、微机电系统动力学、机械故障诊断的研究现状，并对各分支今后发展中值得关注的问题进行了讨论。

2. 一般性理论和方法的进展

2.1 动力学建模

机械系统的动力学分析和控制需要建立在简洁、可靠的模型基础上。由于实际问题的复杂性，系统模型往往要由理论和实验相结合来确定。

目前，分析机械零部件动力学问题的有限元方法已比较成熟，可在 ANSYS、NASTRAN 等商品化软件平台上完成动力学建模和各种分析。相比之下，处理含运动部件的机械系统的多体动力学方法和软件要落后许多。其中，多刚体系统动力学建模技术已比较成熟，可在 ADAMS 等商品化软件上来完成。近期研究主要解决一些遗留问题。例如，具有奇异性和冗余自由度的多刚体系统建模^[2]，机电耦合系统的统一建模^[3]等。

多柔体系统的建模是一具有挑战性的难题。其基本思路是：采用有限元、假设模态、校正模态、奇异扰动等方法获得柔性体动力学有限维逼近的坐标基，联同关节变量作为广义坐标，通过 Lagrange 方程或变分原理导出动力学方程组。其中，关节变量可以是绝对坐标，也可以是相对坐标。前者易于程式化，但形成的方程规模大；后者则相反。在单柔体建模阶段用绝对坐标，到形成系统方程时用相对坐标进行单向递推组集可充分利用两种坐标描述的优点。不同的柔性体动力学有限维逼近会导致不同的最终结果，从而使得计算量、数值稳定性、用于控制的方便程度不同^[4]。这方面的研究很多，但远远未达到工程化水平。

由于机械系统中普遍存在间隙、单侧约束，近年来许多研究集中在数值模拟多体间的接触与碰撞^[5]。对于多刚体系统的二维接触/碰撞问题，基于互补约束条件的算法已经成熟。近期研究主要针对三维接触和计入摩擦的碰撞问题^[1]。对于多柔体系统碰撞问题，一般沿用处理刚体碰撞问题的方法，利用动量平衡法或引入等效弹簧和阻尼描述柔体碰撞时的变形和能耗。由于对柔体碰撞进行精细建模需要计入应力波在柔体中的传播，目前尚限于对个案进行研究。例如，用非线性有限元法描述相互碰撞的弹性体，用多柔体法描述非碰撞的柔体，通过程序进行切换来加速计算过程^[6]。由于接触/碰撞问题的高度非线性和复杂性，该技术仅适用于简单多柔体的短时间历程模拟。

实验建模旨在确定机械系统中一些难以由理论分析得到的复杂因素，如系统阻尼、约束和支撑处的间隙和摩擦、一些作动器的输入输出关系、控制环节的时间滞后等，是典型的动力学反问题。目前，线性时不变系统的实验建模已比较成熟，研究重点已转向线性时变系统和非线性系统^[7,8]。过去，一般通过对实验数据进行曲线或曲面拟合来确定间隙、摩擦等非线性因素。近年来，则将动力学反问题表述为优化问题，采基因算法、模拟退火算法等全局优化技术来解决，或采用各种神经网络来逼近原系统的动力学模型。例如，采用基因算法识别包装材料的非线性特性^[8]，采用自适应滤波和估计以及 Volterra-Wiener 神经网络对随机激励下具有迟滞非线性的钢架和钢筋混凝土组合件进行建模^[9]。此外，非线性动力学的发展不断为非线性系统的实验建模技术提供新概念和新方法。例如，相空间重构、分维数、时间序列的 Lyapunov 算法使得有可能从实验数据提取出描述无限维系统非线性动力学的最低维数和降阶模型^[10]。控制与作动系统的时间滞后正引起人们关注，其辨识是具有挑战性的难题^[11,12]。

2.2 动力学分析

近年来,对机械动力学分析方法的研究集中在如下几个方面,即复杂机械系统动力学的数值模拟、非线性系统动力学、周期时变系统动力学。

描述复杂机械系统的最普适模型是多柔体系统,其动力学方程可以是常微分方程,也可以是微分代数方程。系统动力学数值模拟归结为高效、高精度地求解这两类方程。近年来,有不少研究致力于改进已有的数值计算方法,提高其计算效率、鲁棒性等^[13,14]。此外,发展了一系列数值方法直接计算系统平衡点、周期运动,分析其稳定性、分叉和混沌特征^[15]。

随着弱非线性系统近似解法、低余维分叉分析、数值模拟方法等日趋成熟,人们对 1~2 个自由度的非线性系统在简谐外激励或参数激励下的动力学行为已有比较充分的认识。一些解析和近似分析方法正被推广到高维系统、非光滑系统、受非简谐激励的系统,并试图揭示新的非线性动力学现象。例如,采用 Volterra 级数分析二元升力面在不可压流场中的亚临界气弹响应和颤振^[16],采用映射方法研究多自由度系统碰撞振动的各种分叉^[17,18],通过共振流形揭示了非线性耦合振子中的能量泵现象,发现该现象可用于振动隔离^[19]。

近年来,对弹性结构等无限维系统的非线性振动分析仍以 Galerkin 方法降维为主,在具体结构分析上有许多进展。例如对电缆等柔性绳索动力学研究^[20]、对板壳大挠度振动的研究^[21]、对随机参数激励下弹性结构的稳定性条件研究等^[22]。结构动力失稳及失稳后行为的研究也有许多新进展。例如,以钻孔问题为背景,研究受圆柱面约束的弹性杆在端部压力和扭矩作用下发生的螺旋状变形,揭示了由螺旋状变形到空间混沌现象的机理^[23];给出了细长管道在外压作用下出现的双稳态屈曲现象及其动力传播特性^[24]。

一个令人鼓舞的研究进展是,通过现代非线性动力学理论与实验观测的结合可揭示出一些复杂的非线性行为。例如,以核电

站热交换器为背景，通过高速摄影记录下 300 根相互平行的悬臂梁在横向流激励下的碰撞振动模式，引入符号测度和模式熵来描述这些复杂现象，发现其运动模式与花粉悬浮在液体表面的 Brown 运动具有相似性^[25]。

许多机械系统的动力学模型归结为周期时变系统，并可简化为线性周期时变系统。尽管线性周期时变系统的稳定性理论早已成熟，但真正实际问题却困难重重，其根本原因是只有极少数简单特殊的系统能求得解析的单值矩阵。在已有的几种方法中，Hill 法不便于高维的数值计算，摄动法只局限于周期系数小范围变化之系统，分段常值法破坏了系统向量场的光滑性，且其计算精度与计算量间的矛盾限制了其应用的范围。近年来，基于移动 Chebyshev 多项式拟合成为一种引人注目的有效计算方法。该法将线性周期时变系统的状态向量及其周期系数矩阵用 Chebyshev 多项式项展开继而求得近似的系统单值矩阵，进而可分析系统的稳定性或求得系统响应^[26]。这一方法已被用于直升机旋翼动力学的稳定性分析中^[27]。最近，又被推广到非线性周期时变系统的局部稳定性与分叉计算^[28]。此外，还有学者基于 Poincaré 映射理论提出了分析周期时变系统稳定性与分叉的新方法^[29,30]，提出了周期时变系统的广义频响函数法^[31]。上述各种近似方法虽各有所长，但在对高维周期时变系统的处理上仍存在着相当大困难，因而对实际具有周期运动特征的机械系统动态分析和设计仍缺乏强有力的理论指导。

