



Development Strategy Research on
Health & Efficiency Intelligent Monitoring and Control of
China High-end Energy Power Machinery

中国高端能源动力机械 健康与能效监控智能化 发展战略研究

中国工程院“我国高端能源动力机械健康
与能效监控智能化发展战略研究”项目组



科学出版社

中国高端能源动力机械健康与能效 监控智能化发展战略研究

Development Strategy Research on Health & Efficiency Intelligent
Monitoring and Control of China High-end Energy Power Machinery

中国工程院“我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发
展战略研究”项目组



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是中国工程院“我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展战略研究”重点咨询项目的研究成果,汇编项目综合报告和三个课题的研究报告的主要内容。简要介绍我国石化、冶金、电力及航空等行业能源动力机械装备概况和运行现状;分析高端能源动力机械健康与能效监控智能化国内外发展趋势,提出我国的发展战略、发展思路,以及重大示范工程和研究课题;最后给出我国高端能源动力机械健康与能效智能化发展的政策建议。

本书可供能源动力工程领域领导部门、工业企业和设计院所的领导、专家、工程技术人员使用,也可供科研工作者和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展战略研究=Development Strategy Research on Health & Efficiency Intelligent Monitoring and Control of China High-end Energy Power Machinery / 中国工程院“我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展战略研究”项目组编. —北京: 科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055313-3

I. ①中… II. ①中… III. ①能源—动力装置—智能技术—研究—中国 IV. ①TK05

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第279678号

责任编辑: 范运年 武 洲 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018年3月第二次印刷 印张: 13 1/2

字数: 270 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《我国高端能源动力机械健康与能效 监控智能化发展战略研究》

项目组成员名单

顾问：周 济 院士 周长益 司长

项目组组长：高金吉 院士

副组长：钟 掘 院士

成 员：闻邦椿 院士 陈予恕 院士 王玉明 院士

钟群鹏 院士 甘晓华 院士 谭天伟 院士

王国栋 院士 尤 政 院士 陈学东 院士

刘文强 王孝洋 何正嘉 杨国安 何立东

江志农 叶长青 吕运容 李崇坚 姜尚清

刘华强 王 尚 杨勇平 张俊杰 杜小泽

王宁玲 薛洪涛 徐小力 杨申仲

总 执 笔：杨国安

编写组成员名单

主 编：高金吉 院士

副 主 编：姚剑飞 杨国安

项目办公室：杨国安 张宇飞 李 潇 明 岳 薛凯璇

石化冶金高端压缩机组：

顾 问：王国栋 院士 钟 掘 院士

组 长：陈学东 院士 李崇坚

副 组 长：叶长青 姜尚清

成 员：吕运容 周 敏 何承厚 李信伟 杨树华

何立东 江志农 李连生 于跃平 张成彦

蔡隆展 吴乔国 袁庆斌 聂德福 王 乐

杨启超 赵远杨 肖 军 苏福源 曹先常

柳黎光 王维兴 贾江平 李 健 郭雨春

董荣华 王 喆 朱孔林 王新东 严开勇

王昭东 杨 荃 孙汉兵 孙彦广 高 达

彭宪建 刘华强 王 尚

执 笔：吕运容 刘华强 王 尚

高端能源(发电)机组：

组 长：杨勇平

副 组 长：张俊杰 杜小泽

成 员：秦海岩 梁昌乾 吕廷彦 严新荣 张 健

张 军 张 勇 王红军 牛玉广 顾煜炯

刘永前 柳亦兵 薛 伟 杨志平 王宁玲

唐宁宁

执 笔：杜小泽 杨志平 王宁玲

航空发动机及燃气轮机：

组 长：甘晓华 院士

副 组 长：尤 政 院 士

成 员：蒋东翔 阮 勇 孙超英 薛洪涛 魏德明

宋志平 杨 立 尉询楷 胡晓煜 杜嘉陵

钟诗胜 付旭云 张 弓 吴 新 杨玉宝

杜 辉 殷 锴 支 远

执 笔：薛洪涛

序

改革开放以来，中国在经济建设方面取得了举世瞩目的辉煌成就。我国制造业总量已超过美国，跃居世界第一，钢产量占世界总量一半以上；我国乙烯和炼油居全球第二位，是世界石化大国。在我国经济快速增长的同时，粗放型增长方式的弊端也有所突显，经济发展与资源环境间矛盾的日趋尖锐，特别是高能耗问题已成为制约经济发展的瓶颈。我国炼化行业许多企业处于亏损状态，钢铁和部分石化行业的生产能力已经过剩，因此，不能总是依靠扩大生产规模来实现经济的快速增长，今后如何提高生产设施和装备的技术和智能化水平，确保其高效经济运行、降低生产成本、提高国际竞争力，是摆在我国工程科技领域面前的一个迫切需要研究和解决的重大问题。

