

MT 机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

<http://www.cmes.org>

2017 年第 5 期 总第 192 期



人工智能技术在数控机床中的应用 p01

工业 4.0 背景下的人才培养的思考 p06

世界先进制造业群发展的创新模式探索 p11

智能制造本质与变革的效益（上） p16

客车焊装柔性制造系统 p27

高压开关设备数字化驱动技术与装备研究 p35

中国好设计案例选登（十二） p40

目录

CONTENTS

机械工程导报

MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2017 年第 5 期 (总第 192 期)
2017 年 10 月 28 日出版

主办: 中国机械工程学会工作总部
地址: 北京市海淀区首体南路9号
主语国际4号楼11层
邮编: 100048
电话: 010-68799036 (编辑部)
传真: 010-68799050
E-mail: zhongyg@cmes.org
网址: www.cmes.org
主编: 陈超志
责任编辑: 钟永刚
出版: 《机械工程导报》编辑部
发行: 中国机械工程学会工作总部



专家视点 EXPERT OPINION

人工智能技术在数控机床中的应用	1
工业 4.0 背景下的人才培养的思考	6
世界先进制造业群发展的创新模式探索	11



热点关注 CURRENT POINT

智能制造本质与变革的效益 (上)	16
客车焊装柔性制造系统	27
高压开关设备数字化驱动技术与装备研究	35



中国好设计 CHINA GOOD DESIGN

中国好设计案例选登 (十二)	40
----------------	----

人工智能技术在数控机床中的应用



西安交通大学 梅雪松 施虎

一、人工智能的概念

人工智能是一门研究利用计算机来模拟人的某些思维过程和智能行为（如学习、推理、思考、规划等）的学科，涵盖了数据挖掘和深度学习两种数学方法。前者用于统计规律性的发现，从复杂的数据中找出有用的结果；后者强调专业性、技能型的学习，用于建立模拟人思考推理过程的人工智能数学模型。

人工智能的概念提出得比较早，它以数据和计算为基础，是计算机科学的一个分支。当前物联网、大数据和云计算技术发展势头迅猛，为当今人工智能的普及应用提供了条件（人工智能 2.0）（图 1）。人工智能 2.0 发展于大数据的收集与处理能力，有充分数据源的地方，人工智能就表现出非凡的应用，超过人类进行决策。近年来，人工智能在各行业产生了许多典型的典型案例，如：

●沃森医生：计算机通过大数据的学习，实现了对白血病的

精确判断，成为机器医生。在美国通过执业医师资格评定考试的沃森医生，在中国可以支持肺癌、乳腺癌、直肠癌、结肠癌、胃癌和宫颈癌 6 种癌症的辅助治疗。

●百度、科大讯飞等公司人工智能的应用，使得语音识别率已突破 97%；视觉识别率超过 99%。图像处理是人工智能最有价值的应用场景。

●以云计算为平台，人工智能算法为数据处理工具的百度“百度大脑”技术、阿里巴巴的“智能物联”生态圈、以及腾讯的“TOS+”都是人工智能成功的范例。

●2014 年 Google 用所收购的 Deep Mind 公司的神经网络机

器学习技术，将其应用于处理数据，预测耗电量变化，提升设备分配效率。

●通用电气（GE）借助 Predix 平台，实现了人、机、数据之间的互联，能快速获取、分析海量高速运行的航空发动机数据，让客户在安全环境下进行数据分析处理，最终优化发动机各项性能指标。

二、人工智能在机床制造中的应用

数控机床是制造高精度机器、支撑国防和尖端工业发展的战略性基础装备，体现了一个国家先进制造技术的综合水平，在



图 1 现代人工智能技术的发展背景

我国国防军工、航天航空、汽车工业等行业领域应用十分广泛。通常数控机床产品在全生命周期中会产生大量的数据：设计数据、制造数据、应用数据等，但目前对其制造、应用过程等全生命周期的数据没有有效实现记录、分析及应用。将人工智能应用于这一典型产品的全生命过程将会有效提升制造质量，获得良好应用效果。

1. 数控机床制造中的质量监测

数控机床是一个多部件组成的复杂产品，包括基座、立柱、主轴和进给系统，而且各组成零件的制造环节从设计到加工、装配、调试、检测直到现场应用，经历周期长，其间一些指标主要由工人手动完成，人为影响因素较多，传统的从建模角度进行质量问题分析，无法准确描述系统的全部特性。目前，数控机床制造过程的质量关联数据采集主要

依靠纸质记录，数据的完整性、准确性和实时性无法保证，数据丢失情况严重、且没有形成统一管理，无法质量溯源。各机床设计制造企业在设计经验积累和基础知识储备方面能力薄弱，缺乏构建多源原始数据与制造过程关键监控环节间的多层映射关系，使制造过程一些关键环节难以被及时、精确地反映。

引入人工智能技术之后，将制造环节的关键数据（多工序、多源、多结构的制造过程数据）

进行有效保存即可形成图2所示架构的制造大数据，从而有效监测装配过程中机床质量与核心工艺的关联性以及加工过程中机床质量与核心部件的关联性，乃至使用过程中的机床状态与质量关联性。在此基础上，基于这些大数据，应用机器学习、数据挖掘等手段建立设备和产品质量、性能等智能预测评估方法，实现数控机床制造质量的全面监控。

通过开展基于数据驱动的数控机床制造质量分析与控制相关

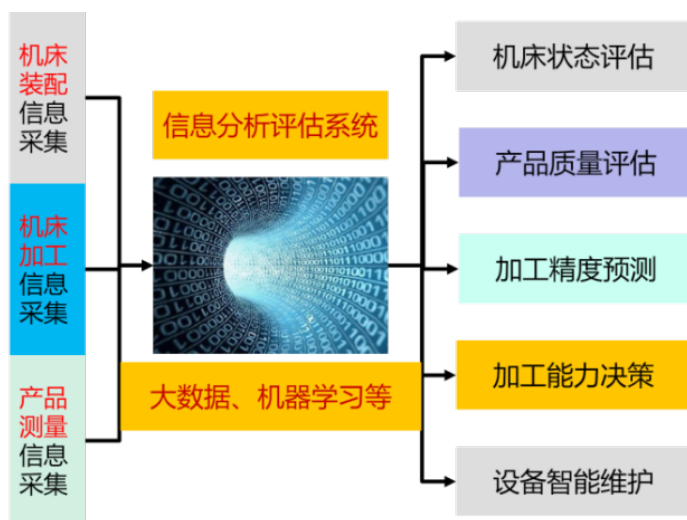


图2 数控机床制造大数据

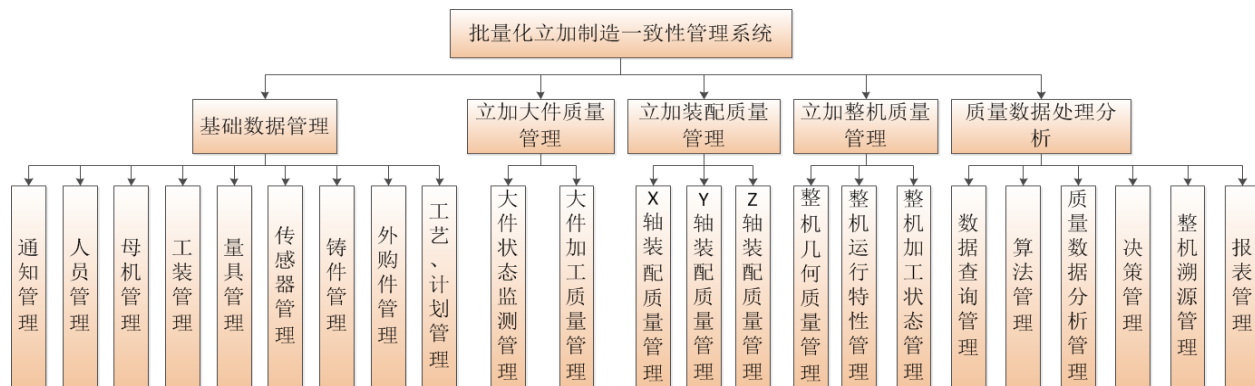


图3 机床制造中的大数据系统功能模块

技术研究,采用大数据挖掘实现机床制造过程数据关联学习与建模,建立质量控制图,发现制造质量与核心工序的关联性,可以为提高数控装备产品制造质量和效率提供新思路。图3所示为面向某机床企业批量化生产的立式加工中心制造全流程中的数据采集、分析系统设计的功能模块架构,通过对大件加工、装配以及整机检测等环节所产生的数据进行存储,设计一致性管理分析系统实现装备制造过程质量数据的集成和管理,为后续的产品质量分析与控制奠定了基础。

三、人工智能在机床运行中的应用

1. 智能机床

人工智能技术在机床中具有广泛的应用前景。人工智能使得机床能够更加高效、高品质、少干预地实施制造过程,从根本上提高几何精度、零件组织性能和品质一致性。早在2000年,日本京都大学的学者就提出了智能机床概念(INC),将专家的知识 and 经验融入感知、决策、执行等制造活动中,赋予产品制造在线学习和知识进化能力。

随着近十几年来计算机技术的飞速发展,新一代智能化机床的概念已逐步演化为图4所示的与精度、可靠性关联的控制、监测、诊断一体化系统。但此类

智能化机床组成复杂、制造成本较高。为此,首先从提出简化的机床智能化方法做起。通过提取能够表征数控机床加工精度的设备信号来分析加工误差的变化规律。如,数控加工过程的振动、速度、切削力等参数与加工指令密切相关,与零件加工质量、精度和加工效率之间存在内蕴的映射关系。以机床误差成分占比最大的热误差为例,数控机床热误差与工况、环境等强耦合,具有非线性、不确定性,一直以来是影响机床精度的难题。应用人工智能技术解决数控机床热误差问题有望成为未来提升机床加工精度实现精密制造的重要手段。

2. 人工智能技术在机床误差抑制方面的应用

误差补偿是目前提升机床精度的通用方法。误差补偿的前提

是对误差建立预测模型,模型精度、建模效率决定误差抑制效果和实际应用,而数控机床种类、工况的改变,预测误差的模型必须随之改变。现有的西门子、fanuc数控系统虽然也具有补偿功能,但是所采用的建模算法是基于PLC语言,给模型构建带来很大的局限性,导致模型鲁棒性以及工况适应性差、建模效率低下,补偿效果差,批量应用困难。目前通用的做法是采用如图5所示的机床个体热误差分析及智能补偿技术,其核心在于误差补偿模型的准确性、鲁棒性问题,而在实际操作过程中建模、解耦非常困难。因此,尽管开展的研究工作较多,但投入实际应用的非常少。由于热误差具有准静态时变、非线性、衰减延迟、多因素复杂耦合等特点,热误差补偿的稳定性和鲁棒性较低,影响了这

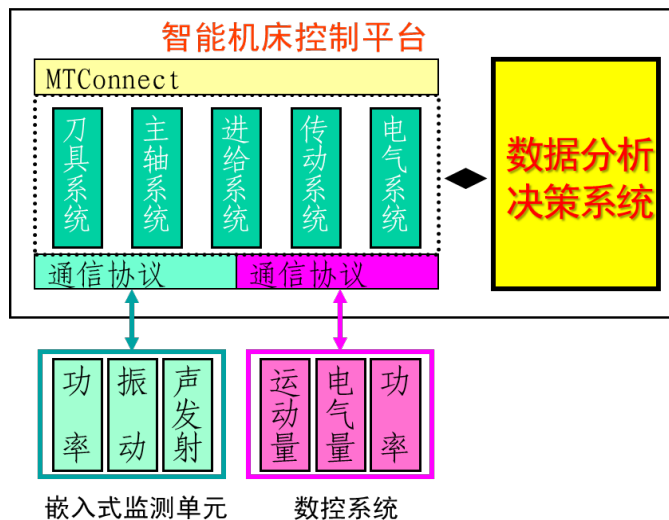


图4 智能机床组成架构

项技术的广泛应用，目前大部分研究停留在实验室阶段，未获得大批量应用，远没有达到商业化

程度。

现代数控机床在使用过程中时刻产生大量反映数控机床运行

机理和运行状态的数据，这些数据大多以数据库、数据文件、生产记录等形式存在，它们蕴涵了与生产设备、生产过程相关的许多规律性信息和生产决策、操作人员的操作决策和控制经验。基于大数据的机床热误差智能补偿提供了新思路。合理利用海量数据，自动、快速地发现海量数据间隐藏的关联规则，从中挖掘有用的信息或知识来准确揭示数控机床热特性机理和热变形规律进而改进传统建模方法并应用于机床热误差补偿，可以有效提高补

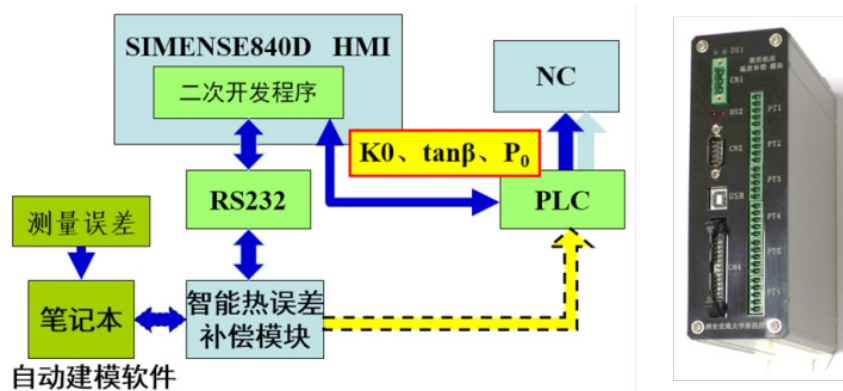


图5 机床热误差补偿原理及装置

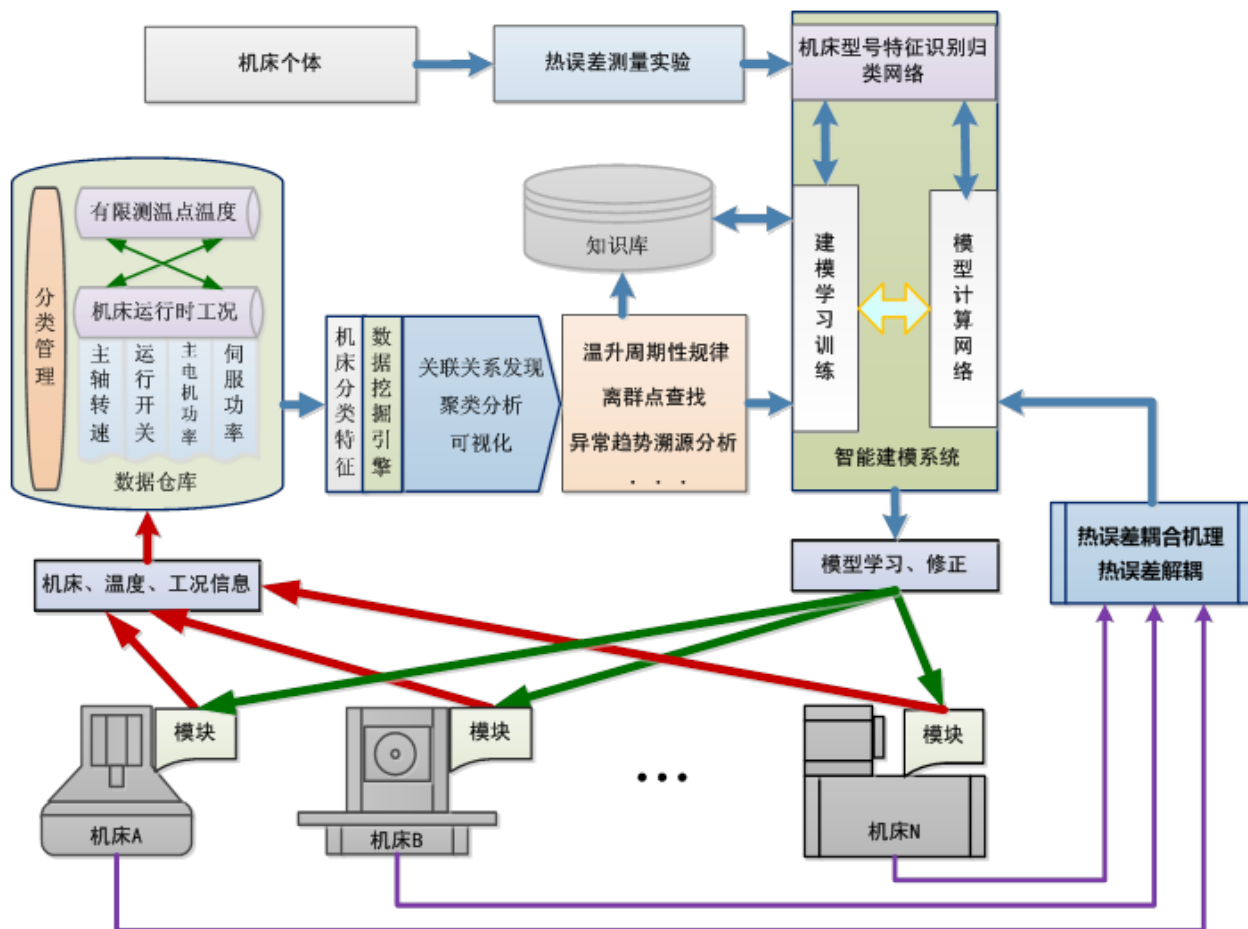


图6 基于大数据的数控机床热误差智能补偿原理

偿的稳定性和鲁棒性，使之适应各种工况和环境，从而有效提高机床精度。

大数据方法能够发掘同型号机床热特性的共性规律，又兼顾机床个体热特性的个性特征；能发掘特殊工况或环境突变时机床热特性变化规律，提高模型的稳定性和鲁棒性。基于大数据的机床热误差原理如图 6 所示，具体实现如下功能：

- 补偿功能，智能补偿模块收集机床运行工况和热特性数据，构建数据仓库。
- 基于大数据思想进行数据挖掘，构建热误差智能补偿知识库。
- 基于大数据智能和多因素解耦驱动实现热误差自动建模，

并对机床个体热误差补偿模型实施自整定。

机床热特性海量温度和运行工况数据的采集是实现智能补偿的前提。采用图 7 所示的数据采集系统架构，温度传感器和机床内置传感器长期采集机床运行工况和热特性。热误差智能补偿模块从机床 PLC 的 I/O 端口实时同步采集机床个体测温点温度和主轴转速、运行开关通 / 断、主轴电机功率、伺服电机功率等实时运行工况数据。数据上传至高性能数据处理平台，构建数据仓库，进行数据存储、管理和大数据处理。

获得海量数据之后，下一步须进行机床热特性数据仓库的构建和管理。通过搭建小型云服务平台存储和处理数据，构建数据

仓库。采用数据挖掘技术解决热误差影响因素发现不全、关键因素数据缺失及实验样本数据代表性有限的问题。在获得数据的基础上，利用热误差数据仓库，自动调整建立热误差模型，将热误差数据仓库中数字化表示的工况数据和挖掘出的作用机理作为自动建模系统的输入量，可以有效解决热误差的鲁棒性问题。

在自动建模环节，其核心在于：热误差模型中适应各种工况、环境的模型参数自整定。具体操作步骤为：首先统计某一段时间内机床运行中的热误差，获取不同工况下的热误差数据；其次采用多目标智能优化算法，计算热误差与温度的关联模型参数；最后通过网络通讯实现机床个体热

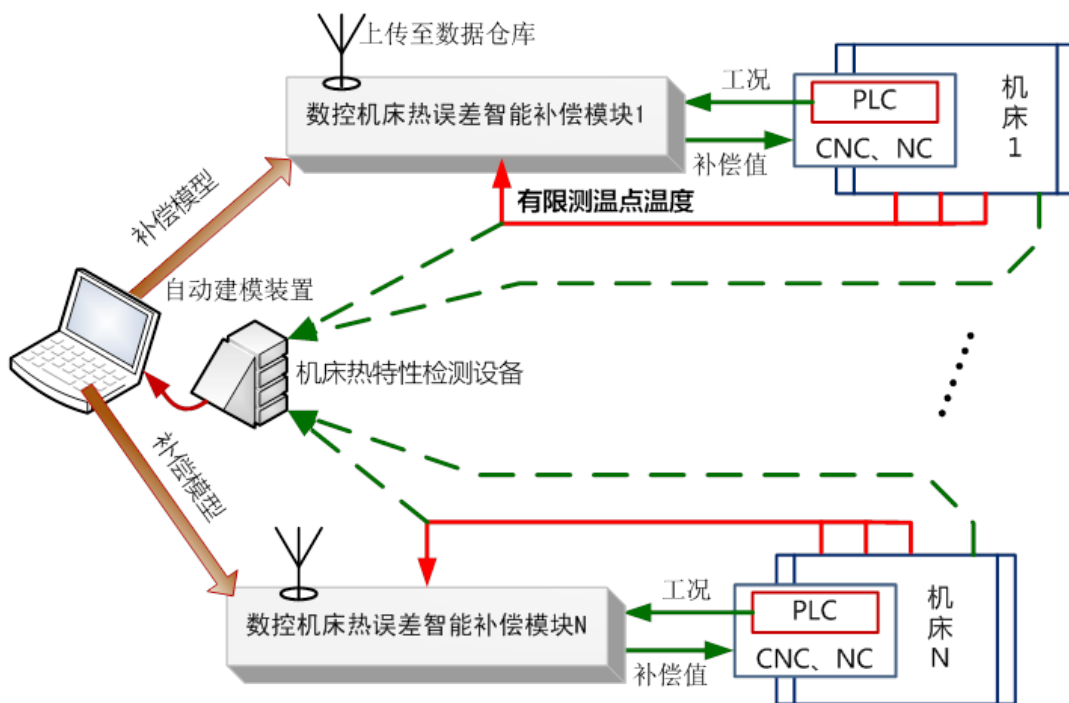


图 7 机床运行数据实时采集原理

（下转第 34 页）

工业 4.0 背景下人才培养的思考

同济大学 陈明

一、技术革新引发工业革命

所有的工业革命都是由技术革命引发的。专家学者认为，新一代信息与制造技术的发展，积累到当前阶段，会引发一次新的工业革命。

首先我们来看信息技术。信息技术已经影响了我们生活和工作的方方面面，如购物从原来到实体店转到网络动鼠标即可完成；最早手机只是用来打电话，

而现在手机已经是一个智能移动终端；电话会议，原来需要专用设备，现在一个微信就解决了。

嵌入式系统在已经成熟的平台和产品基础上与应用传感单元的结合（图 1），扩展物联和感知的支持能力，发掘某种领域物联网应用。嵌入式系统作为物联网的重要技术组成，将有助于深刻地、全面地理解物联网的本质。

