

# 高效洁净能源-动力系统及 热-功转换过程内部流动的研究<sup>\*</sup>

关键词 总能系统, 非定常流动, 多相内流热动力学

## 1 首席科学家

肖云汉 工程热物理研究所研究员、博士生导师, 1986—1993 年在清华大学热能工程系获工学学士、硕士、博士学位。1993 年入中国科学院工程热物理研究所博士后流动站, 出站后留所工作, 1996 年破格晋升为研究员, 1998 年任所长助理, 2001 年任副所长, 分管科研业务工作。入选 1998 年度日本政府特别研究员, 1999 年度中国科学院“百人计划”。中国《工程热物理学报》编委, 中国工程热物理学会工程热力学分会副主任委员, 中国能源研究会热力学及工程应用专业委员会副主任委员, 中国科学院能源研究委员会委员。国家清洁能源行动工作咨询专家组成员。“十五”“863”计划能源技术领域洁净煤技术主题第一届专家组成员。世界银行北京环境二期项目咨询专家。

主要从事能源利用与环境的研究发展工作。主持和承担过国家自然科学基金、国家攀登 B、中国科学院重大和特别支持等多项研究与发展工作。相继参加多项国家能源领域基础、关键技术、高技术规划计划的决策支持研究工作。突破传统分析方法的缺陷, 提出总能系统流程和参数同步优化的定量描述和方法。通过研究物质、能量、化学反应的集成, 为联合循环等复杂总能系统的发展提供设计新方法和决策依据, 并在多方面应用中获得了重要实用价值的成果。对湿空气透平循环的研究打破了国际上以传统分析方法得到的许多框框, 论文被国际同行大量引用; “整体煤气化联合循环

(IGCC) 发电示范项目技术可行性研究”获国家电力公司科学技术进步奖。1999 年被评为第四届中国科学院优秀青年, 获 2001 年度中国科学院青年科学家。

## 2 科学内涵与意义

经济的蓬勃发展依赖于能源的充足与优质供应。功(动力)和热是能源利用的主要形式, 而功(例如电)的作用比热要大得多。在人类社会进步的漫长历程中, 一次能源转换为功的数量和比例不断提高, 成为国家经济实力和人民生活水平的重要标志, 并形成当今世界最大产业之一的动力工业。面向可持续发展的挑战, 开展能源-动力系统的关键基础研究, 将为解决能源优质供应、能源效率、能源环境等我国能源领域面临的一系列重大问题, 提供科学基础和道路: 第一, 提高我国的能源利用效率。世界各国的长期工业实践表明, 一次能源转换为电力的比例越高, 国家的能源利用效率越高, 单位国民生产总值的能耗越低, 温室气体和其它污染物的排放量越低。第二, 提供我国实现中等发达国家目标所需的物质基础。我国人均电力目前仅为中等发达国家的 1/5, 为了完成向中等发达迈进的国家目标, 电力必须持续高速发展。第三, 支撑我国参与国内年均千亿元人民币动力装备市场的竞争和更大范围的国际竞争, 尤其是开拓出我国以高效洁净煤炭发电为主的电力产业和动力设备制造业新格局。第四, 动力(电)是世界公认的最清洁、最能有效利用煤炭的可持续发展方式, 研究发展高

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2001 年 10 月 24 日

效洁净经济的煤炭动力系统,将消除煤炭在我国新世纪继续作为自足、安全、稳定、廉价能源的障碍。

大型高性能能源动力系统的重要关键科学问题是热-功转换中的流动过程和各转换过程集成的系统,重要基础是研究单元过程优化集成的总能系统与工程热力学,以及各种动力机械和设备内部流体流动本质的内流气动热力学。该项目的实施和完成,将在工程热力学、内流气动热力学等能源利用的应用基础科学前沿领域取得重大进展,特别是在当前孕育着重大创新的可持续发展热力循环总能系统、考虑非定常本质的内流气动热力学理论与方法等方面取得突破,从而使我国在这方面的国际前沿继续占有重要的一席之地,为建立符合国情和独具特色的高效洁净能源-动力转换系统及高技术发展提供理论依据和支撑。

