

“机械结构强度和振动”研究的进展

杜庆华 王勛成

(清华大学工程力学系)

[摘要] “机械结构强度和振动”作为应用基础性质的研究,具有两方面的特点:一是和现代力学,材料科学、计算科学、实验科学及其他新技术的研究相结合,为解决现代机械结构强度和振动的关键问题提供新的理论依据、分析和测试方法及监控技术;二是将上述成果转化为工业应用的软件和技术,并在应用中进一步丰富和发展理论成果。国家自然科学基金委员会在“七五”期间设立了“机械结构和振动”重大项目。项目下设11个课题。经过四年(1987—1990)的努力,在1990年底已完成研究计划的要求,达到预期的目标,今年6月通过了基金会组织的专家验收。本文简要介绍该项目四年来取得的主要进展。

一、“机械结构强度和振动”研究的意义

机械结构强度和振动学科的任务是研究机械结构在各种形式载荷和环境条件下的静动力特性、变形、应力和由之可能产生的各种失效形成的机制和规律,以及相应的设计理论和方法,从而保证机械设备安全、可靠、高效地实现其功能要求,并尽量减少材料消耗、延长使用寿命。

现代机械设备发展的趋势是:结构的大型化、轻型化,运行的高速化、连续化、自动化,载荷更加复杂(循环、冲击、随机性),环境更加苛刻(高温、高压、腐蚀介质,辐照等)这一切都对机械结构强度和振动学科提出了一系列新的尖锐而重要的课题。

另一方面,现代力学、材料科学、计算机科学、自动量测和控制科学的发展,给机械结构强度和振动科学的发展以有力的推动,并丰富和扩大了它的研究领域。近一二十年来机械结构强度和振动学科取得了很大的进展。主要表现在:基本力学模型、机理和规律的研究有一系列重大发展;近代分析方法和测试方法的成果使传统的分析方法、实验方法发生了根本性的变化;在机械设计的理论和方法方面改变了传统的经验设计、对比设计、静力设计,采用分析设计、优化设计、动力设计、可靠性设计等方法,并和计算机辅助设计相结合;机械设备运行状态的监测和故障诊断技术得到迅速发展,其中振动方面更为迅速;振动和噪声源的识别、控制和防治理论和技术的研究有很大进展,受到社会的广泛关注。

我国“六五”期间,在机械强度、振动和噪声学科的上述几个方面也有了一定的进展,取得了不少重要的理论成果,并在实际应用研究中取得了较显著的经济效益和社会效益。但是与国际先进水平相比存在很大的差距。因此,国家自然科学基金委员会在“七五”期间设立了“机械结构强度和振动”重大项目。

二、项目简介

“机械结构强度和振动”项目是充分利用现代力学、材料科学、计算科学、实验科学和其他

新技术,对机械结构强度、振动和噪声的若干关键问题进行研究,目的是为我国机械装备的静动力强度设计和运行状况监控提供新的理论依据、分析方法、测试方法、软件系统和应用技术,并取得直接经济效益和社会效益,要求在若干方面取得世界水平的理论成果。研究内容涉及以下四个方面;力学机理、理论模型、分析和计算方法;近代测试和监控技术;工业实用的计算机软件系统以及将研究成果转化为实际生产力的工业应用技术。前两方面侧重理论和方法的研究,后两方面侧重应用和开发的研究。共设有11个课题:

1. 机械结构不连续区应力分析及选形优化的理论和实验研究;
2. 机械工程中复杂板壳结构的强度分析和实验研究;
3. 机械结构在循环加载条件下的弹塑性分析及实验研究;
4. 机械结构热弹塑性分析、实验研究及其应用;
5. 热加工工艺残余应力与机械结构疲劳设计理论;
6. 模态综合用于机械系统动力分析和设计方法的研究;
7. 机械结构流体激发和电磁激发振动的理论和实验研究;
8. 机械结构中的模态分析与建模理论研究;
9. 机械设备振动状态监测、故障诊断与减振技术的研究;
10. 机械结构噪声源机理及其声场特性研究;
11. 气动力噪声源机理及其传播特性研究。