移动通信成为当今世界发展最快、市场潜力最大、前景最诱人的业务。越来越多的人希望

在移动的过程中高速地接入互联网，获取急需的信息，完成想做的事情。

Web 技术的发展，随着时间的发展，由 Web1.0 向 Web4.0 发展，它对数据的挖掘、支持、管理的作用越来越大。

把所有的物体通过互联网连接在一起，这就是物联网。物联网作为当前新兴产业之一，是引领世界发展的重要力量，其发展已经上升到许多国家的战略层面。基于物联网的服务互联网近年来悄然发展，并不断壮大！最早工业 4.0 提出物联网是想把其技术用到生产上，但是两年以后德国发布的工业 4.0 计划里，最重要的一点是把服务也通过网络整合在一起，这二者加起来才是真正的工业 4.0，才是一次工业革命。

云计算，通过使计算分布在大量的分布式计算机上，而非本地计算机或远程服务器中，企业数据中心的运行将与互联网更相似。这使得企业能够将资源切换

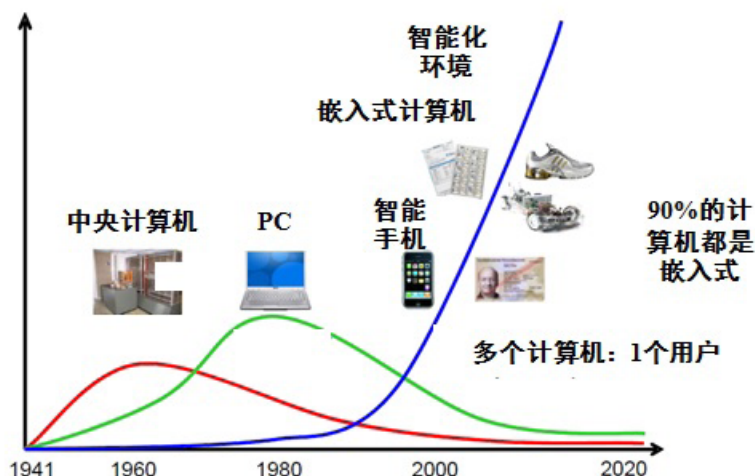


图 1 如今，90% 的计算机都是嵌入式

来源：Industry 4.0: From the Internet of Things to Smart Factories by Prof. Dr. Wolfgang Wahlster

到需要的应用上, 根据需求访问计算机和存储系统。

大数据, 第一, 现在采集的数据非常多; 第二, 不仅是数据多, 而且种类很多; 第三, 随着时间推移数据一直在变化当中。大数据技术的战略意义不在于掌握庞大的数据信息, 而在于对这些含有意义的数据进行专业化处理。换言之, 如果把大数据比作一种产业, 那么这种产业实现盈利的关键, 在于提高对数据的“加工能力”, 通过“加工”实现数据的“增值”。

新一代人工智能是基于互联网与移动终端的普及、传感网的渗透、大数据的涌现和网上社区的兴起等信息新环境和智能城市、智能经济、智能制造、智能医疗、智能家居、智能驾驶等从宏观到微观的智能化新需求的新一代人工智能。新一代人工智能将会对整个社会, 特别是对智能制造产生很大的影响。国务院也已经发布了《新一代的人工智能发展规划》, 很多专家都认为人工智能可能是中国实现跨越式发展, 换道超车的重要手段之一。

二、全球制造业格局面临重大调整

如上所述, 新一代信息技术与制造业深度融合, 引发产业变革, 新的生产方式、产业形态、商业模式正在形成。各国都在加

大科技创新力度, 希望在这一领域取得新突破。

2008 年的金融危机以后, 每个国家都认识到实体经济的重要性, 全球的制造业格局在此时发生变化。各国都发布自己的计划, 比如美国, 发布了一系列的发展计划, 从 2009 年《重振美国制造业计划》、《制造业推进法案》到 2015 年的《美国创新新战略》, 美国不是把传统的制造业拉回到美国进行低层次的循环, 而是用先进的技术来整合制造业。

欧盟及欧洲国家也纷纷提出各种计划, 如, 2009 年欧盟的“未来工厂”, 2010 年的欧盟“地平线 2020 年”, 2010 年法国“新产业政策”, 2013 年的德国“工业 4.0”以及英国“英国工业 2050 战略”等等。

与此同时, 发展中国家正在加快谋划和布局, 积极参与全球产业再分工, 承接产业及资本转移, 拓展国际市场空间。像印度、马来西亚、菲律宾、印度尼西亚等国家正在并将持续承接大量的外包型制造与服务。所以我们会看到, 跨国公司在中国的制造业务也开始慢慢的流向这些国家。这些国家也希望借此此次制造业的转型能够占据一席之地。

我国已成为制造业大国, 但大而不强, 如果不借此次转型的机会积极主动应对, 可能就会很被动。所以, 政府层面已加紧战略部署, 争取抢占制造业新一轮

竞争的制高点, 比如 2013 年的《信息化和工业化深度融合专项行动计划(2013-2018 年)》、2015 年发布的《中国制造 2025》、“互联网+”行动等等。

三、德国工业 4.0

德国工业 4.0 概念 2011 年发布, 2013 年上升到德国国家战略, 其目的是捍卫德国制造业的未来。

德国对工业 4.0 进行了长期的酝酿, 有工业 4.0 的平台, 由政府共同推动; 同时也有德国教研部发布的工业 4.0 技术路线图(图 2)。路线图一直延伸至 2035 年, 从中可以清晰地看到工业 4.0 本身也在路上。

2015 年 3 月 12 日, 德国电气电子行业协会在汉诺威消费电子、信息及通信技术展(CeBIT)上介绍未来工业 4.0 的参考架构(RAMI4.0), 对企业实施工业 4.0 是一个很好的参考。

同年, 工业 4.0 平台正式推出了工业 4.0 的地图(图 3), 地图上清晰标注了遍布德国各地的工业 4.0 应用实例和试验点, 向中小型企业展示了当下数字化生产带来的可能性, 投资数字化改造的价值。特别是中小企业有新的技术可以到这些地图上去实验, 已经不需要企业自己再去开办实验台, 为中小企业节省了很多经费。

此外，学术机构与行业协会还有用于评估企业智能制造能力等级的工业 4.0 的评价体系。

德国认为实施工业 4.0，人才培养是关键。所以他们也设计了人才培养方案，比如“学院立方体”，用来促进人才培养工作的实施。

德国有很多的企业提出了智能制造的战略计划。德国在推行工业 4.0 的时候是有两个战略：一个是叫工业 4.0 市场，要在全德国推广工业 4.0 形成这样的市场；二是，市场形成之后推行工业 4.0 供应商计划，使得自己的企业在第四次工业革命当中占据非常重要的地位。

比如，德国库卡是世界几家顶级为自动化行业提供柔性机器人，生产系统、夹具、模具及备件的供应商之一。库卡将工业机器人的发展分为四个阶段，随着机器人阶段性的进化，其创新度也逐渐提高。目前，机器人的发展正处于第二阶段和第三阶段(图 4)。工业 4.0 的发展，可得到这些面向工业 4.0 的基础装备的有力支持，最终向着未来工业 4.0 时代要求的智能化装备发展。

四、中国制造 2025

《中国制造 2025》是中国制造强国战略的第一步，制造强国战略是三十年三步走，每十年有一个阶段性目标。在第一个十年



图 2 德国工业 4.0 技术路线图

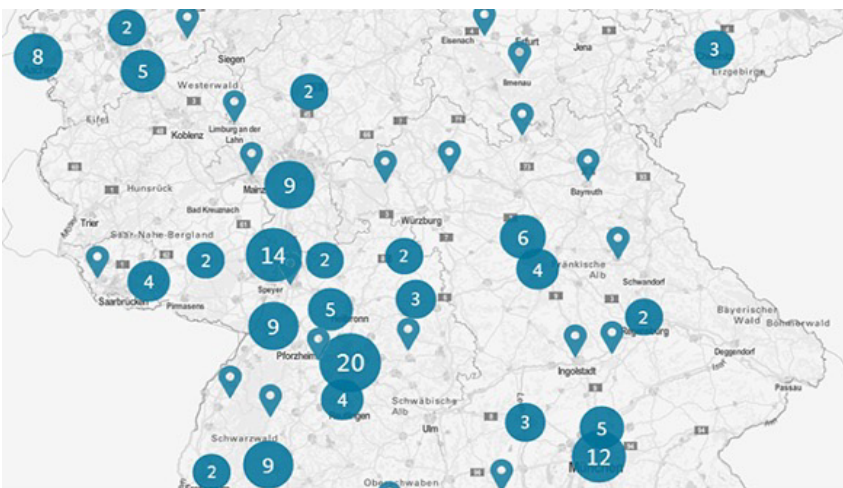


图 3 德国工业 4.0 地图

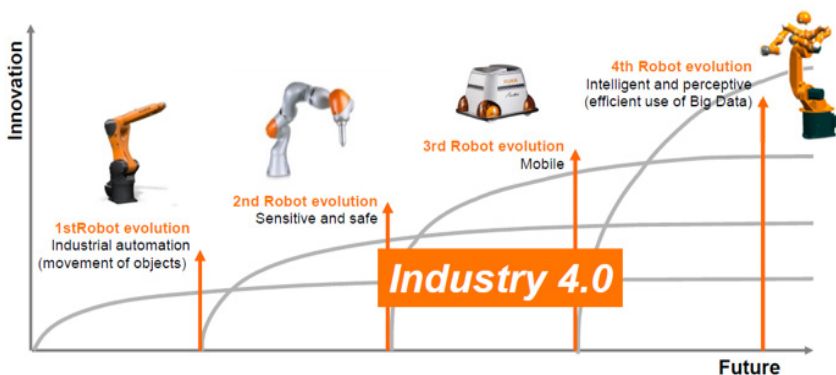


图 4 库卡四代机器人划分

（到 2025 年），挤进世界制造强国的队伍；在第二个十年（到 2035 年）进步为强国中位；最后一个十年（到 2045 年）居于强国领先地位。制造强国战略目标宏伟，对很多制造业企业来说也是很大的挑战。

总体上，中国制造的战略，由中央部署，地方实施。

国务院：国务院部署“中国制造 2025”，“互联网+”，“1+X”方案——彼此结合进行工业创新，促成新的工业革命。

工信部：智能制造示范试点（2015 年：46 家，2016 年：64 家）；智能制造综合标准化与新模式应用项目（2015 年 94 项，2016 年 144 项，2017 年 165 项）；中德智能制造合作试点示范项目（2016 年 15 个，2017 年 17 项）

科技部：发布增材制造（3D 打印）重点专项、科技创新 2030 重大项目、国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项等。

各个地方政府都出台了各省的智能制造发展规划、行动纲要、实施方案等，具体落实《中国制造 2025》。

五、智能制造人才培养

随着第四次工业革命的到来，智能制造的发展，相关的工作岗位会发生一些变化，对有些岗位会提出新的要求，还会产生新的岗位。表 1 为波士顿咨询公司对职业岗位变化的分析。

智能制造人才培养，根据人才种类、行业和专业学科构成一个三维模型（图 5），横向维度是学科，如机械、电子、信息、通讯、控制等等；纵向维度可以是研发工程师、应用工程师和技术人员等；第三个维度是行业，如新一代信息技术产业、航空航天等。行业不一样，对人才需求也不一样。

通过需求分析，可以得出需

要什么样的人才：单个立方体构成一个专业人才；两个立方体构成跨学科的人才，多个立方体构成综合性系统人才。

在新的时代背景下，对专业人才可能需要他对本专业更加精深、需要以新的知识去改进现有的知识结构和体系。其次是跨学科人才，对于跨学科人才的培养，如机械电子工程，将机械和电子结合在一起；还有工业软件，把工业和软件结合在一起。第三是系统级的人才，智能制造 / 工业 4.0 强调“系统的系统”，就必须要有系统级人才来解决问题。软件工程里有软件系统架构师和系统工程师，智能制造其实是软件和硬件的融合，更需要有系统架构师和系统工程师，这对我们来说也是一个挑战。

同济大学也尝试制定四年制的智能制造专业培养方案，专业方案根据《华盛顿协议》所要求的符合工程专业认证标准的进行课时分配，见图 6 及表 2。

大家知道，在有限的时间里，培养系统工程师是很难的，

表 1 波士顿咨询公司对职业岗位变化的分析

变化趋势	职业
消失 / 锐减	简单重复性任务的低技能劳动（生产、装配等）；中等技能工作（生产计划 production planning、质量控制 quality control、维修维护 maintenance）
技能改变	汽车装配线工（automotive assembly-line worker）、移动服务技术人员（mobile service technician）、机器操作员（machine operator）
需求增加	软件开发（software development）、信息技术（IT technologies）、数据分析（data analytics）、研发岗位 R&D、人机界面设计（human machine interface design）
新兴工种	机电一体化专家（mechatronics experts）、信息技术解决方案架构师（IT solution architects）、用户界面设计师（user interface designers）、机器人协调员（robot coordinator）、工业数据科学家（industrial data scientist）

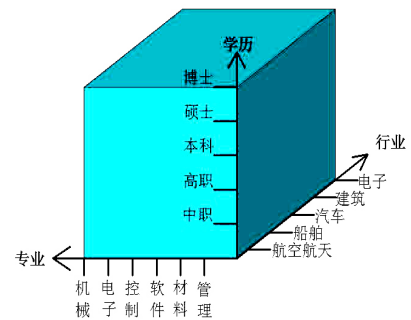


图 5 智能制造人才培养模型

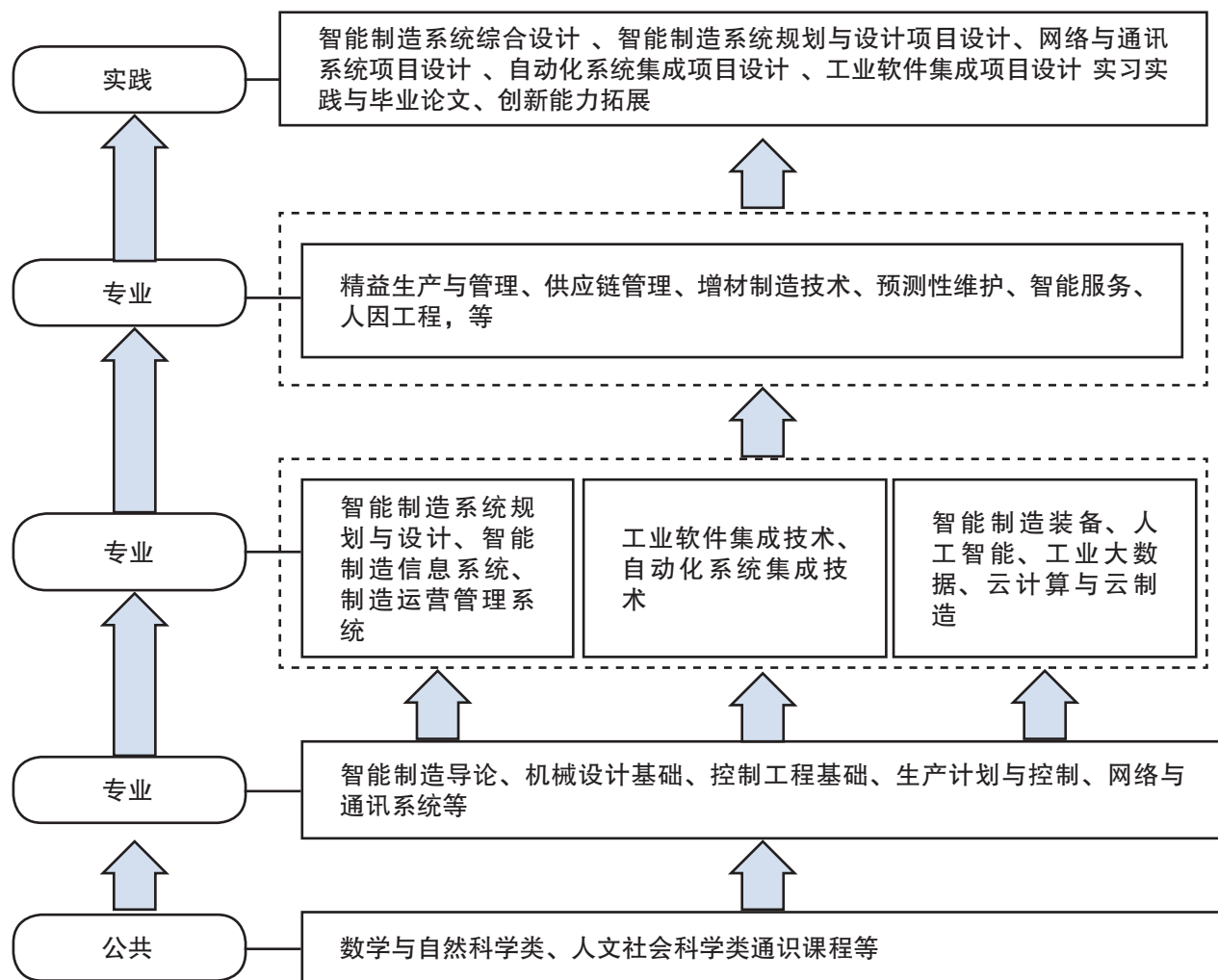


图 6 同济大学中德工程学院智能制造人才培养方案

表 2 同济大学中德工程学院智能制造系统工程专业学分设置

序号	专业认证标准课程类别		通用标准要求	智能制造系统工程专业				
				学分		占总学分比例 %		
				必修	选修	必修	选修	小计
1	数学与自然科学		至少 15%	29.5		16.8		16.8
2	工程及专业相关	工程基础	至少 30%	13		7.4		7.4
		专业基础		36		20.5		20.5
		专业课		19	12	10.8	6.8	17.6
		小计		68	12	38.7	6.8	45.5
3	工程实践与毕业设计		至少 20%	37		21.1		21.1
4	人文社会科学		至少 15%	29		16.5		16.5
5	其他公共选修课							
	小计			163.5	12	93.1	6.8	100
	总计			175.5		100		

(下转第 15 页)

世界先进制造业群发展的创新模式探索



复旦大学 芮明杰

在习总书记的十九大报告中,提到“培育若干世界级先进制造业集群”。作为一个后起的发展中国家、一个工业化尚未完全结束的国家,却已经面临着新一轮工业革命,面临着如何赶超发达国家的千载难逢的机遇,此时不光是要发展世界先进制造业群来引领现行产业体系与产业的转型发展,而是如何采取跨越式发展使我国真正从工业大国转变为工业强国。那么跨越式发展模式是什么样的模式?