2.3 动力学设计

动力学设计的任务是在机械产品的设计阶段，根据给定的动力学环境，按照功能、强度等方面的要求设计产品，使其有良好的动态特性，达到控制振动水平的目的。在研究内容上，动力学设计可分为系统固有特性设计和动响应设计。

固有特性设计主要针对线性时不变系统。从数学角度看，

这是一逆特征值问题，只有在 Jacobi 矩阵等特殊情况下可直接求解。对于实际工程问题，通常将逆特征值问题表述为优化问题，求取某种范数下的最优解。如果采用基于目标函数梯度的优化方法，还需解决特征值和特征向量灵敏度的计算问题。近年来，对特征值和特征向量灵敏度的计算方法日趋成熟，采用约束变尺度法和信赖域法求解复杂结构固有特性设计引出的优化问题取得一系列成功，解决了有多阶固有频率和振型要求的复杂结构设计问题，并应用于飞机颤振模型、体育馆风洞模型等复杂结构的设计^[32]。

动响应设计概念适用于各类机械系统，其设计目标是谋求给定激励下系统的最优动响应。对于线性时不变系统，已可导出了任意确定性激励和平稳随即激励下系统响应关于设计变量的灵敏度，可采用优化方法解决动响应设计问题^[32]。对于弹性连杆机构，引入 KED 分析中的瞬时结构假设，也可采用灵敏度分析方法对其进行动态设计^[33]。

对于快时变线性系统和非线性系统，其动力学设计应理解为系统动响应设计，这方面的研究还非常初步。以非线性系统的动力学设计为例，现有研究多基于正问题近似解对参数的依赖关系，通过奇异性理论来定性找出所需的系统参数^[34]。由于非线性系统可同时存在多种稳态运动，每种运动都有自身的吸引域，严格意义下的动响应设计变量需要包括系统初始条件，这导致了非常复杂的全局优化问题。此外，设计中还要保证所需稳态响应的稳定性裕度。

2.4 振动控制

随着计算机技术和测控技术的发展，振动主动控制技术有了长足进展，已在航空、航天、机械和土木工程领域得到了一些成功应用^[35]。近年来，振动主动控制技术最引人注目的进展是集传感器、控制器、作动器与结构为一体的智能结构^[36-39]。当前，研

研究的热点是基于压电传感器和作动器的智能结构，控制策略则来自 H_∞ 控制、自适应控制、神经网络控制、非线性控制、混合控制等控制理论的新成果。经过大量的数值模拟、优化设计和实验，这类智能结构已有许多成功的应用。大到对空间可展天线、太阳能帆板等张开时的振动进行主动控制^[40]，小到对提琴和吉它的音箱进行振动控制以改善其音响效果^[41]。

随着对振动控制要求的提高，非线性控制和时滞控制正日益引起人们的注意。例如，采用非线性策略解决绳系卫星展开过程的镇定问题^[42]，针对液压系统存在的时滞，用时滞反馈对船载吊车的摆动进行控制^[43]，采用时滞反馈控制非线性系统的混沌运动等^[44,45]。引入时滞后，控制系统的特性会发生质的变化。由此引起的系统稳定性、分叉等问题需要引起重视^[46,47]。

由于振动半主动控制技术具有能耗低、无需对原系统作大修改等优点，近年来日益得到人们关注。例如，已研制了多种电流变和磁流变可控阻尼器，针对转子轴承、车辆悬架等开发了半主动控制技术^[48-50]。此外，采用半主动控制的动力吸振器技术也有新的进展^[51]。

3. 若干重要分支的进展与问题

3.1 转子动力学

转子动力学研究具有悠久的历史，近年来的研究热点包括：轴承特性的建模、轴承的改进、转子的稳定性分析、非线性转子动力学、转子动力学的主动控制等^[52]。

对轴承动力学的研究是转子动力学研究中最活跃的一个领域，近 10 年来公开发表的论文有上万篇之多。在转子动力学的建模中，通常将滑动轴承对转子的影响看作是两个互相垂直方向的油膜力，油膜力与轴颈位移和速度之间的具有相当复杂的非线性关系。随着转子转速的提高，油膜会由层流变为湍流，油膜

惯性的影响越来越大；在高转速、大不平衡的情况下会发生油膜破裂和油膜空穴现象；实际使用中的轴承温度场是随转速和运行时间变化的，而轴承的特性受油膜温度的影响也很大。尽管已对这些情况下油膜压力的分布和油膜力特性进行了一些研究^[53,54]，但迄今为止还有许多不清楚的问题，尤其是建立尽可能符合实际情况的力学模型工作难度很大。

轴承动力特性中的一个大问题是可能造成油膜涡动等失稳现象，因此研制能有效地提供良好润滑并抑制油膜涡动的轴承一直是转子动力学的研究目标。动、静压混合轴承和金属箔轴承的出现明显地改善了轴承的动力特性^[55,56]，但还没有从根本上解决油膜涡动的问题。最近美国 Bently 公司称该公司研制的伺服流体轴承“宣布了油膜涡动的死刑”、可以极大地改善轴承的动力特性^[57]。

挤压油膜阻尼器轴承是 20 世纪 60 年代发展起来的一种技术，80 年代起受到了高度重视，应用范围越来越广。挤压油膜阻尼器轴承是将滚动轴承的外环与轴承座间的过盈配合改为适当的间隙配合，并在外环上过盈配装一个套作为挤压油膜阻尼器的内环，用销钉或鼠笼式弹性支承限制这一内环的转动，使其只能平动，从而挤压环形间隙内的滑油，形成油膜，产生阻尼减振作用。挤压油膜阻尼器尽管具有明显的减振效果，但如果设计制造不好或转子系统的不平衡恶化，油膜力的非线性会大大增加，因而导致许多有害的非线性响应，如双稳态跳跃响应等。为了克服上述不足，出现了几种改进的挤压油膜阻尼器，如多孔环挤压油膜阻尼器和变间隙挤压油膜阻尼器、变间隙挤压油膜阻尼器等。挤压油膜阻尼器轴承是一种动压轴承，与一般滑动轴承的本质区别在于这种阻尼器轴承的内环（轴颈）只做平动，没有转动。一般对挤压油膜阻尼器动态响应的分析都是采用非线性挤压油膜力，最常采用的是短轴承、 π 油膜假设下导出的非线性油膜力，其表达式非常复杂，具有强非线性。以往的研究都不考虑油