本项目由清华大学、西安交通大学、上海交通大学、浙江大学联合承担,杜庆华教授主持。参加研究工作的共约200人,其中教授21人,副教授42人,博士和硕士研究生100多人。

经过四年(1987—1990)的共同努力,1990年底已按期完成研究计划。共获成果51项,已推广应用的有17项,获得的直接经济效益超过2亿元。有4项获专利,26项获奖,其中获国家科技进步一等奖2项,科技进步三等奖4项,科技进步四等奖2项。培养博士27人,硕士128人,其中3人被国家表彰为“有突出贡献的博士、硕士”。完成论著385篇,其中国际会议特邀报告8篇,全国性会议特邀报告6篇,发表于国际刊物16篇,发表于国内知名刊物111篇,学术专著11本。

三、重要成果

理论和方法的研究

1. 机械结构数值分析基本离散方案的研究

(1) 边界元法的理论和方法的研究

边界元法是近十多年来得到迅速发展的一种新的解析数值方法。它在求解域内部能够精确地满足数学物理方程,在边界的应力、位移解答精度较高,在计算效率方面有降低维数和准备数据方便等优点,因而适合于机械结构、特别是不连续区应力分析及形状优化的研究。本项目对边界元理论和基本方法进行了深入的研究,主要成果有:发展了一种准确计算边界元解的边界变量与近边界变量的方法,并在此基础上提出了边界元解误差的一种直接估计,对于适定问题可在没有精确解作比较的情况下得到可靠的误差分析;发展了计算三维弹性裂纹应力强度因子的边界元-有限元耦合法、边界元与模态综合法相结合的边界元模态综合法、以及基于边界元局部应力分析选形优化的设计方法等新的有效数值分析方案。上述成果得到国内外著

名学者的高度评价,认为在许多方面有独特的创见,属于国际先进水平,并获得1990年度国家教委科技进步一等奖。

(2) 用于复杂板壳结构有限元模式和数值方法的研究

构造和设计了新型的板壳单元。对于均质板壳,根据 Reissner 变分原理,给出了正交曲线坐标系中的壳的内力-位移二类变量广义变分原理,据此构造的单元具有良好的性能,且简单有效、通用性强。对于层合板,提出了一个合理的分层式模型,在传统自由度基础上,增加了以各层剪切应变为独立自由度,再利用迭代法或渐近法求解。此法计算量小,精度有所提高,为研究层合板边界效应和几何非线性学问题提供了有效的方案。对于板壳型结构的温度场分析,发展了精确满足内外表面边界条件,只保留中面自由度的单元模式,这对于单层和多层板壳型结构的温度场分析都具有良好的性能,为结构温度场和热应力的分析提供了统一的模式。上述研究成果均达到当前国际先进水平。

2. 复杂载荷作用下机械结构强度完整性的研究

(1) 非弹性分析方案和方法的研究

集中研究常用机械用材的本构模型和非弹性分析的数值方案两个基本问题。

本构模型是结构分析的物理基础。本项目主要从结构分析的目的出发,在宏观唯象的基础上,把握材料特征行为的规律,建立合理的、便于实验和计算分析的本构关系。对于循环载荷作用的情况,提出了离散记忆型弹塑性模型和进一步耦合进高温蠕变效应及它和塑性相互作用的修正分离型热弹塑性-蠕变模型。对需要考虑应变率效应的情况,提出了一种应变率敏感材料的弹粘塑性硬化模型。在粘弹性研究方面,提出了基于弹性损伤理论的、新的粘弹性材料的三维损伤本构关系。

发展稳定、可靠、高效的数值方案是非线性分析的另一基本课题,本项目对此做出的贡献包括:导出了基于 Updated Lagrange 法和 Total Lagrange 法的粘弹性大变形的基本方程及相应的有限元格式;发展了以避免局部非线性以外区域刚度矩阵重新形成和分解为目的的自适应解法;提出了以提高非弹性状态决定的精度和效率为目的的本构方程解析积分方法和以最大限度缩减未知量数目为目的的弹塑性接触问题的混合变量方法等。