党中央从战略高度出发，明确提出，中国今后发展以加快转变经济发展方式为主线。加快转变经济发展方式的根本，在于科技创新驱动，落实节能优先战略。提升我国能源动力机械装备的长周期运行效率，以最低资源和能源消耗获得最大效益，是转变发展思路、创新发展模式、加快经济结构调整和经济发展方式转变的重要举措。

能源动力机械，如透平、轴流、往复式压缩机组、大型风机、燃气轮机组、航空发动机、超临界和超超临界透平发电机组、风力发电机组等是国家经济发展和国防建设的关键能源动力装备。当前我国能源动力机械普遍存在两个突出问题：一是安全运行周期短，故障率较高；二是偏离设计工况运行，效率偏低。而发展健康与能效智能监控技术是提升机械装备长周期、高效稳定运行的关键所在。随着计算机网络技术的快速进步，利用工业互联网、物联网、云计算及大数据等技术提升高端能源动力机械健康与能效远程监控智能化水平是未来发展的重要方向。

2013年元月，中国工程院正式启动了“我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展战略研究”重点咨询项目，由机械运载学部组织的10位院士和近百名专家参与调研工作，中国工程院周济院长亲自参与项目的研究并予以指导，工业和信息化部有关领导和专家也大力支持和指导了项目研究工作。项目选取石化冶金、能源电力及航空领域等具有代表性的行业的能源动力机械为调研对象，经过一年多的调研，对我国能源动力机械装备概况、运行现状及发展趋势及目标等方面进行了深入研究，提出了高端能源动力机械健康与能效智能化监控发展的战略对策，在三个课题研究报告的基础上，形成了《中国高端能源动力机械健康与

能效监控智能化发展战略研究》项目研究报告，并由科学出版社出版。

工欲善其事，必先利其器。本书从设计、制造、工艺、控制、操作、管理等方面，深入探讨分析了我国能源动力机械低效运行的根本原因，提出了发展健康与能效智能化监控的战略对策，以确保我国能源动力机械装备长周期、高效、稳定运行，降低维护和生产成本。同时，也为我国流程工业在役再制造和发展绿色智能装备打下基础。

感谢各位领导和专家对本咨询项目工作的大力支持，感谢“我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展战略研究”咨询项目各课题组成员、有关领导、专家的辛勤工作，感谢大家为中国能源动力机械长周期、高效、稳定运行做出的积极努力！

中国工程院“我国高端能源动力
机械健康与能效监控智能化发展
战略研究”项目组 组长

高金吉

2017年8月

前 言

能源动力机械如压缩机组、发电机组、航空发动机及燃气轮机等，是国家经济发展和国防建设的关键能源动力装备。石化、冶金、能源等流程工业生产装备如压缩机组、发电机组等，具有大型化、复杂化、生产工艺自动化、连续化的特点，设备投资巨大、能耗物耗与经济利益直接相关，故障引起非计划停产不仅会带来巨大的经济损失，还可能导致机毁人亡的重大事故。以陆用燃气轮机、航空发动机为代表的大型燃气涡轮机械是国家实现节能减排、资源可持续发展的必要装备，也是国防实力的象征，已被列入国家中长期科学和技术发展规划纲要的优选主题。

当前，我国能源动力机械普遍存在两个突出问题：一是安全运行周期短，故障率较高；二是偏离设计工况运行，效率普遍偏低。如国内同类机组设计效率比国外先进水平低 2%~5%，连续运行周期只有国外领先水平的 1/2~2/3。在设计、选型、订购、引进装备时，只注重设备本身的效率，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能力差，造成“大马拉小车”低效运行情况普遍存在。

