

流程工业装备绿色化、智能化与在役再制造

高金吉, 杨国安

(北京化工大学诊断与自愈工程研究中心, 北京 100029)

摘要: 钢铁、石化等流程工业是国民经济的支柱产业, 是实现制造强国和《中国制造 2025》提出的重点发展十大领域的基础。目前, 装备与过程不和谐导致我国石化、冶金等流程工业的能耗高、故障多等安全 and 经济运行问题十分突出。本文从设计建设、企业管理、政府导向和人才培养等方面分析了问题产生的原因, 研究了流程工业机械装备绿色化和智能化与在役再制造科技发展战略, 提出绿色设计制造、健康能效监控智能化和在役再制造等对策及政策建议。

关键词: 流程工业; 装备; 绿色化; 智能化; 在役再制造

中图分类号: TH17 **文献标识码:** A

Greenization, Intelligentization and Remanufacture in Service of Equipment in Process Industry

Gao Jinji, Yang Guoan

(Diagnosis and Self-recovery Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Process industries such as steel and petrochemical engineering are the pillar industry of national economy, which are the foundation to achieve “manufacturing power” and the top 10 development areas of “Made in China 2025.” So far, the disharmony of equipment and process engineering in process industries results in the outstanding problems in safety and economic operation, such as high energy consumption and high failure rates of equipments. In this paper, the reasons are analyzed in design and construction, business management, government orientation and talent cultivation. Development strategies are put forward for greenization, intelligentization and remanufacture in service of equipments in process industries. Some strategies and policy proposals are also put forward for greening design and manufacture, intelligentized supervisory control of health and energy efficiency for equipment, and remanufacture in service.

Key words: process industry; equipment; greenization; intelligentization; remanufacture in service

《中国制造 2025》提出, 重点发展新一代信息技术、高档数控机床和机器人、航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、先进轨道交通装备、节能与新能源汽车、电力装备、新材料、生物医药及高性能医疗器械、农业机械装备十大领域^[1]。其中

不包括流程工业装备, 但新材料和发展新一代信息技术与钢铁、有色、化工等流程工业密切相关, 制定的强化工业基础能力, 提高工艺水平和产品质量, 推进智能制造、绿色制造等科技发展战略^[1], 对流程工业生产和装备制造同样具有指导意义。

收稿日期: 2015-05-22; 修回日期: 2015-06-17

作者简介: 高金吉, 北京化工大学, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事设备故障诊断与自愈化领域的研究工作;

E-mail: ygabuct@163.com

基金项目: 中国工程院重大咨询项目 (2013-ZD-3); 中国工程院咨询研究项目 (2013-XZ-2); 2013 年中国工程科技中长期发展战略研究项目 (L1322019)

本刊网址: www.enginisci.cn

钢铁、有色、石化、化工、建材、造纸等流程工业是国民经济的支柱产业，2012年这六大行业合计产值占工业总产值的43.59%，其总能耗约占工业总能耗的64.5%，对污染排放的贡献率远高于产值贡献率^[2]。流程工业为装备制造提供原料，是发展十大领域的重要基础。要实现制造强国，流程工业及其装备的制造占举足轻重的地位。特别是石化、冶金等流程工业装备具有大型化、复杂化、生产工艺自动化、连续化等特点，其典型机械装备如压缩机、连压轧机等关键能源动力装备，一旦故障停机就会造成重大经济损失，甚至导致机毁人亡的重大事故；这类设备是流程工业的耗能大户，仅炼化、冶金行业的压缩机组能耗就占我国工业总能耗的15%左右^[3]。目前我国石化、冶金等流程工业装备安全和经济运行问题十分突出。

中国制造业总量已超过美国，居世界第一。钢产量占世界总产量的一半，有的产能已经过剩，中国是世界石化大国，乙烯产能和炼油能力居全球第二位^[4]，但是中国的钢铁和炼化行业大部分企业处于亏损状态。落实制造强国战略我们面临两个重大问题：其一，流程工业产能过剩，今后不可能大规模增容扩建，流程工业装备制造如何提升技术水平和可持续发展；其二，如何发挥好现有生产企业在役生产设施和装备的作用，安全长周期优化运行，合理充分利用能源资源，降低生产成本、提高企业竞争力。

