

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.11.001

大型复杂成套装备建模与设计的 发展趋势与关键技术研究^{*}

谭建荣, 刘振宇, 沈利红
(浙江大学 机械工程学院, 杭州 310027)

摘要:大型复杂成套装备是国家的战略产业,是许多重大工程建设的基础。大型复杂成套装备建模与设计基础理论与关键共性技术研究是提高我国成套装备及关键机组自主设计制造能力的关键。本研究以复杂空气分离成套装备为例,分析了复杂成套装备超大型与低能耗的发展趋势,凝练了复杂成套装备建模与设计需要解决的关键科学问题,阐述了大型成套装备中动力学非线性耦合建模技术、复杂工况多机组多变量关联设计技术、多机组同步稳定与寿命均衡设计技术、关键部机高强度大构件保质设计技术、大型成套装备性能实验仿真与集成等共性关键技术,最后给出了提升我国大型复杂成套装备设计基础理论与关键共性技术的解决方案。

关键词:复杂成套装备;建模与设计;耦合关联设计;寿命均衡设计;保质设计

中图分类号:TH122;TH45

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)11-1399-03

Development trends and key technologies of complex equipment modeling and design

TAN Jian-rong, LIU Zhen-yu, SHEN Li-hong
(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The research of this paper clarified the affection of super-large complex air separation equipment large-scale mixed flow to the mechanism of gas heat and mass transfer, revealed the poly-phase fluid unsteady flow alternating mechanism and energy migration law in equipment, illuminated dynamics nonlinear coupling mechanism of large equipment under complicated conditions, established the equipment inter-set multi-variable multi-parameter performance analysis and process design theory, uncovered air separation equipment key set and unit high reliability and long duration mechanism, proposed key set and unit large-scale structure life balance design and quality-ensured manufacturing method, thus providing the scientific basis for next generation air separation equipment theoretical breakthrough.

Key words: complex equipment; modeling and design; coupling correlation design; life balance design; design for quality and manufacturing

0 引 言

发展大型复杂成套装备是我们国家的战略产业,是国家许多重大工程建设的基础。例如,大型空气分离成套装备,随着大型钢铁、大型石化、大型火电等大工程对空气分离成套装备需求的增加,我国正在成为世界上空气分离成套装备需求量最大的国家。具体来说,目前我国对空气分离成套装备制氧能力的年需求量已超过 1500 多亿立方米,空气分离成套装备市场需求超过 500 亿元,而且这一统计还不包括燃气和煤气化联合发电、熔融还原炼铁(用氧量比原来约增加 10

倍)对空气分离成套装备的需求,这两项技术一旦大规模应用,对空气分离成套装备将有更大的需求。由此可见,大型钢铁、大型石化、大型火电等大型工程及航天、深海等特殊领域都以工业气体为原料气体或工艺气体,因而,工业气体被工业界普遍认为是“工业的血液”,复杂空气分离成套装备被称为“工业血液”的“造血装备”。

开展大型复杂成套装备建模与设计相关研究,解决大型复杂成套装备设计的共性关键技术问题,进而提高大型复杂成套装备及关键机组的自主设计能力,是增强我国制造业核心竞争力的关键。

收稿日期:2015-09-30

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2011CB706500);国家科技计划资助项目(2013IM030500)。

作者简介:谭建荣(1954-),男,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要研究方向为机械设计及理论、数字化设计与制造。E-mail:egi@zju.edu.cn

本研究以复杂空气分离成套装备为例,分析大型复杂成套装备超大型与低能耗的发展趋势,凝练大型复杂成套装备超大型与低能耗需要解决的建模与设计方面的科学问题,阐述大型复杂成套装备建模与设计中的共性关键技术。

1 成套装备的复杂性与面临的挑战

大型复杂成套装备往往由多部机组成,结构组成、工艺过程与技术需求十分复杂,这些都给成套装备的设计、制造带来了很大的挑战。以空分成套装备为例,其复杂性表现在三个方面:

(1)结构组成复杂。由净化器、压缩机、预冷装置、纯化装置、增压膨胀机、换热器与精馏塔等多机组多部机组成;

(2)工艺过程复杂。通过空气压缩、净化、换热、冷却与精馏等工艺过程,生产氧、氮或其他稀有气体;