膜惯性的影响，但近年来的研究表明在高转速时油膜惯性力的影响很大，并具有提高阻尼，减小刚度的作用^[58]。

在转子系统的稳定性分析中，对轴承油膜力引起的失稳现象的研究最多，这是一个至今还有许多开放问题的研究课题。半速涡动（油膜涡动）和油膜振荡是轴承油膜力引起的两种最常见的自激振动现象。油膜涡动的频率约为转动角速度的一半且随转速增加而增加，其发生时尽管转子振幅增大不多，但会加大系统的动力负荷，造成转子疲劳；油膜振荡的频率基本上与转速无关，约为转子一阶临界，其会使振幅急剧增大并形成强烈振荡，危害性极大。由于转子系统中存在大量的非线性因素，存在多种运动共存现象，如挤压油膜阻尼器中常见的“双稳态”现象。近年来发展了一些基于非线性仿真方法的稳定性理论，如能量法、谱分析方法等。目前在非线性转子系统稳定性分析中采用的最多的是数值积分法。

随着非线性动力学理论的发展和计算能力的迅速提高，对转子系统非线性特性的研究已引起了人们的高度重视，并成为目前转子动力学研究最活跃的领域之一。在过去 20 年中，非协调响应、双稳态响应和拟周期运动是转子系统非线性动力特性的主要研究内容，尤其是在对挤压油膜阻尼器的研究中发现了大量的非线性现象，人们已经注意到在一些情况下非线性系统与其线性化系统有着本质的差别。近年来，在非线性的油膜力、非线性挤压油膜力、非线性裂纹转子、非线性碰摩、非线性刚度支承、非线性磁轴承力等的研究中发现了大量的分叉与混沌现象^[59,60]。

对转子振动和稳定性的控制的难度随着转子转速和功率的提高而不断增大。对转子振动主动控制的研究包括：控制的目标函数，控制器的设计和施加控制力的方法等^[61]，其关键如何施加控制力。目前，有两种施加控制力的方法：一种是直接将力加在转子上，另一种是通过轴承座来施加。为了实现工业应用，一个成功的主动控制作动器应具有：紧凑的结构，大的作动力，

大的调节距离（应大于转子可能的最大振幅），宽的频率范围（至少应包括要控制的最高振动频率）。目前常见的几种转子系统的振动主动控制手段有：磁轴承^[62]、压电作动器^[63]、记忆合金作动器^[64]、液压作动器^[65]、主动可倾瓦轴承^[66]、主动油膜（挤压油膜）轴承以及电/磁流变阻尼器^[67]等。这些方法各有优缺点，如磁轴承的不足在于轴承参振质量大，承载力小，需附加保护轴承等；记忆合金和液压作动器的不足是反馈速度慢等。到目前为止，只有磁轴承得到了较广泛的应用。

从学科发展角度和我国的研究现状看，下述问题值得引起注意：

(1) 轴承动力学：轴承动力特性直接关系着旋转机械的工作效率、可靠性和寿命，因此在研究中要予以高度重视。随着转子系统一方面向大功率、大直径、高转速发展，一方面向超小型、微机械化发展，对研制新的性能良好的轴承和建立尽可能符合实际的轴承动力学模型提出了更高的要求，也是今后轴承动力学研究的重点。今后挤压油膜阻尼器轴承的研究重点应考虑超高速（接近或大于转子系统三阶临界）时的动力特性、强非线性油膜力的影响、油膜空穴和油温变化及可压缩流体的影响等。

(2) 转子系统稳定性：须对造成转子失稳的因素进行更精细的建模；研究多种因素共同作用时的稳定性问题等。

(3) 非线性转子动力学：对非线性转子动力学的进一步研究的关键在于发展高维系统的非线性动力学理论，加强实验研究、建立更符合实际的转子非线性模型，应用非线性转子动力学的分析结果解决实际问题，提出对系统非线性振动实施控制的方法。

(4) 转子动力学的主动控制：转子系统振动与稳定性的主动控制技术具有广泛的应用前景，进一步的研究应考虑非线性控制问题，快速反馈控制问题。应研制频率宽、作动力大、动力学特性简单、尺寸小和控制方便的控制方法和控制器。

(5) 微重力环境下的转子动力学：在空间技术引起的微重力环境下，转子动力学的许多现有理论和成果都会受到挑战，需要进行修正。所有与重力有关的结论都需要重新研究和评价，如在微重力环境下轴承的支承和润滑作用等。研究中应特别注意不仅要略去重力影响，而且还有许多本质性的变化，如轴承中滑油的特性会因微重力而产生本质变化，其聚合作用会大大加强。

(6) 微机械中的转子动力学：微机械的问世和发展对转子动力学提出了新的挑战。如理论建模和分析方法的适用性问题，新的驱动方式和轴承润滑问题，三是转子动态特性测试问题。相当一部分微机械的应用背景是生物医学工程，在旋转式人工心脏、人体微型“清道夫”的研制和分子马达的研究中会遇到转子动力学的问题。心脏间歇式压力、血液和人体组织的影响等都会为转子动力学的研究提出新的问题。

3.2 齿轮传动系统动力学

齿轮传动系统动力学的研究主要包括两个方面的内容，一是齿轮副的动力学分析，二是由齿轮啮合的转子（轴）—轴承系统的动力学研究，即齿轮—转子—轴承系统的动力学研究。

在齿轮副的动力学研究中，一般忽略齿轮传动系统中其它因素的影响，着重分析齿轮轮齿的动力特性和齿轮系统的动力学建模，主要包括轮齿的变形和系统的啮合刚度、齿轮的摩擦特性、激励的形式等^[68]。按啮合刚度的特性分类，可将齿轮传动系统模型分为以下 4 种。a. 线性时不变模型：即在线性振动范畴内，以平均刚度代替时变的啮合刚度，而不考虑由时变啮合刚度所引起的参数激励问题，忽略多对齿轮副的相互关系与时变刚度的作用对系统的影响。b. 线性时变模型：计入齿轮传动过程中啮合齿对数和啮合位置变化引起的啮合刚度随时间周期变化，在线性时不变模型的基础上引进时变刚度的影响，导致齿轮系统的运动方程中出现参数激励。c. 非线性时不变模型：计入轮

齿间存在的间隙，但忽略啮合刚度的时变性，采用常刚度模型。

d. 非线性时变模型：这类动力学模型在考虑间隙非线性的同时，同时计及啮合刚度的时变性，把齿轮系统作为一个非线性的参数激励振动系统加以研究。在研究中，通常将非线性模型简化为单自由度或少数几个自由度，主要用来分析齿轮系统的非线性振动现象；而多自由度模型多用于系统的线性振动分析，侧重于分析齿轮系统的整体振动特性^[69,70]。总的来看，齿轮副的动力学建模已日渐成熟，研究的难点集中在如何求解非线性振动问题。