我国不能总是依靠扩大生产规模来实现经济的快速增长。流程工业必须从规模、速度型向质量、成本和可持续发展型转变；必须落实安全生产和节约优先的方针，充分发挥现有装备的作用，实施工业装备全寿命绿色化和智能化工程科技发展战略。通过开展基于工业互联网的装备健康能效监测诊断和在役再制造工程，提升工业装备绿色化和智能化水平，从而实现机械装备高效、稳定、长周期运行；同时培育发展新兴相关服务型产业。这是我国流程工业加快经济结构调整和转变发展方式的必由之路，也是制造强国的重要组成部分。

一、石化、冶金等流程工业装备运行现状、问题及原因分析

中国工程院重点咨询项目“中国高能耗机械

装备运行状况及节能对策研究”指出，目前我国流程工业关键机组普遍存在能耗高、可靠性差、故障率高和运行周期短等突出问题。国内同类机组的连续运行周期只有国外领先水平的1/2~2/3，中国石化行业大型工艺压缩机故障率约为30%，经济损失巨大，危及人机安全^[5]。国内制造和进口机组远离设计工况运行的现象普遍存在，实际运行效率比设计效率低5%~20%，有的甚至低30%多^[3]。冶金行业由于装备经常低负荷生产，装备智能化程度低，不能自适应调整，能源浪费日显突出。工业装备运行故障多、效率低是中国钢铁和炼化行业大部分企业处于亏损状态的重要原因之一。造成这些问题的主要原因如下所述^[3]。

原因之一：建设和设计问题。在设计、选型、定购、引进装备时片面追求设备本身的效率而忽视与生产过程的匹配，实际运行远离设计工况且设备自适应调控智能化程度低，造成“大马拉小车”低效运行普遍存在^[6]。美国能源部关于空气压缩机负荷率调查数据表明，中国工业空气压缩机负荷率比全球平均水平低13%，如图1所示^[7]。工艺压缩机运行负荷低于设计负荷比这还要严重得多。由于负荷过低，效率远低于设计水平。此外，机电装备故障频发，事故时有发生，国内某企业集团炼油板块压缩机故障情况如表1所示。

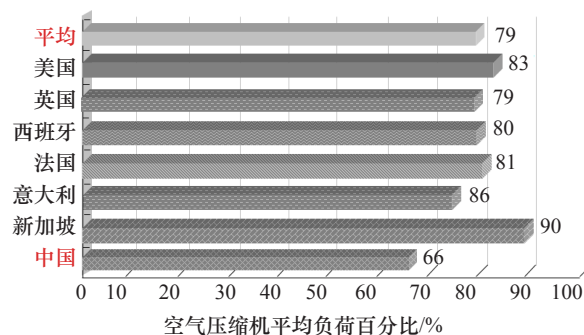


图1 美国能源部关于空气压缩机负荷率调查数据

造成运行周期短和效率低的重要原因：其一，设计时装备与过程不匹配导致“大马拉小车”；其二，在役机械装备缺乏健康能效监测和智能调控系统，对故障不能监测预警且对生产负荷变化不能自适应调控。

高能耗机械装备低效运行现状利用透平压缩机低效运行工程实例进行分析，如表2所示。

往复压缩机组和泵运行负荷偏离设计工况也非常严重,某石化炼油分部 6 000 V 压缩机效率测算数据如表 3 所示。表 4 为某企业泵设备运行效率统计。

原因之二:企业管理问题。装备能耗的评定与节能监管体制尚不健全,生产运行节能没引起全社会足够重视。许多行业对企业高能耗装备的运行能效监测和技术经济评定没有健全的制度,装备节能监管力度不够,节能技术改造措施难以实施;工业装备能耗指标对国企领导政绩的影响没有得到充分体现;企业设备管理部门只负责维修和安全,节能部门往往只重视工艺系统的节能,对装备运行能效

监测评估和节能重视不够;流程工业检修时间紧迫,关键机组无备台,节能改造风险大,企业不愿也无暇顾及;有的机组靠牺牲装备效率保生产安全,还有的为降低生产成本,设备不坏不修,以至酿成事故。

原因之三:政府导向问题。我国缺乏在役装备运行能效的监测评价体系和考核制度,尚无相应的法规和技术标准体系。科技投入重“顶天”轻“立地”;重高新技术赶超国际先进水平,轻解决企业工程实际问题。在先进制造领域,各种基金和重大项目投入都以研制新型高端装备和机械制造工艺技术为主,在流程工业生产装备运行节能科技创新

表 1 某企业集团炼油板块压缩机故障情况

年度	总台数/台	功率 200 kW 以上的压缩机台数/台	故障次数/次	故障停机时间/h	故障率/%
2008	1 373	1 169	370	15 502	27.00
2009	1 418	1 223	366	12 066	24.70
2010	1 399	1 209	416	15 742	29.70