发展健康与能效智能监控技术是解决上述两个突出问题的关键所在。近些年来，石化、冶金、电力行业逐步对行业内能动机械进行更新换代与改造升级，机组健康与能效水平显著提升，节能效果明显。如某石化企业进行机组控制优化改造后，每小时节约蒸汽 9t，年节约 1400 余万元。在取得显著收益的同时，我国能源动力机械健康与能效监控技术的研究基础却较为薄弱，缺乏对机组能耗、排放、经济与生态效益的综合考虑，普遍存在在线远程智能监测、诊断及故障早期预警能力不足等问题。另外，现有监测系统市场大多被 GE 公司、Siemens 公司等外企占有，关键技术被其垄断。我国能效检测评价标准的缺失，也阻碍了机组能效评价工作的开展。

长期以来，众多企业缺乏对大型透平压缩机、往复压缩机低效运行的关注，尚未配备低效工况监测系统和高耗能设备效率分析诊断系统，部分机组的运行效率比设计效率低，且众多机组仍采用单体、分散式控制方式，缺乏先进的综合优化控制系统。发电机组健康与能效监控以设备层面为主，缺乏精确测量关键参数的手段和技术，系统集成优化与协同功能和机组健康与能效演化趋势的预测能力不足。同时，目标和评价方法单一，不能满足发电能源动力机械安全高效和清洁运行的要求。国内航空发动机与燃气轮机健康与能效监控管理技术研究基础十分

薄弱,产业化程度低,没有成熟的国产成套产品,传感器等基础工业薄弱,难以支撑航空发动机与燃气轮机健康与能效监控技术发展。

为此,中国工程院于2013年1月正式启动了“中国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展战略研究”重点咨询项目。由中国工程院高金吉院士担任项目组组长,近百名专家参与此项研究工作。综合考虑能源动力机械在各行业的分布情况,项目分别选取以压缩机组为核心的石化冶金行业、以发电机组为核心的电力行业以及以燃气轮机、飞机发动机为代表的大型燃气涡轮机械,调研上述行业和领域中能源动力机械的分布情况、健康与能效现状及其存在的问题,研究我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展趋势和目标,提出符合我国国情、能够切实推动高端动力机械健康高效运行的政策建议。

经过一年多的调查和研究工作,形成了石化冶金、能源电力及航空领域的高端动力机械健康与能效监控智能化专业研究报告,在此基础上,项目组总结归纳出了综合报告,多次听取项目组专家的意见和建议,仔细核对和修改,最终形成了项目综合报告。报告共分概况、现状、发展趋势及目标、战略对策、结论和建议五部分。报告详细对比分析了国内外能源动力机械健康与能效监控智能化现状及其发展趋势;确立了我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化的总体战略思路,即夯实产业基础,科技创新驱动,科学政策引导,专业人才培养;提出了8项健康与能效监控智能化发展重大示范工程和21项建议重点开展的研究课题;并就我国高端能源动力机械健康与能效智能化发展提出了相应的政策建议。

在项目的立项和实施过程中,中国工程院院长周济院士亲自到会指导工作,工业和信息化部领导多次了解调研情况,体现了领导的高度重视。现场调研过程得到了各方人士的广泛支持,在此一并表示感谢。

根据项目组院士专家的建议和立项要求,项目组将此项研究成果汇集成册出版,奉献给关心和支持我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展的政府机构、企业、科技界、教育界以及社会其他各界人士,以期能够对我国高端能源动力机械的健康与能效监控智能化发展以及改变我国高耗能动力装备低效运行现状、降低生产成本、提高国际竞争力有所裨益。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编 者

2017年8月

目 录

序

前言

第 1 章 我国能源动力机械运行状况及重大需求	1
1.1 能源动力机械及本报告研究领域	1
1.2 我国在设能源动力机械健康与能效状况概述	3
1.2.1 压缩机组	3
1.2.2 发电机组	7
1.2.3 航空发动机及燃气轮机	14
1.3 我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化的重大需求	17
1.3.1 高端压缩机组健康与能效监控智能化的重大需求	18
1.3.2 发电机组健康与能效监控智能化的重大需求	19
1.3.3 航空发动机及燃气轮机健康与能效监控智能化的重大需求	20
1.4 小结	21
第 2 章 能源动力机械健康与能效监控智能化现状	22
2.1 国外高端能源动力机械健康与能效监控智能化现状	22
2.1.1 压缩机组	22
2.1.2 发电机组	45
2.1.3 航空发动机及燃气轮机	55
2.2 我国能源动力机械健康与能效监控智能化现状	84
2.2.1 压缩机组	84
2.2.2 发电机组	96
2.2.3 航空发动机及燃气轮机	102
2.3 我国能源动力机械健康与能效监控智能化存在问题及原因分析	107
2.3.1 压缩机组存在的问题及原因分析	108
2.3.2 发电机组存在问题及原因分析	111
2.3.3 航空发动机及燃气轮机存在的问题及原因分析	113
2.4 小结	115
第 3 章 我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展趋势及目标	117
3.1 我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展趋势	117
3.1.1 高端压缩机组健康与能效监控智能化发展趋势	117