齿轮—转子—轴承系统的动力学研究始于 20 世纪 60 年代。自 80 年代起，弯扭耦合振动成为研究的重点。近年来，弯扭耦合模型得到了进一步完善，使得人们可以比较精确地计算齿轮传动系统的许多复杂动力学特性。一些应用研究也取得较大的进展，例如已将弯扭耦合振动模型应用到 DH 型压缩机组的动力学分析中，并形成了专用软件包，可以计算系统的动态特性和各种激励下的动力响应，分析系统的稳定性等^[71]。最近，在由圆锥齿轮传动的转子—轴承系统纵弯扭耦合振动分析方面也有所进展^[72,73]。80 年代后期以来，非线性动力学的进展使人们不断把新观点和新方法引入到齿轮—转子—轴承系统的动力学分析中。一些运用传统线性模型无法得到合理解释的非线性现象如幅值跳跃、分岔和混沌等，通过理论分析和数值模拟被揭示了出来^[74-76]。近年来，这方面研究的重点主要集中在系统平衡点和周期解及其稳定性，系统随参数变化发生的分岔和混沌问题。例如，在无限长轴承非线性油膜力作用和时变啮合刚度模型前提下，研究两平行轴刚性转子系统的平衡点和周期解失稳问题^[77]。

从学科发展角度和我国的研究现状看，下述问题值得引起注意：

(1) 系统建模：对齿轮—转子—轴承系统进行动力分析需要用尽可能简单而又可靠的模型，建模和模型降价是今年来人们

普遍关注的问题。建模中的难题是如何处理系统各连接部位、边界处、轴承处的刚度和阻尼，如何处理动载荷。对于这些难以进行理论建模的问题，须依靠实验建模、参数辨识、载荷辨识等求解动力学反问题的手段。

(2) 各种耦合振动问题：需针对齿轮—转子—轴承系统，综合考虑各种耦合振动问题，例如纵弯扭转振动之间的耦合、各参振部件通过联轴器连接的转子系统之间的耦合、以及机电耦合和转子系统与环境之间的各类耦合作用等。

(3) 非线性动力学分析：现有的齿轮传动系统非线性动力学分析还局限于非常简单的模型，以给出一些现象为主。今后需针对更为实际的模型，探索非线性动力学的规律。

(4) 振动与噪声控制：如何降低齿轮传动系统的振动与噪声已成为人们关心的问题。在汽车传动系统、直升机传动系统中，这一问题已成为制约产品竞争力的重要因素。我国在这方面的研究还非常薄弱。

3.3 弹性机构动力学

弹性机构是典型的多体动力学系统。随着机构部件日趋轻柔、其弹性振与刚体运动相耦合，致使数学模型成为具有时变系数、复杂非线性项的高维微分方程组或微分代数方程组，这给弹性机构的动力学分析带来很大的困难。

目前，对弹性连杆机构动力学分析的 KED 法已比较成熟。近年来，不少研究开始涉及动力稳定性、主共振、分数共振、主参数共振、内共振等非线性动力学问题^[78-87]。由于高维非线性动力学问题的难度，这些研究的对象主要是最简单的四连杆或曲柄连杆机构，对具有共性的弹性多杆或组合机构动力学研究还很少。与弹性连杆机构相比，弹性凸轮系统的动力学研究进展逊色许多。在多数研究中，将从动件简化为线性时不变系统，讨论其动力学响应及其优化问题^[88-91]。近期，一些研究开始涉及到动力稳定性、

参激振动等问题^[92,93]。由于非线性动力学理论未能足够地渗入到该领域，其研究的深度与广度仍显不足，理论成果与工程要求仍有相当距离。

近年来，已有不少关于弹性机构振动主动控制的研究^[94-96]。研究的典型问题是：引入模态控制等结构控制中的方法，采用压电陶瓷片为驱动器，对平面四连杆机构的弹性振动进行主动控制。这些研究尚在实验室阶段，到实际工程应用尚有距离。

从已有研究基础和问题的难度看，弹性机构动力学是机械动力学中颇具挑战的前沿领域。以下是一些值得注意的问题。

(1) 动力学建模与数值模拟：建立更为精确的弹性机构动力学模型，该模型不仅应正确反映出构件弹性变形对机构大范围运动的影响，而且还应正确体现出机构的大范围运动对构件弹性变形的耦合程度，同时结合大多数机构具有周期运动特征，建立起具有针对性的有效、可靠的数值计算方法，最终逐渐形成成熟的弹性机构动力学仿真软件系统。

(2) 动力学设计：在较透彻地理解弹性机构非线性动力行为及其特性后，需从特定机构出发，逐步形成弹性机构的动态设计理论，建立起一些动态设计的准则。

(3) 间隙问题：目前，对含间隙机械系统的研究多基于间隙量为定值的假设，且系统模型很简单。实际弹性机构在设计、制造过程中，各构件尺寸是以满足一定的公差范围为设计及加工要求；再者，多数弹性机构具有周期运动特征，故实际弹性机构中许多间隙往往以周期时变间隙或符合一定概率分布的随机间隙甚至二者的复合形式出现。因此，需研究含周期时变间隙或随机间隙的弹性机构的动力行为。

(4) 振动控制：如上所述，机构振动主动控制的研究大多以最简单的平面四连杆机构为对象，采用压电作动器，控制形式及效果与实际弹性机构的要求存在很大距离。因此，需针对实际弹性机构，探索更为有效的控制策略及作动器。

3.4 车辆动力学

由于人们对车辆系统的高速、安全和舒适等要求不断提高，车辆系统动力学是近年来广泛关注的研究领域。从车辆动力学分析和设计角度看，基于多体动力学的 ADAMS 平台已提供了非常方便的动力学模拟平台。因此，近年来车辆动力学的研究趋势是将车辆作为机电一体化系统，以多体动力学为建模工具，结合最优化方法和控制技术进行动力学与控制的一体化分析与设计。例如，研究车辆驾驶动力学的自适应、非线性与学习控制、车辆自动跟踪中的纵向及横向运动控制，采用主动控制来改善高速列车在大曲率弯道上行驶的动特性，对火车轮对的蛇形运动进行镇定控制等。

此外，人们愈加注重从力学机理上加强对列车轮轨间、汽车轮胎与路面间的相互作用影响。例如，从多体系统动力学角度研究列车车轮磨损引起的不平衡动载荷及轮跳振动，从非线性动力学角度研究具有干摩擦的列车轮对动力学问题。

我国在高速列车、中高档轿车的研究方面起步较晚，在今后产品研制的关键技术中有一系列值得注意的动力学问题。例如：

(1) 高速列车的动力学设计^[97]：在高性能、低自重高速列车的研制中，需要采用抗蛇形机构、抗侧滚装置、非对称悬架、主动或半主动悬架等措施提高列车的稳定性裕度和减振性能，列车的动力学模型非常复杂。为了解决运动稳定性和运行平稳性间的矛盾，需要采用多体动力学方法对高速列车进行建模、模拟、分析和优化设计。

(2) 高速受流系统动力学^[97]：为了保证高速运行的列车受电弓与接触网间良好的跟随性，需要从多柔体动力学角度进行模拟和设计，并充分计入高速气流对弓网接触的影响。

