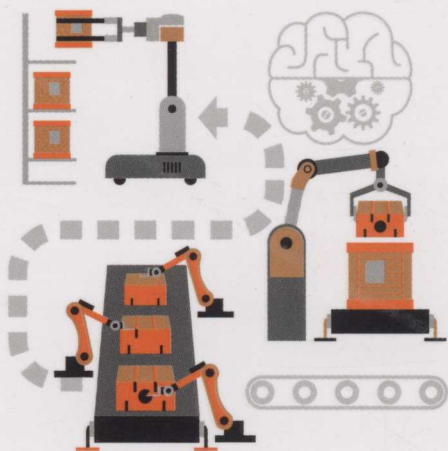




面向中国制造2025^的 制造业智能化转型

肖维荣 宋华振 编著

全景介绍智能制造规划：从精益运营到工厂集成
全局分析智能制造落地：从自动化到信息化集成



机械工业出版社
China Machine Press

工业控制与智能制造丛书

面向中国制造2025 的 制造业智能化转型

肖维荣 宋华振 编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

面向中国制造 2025 的制造业智能化转型 / 肖维荣, 宋华振编著. —北京: 机械工业出版社, 2017.9

(工业控制与智能制造丛书)

ISBN 978-7-111-58127-7

I. 面… II. ①肖… ②宋… III. 智能技术 - 应用 - 制造业 - 研究 - 中国 IV. F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 240620 号

面向中国制造 2025 的制造业智能化转型

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 余 洁

责任校对: 李秋荣

印 刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版 次: 2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 170mm × 242mm 1/16

印 张: 17.25

书 号: ISBN 978-7-111-58127-7

定 价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有 · 侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

全球经济在产能过剩的大背景下都面临着转型的压力，新经济与传统制造业的融合为产业带来了新的机遇，这也是为什么德国工业 4.0、美国工业互联网以及中国制造 2025 规划成为产业聚焦的热点。大家都在寻求一个更为明晰的未来产业走势，并能够未雨绸缪，提前布局，以赢得先机。

本书避开了已有的大量概念的介绍，从智能制造的实际工程集成角度分析如何落地实现。第 1 章中，首先，对于智能制造而言，这种转型的基础是思想的转变，原有的思维方式必须改变，包括成本效率、精准设计等管理思想的转变，以及开放自动化、方案集成等技术战略的转变，也包括真正的“以人为本”的理念升级。

在本书第 2 章，将以智能集成所面临的实际互联互通、互操作等问题来分析技术实现，包括智能集成对于通信的需求，以及在不同层级实现这些互联互通的方法（包括实时通信、FDT/DTM、OPC UA 的技术概要及关联关系），也对安全总线技术进行了延伸。

软件必然成为未来竞争的焦点，本书第 3 章介绍了软件在操作系统、平台技术、开源方案等方面的重要性，介绍了软件的标准化与规范化，智能软件开发流程和仿真技术，以及最新的模块化概念 mapp，并结合实际案例进行了分析。

在第 4 章，结合目前最为重要的机器人技术，分析了机器人集成中存在的问题；并从最新的 PLCopen 协同运动控制、openROBOTICS 技术、基于 POWERLINK 的集成、视觉集成等多个方面介绍了实现机器人集成的方法与要点；最后对未来最为重要的“机器人安全技术”进行了分析，介绍了如何遵循

安全设计标准与实现的方法。

第5章则以如何实现整个智慧工厂为思路，基于精益思想设定目标、自动化与信息化融合、具体的工厂信息化应用对实现智慧工厂的路线图进行了分析；并结合能源监控与基于状态的预测性维护技术具体分析了如何实现工厂的效率优化，直到实现智慧工厂。