一、世界先进制造业群的发展规律与模式

世界先进制造业群的形成和发展究竟遵循什么样的规律?它的动力机制与培育机制在哪里?成长路径和发展模式又是如何?这些是世界先进制造业群发展迫切需要解决的理论问题。

国外学者的研究发现世界先进制造业群发展有两个关键要素:一个是技术创新,另一个是政策扶持。

Harfield(1999年)认为政府在新兴产业发展中起辅助作用,新兴产业的发展更多要依靠市场竞争的力量。与此相反,Lach(2002年)利用以色列新兴产业的数据研究发现,政府资助刺激了小企业研发投入,有利于新兴产业中小企业快速发展。Pohl(2005年)探讨了日本产业振兴合作组织(Industrial Revitalization Corporation of Japan)与市场的关系,认为该组织在海洋新兴产业的扩大和再生产方面不能达到预期目的,强调市场调控的重要作用。Ellison和Glaeser(2010年)也指出有利于产业发展的金融、财政、税收政策的引导是保障和促进新兴产业健康发展的重要手段。Lovdal和Neumann(2011年)对一些和海洋新兴产业相关的企业进行了调查,结果显示,企业认为能制约海洋新兴产业快速发展以及商业化的因素主要可以分为两大类:一是资金;二是政治上的支持。这两大类的影响因素又可以分为许多方面,其中包括

替代品的价格低、生产许可证难以得到、评估系统缺失等等。

国内学者对世界先进制造业群发展规律及发展模式的探讨更多是从产业内在要素、机理的分析,探寻产业特殊的发展规律与路径。

龚惠群、黄超和王永顺(2011年)指出,世界先进制造业群发展规律主要表现为四个方面:一是世界先进制造业群的成长要基于原始创新,将原创性科技突破的成果转化为标志性目标产品,是世界先进制造业群形成和成熟的重要标志;二是世界先进制造业群的发展要针对新的产品和技术,创立和运用新的商业模式,引导和培育消费需求;三是世界先进制造业群的发展要构建全新技术标准体系,塑造新兴产业业态;四是世界先进制造业群的发展要孕育新的产业创新集群。王新新(2011年)提出了世界先进制造业群发展的三大动力机制:技术进步、产业结构高级化、改造传统行业。技术进步带来消费需求结构和产业结构分化,是世

界先进制造业群发展的直接动力；产业结构高级化利用知识的“共享性”和“溢出效应”提升整体产业的现代化水平，是新兴产业发展的基础动力；改造传统产业推动产业升级，是新兴产业发展的现实动力。包海波（2012年）也提出了世界先进制造业群培育的三大动力机制：技术研发机制、市场培育机制、制度激励机制；认为技术推动与市场推动是产业发展的两大动力机制，而完善的政策制度体系可以破解产业发展的约束性条件，因此技术、市场与制度的协调互动是世界先进制造业群三大培育机制。桂黄宝（2012年）以我国新能源汽车产业为例对世界先进制造业群的成长动力机制进行剖析，提出了世界先进制造业群成长的四大动力机制——创新驱动、政策推动、需求拉动、市场竞争的“四轮驱动模型”，并指出创新驱动应该始终处于最重要的位置，与其他动力因素相互配合，共同推进世界先进制造业群发展。

国内学者对世界先进制造业群发展模式的研究可以归纳为以下三种模式主张。

1. 集群发展模式，即主张通过发展世界先进制造业群集群的方式来形成产业集聚。喻登科（2011年）等人提出了以集群协同创新的模式来发展世界先进制造业群，形成世界先进制造业群集群，这些世界先进制造业群集

群可以采取单核、多核或星形发展模式，并建议不同区域要根据不同产业环境、不同经济发展需求应该做出不同的选择。涂文明（2012年）也提出了世界先进制造业群的区域集聚发展模式，指出要从国家战略层、区域集聚层和技术—产业层三个层面进行区域集聚，并给出了突破性技术创新驱动型、产业创新战略联盟型和高新技术开发区升级型三种实践模式。

2. 产业融合发展模式，即主张世界先进制造业群要与传统产业联动、融合发展。熊勇清、李世才（2010年）针对我国产业发展目前所面临的传统产业改造升级和世界先进制造业群培育与发展的双重任务，提出了两类产业耦合发展的解决思路，对两类产业间的耦合关系和耦合内容进行了理论分析，并就世界先进制造业群与传统产业耦合发展的主要阶段及作用机制进行了具体研究。乔玉婷、曾立（2011年）从经济发展和国防建设，从军队和地方角度探索世界先进制造业群的发展道路和模式，指出世界先进制造业群的发展要面向民用和军用两类需求，依托民用资源和国防资源，服务民用和军用两个市场，走军民融合式发展模式。林学军（2012年）指出世界先进制造业群的发展可以有嫁接、裂变、融合三种方式。嫁接式是指的新兴产业的发展主要是依靠高

新技术，企业进入全新的、独立发展的领域，如90年代中期嫁接于互联网的“.com”这类的网络公司。裂变式即通过高新技术应用于当地的传统产业，在设计、制造或原材料等，产生某个方面的新分工，从传统产业裂变出新的产业出来。融合式指的是高新技术全面与传统产业结合，在设计、制造、原材料、销售等各个方面，全面提升本地区具有优势的传统产业。

3. 创新驱动发展模式，即主张从技术创新、产品创新来推动产业创新发展。王利政（2011年）从技术生命周期和技术水平的国际比较优势的视角，分析了在起步、成长、成熟等不同阶段发展战略性新型产业所适宜的模式，同时指出从产业核心技术水平在世界的位置看，世界先进制造业群发展模式可有技术领先的发展模式和技术追随的发展模式进行选择。刘志彪（2012年）指出世界先进制造业群应避免成为新的低端“加工制造业”，并从全球价值链（Global Value Chain, GVC）视角构建了一个基于“链”的分析框架，从产业链、价值链、创新链、服务链和生态链这五个方面，寻求推动世界先进制造业群高端化发展的政策取向和措施。申俊喜（2012年）主张当前发展培育世界先进制造业群应当坚持“研发优先，技术驱动”，而非“投资驱动”，以强大的研

发能力去支撑核心技术实质性的突破和自主知识产权的获取,才是世界先进制造业群健康成长和发展的关键,并指出要创新产学研合作的组织模式,要根据世界先进制造业群不同发展阶段的特点,明确产学研合作的目标定位与发展重点,而且应该科学地制定世界先进制造业群的技术路线图,增强企业技术创新的积极性和能力。

二、世界先进制造业群发展的“跨越”模式

世界先进制造业群发展的跨越式模式,就是通过自主创新直接把握世界先进制造业群的价值链高端,发展附加价值高收益大的环节,形成自己的核心竞争力从而成为该产业价值链的控制者,同时能够引领其他相关产业转型升级的创新模式,这个模式我们称之为“三高”模式。这三个高的内涵为:

1. “产业高新”首先指世界先进制造业群发展以当代高新技术为基础,代表着未来产业革命

的发展方向(图1)。具体应该有三个方面的特性,第一,所发展的世界先进制造业群在核心技术、关键工艺环节上是高新的,属知识密集、技术密集;第二,通过发展这样的产业具有技术与知识自主创新的能力,而且是国际领先的创造力;第三,所发展的这样的产业具有强大的战略引领性,能够引领其他相关产业技术进步,产业调整升级,产品创新。

2. “产业高端”是指世界先进制造业群具有高级要素禀赋支持下的内生比较优势,因此处于有利的产业价值链竞争位置(图2)。产业高端的内涵可以从三个方面理解:(1)高级要素禀赋,指要素禀赋从传统的资源禀赋到知识禀赋,而知识禀赋在企业多体现为在核心技术和关键工艺环节有高的技术密集度。如目前ICT产业中的云计算、物联网等;

(2)高的价值链位势,如制造业价值链形如“微笑曲线”,高的价值链位势就是在“微笑曲线”两端,而动态维持高价值链位势需要具有高的自主创新能力;(3)是高的价值链控制力,从在价值

链上所处的环节位置判断,实质就是对价值链关键环节——核心技术专利研发或营销渠道、知名品牌等的控制力,高价值链控制力对于产业也具高战略引领性。

3. “产业高效”是指世界先进制造业群资源配置效率高,具有良好的经济效益和社会效益(图3)。产业高效的内涵也有三方面的内容:(1)高的产出效率,如单位面积土地产出效率、人均产出效率等;(2)高的附加价值,如利润率高,工业增加值率高,税收贡献大等。(3)高的正向外部性。指产业与环境和谐友好,生产过程产生污染少、符合低碳经济要求,还有就是对就业的促进和产业链上其他企业的带动作用等。

三、跨越式发展模式的内在逻辑和特征

世界先进制造业群高新高端高效的“三高”发展模式,可以从其内涵层面梳理了3条横向对应关系,就是从世界先进制造业群占领高端到实现高效的内在联

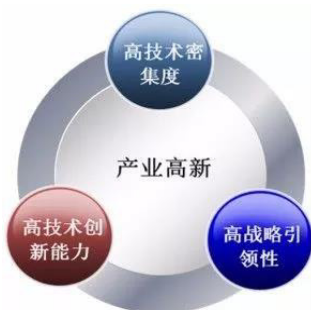


图1 产业高新

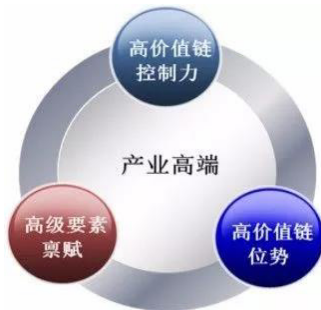


图2 产业高端图

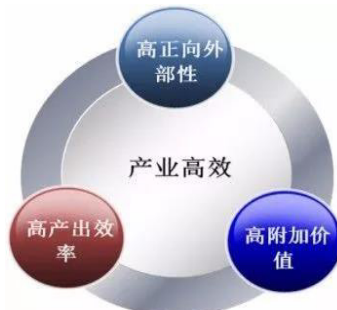


图3 产业高效图

系和逻辑关系（图4）。对这3条横向对应关系的把握可以帮助理解世界先进制造业群发展的目标和实现目标的路径。

1. 高技术密集度—高级要素禀赋—高产出效率。高技术密集度是高新的重要特征，高端则相应的必须以高级要素禀赋为基础（表现为资本密集、知识密集和专业化人力资本）；高效则体现为资源的充分利用，产出效率比较高。高级要素禀赋是产业高端的核心特征。企业掌握核心技术和关键的工艺环节、品牌营销，相应的必须以高级要素禀赋（知识禀赋等）为基础才能实现，高级要素禀赋具有实现高产出效率的前提基础和条件，而且也必须实现高产出效率才能实现产业高效，这也是市场经济下企业经营的主要目标。

2. 高战略引领性—高价值链控制力—高正向外部性。高战略引领性，意味着具有产业发展的前瞻性，能够带动产业的升级和

转型；具有较高的价值链控制力，具有一定的价值链治理权；能够发挥知识溢出效果、产业关联带动作用，以及有助于形成低碳、循环经济、环境友好的产业生态系统。高价值链控制力是产业高端的表现特征。高价值链控制力带来的高战略引领性意味着具有产业发展的前瞻性，能够带动产业集聚发展和产业的升级，对价值链的控制意味着对产业的关联带动作用，以及形成和谐产业生态系统和产业发展环境，也就是产业发展的正向外部性影响，这些也是产业高效的内在要求。

3. 高自主创新能力—高价值链位势—高附加值。高自主创新能力意味着掌握一定的核心技术，具有自主知识产权，并且必须处于较好的价值链竞争位势，才能获得高附加值。高价值链位势是产业高端的重要判断标准。意味着在关键价值链环节的把握，可以发展出关键技术工艺和供应链品牌环节的优势，这就

使产业和企业处于较好的价值链竞争位势，获得高附加价值也就顺理成章，而且也必须转化为高附加价值才能实现产业高效。

通过跨越式发展，希望中国的世界先进制造业群形成在全球价值链控制力、自主创新发展能力及空间集聚发展能力等三个方面均领先的革命性产业（图5），实现从现行产业体系向现代产业体系的全面升级，抓住第三次工业革命的伟大趋势，实现我国经济社会的可持续发展，实现中华民族的伟大复兴。

世界先进制造业群作为我国未来的重点发展对象，被寄予了推动科技创新、产业转型，实现经济新一轮增长的厚望。我国将世界先进制造业群置于国家战略的高度，是为了在新一轮的全球产业革命和科技革命中抢占制高点，体现了四个方面的意图：

1. 通过世界先进制造业群的发展，整体提高我国的自主创新能力，即把经济发展的模式从长期依靠要素低成本转换到依靠创新驱动的轨道上来。

2. 考虑在中国资源环境约束的前提下，通过发展世界先进制造业群增强可持续发展能力。

3. 国际金融危机之后，我国面临全球性产业结构调整和科技革命的问题。

4. 把世界先进制造业群和传统产业的改造升级结合起来。传统产业转型升级的方向之一便是

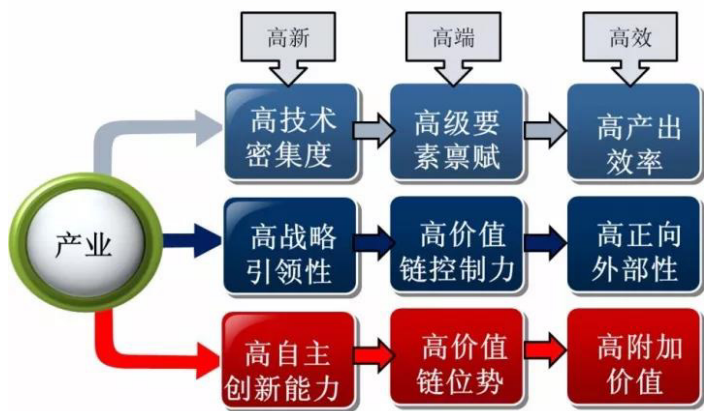


图4 世界先进制造业群“三高”逻辑图

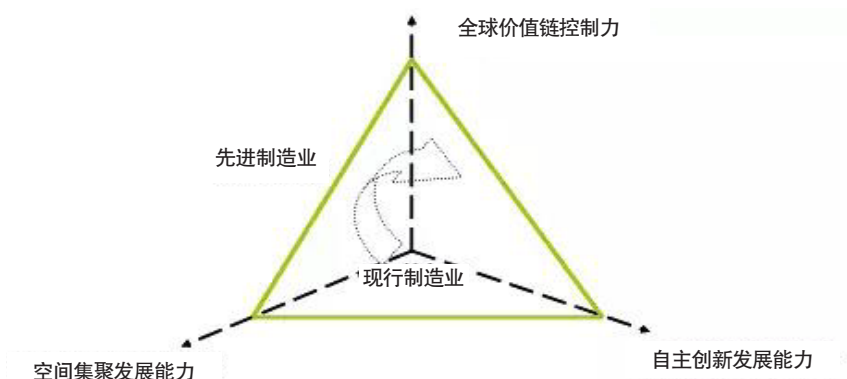


图5 世界先进制造业群竞争力

世界先进制造业群，世界先进制造业群发展提供的产品技术和服务为传统产业的转型升级提供了重要的支撑。

相对传统产业来说，民营资本在世界先进制造业群中的生存空间更大。从我们对世界先进制造业群调查分析的结果来看，可以看出，民营企业占了沪深市世界先进制造业群上市公司的比例近一半，尤其是民营新一代信息技术产业与节能环保产业。通过以上分析我们可以看出世界先进制造业群民营上市公司发展的现状成果：产业迅速成长，门类不断增多；产业创新能力不断提升，竞争力增强；部分产业规模优势

明显，具有一定的竞争力。

然而，世界先进制造业群的“战略性”地位，决定了国有企业必须在这一领域有所作为。国有企业拥有强大的资本实力，先进的创新科技。虽然我国世界先进制造业群民营上市公司发展迅速，但目前仍面临着一些制约企业发展的因素：资金短缺，在产业化的各个环节，缺乏资金支持；新兴产品和服务成本偏高；基础设施不完善；创新能力有待进一步提高；高素质的人才资源匮乏等；诸多瓶颈问题使世界先进制造业群民营企业的生存和发展空间受到了较大的限制。因此，不仅需要市场的力量，还需要政府

为世界先进制造业群民营企业创造宽松的政策环境，并提供研发资助、激励性补贴等支持。同时也要高度关注世界范围内世界先进制造业群的发展态势和走向，从中找出值得借鉴的地方：

(1) 立足国情，作出发展世界先进制造业群的深度选择。

(2) 构建良好的政策支持体系，促进世界先进制造业群的发展。

(3) 政府应在竞争前提供研发资助，做足前期准备，为世界先进制造业群的发展营造良好的成长环境。

(4) 掌握关键核心技术，赢得世界先进制造业群持续发展主动权。

(5) 完善法律监管体系，加强金融监管规范地方政府融资平台，尽量剔除非市场因素，保障世界先进制造业群的健康发展。

(6) 政府可以提供一些示范项目，吸引消费者，以促进产业化初期世界先进制造业群的产品市场的打开。MT

(上接第9页)

所以，必须在培养的方式方法上下工夫。对于智能制造的人才培养来讲，除了国际合作、跨学科、多学科融合，一个非常重要的方面就是基于项目的学习。基于项目学习掌握的知识更实用，对教

学的时间要求会更短。还要强调实践，因为学生毕业后进入企业是需要解决实际工程问题的。

人才的培养，并不只是在高校里就已经完成，企业里现有的工程师也需要“充电”升级，重

新组合他们的能力和知识结构，这样的培训非常重要。很多的社会团体、学会、协会、培训机构都可以积极地发挥作用，动员整个社会的力量，培养更多面向智能制造需求的人才。MT

智能制造本质与变革的效益（上）



美国信息技术与创新基金会 STEPHEN J. EZELL

智能制造——将信息与通信技术（ICTs）应用于现代制造业流程中的各个方面——正在改变全球制造业经济。制造业数字化将革新产品的设计、制造、使用、操作和售后服务，同时也将革新工厂的运营、工艺和能源足迹以及制造供应链的管理。这一趋势也将改变制造业竞争的全球格局，从而可能降低低成本地区的相对优势。在智能制造技术上取得领先的国家及其企业和行业将比全球的其它竞争对手抢先一步占得先机。国家政策对于竞争格局的形成起到了至关重要的作用，进而影响智能制造的领导力，并且影响着从各国企业如何快速研究、开发、应用和扩散这些技术到各国劳动力和供应链如何准备利用这些技术的各个方面。

一、前言

信息和通信技术不仅正在改变媒体、出版、交通、酒店、金

融和运输行业，同样也在改变制造业经济的各个方面：从产品的设计、制造和使用到工厂如何对产品进行连接、操作和装配。智能制造的到来预示着产品的设计和和生产将会变得更加迅速、安全、高效与廉价；进而提高能源利用效率并且能够更好地满足个体客户的定制需求。此外，制造业数字化将带动自动化和大规模定制（与批量生产大量同质化产品相反）的发展——即“同一产品不同尺寸”，促使生产更加靠近终端用户，有望改变当代制造业经济现状，降低传统上低工资国家低劳动力成本的相对竞争优势，提高高薪国家在全球制造业中获得市场份额的能力。

本报告开篇介绍了智能制造的发展过程，将智能制造置于先进制造领域的背景下，描述了智能制造如何触及现代制造价值链和生产过程中的各个环节。然后，本报告罗列了智能制造的益处，并回顾了领先国家为实现智能制造

制造业领导地位所推行的政策。最后，报告对于美国应该考虑采取哪些政策支持整体制造业、提高特定领域的智能制造能力进行了评述。报告向国会提出以下政策建议：

1. 仿效参议院通过的《2016年能源政策现代化法案》（S. 2012）颁布相关法律，为美国中小型制造企业针对智能制造技术进行培训和应用提供更为充足的联邦资源。同时明确指出智能制造的正式定义，指导能源部工业评估中心项目与中小型制造企业更加紧密合作，帮助他们了解并采用智能制造技术。

2. 分配资金建设美国制造业（以前称为全国制造业创新网络），从目前的9家发展到预期的45家机构。

3. 为机械设备投资提供更为有力的税收优惠政策，例如基本资本性支出占比超过75%时实行35%的投资税抵免（ITC）。

4. 在上述方案之外，允许公

司在第一年投入全部设备和软件成本，而非在之后若干年内折旧成本，从而实现合理避税。

5. 支持《小企业研发法案》(Small Business R&D Act)，要求小企业管理和国家税务局加大对相关企业的知识共享，进行研发税收抵免手段培训，并向国会报告其进展情况。

6. 调整制造业拓展伙伴(MEP)成本共享比例，由原先的2:1(非联邦政府:联邦政府)调整为1:1。

7. 加强对制造业劳动力的认证。通过资金投入，拓展特定制造业部门认证的推行与使用，确保相关认证符合标准、全国通行且获得行业公认。

8. 大力支持社区学校的职业教育项目，部分可由增加帕金斯职业教育和培训项目基金来实现。

9. 改革《劳动力投资法案》体系，允许更多资金进入劳动力投资委员会，而非进入由行业领导的地区技能联盟。

10. 通过《制造业大学法案》(The Manufacturing Universities Act)，该法案将授权并提供资金，围绕制造业大学这一核心内容，创建至少20所顶级大学。

11. 通过《2015年国家工厂实验室网络法案》，该法案将为一个名为“国家工厂实验室网络”的非营利组织制定联邦章程。

12. 资助一个将创客行动和创客空间与高中相结合的试点计划。

13. 为研发提供足够的资金，用于攻克与物联网相关的关键技术难关，例如开发相关标准、改善网络安全以及降低功耗。

14. 在未来五年内，为国家战略计算机计划(NSCI)及其相关的联邦高性能计算机计划提供资金支持，每年至少3.25亿美元。

15. 认识到贸易协定(如《跨太平洋伙伴关系协议》(TPP)、《服务贸易协定》(TiSA)等)中存在部分重要条款，能够防止伙伴国家之间设立跨境数据流动障碍，否则可能严重遏制智能制造的潜力。

下届政府或所属代理与相关部门应:

1. 继续贯彻落实国家制造业战略。

2. 确保制造业拓展伙伴(MEP)中心与所有制造业创新研究所展开密切合作，识别新兴的制造工艺技术，并将其迅速传播给中小企业制造商。

3. 指导美国国家标准技术研究所(NIST)继续制定智能制造标准的格局，利用其号召力促进行业自主发展和采用可相互操作的数据通信标准，并通过有关标准和实践解决网络安全和隐私问题。

4. 商讨(和执行)贸易协议

要求，防止伙伴国之间设立跨境数据流动障碍。

二、为何现在开始智能制造?