(3)技术需求复杂。大型钢铁、大型石化、大型火电等大型工程对空气分离类成套装备的设计制造提出了不同的技术要求。

2 大型复杂成套装备的发展趋势

从空分技术和空分装备的发展历程来看,可以将空分装备技术分为:

以焦尔-汤姆逊循环理论为基础的第一代空分装备技术,以多股流多相换热理论为基础的第二代空分装备技术,以两相双膜传质理论为基础的第三代空分装备技术,以及正在形成发展中的第四代空分装备技术。

超大型化与低能耗化作为第四代空分装备技术的重要特征,已成为当前空分装备技术国际竞争的制高点。空分装备超大型化,可以有效降低能耗,节约成本,提高设备运行的可靠性,减少设备维护的工作量。例如,同样满足 $10 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 用氧量的需求,1 台 10 万等级的空分装备比 2 台 5 万等级空分装备联动大约可节约能耗 10%,节约投资 30%,设备故障率降低 50%。空分装备的能耗是空分配套企业最主要的能耗之一,例如,大型钢铁企业空分装备耗电量通常占公司总用电量的 $1/7$ 。装备能耗指标每降低 $0.1 \text{ kWh}/\text{m}^3 \text{O}_2$,就意味着空分装备设计制造技术一次大的飞跃。我国空分成套装备若平均能耗指标下降 $0.1 \text{ kWh}/\text{m}^3 \text{O}_2$,全国每年可节省用电量达 55 亿 ~ 60 亿千瓦时,相当于三峡工程年发电量的 6.5%^[1]。

然而,我国空分成套装备超大型化、低能耗化技术与国际先进水平相比仍存在很大的差距。造成这一差距的主要原因及技术难点是:

在超大型化方面。空分成套装备超大型化设计不是对现有机组尺寸的简单放大,需要对整个装备重新

进行复杂的参数计算分析。目前,发达国家已掌握超大型空分成套装备跨机组动力学非线性耦合与多参数关联设计、超大型化压缩机膨胀机换热器等设计制造技术,而我国超大型空分成套装备设计制造所依据的计算公式还主要停留在通过经验、引进消化或有限试验数据拟合而成阶段。

在能耗方面。发达国家已掌握临界区附近空分流体热物性精确数据、超大结构汽液两相流均布技术、低能耗高密度板翅式换热器设计制造技术、低能耗大流量压缩机设计制造技术等低能耗核心技术,空分成套装备外压缩流程单位氧产量电耗可达 0.365 kWh ;而我国关键机组能耗大,空分成套装备外压缩流程单位氧产量电耗 $0.41 \sim 0.43 \text{ kWh}$ 。

因此,等级上不去,能耗下不来,成为现阶段制约我国空分成套装备发展中的突出问题。

3 大型复杂成套装备建模与设计的共性关键技术

3.1 成套装备动力学非线性耦合建模技术

针对大型复杂成套装备中连续、离散混合的非线性、强耦合动力学问题,需要解决以下几个问题:

(1)研究连续离散混合系统统一表征理论及方法;

(2)揭示大型装备中多因素非线性界面环境的动力学耦合作用机理;

(3)建立多场耦合环境下设备转子系统的非线性动力学模型,确定转子系统在非对称、非稳定外场作用下的非线性振动特性;

(4)实现基于多领域物理统一表达方法的复杂动力学系统解耦机制及求解方法。

3.2 复杂工况多机组多变量关联设计技术

大型复杂成套装备设计中,需要解决不同机组间存在的机/电/液/控/低温多学科关联的多个主要设计变量与设计参数的设计与分析问题。针对这一难题,需要清晰了解多机组多学科多参数关联机理,揭示机组界面参数的相互作用及其传递规律^[2],实现成套装备多性能关联设计与工艺流程的关联设计。

3.3 多机组同步稳定与寿命均衡设计技术

针对大型复杂成套装备多机组寿命随机分布问题,需要阐明压缩机、膨胀机、动力装置等多机组运行过程出现不稳定运行的机理,揭示在复杂振动载荷作用下装备运行的稳定性准则和关键零部件疲劳失效的规律^[3],获取成套装备多机组零部件寿命序列,实现大型复杂成套装备多机组零部件寿命的均衡设计。