(3) 汽车动力学的综合：随着中高档轿车大量使用柔性衬套，汽车操纵动力学、行驶平顺性、振动与噪声等性能指标之间经常

出现矛盾，导致刹车不平顺等涉及多个子系统的综合性问题。因此，需要从大系统动力学角度来协调车辆各子系统的动力学设计。由此产生了许多 ADAMS 平台尚无法解决的动力学分析和综合问题。

3.5 微机电系统动力学

近年来，微机电系统（简称 MEMS: Micro Electro-Mechanical System）正走出实验室，成为 21 世纪初的新兴产业。仅从国防科技工业领域看，MEMS 技术将用于各种微型武器系统，形成具有新的竞争力的“智能军火”。西方发达国家正在积极研制用于军事目的的微型航空器、重量在 1kg 级、甚至 0.1kg 级的纳米卫星等。而它们的实现必须借助各种微发动机、微惯导仪器、微传感器、微执行机构。

与传统机械和结构相比，MEMS 的研制过程更具有设计与制造一体化的特征。目前，对 MEMS 的设计多还在器件水平。除了少数二维器件的设计外，多数设计借助于 ANSYS 等商品化软件进行试凑；除了一些微加速度计的设计外，多数设计尚属于结构静强度或机构运动学范畴。可以预见，随着 MEMS 的实用化，其动力学问题将日益引起人们的关注。例如，微发动机中的运动部件、微惯导仪器必须从动力学角度去进行分析和设计。这方面的研究尚处于起步阶段，以下是若干值得注意的问题。

(1) 多学科耦合的大规模动力学模拟^[98-100]：许多 MEMS 包括了固体、流体、热传导、电磁、静电等相互作用。例如，在微米尺度的流速计中，集成了限流元件、压力传感器、放大电路等。对其进行动力学模拟需要使用含计算流体力学模块的 ANSYS 有限元软件包 FOLTRAN 和电网络模拟软件 HSPICE，联合解决多学科耦合的 MEMS 仿真与设计。仅从流体力学看，又可能包括自由表面和表面张力、非牛顿粘性流、非均匀多相流、悬浮流体、表面吸收和催化作用、混合、多介质传导、热传导和辐射等。因此，需要有

适应各种学科和各种方程的网格生成技术及动力学求解器。由于对 MEMS 精细建模的需要，上述多学科耦合的数值模拟规模非常大。目前，在 MEMS 的动力学研究中，处理 10000 个自由度的线性问题已属常规，但更大规模的多学科耦合数值模拟还有许多困难。

(2) 尺度效应分析^[101]：目前，对 MEMS 器件的尺度效应研究主要针对强度、摩擦与润滑等问题，很少针对动力学问题。已有实验证明，对于基于共振或滤波原理的微传感器，其工作频率范围达 kHz 或 GHz，会产生由于尺度引起的稳定性问题。随着尺度缩小，对于宏观器件可忽略的失稳变得突出。当器件尺度很小时，温度、驱动功率、Brown 运动、Johnson 噪声、光子、电子、吸收分子的波动等都影响噪声特性，有可能限制超微微传感器的应用。这些都是 MEMS 发展中需要认真解决的动力学问题。

(3) 非线性动力学分析：MEMS 中的非线性主要源于微机构、微驱动器（如静电机），例如柔性铰产生的几何大变形、摩擦等。目前，对非线性问题的研究主要采用 ANSYS 软件进行非线性有限元建模和瞬态响应数值模拟。几乎未从非线性动力学的高度来研究非线性振动、动力稳定性等问题。随着微机构和微驱动器实用化，转速高达十万转的微马达将投入使用，高速旋转机械和机构的动力学问题必将引起关注。

(4) 纳米机械的动力学模拟^[102-104]：当 MEMS 中器件的尺度小到纳米量级时，基于连续介质力学理论的建模方法将失效。目前，对纳米机械的设计尚处于探索阶段，例如采用分子动力学模拟方法研究纳米齿轮的可行性。该方法引入了许多假设，从而有一系列局限性，如不能计入量子效应，计算规模还只能到上万个粒子，难以对具有支链和环状结构的柔性分子的进行模拟等。因此，有必要研究介于量子力学和连续介质力学之间的动力学，使之能用于纳米器件的模拟。

3.6 机械故障诊断

机械设备故障的研究内容包括故障机理、诊断理论及方法、实用诊断系统三个方面。其中，诊断理论及方法是故障诊断技术的核心和基础，也是近年来研究最多、发展最快的一个方面。它决定了诊断结果的有效性、精确性和可靠性。基于实测机械振动信号的诊断方法在诊断理论和方法中占有非常重要的地位^[105,106]。

诊断理论和方法的核心是故障特征提取，即借助信号处理技术对原始测量数据进行加工提取信息凝聚和融合等处理，获得最能代表信号特征的信息参数。当前常用于进行特征提取的方法包括：传统的谱分析技术、小波变换^[107,108]、时频分布^[109-113]、高阶统计量分析^[114-120]、分形及分维数理论^[121-123]等，正在兴起的方法有：适用于旋转机械的循环平稳信号分析方法^[124-126]，能够从大量数据中发掘出隐含特征信息的数据挖掘技术^[1287-129]。

就结构体系而言，机械设备状态监测与故障诊断系统经历了三个发展层次，即集中式、集散式和分布式。分布式结构具有资源分散、结构模块化、工作并行性、协作自治性等优点，是 20 世纪 90 年代中后期以来发展最快、应用最为广泛和成功的系统结构。基于 Internet/Intranet 的远程故障诊断是则近几年迅速发展起来的新技术^[130,131]，是设备诊断技术与通信技术、网络技术、计算机技术以及控制技术相结合的产物。

根据当前计算机技术、信息技术以及现代信号处理技术迅速发展的形势，机械故障诊断的发展应当重点注意以下几个方面。

(1) 特征提取方法：重点研究基于高阶统计量分析、小波变换、神经网络以及数据融合等方法的特征提取技术，并与数据挖掘技术相结合，发展实用、有效的特征提取方法。

(2) 有针对性的故障诊断方法：轴承、齿轮和转子等是设备中极为重要但又容易发生故障的机械设备零部件，但现有研究远未能彻底解决问题。以转子系统为例，其主要故障就有：不平衡、初始弯曲、刚度非对称、非对中、油膜涡动和油膜振荡、旋转失速

和喘振、摩擦与松动、转子裂纹、密封失稳、滚动轴承故障等。往往多种故障具有相同征兆，多种原因可能造成同一故障。因此，需根据各种零部件和系统的工作模式和特性，深入开展有针对性的故障诊断方法研究，尤其是早期故障诊断方法研究。

(3) 专家系统：今后的研究重点应当是实用诊断规则总结和推理机制或推理方法。例如：针对不确定的、不精确的、不完备的、甚至有时是不一致的和时变的知识，可以发展基于证据组合理论的推理方法。