历史上先后出现过几次重大的制造模式变革，在这些变革中有的地区取得了领先地位，有的地方却相对滞后。人类历史绝大部分时间当中，“制造业”与手工制造(即个别有手艺的青铜器或铁器工人)总是分不开的，这种模式一直盛行，直到中世纪时期(约公元700年)，之后它逐步让位于仍旧专营贸易的行会生产系统，由个人生产向行会生产水平发展。这个系统最终被18世纪末由英国开始的第一次工业革命所取代。这次革命带来了以水和蒸汽为动力的机械生产设施(如轧棉机和纺织机)并且极大地提高了铁制产品的使用量。

近一个世纪后的19世纪末期，第二次工业革命爆发。此次革命以劳动力分工为基础，引入以电力驱动的大批量生产模式，增加了钢制产品和机器的使用量，同时也将流水作业概念(即亨利·福特(Henry Ford)的批量汽车生产理念)付诸实践。由此展开了第二次工业革命。随着战后各自独立的制造商开始引入自动化技术(这一名称最早出现于1945年，指代生产某一特定部件或执行某一特定工艺流程的

单一目的机器)以及自动化连续流水式系统(连续流水式创新可追溯到1939年,当时新泽西州标准石油公司创造了第一套工业用流化设备),第三次转变业已发生。在这些工厂中,原材料从一端连续流入,经加工后成为产品从另一端流出。二战后的数十年间,这些系统不断被引入不同行业并加以改进升级,制造业生产力大幅提高。然而,这些系统却有一个弊端——灵活性较低,系统一旦发展成熟,相关工作往往可以由低水平劳动力完成,且远离终端消费市场。与此同时,科学产业(包括电子和化工)的出现意味着产品数量不断上升,且日益精细。然而,值得一提的是大多数评论者都忽略了这第三次转型,将其与19世纪90年代末的变革视为一体。因此,许多人将今天的转型称为“第四次工业革命”或“工业4.0”(本报告将把当下的转型视为第五次技术浪潮)。

第四次变革发生在20世纪80年代和90年代,当时首个数字电子系统问世,信息通信系统(例如计算机辅助设计和制造、机器人等)进一步推动了自动化制造发展,提高了产业灵活性,更主要的是还优化整合了分散的供应链,从而实现了多种生产全球分布。

如今兴起的是第五次技术浪潮——“智能制造”时代,此次

变革将先进的数字技术更完整地整合到生产系统之中。这些技术包括无线通信技术、物联网、云计算、简易的可编程机器人、机器智能和其他下一代数字技术,旨在实现虚拟和物理世界之间直接且实时的沟通。

在当今先进制造技术的基础之上,自动化、智能化设备和系统利用传感器数据(通常通过无线技术传达)来控制材料、产品和信息的流动情况,将生产过程转变为模块化的灵活系统,进而提高效率,加强创新并节约资源。

第五次技术浪潮还包括使用数字设计技术,这一应用不仅可以优化产品自身的设计,还能从工厂层面优化产品加工工艺流程并通过产品数据分析持续改进设计和性能。正如西门子公司加拿大总裁兼首席执行官罗伯特·哈特(Robert Hardt)所说,智能制造的基本特点就在于“通过各价值创造实体之间的相互联系,实时提供所有相关信息,并且及时从这些数据中获得最佳价值创造流程。”

如表1所述,智能制造时

表1 促成智能制造的关键技术

传感技术	嵌入设备、机器和产品中的传感器可用于测量诸多数据,从输出、消耗、磨损和容量,到重要的操作条件(如温度、湿度和电流)。传感器所提供的信息流对于智能制造技术来说至关重要。在过去10年中,传感器技术的成本已经下降了百倍,而全球传感器的数量在2012年至2014年的三年间增长了五倍以上,全球传感器的装运量从2012年的42亿增加到了2014年的236亿。
无线连接技术	智能制造需要通过无线连接技术将各种传感器、执行器和机器人连接到分析或控制平台。目前,已有各种各样的解决方案投入使用以填补这一角色的空缺,有的基于未授权频谱,有的则由移动运营商通过许可频谱提供。运营商正在寻求5G和包括窄频带物联网等在内的过渡技术,以便接纳大量涌入的物联网设备。在未授权领域,已经开始出现诸多开放和专有的标准。也许最值得注意的地方在于,以物联网为重点,利用WiFi和802.11ah技术能够针对900MHz频段中较长电池寿命和广阔区域提供互联性。将传感器和互联性组合在一起便可实现所谓的物联网,即通过传感器和通信设备将机器、产品和基础设施等广泛的“事物”与互联网相连。“工业物联网”这一术语特指其在工业领域内的应用。
数据分析技术	个体工厂、整体工厂、整体供应链和制造业产品本身便会生成大量数据,能够有效分析这些数据的能力对于实现智能制造至关重要。因此,数据现在与人力、技术和资本一样,都属于企业的核心资产。
衍生设计	这是一种模仿自然进化方法的设计技巧,设计人员或工程师将设计目标与相关参数(例如材料、制造方法和成本约束)输入衍生设计软件中,通过软件算法探索所有可行的设计解决方案组合。
计算机辅助设计(CAD)	指使用计算机系统来帮助创建、修改、分析或优化部件、最终产品乃至整个生产系统或工厂环境的设计。
高级机器人技术	下一代工业机器人不仅价格低廉,而且可进行重新编程,因而可用于处理多样化任务,功能更加丰富同时更具灵活性。新工业机器人可以模仿人类的运动,甚至可以由工作人员亲自操纵机械臂向机器人展示如何执行某些特定任务。

代的到来,得益于一系列基础性数字技术的出现和成熟,这些数字技术能够通过“数字线程”,跨越个体生产机器、整体生产流程、全体工厂与更广泛的企业、整体产业供应链以及制造业产品本身,实现实时创造、存储、通信以及数据分析。

三、智能制造现状与具体应用

本节首先明确阐述了先进制造和智能制造之间的主要区别,然后描述了智能制造如何改变制造生产的每个步骤。

1. 先进制造并不等同于智能制造

各种不同的用于描述目前技术变革的术语造成了相当大的混乱。有些人将“先进制造”与“智能制造”相互替代使用。例如:经济合作与发展组织(OECD)对“先进制造”的官方定义——“先进制造技术指的是利用计算机控制或微电子设备对产品进行设计、加工和处理”——与智能制造或多或少有些相似。还有些人用该术语来形容先进技术产品的制造行业。

总统科技顾问委员会(PCAST)将“先进制造”一词定义为“(a)基于信息协同、自动化、计算、软件、传感和网络,和/或(b)利用物理和生物科

学领域的尖端材料和新原理(例如,纳米技术、化学和生物学)的一系列活动。它不仅包括用新方式生产现有产品,还包括利用新的先进技术生产新兴产品。”从本质上讲,先进制造包含两个内容:生产先进产品和采用先进的、以信息通信技术为基础的生产流程。智能制造则侧重于后者。

事实上,智能制造特指将信息技术应用于现代制造业生产过程中的各个方面——从产品的设计、制造和消费方式;到如何连接和编排工厂车间生产过程中涉及的各个机器和设备;再到中间产品如何通过整个生产供应链送交总装。智能制造实际上包含所有可用于制造过程的信息技术,这些应用能够提高生产力、节约成本、降低能耗并为购买者提供创新型定制化产品。为了明确定义,美国第114届国会上有议案提出了可行的、正式的智能制造定义,并将其作为《2016年北美能源安全和基础设施法案》(North American Energy Security and Infrastructure Act of 2016)(S.2012)的一部分。法案中定义智能制造如下:

应用于信息、自动化、监控、计算、传感、建模和网络领域的先进技术,其主要特点如下:

(A)以数字化形式;模拟制造生产线;操作计算机控制的制造设备;实现生产线状态的监控和交互;以及管理和

优化生产过程中的能源生产率和成本;

(B)厂房能源效率的建模、模拟和优化;

(C)监测和优化建筑的节能性能;

(D)产品能源效率及可持续性性能的建模、模拟和优化,包括使用数字样机和增材制造以加强产品的设计;

(E)通过网络连接制成品,以监控并优化网络性能,包括自动化网络操作;以及

(F)供应链网络的数字化连接。

然而,许多人认为,制造业只与“物质”有关——即利用物理材料来生产实物产品。事实的确如此,不过它也与“信息”相关——部件所处的位置、机器如何能够有效运作、如何管控机器以及如何对产品外观和功能进行预期。换句话说,制造业所面临的挑战不仅是物质方面的挑战,同时也包括信息方面的挑战。(事实上,制造商应尽可能将“信息”而非“物质”推向终端客户)。直到如今信息通信技术(软件、数据分析、无处不在的无线信息传输、传感等)实现突破,制造业才开始有能力完全应对来自信息方面的挑战。从这个意义上讲,正如一些纯信息活动(如旅游代理商、财务、会计等)被信息和通信技术改变一样,制造业也开始迎来转变。

实质上,智能制造就是将“设计—制造—使用”的各个环节的信息同制造相结合。奥特克公司(Autodesk)的资深设计、制造行业战略专家迪亚哥·坦布瑞尼(Diego Tamburini)所说,完全无法想象一个设计水平低下、高油耗、不环保的车辆本身是通过最高效的制造流程生产出来的。然而智能制造并不是单一技术和因素组成的:智能制造必须包括从产品设计(包括节能利用以及操作方面的构思)到产品系统运行效率,再到产品应用的智能程度和可持续性整个产品生命周期中的连续过程的优化。

美国制造技术协会(AMT)的技术副主席蒂姆·辛巴拉(Tim Shinbara)表示,政策制定者应当了解智能制造的四个层级。第一层级是智能机器本身,通过加装传感器的方式用于成形、剪切、锻造、冲压的各种特定机器形成信息流并融入工业物联网。第二层级是“数字线程”通过工艺链的连接,将分散于独立机器之间的信息实现跨车间的信息流整合(创建出覆盖整个企业范围的制造系统)。这表示原本彼此独立的工艺链通过信息和通信技术的整合构成企业整体的制造生产体系。第三层级,要在这个庞大的“制造智能”体系中通过数据分析来优化工艺流程,并通过迭代的方式设计智能化产品。第四层级,则是智能化的CEO或者高管,

在建立了企业智能系统和部门的基础上被授权对生产水平、生产地点、生产设置等实施优化和实时决策。

诚然,这是智能制造未来发展的整体构想,但在此讨论过多难免有本末倒置之嫌,接下来的内容将详细介绍当代制造系统各环节中所采用的“智能化”应用。

2. 当代制造系统各环节中所采用的“智能化”

如前所述,数字技术将彻底改变现代制造业的各个方面:从制成品的设计到生产过程的管理和执行以及工厂运营,再到产业供应链整合,甚至包括产品一旦出厂后客户如何使用产品。事实上,有一项研究估算表明,目前制造商们平均拿出了研发预算的8.1%用于研发此类用途的数字工具。下面,本文将对制造过程各环节中所应用的信息技术进行分析。

(1) 数字化产品设计

计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助工程(CAE)的建模和仿真技术随着计算机计算速度的不断加快,包括高性能计算(HPC)系统的发展,开始逐渐改变产品的设计过程。计算机辅助设计利用几何参数创建电脑模型,计算机辅助制造(CAM)则利用几何设计数据来控制自动化的机器装备。近年来,计算机辅助设计、计算机辅助工程和计算

机辅助制造系统已经有了长足的发展,价格逐步降低、功能更加强大、普及率上升且操作更加简便。

例如在飞机设计方面,数字模拟使设计人员可以在风洞实验之前就对许多关键飞机组件——包括机翼和机身——进行改进设计和模拟操作。事实上,计算模型让航空设计师得以处理“虚拟环境下流体动力学多场耦合问题”。在减少新飞机所需风洞试验时长的努力中,这种数字化技术的贡献率占到了50%。同样,通用电气公司(GE)利用高性能计算驱动的建模和仿真工具“终止了原定的喷气式发动机设计流程,转为对发动机的各个独立组件(压缩机、燃烧室、涡轮、桨叶等)进行整体建模分析。”据通用电气估算,使用数字设计工具使其新喷气式发动机的开发时间缩短了半年,并且还发现每减少1%的燃料消耗每年就能为航空运营商节省20亿美元的成本。此外,固特异公司(Goodyear)也使用计算机辅助设计工具将其设计一款新轮胎的时间从三年缩短到一年以内,并且将公司研发预算中轮胎成型和测试费用的比例从40%降低到了15%。

中小型制造企业同样能够从数字化的生产研发工具中获益。这主要得益于这些数字工具(包括作为硬件支撑的计算设备)在云端(减少内部信息通信基础建

设的需要)和许可租赁平台(相比以往那种昂贵的永久许可模式,节省了预付费)上日渐普及。例如泽普高速备件公司(Zipp Speed Weaponry)是一家位于美国印第安纳州的专营高性能自行车配件(例如轮毂和车胎)的小型制造商,也是美国目前仅存的一家高性能自行车配件厂。该公司利用高性能计算驱动的虚拟仿真软件协助设计赛车轮胎,这一方法使得他们能够更好地对理解流体动力学问题,成功解决了以往只能通过风洞实验解决的湍流问题。这一技术也使得该公司在全球竞争中保住了独一无二的市场空间。在此基础上设计出的空气动力轮胎于2010年上市,并在两年内使公司的全球收入翻倍,还为印第安纳州创造了120个新的就业机会。

数字建模和仿真工具这些令人印象深刻的应用案例还只是开始。如今,基于计算机的衍生设计工具让产品设计师能够设计出以往难以想象的产品形状、结构和材料属性。设计师能够通过衍生设计技术告诉软件自己想要的产品形状、相关限定条件以及结构和材料特性;然后计算机将给出比设计师设想的更高效、更完善、更结实、更轻巧和更耐用的方案。

例如,欧特克公司的计算机辅助设计软件付诸实践已有数十年之久,但是该公司现在仍在开

发和部署一种更为依靠数据驱动的方法,通过利用新的算法协议,让设计师基于材料和性能需求清单进行设计,其设计结果还能使用高精度的增材制造(如3D打印)方式进行制作。图1展示了一种衍生设计的飞机机舱隔板——仿生隔舱,该部件由衍生设计而成,然后通过3D打印成形,部件上使用的先进材料也比现有材质减重了近50%(同时强度也得到了大幅提升)。如果全部使用这种隔舱,一架空客A320能够减重1100磅。同时由于每减少2.2磅的自重每年就能够节省233镑的燃料消耗,一架应用新型隔舱的飞机每年能够减少166公吨二氧化碳的排放。如果将这一产品应用于一家航空公司所有的A320空客上,每年二氧化碳减排可达465000公吨,相当于96000辆大客车停驶一年。

衍生设计工具的发展加上增材制造等新的生产技术,拓宽了设计者和制造者的想象空间。《华尔街日报》(The Wall Street

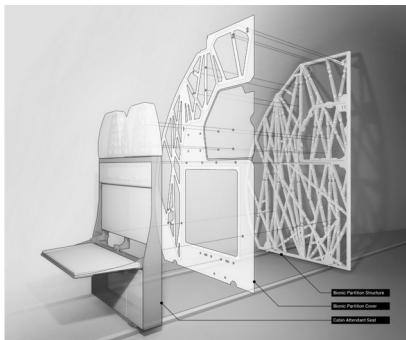


图1 衍生设计技术构建的概念型飞机机舱隔板

Journal)的约翰·克腾(John Koten)表示,“通用电气公司的设计师和工程师已经开始对古代文物和史前鸟类化石重新进行拓扑研究,以寻找设计的灵感。他们设想:几个世纪前的前辈们可能因为当时研磨或铸造等传统手段的限制而不得不放弃一些创新的结构。”

简单来说,以信息技术为基础的设计工具正在改变产品的设计方式,加快产品研发的速度,节约资金,给顾客提供更为优质产品,甚至可以成为制造商竞争优势的来源。除了优化了设计过程之外,信息技术在产品制造、生产这一过程中的作用也日趋重要,下文将对此进行详细阐述。

(2) 增材制造(3D打印)

无论是用于计算机数控机床(CNCs)还是第一代工业机器人,信息技术长期以来都在车间层面对生产过程和系统起着引导作用。但是,第五次技术浪潮日益增长的能力已经解锁了新的模式,不再仅仅是数字化设计,还包括数字化生产。

尤为值得一提的是,正是数字化真正挖掘出了增材制造或3D打印的潜力。在增材制造中,依据数字文件(每层是最终物件的横截面图)将材料一层层堆叠制造,直至生成三维实体物件。迄今为止,大多数制造工艺都是在做减法,也就是说,它们通过研磨或冲压,使钣金或铝块形成所

需形状；相比之下，增材制造则是逐层制造，其所能实现的新形状和机械连接都是传统的减法制造技术无法实现的。

增材制造可投入诸多领域以提高速度和效率、减少误差，并消除生产线上的浪费现象。例如，在传统的减法制造中，根据所需的复杂性和形状不同，大约 60%~70% 的铝块最终会变为废弃金属。增材制造能够明显提升材料使用效率，极大地降低材料浪费，进而获得相应的环保效益。此外，增材制造一旦得以进一步完善，还可以大大减少部件数和步骤，同时减少典型制造过程中的潜在出错率，从而将生产率推向新的高度。综上所述，目前，全球 3D 打印行业的收益预计将从 2013 年的 31 亿美元增长到 2018 年的 128 亿美元，到 2020 年将超过 210 亿美元。增材制造业已经准备对涵盖鞋子、假肢、卫星和药物等全体商业和消费者产品产生巨大影响。

例如，耐克公司 (Nike) 和安德玛公司 (Under Armour) 都在探索利用增材制造改变鞋子的制造工艺，旨在能够为每个运动员定制生产运动鞋。例如，安德玛的缔造者 (Architect) 系列运动鞋 (一款训练鞋)，便是最先利用 3D 打印技术制造鞋底夹层，旨在帮助运动员在力量训练期间保持平衡。而耐克则将其“飞织”系列跑鞋 (Flyknit) 定义

为“世界上第一批使用增材制造批量生产的消费品”。该技术能够将鞋舌、鞋底和鞋面分开制造，然后缝合在一起，并通过专用软件指导 3D 打印机切换材料，从而按需增加强度或灵活性。这使耐克生产鞋子的部件由几十个变为几个，减少了 80% 的浪费。

增材制造技术在个性化产品中的应用才刚刚起步。西门子公司使用增材制造定制生产适应个体佩戴者耳道特征的耳内助听器。3D 打印技术能够根据患者的特定的结构需求和设计意愿制作假肢，为假肢行业带去了革命性的变化。欧特克和多伦多大学 (University of Toronto) 现已联合尝试了许多不同的肢体扫描方式，并为乌干达 (Uganda) 和其他饱受战争摧残的地区定制了一批 3D 假肢模型。以前，获得假肢的过程可能需要几周到一个月的时间，但是有了新的 3D 扫描和身体塑模技术，患者可以快速、精准地获得假肢模型，然后通过 3D 打印机制作出来。相较传统方式制作的假肢，这样的成品更加自然、贴合、美观。

在工业领域，增材制造技术，直到最近，主要用于产品原型制作。例如，福特公司 (Ford) 使用 3D 打印制作了许多汽车零部件的原型，包括气缸盖、制动器转子、换挡旋钮和弯头。增材制造技术在产品原型的制作中发挥着至关重要的作用，与此同时，

它也越来越多地被用于生产最终产品。例如，2014 年，通用电气航空公司 (GE Aviation) 宣布计划开始批量生产其通过 LEAP3D 打印的喷气式发动机燃油喷嘴。通用电气航空公司称，LEAP 设计的喷嘴极为精密，油耗低，只能通过 3D 打印技术制造，还预计使用这种喷嘴能够降低 15% 的油耗和碳排放量。通用电气航空公司现已投资 5000 万美元搭建了一处 30 万平方英尺的厂房，预计到 2019 年将生产 4 万个 3D 打印喷嘴。不过，这仅仅是个开始，西门子公司认为另一个“(增材制造) 可以应用的领域是通风与冷却管道集成化的涡轮叶片。”这样一来可以显着提升飞机发动机的性能，延长使用寿命。而在飞机制造方面，波音公司 (Boeing) 已经利用 3D 打印技术取代传统的机器加工，生产了 300 种不同部件，共计超过 20000 多件。

通过增材制造实现衍生设计，这将形成一种强有力的生产搭配，能够为设计师和工程师提供新的工程自由度，使其利用较低成本的轻质结构制作具有复杂内部几何形状的产品，甚至实现原位移动组装。例如，传统的离心洗衣机制造需要 32 个部件，但如果使用增材制造，相同设备仅需三个部件即可完成，使小批量和定制生产成为可能。而洛克希德马丁公司 (Lockheed Martin)