上述成果是对结构非弹性分析方案进行了系统的研究,在计算力学学科上,具有创造性,处于国内领先,并达到国际先进水平。

(2) 损伤规律和寿命估算方法的研究

建立材料微观损伤行为对宏观力学性质变化的关系,是当前损伤力学研究的前沿课题。本项目借助于扫描电镜下的直接加载观测,研究了焊接结构的近缝区和热影响区的微观损伤行为,提出了反映韧性损伤演变过程的“双型损伤模型”及反映疲劳累积塑性影响的宏观损伤律,并对 15MnMoVNRe 材料的损伤参数进行了识别。还进一步研究了内部缺陷和应力状态对损伤演变的影响,追踪破坏路径,分析和预测了热影响区的损伤后期行为,取得了和实验观测相一致的结果。

以上,利用微观观测结果,提出力学模型,建立宏观损伤律的研究是具有创造性的,属于国际先进水平。

3. 机械结构动力系统建模理论和模态综合方法的研究

(1) 动力子结构法的理论研究

作为大型复杂系统动力分析的基本方法——动力子结构法,其理论和数值方法在本项目的研究中取得了比较系统的进展。主要有:把 Hu-Washizu 广义变分原理推广到具有五个和六个场变量的非线性弹性动力学,给出了分区的混合杂交型变分原理,为非线性动力分析的有限元方法和动力子结构方法提供了发展的理论基础;提出了统一的动力子结构方法,克服了现有各种方法的不足之处,达到了完善的统一;在 Ritz 减缩基意义下,利用约束模态及由此而产生的 Lanczos 矢量,即全部采用静力模态实施动力系统的模态综合,使 Lanczos 算法成为固有值分析和 Ritz 减缩下非线性响应分析的有效工具。以上成果已成功地用于复杂管道系统的模态分析和动力设计等实际工程问题,计算效率可比现行的子空间迭代法提高一个数量级。

(2) 机械结构动力学计算模型修改方法的研究

为改进现行计算模型修改方法存在的缺点,在证明了相容质量阵定理和相容刚度阵定理的基础上,建立了可以满足充分反映结构几何和物理特点的各种约束条件的精细校正方法,为分析模型的修改提供了完备解集。此方法可以保持原矩阵的带宽和零元素不变,不仅大大减少了计算工作量,且修改灵活,修改后的模型保持与实际结构的对应关系,从而使修改后的模型可以再修改。其次,还提出了一种局部结构动力修改的频率响应函数方法,可以用于正逆两种修改:在正修改中,利用振动系统矩阵的增量和原系统的频率响应函数计算修改后结构的频率响应函数;在逆修改中,将修改确定在某些局部位置上,利用原系统和修改后系统应具有的频率响应函数的差值,可以计算出系数矩阵的修改量。此法对系统的各种形式的阻尼具有广泛的适应性。

以上成果在理论上均具有特色,处于国际先进水平,并具有重要的实用价值。

4. 机械结构噪声源机理和振动状态识别的研究

(1) 噪声源机理和控制方法的研究

在较全面地定量分析各类气动力噪声源强度与辐射声场特性的基础上,首次明确并肯定,脉动升力的偶极子声源是圆柱绕流气动噪声的主要声源,并据此提出一套比较完整的声源分析和声场计算方法。在非线性声传播、反声及声激波这一当前流动声学 and 噪声控制研究的前沿领域,完成了跨音速管道非线性声传播、反声降噪、声激波降噪等方面的数值研究。在机械结构声辐射、结构振动响应与任意外力激励三者声源关系的机理研究中,提出了应用“时域边界元波动分析理论——声振迭代关系”改变了长期沿用的传统方法,得到更加符合实际的结果。上述成果得到国内外的普遍重视和好评,处于当前国际先进水平。