本书以切实的落地实现为核心思想，并以实际的跨界融合技术来阐述“智能集成”的实现路径、智慧工厂的路线图，具有极高的参考意义。

本书所引用的大部分参考文献来自于官方组织的网络可下载的资料。第2章引用了德国工业4.0工作组的《工业4.0实施战略》报告中对于智能工厂的互联定义，IEC TR62390对于工业网络互联互通的层级定义，OPC UA基金会对于工业4.0与智能制造中通信互联的需求响应，EDDL和FDT/DTM应用架构与比较分析，NIST陆燕教授在《智能制造标准的全景》中对整个智能制造的相关标准、智能工厂能力需求的分析，以及ARC在智能制造白皮书中对于智能制造的架构分析。第3章引用了PLCopen组织彭瑜教授对于自动化软件开发的相关文档及PLCopen运动控制标准与规范、同时借鉴了王映辉博士对于软件复用、组件开发技术相关的课件。第4章引用了IFR对机器人市场的分析，IEC/ISO对于安全技术标准与规范引用和协作机器人的安全规范与标准。第5章引用了日本丰田大前严一对于精益制造的浪费的分析，VORNE公司对于OEE计算方法，NIST关于智能工厂能力需求，ISO50001中的能源管理，NASA关于预测性维护，以及ISO10816对于传动设备振动测量标准与规范。这些技术文档、培训资料、产品手册、使用说明书、会议报告、课件、技术文献、标准，以及一些与原作者相关的引用已经在文中进行了说明，但官方组织的文献无法获知原作者信息但也在这一并予以感谢。

当然，由于本书结合的都是较为前沿的新技术，加之时间仓促，书中难免有不足之处，希望读者批评指正，以便我们今后更好地改善升级版本。

前言

第 1 章 智能时代的变革需求	1
1.1 智能时代的自动化需求	3
1.1.1 新的消费需求改变制造业	3
1.1.2 制造业面临的压力与使命	4
1.1.3 成本效率的三大主题	6
1.2 工业自动化领域的新视角	10
1.2.1 自动化行业产品到方案的转变	10
1.2.2 集中与分布的关系变革	11
1.3 开放自动化是必然趋势	14
1.3.1 市场宣传以及联盟锁定的手段	14
1.3.2 技术壁垒	14
1.4 智能时代“人”的因素	16
1.4.1 智能时代的规范	16
1.4.2 人的角色定位	17
1.4.3 精准文化	18
第 2 章 智能集成中的互联互通	19
2.1 互联互通	20

2.1.1	互联互通在不同阶段的变化	20
2.1.2	软硬件接口问题对集成的影响	27
2.1.3	智能集成时代的互联互通需求	32
2.2	工业通信技术发展趋势	34
2.2.1	现场总线技术到工业以太网	34
2.2.2	工业实时以太网	36
2.2.3	实现实时性的几种方法	40
2.2.4	主要的实时以太网技术比较	41
2.2.5	设备互联互通	43
2.3	OPC UA 在智能集成中的角色	53
2.3.1	智能集成中对于语义互操作的需求	53
2.3.2	OPC UA 的介绍	59
2.3.3	POWERLINK 的 OPC UA 集成	70
2.4	安全集成通信	71
2.4.1	安全对智能集成的意义	72
2.4.2	未来安全技术发展的几个特征	73
2.4.3	分立的安全与集成安全	75
2.4.4	openSAFETY——解决集成中的安全	76
2.5	标准体系的解读	79
2.5.1	工业 4.0 的参考架构模型设计 RAMI 4.0	80
2.5.2	工业 4.0 标准制定体系	81
2.5.3	相关标准列表	81
2.5.4	中国智能制造标准化体系架构	83
第 3 章	软件在智能制造中的角色	86
3.1	软件在智能机器开发中的重要性	87
3.1.1	工业软件构成了核心竞争力	88
3.1.2	工业软件是赢得未来的关键	91