3.1.2	发电机组健康与能效监控智能化发展趋势	124
3.1.3	航空发动机及燃气轮机健康与能效监控智能化发展趋势	135
3.2	基于网络的高端能源动力机械健康与能效远程监控智能化技术及其发展趋势	148
3.3	我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展目标	156
3.3.1	高端压缩机健康与能效监控智能化发展目标	156
3.3.2	发电机组健康与能效监控智能化发展目标	157
3.3.3	航空发动机及燃气轮机健康与能效监控智能化发展目标	158
3.4	小结	159
第4章	我国高端能源动力机械健康与能效监控智能化发展战略对策研究	161
4.1	夯实产业基础	161
4.2	科技创新驱动	163
4.3	科学政策引导、依法规范发展	164
4.4	构建健康与能效监控智能化专业队伍与机构	166
4.5	重点研究方向	167
4.5.1	高端压缩机健康与能效监控智能化发展关键技术	167
4.5.2	发电机组健康与能效监控智能化发展关键技术	172
4.5.3	航空发动机及燃气轮机健康与能效监控智能化发展关键技术	178
4.6	重大示范工程	183
4.6.1	高端压缩机重大创新工程与示范基地	183
4.6.2	发电机组重大创新工程与示范基地	184
4.6.3	航空发动机及燃气轮机重大创新工程与示范基地	184
4.7	建议重点开展的研究课题	185
4.7.1	高端压缩机重点开展的研究课题	185
4.7.2	发电机组重点开展的研究课题	187
4.7.3	航空发动机及燃气轮机重点开展的研究课题	187
4.8	小结	189
第5章	结论和建议	191
5.1	主要结论	191
5.2	主要建议	193
参考文献		195

第1章 我国能源动力机械运行状况及重大需求

1.1 能源动力机械及本报告研究领域

我国制造业总量已超过美国，居世界第一，冶金行业钢产量占世界总量一半以上，居绝对第一位；我国乙烯和炼油产量居全球第二位，是世界石化大国。但是我国炼化行业许多企业处于亏损状态，钢铁和部分石化行业生产能力已经过剩，不能总是依靠扩大生产规模来实现经济的快速增长，今后如何发挥现有生产设施和装备的作用，确保其高效经济运行、降低生产成本、提高国际竞争力，是摆在我国工程科技领域面前的一个迫切需要研究和解决的重大问题。同时，以陆用燃气轮机、航空发动机为代表的大型燃气轮机机械是国家实现节能减排、资源可持续发展的必要装备，也是国防实力的象征，都已被列入国家中长期科学和技术发展规划纲要的优选主题。

能源动力机组如透平、轴流、往复式压缩机组、大型风机、燃气轮机组、航空发动机、超临界和超超临界透平发电机组、风力发电机组等是国家经济发展和国防建设的关键能源动力装备。机组发生故障引起的非计划停产会带来巨大经济损失，并可能造成机毁人亡的重大事故。同时，改变我国高耗能能动装备低效运行的现状也是迫切需要解决的重大问题。

压缩机组是天然气输运与液化、石油开采与炼制、煤液化与煤化工等能源工业的核心装备，也是石化、冶金等领域的重要耗能动力设备，对其行业的发展和节能降耗起着关键性的作用。随着炼化、冶金等装置向大型化、高效化方向发展，对压缩机提出了更高性能、更高可靠性和更高效的要求。据测算，我国炼油、石化、冶金行业的压缩机能耗占全国工业能耗的15%左右，且国产压缩机组普遍存在能耗高、性能不稳定、可靠性差、故障率高和寿命短等突出问题，如设计效率比国外先进水平低2%~5%，连续运行周期只有国外领先水平的1/2~2/3^[1-3]。在运行控制方面，因故障常常不能被及时识别和诊断、异常工况不能被有效地发现和控制，重大设备事故时有发生，严重影响炼化装置的安全生产，经济损失巨大，危及人机安全。由于设备性能参数与工艺流程匹配性差、防喘振保护系统设计安全裕度大，加上能效监控的欠缺，导致机组的实际运行效率普遍偏低。据统计，我国主要石油化工企业（中国石化、中国石油、中国海油）目前拥有在用大型压缩机组（200kW以上）约4000台，设计功率约900万kW。如果通过实施在役改造工程，使压缩机组的运行效率提高10%，每年将节电76亿度，节约成本达46亿元。