(4) 远程诊断系统：远程诊断系统是近年来随着 Internet 和信息技术的高速发展而正在不断走向成熟的故障诊断应用技术，它是对传统故障诊断理论和技术的种革新。远程诊断系统通常是一个复杂而庞大的系统，一般包括远程诊断专家会诊，信息服务、在线监测以及远程教育和学习等几个部分。尽管目前国内已有一些高校在 Internet 开通了试验性或宣传性远程故障诊断网站，但离实际使用尚没有相当一段距离。今后的发展趋势应当是建立统一的开放式体系结构、制订远程诊断规程、传输协议以及信息交换格式和标准等。

鸣谢：上海交通大学孟光教授、陈进教授、作者的助手冯志华副教授、李明副教授等为本文提供了部分素材，在此一并致谢。

参考文献

1. 胡海岩. 先进机械系统的若干动力学与控制问题. 面向 21 世纪的中国振动工程研究. 北京: 航空工业出版社, 1999, 1-9.
2. Blajer W. An improved formulation for multi-body systems with possible singularities and redundancy. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 9.
3. McPhee J, Scherrer M, Shi P F. A unified modeling approach for electro-mechanical multi-body systems. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 119.

4. 于清, 洪嘉振. 柔性多体系统动力学的若干热点问题. 力学进展, 1999, **29**(2): 145-154.
5. 刘才山, 陈滨. 多柔体系统碰撞动力学研究综述. 力学进展, 2000, **30**(1): 7-14.
6. Eberhard P. Transitions in mixed multi-body systems / finite element contact simulation. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 10.
7. 邹经湘, 于开平, 杨炳渊. 时变结构的参数识别方法. 力学进展, 2000, **30**(3): 370-377.
8. 梁艳春. 计算智能与力学反问题中的若干问题. 力学进展, 2000, **30**(3): 321-331.
9. Masri S F. Robust neural estimation of internal forces in nonlinear structures under random excitation. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 138.
10. Gega G, Alaggio R, Benedettini F. Dimensionality and reduced-order models for complex dynamics from experimental observations. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 144.
11. 胡海岩. 线性受控系统的反馈时滞可辨识性. 振动工程学报, 2001, **14**(2): 161-165.
12. 张文丰, 胡海岩. 含反馈时滞的非线性动力系统参数辨识. 振动工程学报, 2001, **14**(3): 印刷中
13. 潘振宽, 洪嘉振等. 多体系统动力学微分/代数方程组数值方法. 力学进展, 1996, **26**(1): 28-40.
14. 王琪, 陆启韶. 多体系统 Lagrange 方程数值算法的研究进展. 力学进展, 2001, **31**(1): 9-17.
15. 胡海岩. 应用非线性动力学. 北京: 航空工业出版社, 2000.
16. Marzocca P, Librescu L, Silva W A. Nonlinear stability and response of lifting surface via Volterra series. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 109.
17. 金栋平, 胡海岩. 碰撞振动及其典现象. 力学进展, 1999, **29**(2): 155-164.
18. 谢建华, 罗冠炜. 碰撞振动系统的分叉与混沌研究. 面向 21 世纪的中国振动工程研究. 北京: 航空工业出版社, 1999, 52-58.
19. Vakakis A F, Rozhkov I. Energy pumping phenomena in nonlinear coupled oscillators. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 138.
20. Hu H Y, Jin D P. Nonlinear Dynamics of a traveling cable subject to

- transverse fluid flow, *Journal of Sound and Vibration*, 2001, **239**(3): 515-529.
21. Han Q, Hu H Y, Yang G T. A study of chaotic motion in elastic cylindrical shells, *European Journal of Mechanics A*, 1999, **18**(2): 351-360.
 22. Wedig W V. Strong stability conditions in elastic structures under stochastic parametric loading. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 109.
 23. Heijden G. The static deformation of a twisted elastic rod constrained to lie on a cylinder. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 145.
 24. Netto Th, Kyriakides S. Dynamic propagation and flip-flopping of buckles in pipelines. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 108.
 25. Moon F C, Kuroda M. Complexity measures in large arrays of fluid-elastic oscillators. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 145.
 26. Sinha S C, Wu D H. An efficient computational scheme for the analysis of periodic systems. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, **151**(1): 91-117.
 27. Wu D H, Sinha S C. A new approach in the analysis of linear systems with periodic coefficients for applications in rotorcraft dynamics. *Aeronautical Journal*, 1994, **27**(1): 9-15
 28. Butcher E A, Sinha S C. Symbolic computation of local stability and bifurcation surfaces for nonlinear time-periodic systems. *Nonlinear Dynamics*, 1998, **17**(1): 1-21
 29. Sinha S C, Butcher E A, David A. Construction of dynamically equivalent time-invariant forms for time-periodic systems. *Nonlinear Dynamics*, 1998, **16**(2): 203-221
 30. Guttalu R S, Flashner H. Stability analysis of periodic systems by truncated point mappings. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, **189**(1): 33-54.
 31. Belmont M R. Generalized frequency response functions for systems with time-varying coefficients. *Proc Instn Mech Engrs*, 1994, **208**: 145-153.
 32. 周传荣. 结构动态设计. 振动、测试与诊断, 2001, **21**(1): 1-8.
 33. 于德介. 弹性连杆机构灵敏度分析方法与应用. 面向 21 世纪的中国振动工程研究. 北京: 航空工业出版社, 1999, 39-44.
 34. 王福新, 胡海岩. 含弹性与阻尼约束的隔振系统动力学设计, 振动工程

- 学报, 1997, **10**(4): 395-403.
35. 顾仲权, 马扣根, 陈卫东. 振动主动控制, 北京: 国防工业出版社, 1997.
 36. 陶宝祺. 智能材料结构. 北京: 国防工业出版社, 1997.
 37. 李俊宝, 张景绘, 任勇生, 张令弥. 振动工程中智能结构的研究进展. 力学进展, 1999, **29**(2): 165-177.
 38. 任勇生, 王世文, 李俊宝, 沈亚鹏. 形状记忆合金在结构主被动振动控制中的应用. 力学进展, 1999, **29**(1): 19-33.
 39. 李山青, 刘正兴, 杨耀文. 压电材料在智能结构形状和振动控制中的应用. 力学进展, 1999, **29**(1): 66-76.
 40. 刘明治, 刘春霞. 柔性机械臂动力学建模和控制研究. 力学进展, 2001, **31**(1): 1-8.
 41. Hanagud S, Griffin S, Noyer M B. Active structural control for smart violins and guitars. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 214.
 42. Steiner W, Steindl A, Troger H. Center manifold approach to the control of a tethered satellite system. Applied Mathematics and Computation, 1995, **70**(3): 315-327.
 43. Nayfeh A H, Masoud Z N, Mook D T. Control of cargo pendulation for ship-mounted cranes. 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 229-230.
 44. 胡海岩. 力学系统混沌的主动控制. 力学进展, 1996, **26**(4): 453-463.
 45. 刘向东, 黄文虎. 混沌系统延迟反馈控制的理论与实验研究. 力学进展, 2001, **31**(1): 18-32.
 46. 胡海岩, 王在华. 具有时滞的受控机械系统动力学进展. 自然科学进展, 2000, **10**(7): 577-585.
 47. Hu H Y, Wu Z Q. Stability and Hopf Bifurcation of a Four-Wheel-Steering Vehicle Involving Driver's Delay. Nonlinear Dynamics, 2000, **22**(4): 361-374.
 48. 孟光, 姚国治, 鲁宏权. 电流变技术用于振动控制的实验研究. 面向 21 世纪的中国振动工程研究. 北京: 航空工业出版社, 1999, 16-24.
 49. 翁建生. 基于磁流变阻尼器的车辆悬架系统半主动控制. 南京航空航天大学博士学位论文, 2001.
 50. 郭大蕾. 车辆悬架振动的神经网络半主动控制. 南京航空航天大学博士学位论文, 2001.
 51. 钱小勇, 胡海岩. 可调间隙的半主动吸振器及其实现. 振动工程学报, 2001, **14**(4): 印刷中.