3.1.3	智能制造实现的软件障碍分析	92
3.1.4	从软件角度理解智能制造	95
3.2	工业软件价值体系	97
3.2.1	RTOS 实时操作系统	99
3.2.2	平台软件	101
3.2.3	第三方软件的集成	105
3.2.4	行业应用软件	106
3.2.5	MES 互联	108
3.2.6	软件标准化	111
3.3	有没有银弹?	115
3.3.1	软件复用	116
3.3.2	实现复用的对象	116
3.3.3	软件复用相关技术	117
3.3.4	软件构件技术	117
3.3.5	软件决定智能集成实施的效率	120
3.4	智能机器在软件开发各个阶段中的角色	121
3.4.1	需求定义	122
3.4.2	选型与配置	123
3.4.3	仿真——智能时代机器开发	123
3.4.4	编程	127
3.4.5	模块化测试	128
3.4.6	生产与维护功能	128
3.5	软件商业模式的改变	130
3.5.1	软件未来盈利模式	130
3.5.2	软件服务竞争力	132
3.6	mapp 如何实现开发效率的提升	133
3.6.1	自动化软件银弹技术	133
3.6.2	mapp 的智能机器软件构成	135

- 3.6.3 mapp 的可视化开发实例 136
 - 3.6.4 mapp 的效果评估 138
 - 3.6.5 mapp 在智能装备开发中的应用 139
 - 3.6.6 mapp 审计追踪功能在制药行业的应用 140
- 3.7 mapp 应用——四轴码垛机器人的开发 143
 - 3.7.1 四轴码垛机器人应用 143
 - 3.7.2 硬件架构 144
 - 3.7.3 mapp 的应用模块 145
 - 3.7.4 机器功能设计 147

第 4 章 智能机器人集成——封闭到开放系统 156

- 4.1 传统机器人集成中遇到的问题 157
 - 4.1.1 开放性问题 158
 - 4.1.2 安全实现问题 160
 - 4.1.3 智能产线的集成难题 162
 - 4.1.4 机器人控制系统方案中的问题 163
- 4.2 通用运动控制（GMC）..... 163
 - 4.2.1 通用运动控制实现设备集成 164
 - 4.2.2 PLCopen 在智能产线集成中的角色 165
- 4.3 开放的机器人集成 176
 - 4.3.1 openROBOTICS 176
 - 4.3.2 基于 POWERLINK 的机器人集成 179
 - 4.3.3 机器人与工艺设备的集成 183
 - 4.3.4 智能机器人的发展 185
- 4.4 机器人的安全技术 186
 - 4.4.1 机器人安全问题 186
 - 4.4.2 集成安全技术 191
 - 4.4.3 机器人安全标准 193
 - 4.4.4 SafeROBOTICS 197

4.4.5 新增 SLP & SLO 安全功能	201
第 5 章 智慧工厂集成实现	205
5.1 智慧工厂的规划目标	206
5.1.1 制造工厂的竞争力本质	206
5.1.2 智慧工厂模型	209
5.1.3 实现智慧工厂的路径分析	214
5.2 精益与智能集成的关系	219
5.2.1 精益生产简介	219
5.2.2 精益制造与数字化	220
5.2.3 OEE 的构成要素	221
5.2.4 关于 OEE 的计算	222
5.2.5 OEE 的目标与收益	223
5.2.6 OEE 与自动化系统的融合	225
5.3 过程数据采集 PDA	227
5.4 智慧工厂能源管理问题	232
5.4.1 工厂能源问题与 ISO 50001 标准体系	233
5.4.2 工厂节能空间与方法	234
5.4.3 能源改造的方法	235
5.4.4 能源经理考虑的问题	236
5.4.5 能源监控系统 EnMon	237
5.5 预测性维护技术	242
5.5.1 维护方式的变化	242
5.5.2 预测性维护的方法	245
5.5.3 基于状态监测的预测性维护系统	253
5.6 云服务平台	261
5.6.1 云服务在工业中的应用	261
5.6.2 基于云服务的平台建设	263

智能时代的变革需求

自 2013 年以来,“工业 4.0”作为一个逐渐被关注的主题在人们的生活中凸显。在此之后,与我们关联度更高的就是“中国制造 2025”。

德国所提出的“工业 4.0”意在推动生产技术的传统工业信息化。在通向物联网的路上,虚拟和现实的世界将融合成为“信息物理系统”(Cyber-Physical System),从而促进业务流程和技术流程的无缝结合。“工业 4.0”涵盖的行动领域可以归结如下:

- 作为成功关键因素的安全技术。
- 法律的框架条件。
- 数字化工业时代的工作组织和设计。
- 标准制定、标准化以及针对参照构架的开放式标准。
- 复杂系统的掌控。
- 具有区域覆盖性的针对工业的宽带基础设施。
- 教育与培训。
- 资源利用效率。
- 新的商业模式。

随着“工业 4.0”的提出,德语中出现了一个词“Autonomik”[⊖]。这个词意指“自治化”,是研发新一代面向未来的智能工具与系统的方法。这些智能

⊖ 参见 www.autonomik40.de。

工具与系统能够自行组网、自行识别工况、自适应于变换的工作条件，以及与其他设备进行交互行动。

总结起来，“工业 4.0”的核心就是实现系统的自治化和人机合作。它不是一个具体的目标，而是一场工业革命的变革过程。

“中国制造 2025”是更加具有针对性、更加具体化的行动纲领，意在将中国的制造业从制造大国变成制造强国。其战略方针是通过新一代的信息技术与制造业的深度融合，推进以智能制造为主攻方向，完善多层次、多类型的人才培养体系，从而促进产业向高效、高价值和低能耗的模式升级转型。“中国制造 2025”旨在重点行业或领域实现追赶或超越。图 1-1 诠释了其整体思路^①。

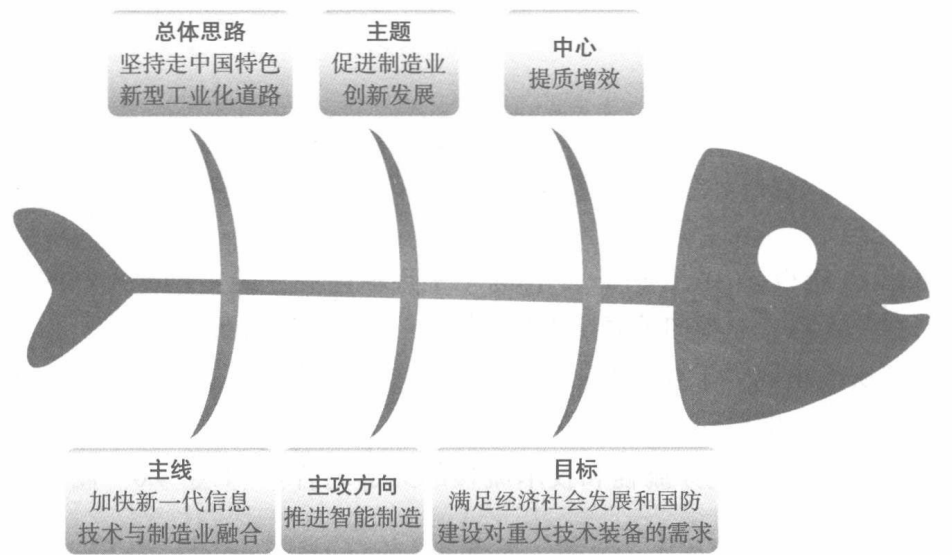


图 1-1 (中国制造 2025) 的整体思路

总结起来，“中国制造 2025”的核心就是“智能制造”和“互联网+”。

当然，“工业 4.0”对于不同的行业或者人群来说有着不同的理解或含义。对于制造业来说，这个概念可用图 1-2 所示几个关键词来描述。

“工业 4.0”时代的到来，意味着智能时代的到来。我们将面临着哪些机遇和挑战？我们需要准备或者改变些什么？下面将作一些解析或探讨。



图 1-2 制造业对工业 4.0 的理解

① 王喜文. 中国制造 2025 解读：从工业大国到工业强国 [M]. 北京：机械工业出版社，2015:39.