表 2 透平压缩机组低效运行工程实例

装备名称(型号)	所在装置	设计效率/%	运行效率/%	低效主要原因	检测单位	所属单位
透平机(CT5102)	加氢精制	70	32.22	压缩机负荷较小, C1101 体积负荷仅 61%, C5102 负荷更低	中国石油石化节能监测中心	某石化分公司炼油厂
压缩机(C5102)		75	55.98			
透平机(CT1101)	加氢裂化	70	64.71	密封间隙超标, 喷嘴与叶片间隙超标; 喷嘴或叶片变形	北京化工大学	某石化分公司化肥厂
压缩机(C1101)		75	60.09			
透平机	合成氨	75	51.00			

表 3 某石化炼油分部 6000 V 压缩机效率测算数据

名称	型号	流量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	效率/%	功率/kW	电机效率/%	负载率/%	电机利用率/%
氢压缩机	BTD-NICC	2 000	38.7	186	75.6	53.1	29.3
氢压缩机	2D12-5.2/14-84	2 200	29.4	286	86.1	80.6	25.3
氢压缩机	4M80-30/2.2-200-BX	16 590	37.9	2 088	71.0	67.8	26.9
燃料气压缩机	LG-68/6	4 080	33.5	332	68.0	60.4	22.8
燃料气压缩机	2D16-74/16-BX	3 640	67.5	147.2	40.1	65.2	27.1

表 4 某企业泵设备运行效率统计

设备	< 51 %/台	51 %~70 %/台	70 %~83 %/台	> 83 %/台	备注
装置 1	13	0	1	1	1963 年投产, 2007 年改造
装置 2	16	5	1	0	1990 年投产
装置 3	10	5	2	3	1998 年投产
合计	39	10	4	4	—

方面的支持比较薄弱。

原因之四：人才培养和教育问题。人才培养重创办世界一流大学，轻培育对国家最有用的大学。在高等教育领域，目前传统的单学科划分往往形成壁垒，不利于培养善于解决复杂工程问题的交叉学科人才；对工业过程、装备与控制交叉学科人才培养重视不够，不利于培养善于解决诸如装备与过程、控制的系统和谐设计及高效运行等复杂工程问题的交叉学科人才。

工业装备绿色化、智能化工程要立足于工业装备全寿命周期，即工业装备的设计、制造、运行、在役再制造和再制造等阶段，还要考虑与生产过程的和谐适应，确保工业装备自身和生产过程的安全、节能、节材和环保，实现绿色化、智能化，如图2所示。

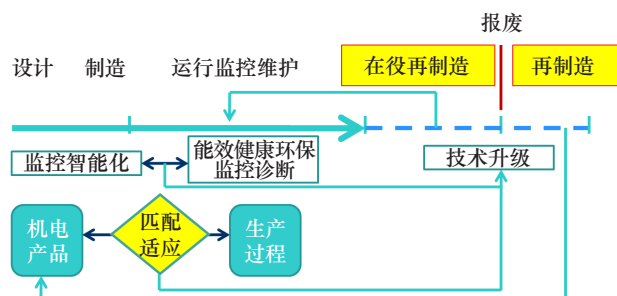


图2 流程工业装备全寿命绿色化、智能化工程

二、绿色设计制造

长期以来，我国许多工业装备技术以消化吸收、仿制为主，缺乏自主创新品牌^[8]；低能耗与轻量化的绿色设计技术基础薄弱，既缺乏绿色设计理念，又缺乏绿色设计监管。工业装备设计要特别重视与生产过程的匹配，改变实际运行远离设计工况且设备自适应能力差的现状。此外，还应做到：①面向环境的设计，使装备运行与环境友好；②在满足使用功能、保证力学强度和使用寿命的前提下，简化结构，实现装备的轻量化，达到节材和节能的效果；③将科技进步的新理论、新理念、新材料、新工艺、新技术及时融入设计中，从而改进设备结构、提升运行监控水平，有效提升设备的绿色化程度；④在设计过程中增强可回收的意识，使设备结构具有多重可回收性，推进资源循环利用；⑤使先进成形技术向数字化、减量化、短流程、精密化、复合化、绿色化、智能化方向发展，装备零部件毛坯制

造趋向近净成形——精确锻压成形、精确轧制成形、无模铸造精密成形、无废弃物制造促进循环利用等^[1]。

三、健康能效监控智能化

美国等发达国家对装备的故障预测和健康管理（PHM）与基于工业互联网大数据分析和优化决策高度重视，通用电气公司（GE）将其称为新一轮工业革命浪潮^[9]。中国工程院也提出，数字化、信息化、网络化、集成化、智能化是科技革命和产业变革的必然趋势，我国流程工业加快转变经济发展方式要抓住这个难得的重大机遇。