冶金方面调研数据显示,仅首钢京唐一家企业就配有大型鼓风机 150 台左右,总功率约 54 万 kW,如果运行效率普遍提高 4%,这些能动机械每年就可节约用电约 10 亿度。

电力是现代文明的标志,是支撑我国经济社会可持续发展的根本保障。电力是重要的二次能源,构筑稳定、经济、清洁、安全的电力能源供应体系,对维护国家安全、实现节能减排战略目标发挥着举足轻重的作用。改革开放 30 多年来,中国电力工业取得了举世瞩目的成就,装机容量和发电量均保持持续快速增长,目前已排名世界第一。近年来发电能源结构不断优化,风电、水电、核电、太阳能等清洁能源发电装机比例逐年增加,火电发电装机比例下降到 70% 以下,随着发电技术不断进步,发电动力装备不断更新换代,发电机组的健康和能效状态显著提升。但由于风电、太阳能发电的间歇性、核电要求的安全性、水电的径流特性,致使火力发电频繁深度参与调峰,加之火力发电参数高、排放要求严,致使机组运行控制难度增大,发电动力装备的深度增效减排和状态维护面临新的挑战,与之相关的发电动力机械健康与能效监控智能化面临重大需求。

航空发动机是为飞机提供动力所需的重要产品,它具有高温、高转速、高可靠性的特点,而且必须满足低污染、低噪声、低油耗、低成本和长寿命的要求。所以,航空发动机是典型的高端机电产品,是航空工业最璀璨的明珠。由于飞机高空飞行的特点以及发动机所处的飞机心脏的地位,在飞机飞行过程中,尽管发动机只是偶有故障,但其故障已经成为影响飞机飞行安全的重要因素。燃气轮机作为一种先进的动力机械,广泛应用于航空、电力系统、动力拖动和舰船,燃气轮机及其联合循环动力装置已成为世界主要动力设备之一。由于其结构复杂,加之在高温、高压和高转速的环境下工作,燃气轮机易于发生各种故障,并且随着运行时间的增长,各部件的特性将会逐渐偏离设计点,造成燃气轮机性能逐渐退化,除此之外,燃气轮机气路通流部分可能遭受到物体打伤造成突发性故障^[4-6]。恶劣的工作条件(高温、高压、强腐蚀、高密度的能量释放)使其成为整个装备系统中故障的敏感多发部位,且其故障的发生和发展具有快速和破坏性极大的特点。燃气轮机故障不仅会造成燃机性能下降,影响燃机的经济性,如果故障不能被及时发现和维修,还将会影响燃气轮机运行的经济性、安全性和可靠性,为此,燃气轮机健康管理和能效监控受到广泛关注。因此,通过监测预警和健康管理等确保安全运行和基于诊断的设计改进,是提高燃气涡轮机械运行可靠性的重要举措,是能源动力工业乃至航空发动机可靠性和安全性工程的重要环节。

综合上述能源动力机械在各行业的分布情况,分别选取以压缩机组为核心的石化冶金行业、以发电机组为核心的电力行业,以及以燃气轮机、飞机发动机为代表的大型燃气涡轮机械,调研上述行业和领域中能源动力机械的分布情况、健康与能效现状及其存在的问题,研究我国高端能源动力机械健康与能效监控智能

化发展趋势和目标，提出符合我国国情、切实推动高端能动机械健康高效运行的政策建议。

1.2 我国在设能源动力机械健康与能效状况概述

1.2.1 压缩机组

石化与冶金行业是能源消耗大户，其生产过程中消耗大量能源，其中，设备耗能是炼油化工装置能耗的主要组成部分。统计表明，石化加工工业综合能耗中，约 30% 为压缩机、风机、泵等通用机械设备消耗，如图 1.1 中的电耗与蒸汽消耗，冶金生产中能动设备占钢铁生产总能耗的 10%~15%，提高压缩机、风机、泵等通用机械设备的健康水平和运行效率是石化、冶金等流程工业节能减排的主要途径之一^[1-2]。