3.4 关键部机高强度大构件保质设计制造技术

大型复杂成套装备可靠性与稳定性,需要通过机

组、部机的设计、制造和装配质量来保证。针对超大型空分成套装备中大型压缩机、板翅式换热器等设计制造中的难点问题,需要解决大流量多轴耦合高速转子动态变形控制技术^[4]、高强度特长、特宽高压板翅换热器的保质设计制造方法,实现大型压缩机中超薄叶轮叶片和刀具耦合动力学分析及其对能耗的影响,从而,实现成套装备关键机组与部机的保质设计与制造。

3.5 大型成套装备性能实验、仿真与集成技术

数值模拟与实验研究是验证大型复杂成套装备设计理论与方法正确性与有效性的重要手段,因此,需要建立大型复杂成套装备数字样机的仿真模型,以此来模拟成套装备的整机性能;同时,需要通过构建关键部机性能实验台与系统状态监测及故障诊断实验台^[5],为成套装备的性能分析、系统集成、状态监测与故障诊断提供实验依据。

4 大型复杂成套装备建模与设计的解决方案

(1)大型复杂成套装备的建模与设计涉及学科广泛,必须用多学科交叉的研究模式加以解决。

例如,在空分成套装备的设计制造中,必须通过低温、力学、化工学科的交叉,解决低能耗驱动的大尺度混合流复杂界面渐变形成规律与能量迁移机理;通过机械设计和信息学科的交叉,解决超大型化空分成套装备非线性动力学耦合与多工况多学科多参数关联的设计问题;通过机械制造、低温、力学学科的交叉,解决复杂空气分离类成套装备运行稳定、关键零部件寿命均衡及关键机组保质的设计制造问题。

(2)在复杂成套装备的设计制造方面,需要高度重视原始创新与集成创新相结合。

自主设计是实现原始创新、集成创新、引进消化吸收再创新的关键,没有正确的设计创新就不可能是成功的创新。例如,在空分成套装备设计制造中,在深低温混合流多相传热传质理论、装备非线性动力学变量分离与耦合机理、多机组寿命均衡与保质制造技术等方面形成原创性成果的基础上,通过多学科、多系统技术成果融合汇聚,在超大型空分成套装备设计制造中实现集成创新,为形成具有市场竞争力的产品提供科学技术支撑。

(3)基础研究与装备应用相结合。

从复杂成套装备自主设计制造中提炼科学问题,解决成套装备在机理、建模、设计、制造与运行中的关键技术问题,在典型企业的产品开发中实现应用验证,保证基础研究有明确的载体。

5 结束语

中国从制造大国走向制造强国,设计是关键。创新驱动,设计要先行。我国要在激烈的国际竞争中掌握主动权,打破工业发达国家在尖端产品领域对中国的封锁,就必须重视大型复杂成套装备自主设计的基础理论与关键共性技术研究,大力提高我国大型复杂成套装备自主设计制造能力。

本研究以复杂空气分离成套装备为例,分析了复杂成套装备的发展趋势,凝练了复杂成套装备需要解决的建模与设计方面的基础科学问题,阐述了大型成套装备中动力学非线性耦合建模技术、复杂工况多机组多变量关联设计技术、多机组同步稳定与寿命均衡设计技术、关键部机高强度大构件保质制造技术、大型成套装备性能实验仿真与集成等共性关键技术,给出了提升我国复杂成套装备建模与设计基础理论与关键共性技术的解决方案。

参考文献 (References):

- [1] ZHAO X B, CHEN J Y, YAO L, et al. Research and development of large-scale cryogenic air separation in China [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2014, 15(5):309-322.
- [2] 彭翔,刘振宇,谭建荣,等. 基于变关联分析的复杂产品设计模型简化[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(8):1245-1254.
- [3] FAN J L, GUO X L, WU C W, et al. Research on fatigue behavior evaluation and fatigue fracture mechanisms of cruciform welded joints[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528:8417-8427.
- [4] 李开泰,张武,黄艾香,等. 三维旋转 Navier-Stokes 方程有限元维数分裂方法[J]. *中国科学:数学*, 2015, 45(8):1299-1318.
- [5] 徐敬华,张树有,谭建荣. 大型空分板翅换热器性能强化的逐流段设计方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(9):129-136.

[编辑:罗向阳]

本文引用格式:

谭建荣,刘振宇,沈利红. 大型复杂成套装备建模与设计的发展趋势与关键技术研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(11):1399-1401.

TAN Jian-rong, LIU Zhen-yu, SHEN Li-hong. Development trends and key technologies of complex equipment modeling and design[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(11):1399-1401.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>