对工业装备而言，运行是其设计制造的目的，也是发挥其功效、创造价值的阶段，绿色运行至关重要。对我国工业企业尚存大量低效运行、故障频发的机械装备，应发展基于工业互联网的装备健康能效监测诊断系统，诊断分析机器服役存在的问题，为装备的安全和高效运行提供科学依据和技术支撑。我国在这一方面已取得可喜的成果，自主开发的健康监测诊断系统在国内大量推广应用，如国内企业应用的往复压缩机组监测诊断系统95%以上是自主生产的，图3是应用于石化、冶金、风力发电等的网络化装备远程监测系统；石化、冶金、机械的用户和制造厂已对数千台关键机组进行远程实时监测和故障诊断，通过远程监测中心预警，曾避免多起氢气爆炸等重大事故^[1]。我国自主开发的高能耗设备能效监控和节能改进指导系统与往复压缩机流量自适应无级调控系统分别如图4和图5所示。

工业装备运行绿色化、智能化是对设备运行状态进行实时健康诊断和能效监控，以便及时维护，避免重大事故，并通过智能调控使装备运行与过程相适应，从而提高装备运行能效，并使整个工艺流程能耗和排放降到最低水平。

四、在役再制造工程

鉴于我国石化、冶金等企业高能耗、机械“大马拉小车”低效运行普遍存在的现状，有必要开展在役再制造工程。在役再制造工程（remanufacture engineering in service, REIS）是以装备健康能效监测诊断理论为基础指导，以在役老旧和性能低下的