1.1 智能时代的自动化需求

如果说在 20 年前终端消费者缺少及时表达自己对产品的喜好或诉求的渠道,如今的电子商务时代,终端消费者和产品供应链上各级制造商的距离缩短到了“如同纸张的薄度”。所有的沟通缝隙几乎都被填补,终端消费者的愿望不仅可以很快地传递到产品供应商处,而且这些愿望或诉求也是不断变化的。正是这些不断变化的消费需求在影响着制造业的发展。

1.1.1 新的消费需求改变制造业

我们过往习惯的产品批量常常是 100 万或者更大的数字,因为只有这样的批量才能使产品的成本降低至一个有竞争力水平的价格。而今,我们必须做出改变,制造业正承受着由消费者终端传递过来的越来越强的压力,这种压力最终导致如下现象:

(1) 产品的生命周期越来越短

消费者对一种款式产品的喜好度下降得越来越快,同时,市场竞争也在不断地加剧,这就必然导致产品的生命周期变得越来越短。在这样的形势下,企业的技术竞争力就受到了越来越大的挑战。如何做到尽快研制下一代产品并不断地创新,对技术团队、公司的管理层甚至决策层来说都是一个很大的难题。在这样的情形下,生产让公司有利润并且让客户买得起的产品,是解决这个难题的核心。

(2) 产品的技术越来越复杂

技术的发展与创新就意味着产品的技术与更多的学科关联,而且每一个学科的问题会变得更加深奥。对于一台机器的自动化方案来讲,实际上是一个“机电软^①一体化”的问题。首先对于一个自动化方案的配置,需要了解方案的需求,如机器的运动速度、加速度以及力矩等;其次是运动控制的精度以及其他要求。对于传动产品,诸如伺服驱动、减速器以及伺服电机的恰当配置需要考虑机器的传动方式、结构、尺寸以及转动惯量等参数。接下来,在设计控制方案的时候,如果要达到理想的运动控制效果,那么一个将机械和电气结合在一起的建模仿真就很有必要。如果控制对象是一台风力发电设备^②,那么所涉及的学科就更多了。

① 肖维荣,齐蓉.装备自动化工程设计与实践[M].北京:机械工业出版社,2015:4.

② 肖维荣,齐蓉.装备自动化工程设计与实践[M].北京:机械工业出版社,2015:2.

(3) 产品单件批量成为“工业 4.0”的一个重要特征

图 1-3 列出了单件批量的影响因素以及挑战。亨利·福特在宣讲他的标准化生产创举时曾经说过：“顾客可以选择他想要的任何一种颜色，只要它是黑色。”然而在今天，这句名言恐怕可以改成：“顾客可以选择他想要的任何一种颜色，只要他想得出来。”市场的竞争、客户需求的多样化导致了如今标准化产品制造的缩减，以及定制化产品制造的不断增加。单件批量率先出现在数字化胶印设备上，生产线上每一件产品都可以是不同的。而影响这种趋势的因素还来自于地域与文化的差异，尤其来自于新兴市场，如“金砖五国”的多样需求。比如苹果公司的 iPhone 手机，在欧洲一般黑色或者银色往往是首选，而在中国玫瑰金或者金色往往是热门的选择。这种单件批量的趋势正面临着来自两个方面的挑战：一方面，终端消费者虽然喜爱富有个性化的产品，但他们却同时梦想着产品价格如同大批量生产的一般；另一方面，单件批量意味着工厂要有柔性生产的条件和能力，而具备并实现这种能力却是一个时间和成本的问题。