(2) 振动状态监测,故障诊断技术的研究

在大量处理和分析故障信号在时域和频域上的特征的基础上,着重发展了短序列数据(脉冲信号)信号处理的三种新方法,使机械故障诊断信号分析技术提高到一个新阶段,其中 AR-PE 谱估计方法为突破“AR 幅值定量”的重大难题奠定了基础。

(3) 机械设备减隔振技术的研究

用功率流方法对隔振系统进行振动分析方面,提出了力等效的原则,解决了以保守耦合模型来等效非保守耦合系统这一难题,并对后者进行了深入的研究,达到本领域的领先水平。在热力动力耦合振动分析方面,提出了一种计算量少、精度高的显式积分格式求解耦合方程组的时间历程问题。研究表明:热力动力耦合因素在振动中的影响主要表现为热弹阻尼形式;

热弹阻尼系数是热力动力耦合参数和频率参数的函数。这为振动热力控制提供了理论依据。

应用和开发研究

作为应用基础研究,本项目既着重理论和方法的研究也注意应用和开发的研究。以后者为主的研究在 51 项成果中占 40 项,在 20 项获奖项目中占 14 项,有相当多的研究成果能直接应用于国民经济或国防建设,并可取得比较显著的经济效益和社会效益。根据已鉴定成果的不完全的统计,在“七五”期间本项目已为国家新创和节约二亿多元;还有一些居于国内领先及国际水平的研究成果具有很大的推广应用潜力,将在“八五”期间取得更明显的效益。就服务于生产实际以及为社会提供效益的形式和特点来说,这些成果可分为两大类。

1. 提高机械设备的设计水平,增强产品的竞争力

主要是将机械设计理论和方法的研究成果,进一步开发为程序和软件系统(本项目共研制开发了 57 个程序、软件及程序包),有些还进一步开发为直接投入生产的图纸,从而提高了产品的设计水平,增强了产品在国内外市场的竞争力。

浙江大学开发的岔管 CAD 系统是基于正交曲线坐标下等参曲壳单元的研究、针对水电站岔管设计的需要,在微机上实现专业化的计算机辅助设计,为岔管设计提供了迅速、方便、可靠的依据。已用于北京十三陵抽水蓄能水电站等四个水电站月牙型岔管的设计,得到有关单位的高度评价。

清华大学开发的压力容器分析法设计有限元分析软件包是基于壳体温度单元和瞬态温度分析等的研究,根据在我国推广分析法设计的需要,在微机上实现了工程中常用的各种容器温度场、应力场全自动有限元分析和强度校核以及部分容器的优化设计。它的第一版和扩充版分别在 1989 年和 1990 年经国家技术监察局鉴定,认为达到当前国际水平,建议作为压力容器设计规范的技术文件在全国压力容器行业内推广使用。现已有 60 多个单位引入了此程序包,对提高产品设计和其进入国际市场发挥了作用。

清华大学开发的管道系统动力特性及地震响应分析和事故工况动力分析程序是基于动力子结构法的研究成果和针对核安全的需要而开发的。经国家核安全局鉴定,认为达到当前国际同类软件的先进水平,不仅可用于核电站主管道系统的设计和安全审批,还可用于石化、航天航空等工业部门。

西安交大开发的变压器短路强度和动稳定软件包是基于电磁激发振动的理论和实验研究的成果,针对要求变压器能承受短路冲击而不损坏这一电力工业重大课题而开发的。经机电部鉴定,认为达到国际先进水平,可用于产品设计,具有重要的应用价值。

降低噪声是动力机械设计的重大课题。上海交通大学和清华大学关于“噪声源机理及传播特性”的成果,在实际应用中取得了相当显著的成效。上海交通大学承担的大功率燃气轮机进气消声器设计试验研究,应用二维理论分析方法,改变了陈旧的设计方法,为舰用燃气轮机消声器实船设计提供了可靠依据。经中国船舶总公司军工部鉴定,认为达到 80 年代国际水平。清华大学关于低噪风机的应用研究,开发了一系列产品,比噪声达到国外同类产品的先进水平,先后获得 4 项省市和部委的技术进步奖,设计技术已转让给近 50 家工厂,新增产值超过 3000 万元。其中一台参加 1990 年 10 月在印尼举行的第一届中国环保设备展览,获得好评,产品当即售出。现在,外商正在洽谈合作业务。