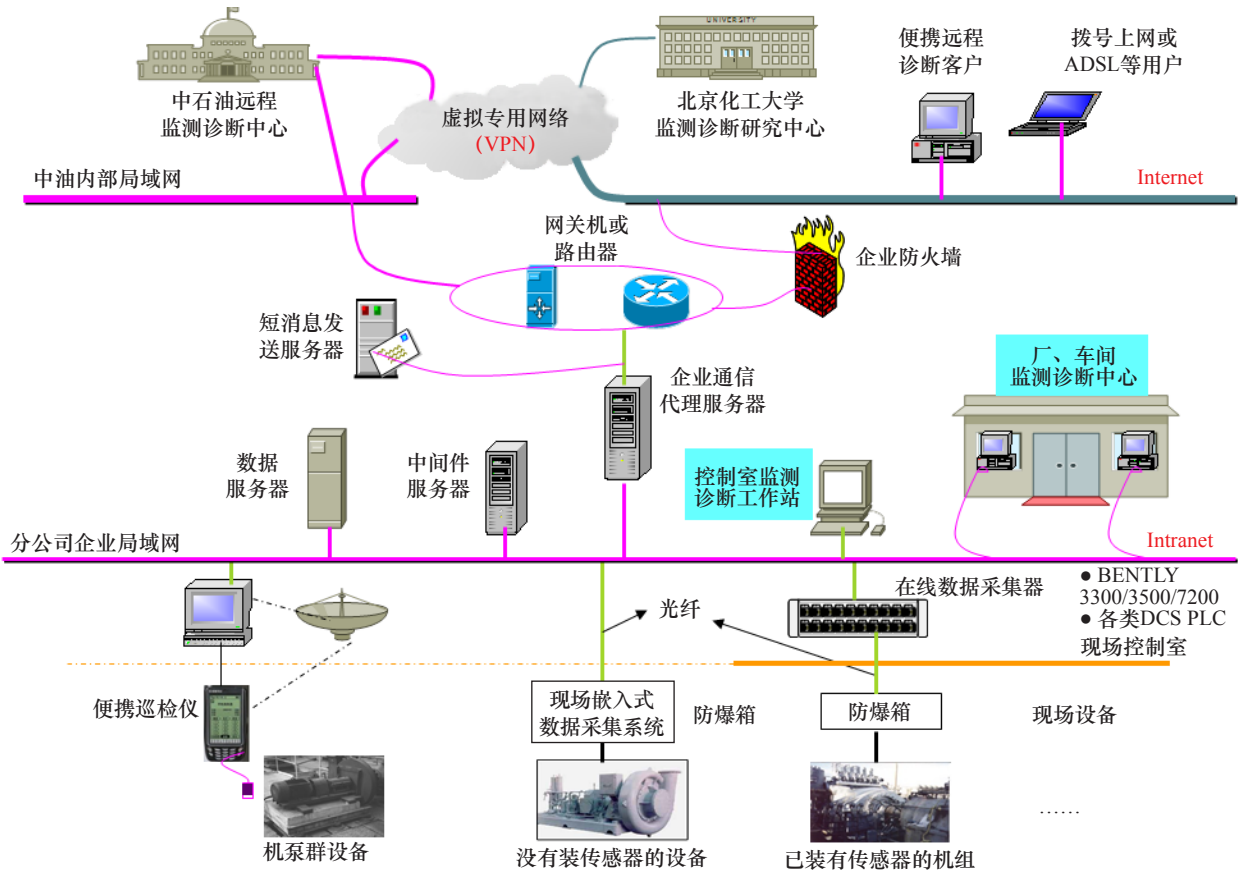


图3 基于工业互联网的装备远程健康监测诊断系统

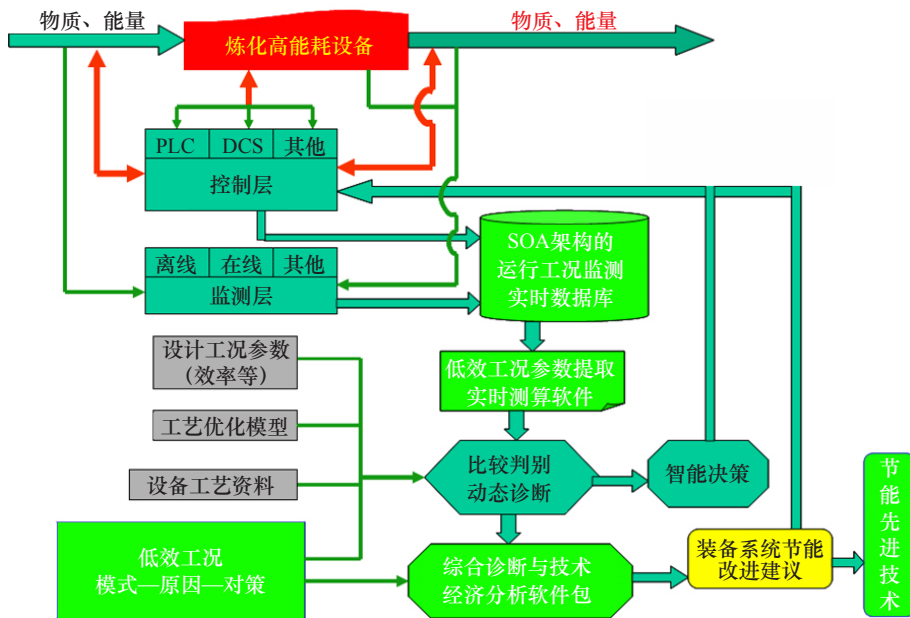


图4 高能耗设备能效监控和节能改进指导系统

注：SOA为面向服务的体系结构。

机电装备实现提升健康能效和智能化水平为目标，以再制造后的装备更适应生产为需求准则，以先进

技术和再设计为手段，进行改造机电装备的一系列技术措施或工程活动的总称。对在役老旧和性能低

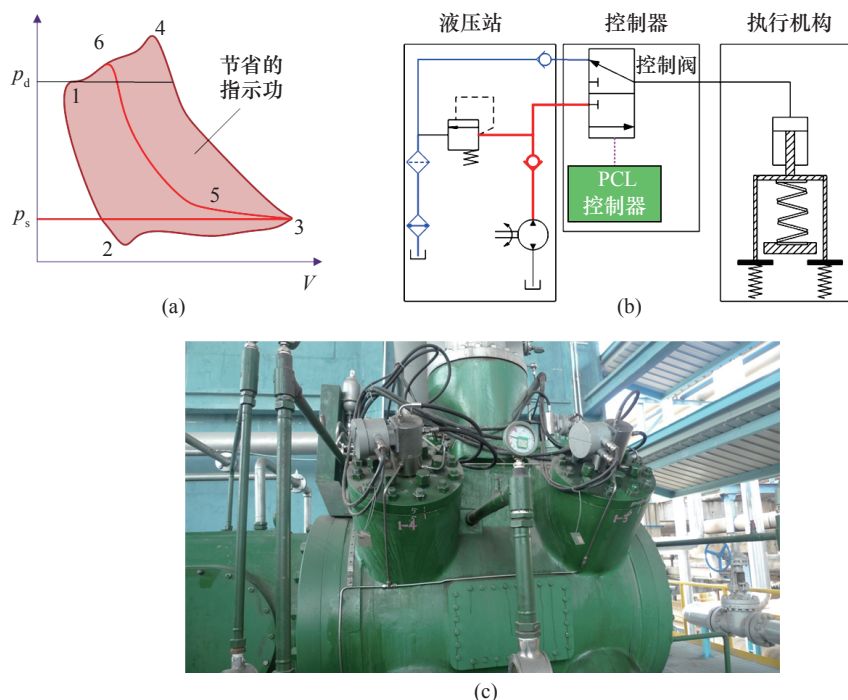


图5 往复压缩机流量自适应无级调控系统

下、故障频发的装备进行健康能效监测和系统诊断，可准确查明存在的问题，有的放矢地进行个性化再设计，可使装备与过程比原设计更匹配，并提高其智能化水平。在役再制造工程可确保装备系统安全、节能、环保、长周期运行，降低生产成本和产业升级成本，也为我国装备制造业可持续发展和培育新兴服务型在役再制造产业提供新的机遇和市场。

简而言之，在役再制造工程就是在役机电装备高技术改造升级的服务型产业，其主要内容包括以下四个方面。

- (1) 对在役老旧装备进行健康能效监测和系统诊断，查明存在的问题。
- (2) 以提高健康能效、智能化水平和适应生产系统需要为目标，应用新技术进行再制造设计。
- (3) 按再制造设计要求，进行机件和调控系统的预制。
- (4) 在适当时对装备进行再制造。

对流程工业装备实施在役再制造使在役老旧和性能低下的机电装备重焕青春，大大提高装备的健康、能效、智能化水平，是实现更清洁、更健康、更安全和可持续发展的重要举措。以高效可靠为目标和基于运行诊断进行的新概念设计是在役机电装

备高技术改造升级的前提。在役再制造可将我国基础工业从大规模扩大生产装置引导至向提高现有生产装备技术水平、节能降耗、提高国际竞争力过渡的道路上，发展循环经济的同时发展产业升级，在役再制造将发挥重要作用。

在役再制造工程与再制造工程有所不同，再制造工程 (RE) 是使废旧机器起死回生，而在役再制造工程是使性能低下、故障频发、技术落后的在役装备重新焕发青春，并提高性能和智能化水平。再制造工程与在役再制造工程之间的关系如表5所示。