则通过 3D 打印技术生产轻质部件，极大地降低了其卫星重量，并打算“在未来将这一技术用于生产复杂部件乃至整个卫星。”此外，通过帮助生产备件以支持即时（JIT）制造和“边际需求设备”，3D 打印也将有助于消除储运损耗和保持大量备件库存的需要。此外，增材制造的能力将随着未来几年的成本下降而稳步增长。事实上，据西门子公司估计，在 2013 年至 2023 年的 10 年间，即使 3D 打印机运行速度增长超过 400%，增材制造的成本仍将下降 50%。

除了工业应用外，3D 打印技术还将日益成为一种大众化技术。坦布瑞尼指出，随着廉价的 3D 打印机开始大量出现在人们家中或“创客空间”中——如遍布全国的技术工坊（TechShop）一类的小型制造场所，除现有的“个人计算”之外，还将出现“个人制造”现象。最终，3D 打印将推动实现“直接数字化制造”的时代，使用户真正实现依据 3D 建模“打印”出部件乃至最终产品，由过去单纯提供即时概念到如今参与创造，并推动实现无工具生产，显著降低库存和生产过程中可能产生的废料。直接数字化制造还将实现分布式和定制生产（定制生产是指“批量”生产不同质量的同一产品），这意味着可以在任何地方制造零件，并且更靠近客户或远程（例如，太空

或战场）位置。

然而，尽管增材制造在工业生产中的重要性与日俱增，但其局限性也不可忽视。短期来看，增材制造更应该是传统工业生产方法的补充而非替代。3D 打印技术在生产复杂、高价值、低容量、高度定制化产品时效果最好。但对于大批量生产的产品（如 10000 张办公椅、50000 个手机壳等），由于时间和成本的考虑，增材制造可能并不适用。美国国家标准技术研究所（NIST）《增材制造成本与成本效益》报告指出：对于数千零件的大批量生产来说，增材制造的成本目前从经济上看并无优势。此外，增材制造的耗时通常比传统生产方式长。然而，目前一种名为“混合制造”的全新制造工艺正在兴起。混合制造包含增材和减材两种技术（越来越多地置于相同设备中），结合了二者的优势：通过 3D 打印，在不浪费材料的情况下制造复杂形状，同时通过减材技术保证精度和表面光洁度。

（3）数字化支持工厂运营

智能制造业已蓄势待发，能够为制造商们提供全方位的视角，了解在多流程链中生产系统内各处所发生的变化，并通过实时智能化手段调整优化制造流程。其中包括实时掌握各生产机器和设备的运行状况及其运行环境，了解流水线和工作单元的效率，以及快速重新编程或重新配

置机器人和其他生产设备的能力，增加制造商的灵活性和弹性，从而更好地进行定制化生产。不过，其中大部分是通过给生产设备装备传感器并接入物联网来实现的。

麦肯锡全球研究所（MGI）期望未来能将物联网独立应用于制造业之中——换句话说，使用传感器让工厂车间的每一台生产设备智能化，从而更好地使其实现共同优化——预计到 2025 年，此举将使制造生产力从 10% 提高到 25%，全球工厂每年可以创造高达 1.8 万亿美元的新价值。关于智能制造应用（很大程度上由工业物联网驱动）如何能够优化工厂运营，成功的案例已经遍布制造业的各个部门。对于制造商来说，这些应用带来了一系列好处：提高生产效率的同时节省成本，减少缺陷的同时提高质量，通过事先预测减少突发故障停产情况，减少库存，减少浪费以及增强环境可持续性。

例如，智能制造正在改变汽车行业的生产流程。通用汽车（General Motors）利用传感器来监测车辆在涂漆时的湿度情况；如果环境条件不利，车辆或部件可以移动到车间的其它位置或根据需要调整通风系统。同样，哈雷戴维森摩托车公司（Harley Davidson）对摩托车喷漆区域的风扇速度进行实时跟踪监控，可以根据环境波动对风扇进行算法

调整。而福特公司（Ford）则在底特律市外的胭脂河工厂（River Rouge）全线布置了传感器。此举对福特公司而言有一极大的益处：下游机器可以检测到上游机器传来的工件是否合规，哪怕是极微小的尺寸差别也能准确判断，从而立即识别并修复上游机器中可能存在的问题。

数字化的制造过程也改变了国防承包领域。在洛克希德马丁公司，下一代数字制造技术已经重新定义了公司的生产周期，并构成了洛克希德马丁公司所谓的“数字挂毯”：一种由集成化模型工程（MBE）软件驱动的无缝数字环境，旨在利用数字化数据支撑产品从概念走向现实。换句话说，洛克希德马丁公司可以以定义零件或产品（比如：设计定义文件）的数字信息从其设计软件移至实际制造零件和最终产品的下游生产机器上。而雷声公司（Raytheon）使用类似的工具来跟踪生产过程中几乎所有的活动。例如，雷声公司声名在外的一点：能够追踪各工厂内每个螺丝的转动次数，这一点对于公司生产敏感装备（比如具有严苛容错率要求的导弹）而言至关重要。

生命科学和信息通信技术硬件制造商利用智能制造技术来预测潜在问题并降低成本。英特尔公司（Intel）利用数据进行预测建模，用以推测故障、确认质检优先级并降低其芯片制造厂的

监控成本。需要跟踪的潜在变量太多，“信息太少”将不再是工厂浪费和亏损的理由。默克公司（Merck）为改进一种疫苗，进行了150亿次计算，用以确定会对最终产品质量产生影响的环境和过程因素。

如前面的几个例子所述，在工厂以及对实际使用的产品的支持上，智能制造最重要的一个应用就是进行预测与预防性维护和修理。这让制造商能够实时监控生产设备的状态并且防止发生故障，或在发生故障后立即进行检测。从本质上讲，智能制造将维护模式从修复和替换转变为预测和预防。据麦肯锡全球研究所估计，使用预测性维护技术可将工厂设备维护成本降低40%，同时降低设备停机时间50%，并将资本设备投资成本（替换有缺陷的设备）降低5%。同时，麦肯锡全球研究所解释说：“一旦机器通过物联网传感器和执行器进行互连和管理，就可以用自动感应设备消除许多可能导致降低生产力的人力和机器错误，从而提高资产利用率。”与之相对应的，美国能源部太平洋西北国家实验室（U.S. Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory）预计资产维护可以节省12%的定期维修成本，将总体维护成本降低30%，并减少70%的机器故障。

通用电气的智慧工厂

（Brilliant Factories）计划——旨在将精益卓越的运营能力与其全球500多家工厂的数字能力相结合——就是一个引人注目的例子。通过使用这些数字技术，通用电气公司位于肯塔基州列克星敦市的家电园区（Appliances Park）工厂在生产洗碗机和洗衣机时，降低了50%的生产缺陷。制造商越来越多地将预测维护数据与企业资源规划（ERP）系统相结合，以期改进工作流程安排，从而优化维护计划并最大限度地减少机器停机时间。例如，为航空公司和货运业提供支持的塔勒瑞斯公司（Taleris）就在使用这种技术来预测飞机维护故障，从而尽量减少航班延误。同样地，德国蒂森克虏伯公司（ThyssenKrupp AG）利用网络设备传感器来识别和预测维护问题，从而减少计划外的停机时间，有助于避免不必要的维修安排。美国质量协会（American Society for Quality）2013年12月的调查结果表明，美国制造商正在部署更智能的机器以减少生产缺陷：82%的美国制造商已经开始投资智能机器和系统，其中49%称产品缺陷有所下降。

智能制造还将有助于强化库存最优化技术，简化并优化车间流程和订单履行作业。例如，配备机器人的仓库所能处理的订单量是未配备机器人仓库的4倍。再说一个例子，汽车配件供应商

伍尔特美国公司 (Würth USA) 开发了一个“iBins”系统, 利用智能相机技术监控运输箱的填充水平, 并将数据无线传输到库存管理系统, 根据需要自动重整供应。麦肯锡估计, 此类库存优化措施可以节省 20% 到 50% 的工厂库存置存成本。

此外, 通过利用工厂内各设备和生产系统所生成的信息, 可将物联网与智能制造相结合, 通过重新分配任务和重新定义工作流程来优化生产过程。换句话说, 现代软件和信息技术系统正在帮助设计最佳的工厂布局。例如, 通过为工人提供徽章、标签和其他传感器, 公司可以对活动、任务和交互行为进行追踪, 从而更好地了解各功能的运作情况。麦肯锡全球研究所估计, 这种工厂层面的组织结构重塑每年能带来高达 500 亿美元的价值。此外, 物联网传感技术可以在设备与个体工人相距过近时发出警报或停止设备或个体作业, 降低 10% 到 25% 的厂内工伤数量。如此, 在 2025 年前, 全球每年可节省 2250 亿美元。

最后, 智能制造技术让设计人员开始重新思考位置固定的传统工厂, 并尝试打造可移动工厂。例如, 辉瑞公司 (Pfizer) 目前正在开发便携式制造平台, 旨在高效地为需求最迫切的国家生产儿童疫苗。这些便携式制造平台和辉瑞公司的大型制造设备

并无本质差别, 只是尺寸更小, 以模块化形式打造的更为弹性化的版本。智能制造工具使辉瑞公司能够为这些技术系统开发管控战略, 进而高效地在全球范围内部署相应模块。

(4) 数字化连接的供应链管理

智能制造业也将大大提高公司管理供应链的能力, 从更广泛的角度来说, 它能够实现中小企业与其工业价值链的无缝融合。这一点非常重要, 因为工业供应链本身的相互关联性可能滋生风险, 而信息增多可以均衡召回和成功发货之间的差值。总而言之, 几乎整个制造业的各个方面都会受到影响。

在汽车行业, 丰田公司 (Toyota) 通过准确了解每个机床对应生产车辆的哪个部件, 更快地跟踪、隔离有缺陷的部件 (或产生故障的生产设备), 从而缩短了召回的时间, 也降低了成本。在德国, 包括宝马公司 (BMW) 在内的汽车制造商已经设定了一个目标: 了解每个车辆关键部件生产公司所有主要生产设备的实时状态。德国汽车制造商们不希望供应商突然打电话来通知他们刹车片或发动机零件得延迟交货, 这将导致整个生产周期滞后; 他们想要实时了解上游的任何问题, 以便他们立即评估生产计划会受到何种影响。

美国通用电气油气系统公司

(GE Oil and Gas) 利用云端供应链数据平台对材料、设备和服务进行管理。现在部署于五大洲的实时系统就是为了降低油田停运造成的高额损失, 同时为客户提供更高水平的定制化服务。同样, 惠普公司 (HP) 将网络分析整合到供应链监控之中, 利用数据可视化工具, 将优化供应链所需的时间降低了 50%。

(5) 工厂以外的智能产品

过去, 一旦产品从货运码头发出, 制造商们便很难对其性能进行跟踪。有的公司会针对产品性能向消费者进行调查。而其它公司则只能依靠保修、退换货等信息了解产品性能。但总的来说, 产品一旦离开制造商, 就进入了未知的世界。因此, 制造商提高其产品质量和功能性的能力也随之下降。

但是现在, 在智能制造的帮助下, 产品自身便能将承载的消费和服务信息以及可用于改进产品未来版本的相关数据反馈至设计过程, 甚至可将一些产品用作开发新产品的创新平台。其实, 产品正朝着智能化互联设备的发展方向, 并且逐步嵌入更广阔的系统之中。这也就是为什么越来越多的企业将“产品和服务进行捆绑销售”的原因。

这一切都将始于智能产品, 而智能产品包括三个关键部分: 1) 物理部分 (例如: 机电部件); 2) 智能部分 (例如: 传感器、微处

理器、数据存储、嵌入式操作系统和通常会配备的数字用户交互界面)；以及3)连接部分(例如：由天线或内部调制解调器提供的无线连接)。对于公司来说，智能产品的出现意味着产品设计者的思维也需要相应调整：从设计个体产品转向设计可在系统内操作的产品，这也意味着产品开发将逐步从单纯的机械工程领域转为跨学科的系统工程领域(重点关注信息系统部分)。总而言之，信息技术通过实现大规模定制、低成本可变性，常青设计以及产品本身成为商业平台的潜力(即通过服务可以反复获得收益的平台)改变了产品的性质。

首先，智能化连接产品中的软件可以显著降低整套产品的变体或定制化成本。例如，重型设备制造商约翰迪尔公司(John Deere)以前根据所需马力等级不同，为旗下的拖拉机、收割机和轧棉机制造了不同的发动机，但现在可以一律使用同一种标准发动机，然后通过软件来调整发动机马力。同样的，智能产品可以通过“无线”更新操作或控制软件，进而实现“常青设计”(对现有产品进行持续性升级或更新)。例如，特斯拉公司(Tesla)在旗下的汽车中安装了自动驾驶软件，公司可以远程升级该软件。再举一个例子，2013年，由于司机在路面上撞到金属物件，致使

两辆特斯拉S型车的电池被刺穿并起火。经过此事后，特斯拉意识到旗下部分车型底盘过低，并通过“无线”软件更新，使S型车在特定情况下能够提高车身悬架，从而大大降低车身被进一步刺穿的可能性。

智能产品还可支持远程操作。例如，ABB机器人公司(ABB Robotics)的工业机器人允许终端用户对其进行远程监控和调试。智利国家铜业公司(Codelco)是世界上最大的铜矿公司，现已实现采矿和挖掘设备100%自主运行，技术人员可在智利首都圣地亚哥的中央控制室对从南美到澳洲的全球采矿设备进行控制。此外，该公司近来开始在定期维护之前，使用机器人对设备进行提前检查，以期缩短维护时间并最大限度地减少设备管理监督成本。

在许多行业，智能产品的出现改变了制造企业的商业模式，随着越来越多公司开始接纳“服务化”——即将销售产品视为服务，租赁或按月订购皆可。在喷气式发动机、复印机、打印机和暖通空调(供暖、通风和空调)系统等众多工业产品上，公司不再仅仅是销售个别产品，而是越来越多地将产品作为综合服务进行销售。例如，通用电气公司的医疗设备部门不再向医院出售单一的放射设备(如核磁共振仪

或X光机)；相反，它销售的是放射性服务。在这种模式下，通用电气公司接管医院(或更大的医疗保健机构)的整套放射性设备，安装具有远程监控功能的设备，对设备的运行情况进行实时监控，提前诊断和检测各种潜在故障模式。实质上就是通用电气公司拥有并维护设备，向客户收取使用放射性设备的费用，而不是让他们购买设备。

同样地，喷气式发动机制造商们也不再向航空公司(或飞机租赁公司)“销售”发动机。相反，劳斯莱斯(Rolls Royce)“按小时出售功率”，通用电气航空发动机公司(GE Aviation Engines)出售“可靠的推进力”，为航空公司客户解决了固定资产贬值的问题。客户只用按其消耗的推力支付费用，将故障风险转移给出租方。这样一来，如果因为发动机故障导致飞机停飞，发动机服务供应方则需要承担所有费用。对于喷气式发动机制造商来说，一旦与航空公司签订承包合同，航空公司便不再关心提供动力的发动机到底是那家公司的产品。如此一来喷气式发动机出租人则可以暗中用自己的产品逐步替换竞争对手的产品。通过该方法，无需向航空公司销售任何产品，就可以在不知不觉中逐步提高产品渗透率。**MT**

(未完待续)

客车焊装柔性制造系统



郑州宇通客车股份有限公司

一、导言

郑州宇通客车股份有限公司是客车行业年产量最大的客车生产企业。经过多年的跨越式发展,人工成本和产能不足已成为制约公司发展的瓶颈,为了应对逐年上涨的人工成本压力,提高生产制造能力,提升产品的市场美誉度,推进制造系统的智能化、柔性化、自动化势在必行。宇通客车于2012年8月启动焊装柔性制造系统的研究工作。历经3年,开发了基于宇通生产现状的客车焊装柔性制造系统,该系统的投产有效的缓解了新能源客车的产能压力,降低了人工成本,提升了宇通客车的生产制造能力。

二、系统设计方案

客车焊装柔性制造系统设计顺应客车行业由劳动密集型向智能化、柔性化、自动化转型的发展趋势,旨在降低人工成本,提高生产制造能力,以争创行业领

先为目标。该柔性制造系统能够满足客车行业多品种、小批量、定制化的订单生产模式,重点解决客车焊装总成的柔性制造和自动化混流生产。

系统设计集成了弧焊机器人集群、重型焊接变位机、柔性工装、工装库、工装切换系统、除尘系统、智能监控系统等7个子系统。在整体工艺布局上,采用机器人集群居中布置,双焊接变位机左右横移穿梭方案,实现机器人弧焊集群的生产效率最大化;应用机器人+激光扫描系统及多种传感器技术,自动识别焊缝状态,智能选择焊接参数,自动差补焊道轨迹,提高了机器人焊接对零件的容差性能;同时综合应用冷弧焊、脉冲焊、多层多道焊等多种焊接方法,建立针对客车焊接总成的专用焊接参数库,有效解决了总成结构变化多、焊缝间隙不稳定、焊接余高控制困难等问题;通过工装库、工装切换系统、焊接变位机的系统联动,不同车型的工装可以完成快

速整体切换和精确定位,实现焊装总成的自动混流生产。

客车焊装柔性制造系统依靠数字化模拟、实时检测、智能控制等技术,保证了产品制造精度和一致性;柔性化和自动化的设计策略,使多品种、小批量的生产模式实现了高效柔性制造;计算机网络、数据库和先进通讯技术的支撑,使信息敏捷传递、快速处理得以实现;数控化生产设备、物流设备和信息管理系统的应用,实现了客车焊装柔性制造系统的全自动联线生产和全过程监控;除尘系统的联动控制,满足了改善工作环境、降低能耗的绿色生产需求;多系统硬件高度集成,占地面积2640 m²,双班年产能1.2万台,符合小场地,大产能的精益生产特点。综上所述,该系统符合智能化、柔性化、自动化、高效、绿色、精益的设计要求。

系统研发过程中,先后突破了多个重大设计制造难题,如:大尺寸焊接总成的焊接变形控

制、电控系统运行稳定性控制，重型机械结构自重挠曲补偿，高密度弧焊机器人集群电气干扰等。在困难中找机会，在探索中寻创新，提升了自主研发能力，为客车焊装柔性化制造提供了一个成功的范例。

三、硬件系统

1. 硬件系统构成

客车焊装柔性制造系统集成弧焊机器人集群、重型焊接变位机、柔性工装、工装库、工装切换系统、除尘系统、智能监控系统等七个子系统。具体工艺流程如图1所示。

2. 弧焊机器人集群系统

此系统由机器人、激光扫描及焊接传感器系统、焊接电源、接地系统、送丝系统等构成（图2）。在设计阶段应用数字化工艺规划和机器人焊接仿真模拟，选定14台弧焊机器人集中布置方案，可以实现焊装总成正反面焊缝同时焊接，有效控制焊接总成的焊接变形问题，提高制造效率

和系统自动化率。该弧焊机器人集群系统具备以下特点。

（1）弧焊机器人配备转臂式第七轴，作业半径大，适合机器人群高密度布置，焊接可达率较传统六轴机器人大幅度提升；机器人的信息通讯和互锁关系采用分组群控构架，生产信息通过网络传输给主控机器人，通过主控机器人进行任务分配和通讯互锁，实现机器人集群与焊接变位机的系统联动，满足多车型的混线生产需求。

（2）智能传感技术综合应用，机器人配备了激光扫描系统、电弧跟踪系统和触碰寻位传感系统，多种传感技术的综合应用使得机器人能够识别型材焊缝位置、间隙和阶差，根据不同的焊接工况，智能调整焊接参数及焊接轨迹，提高机器人焊接对零件的容差性能，提升焊接质量。

（3）配备多层多道焊及焊接参数插补软件，焊接系统高度开放，可以根据工况进行自主开发，有效降低编程复杂程度，提升编程效率。

（4）应用滑动导电装置实

现双焊接变位机单独接地，应用弹性导电机构实现焊接总成的分区接地，有效解决了弧焊机器人集群焊接过程的电气干扰。

（5）应用两级送丝装置实现远程送丝，桶装焊丝集中供应，方便生产物流和焊机维护。

3. 重型焊接变位机系统

焊接变位机由头尾双立柱、母梁框架、伺服电机、滚珠丝杠、重载导轨等组成。变位机的驱动全部应用机器人外部轴实现，通过机器人系统集中控制，可以实现与机器人焊接过程同步运动，确保机器人能够以最佳姿态进行焊接。双变位机高速横移穿梭，实现机器人弧焊集群的生产效率最大化。母梁框架与柔性工装通过气动快换定位机构，保证柔性工装的快速切换和安全锁止；其技术难点在于重型母梁的自重挠曲变形补偿，母梁框架在设计阶段应用CAE分析技术，确保整个装备的运动力学模型合理稳定；生产阶段应用变形补偿机构进行多点位置补偿，保证母梁框架结构的重复精度。变位机的旋转和