2. 保证设备正常、有效地运行,提高设备安全性和生存力

一部分机械设备投入运行以后,不能正常有效地运行,将造成重大的经济损失,甚至危及人员设备的安全。本项目将这方面的课题放在重要的位置,充分利用所取得的研究成果,高水平地解决这类运行过程中的重大课题。

上海交通大学关于阿依-24 航空发动机振动故障的研究是一个很好的典型。课题组采用了机械结构模态分析与建模理论的研究成果以及一系列当代故障诊断新技术,通过对 170 台发动机的实测试验、计算机模拟、零件试验、发动机台架试车及试飞等方法,经过数百次试验,终于找到了故障的原因并采取了针对性措施,彻底解决了问题,保证了航班的正常运行以及军事任务的完成,并大大节约了维修费用,提高了飞机的周转率,取得了巨大的经济及社会效益,先后获中国民航总局和国家科技进步一等奖。

另一获国家科技进步一等奖的项目是上海交通大学关于变流机组隔振降噪的研究。变流机组是我国水下主要常规潜艇的重要设备,由于其数量多、分布广、噪声大,严重恶化艇内环境,且降低了水下作战的隐蔽性。课题组从降低噪声源和隔离噪声传播两方面采取措施,取得明显的效果,提高了舰艇的战术性能,该项成果属国内首创。

西安交通大学关于“512 循环机管系减振技术”的研究,对管系气流脉动进行了计算和分析,选择合适的结构和尺寸,使气流脉动和管道振动得到有效控制,技术指标达到国际先进水平。化工部化肥司准备向全国推广 512 循环机的减振技术,其效益每台每年可达 1292 万元。

四、国内外研究现状和对我国今后研究工作的设想

近些年来,国内外边界元法的研究始终十分活跃,每年举行的有关国际会议就有 3—5 次。比较引人注目的有:反问题的边界元法、各种非线性问题的边界元法、以及随机边界元法...等。在板壳结构有限元分析方面,国际上仍注意设计单元中的一些难点,例如板壳单元中的薄膜自锁问题、叠层复合材料板壳的边界效应、层间应力和脱层的静动力特性等问题。

高温条件循环热-机械作用下的材料本构和损伤规律是国际上研究的一个热门课题。改进非弹性数值分析的精度、效率和稳定性仍然是当前计算力学研究的重点课题。此外,热结构的粘弹性和粘塑性及蠕变分析研究,以及非弹性分析简化方法和结合状态监测的实时分析方法的研究也越来越受到广泛的重视。

在大型复杂结构动力分析方面,动力子结构方法成为近代的有效分析手段,国内外不少学者同时在进行各种改进工作。结构动力修改、理论模态和实验模态也是国际模态分析会议的热门课题。自由度在 10^4 量级的空间结构系统的研究,高效的非线性问题的算法以及非平稳随机振动等难题国际上仍是需要进一步开展工作的前沿课题。在气动噪声研究方面,国外的现场反声控制实验研究已有较大进展,对声激波工作提出了声激波降噪的方法并作了初步数值分析。同时,还加强了关于旋涡发声机理和声控流方面的研究。

近年来,国际上关于耦合问题,包括流固耦合、电磁与弹性耦合等方面的理论分析、数值模拟和实验研究都在深入开展。国内针对流体传输管道、反应堆燃料棒和换热器的流体激振振动、以及流固耦合系统动力分析若干基本问题与数值分析方法开展了理论研究。同时,也开展了关于电机电磁参数共振、电子闭环控制、以及发电机转子扭振和电网回路耦合的研究等电磁固体耦合问题的研究。

根据当前大型复杂机械装备面临的问题,以及国际上的最新进展与发展趋势,我们认为今

后的工作应注意如下特点：

1. 从传统的个别构件的分析,发展为全系统性能的统一分析和控制,以及与此相联系的需要深入研究和解决一系列耦合问题。例如大型发电机组的动态分析就涉及流体-固体、土壤-结构、热场-机械、磁场-固体等耦合问题。

