

的时间尺度是不以“千年”为单位来考虑,将是不可思议的。

岩体的稳定性在千年或几千年之内会发生什么样变化,是需要认真研究的,如:千年之内的地震问题,千年一遇的水文问题,千年的地应力释放问题,千年的岩体风化问题,千年的岩体强度的时间效应问题。对上述问题进行综合研究,最后应对岩体稳定性的变化趋势做出预测,这对大型工程的安全和经济都是非常重要的。

还有的工程,规模虽大,而工程寿命不长。如有的大型露天矿开采工程,30—40年开坑,多者100余年,在这段工程时间尺度内,边坡发生变形,甚至出现大变形,只要不发生滑动破坏,不影响采矿生产,就可认为边坡是稳定的。但要加强变形观测,加强监视。当然,这要在深入研究时间尺度之后,才能得出科学结论。

以上提出的四个问题,不是工程地质工作者独立能解决的,需要多学科的联合,特别是与岩石力学和工程力学工作者的联合,还要特别重视实验技术开拓和创造,先进的技术手段是解决这些问题的最好钥匙。

PROBLEM OF ENGINEERING GEOMECHANICS IN BIG ENGINEERING

Sun Yuke

(South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China)

转子动力学中的若干近代力学问题

张 文

(复旦大学应用力学系,上海 200433)

由于动力、能源和航空工程等的需要,近30多年来转子动力学有了很大的发展。当前,国内外对转子动力学的研究热点有以下几方面

1 大型复杂转子系统的力学建模和分析手段

1.1 **大型复杂柔性转子系统** 近代旋转机械一个重要特征是高转速和轻结构,轻柔部件在强离心力作用下会发生强烈的弹性变形,因此不能再像低转速时那样把许多部件简化为刚体,而必须作为弹性体处理,从而构成复杂柔性转子系统。航空发动机叶片-盘-轴整体群全弹性转子模型就是一个典型实例。此时若采用有限元模型,面对的将是几万、几十万个自由度的系统,为计算机容量所不容。因此,必须为大型复杂柔性转子系统寻求新的建模手段。我国航空发动机总公司已把该课题列为“八五”重点攻关项目。

1.2 **柔性转子系统-柔性基础系统** 要使超临界转子运行安全、可靠,需采用柔性支承和柔性基础。用加固基础抑制振幅的传统观念已陈旧且会导致适得其反的结果,这是近代旋转机械设计思想的一个飞跃。但却大大增加了动力分析的难度,因为此时面对的是转子系统和不

转动的支承——基础系统耦合的整体系统,整个模型比原转子系统更复杂。近代大型汽轮发电机组的转子-油膜-支承-基础大系统模型和航空发动机的转子-支承-机匣系统即为两个实例。

1.3 非同步旋转机械 现在出现了许多自身结构相当复杂的非同步旋转机械,如双转子和三转子航空发动机,化工行业中的进动式旋转机械,航天器中带弹性内外环的陀螺仪,纺织机械中的高速纱锭等。在这些旋转机械中有多个旋转体,各有各的旋转角速度。对这类旋转机械,连临界转速概念都需重新定义。

1.4 联结件的建模 复杂结构系统的正确建模还有赖于各部件之间联结件的合理建模,它甚至是建模的关键。由于联结件的力学特性往往有许多难以处理的非线性因素,如接头摩擦、接触等,建模相当困难。目前的手段主要是线性模型的参数识别。今后的工作是发展非线性模型的参数识别,争取不通过识别来建模。最近,国外提出了“界面动力学”的新方向。

面对大型、超大型复杂旋转系统的动力分析,目前已有的新的建模方法包括:(1)动态子结构法;(2)周期结构的群论算法;(3)子结构联结件力学模型的参数识别技术等。

2 非线性大变形分析

高转速轻柔部件在强离心力场下必引起大变形。为了正确计算离心力的刚度效应,如高速旋转下盘/片组件的耦合振动,对叶片和盘都必须考虑柔体的大变形,引入几何非线性。高速柔体系统动力学本质上是非线性动力学。

有些高速自旋体,如直升机旋翼,除自旋自由度外,还伴有其他大的刚体运动自由度,引起刚体运动和弹性位移之间的非线性惯性耦合。

3 陀螺弹性体动力学,陀螺特征值问题

高转速带来的另一重要效应就是陀螺力。凡带有自旋部件的柔体系统的扰动运动,如变形陀螺和高速柔性转子系统,文献上统称为“陀螺系统”。如自旋平板(磁盘、止推轴承面等),空间机械臂,自旋稳定航天器太阳帆板、天线和太空望远镜,直升机桨叶和透平叶片,都属陀螺系统。充液柔性管道的动力分析,力学上也属陀螺系统。因此,陀螺弹性系统动力学是一个有很大理论和应用价值的新方向,它覆盖了转子动力学部分理论内容。