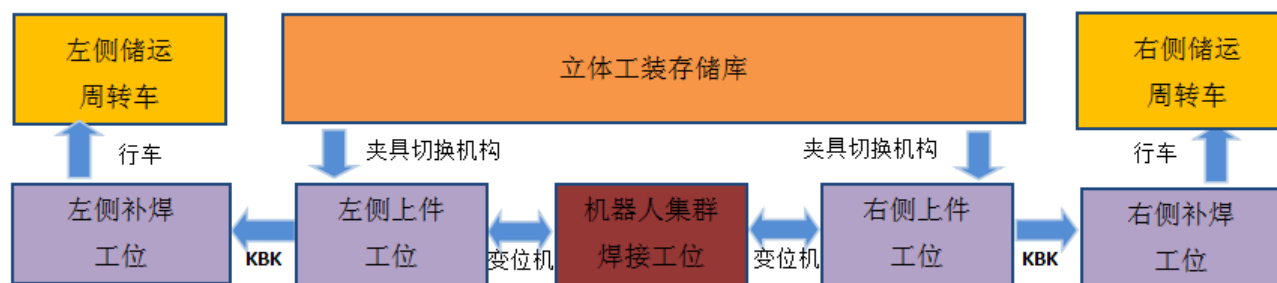


图1 工艺流程图

升降运动力学状态复杂，驱动形式选用双轴驱动同步控制模式；平移机构选用大功率单轴驱动，实现变位机快速平稳运行。在上件工位，变位机的升降动作配合活动踏台的应用，作业人员可以实现符合人机工学的最佳作业姿态。

4. 柔性工装

由主框架、辅助梁系统、定位压紧机构、切换机构、电控系统、气路系统等组成。按照乘用车高精度工装标准设计、加工、装配和调试，系统运用尺寸工程理论，全过程激光三坐标测量跟踪，确保了工装的定位精度。设计前，运用 CAE 模拟分析并探索应用弹性 BASE 结构设计理念，优化主框架和辅助梁的力学结构，有效降低了大型工装的自重。设计中，应用机器人焊接离线仿真技术，模拟并检查出工装上影响机器人焊接的干涉位置，通过优化工装局部结构，有效的提升了焊接自动化率。工装的定位机

构具有多个方向的调整功能，试生产过程中，根据焊接变形量统计分析，应用焊接反变形手段，有效控制大尺寸焊接总成的焊接变形。

通过多种快速切换装置的开发和应用，柔性工装系统具备站内“小切换”功能，即：通过调整工装上的切换机构，实现同平台不同车型的柔性切换，实现快速和精准定位。工装整体切换时，通过主框架上的气电快速切换机构，实现通讯、电源、气路的快速通断。执行单元全部使用电控气动模式，可以实现零件的自动夹紧、打开和同步顶出，经生产验证，该柔性工装能够有效控制焊接变形，保证焊后总成尺寸精度和一致性。

5. 工装库

由左右存储库、升降移栽机、辊道输送线等构成，可以满足多种车型工装的立体存储（图 3）。左右存储库分别布置在升降移栽

机两侧，可实现左右存储库共用升降移栽机的目的。工装库的库体两侧设置无动力锥型辊用以校正工装的滑移方向，库体底部的重型托举辊经过精准调平，可以避免柔性工装在存储和输送过程中的自重挠曲变形。升降移栽机独特之处在于：不仅能够承载工装进行升降运动，同时移栽平台上配备了伺服驱动的往复小车，实现柔性工装的横移出入库动作。升降运动时，通过升降移栽机两端布置的定位销配合库体的 V 形定位块，可保证升降移栽机层高方向的重复定位精度；横移运动时，往复小车上的电磁铁（电磁铁具有过载保护功能）与工装吸合后，通过伺服驱动系统将柔性工装从工装库中平稳拉出和准确到位。工装库底部安装了多条辊道线，可以实现工装的前后出入库动作；辊道线与柔性工装的支撑梁均匀接触，避免工装的输送变形问题。

该系统可以实现最大 24 套

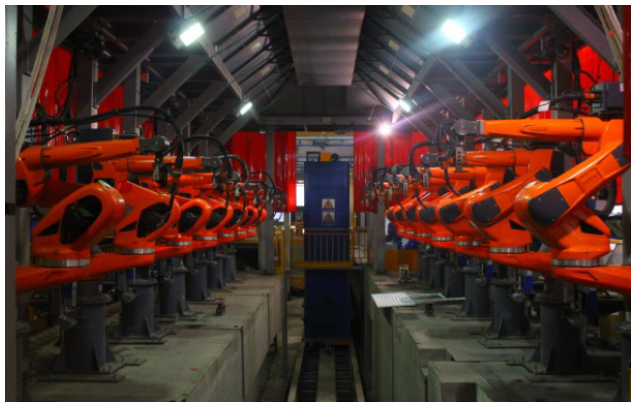


图 2 弧焊机器人集群系统



图 3 工装库

工装的立体存储，解决了客车行业大型总成工装存储、输送的变形难题，同时节省了大量的工装存放面积。

6. 工装切换系统

由移载变位机、移载母梁、重载导轨、空中移载机等构成。由于移载变位机需要同时承载两套工装质量，所以其升降、翻转、平移全部采用双驱形式。移载母梁采用正反面双工作台模式，工装切换时，移载变位机会带动两套工装翻转切换，减少移载变位机返回库体的运行时间，提升生产节拍。移载变位机翻转时，通过均布在移载母梁的多组气动马达实现与柔性工装安全锁定，确保工装在翻转过程中安全可靠。移载变位母梁上设置的定位销与焊接变位机母梁的定位销定位位置和定位形式完全一致，定位基准的统一保证了柔性工装在频繁输送切换后的重复精度，进而确保工装与机器人的相对位置稳定性。

切换系统具备工装整体更换功能，实现工装整体库内“大切换”。系统最大可以实现 12 类平台级的快速转换，所覆盖车型近 40 种，为多车型混流生产提供保障。

7. 除尘系统

由吸尘罩、除尘管道、除尘主机、过滤器、消音器等组成。

该系统与主控机器人联动控制，确保在机器人焊接时，焊接区域的烟尘有效排除。机器人停机时，除尘系统自动关闭，有效降低能源消耗。除尘系统采用车间内循环方式工作，配备专用消音装置，确保设备运行噪音在 85 分贝以下。

8. 监控系统

由监控摄像头、显示器、监控主机、存储硬盘、急停系统等组成。通过布置在不同工位的监控摄像头，实时视频监控各系统的运行情况，方便操作人员对各系统的日常生产及紧急情况监控和处理；监控主机与主 PLC 联网，能够完成任务远程下达，实时生产状态监控。

四、控制系统

1. 控制系统构成

客车焊装柔性制造系统由以下五个子系统构成：弧焊机器人集群控制系统；重型变位机和柔性工装控制系统；工装存储和切换控制系统；除尘控制系统；监控终端系统（网络拓扑图如图 4 所示）。控制系统采用集散式控制思路进行设计，由主控 PLC 和分布式 PLC 构成，PLC 间通过工业以太网和现场总线网络进行数字化通讯。系统能够根据订单排产计划，通过现代信息技术和智能传感技术的应用，实现工装自动切换、机器人焊接程序自动切

换、焊接过程智能识别、生产状态监控等功能。该系统从智能控制角度解决了多品种、小批量生产带来的行业难题，为提升客车智能制造提供了思路和借鉴。

2. 弧焊机器人集群控制系统

由十四套机器人焊接系统构成，控制系统采用分组群控构架，即：控制架构上分为两个群，每群七套机器人中的一台机器人担任主控机器人，实现群内统一控制并与主 PLC 进行通信。两台主控机器人从主 PLC 接受焊接任务信息，并将计划信息转化为焊接程序列表，控制群内的机器人统一进行焊接程序切换。

弧焊机器人配备了激光扫描及触碰寻位系统（图 5），通过多种传感器技术的复合运用获得焊缝检测信息（如：焊缝位置、焊缝宽度、焊缝体积、焊缝阶差等），机器人后台将测量信息与数字模型进行对比分析后，智能化修正机器人工作轨迹，保证焊接的实际路径与焊缝的真实位置一致。该系统具有自动检测传感、智能调用焊接参数，自动差补焊道轨迹等功能，可以有效提高机器人焊接对零件的容差性能；同时针对客车焊接总成特点，总结建立专用焊接参数库，通过综合应用冷弧焊、脉冲焊、多层多道焊等多种焊接方法，保证焊接质量目标达成。

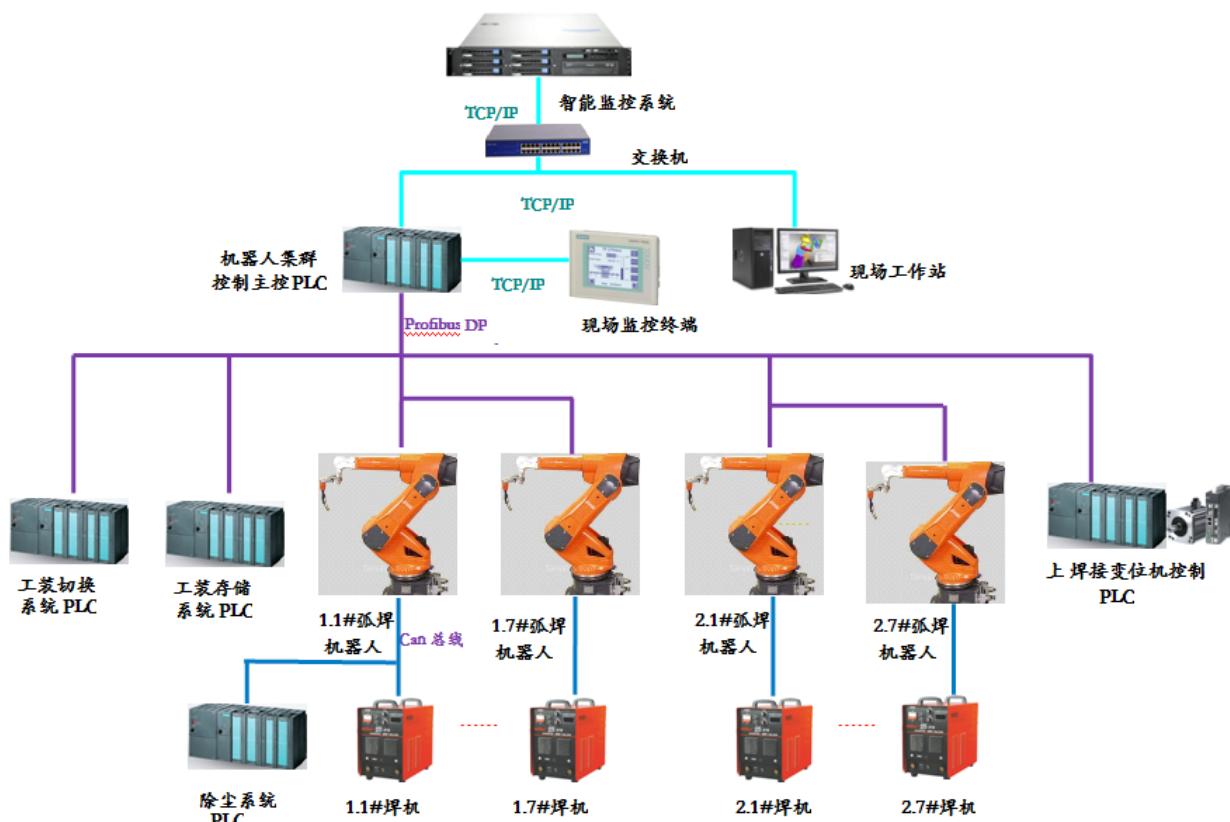


图4 控制系统网络拓扑图

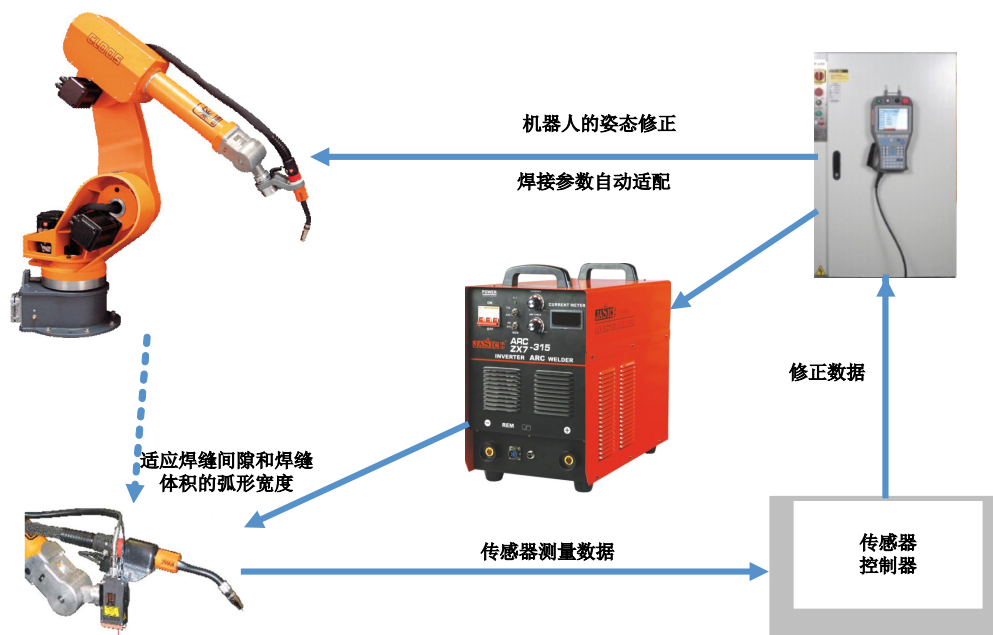


图5 机器人智能焊接控制流程图

3. 重型变位机和柔性工装控制系统

由主控 PLC、伺服位控模块、电气自动快速切换装置、定制化固态继电器切换模组及智能变位机翻转机构组成。机器人专用重型变位机在焊接领域属国际难题，其技术难点在于重型装备多轴伺服的位置精度和长期使用稳定性的控制，基于以上分析，在控制系统上应用了多轴伺服定位插补技术、齿轮间隙补偿技术、多轴同步精确位置控制技术等国际先进技术，确保该重载变位机有较高的重复定位精度，能够更好地服务于机器人焊接系统。

柔性工装锁定到变位机母梁后，通过气电快速切换装置实现变位机与工装之间的通讯、气路、电源快速对接，由变位机 PLC 统一控制，实现变位机的升降和工装夹具的压紧、空位、打开和顶升。在人工装、取件过程中，应用人机交互流程化程序，实现变位机位置的自动转换，方便员工装件作业。

4. 工装存储和切换控制系统

由工装存储系统、工装智能出入库系统、工装移载系统、工装切换系统组成。工装库立体存储了多个车型工装，其控制系统不仅要保证工装的顺利出入库，还要能够识别每套工装的信息及相应的存储位置。每个车型的工

装信息及存储位置在工装库存储管理数据库中进行存储，每次入库及出库前，程序查询数据库，确定出库工装位置和入库工装存储位置，实现准确稳定的出入库操作。

工装储存和切换系统的联动控制，可以满足自动识别工装存储库位，智能出入库流程控制，输送平台间的工装自动移载、自动切换的需求。该系统可根据排产计划，智能选择出入库车型工装，完成工装在输送过程中的自动定位、快速转运和变位机上的快速切换。整个过程无需人工干预，全程自动控制。同时为了缩短下一个工作循环的周期，工装智能出入库系统会提前启动，在提示并得到确认后，提前将柔性工装转载至中间准备位置，缩短切换时间。

5. 除尘系统

除尘系统控制设计需要在不影响焊接质量的前提下，实现降低车间粉尘浓度，满足节能低噪的设计需求。基于客车焊装车间的作业环境，应用了以下控制方案：

(1) 使用变频技术调节吸尘风速，以适应不同的工况，实现吸尘风速可控。

(2) 根据焊接工艺自动调节风速，采用在焊接时降低除尘风速，保证焊接电弧保护气体区内气流稳定，焊接完成后提高风

速，保证焊接烟尘及时排除的动态控制模式。在确保焊接质量的前提下，最大程度的降低车间焊接粉尘。

(3) 采用与机器人工作站实时联网的系统控制模式，实现除尘系统在机器人焊接作业结束后延时 30 秒自动关机，以降低能源消耗。

6. 智能监控系统

该系统集合了整个客车焊装柔性制造系统的相关状态及控制信息，能够实现生产任务的远程排布、各机器人机组的生产状态监控、在线与入库工装的状态监控、除尘系统状态监控及调整。

7. 智能系统构架与接口预留

针对后期规划的智能化系统建设，该项目预留了智能化接口。在硬件方面，预留了工业以太网接口，外部计算机可以通过网线实现快速连接。在软件方面，设计了关键数据交互区，实现了关键数据可通讯交互，为信息物理系统建设提供了完整的接口。

五、先进性

(1) 柔性化制造：该系统可以实现同平台车型工装“站内小切换”，异平台车型工装整体“库内大切换”，再配合机器人本身具备的柔性化特点，系统最

大可以实现 12 类平台级的快速转换，所覆盖车型近四十种，实现多车型混流生产。

(2) 多系统高度集成，自动化程度高：硬件系统集成整体设计，电控系统基于信息技术和工业网络实现系统联动和群控互锁，中央监控系统对生产状态实时跟踪，实现自动化和全闭环的现代化现场管控模式。

(3) 智能化焊接系统：弧焊机器人配备了以激光扫描为代表的多种传感器技术，可以实现零件位置检测、零件间隙和阶差判断、智能焊接参数选择和焊接轨迹修正，最大限度降低零件精度对焊接质量的影响，实现焊接控制由自动化向智能化的跨越。

(4) 专用弧焊参数库：基于长达 18 个月的焊接系统实验和调试，综合运用普通焊、冷弧焊、脉冲焊、多层多道焊等多种焊接方法，建立起针对客车焊接总成的机器人专用焊接参数库，有效

的支撑焊接质量的控制和提升。

(5) 客车焊装柔性制造系统是现在客车焊装领域制造柔性最强、自动化程度最高、系统最复杂的焊装制造系统。该系统投产后，不仅提升了客车焊接总成的焊接质量、尺寸精度和生产效率，更重要的是，该项目为客车焊装领域的智能化、柔性化、自动化摸索出一条可行的道路，为国产客车行业焊装发展起到借鉴作用。表 1 为客车焊装柔性制造系统主要技术指标。

六、主要成果

公司通过多年来的自主研发和系统的技术创新，逐步掌握了电控、安全、节能、环保、舒适、电子化智能化技术，形成相应的领先技术和产品优势。在电动客车领域，形成了多项行业内独有新技术，如发动机智能启停技术、基于功能划分的电动客车分层多

网络控制技术、集成式双电机控制器技术、基于模型的动力电池荷电状态在线估计算法、混合动力客车综合节能方法与技术。整车在安全性、可靠性、经济性上处于行业领先地位，建立了国内最专业的电动客车车辆远程监控系统，结合网络技术和信息传输技术对车辆状态、动力电池、动力系统、电附件系统等进行远程无线、实时监控，后台备份数据，实现故障诊断自动化、运营维护数值化、安全监控自动化。在电动客车动力系统优化及控制、电控及安全技术、平台化、标准化、通用化技术方面取得了大量的研究成果，形成了自主知识产权。

自主研制了节能与新能源客车动力平台，开发了全系列的混合动力、插电式和纯电动客车产品，具有自主知识产权，综合技术处于国际先进水平，其中整车节能与控制技术、高压隔离电源变换技术、高密度电驱动控制技术等方面处于国际领先水平，并投入批量应用获得重大经济效益和社会效益。

截至 2014 年底，宇通客车拥有软件著作权 15 件，有效专利 713 件，其中发明专利 21 件。2014 年当年共申请专利 343 件，其中发明专利 73 件，获得授权专利 255 件，其中发明专利 13 件。宇通客车共主持或参与完成 55 项国家及行业标准制定工作，其中 43 项已经发布，2014 年形

表 1 客车焊装柔性制造系统主要技术指标

指标	参数	指标	参数
焊接合格率	98%	工装精度	±0.2mm
焊接自动化率	81%	尺寸精度	±2mm
生产节拍	17 分钟 / 台	噪音	85dB
产能	1.2 万 / 年	粉尘	0.4mg/m³
机器人作业半径	2.5m	重型变位机旋转速度	8 度 / 秒
工件最大尺寸	12500mmX3300mm	重型变位机旋转速度	25m /s

成国家、行业标准 9 项。

宇通客车与清华大学等国内知名高校和科研院所建立了产学研合作关系，集成优势科技资源，提升了研发水平和创新能力。已获得省市级科技进步奖 9 项，其中河南省科技进步一等奖 2 项，河南省科技进步二等奖 1 项，河

南省科技进步三等奖 1 项，郑州市科技进步一等奖 5 项。

七、展望

经过多年的发展，信息技术、自动化生产技术和柔性制造技术在生产领域广泛应用，客车制造

也在逐步告别劳动密集型产业，向智能化、信息化生产迈进。中国客车行业将通过针对市场需求产品的柔性生产体系研发，实现全面基于产品定制化的智能化生产体系建设，提高国内客车的质量和竞争力，推进国内客车产品向中、高端发展。MT