2. 从单一的力学分析发展为多学科的综合研究。例如研究焊接区的疲劳和断裂就需要进行材料学、化学、工艺学、传热学和固体力学等的综合研究。

3. 从单纯的作为设计学的内容发展为贯穿设计、选材、工艺、运行监测和控制,直至失效或事故分析的全过程的研究内容。

为此,建议国家自然科学基金会在“八五”期间设立“现代大型机械系统动态性能和结构完整性的基础研究”重大项目,内容包括:

1. 大型复杂机械全系统动态特性及其平稳性的研究;
2. 大型复杂机械结构冲击与噪声性能分析与环境控制的研究;
3. 大型复杂机械结构在复杂载荷和环境下的强度完整性的研究;
4. 机械结构关键部位静动强度分析及优化设计的研究;
5. 大型复杂机械中耦合问题的研究。

对大型机械结构系统开展动态性能、结构完整性和环境控制的研究,在学科上反映了大型机械装备的关键技术问题,将对我国能源节约利用、高效运输系统的建设以及环境改善等起到显著作用。

五、几点体会

1. 注意开展国际合作与交流,有助于项目研究工作的深入进行。在本项目的实施过程中,本项目负责人和日本著名学者,曾先后三次联合召开了中日/日中边界元法学术会议,促进了我国边界元法研究不断取得新的成果。目前,中日两国研究水平大致相当,都有一些国际先进成果。

1990年在我国召开的工程中振动问题国际会议(ICVPE-90),本项目负责人为该会议的学术顾问委员会主席并主持会议。项目课题组有8人在会上做了学术报告,部分外国学者还在承担本项目的几个学校进行了顺访和深入的学术交流。

一些课题组或承担单位分别与法、德、日、意、奥等国的对口单位或教授订立校际交流或合作研究合同。在此期间还约有40人次出国参加国际会议。

通过以上活动,能及时掌握国际研究进展,促进相互了解,推动本项目的深入进行,对制定今后研究规划也有重要的参照对比意义。

2. 本项目的学术领导小组和主要研究人员,在“六五”期间就承担了国家科委的重大项目,对本项目的实施起到重要的导向作用。在设立研究课题时,能综合考虑国民经济发展与学科创新的要求,合理兼顾学科水平与经济、社会效益。

3. 项目领导小组对项目实行动态管理、严格要求,并能以身作则、认真负责,因而具有较高的威信,能使四校承担项目的研究力量形成一个整体,这是较好完成任务的重要保证。

RESEARCH ON STRENGTH AND VIBRATION OF MODERN MACHINERY STRUCTURES

Du Qinghua Wang Xucheng

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China)

Abstract

A major project for research on the strength and vibration of modern machinery structures has been established by NSFC since 1987. The Project consists of following subitems:

1. The stress analysis of discontinuous region of machinery structures and its shape optimization.
2. The stress analysis of complex plate and shell structures of machineris.
3. Elastoplastic analysis of machinery structures under cyclic loading.
4. Thermo-elastoplastic analysis of machinery structures.
5. Residual stresses and fatigue analysis of machinery structures.
6. Model synthesis for the dynamic analysis of machinery structures.
7. Electromagnetic induced and fluid induced vibrations of machinery structures.
8. Modelling theory and model analysis of machinery structures.
9. Condition monitoring, fault diagnostics and vibration reduction technique of mechanical equipments.
10. The mechanism and sound field characteristics of mechanical noises.
11. The mechanism and propagation characteristics of aerodynamic noises.

The purpose of the project is to provide theoretical bases, analytical and experimental methods, software systems and applied techniques for the static and dynamic design of machinery structures. After 4 years of cooperative works of around 60 professors and more than 100 research scientists, the final results of investigations include: 386 papers and 11 monographs, 27 doctoral dissertations and 128 M.S.thesis, 57 computer programs or software. 29 National or Ministry Awards or Patent, and more than 200 million RMB for direct economic benefits.