4 油膜失稳新机理探索和非线性分析

油膜失稳是地面旋转机械中的老大难问题,特别是对大型汽轮发电机组,至今国内外仍未解决好。我国国产 20 万千瓦和 30 万千瓦汽轮发电机组多次发生油膜振荡灾难性事故。1989 年有关部门对投运的 37 台国产 20 万千瓦机组作了普查,27% 机组存在低频涡动,潜伏着事故内因。因此,油膜失稳分析是我国电站工程的一项艰巨任务。

过去,油膜失稳的理论分析研究一直采用小扰动假设,用 Reynolds 润滑方程描述,而实际转子常可越过计算出的“失稳”转速仍保持正常运转并以有界的极限环作涡动,其轴颈的静偏心量和扰动运动幅度是同量级的,并不是小扰动。经验表明:静态大偏心可以抑制油膜失稳,显然,这是强非线性的表现。此外,油膜层内出现的空穴、倒流都不能用 Reynolds 方程描写,而应直接用 Navier-Stokes 方程求解。极限环后的失稳也应采用 Hopf 分叉理论处理,这都是非线性手段。建议我国加强开发这一应用基础理论研究,找到简洁有效的非线性分析手段。

5 其他非线性流-固耦合问题

5.1 密封失稳、叶尖气隙失稳(Alford 力) 近代转子动力学中与油膜失稳类似的其他流-固耦合问题是密封失稳、叶尖气隙失稳等,也严重地影响着高速旋转机械的正常运行,引起

人们的关注。其失稳机理也很复杂,定性讲主要是流动介质对偏心转轴产生一个切向力所致。这类力在力学上统称为“循环力”。要实现定量分析,首先得找到介质反馈力与轴的扰动运动的定量关系。这项工作外国还刚开始,美国的 MIT 的 Gas Turbine Laboratory 有一个组在专门从事叶尖汽隙力的研究。MIT 的研究选题的明显特点是超前研究。

5.2 充液转子 另一个非线性流-固耦合问题是内充液转子,特别是有自由面的部分充液,这是典型的自激振荡。问题的工程背景是离心分离机械,水冷旋转机械和自旋稳定卫星等。前面提到的介质(包括油膜)都是外绕着转轴,由转轴外壁带动它们运动。而充液转子中的液体在转子的空腔内,其运动由柔性转筒的内壁带动。该流-固耦合问题是转子动力学中的新内容。

6 主模态局部化现象分析,失调盘/片

工程上有许多结构呈周期对称型,如盘/片组件。近年来,人们发现一个新的力学现象:对具有弱内耦合的原对称结构,由于制造或材料公差引起对称性微小变化,会使整个结构的动态性能发生突变,原来的整体激励振动被演变成只有个别叶片的强烈振动。由于能量被限制在个别叶片上无法外传,引起该叶片的严重疲劳损伤,在工程上十分有害。

这一现象的研究可追溯到 50 年代,Anderson 和 Mott 发现,固体晶格出现缺陷时,薛定谔电子波动方程的特征模态会出现局部化现象,固体竟由导体变成半导体。这一创造性发现与应用使他们荣获 1977 年诺贝尔物理奖。Hodges 把这一理论用到周期结构上,对失调结构的振动局部化现象做出了正确解释。可见,基础理论研究存在共性。工程上,目前人们正在采用矩阵摄动法来作失调结构模态局部化分析。但是重特征值的灵敏度分析还存在许多理论难点,这是当前振动控制的新研究内容之一。

7 内耗失稳,粘弹性转子动力学

和结构振动不同,在转子动力学中材料内阻尼扮演着十分重要的角色。早已证明,一定的材料内耗会引起转子失稳。定向自旋航天器最终是否失稳也主要取决于它的内耗水平。

高转速使变形转轴内的应力和应变发生强烈的高频交变,于是材料内阻特性开始显露。应力-应变关系呈现滞迟回线特征而不再是胡克直线过程。新的高分子材料的使用(如高速纱锭中的塑料锭轴,固定旋转部件用的高强度粘结剂等),使转子系统内的粘弹性效应更加明显,达到一定程度的内阻尼会引发转子的蠕变失稳,就象甩湿面条一样。

基于转子稳定性对内耗的敏感性,现在已发展出粘弹性转子动力学这一分支,主要是采用粘弹物质本构关系(积分型或微分型),讨论高速旋转体的动力行为。

8 其它非线性问题

除上述外,还有裂纹转子-参数共振,裂纹的在线监测与诊断及转子的干摩擦失稳等问题。

SOME PROBLEMES OF MODERN MECHANICS IN ROTOR DYNAMICS

Zhang Wen

(Fudan University, Shanghai 200433, China)