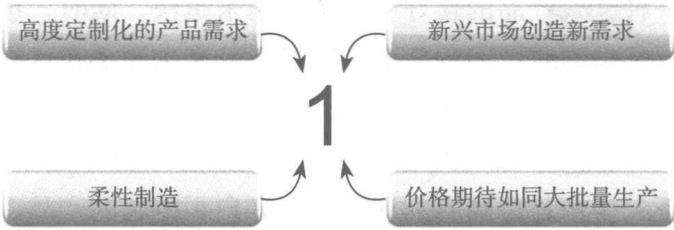


图 1-3 单件批量的影响因素以及挑战

1.1.2 制造业面临的压力与使命

笔者在撰写本书时，正是“中国制造 2025”颁布之时以及中国第十三个五年计划公布之时。笔者认为这些目标以及规划的制定，其根本目的之一是引导中国的制造业进行转型升级，从而使中国制造业在世界的经济舞台上具备更强大的竞争力。而中国制造业要想成功地转型升级，首先要有战略意识和行动，从而摆脱整个制造业的“价格竞争”模式。我们从下面的一个例子中可以体会出一些道理。

某大型城市的大型国有企业，曾经是中国某机械制造领域的市场领导者。近十几年来，业绩一直在下滑。在中国加入 WTO 之后，该企业不是将优秀的国际竞争对手作为标杆，利用各种机遇，积累或获取资源，尽快建设技术研发团队，在产品以及技术上发挥长处，而是在以价格为主导的销售模式上下工

夫。拼命压低采购成本是其采用的一贯策略。然而正是这样的措施反映了企业急功近利的短期行为，导致在这个市场上不可避免的战略倒退的后果。例如把某一年采购成本降低10%，并不意味着企业的总成本一定会下降，更并不意味着在客户处的产品销售价格就一定保持不变。该企业能否实现战略突围，最小化企业的总成本而不是采购成本，一定是其战略选项之一，然而却一定不是其战略的唯一选项。

从笔者的角度看，其实中国的制造业已经从“价格低廉、质量差”逐步转向了“价格优势、性能弱势”。要走向战略优势，中国制造业自然还有很长的路要走。总结起来，中国的制造业面临如下压力：

（1）战略选项

长期的战略是增加企业的技术积累、提高技术竞争力，使企业的市场定位不仅在国内而且在国际上更有差异化。但实现这个目标需要时间。所谓“弯道超车”的做法之一是在海外市场收购有技术资源的公司。然而这种做法所带来的是人才的挑战，即企业是否有合适的团队来管理所收购的企业，以达到为己所用的目的。

短期战略是指企业如何在短期生存并发展的问题。比如对于长期战略的投入过多，企业很可能出现资金链断裂等问题，从而导致企业制定的宏伟规划半途而废。

所谓的战略选项，主要是解决“有所为，有所不为”的问题。实际上对于企业来讲，最困难的是在战略上搞明白什么“不为”。而对于要“有所为”的选项，重要的是如何“为”。

（2）成本竞争力

对于是在采购或生产成本上下工夫，还是在总所有成本（Total Cost of Ownership, TCO）的优化上下工夫这个问题，实际上很多企业需要进行认真的思考。

什么是总所有成本？总所有成本是在一定时间范围内所拥有的包括置业成本（Acquisition Cost）和每年总成本在内的总体成本。在某些情况下，这一总体成本是一个为获得可比较的现行开支而对三到五年时间范围内的成本进行平均的值。

极端地压低采购成本实际上不仅不专业，也是很危险的。由此产生的“跷跷板效应”会直接对产品的质量、售价以及市场的开拓产生负面影响，从而形成企业发展的死循环。这里不得不提的是，在客户与供应商的关系上，欧洲企业在供应链的战略管理中处理得专业且得当。而中国的企业在这方面需要改善

的空间还很大。

成本竞争力是中国制造业转型升级的关键战略要点之一。这个问题我们在下一节再单独展开讨论。

1.1.3 成本效率的三大主题

对于企业的竞争力而言，单独讨论成本是不全面的。成本必须与效率结合在一起才能给出更加清晰的分析结果。这样就有了成本效率（Cost Efficiency）这个概念。

成本效率是指按“成本－效益”的观点来测定成本开支效果的一项质量指标。这项指标通常可用一定期间的成本开支额与营业收入的比率，或成本开支额与平均资金占用额的比率，或成本开支额与利润的比率来反映。