52. 闻邦椿等. 高等转子动力学—理论、技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2000.
53. Santos I F, Nicoletti R. Influence of orifice distribution on the thermal and static properties of hybridly lubricated bearings. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, **38**(1): 10-13.
54. Knight J, Ghadimi P. Analysis and observation of cavities in a journal bearing considering flow continuity. *Tribology Transactions*, 2001, **44**(1): 88-96.
55. Fayolle P, Childs D W. Rotordynamic evaluation of a roughened-land hybrid bearing. *Journal of Tribology, Transactions of ASME*, 1999, **121**(1): 133-138.
56. Renshaw A A. Vibration considerations in foil-bearing design. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME*, 1999, **66**(2): 432-438.
57. www.Bently.com
58. Meng G, Guo Y C, Hahn E J. The influence of fluid inertia forces on the sudden unbalance responses of squeeze film damper supported rotors. *Journal of Engineering Tribology*, 1998, **212**(5): 353-357.
59. 黄文虎等. 非线性转子动力学研究综述. *振动工程学报*, 2000, **13**(4): 497-509.
60. Zheng J B, Meng G. Bifurcation and chaos response of nonlinear crack rotors. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1998, **8**(3): 597-607.
61. Ulbrich, H. Active vibration control of rotors, *Proceedings of 5th International Conference on Rotor Dynamics, IFToMM, Germany*, 1998, 16-31.
62. 刘迎澍, 黄天. 磁悬浮轴承研究综述. *机械工程学报*, 2000, **36**(11): 5-9.
63. Palazzolo A B. Piezoelectric pushers for active vibration control of rotating machinery. *Transactions of ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, Reliability in Design*, 1989, **111**(2): 298-305.
64. Straub F K, Merkley D J. Design of a smart material actuator for rotor control. *Smart Materials and Structures*, 1997, **6**(3): 223-234.
65. Bormann J, Ulbrich H. Isolation of vibration to avoid dynamic interactions between a telescope and its foundation by active control, *Proceedings of 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan*, 1996.
66. Santos I F. Design and evaluation of two types of active tilting pad journal

- bearings. IUTAM Symposium on the Active Control of Vibration, England, 1994.
67. Yao G Z, Meng G. The vibration control of a rotor system by disk type electro-rheological damper. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, **219**(1): 175-188.
 68. 李润方, 王建军. 齿轮系统动力学. 北京: 科学出版社, 1996.
 69. 杨宏斌, 邓效忠, 高建平, 方宗德. 齿轮非线性振动研究综述. *中国机械工程*, 1999, **10**(7): 807~809.
 70. 孙涛. 行星齿轮系统非线性动力学研究, 西北工业大学博士学位论文, 2000.
 71. 夏伯乾. 齿轮耦合多平行转子—轴承系统动力学及其应用研究, 西安交通大学博士学位论文, 1998.
 72. Choi S H, Glienicke J, Han D C, et al. Dynamic gear loads due to coupled lateral, torsional and axial vibrations in a helical geared system. *Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, 1999, **121**(2): 141~148.
 73. Li M, Yu L, Jiang P L, et al. Modeling analysis of the coupled axial-lateral-torsional vibration of the rotor system geared by bevel gears. *Proceedings of the First International Conference on Mechanical Engineering*, China Machine Press, 2000.
 74. Kahraman A. Non-linear dynamics of a spur geared rotor-bearing system with multiple clearances. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, **144**(3): 469~506.
 75. Kahraman A. Interactions between time-varying mesh stiffness and clearance non-linearities in a geared system. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, **146**(1): 135~156.
 76. Ozguven H N. A nonlinear mathematical model for dynamic analysis of spur gears including shaft and bearing dynamics. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, **145**(2): 236~260.
 77. 李立, 郑铁生, 许庆余. 齿轮-转子-滑动轴承系统时变非线性动力特性研究. *应用力学学报*, 1995, **12**(1): 15~24.
 78. Hsieh S R, Shaw S W. The dynamic stability and non-linear resonance of a flexible connecting rod: single-mode model. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, **170**(1): 25-49.
 79. Beale D, Lee W S. Nonlinear equation instability boundaries in flexible mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, **31**(2): 215-227.
 80. Turhan O. Dynamic stability of four-bar and slider-crank mechanism with

- viscoelastic (Kelvin-Voight model) coupler. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, **31**(1): 77-89.
81. Yang K H, Park Y S. Dynamic stability analysis of a closed-loop flexible link mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, **31**(5): 545-560.
 82. Yang K H, Park Y S. Dynamic stability analysis of a four-bar mechanism and its experimental investigation. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, **33**(3): 307-320.
 83. 张策, 陈树勋. 论弹性连杆机构的低阶谐振现象. *机械工程学报*, 1986, **22**(1): 81-92.
 84. 王玉新. 弹性连杆机构主共振. *振动工程学报*, 1996, **9**(2): 116-127.
 85. 王玉新, 储景云, 张策. 弹性连杆机构的分数共振. *天津大学学报 (英文版)*, 1995, **1**(1): 48-53.
 86. 王玉新. 弹性连杆机构低阶谐振响应不完全同步机理研究. *机械工程学报*, 1996, **32**(4): 11-16.
 87. 张宪民, 刘济科, 沈允文. 弹性连杆机构的非线性动力学特性分析. *应用力学学报*, 1996, **13**(2): 37-43.
 88. Liu H T J. Synthesis and steady-state analysis of high-speed elastic cam-actuated linkages with fluctuated speeds by a finite element method. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1997, **119**(3): 395-402.
 89. Yilmaz Y, Kocabas H. The vibration of disc cam mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 1995, **30**(5): 695-703.
 90. Dresne T L, Barkan P. New method for the dynamic analysis of flexible single-input and multi-input cam-follower systems. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1995, **117**: 150-117.
 91. 冯志华, 胡海岩. 几何约束与动力约束结合的平面凸轮机构基本尺寸优化. *振动工程学报*, 2001, **14**(2): 145-149.
 92. Mahyuddin A I, Midha A, Bajaj A K. Evaluation of parametric vibration and stability of flexible cam-follower systems. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1994, **116**(2): 291-297.
 93. 冯志华, 兰向军. 弹性凸轮系统参激振动稳定性分析. *机械工程学报*, 2001, **37**(3): 93-96.
 94. 张宪民, 刘宏昭, 曹惟庆. 柔性机构弹性振动的主动控制. *机械工程学报*, 1996, **32**(1): 9-16.
 95. Cuccio A, Garziera R. Vibration control input-laws in point to point motion: theory and experiments. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, **33**(4): 341-349.