钢铁、石化等流程工业产能过剩，今后不可能大规模增容扩建，流程工业装备制造业如压缩机、风机、冶金机械等如何可持续发展是我国经济发展和实施制造强国战略面临的必须解决的重大问题，在役再制造也为发展新兴服务型在役再制造产业、为我国装备制造业未来可持续发展提供新的机遇和市场。与此同时，流程工业装备制造企业也必须提高装备设计制造的绿色化、智能化水平。

目前，大多数企业对装备节能技术改造重视不够，特别是关键机组无备台，节能改造风险大，企业不愿也无暇顾及。中国石油化工集团公司（以下简称中石化）和中国石油天然气股份有限公司（以

下简称中石油)有的企业与装备制造厂家合作,对有些效率低下的机组成功进行了再制造,均在当年回收成本,节能效果十分显著。

透平压缩机组在役再制造工程案例之一:中石化某分公司 $8 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 催化裂化装置,富气压缩机-汽轮机组由美国 ELLIOTT 公司引进。投产后实际需要气量为 $33\,000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,比机组设计正常点流量 $42\,000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 少了 $9\,000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,机组长期在防喘振阀 14% 开度下运行。

主要再设计改造内容为应用新技术只改造压缩机通流部分:①采用三元流场设计,提高通流部分气动效率;②叶轮级间口环密封采用金属软密封,

减少级间内泄漏;③采用反旋绕式平衡盘密封,降低平衡盘气流扰动激振。透平压缩机再制造原理及结构如图 6 所示。改造前后的运行参数对比如表 6 所示。改造投资 360 万元,全年工作 8 000 h 可节约运行成本 512 万元。

透平压缩机组在役再制造工程案例之二:中石化某分公司 2# 催化裂化烟机,设计效率最大为 82%,实际运行效率仅为 69.58%。改进措施:①采用全新的全三维有黏气动设计,烟机的最佳工作点在最高效率点上;②叶片型面采用复合弯扭设计,减少催化剂的堆积,提高效率同时减少二次流产生的磨损;③改进了密封和烟机排气壳体。改造前后