对于制造业来讲，与成本效率紧密相关的三大主题分别是：保证客户的满意度、提高生产效率、节省资源，如图 1-4 所示。

1. 保证客户满意度

价格、交货周期以及个性化需求这三个指标可以基本描述客户满意度，如图 1-5 所示。

要在以上三个指标上取得很好的分数，企业不仅需要有一个高效的学习型组织，而且必须具备整体的灵活性，单单具备技术的创新能力是不够的。当然，除去这三个指标外，还包括售后服务在内的客户体验。这种客户体验实际上是测验产品的可兑现性（承诺的是否可以被体验到）。

2. 提高生产效率

效率、效益和效能在这里表达的是相同的意思，不同的是其使用的场合或用途。对于效率，从不同的角度分析也有不同的定义。财务上最基本的定义如下：

$$\text{效率} = \frac{\text{收益 (收入)}}{\text{花费 (付出)}}$$

(1.1)



图 1-4 成本效率的三大主题

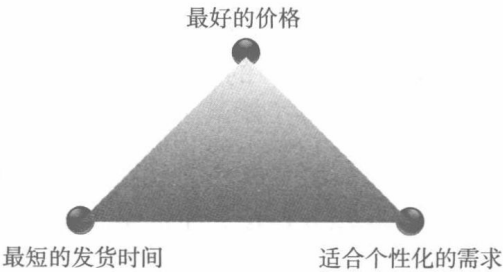


图 1-5 客户满意度的主要描述指标

如果把这个定义广义化，那么可以有

$$\text{效率} = \frac{\text{产品（数量、质量、价格）}}{\text{资源（材料、能源、人力资源）}} \quad (1.2)$$

然而，当我们习惯于这样看待效率的时候，却忽略了影响竞争力的一个重要因素，即时间。

$$\text{效率} = \frac{\text{产品}}{\text{资源} \times \text{时间}} \quad (1.3)$$

理论上对以上表达式的解释是：用最少的资源，占用最短的时间，制造出数量最多、质量最好、价格最有竞争力的产品，这是一个制造企业所追求的目标！

笔者无意在此全面展开关于效率的讨论，下面将从如何提高生产效率和缩短研发周期的两个重点方面进行一些探讨。

（1）提高可用性

所谓“可用性”是指生产设备的可用性。提高生产效率就意味着首先要缩短和消除停机的因素。图 1-6 示出了影响设备可用性的因素。

一旦发生工艺过程中断的情况，不仅生产过程停止，而且由于工艺参数的丢失或错乱一定会导致产品的报废，给企业带来损失。当“急停”按钮按下的时候，机器不是停止，而是在中断部分功能的时候保证设备连续，哪怕是低速运行，从而保证生产效率得到最大化。集成的安全技术是可以做到这一点的。当今几乎每台机器都必须

集成安全技术，如缩短停机时间、减少材料浪费以及使用更少的文档，这对于用户和终端用户都会显现巨大的益处。提高设备的可用性，就意味着相对于其他方案提高了单位时间的产量。由此可见，开放的集成安全技术对于智慧工厂也是至关重要的。

生产设备的频繁启动或停机，不仅影响设备的运行效率，而且耗能。在线的物流出现停滞说明线上设备间的协调出现了问题。因此整个生产线上各设备协同运行，机器匀速运转、线上物流匀速且通畅，不仅可以保持较低的能耗，而且也是高生产效率的标志。同时，尽可能缩短物料处理的时间、从设计角度减少机器的尺寸、尽量使用轻巧结构的部件等，都是减少损耗、提高效能的重要措施。

投入并运行一条自动化生产线不是问题，问题是这条生产线的可用性或再

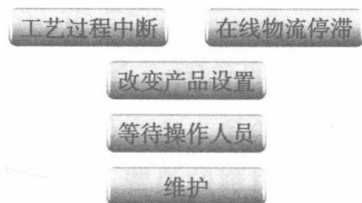


图 1-6 影响设备可用性的因素