96. Chen C I. Active control of elastodynamic vibrations of a flexible mechanism with piezoelectric actuator. Proceedings of DETC'99, 1999, DETC99/VIB-8019.
97. 沈志云. 关于高速铁路及高速列车的研究. 振动、测试与诊断, 1998, **18** (1): 1-7.
98. Fan Shi, Ramesh P, Mukherjee S. Dynamic analysis of micro-electro-mechanical systems. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, **39**(24): 4119-4139.
99. Kotera H, et al. Dynamic simulation method of MEMS coupling electrostatic field, fluid dynamics and membrane deflection. Proceedings of MICRO SYSTEM Technologies 98, Berlin: VDE Verlag, 1998.
100. Krassow H, Zabala M, Gotz A, Cane C. MEMS design optimization using coupled FEM and electrical circuit simulation. Proceedings of Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators, Cambridge: Computational Publications, 1998.
101. Vig J R, Yoonkee Kim. Noise in microelectromechanical system resonators. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1999, **46**(6): 1558-1565.
102. Yao N, Lordi V. Carbon nanotube caps as springs: Molecular dynamics simulations. Physical Review B, 1998, **58**(19): 12649-12651.
103. Jie Han, Globus A, Jaffe R, Deardorff G. Molecular dynamics simulations of carbon nanotube-based gears. Nanotechnology, 1997, **8**(3): 95-102.
104. Srivastava D. A phenomenological model of the rotation dynamics of carbon nanotube gears with laser electric fields. Nanotechnology, 1997, **8** (4): 186-192.
105. 陈进. 机械设备振动监测与故障诊断. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
106. 徐敏等. 设备故障诊断手册 机械设备状态监测和故障诊断. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
107. 何振嘉. 我国小波技术的应用现状与进展. 振动工程学报, 2000, **13**(S): 16-22.
108. Lin J., Feature extraction of machine sound using wavelet and its application in fault diagnosis. NDT & E International, 2001, **34**(1): 25-30.
109. Wang W J, McFadden P D. Early detection of gear fault by vibration analysis - I. Calculation of the time-frequency distribution. Mechanical System and Signal Processing, 1993, **5**(2): 192-203.
110. Wang W J, McFadden P D. Early detection of gear fault by vibration

- analysis - I. Interpretation of the time-frequency distribution using image processing techniques. *Mechanical System and Signal Processing*, 1993, **5** (2): 205-215.
111. Staszewski W J, Worden K, Tomlinson G P. Time-frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, **11**(5): 673-692.
112. Loughlin P J, Bernard G D. Cohen-Posch (Positive) time-frequency distributions and their application to machine vibration analysis. *Mechanical System and Signal Processing*, 1997, **11**(4): 561-576.
113. Bonato P, et al. Bilinear time-frequency transformations in the analysis of damaged structures. *Mechanical System and Signal Processing*, 1997, **11** (4): 509-527.
114. Lee S K. Fault diagnosis of a gearbox using the sliced Wigner fourth order time frequency method smoothed by a new kernel function. *KSME International Journal*, 1999, **13**(12): 940-947.
115. Barker R W, Klute G A, Hinich M J. Monitoring rotating tool wear using high order spectral features. *Transactions of the ASME, Journal Engineering for Industry*, 1993, **115**(1): 23-29.
116. Fackrell J W A, White P R, Hammond J K. The interpretation of the bispectra of vibration signals - I. Theory. *Mechanical System and Signal Processing*, 1995, **9**(3): 257-266.
117. Fackrell J W A, White P R, Hammond J K. The interpretation of the bispectra of vibration signals - II. Experimental results and applications. *Mechanical System and Signal Processing*, 1995, **9**(3): 267-274.
118. Honarvar F, Martin H R. New statistical moments for diagnosis of rolling element bearings. *Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, **119**(3): 425-432.
119. Collis W B, White P R, Hammond J K. Higher-order spectra: the bispectrum and trispectrum. *Mechanical System and Signal Processing*, 1998, **12**(3): 375-394.
120. Rivola A, White P R. Bispectral analysis of the bilinear oscillator with application to the detection of fatigue cracks. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, **216**(5): 889-910.
121. Logan D, Mathew J. Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearing - I. Basic concepts. *Mechanical*

- system and signal processing, 1996, **10**(3): 241-250.
122. Logan D, Mathew J. Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearing - II. Selection of experimental parameters. Mechanical system and signal processing, 1996, **10**(3): 251-264.
 123. Jiang J D, Chen J, Qu L S. The application of correlation dimension in gearbox condition monitoring. Journal of Sound and Vibration, 1999, **223** (4): 529-542.
 124. McComick A C, Nandi A K. Cyclostationarity in rotating machine vibrations. Mechanical System and Signal Processing, 1998, **12**(2): 225-242.
 125. 秦恺, 陈进. 一种滚动轴承故障特征提取的新方法—谱相关密度. 振动与冲击, 2001, **20**(1): 34-37.
 126. Jiang M, Chen J, Qin K, Wang W J. Cyclostationary signal analysis based fault diagnosis fethod for rotating machinery, Proceedings of 5th International Conference on motion and vibration control' 2000, 2000, Sydney, 433-438.
 127. Agrawal R, Imelinski T, Swami A. Mining association rules between sets of items in large database. Proceedings of the ACM SIGMOD Conference on Management of Data, 1993, Washington D.C., 207-216.
 128. Wang X Z, Chen B H, McGreavy C. Data mining for failure diagnosis of process units by learning probabilistic networks. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Part B, 1997, **11**(4): 78-84.
 129. 杨文献, 任兴民, 秦卫阳, 姜节胜. 基于数据挖掘的复杂设备故障诊断方法研究. 振动工程学报, 2000, **13**(S): 48-51.
 130. Jousselein A, Ricard B, Morel J. An integrated architecture for intelligent monitoring and diagnosis of EDF power plants. International Journal of Engineering Intelligent systems for Electrical Engineering and Communications, 1995, **31**(1): 25-31.
 131. 汪慰军, 陈进, 秦恺. 远程设备故障诊断系统的一种实现方法. 第七届全国振动理论及其应用学术会议论文集, 上海: 同济大学出版社, 1999, CVTA'99-1420129.

作者: 胡海岩, 南京航空航天大学结构工程与力学系。