### 3 研究进展及创新点

该项目联合了国内相应领域的主要单位:中国科学院工程热物理研究所、力学研究所和清华大学、西安交通大学、上海交通大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等。

围绕创建我国新型能源动力系统,前两年共部署了4个课题,分别从总能系统的优化、综合与创新;新型广义总能系统的全息性能和规律;复合工质新型动力系统及仿真;动力系统的计算机集成、动态控制与流场全方位评价4个方面开展工作。

对HAT循环关键部件——湿化器进行了大量实验研究,获得了一批有价值的实验数据,得出了湿化器内传热与传质系数的经验关联式,与湿化器内传热传质物理模型结合,得到各参数及传热传质推动力——焓差沿湿化器高度的分布,揭示了湿化器的设计点性能和变工况性能,得出同实验研究完全一致的结论。建设了大湿度空气燃烧实验装置,完成了调试、验收,提高了测试技术,完成了燃烧室(无注水注汽情况下)总体性能试验、火焰结构特性试验、燃烧室冷态流场测试分析。已完成高密度一次表面换热器模型设计,筛选了换热元件材料,进行了制作工艺实践,进入性能数据实验阶段。

通过对燃料化学能释放、动力转换等过程的分析,为我国高效、洁净能源-动力系统的研究发展提

供坚实的基础。对整体煤气化湿空气透平循环(IGHAT)进行了优化,研究了湿化器出口空气含湿量、间冷压比及空分集成程度等主要参数对循环性能的影响,比较了HAT与IGHAT循环。提出化学链燃烧新机理,旨在取代传统的造成能源品位利用最差并引起环境生态污染的燃烧过程,开拓出第三代能源环境动力系统;对由化学链式燃烧器与固体氧化物燃料电池构成的联合循环进行了流程和参数优化。揭示了熔融碳酸盐等燃料电池及其与透平集成的发电系统的稳态和运行特性。

初步论证了以煤气化为核心的多联产系统和“合成气城市”概念在中国实施的可行性,拓展了以往多联产系统侧重化工产品生产的概念,将清洁能源生产与环境问题控制引入多联产系统中。开展联合循环系统更新的热力学性能研究,进行了联合循环系统改造各种因素的综合分析。

围绕热功转换过程中非定常流动机理和新一代设计体系研究,在前两年这方面共部署了五个课题,分别从叶轮机内流湍流微细结构与湍流模型;叶轮机多级环境流动干涉现象、流动失稳现象以及有效利用和控制方法;叶栅新几何和新流型;非定常汽液两相流动、相变及能质传输规律;基于非定常流动理论研究成果的(准四元)先进设计体系等五个方面开展了研究工作。

在湍流微细结构研究方面,为能够细致测量角区旋涡流动结构和湍流特性,专门建造了大尺寸扩压叶栅风洞,利用三维激光多普勒测速仪测量了角区旋涡结构和湍流特性以及转子尖区泄漏流的流动机理,发展了近壁湍流理论模型和叶轮机湍流工程模型研究并进行初步数值计算。在复杂带激波流动研究方面,开展了内流复杂带激波流动的广泛调研,结合对叶轮机流动领域的已有认识和理解,形成并丰富了该方向的研究手段与重点;同时针对复杂带激波流动数值模拟的要求新开发了多块网格计算复杂流域程序。在燃烧波研究方面,前两年主要是针对流场扰动对管道中燃烧波发展影响进行了研究,建立了完整的实验系统。

在流动干涉计算方法研究方面,针对数值模拟对计算资源的巨大需求,重点发展了基于大规模网

络并行环境的二维、三维非定常流常计算方法,在 Windows NT 和 Linux 两种计算环境中实现了基于 Winsock 和 PVM 并行平台的 CFD 通用界面标准,研究和开发了基于隐式格式和基于双时间步长显示格式的非定常 Navier-Stokes 方程求解方法和计算程序。对于动静叶栅流动干涉(固有非定常)问题,实现了多级压气机和透平的定常和非定常多级联算,着重探讨了计算方法的可靠性和结果的合理性。在非定常全周叶片排流动建模与算法研究方面,发展完善了适合引入激盘模型的三维粘性流场的数值模拟方法。