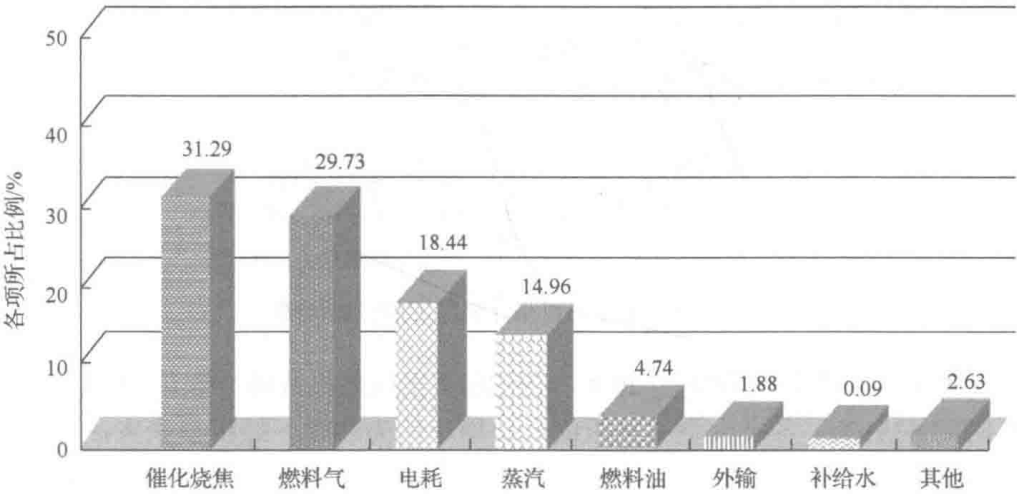


图 1.1 石化加工过程综合能耗构成

目前，我国石化与冶金行业压缩机组普遍存在能耗高、故障率高和寿命周期短等突出问题，大量的低效运行、故障频发的机组在流程工业生产中仍发挥着重要作用，不可能同时大量报废；同时，流程工业连续生产，检修时间紧迫，有些机组能源浪费严重是众所周知的，但装备节能技术改造风险大，企业不愿也无暇顾及。许多压缩机组实际运行效率比设计效率低 5%~20%，事故时有发生。在设计、选型、订购、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能力差，导致“大马拉小车”“小马拉大车”等低效运行状况普遍存在。

美国能源部关于空压机负荷率调查数据表明，中国工业空压机负荷率比全球平均水平低 13%。压缩机组故障较多，重大事故时有发生，调查数据显示，我国

压缩机组的连续运行周期只有国外领先水平的 1/2~2/3，还不能确保安全长周期运行。近年统计，炼化企业各类大型工艺压缩机故障率约为 30%，经济损失大，危及人机安全^[2]。

(1) 石化行业压缩机组故障较多，重大事故时有发生，不能确保安全长周期运行。目前，我国石化行业压缩机组普遍存在能耗高、故障率高和寿命周期短等突出问题，同类机组的连续运转周期只有国外领先水平的 1/2~2/3。据统计，国内某大型石化企业 2007 年至 2010 年加氢裂化、乙烯裂解、合成氨、聚丙烯、重整装置、催化裂化等重要流程工业装置因设备故障造成的非计划停工为 156 次，其中因压缩机设备故障导致的非计划停工约占 13.46%，是造成装置非计划停工的主要原因之一，如图 1.2 所示。