(上接第 5 页)

表 1 某型数控车床误差补偿效果对比

类别	定位精度X (μm) (运动速度14.4m/min)		定位精度Z (μm) (运动速度12m/min)		稳定性
	环境温度23.3℃	环境温度34.5℃	环境温度23.6℃	环境温度31.7℃	
补偿前	7.019	26.46	17.84	60.04	3倍变化
补偿后	1.96	2.38	4.74	4.88	不变
补偿效果	误差减低72%	误差减低91%	误差减低73%	误差减低92%	好

误差补偿模型自整定。

将上述误差补偿技术应用于数控系统补偿功能的开发和机床的精度及精度稳定性的提升，得到了许多成功案例。如某企业数控车床批量建模和补偿，其效果如表 1 所示。利用企业自己采集的环境温度、机床温度，工件误差，构建了稳定的热误差补偿模型，补偿前误差变化幅度超过 3 倍，补偿后精度提高 1 级并恒定不变。此外，基于上述技术提出的摩擦误差补偿方法已经嵌入多

款国产数控系统中，作为补偿功能模块，在手机外壳加工用高速钻攻中心等高档数控机床的应用中取得了良好的效果。

四、总结

人类社会正在向着智能时代发展，人工智能正日益改变着人们的生活。同时，人工智能技术的不断发展也为制造业采用新技术解决老问题提供了新思路。尽管目前人工智能与制造技术的融

合度仍相对较低，但未来人工智能在制造业中的应用前景非常广阔。在二者相融合的发展道路上，需重点解决如下几方面的问题：

- 实现数据采集各环节的互联互通；
- 能够实现对制造过程各关键设备状态的实时感知；
- 实现制造过程的数据保存、分析与显示的软硬件平台能力，即构建数据仓库云平台；
- 需要构建数据接口标准，提高控制系统开放性。MT

高压开关设备数字化驱动技术与装备研究

平高集团有限公司

一、导言

随着全球资源环境压力的不断增大，社会对环境保护、绿色能源、节能减排和可持续性发展的要求日益提高。同时，电力市场化进程的不断推进以及用户对电能可靠性和质量要求的不断提升，要求未来的电网必须能够适应多种能源类型发电方式的需要，能够更加适应高度市场化的电力交易的需要，能够更加适应客户的自主选择需要。因此，具有灵活、清洁、安全、经济、友好等特点的智能电网，成为了未来电网的发展方向，也是经济和技术发展的必然结果。

目前断路器的操作机构仍然是应用弹簧、液压操动机构为主，由于这些操动机构结构复杂，采用元件多，使断路器故障率较高，可控性比较差，且由于这类机构都有使用液压油、润滑油等，环境友好性差。高压开关 GIS 隔离、接地开关，敞开式隔离开关配套使用的机构多为电动操动机构，其结构也过于复杂，在实际运行

过程中存在不少问题，如传动不灵活，分、合闸过程容易出现不到位的情况；分、合闸过程中运动特性单一，基本以恒定速度完成分、合闸动作，无法避免刚合、刚分时本体碰撞和振动，与本体匹配性较差；智能化程度低，可控性差，难以满足国网建设智能电网的需求。无论从灵活、可靠、环保、友好还是智能电网建设的战略目标，开发新型数字化控制驱动机构已迫在眉睫。

高压开关数字化驱动技术结合现代电力电子、电机控制技术、微计算机技术、机械设计技术等多个学科技术，综合运用于高压开关操作控制中。数字化驱动技术具有组成元件少，运动过程可控，响应速度快，动作时间分散性小和微机控制等特点，有助于提升高压开关智能化水平，提升电网装备数字化水平。

二、高压开关设备数字化驱动技术国内外研究现状

断路器数字化驱动技术是将

伺服电机直接与高压断路器传动轴连接，直接驱动断路器动触头分合闸操作。目前国内尚未生产配有电动操动机构的高压断路器产品，但 ABB 公司已有成套产品（LTB-D 系列 72.5-17kV 单相操动或者三相机械联动断路器）投放市场。ABB 公司从 2000 年起应用于单相操作和三相操作瓷柱式断路器、罐式断路器、PASS 紧凑型开关设备、GIS 及发电机断路器。截止 2005 年，已有 100 多台配电动机操动机构的高压断路器在瑞典、丹麦、意大利、澳大利亚、新西兰、阿根廷等 17 个国家投入使用。

2007 年，泰国购买了一台 ABB 生产的配电动机操动机构的高压断路器，这也是亚洲应用的第一台电动驱动高压断路器。

国内目前仅在 40.5kV 电压等级电机驱动断路器方面开展研究，126kV 及更高电压等级可供应用的电机尚处于研究阶段，只是在电机模型仿真、三相永磁同步电动机直接驱动断路器技术上进行了基础技术的前期调研和研究工作（大多在高校开展），研

究成果均处于试验阶段，国内尚无进入工程实际生产应用的案例。

三、高压开关设备数字化驱动技术的优势

高压开关设备数字化驱动技术是把现代电力电子、电机控制技术、微计算机技术、机械设计技术等多个学科技术综合运用于高压开关操作控制中。伺服电机操动机构的可控性强，可以克服传统操动机构在分、合闸启动后运动状态不

可控制的缺点。只需改变控制器和电机的参数，一款伺服电机操动机构使用于多型号高压开关中，并与之匹配，简化高压开关操动机构序列，减少机构种类；伺服系统可实时反馈开关动作特性参数，实现高压开关驱动系统故障检测、故障报警、故障诊断，改变传统高压开关智能程度低的现状。具体优势概括如下：

(1) 采用伺服控制，克服传统操动机构行程曲线不可控的缺点；

(2) 可设定多条运动曲线，和不同本体匹配性好，机构移植性强；

(3) 无分合闸脱扣装置，响应时间短，减小电力系统的故障响应时间；

(4) 动作分散性小，易于实现选相控制；

(5) 易于实现开关状态监测，真正实现一次电力设备智能化。

四、高压开关设备数字化驱动系统

永磁电机直接驱动高压开关突破了以往断路器操动机构的原理和思路，由电机转子直接驱动高压开关触头的运动从而实现分合闸操作。其运动部件只有一个，结构简单，大大减少了故障源，保证了断路器的可靠运行；同时由于微控制器的应用，能实现断路器的智能控制，满足现代智能电网的要求。

近年来，机械制造工艺水平的不断提高，电力电子技术发展迅猛，电动机的制造以及输出转角、转速和能量的精确控制都已经能够实现，这就为应用于高压开关的新型电动机操动机构奠定了基础。

伺服电机驱动断路器设备主要由三相永磁同步电动机(PMSM)、储能电容器、伺服驱动器、伺服控制器、传感器单元以及断路器本体组成，如图3所示。

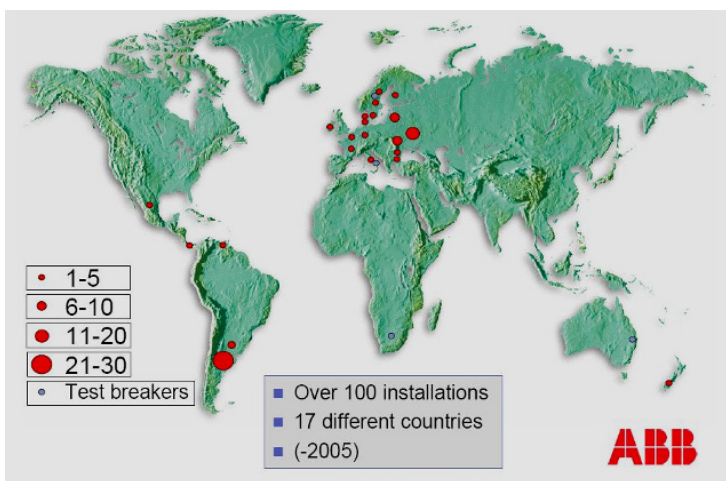


图1 ABB电动机操动机构的应用情况

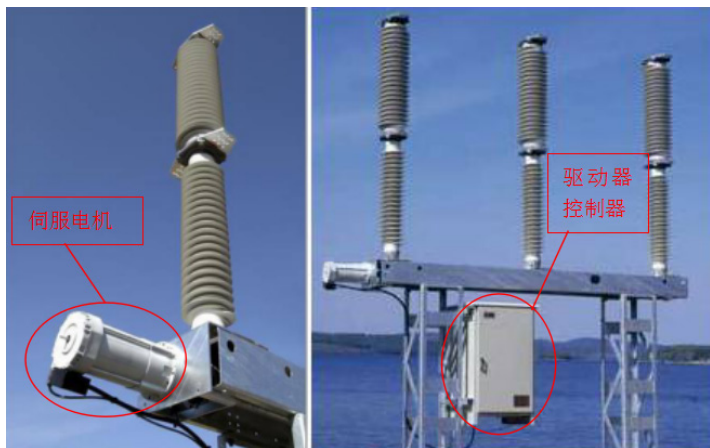


图2 ABB配电动机操动机构的高压断路器在泰国的应用

基本工作原理：AC380V 升压后经整流器进入储能电容，储能电容器为伺服驱动器提供驱动电机能量；控制器可以时时采集开关的状态信号并实现开关的闭锁、联锁功能，同时与驱动器通讯进行参数设置，接收分、合闸指令并触发驱动器动作，实现断路器分、合闸操作。

1. 三相永磁同步电动机 (PMSM)

由于断路器开关设备分合闸动作时间短（几十毫秒内完成），需要的瞬时扭矩大，功率高，需要精准的角位移控制，这使得常规电动机望而却步。而随着新材料和电动机技术的发展，一种新型的三相永磁同步电动机能够解决以上困难，三相永磁同步电动机取消了励磁系统损耗，提高了效率，功率因数可达到或接近于 1.0；取消了励磁绕组和励磁电源，结构简单，运行可靠；稀土

永磁电机结构紧凑、体积小、质量轻；电机尺寸和形状灵活多样；采用伺服控制系统，可实现调速。三相永磁同步电动机如图 4 所示，图 5 为永磁电机热仿真计算校核。

2. 储能电容器

为伺服电机提供电源采用电解电容器储备电机驱动机构合、分闸操作所需的能量，保证电容储存电能满足断路器 0~0.3s-C0 操作循环，减少对变电站直流屏的冲击。电容的种类较多，可分为脉冲电容器、电解电容器、超级电容器。由于脉冲电容在自身温度超过 80℃、超级电容在瞬间承受高于额定电压 10% 的过电压后都会出现不可逆严重损坏，给断路器长期运行带来安全隐患。综合经济、使用方式、寿命、可靠性等方面的考虑，电解电容可靠性更高，但是其使用寿命只有三年左右，需定期更换。电解电容器组如图 6 所示。由于电容器

电压较高，高达 800V，电容器充电回路需要采用隔离变进行充电，使得电容器电压不受外界影响。在调试和检修时，基于安全考虑，需要将电容器中的电能释放，电路采用放电电阻发热形式实现这一目标。

3. 伺服驱动器

伺服驱动器采用 PWM 逆变单元，逆变单元采用大功率 IGBT 构成 H 式电路和脉宽调制技术 PWM 实现对电机电流控制，从而校正控制电压、环境温度等因素导致的断路器触头运动偏差，从而保证断路器动触头按照预定参考轨迹运动。IGBT 设计如图 7 所示，驱动器控制算法如图 8 所示。

4. 伺服控制器

采用数字信号处理器 (DSP) 作为控制核心，嵌入复杂的控制算法程序，通过位置、速度和力矩三种方式实现对电机数字化、

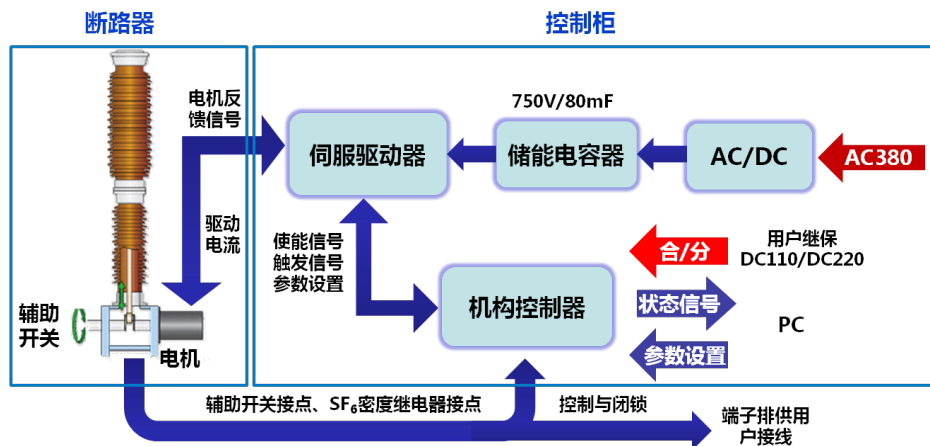


图 3 高压开关设备数字化驱动系统

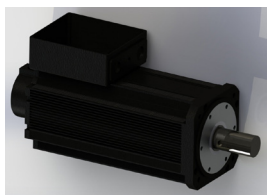


图4 三相永磁同步电动机

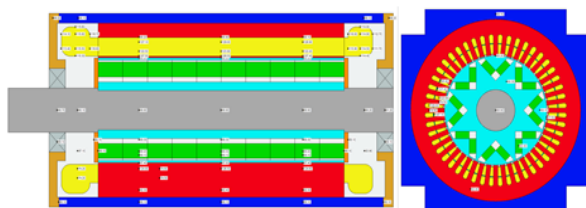


图5 永磁电机热仿真计算

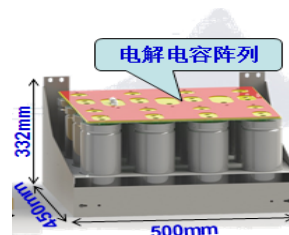


图6 电解电容器组

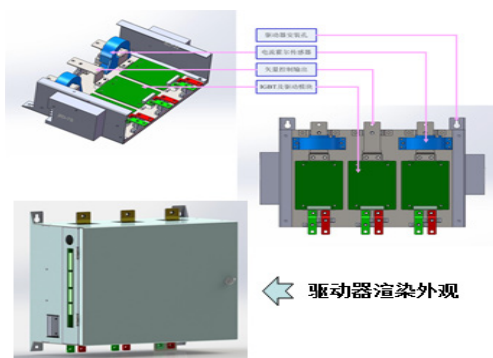


图7 IGBT 模块设计

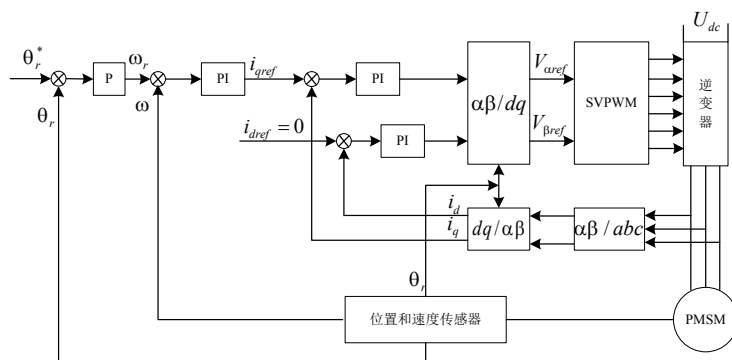


图8 驱动器控制算法

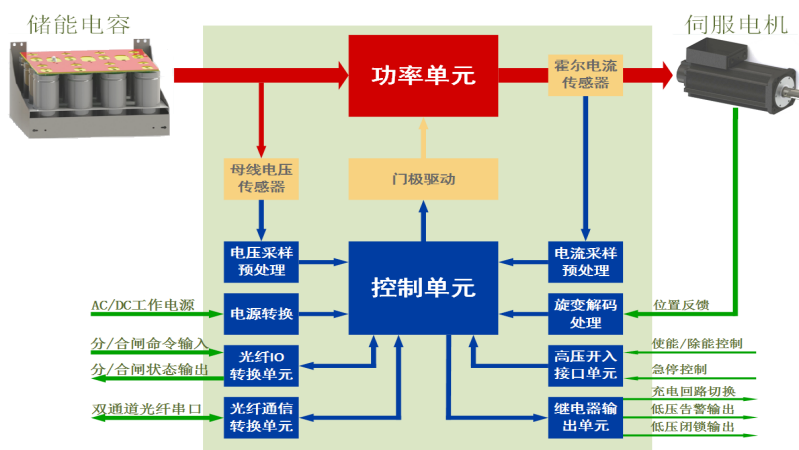


图9 控制流程图

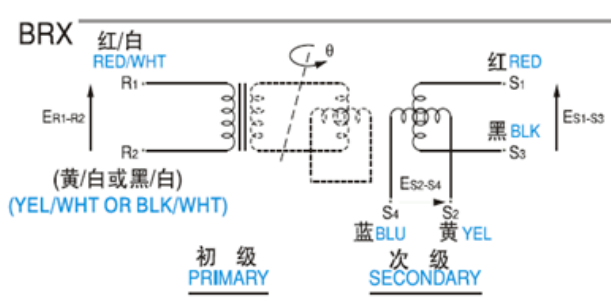
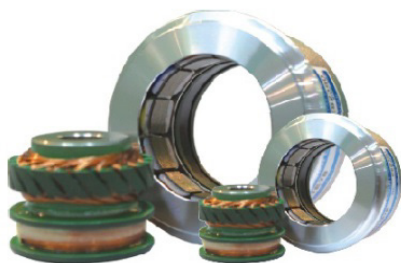


图10 旋变传感器

网络化和智能化控制，如图 9 所示。

分合闸过程中，运动控制单元实时采集断路器触头运动位置和电机驱动机构电流，并与参考轨迹进行比较，根据断路器触头运动偏差及偏差变化率控制电机电流，改变电机转矩，从而控制断路器动触头运动速度，保证断路器按照给定最佳轨迹运动，确保断路器动作时间稳定性；同时，断路器运动控制单元可以根据分合闸操作过程中获得位移、电流等信号实现断路器在线监测。



图 11 电压传感器

5. 传感器单元

传感器单元主要采用旋变传感器实时检测电机转动角度，如图 10 所示；电压传感器实时监测电容器电压，如图 11 所示，电流传感器实时监测电机动力电流，如图 12 所示，并将采集角位移、电流、电压信号作为运动控制器反馈输入信号。

6. 断路器灭弧室

断路器采用目前最先进的双动自能式灭弧室，分合闸速度、



图 12 电流传感器

操作功低于同级别的其它灭弧室，减小电机负载，使得伺服电机、驱动器、控制器设计降低难度；三相采用三极联动方式，提高断路器合闸同期性和稳定性。平高集团自主设计的断路器如图 13 所示。

五、展望

高压开关数字化驱动技术将会引领高压开关开展一场驱动技术革命，其特点和优势表现在以下三个方面：

(1) 传动结构简单，可靠性高。高压开关采用数字化驱动技术简化了动力传动链，无机械分、合闸锁扣模块，高可靠性，长寿命。

(2) 智能化程度高。高压开关采用数字化驱动技术，使得分合闸过程可控，能与高压开关机械特性最佳匹配；输出量可调，适应性强，简化驱动机构种类；智能化程度高，可实现智能诊断、故障检测、故障显示、故障报警等功能；设备运行数据监控，数据存储，物联监控。

(3) 可控性强，运动精度高。高压开关采用数字化驱动技术，利用智能检测及补偿技术，使得高压开关运动精度高，可控性强，根据产品实际运行情况，自适应调整运动参数，发挥产品最佳性能。MT

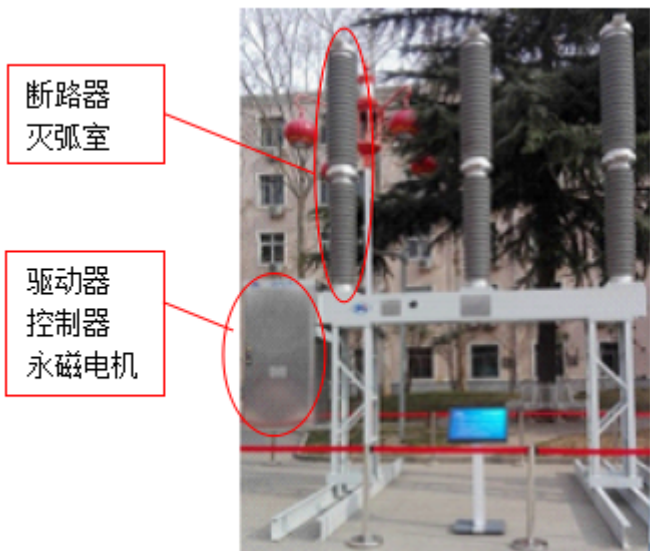


图 13 平高集团自主开发的 126kV 电机驱动断路器

中国好设计案例选登

(十二)