在流动失稳机理与控制方法研究方面,完成了两级低速压气机(设计转速 2 400rpm)的设计、加工、安装和调试,得到了系统稳态和非稳态基本特性。构思了微量喷气的基于壁面处理的旋转失速控制机构并得以实现,对该机构造成的系统稳态、常规动态特性进行了实验研究和分析,利用一维连续小波和二维小波分析了几种喷射状态对系统稳定性和先兆。在国内首次实现了基于微量喷气控制机构的旋转失速机理和控制方法的研究,在国际上首次提出了适用于动态流谱的实际测试技术和数据分析技术——一维连续小波和二维小波方法,向应用迈出了实质性步伐,数量级(2—3 个数量级)地提高了失速预报的提前度。

在叶栅新几何及内流新流型的研究方面,通过环形扩压叶栅中应用弯曲叶片的实验研究,得到了正弯叶栅、正倾斜叶栅、S 型叶栅不同冲角下损失值的变化规律,为进一步探索新几何及新流型提供了基本数据;探讨了尾板正弯曲叶栅和反弯曲叶栅实验结果的影响。“后部加载”叶型与叶片沿叶高的弯扭成型优化匹配的试验研究初步揭示了“后部加载”叶型与叶片的弯扭联合气动成型与合理匹配能够一步提高涡轮的气动性能的可能性。关于气膜冷却的研究,主要集中在小动量比条件下冷气射流场结构、主流场的影响、与附面层的相互掺混等因素对冷却效率的影响方面,得到了冷气喷射角度、冷却孔布置方式等影响的定量和定量结果。

作为叶轮机流场特性全方位评价体系的理论基础,系统地提出了具有高精度、高分辨率、超快速、气固耦合等特点的非定常全三维粘性流动数值分析方法,发展了分析软件。作为应用,对阜新电厂某汽轮机组低压缸五级隔板碎裂等两起事故进行了分析研究,与试验对比符合良好。

特高参数和极限条件下稳、瞬态汽液两相流动、相变及能质传输规律的实验研究方面,研究了超临界锅炉在变压运行过程中可能发生的传热恶化及水动力特性方面的问题,并针对锅炉的结构特点,分别研究了垂直管、水平管、倾斜管和内螺纹管在均匀受热及单面受热的条件下发生传热恶化的问题。通过试验,得出了在不同参数条件下的壁温分布规律,发生传热恶化的起始条件及传热恶化后的传热系数,流动过程中的稳定性等,并着重进行了 20MPa 到 24MPa 压力的接近临界压力区的试验。另外设计完成了专门的试验系统,用以进行注水时的瞬态流场及温度场的研究,同时完成了细观尺度管汽液两相流动与传热特性实验台。在探索研究多相流热物理过程的多尺度随机诊断和控制理论与技术方面,已成功地研究开发了内部为两相流强制对流传热条件下的稳、瞬态非线性多维导热反问题快速算法和程序;有关汽液两相流不稳定性及界面波特性的表观参数随机信号的快速多域值多尺度分析研究初步获得成功。

基于前两年项目对热功转换过程中非定常流动研究的成果,提出了建立先进设计体系的基本思路:全面考虑诸如气动部件流场干涉、叶片周向布局、两相流动等非定常流场干涉对部件气动性能的影响,通过数值模拟和实验研究取得数据和规律,建立与实际设计参数有效关联的非定常气动设计软件体系。前两年在这方面的主要进展包括:将汽轮机部分进气(典型的非定常流场结构)的非定常特性通过数值模拟对原有设计体系进行修正,并在实际设计中得到应用。

(相关图片请见彩插四)



国家重点基础研究发展规划项目

# 高效洁净能源-动力系统 及热-功转换过程内部流动的研究



右起：蒋洪德院士、黄伟光所长、肖云汉（项目首席）、蔡睿贤院士（项目顾问）、徐建中院士



学术讨论



透平排气系统实验台



热转换实验台



加压湿化器实验台



三级轴流压气机实验台



激波管风洞涡轮叶栅实验台