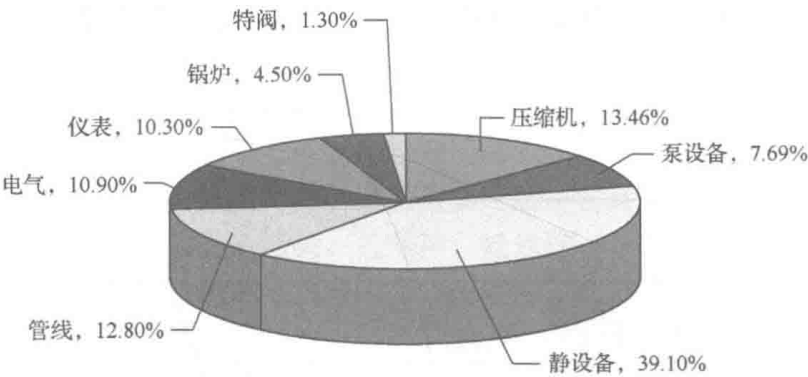


图 1.2 导致装置非计划停工的设备故障

又如国内某石化工业集团 2008 年至 2010 年压缩机故障次数达 1152 次，故障停机时间 43310h，各类大型工艺压缩机故障率约为 30%，经济损失大，危及人机安全，详见表 1.1。

表 1.1 某石化工业集团压缩机故障情况

年份	总台数	压缩机/(200kW 及以上)	故障次数/次	故障停机时间/h	故障率/%
2008	1373	1169	370	15502	27.00
2009	1418	1223	366	12066	24.70
2010	1399	1209	416	15742	29.70

(2) 石化行业部分压缩机组长期偏离设计工况低效运行，实际运行效率比设计效率低 5%~20%。

调研结果表明，石化行业部分压缩机组长期偏离设计工况低效运行，效率比设计效率低 5%~20%。抽样调查透平压缩机组低效运行工程实例如表 1.2 所示，运行效率最低的还没有设计效率的一半；往复压缩机组运行负荷偏离设计工况实例见某企业 6000V 压缩机效率测算数据，如表 1.3 所示；美国能源部关于空压机

负荷率调查数据显示，全球各地区空压机平均负荷百分比如图 1.3 所示，可见，我国工业行业的空气压缩机负荷率要比全球平均水平低 13%^[2-3]。

表 1.2 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			

表 1.3 炼油分部 6000V 压缩机效率测算数据

名称	型号	流量 /(m ³ /min)	效率/%	功率/kW	电机效率 /%	负载率 /%	电机利 用率/%
氢压缩机	BTD-NICC	2000	38.7	186	75.6	53.1	29.3
氢压缩机	2D12-5.2/14-84	2200	29.4	286	86.1	80.6	25.3
氢压缩机	4M80-30/2.2-200-BX	16590	37.9	2088	71	67.8	26.9
燃料气压缩机	LG-68/6	4080	33.5	332	68	60.4	22.8
燃料气压缩机	2D16-74/16-BX	3640	67.5	147.2	40.1	65.2	27.1

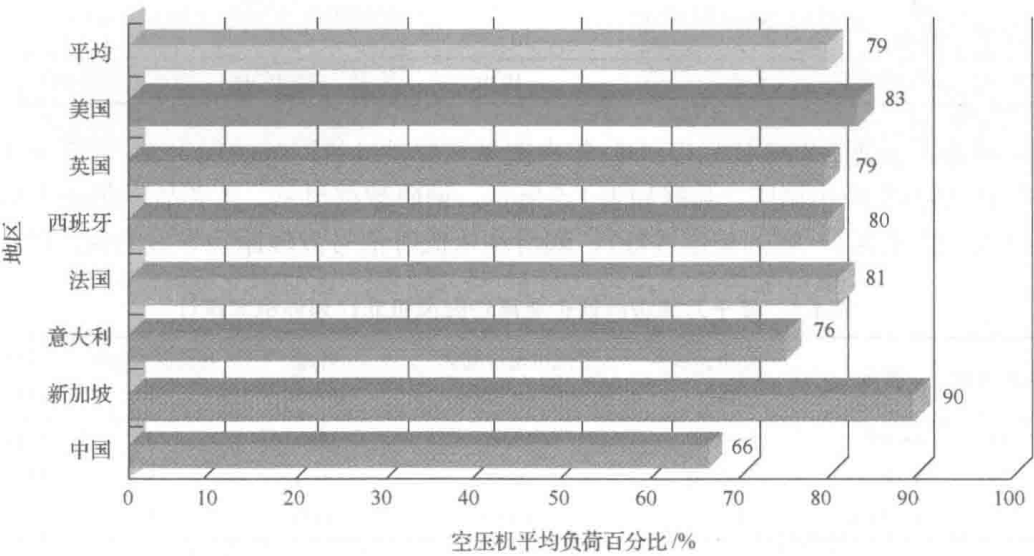


图 1.3 世界各地区空压机负荷对比