12000t 全回转自航起重船

一、案例背景

起重船是一种用于水上起重作业的工程船，又称浮吊，被广泛应用于海上大件吊装、海上救助打捞、桥梁工程建设和港口码头施工等多个领域。随着海上工程作业任务的复杂化，浮吊设计技术逐渐向起重吨位重型化、作业领域深海化和吊装过程高效率化方向发展，对起重船起重能力的需求日渐提高。上海振华重工股份有限公司自主建造的世界最大 12000t 全回转自航起重船（图 1），以单臂架 12000t 的固定吊重能力和 7000t 360° 全回转的吊重能力位居世界第一。该起重船可在浅海、深海和超深海行各种起重、勘探、打捞任务，还可以处理 3000m 或更深的重型打捞，与水下机器人配合完成前人无法完成的深海作业，其巩固了我国在该领域的领先地位，并为我国打捞救助事业向深海延伸提供了装备支撑。

二、设计思路

作为未来全球最大的全回转起重船，12000t 级起重船空船总重 44000t，船长 297.55m，船宽 58m，型深 28.8m，转台直径达 45m，固定最大起重能力为 12000t，全回转最大起重能力为 7000t，最多可容纳 380 人同时居住。船体巨大，可抗大风浪

涌，以 11 ~ 13 节速度航行，也可以利用动力定位系统做短时航速达到 15 ~ 16 节或更大。该船具备自航、锚泊、动力定位以及 3600 全回转等功能，适用于无限航区航行，可在浅海（400m 以下）深海（400m ~ 1500m）和超深海（1500m 以上）进行各种起重、勘探、打捞任务，以及处理 3000m 或更深的重型打捞，此外，



图 1 12000t 全回转自航起重船

还可以广泛运用于架桥、救助、水上施工等多个领域。

三、设计创新点

1. 定位系统设计

设计 10 点锚泊定位和 DP2 动力定位功能, 以适应复杂海况条件、作业面广, 满足全球大多数海域海上起重作业要求。其中, 船上安装了 12 个推进器, 满足 DP2 动力定位功能, 包括 2 个 2750kW 的侧推进器、6 个 3800kW 的可伸缩式全回转推进器以及 4 个 3250kW 吊舱式全回转推进器。此外, 该船还预留了 2 个推进器位置和接口。与普通起重船相比, 可节约拖轮费用和拖航时间, 作业行动更加精准自如。

2. 高强度钢焊接

12000t 起重机大规模使用 800MPa (抗拉强度) 高强度钢, 降低了整机质量。针对高强度钢碳当量较高, 焊接热影响区存在一定的淬硬和冷裂倾向问题。本项目研究设计了专门针对高强度钢的焊接工艺, 防止冷裂纹的产生, 杂质偏析引起的层状撕裂以及大线能量焊接时焊缝的脆化现象; 尽可能减小高强度钢预热温度对焊缝机械性能的影响。

3. 超大吨位吊钩设计制造

12000t 大型回转浮吊单钩载

质量 6000t, 加之为形状复杂的四爪吊钩, 体积大, 材料强度要求极高。经过创新设计, 使超大吨位四爪吊钩可锻造成形, 满足强度、性能、形状等要求。并为后续研究更高级别的吊钩提供经验。

4. 设计制造智能型大拉力重型锚绞车

12000t 浮吊船配置 10 台大拉力重型定位绞车, 定位锚绞车的单索额定拉力达到 140t 以上, 这些绞车是保障浮吊在浅海作业定位的关键设备。

5. 创新设计无平衡梁筒体全回转支撑装置

创新设计的无平衡梁新型全回转支承装置, 采用多条环形轨道支撑, 回转能力达到 7000t, 实现旋转支撑的均载。该结构形式使得重载回转时安全可靠, 并且后期滚轮的保养维护更加方便、快捷。

6. 设计制作大直径回转支撑平台加工技术

大型回转筒体由多层滚轮排列而成, 为实现滚轮的均匀载荷, 必须严格保证支撑平台的平面度。根据起重机设计要求本项目专门设计制作了大型平面加工设备, 该设备具备在线测量反馈功能, 保证了大尺寸回转支撑平台的平面度小于 1.5mm 的设计要求。

7. 大型起重机过桥技术

12000t 全回转起重机设计人字架放倒模式, 在人字架完全放倒情况下, 整机高度可以控制在水面上 56m 内, 这样就可以通过苏伊士、博士普鲁斯等运河, 而无需绕道, 远航, 将超大型浮吊的作业范围扩大到地中海和黑海等内海领域。

四、设计先进性指标

12000t 全回转自航起重船是目前世界上单臂架起重重量最大的全回转起重船, 能够进行超大吨位 (12000t) 的吊载, 可施行浅海、深海 (3000m) 和超深海的海上大件、模块、导管架的起重吊装, 以及大型模块起重、打捞、拆卸报废平台、海底能源勘探开发等各种作业任务, 其成功总装, 标志着中国在巨型起重船领域的领先地位获得了进一步巩固。为韩国进行世越号沉船打捞, 受到世界认可, 直接提振了我国对海洋资源和事务的驾驭能力。不仅如此, 由于我国近年来加大了海洋油气田的开发力度, 南海诸岛部分岛礁开发计划也渐渐浮出水面, 因此 12000t 级起重船在服役后将有着极为广阔的市场前景, 也将为我国海洋开发和捍卫海上国土主权做出新的贡献。

服务型制造新模式

一、案例背景

杭州杭氧股份有限公司（以下简称杭氧）是国家 520 家大、中型重点骨干企业之一，是我国大、中型空气分离及液化设备的研究、开发中心和制造基地。公司拥有国家级技术中心，具有较强的科研开发、工程成套、咨询服务和综合性开发的能力，是国内气体分离设备行业的龙头企业。

近些年来，杭氧紧紧抓住我国工业经济快速发展的有利时机，依靠技术进步和改革，企业得以迅速发展壮大。但是这种情况是否能一直持续？杭氧的未来更大的发展空间在哪里？这些是杭氧一直在思考的问题。

为此，杭氧从气体分离设备制造业的特点和国外同行的发展历程入手进行分析，结合公司在大、中型成套气体分离设备设计制造等方面的优势，审时度势，提出了拉长空分产业链的构想，采用“产品+服务”的商业模式，实现从单纯的设备制造企业向设备制造和工业服务型企业的转型，成为从“卖奶牛”变成“卖牛奶”的服务型制造转型的典型案例。

二、设计创新点

1. 全产业链格局

杭氧通过创新思维，实现产业的转型升级，提出了“重两头、拓横向、做精品”的发展战略。

“重两头”就是指空分产业向两头延伸，向上重点发展工程成套业务，向下重点发展气体业务。

“拓横向”是指发展成套空分关键配套部机业务，兼顾横向发展石化低温相关产业，如乙烯冷箱、液氮洗冷箱和 LNG 冷箱等业务。

“做精品”就是指改善现有生产管理体制和生产组织方式，加强计划管理、成套管理和质量控制，增强协作、提高效率、制造精品，以适应新形势、新情况和新要求。

通过“重两头、拓横向、做精品”的发展战略的实施，形成工程成套、设备制造、工业气体相互扶持、相互补充的全产业链经营格局，实现从单纯的设备制造向设备制造和工业服务型企业的转型。杭氧气体服务不仅涉及钢铁、有色、化工、玻璃和二氧化碳等领域，更在实现开发区管网供气的模式上有新的突破。而拥有先进的空分技术、丰

富的操作经验、大量合作关系良好的空分客户群，都是杭氧发展气体产业的有利因素。

2. 产品+服务

杭氧在其商业模式下转向具有更高盈利能力的气体产品，在产业链上完成上下游整合、迅速实现区域性扩张，形成扩张型的投资战略、多渠道的融资战略以及适度的分配战略。

杭氧在一个区块内，选择至少一家优质合适的管道气用户进行合作，投资建设气体公司，进行扎根布点，然后辐射周边，大力拓展邻近周边的管道气和液态产品市场，根据用户的需求情况增强密度，块状协同发展，形成区域市场优势，实现区域效益的最大化。这种“扎点画圆”式的市场拓展模式，突显了抢占“用户集中、后续发展潜力大”的市场区域的重要性。

有了自己的气体工厂，很多新技术、工艺就有了实验的场地，通过空分新技术的应用，不但降低了气体公司的运营和维护成本，也通过试验和改进，提升了空分设备的性能，促进了空分技

术的进步,使空分制造和气体产业更具竞争力,体现出设备和气体互为支撑、共同提升的发展格。

目前,公司已在投产的15家气体公司的空分设备中,安装了远程监控系统,通过互联网浏览到空分设备实时工况参数表、分组流程画面、报警日志等,随时随地了解空分设备生产情况实施远程监控降低了总部对气体公司的管理费用5%左右,节约人力、物力8%左右;通过远程监控能对气体公司设备的故障及时的解决,节约了时间80%左右,节约运营成本5%左右。

三、效果与应用

杭氧作为一家以制造空气分离设备和工业气体为主的大型企业集团,2015年集团简单合并实现销售收入59.60亿元,简单合并实现利润3.09亿元。其中,气体产业销售收入已超50%,服务型制造新模式全面提升了公司营运质量、盈利能力和经济效益,以适应经济发展新常态。

目前,从南方的广西防城港,到北国双鸭山;从东海之滨的江苏如东,到中原腹地的河南济源,

杭氧布点设局,编织了一张覆盖全国各地的气体网络图。如今,杭氧气体投资规模居国内前列,已经成为了国内较有影响力的工业气体生产服务企业。

而据分析,气体产业正处于高速增长的机遇期,拥有长期、稳定的收益。它是一个商业模式稳定、持续健康的产业,它的收入、利润都是累进递增的,投资回报有前低后高的特点。若干年后,随着投资项目银行利息和设备折旧费用的逐年减少,气体产业回报值得期待。

高速大运量客运索道

一、案例背景

我国拥有世界最大的旅游市场,年游客量近30亿人次,已成为保持经济持续增长实现“中国梦”的重要支柱。作为现代旅游业和滑雪运动基础装备的客运索道,已纳入国家鼓励类产业目录。截止2015年底,我国现有客运索道600余条,其中绝大部分为运量小、速度低、上下车安全感差等性能落后的低端产品,造成游客候车时间长,上下车紧张,严重影响旅游质量和景区效益。游客最珍贵的是时间,最重要的是安全,因此迫切需求一种“运行

速度要快,游客上下时要慢,输送人员量要大,运行安全性要高”的高速大运量客运索道。由北京起重运输机械设计研究院研制的高速大运量客运索道,是国际索道行业的高科技产品。该产品立足自主品牌、具有完全自主知识产权,填补了我国客运索道的技术和产品空白,为北京2022年冬奥会举办提供了关键配套设备。

二、设计创新点

1. 动态载荷线路设计

脱挂抱索器客运索道的动态特性决定了索道的可靠性和安全

性。本成果针对大跨度、刚柔耦合的脱挂抱索器客运索道在非平稳风载下的动态性能问题,在考虑运动集中载荷和悬索自重的基础上,采用了运动集中载荷作用下悬索的非线性方程(1.1),以及吊厢高速运动时的固有频率计算模型(式1.2)。

在脱挂抱索器客运索道动态特性研究的基础上,通过建立线路几何参数、吊厢间距、支座反力、运载索受力、回转轮受力、钢丝绳垂度、分割跨弦倾角等计算模型(图1),提出了脱挂抱索器索道动态载荷的线路精确计算方法,打破了原有的静态均布载

荷线路近似计算方法,彻底解决了刚柔耦合的客运索道在非平稳风载荷下的动态性能问题;开发了脱挂抱索器客运索道线路总体设计优化软件(图2),优化了线路布置和受力,提高了线路计算的精确性,解决了高速大运量荷载状态下的总体设计难题。

2. 高低速转换安全设计

为了保证乘客安全上下车,吊厢速度应不高于0.3m/s。当脱挂抱索器索道重达1t的吊厢进站速度从6m/s降至0.3m/s,出站又从0.3m/s升至6m/s时,加减速极易造成吊厢的纵向大幅摆动,影响乘坐安全性和舒适性。为此本成果通过建立吊厢的动力学模型,研究了吊厢进出站的动态特性,基于吊厢纵向最小摆动

目标,建立了加减速运行优化数学模型,优化后的加减速双S曲线如图3,图4所示。依据吊厢进出站加减速的双S曲线,结合传动比、传动力矩等性能要求,开发了如图5所示的加减速装置,有效地解决了吊厢高速进出站纵向大幅度摆动的行业难题,从而彻底解决了在线高速与离线低速相互可靠转换的难题。

$$\begin{cases} v_{tt} - c_2^2 v_{tt} + 2\mu v_t = c_1^2 P v_{xx} + \frac{c_1^2}{2l} v_{xx} \int_0^1 v_x^2 dx \\ + \frac{1}{\rho A} \delta(x - x_d)(Mg - Mv_{dtt} + F + \frac{Q_y}{\rho A}) \\ c_1^2 = \frac{E}{\rho} \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2M}{\rho A l} \sin^2 \frac{n\pi x_d}{l}}} \omega_{0n} \\ \omega_{0n} = \frac{n\pi c_2}{l} \quad c_2^2 = \frac{N_0}{\rho A} \end{cases} \quad (1.2)$$

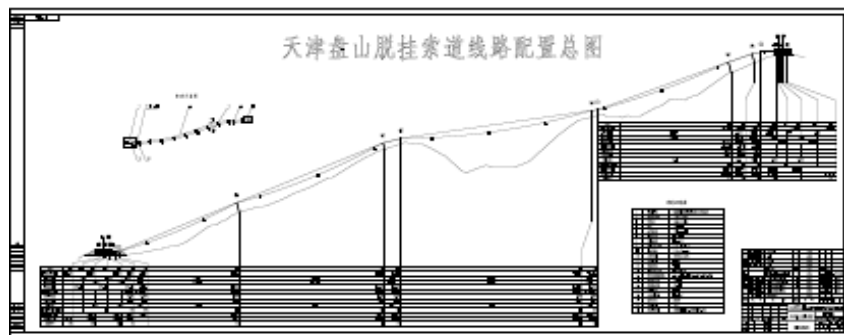


图1 脱挂抱索器索道线路计算图

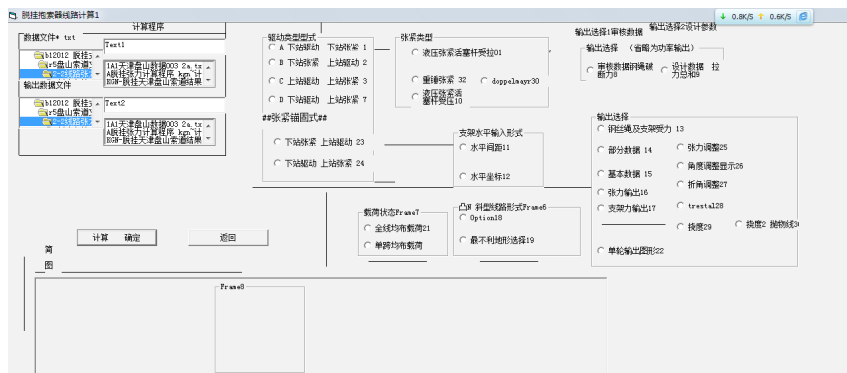


图2 脱挂抱索器索道线路设计软件

3. 抱索器可靠性提升

开发了集脱挂抱索器客运索道运程监控、故障诊断、站内吊具防撞监控、脱挂抱索器状态检测及抱索器脱开与挂结安全监控等为一体的脱挂抱索器客运索道自动控制技术与系统,形成了一个集电气设备控制、实时总体优化调度和高可靠性运行装备为一体的完整系统方案,如图6所示,解决了在高速下n个抱索器与钢丝绳随机脱开与挂结的安全性和可靠性难题。

4. 系统功能特点

控制系统的安全性设计:①采取冗余安全型双控制器主、从热备份连锁控制技术,确保不间断的运行控制。②具有自诊断功能控制器的I/O模块,确保现场快速故障排除。③优化的电制动控制技术,在紧急制动时,可迅速实现断电补偿,确保对制动过程的平稳、舒适和安全。

控制系统采取了三级防雷保护措施:①实现多级雷电浪涌保护技术,响应快、通流容量大、

残压低。②采用温控断路技术，有效防止火灾发生。

吊厢站内区间位置自动跟踪及抱索器安全出站监控功能：开发吊厢站内位置控制离合器和防撞控制程序，确保乘客上下车的安全；开发抱索器出站形状安全

门检测系统和抱索器抱紧力检测系统，结合抱索器零故障出站安全控制程序，杜绝了抱索器不安全状态出站的可能。

控制系统具有上下站联网远程控制功能：可远程对索道运行状态进行监控，及时解决索道现

场运行故障和指导现场运行操作。

三、效果与应用

高速大运量脱挂抱索器客运索道具有两大推广优点：①优良的技术性能：小时单向运量可达2400人，是低端客运索道的5倍；运行速度最高可达6m/s，是低端客运架空索道的6倍；上下车速度为0.3m/s，不到低端客运索道的1/3。②极高的性价比：性能、参数指标相同或相近的前提下，价格仅为进口产品的50%。

本项目自主研发成功，已迅速进入并占领市场，从2009年8月至2016年06月我院已在峨眉山金顶、青岛世园会、张家口万龙滑雪场、吉林北大壶滑雪场等景区雪场建设并通过国家索检中心验收30条脱挂索道项目。到目前为止，我院已承接高速大运量脱挂索道50余条，占新增同类产品市场的60%。新增产值约15亿元，实现利润近3亿元。创造就业岗位3000余个，年营运收入达10亿元。

已投入运营的高速大运量脱挂抱索器客运索道，均经受住了黄金周满负荷运行的考验，尤其是应用于张家口万龙滑雪场的国产首条滑雪脱挂索道，连续60天高速运行，共运送滑雪者约40万人次，成为该滑雪场主要输送工具，得到了用户极高的评价。本设计提升了我国客运索道技术水平，推动了我国旅游业和滑雪运动的发展，取得显著的经济和社会效益。MT



图3 吊厢进站减速的双S形速度曲线

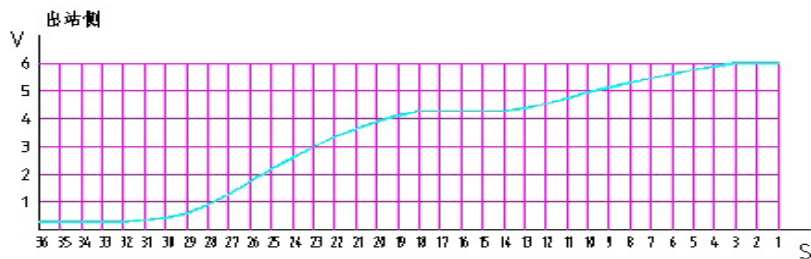


图4 吊厢出站加速的双S形速度曲线

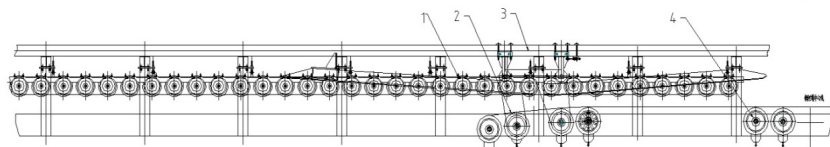


图5 加减速装置

1. 加减速皮带轮组 2. 取力轮系 3. 站内钢结构 4. 站口两轮组

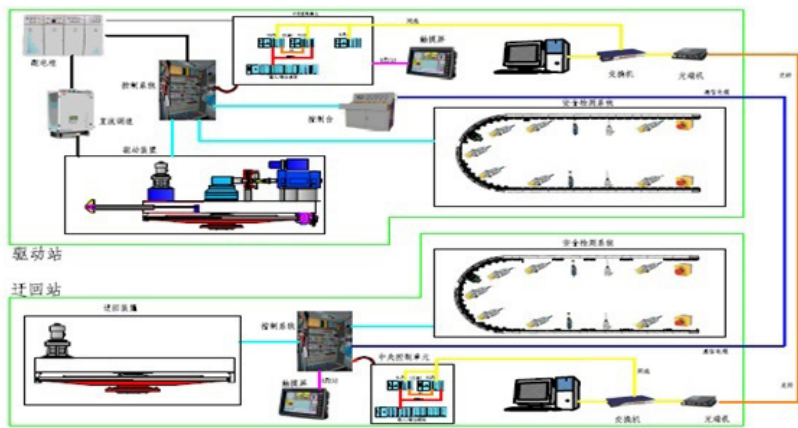


图6 脱挂索道自动控制技术与系统

2018 移师广东(东莞)

MEET AGAIN IN GUANGDONG (DONGGUAN)

BEW2018

第23届北京·埃森焊接与切割展览会

THE 23rd BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING FAIR

珠三角经济发展提速

Accelerated Economic Development of Pearl River Delta

东南亚市场开拓活跃

Active Market Exploration in Southeast Asia

“一带一路”东风强劲

Strong Wind of “Belt and Road”

微信二维码



关注我们的微信公众号，
可获取更多展会信息。

北京/BEIJING

上海
SHANGHAI

广东(东莞)
GUANGDONG (DONGGUAN)



2018年5月8-11日

广东现代国际展览中心

May 8-11, 2018

GD Modern International Exhibition Centre



www.beijing-essen-welding.com

www.埃森焊接展.com