表 5 在役再制造工程与再制造工程之间的关系

项目	在役再制造工程	再制造工程
对象	老旧、健康能效状况差的在役机械装备	有剩余寿命的废旧零部件作为再制造毛坯,过时产品局部改造
目标	提高生产线上在役装备健康能效和智能化水平,适应生产系统需求	再制造工程使废旧机器起死回生,批量化再制造出与原来一样的机器,性能质量达到或超过新品
特点	对众多企业同类在役老旧装备进行个性化技术升级的专业化产业	对废旧产品进行的专业化、批量化的修复与改造
理论基础和关键技术	健康能效监测和系统诊断的再设计,自愈化、自优化理论	再制造剩余寿命评估基础理论与相关技术、表面工程技术,装备智能自愈合、自修复的材料和技术
意义	发展产业升级经济:研制-使用-诊断再设计-升级-使用	发展循环经济:研制-使用-再生-使用

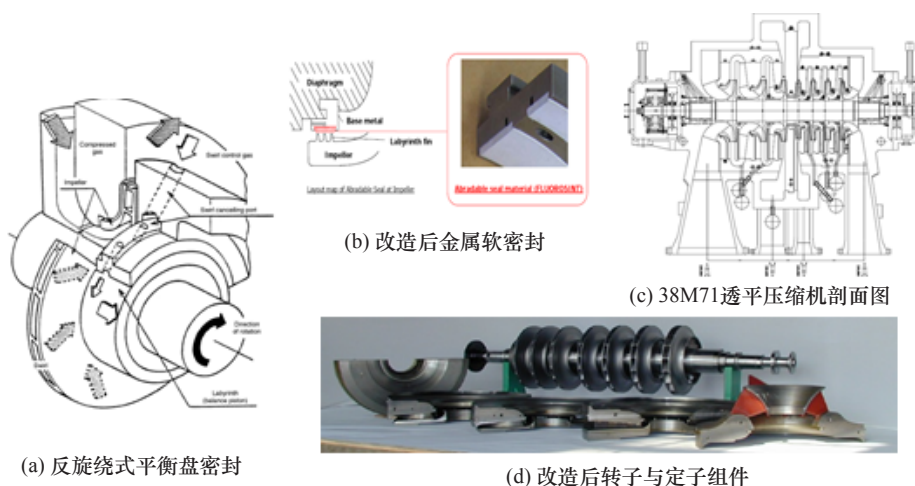


图 6 38M71 透平压缩机再制造原理及结构示意图

表 6 改造前后运行参数对比

运行参数	流量 $/(\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	进出口压力 $/ \text{MPa}$	防喘振阀 开度 /%	转速 $/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	功率 $/ \text{kW}$	工作范围 /%	蒸汽流量 $/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	整机效率 /%
改造前	42 000	0.16/1.6	14	6 536	4 300	75~90	66	74
改造后	33 000	0.16/1.6	0	6 559	3 530	75~105	58	79~80

的运行参数对比如表 7 所示。新烟机效率提高到 86%，投资成本只需 10 个月就可收回。

往复压缩机无级气量调节技术升级案例：中石油某企业对七台往复压缩机采用无级气量调节技术升级改造，每年节电 3 687 万度，年创效益 2 581 万元，改造投资 2 000 万元，当年可收回投资，如表 8 所示。

五、绿色化、智能化科技发展战略与对策

流程工业装备绿色化和智能化科技发展是实现制造强国战略的重要组成部分，要予以足够的重视。首先要理念创新，要从大规模基建扩容向发挥好现有生产设施和装备的作用转变，特别要重视在役工业装备的安全和节能运行。我国工业和信息化部等政府主管部门要做好顶层设计，制定发展战略和规划。以石化、冶金行业高能耗机械装备为重点，调查发达国家高端能动机械健康和能效监控的发展现状和趋势，深入了解我国的现状和差距，提出我国重点发展、自主创新方向和发展战略新兴产业的对策措施，提出以我国流程工业装备绿色化、智能化为目标的在役再制造工程发展路线图。

（一）科研投入适度向装备健康能效监测诊断和在役再制造工程领域倾斜

重视发挥现有生产设施和装备的作用，提升企

业技术和智能化水平。力争在重大科学问题和关键核心技术上实现革命性突破，提出并支持在役再制造工程发展的共性关键技术。建议开展如下专题研究和推广应用工作。

（1）基于工业互联网的流程工业机械装备健康能效监测诊断系统，多参数监测的健康综合诊断和大数据分析能效评价体系。

（2）开发基于监测诊断的个性化设计和在役再制造关键技术，确定流程工业机械装备再制造重点工程。

（3）开发流程工业机械装备智能联锁停车保护和故障自愈调控系统以及装备与过程复杂工况适应的自优化调控节能技术。

（二）培养工业装备节能专业人才，建立节能专业队伍

高等教育要改变单一专业的一级学科划分体制，逐步增设交叉的一级学科，如过程工业装备与控制工程等，培养装备与过程和谐设计及高效运行等交叉学科人才；同时提高工程技术人员和一线操作人员水平，科学运行高能耗设备，在降低设备故障率的基础上提高设备使用效率和管理水平。

（三）重视装备与生产过程系统的和谐设计和审查监督，提高绿色化、智能化和节能设计水平

设计单位要强化节能、安全等系统设计和审查，

表 7 改造前后运行参数对比

运行参数	整机实测效率/%	改造成本/万元	改造后每小时多发电量/kW	多创造年收益/万元
改造前	69.58			
改造后	86.00	800	1 800	930

表 8 往复式压缩机无极气量调节系统节能一览表

装置	设备名称	设计流量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	实际流量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	电机功率/kW	改造前电流/A	改造后电流/A	投用时间	全年节电/万度
二加氢	4M50 新氢机	29 400	22 000	3 200	260	160	2013/6/1	795
连续重整	4M40 增压机	25 459	15 000	2 100	200	165	2013/11/10	278
二套制氢	2D32 原料气增压机	25 920	20 000	800	55	35	2013/11/25	159
汽油加氢	2D12 新氢机	7 200	2 500	355	52	34	2014/2/1	143
加氢裂化	C-1002A 新氢机	33 000	8 000	3 400	260	190	2014/3/31	560
柴油加氢	4M80 新氢压缩机	35 334	11 550	3 100	216	91	2015/1/28	1 000
柴油加氢	4M40 氢气压缩机	60 000	24 000	2 500	175	81	2015/1/28	752
合计					1 218	756		3 687

从设计源头抓起,从系统工程、环境工程、综合利用、运行可靠性的角度来构思与设计,重视装备与过程匹配,避免实际运行出现“大马拉小车”的现象。提倡研制设计对复杂工况可自适应调控的装备系统,提高智能化水平。加强对高能耗装备系统设计及运行能效的评价和监督。

六、政策建议

(1) 推行依法节能,加大高能耗设备运行能效的监管力度,对工业装备实行充分、合理利用能源的“光盘政策”。建立第三方机构,负责工业装备监测和评估装备效能等级;完善和推广应用基于工业互联网的装备健康能效监测诊断体系,制订和实施机组安全节能绿色化评级标准;对严重超标的企业严令其限期整改。

(2) 扶植培育在役再制造等新兴服务型产业。以降低运行成本及增进技术进步为目的,建立在役再制造节能风险机制,实施减免税政策。

(3) 科研投入和人才培养适度向工业装备绿色化、智能化工程等交叉学科倾斜,提出并支持工业装备绿色工程发展的共性关键技术,重视发挥现有生产设施和装备的作用,提升企业装备技术和智能化水平。

(4) 重视相关领域国家与行业标准的修改及制订工作;明确企业及主管部门责任,设计部门要以用户应用装备取得效益为宗旨,制订和实施机组与过程和谐设计规范及考核机制。企业设备部门要管设备节能。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知, 国发(2015)28号 [Z]. 2015-05-08.
- [2] 中国工程院“工业绿色发展工程科技战略及对策”项目组. “工业绿色发展工程科技战略及对策”项目综合报告 [R]. 201505, 北京: 中国工程院, 2015.
- [3] 高金吉, 张连凯. 中国高能耗机械装备运行现状及节能对策研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [4] 王基铭. 中国石化工业现状与发展及重大石化装备国产化 [J]. 当代石油石化, 2006, 14(4): 1-6, 49.
- [5] 吕运容, 陈学东, 高金吉, 等. 我国大型工艺压缩机故障情况调研及失效预防对策 [J]. 流体机械, 2013, 41(1): 14-20.
- [6] 秦国良. 大型透平压缩机技术发展现状及趋势 [J]. 通用机械, 2012(10): 37-39.
- [7] 潘志旸, 韩俊英. 压缩空气系统节能 [J]. 通用机械, 2005(3): 14-16.
- [8] 姜红. 加快中国装备制造业发展的意义与对策 [J]. 边疆经济与文化, 2004(11): 47-51.
- [9] Evans Peter C, Annunziata Marco. Industrial internet: Pushing the boundaries of minds and machines [R/OL]. General Electric, 2012-11-26[2012-11-28]. http://www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf.