

质量 4.0: 概念、基础架构及关键技术

刘虎沉¹, 王鹤鸣¹, 施华^{2*}, 尤建新¹

1. 同济大学经济与管理学院, 上海 200092

2. 上海电机学院材料学院, 上海 201306

摘要 通过明确质量 4.0 定义、特征、目标, 完善了质量 4.0 概念, 设计了质量 4.0 基础架构, 讨论了工业大数据、数字孪生、机器学习等 8 类关键技术及其支撑质量 4.0 的具体方式, 分析了中国制造业在质量 4.0 应用方面存在的问题并给出具体对策。

关键词 质量 4.0; 工业 4.0; 质量管理; 智能制造

经济与社会的迅速发展为制造业带来了新的挑战: 消费者需求及偏好日益多样化、个性化; 产品研发与生产需要更加灵活; 企业需要更快响应与决策, 以及更高效利用资源等^[1-2]。同时, 随着大数据、云计算、物联网、人工智能、数字孪生为代表的新兴技术迅速发展, 生产设备机械化、自动化、数字化程度进一步提升。在行业挑战与技术进步等因素推动下, 各国提出了不同的制造业发展战略, 如德国工业 4.0 概念、美国工业互联网战略、中国《中国制造 2025》等^[3-5]。这些战略虽然在执行基础、执行目标、行动路径等各有不同, 但其本质均是推进以智能制造技术为核心的新一轮产业变革^[4-5]。而质量管理对制造业发展至关重要, 其理念和方法都需要充分利用新兴技术、结合新的智能制造背景进

行迭代与升级, 以应对产业链、价值链、产业模式变革带来的严峻挑战。这引起了国内外学者的高度关注, 质量 4.0 概念应运而生。

质量 4.0 概念最初由 LNS Research 公司的 Dan Jacob 在 2017 年基于工业 4.0 概念提出^[6]。Jacob 阐述了质量 4.0 的概念、关键技术等内容, 并基于人、技术、流程 3 个角度将质量 4.0 划分为 11 个维度, 旨在为制造业企业转型提供参考和指导。之后受到部分研究者关注: Kumar 等^[7]构建了基于最优-最差方法的质量维度评估的决策模型; Christou 等^[8]设计了一个实现端对端集成的工业物联网平台及架构, 可实现不同数据源的有效整合、基于机器学习的多目标优化等功能; Escobar 等^[9]从大数据的角度讨论了质量 4.0 的 4 项挑战, 并针对性地提出了一种识

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-31

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21ZDA024)

作者简介: 刘虎沉, 教授, 研究方向为质量工程与可靠性管理, 电子信箱: huchenliu@tongji.edu.cn; 施华(通信作者), 讲师, 研究方向为智能制造质量管理, 电子信箱: shih@sdju.edu.cn

引用格式: 刘虎沉, 王鹤鸣, 施华, 等. 质量 4.0: 概念、基础架构及关键技术[J]. 科技导报, 2023, 41(11): 6-18; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.001

别、感知、发现、学习、预测、重新设计、重新学习的7步策略; Chiarini等^[10]基于混合方法研究构建了包含人、流程、技术3个维度11个主题的质量4.0的理论模型; Sader等^[11]基于文献综述与企业实际对质量4.0的特征、技术、应用及挑战做了总结与分析,并综合工业4.0和质量管理发展历程给出了质量4.0的定义。

虽然一些学者对质量4.0概念与理论进行了有益的探索,然而目前还没有形成系统的质量4.0框架体系,相关理论在概念、架构、技术等方面仍有提升和完善空间。

1 国内外研究进展

当前,质量4.0主要从3个角度开展研究:(1)质量管理的现状及展望;(2)质量4.0概念、理论;(3)如何采用工业4.0技术进行质量管理。明确提及质量4.0概念的文章较少。以Web of Science数据库为例,截至2022年12月31日,在主题、摘要、关键词中精确检索“Quality 4.0”时最终结果只有17篇。在中国知网数据库中检索“质量4.0”时,最终得到的核心期刊数量结果为0。而很多研究虽未明确提及质量4.0,研究的内容属于质量4.0。例如关于质量检测、预测、控制^[12-14],零缺陷制造^[15],工业大数据^[16],预测性维护^[17]的研究等。这些研究中包含了在当前智能制造背景下实施质量管理的理念、技术与方法,因此与质量4.0密切相关。鉴此,本文在检索“质量4.0”“工业4.0”“智能制造”“零缺陷”“预测性维护”等关键词之后,从3个角度对国内外研究进展进行综述。

1) 关于质量管理的现状及展望的研究。Gunnasekaran等^[18]从经济、人、决策模型与商业模型4个角度对工业4.0背景下的质量管理研究进行了总结,并基于人和技术2个维度提出了潜在研究方向及研究问题。Asif等^[19]指出传统质量管理模型已无法适应工业4.0,为了与时俱进,可以从正念、知识资本管理、大数据驱动的质量预测、精益组织架构、网络互联公司管理的角度实施质量管理模型的升级与更新。Zonnenshain和Kenett^[20]认为当前质量

管理模型的发展陷入了停滞,质量专家的领导地位逐渐下降,这要求企业尽快适应工业4.0背景下新的生产范式。为此Zonnenshain和Kenett提出了质量4.0的理论框架,其中包含了9个未来研究方向。Psarommatidis等^[15]提倡在工业4.0时代发展零缺陷制造以提升企业的竞争力、生产率、收益率和可持续性,并分析了当前零缺陷制造战略面临的9点挑战,给出了开展零缺陷制造实践的案例和未来研究方向。基于以上研究可以得出:传统质量管理需要进行重大变革以适应新的生产范式,而变革的具体方式可以从人、组织、理念、模型、方法等不同维度展开研究,变革的根源动力是工业4.0带来的新一代信息技术。

2) 关于质量4.0概念、理论的研究。Sader等^[11]和Chiarini等^[10]均构建了各自的质量4.0理论框架,但是采用了不同的研究方法:Sader等采用文献综述的方法开展研究,而Chiarini等的研究则基于制造业公司质量专家的经验评价。此外,一些研究者尝试将质量4.0建立在现存质量管理模型的基础上。如Glogovac等^[21]以ISO 9004:2018模型作为工业4.0下质量管理成熟度评估的基础,并通过验证性因子分析和结构方程模型法证实了其可行性。Ali等^[22]将质量4.0视为全面质量管理在工业4.0背景下的进一步延伸与拓展,并基于帕累托图法确定了质量4.0实施的7个关键成功因素。Fonseca等^[23]认为欧洲质量管理基金会EFQM 2020模型可为质量4.0提供综合的框架以实现卓越的组织绩效。

3) 关于如何采用工业4.0技术进行质量管理的研究。研究表明大量工业4.0技术与方法可应用于质量检测、质量监控、质量预测、设备故障诊断及预测性维护、服务质量改进等质量管理活动。这些技术类研究中包括以下关键词:大数据^[16]、云计算^[18,24]、边缘计算^[24-26]、数据挖掘^[27]、人工智能^[17,28]、机器学习^[29-30]、深度学习^[31]、集成学习^[32-33]、神经网络^[34-35]、支持向量机^[36]、数字孪生^[37-39]、增强现实^[40]、计算机视觉^[41]、机器视觉^[42-43]、无线射频识别^[11,44]、可视化^[11,45]、机器人^[11,46]、仿真优化^[13]、物联网^[8,14]等。这些技术被广泛应用于质量管理活动中,例如神经网络是机器学习采用的一类算法,而机器学习可应

用于机器视觉技术进行缺陷检测,也可用于质量预测。因此在宏观视角下,需要建立完整的质量4.0技术体系,并且要明确各项技术对质量管理活动产生贡献的具体方式。

基于上述文献分析,可以发现当前质量4.0的研究仍面临以下挑战。

1) 质量4.0的基本概念(包括其定义、特征、目标等)不够完善。当前研究没有对质量4.0形成统一的定义,原因是研究者从不同的角度探索质量4.0定义的起源^[1]。这些不同的角度与观点需要进行综述,便于得到明确、一致的质量4.0定义。此外,需要厘清质量4.0的内涵,明确质量4.0的特征及最终目标。完善以上质量4.0基本概念,可以更好地促成质量4.0理论体系的构建与发展,为制造业转型升级提供有力指导。

2) 质量4.0缺少基础架构相关研究。质量4.0架构需要明确整个系统的需求和可配置的技术工具,进而基于质量管理的视角进行设计。架构设计应当满足如下要求:(1) 易于理解,在描述“宏观要求”与“微观实现”之间达到良好的平衡,成为质量管理工作设计者与技术实现者沟通的桥梁;(2) 适配性高,可适应不同领域的制造企业,而非针对某一类特殊企业,这样有助于质量管理者配置、部署相关模块及功能。

3) 质量4.0没有形成系统的技术体系。质量4.0的实现需要大量新兴技术的驱动,部分研究者已对质量4.0需要采用的技术进行归纳总结^[6, 11],但

仍存在一些未被提到且至关重要的技术,例如机器视觉、增强现实、数字孪生等。同时,已被研究者提到的技术如大数据、人工智能等如何支撑制造业的质量管理活动也需要更详细的说明。

2 质量4.0概念

2.1 质量4.0定义及内涵

Jacob基于工业4.0概念提出质量4.0,对其定义为:质量管理的数字化及其对质量技术、质量流程和人员的影响^[6]。Jacob在LNS Research公司官方网站上发布了《What is Quality 4.0?》一文,对质量4.0概念进行了补充:质量4.0将工业4.0技术与传统质量方法相结合,以在卓越运营、绩效和创新方面达到新的最佳状态。Jacob对于质量4.0的定义可以通俗地理解为“工业4.0背景下的质量管理”,这构成了大部分质量4.0研究的基础。

而国际质量科学院(IAQ)和美国质量学会(ASQ)也很早就开始讨论质量管理的未来。Watson作为IAQ前院长提出了另一种质量4.0定义:质量管理发展历程中的第4个阶段^[47]。这种定义方式参考了工业4.0概念的发展历程,并且Watson阐述了4个阶段的不同特征,这启发研究者从另一个角度定义质量4.0。例如Escobar等^[9]将质量管理的4个阶段定义为:(1) 统计质量控制,(2) 全面质量管理,(3) 六西格玛,(4) 质量4.0。Watson提出的质量管理发展历程及各阶段特征如图1所示。

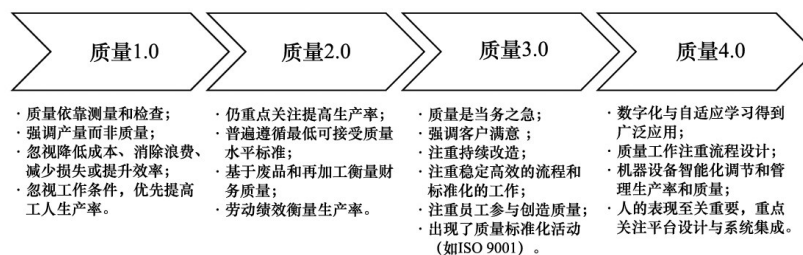


图1 质量管理发展历程

以上2种定义方式各有侧重点和局限性:第一类定义强调工业4.0技术的影响,但忽略了质量管理本身的发展脉络;第二类定义突出质量管理独立的发展过程,但学术界尚未在前3个阶段的划分上

达成一致。例如,与Escobar等提出的4阶段不同,Sader等^[11]将前3个阶段划分为质量控制、质量保证、全面质量管理。因而第二类定义的严谨程度需要进一步提高。部分研究者在回顾了2类定义方

式后提出了新的定义。例如, Sader等^[11]认为质量4.0是一种扩展的质量管理方法,将最新技术与传统质量管理实践(质量控制、质量保证、全面质量管理)相结合,以扩大质量管理范围并提高质量管理活动的绩效和效率。这个定义在2类方式间达到了平衡; Chiarini等^[10]提出质量4.0是一种以客户为中心和数字化赋能的方法,将整个价值链(包括企业内的纵向集成、企业间的横向集成和端到端集成,这3种集成的理念来源于工业4.0^[1,4])上的人员、流程和技术整合起来,与价值链中的利益相关者协作,从而做出基于证据的决策。

总而言之,质量4.0发展至今未得出明确、一致的定义。这很大程度上归因于研究者对于质量4.0概念中“4.0”起源的不同理解。鉴此,本文提出以下质量4.0的定义:在工业4.0背景下利用新一代信息技术对质量管理理念、方法的改进与创新,从而最大化提升产品全生命周期质量、提高质量管理效率、减少缺陷并降低成本。此定义在“4.0”的来源上参考了第一类定义方式,同时引入了新的内涵。

1) 质量4.0强调传统质量管理方法改进及创造新的质量管理方法。

传统质量管理方法需要与时俱进以适应新的生产范式。例如Shin等^[48]提出了工业4.0背景下的质量计分卡,宗福季^[6]提出了改进的DAMIC方法。同时质量管理方法需要结合当前技术进行创新。例如利用大数据与人工智能等技术分析客户个性化需求以改进研发设计质量;利用智能传感器、智能装备和分析技术实现实时质量监控和预测以改进生产制造过程质量;利用优化理论与算法配合仿真建模技术改进物流配送服务质量等。

2) 质量4.0是面向个性化产品全生命周期(指产品从准备进入市场开始到被淘汰退出市场为止的全部运动过程,包含研发设计、制造装配、物流服务等环节)的价值创造过程。

传统质量管理对于质量的理解倾向于“符合要求”,由此产生了如ISO 9001的质量管理标准体系来衡量产品质量符合要求的程度。这其实是对产品质量问题的“被动防守”,质量管理的重心也往往集中在产品的生产制造装配环节。在质量4.0背景

下,顾客需求更加追求个性化,产品生命周期更短,此时的质量概念更加强调“顾客满意”。这要求质量管理者扩大质量管理范围、强化质量管理职能、化被动为主动,基于产品全生命周期的质量管理活动创造更多价值、提升顾客满意度。

3) 质量4.0注重精益与零缺陷质量思想的结合。为了应对大规模个性化产品的质量需求,质量4.0需要质量管理活动具备更加高效、灵活的响应。

这要求质量4.0组织架构“小而精”,大量工作由高度自动化、数字化、智能化的设备与系统承担,并且这些设备与系统相比人通常更加可靠,可以有效减少缺陷与错误的发生,促进了零缺陷的实现。同时,质量4.0还采用新兴技术基于产品导向和过程导向开展产品质量检测、监控、预测,以及设备的故障诊断、预测性维护等工作,主动促成零缺陷制造^[15]。因此在质量4.0背景下,精益与零缺陷是相辅相成的(图2)。精益有助于零缺陷目标的达成;零缺陷可以减少缺陷导致的浪费、补救成本从而回馈于精益理念的实现。

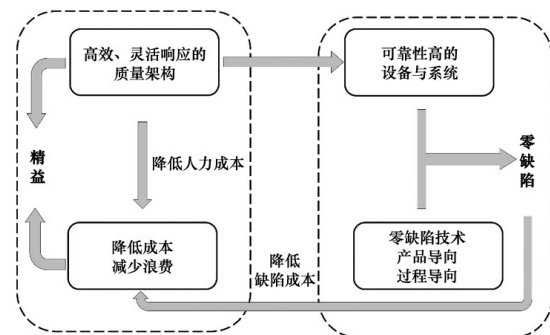


图2 精益与零缺陷协同

2.2 质量4.0特征

与传统质量管理相比,质量4.0出现了新的特征(图3)。

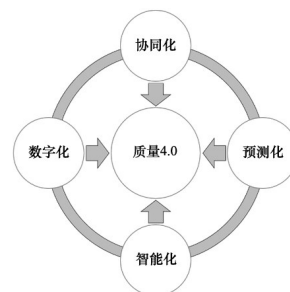


图3 质量4.0特征

1) 质量管理模式协同化。

为了实现高效的产品全生命周期质量管理,质量4.0要求全价值链企业采用协同化的质量管理模式。质量4.0通过建立面向全价值链企业的云端数据库及云端质量管理体系与平台,对产品全生命周期中不同环节的多源异构数据储存、管理、挖掘、分析以支持质量管理活动,可以促进企业间的信息共享与质量管理联动,建立有效的产品全生命周期质量追溯体系^[8, 26, 49]。质量4.0强调协同构建企业质量管理生态圈,避免信息孤岛打破合作壁垒,整合企业资源提升管理效率,从而降低成本、提高质量、提升顾客满意度,最终实现全生态圈企业的互惠共赢^[26, 49]。

2) 质量管理流程数字化。

质量4.0充分应用高度数字化的设备工具、系统平台及工作流程,充分挖掘数字化技术在质量管理中的创新作用,系统化提升企业生态圈质量管理能力^[49]。智能工厂中的大量传感器和数字化设备可将收集到的产品质量信息转换为可以通过计算机程序处理的质量数据,这些数据构成了质量4.0中质量监控、质量预测、质量追溯等质量管理活动的基础。数字化系统与平台可有效支持企业内、企业间的互联和协作,支持质量管理体系的快速响应,支持高质量的分析结果展示以辅助管理者进行决策。

3) 质量管理工具智能化。

在质量4.0背景下,部分传统的质量管理工具由于标准化程度较高将被人工智能所取代。例如智能机器人可以按照预先设定的质量管理标准流程与方法,在更加恶劣的条件下完成更高要求的质量检测任务,或者提供高质量的物流配送服务。此外,人工智能可以对传统质量管理工作进行改进与创新。例如上述智能机器人可以在短时间内大量集中部署,利用人工智能的强大算力解决大规模复杂优化问题,从而提供最优的配置方案,实时引导智能机器人完成质量管理工作^[46]。质量4.0旨在实现质量管理的高度自动化、智能化,从而提升质量管理体系的可靠性、管理效率和管理效果。

4) 质量管理结果预测化。

质量4.0根据相应的企业生产实际,利用一定的理论算法(如支持向量机、随机森林、决策树、逻辑回归等方法),基于质量大数据将当前的产品质量指标和质量影响因子综合考虑,对产品的质量信息给出预测化结果,为质量管理者决策提供支持^[33]。提供预测化结果是保障质量、减少缺陷的重要举措,但因为实际的工业生产过程包含非常复杂的生产要素,使得传统质量管理方法很难实现质量预测。而质量4.0采用新一代信息技术与智能化设备,可以实现产品缺陷、设备故障发生前的预测和预防,大幅减少质量损失和资源浪费。

2.3 质量4.0目标

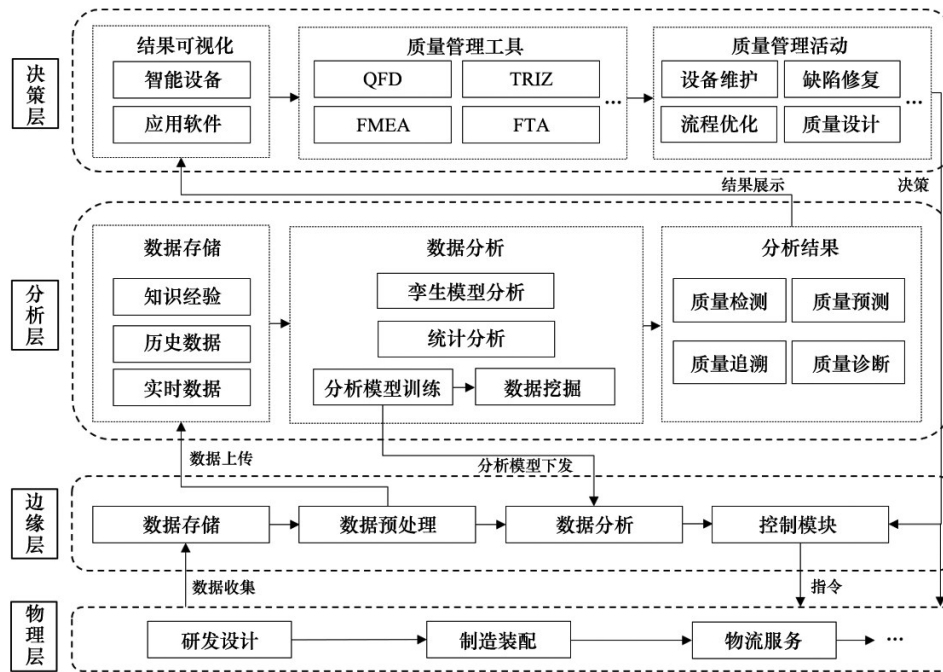
质量4.0的最终目标是帮助企业在快速变化的市场环境中获取长远的竞争优势与可持续性发展。质量对当今企业发展至关重要,以新能源汽车企业为例,每年因质量问题而召回的乘用车数量多以百万计,会产生高昂的召回、维修等成本;质量问题引起的负面舆情在互联网技术高度发达的当今社会迅速传播,对品牌形象造成沉重打击。而且越是高端制造业,产品缺陷、设备故障产生的成本就越高。因此,如何将快速更新迭代的产品维持在高质量水平成为了制造业企业的当务之急。

在传统质量管理背景下,由于很难彻底消除缺陷,质量提升的边际效益较低。而质量4.0可以有效解决这个难题。在质量4.0背景下,新一代信息技术的发展为制造业达成零缺陷目标提供了坚实的基础,企业生态圈质量管理水平将会达到全新的高度。当然,质量4.0会带来较高的初始成本,无论是自己构建高度自动化、数字化、智能化的质量管理体系,或者购买其他公司的质量管理方案与服务,都是一笔不小的费用。但是长远来看可以增加客户满意度,提升品牌效应,减少因产品缺陷导致的资源浪费和补救成本,从而实现真正的“质量免费”。

3 质量4.0基础架构

基于以上质量4.0概念分析,提出质量4.0基础架构(图4)。

质量4.0基础架构包含物理层、边缘层、分析层



注:质量功能展开(QFD),发明问题解决理论(TRIZ),故障模式及影响分析(FMEA),故障树分析(FTA)。

图4 质量4.0基础架构

与决策层。物理层包括产品的全生命周期中与质量相关的人、机、料、法、环等元素,是质量数据与质量信息的来源。边缘层包括短暂的数据存储、数据预处理、简单的数据分析以及控制模块。分析层负责数据的存储与管理,通过数据分析得出质量相关分析结果,这些功能主要在云端实现。决策层负责向质量管理者展示分析结果,为质量管理者提供质量管理工具,辅助质量管理者开展各项活动及制定决策。

质量4.0旨在实现3种质量循环。

1) 物理—边缘循环,即由物理层、边缘层参与的简单循环。

边缘层具备一定的数据处理与分析能力,因此质量管理者可以预先在边缘层部署相应设备与技术,设置标准的流程与方法,从而实现实时、自动化的质量管理。质量4.0从物理层中收集质量数据与信息,在边缘层中存储、预处理、分析,由控制模块向物理层下达指令,实现质量管理。因为边缘层处于质量数据流的上游,因此数据的时效性更好,且整个质量循环不需要人的监督,可以自动化实现。缺点在于边缘层的硬件能力有限,且只能基于实时

数据进行分析,无法结合知识经验、历史数据。因此这种循环无法从事复杂的质量管理工作。

2) 物理—边缘—分析循环,即由物理层、边缘层、分析层构成的协同循环。

在物理—边缘循环的基础上,分析层可以为边缘层训练并提供优质的模型与方法,辅助边缘层的分析工作,从而实现实时、自动化、智能化的质量管理。数据经由边缘层存储、预处理之后,可上传至分析层用于分析模型的训练,训练后的模型下发至边缘层辅助实现数据分析。因此物理—边缘—分析循环更加智能,且全流程依然可以自动化实现。

3) 完整的质量4.0循环,即物理层、边缘层、分析层、决策层全部参与的循环。

实时数据经由边缘层预处理后,上传至分析层与知识经验、历史数据集中存储管理及分析。数据分析包含孪生模型分析、统计分析和数据挖掘。分析结果包含质量检测结果、质量预测结果、质量追溯结果、质量诊断结果等。这些分析结果最终在决策层经由结果可视化工具(包括智能设备与应用软件)展示在决策者面前,决策者结合质量管理工具开展设备维护、缺陷修复、流程优化、质量设计等质

量管理工作,制定最终的决策。决策可以作用于边缘层的控制模块,也可以直接作用于物理层。完整的质量4.0循环智能化程度更高,质量管理能力更强,但由于需要质量管理者的参与,因此无法全自动化实现。

4 质量4.0关键技术

质量4.0的概念与理论需要大量先进技术的支持得以实现。一方面,通过文献分析发现,应用工业大数据、数字孪生、机器学习、机器视觉对质量管理过程进行建模,可以提升质量管理模型的仿真能力和智能化水平^[25, 30, 38, 42]。另一方面,在智能制造环境下,企业的质量管理实践也需要向数字化、网络化、智能化方向转型和升级。例如,基于可视化技术对质量分析结果进行智能展示,采用优化技术改善质量管理的资源调度,利用连接技术与协作技术加强企业内部与企业间的互联与协同能力,从而帮助企业降低成本提升效率。基于以上2个角度,本文最终确立了质量4.0的8类关键技术,即工业大数据、数字孪生、机器学习、机器视觉、可视化技术、优化技术、连接技术、协作技术。

4.1 工业大数据

工业大数据指企业生态圈内产生的海量、高增长率、多样化的数据资料^[16, 25]。工业大数据是质量4.0的基石,其他技术例如机器学习、数字孪生、优化技术等都是基于工业大数据的处理与分析。工业大数据技术包含数据的全生命周期中需要的一系列技术,包括数据收集、数据存储、数据处理、数据分析、数据应用、数据治理^[50](图5)。

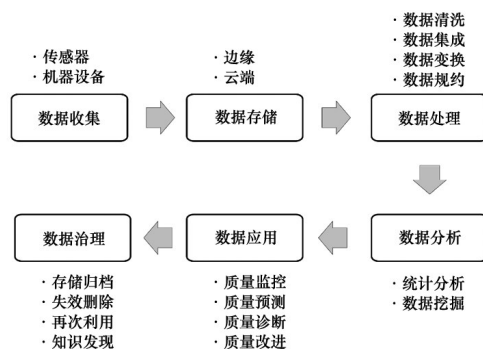


图5 工业大数据技术流程

数据收集主要通过智能工厂内的大量传感器实现,同时高度数字化的机器设备自身的信息也是数据的直接来源。收集到的数据可以在设备的边缘层短暂存储,然后上传至企业云端数据库进行管理。数据处理指分析前的数据预处理,包含数据的清洗、集成、变换、规约等步骤,未经过预处理的数据将极大增加数据分析的难度和效率。数据分析通常包含统计分析与数据挖掘2种形式:统计分析目的性强,注重利用现有分析工具得出确定结论;数据挖掘注重在大数据中通过机器学习、人工智能等技术手段搜索隐藏于其中的信息与知识,挖掘不同变量之间深层次关系与模式。在数据分析过程中,不仅要实时数据分析,往往还要和历史数据、经验知识数据结合分析;这些不同来源与结构的数据平时被存放在企业自身或云端的数据库中等候调用^[50]。数据分析的结果将应用于质量管理中的质量监控、质量预测、质量诊断、质量改进等活动。最终的是数据治理,要将有效的数据归档以备再次利用,将失效数据删除,并从数据中提取知识与经验。

数据的处理与分析既可以在设备边缘层实现,也可以在云端实现,这2种情况分别采用边缘计算与云计算。由于硬件能力的限制,边缘层很难实现复杂的计算与分析,但边缘层更加贴近数据源,可以有效提升数据处理效率、减轻云端负荷。在当前的质量管理实践中,往往采用云边协同的方式进行数据处理与分析。例如张明强等^[24]设计的空调外观质量人工智能检测系统中,边缘层负责收集数据上传云端、利用云端下发的人工智能模型质量实时检测并执行控制决策;云端负责数据存储及人工智能模型的训练、更新,然后下发至边缘层投入使用。

4.2 数字孪生

数字孪生是一种先进的仿真模拟技术,其通过数据交互构建物理实体的虚拟模型映射,从而支持产品的研发、生产及业务管理过程的分析 and 决策^[37, 51]。在质量4.0中,数字孪生技术被应用于复杂产品装配过程的实时质量管理^[37, 52],设备的故障诊断以及预测性维护^[38-39]。基于数字孪生的质量管理模型通常由3个部分组成:(1) 真实空间内的物理系统;(2) 虚拟空间内的数字孪生模型;(3)

数字孪生模型质量管理体系^[39]。

基于数字孪生的质量管理模型如图6所示,其运作方式如下:(1) 构建真实空间内物理系统的数字孪生模型,实现物理系统到孪生模型的设备状态、工作条件等各项映射;(2) 基于数字孪生模型实施质量管理,并获得反馈信号;(3) 若没有实现质量管理目标,则继续改进,直至获得理想的反馈信号;(4) 在获得理想的反馈之后,基于改进后的数字孪生模型进行决策,实现对真实空间内物理系统的质量管理。数字孪生技术的实现需要智能传感器、机器学习、增强现实、虚拟现实等大量技术的支持,使得它往往会产生较高的成本^[39]。但它的优势在于创建了一个虚拟的模型,除了能够最大程度还原产品与设备的真实状态,还可以代替成为大量质量管理实验的对象,减少真实空间内的消耗与损失。因此,数字孪生技术在质量管理领域内具有广阔的发展空间。

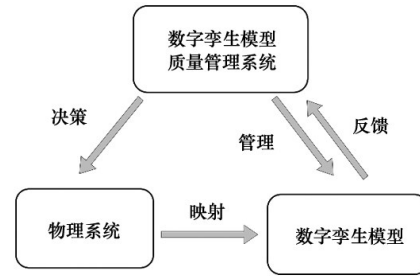


图6 基于数字孪生的质量管理模型

4.3 机器学习

机器学习是人工智能领域的核心学科与技术,旨在用计算机模拟人类学习行为从而获取新的知识与技能。机器学习分为传统机器学习与深度学习;传统机器学习算法包括决策树、支持向量机、随机森林、逻辑回归、K近邻(KNN)等;深度学习则包括卷积神经网络、深度信任网络等。当前质量管理研究中采用的机器学习算法如表1所示。

表1 质量管理研究机器学习算法汇总

传统机器学习/深度学习	采用的算法模型	代表性文献
传统机器学习	支持向量机	[36]
深度学习	卷积神经网络、深度信任网络、循环神经网络、迁移学习	[17]
传统机器学习	决策树、神经网络、逻辑回归	[27]
传统机器学习	逻辑回归	[29]
传统机器学习	KNN、朴素贝叶斯、随机森林、支持向量机、人工神经网络、逻辑回归	[53]
传统机器学习	线性回归、多层感知器、支持向量回归	[30]
深度学习	稀疏深度信任网络	[31]
深度学习	双向长短期记忆网络	[54]
传统机器学习	Bagging、梯度提升树	[32]
传统机器学习	LightGBM、极限梯度提升、支持向量机、多项式先验分布朴素贝叶斯	[33]
深度学习	卷积神经网络	[34]
传统机器学习	概率神经网络	[35]
传统机器学习	BP神经网络	[55]
传统机器学习	Bagging、随机森林	[56]
传统机器学习	逻辑回归、支持向量机、极限梯度提升、梯度提升树、Stacking	[57]
传统机器学习	学习向量量化、多层感知器	[58]

机器学习是质量4.0中各项功能的关键支撑技术,尤其是对于质量预测功能。利用机器学习实施质量预测通常包含以下步骤:(1) 明确问题。例如将某机加零件质量预测问题可以抽象成二分类问题;(2) 根据问题选择合适的算法模型;(3) 收集数据,并进行预处理,通常包含数据的清洗、检查、

校正、格式转化等;(4) 特征选择。这一步要求选择显著特征,摒弃非显著特征;(5) 数据集划分。通常将80%的数据划分为训练数据集,20%的数据划分为测试数据集;(6) 模型训练、评估与调优。利用训练数据集对模型进行训练,并利用测试数据集对模型进行评估。若效果不理想,则需进行参数

调整直到确定最终的最优模型;(7) 保存最终模型及投入使用,得出质量预测结果。机器学习技术除了直接对质量 4.0 提供支撑外,还可以通过其他技术提供间接支持。例如工业大数据、数字孪生、机器视觉都需要用到机器学习。随着制造业数字化程度越来越高,源源不断的“数据宝藏”等待质量管理者挖掘、利用;而机器学习作为处理大数据最有效、最高效的技术手段,将在质量管理领域发挥重大作用。

4.4 机器视觉

视觉技术通常分为机器视觉(machine vision)和计算机视觉(computer vision)2种。目前2种视觉技术的联系与区别还未得出清晰、明确的结论,因此本文在这里将它们统称为机器视觉。机器视觉是指机器代替人眼从图像(影像)中获取信息的技术。机器视觉技术通常由图像摄取技术和图像处理技术2部分组成。图像摄取主要由如智能工业相机、图像传感器等先进的光学设备实现;而图像处理则由智能计算机实现。图像处理有2种不同的目标导向:以测量为主的导向和以识别为主的导向。而其中图像识别的目标很大程度上依赖于机器学习和深度学习技术的支持。

机器视觉对于质量 4.0 的贡献与支撑作用主要体现在质量检测的职能上,例如实现产品缺陷(尤其是外观缺陷)的自动化高效检测^[26];也可用于机器设备的过程监控与故障诊断^[42],以及装配过程的实时监控和动态偏差修正^[43]。虽然质量 4.0 希望通过预测—预防的技术手段实现零缺陷目标,但绝对的“零缺陷”是不存在的,缺陷只是被减少到了可以忽略不计的程度。在当前质量 4.0 转型的初级阶段,质量检测依然是制造业企业最主要、最重要的质量管理职能。因此,机器视觉技术将在质量管理实践中广泛应用。

4.5 可视化技术

可视化技术是将信息转换成图像、画面从而增强人获取信息及交互处理能力的技术。在质量 4.0 背景下,可视化技术可以提升质量管理效率、改善质量管理工作条件、辅助质量管理者决策、提升质量管理水平。以增强现实技术为例,其通过将虚拟

信息内容与真实世界叠加显示,可以代替质量检测、质量监控过程中的纸质文件、表单,做到“无纸化”,从而充分释放质量管理者手部空间,提升工作效率;搭载可视化技术的智能设备(如头戴计算机)可以和物联网、人工智能等技术配合使用,即使是复杂、恶劣的工业环境中也可以做到实时信息展示与人机交互;智能屏幕可以在车间内大量部署,向车间操作员显示丰富的信息、说明或警报,减小人为因素导致质量问题的概率。

4.6 优化技术

优化技术是在一定的约束条件下基于特定目标对当前策略、方案的改进技术。在实践中,质量管理往往是面向多产品、多过程、多情境的复杂工作,因此需要利用优化理论与技术求解最优的质量管理方案,提升效率降低成本。利用优化技术改进质量管理方案的步骤通常包括:(1) 建立模型。将实际问题转化为数学语言,例如文献[46]中多机器人执行质量检测任务可以抽象成覆盖路径规划问题。(2) 算法设计。常见的优化算法包括模拟退火、遗传算法、列生成等,可以将传统算法组合与改进以满足实际使用需求。(3) 模型求解。随着新一代信息技术的发展,求解模型的方式方法更加多样化,例如可以使用gurobi、Cplex等专用求解器求解,也可使用Python等语言编程求解。

优化技术与方法对于质量管理而言并不陌生,尤其在企业的供应链质量与服务质量管理中发挥了重要作用^[2]。较为复杂的优化技术虽可以出色地解决问题,却难以在实践中落地。而质量 4.0 将改变这一局面,因为新一代信息技术的发展带来了巨大的算力提升。未来将会有更多、更复杂的优化理论与技术进入质量管理实践。

4.7 连接技术

连接技术指实现企业生态圈中不同对象之间信息互联与传输,形成有机整体的技术。连接技术对于质量 4.0 至关重要,例如第五代移动通信技术(5G)可以提供更高的信息传输速度,提升质量管理效率,保障工业大数据的时效性;无线射频识别技术具有使用方便、操作快捷、适应能力强、抗干扰能力强等特点,可用于质量数据采集、实时质量监

控与产品质量追溯^[44];互联网协议第6版(IPv6)的出现以及网络基础设施的改进与扩建可以容纳更多物理、产品、设备的实时互联,为开展大规模复杂质量管理活动提供硬件条件^[45]。

4.8 协作技术

协作技术指帮助企业生态圈中质量管理者之间交流、协作的技术。社交媒体平台是一项重要的协作技术,企业级社交媒体平台具备大量的功能如线上会议室、云文档、数据连接器等,可以有效促进质量管理者跨区域、跨时间沟通与协作;用户级社交媒体平台则可以加强企业与顾客的联系,获得顾客的产品体验反馈、质量问题反馈、质量改进建议。区块链技术使用一系列具有时间戳的不可变记录来保存信息,是一种去中心化的分布式信息系统,因此可以显著增强质量管理协作中信息的安全性与可追溯性。企业还可以通过构建企业质量管理体系与平台,为质量管理工作提供“一站式”工作体验,提高信息透明度、提升质量管理协作水平。

5 中国制造业质量4.0应用面临的主要问题及对策

虽然质量4.0可帮助企业在智能制造时代取得优异的质量管理绩效,但其落地实施过程需要结合具体场景和问题来分析。目前,中国制造业在质量4.0的概念、基础架构及关键技术等方面存在一些现实问题,具体表现在以下3个方面。

1) 质量4.0关键技术能力欠缺。质量4.0的实现需要大量的智能传感器、高性能计算机、高性能芯片等硬件设备,还需要针对不同的质量管理场景做具体的应用平台、人工智能模型等软件层面的研发。然而当前的关键技术能力以及研发效率相较于发达国家仍处于劣势,难以满足质量4.0转型的需求。对此,需要中国制造业在新技术研究与应用上加大投入;同时通过一些政策及措施,激励更多高新技术行业的企业和组织加入中国制造业转型升级的浪潮,将自身的技术能力产品化,更好地服务于中国的制造业客户。

2) 人员质量4.0意识较为淡薄。实现质量4.0

需要整个企业有良好的数字化基础,这就要求制造业企业在建设自身的信息系统时具有一定的前瞻性,且质量管理人员要有较强的技术学习和理解能力。但当前大量制造企业(尤其是中小企业)数字化程度不高,系统的可拓展性太差,且质量管理人员的技术能力较弱,导致质量4.0落地变得非常艰难。对此,需要加强质量管理人员的质量4.0意识,开展相应的新技术培训,从而推动企业数字化建设,为质量4.0落地奠定基础。另一方面,可重点研发一些低代码、零代码的开发平台及开发工具,供质量管理人员使用,降低质量管理应用软件的开发门槛,提升开发效率。

3) 质量4.0转型瓶颈期难以突破。实现质量4.0需要前期投入大量的人力、物力及财力成本,但其效果并非随着投入的增加而成比例提升。在企业到达依靠高质量产品及高市场份额盈利的关键节点之前,会处于一个瓶颈期,期间无法保证企业可以持续盈利,转型的预期效果不明确。因此,很多企业领导者即使清楚质量4.0转型的未来前景,但转型意愿仍然不高。对此,需要政府提供政策支持和激励,通过统筹布局和顶层设计,帮助企业克服前期转型成本过高的压力,推动企业成功向质量4.0转型。此外,学术界可以加强对质量4.0的研究工作,对质量4.0转型中投资与回报的关系建模分析,为转型中的制造业企业提供可量化的预期管理与理论方法支撑。

6 结论

明确了质量4.0的定义,指出质量4.0是在工业4.0背景下利用新兴技术对质量管理理念、方法的改进与创新,从而最大化提升产品全生命周期质量、提高质量管理效率、减少缺陷并降低成本。其次,指出质量4.0的特点分别为协同化、数字化、智能化、预测化,并提出质量4.0的最终目标是帮助企业在快速变化的市场环境中获取长远的竞争优势与可持续性发展。再次,提出了质量4.0的基础架构设计,包含物理层、边缘层、分析层、决策层,可实现物理—边缘、物理—边缘—分析以及完整的质量

4.0的3种质量循环。最后讨论了工业大数据、数字孪生、机器学习、机器视觉、可视化技术、优化技术、连接技术、协作技术8类质量4.0关键技术,描述了它们实施质量管理的方式。

质量4.0作为质量管理理论与实践的最新成果,是企业维持竞争优势、实现可持续发展的必然选择。质量4.0研究仍有大量发展空间,本文基于现有研究提出以下未来研究方向。

1) 质量4.0理论体系构建。质量4.0概念发展仍处于起步阶段,当前相关理论依然不够成熟,需要进一步完善。因此,可以从概念、方法、实践等多个角度,构建完善的质量4.0理论体系,从而指导企业数字化、智能化转型,促进企业质量4.0文化建设,帮助高校和企业培养质量研究和管理人才。

2) 质量4.0方法更新。当前研究中提出了一些质量管理方法、模型、工具的改进,但仍有大量的方法未得到充分讨论,例如故障模式与影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、质量功能展开(QFD)等。这些方法如何与工业4.0新技术相结合、如何增强与创新从而解决实际问题未来研究的重点。

3) 质量4.0实践创新。质量4.0理论需要与企业质量管理实践深度结合。当前对质量4.0实践的研究不足,需要进一步探索诸如如何基于质量4.0理论设定企业实际质量管理方案、如何度过质量4.0转型瓶颈期、如何克服较高初始成本带来的管理压力等。目前已有大型企业开始实施质量4.0战略,可将此类企业的实践作为研究对象,为其他企业质量4.0转型开辟道路。

参考文献(References)

- [1] Lasi H, Fettke P, Kemper H G, et al. Industry 4.0[J]. *Business & Information Systems Engineering*, 2014, 6(4): 239-242.
- [2] 温小琴, 胡奇英. 基于质量意识和工艺创新的供应链质量决策[J]. *管理科学学报*, 2018, 21(2): 80-90.
- [3] 周济. 智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [4] 延建林, 孔德婧. 解析“工业互联网”与“工业4.0”及其对中国制造业发展的启示[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(7): 141-144.
- [5] 李金华. 德国“工业4.0”与“中国制造2025”的比较及启示[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2015, 15(5): 71-79.
- [6] Jacob D. *Quality 4.0 impact and strategy handbook*[M]. Cambridge: LNS Research, 2017.
- [7] Kumar L, Hossain N U I, Fazio S A, et al. A data driven decision model for assessing the enablers of quality dimensions: Context of industry 4.0[J]. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 35: 896-910.
- [8] Christou I T, Kefalakis N, Soldatos J K, et al. End-to-end industrial IoT platform for Quality 4.0 applications[J]. *Computers in Industry*, 2022, 137: 103591.
- [9] Escobar C A, McGovern M E, Morales-Menendez R. Quality 4.0: A review of big data challenges in manufacturing[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, 32(8): 2319-2334.
- [10] Chiarini A, Kumar M. What is Quality 4.0? An exploratory sequential mixed methods study of Italian manufacturing companies[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(16): 4890-4910.
- [11] Sader S, Husti I, Daroczi M. A review of quality 4.0: Definitions, features, technologies, applications, and challenges[J]. *Total Quality Management & Business Excellence*, 2021, 33(9/10): 1164-1182.
- [12] 曹裕, 李青松, 胡韩莉. 供应链产品质量检查策略的比较研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(1): 111-125.
- [13] 成国庆, 周炳海, 李玲. 多设备系统的生产批量、质量控制与预知维护联合优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(8): 2152-2161.
- [14] 王鸿鹭, 蒋炜, 魏来, 等. 基于物联网的产品全生命周期质量管理的模式创新与展望[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(2): 475-482.
- [15] Psarommatas F, Sousa J, Mendonça J P, et al. Zero-defect manufacturing the approach for higher manufacturing sustainability in the era of industry 4.0: A position paper[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(1): 73-91.
- [16] 宗福季. 数字化转型下工业大数据在质量创新中的应用[J]. *宏观质量研究*, 2021, 9(3): 1-11.
- [17] 袁焯, 张永, 丁汉. 工业人工智能的关键技术及其在预测性维护中的应用现状[J]. *自动化学报*, 2020, 46(10): 2013-2030.
- [18] Gunasekaran A, Subramanian N, Ngai W T E. Quality management in the 21st century enterprises: Research pathway towards Industry 4.0[J]. *International Journal of*

- Production Economics, 2019, 207: 125–129.
- [19] Asif M. Are QM models aligned with Industry 4.0? A perspective on current practices[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120820.
- [20] Zonnenshain A, Kenett R S. Quality 4.0—the challenging future of quality engineering[J]. Quality Engineering, 2020, 32(4): 614–626.
- [21] Glogovac M, Ruso J, Maricic M. ISO 9004 maturity model for quality in industry 4.0[J]. Total Quality Management & Business Excellence, 2020, 33(5/6): 529–547.
- [22] Ali K, Johl S K. Soft and hard TQM practices: Future research agenda for industry 4.0[J]. Total Quality Management & Business Excellence, 2022, 33(13/14): 1625–1655.
- [23] Fonseca L, Amaral A, Oliveira J. Quality 4.0: The EFQM 2020 model and Industry 4.0 relationships and implications[J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3107.
- [24] 张明强, 高华, 袁东风, 等. 云边协同外观质量 AI 检测系统的设计与实现[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2021. [2023-01-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211112.1252.012.html>.
- [25] 张洁, 汪俊亮, 吕佑龙, 等. 大数据驱动的智能制造[J]. 中国机械工程, 2019, 30(2): 127–133, 158.
- [26] 刘献礼, 李雪冰, 丁明娜, 等. 面向智能制造的刀具全生命周期智能管控技术[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 196–219.
- [27] 赵丽, 程铁信, 莫莹, 等. 基于 C5.0 改进算法的焊接工艺参数选择决策树数据挖掘模型及其应用[J]. 中国管理科学, 2016, 24(增刊 1): 177–182.
- [28] 李杰, 李响, 许元铭, 等. 工业人工智能及应用研究现状及展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(10): 2031–2044.
- [29] Asif K, Zhang L, Derrible S, et al. Machine learning model to predict welding quality using air-coupled acoustic emission and weld inputs[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(3): 881–895.
- [30] Zhou B, Pychynski T, Reischl M, et al. Machine learning with domain knowledge for predictive quality monitoring in resistance spot welding[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(4): 1139–1163.
- [31] 董海, 高秀秀, 魏铭琦. 基于深度学习的完全填充型熔融沉积成型零件质量预测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 200–211.
- [32] 柏雪, 李剑锋. 基于 Bagging 集成算法的产品质量等级智能判定研究[J]. 工业工程与管理, 2022, 27(4): 58–66.
- [33] 李敏波, 董伟伟. 面向不平衡数据集的汽车零部件质量预测[J]. 中国机械工程, 2022, 33(1): 88–96.
- [34] Singh S A, Desai K A. Automated surface defect detection framework using machine vision and convolutional neural networks[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 34: 1995–2011.
- [35] 李丽丽, 陈琨, 高建民, 等. 采用优化概率神经网络的质量异常识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 2813–2821.
- [36] 封晓斌, 汤易兵, 吴增源, 等. 基于 SRFML-Lift 的流程制造产品质量状态监测[J]. 中国管理科学, 2021, 29(12): 227–236.
- [37] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110–132.
- [38] Aivaliotis P, Georgoulas K, Chryssoulouris G. The use of digital twin for predictive maintenance in manufacturing [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2019, 32(11): 1067–1080.
- [39] Wang J, Ye L, Gao R X, et al. Digital twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3920–3934.
- [40] de Assis D J, Nestor F A, Alejandro G F. Smart working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 163: 107804.
- [41] Mordia R, Verma A K. Visual techniques for defects detection in steel products: A comparative study[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134: 106047.
- [42] Zhou X N, Wang Y N, Zhu Q, et al. Circle detection with model fitting in polar coordinates for glass bottle mouth localization[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(1/2): 1041–1051.
- [43] 朱永国, 张文博, 邓正平, 等. 基于激光跟踪仪和机器视觉的飞机翼身对接装配偏差动态综合修正[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 187–196.
- [44] 曹伟, 江平宇, 江开勇, 等. 基于 RFID 技术的离散制造车间实时数据采集与可视化监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(2): 273–284.
- [45] 陈亮, 吴梦婷. 智能车间质量数据集成及可视化分析平台设计[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1641–1649.
- [46] 程晓明, 刘银华, 赵文政. 面向大型三维结构检测的多机器人覆盖路径规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 246–253.
- [47] Watson G H. The ascent of quality 4.0[J]. Quality Prog-

- ress, 2019, 52(3): 24–30.
- [48] Shin W S, Dahlgaard J J, Dahlgaard-Park S M, et al. A quality scorecard for the era of Industry 4.0[J]. *Total Quality Management & Business Excellence*, 2018, 29(9/10): 959–976.
- [49] 工业和信息化部. 制造业质量管理数字化实施指南(试行)[S/OL]. [2022-12-23]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2022/rt_a4a9b2d8222a4024a5b4f-3dc1ec2f0a4.html.
- [50] 任明仑, 宋月丽. 大数据: 数据驱动的过程质量控制与改进新视角[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(11): 2731–2742.
- [51] 孙滔, 周铨, 段晓东, 等. 数字孪生网络(DTN): 概念、架构及关键技术[J]. *自动化学报*, 2021, 47(3): 569–582.
- [52] 武颖, 姚丽亚, 熊辉, 等. 基于数字孪生技术的复杂产品装配过程质量管控方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1568–1575.
- [53] Ismail M, Mostafa N A, Elassal A. Quality monitoring in multistage manufacturing systems by using machine learning techniques[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022, 33(8): 2471–2486.
- [54] 房鑫洋, 张洁, 吕佑龙, 等. 基于 Attention-BLSTM 的复杂产品制造质量预测方法[J/OL]. *计算机集成制造系统*, 2023. [2023-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211126.1817.008.html>.
- [55] 侯红玲, 陈鑫, 常向龙, 等. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的内螺纹冷挤压质量预测[J]. *塑性工程学报*, 2022, 29(1): 102–109.
- [56] 于勇, 薛静远, 戴晟, 等. 机加零件质量预测与工艺参数优化方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(3): 441–447, 499.
- [57] 张振刚, 林丹. 数据赋能离散式制造的特定工件的质量符合率预测[J]. *工业工程与管理*, 2021, 26(4): 28–35.
- [58] Kumar R R, Ganesh L S, Rajendran C. Quality 4.0—a review of and framework for quality management in the digital era[J]. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2022, 39: 1385–1411.

Quality 4.0: Concepts, basic architecture, and key technologies

LIU Huchen¹, WANG Heming¹, SHI Hua^{2*}, YOU Jianxin¹

1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. School of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China

Abstract Quality 4.0 is an emerging quality management concept, which has been increasingly appreciated due to intensification of competition, continually changing customer requirements, and technological evolution. It deals with aligning the practices of quality management with the emergent capabilities of Industry 4.0 to improve cost, time and efficiency as well as increase product quality. As the future of quality, Quality 4.0 has become a potential choice for enterprises and has attracted increasing attention in recent years. In the literature, many studies have been conducted to investigate Quality 4.0 from different perspectives. They provide valuable insights and interesting research suggestions concerning Quality 4.0. However, the current researches on Quality 4.0 are insufficient in terms of basic concept, architecture design and key technologies. Therefore, this paper tries to improve the concept of Quality 4.0 by clarifying the definition, features and goals of Quality 4.0 based on a comprehensive review of current researches and practices. Then, a basic architecture of Quality 4.0 is presented by including physical layer, edge layer, analysis layer and decision layer. Besides, eight key technologies, i.e., industrial big data, digital twins, machine learning, machine vision, visualization technology, optimization techniques, connect technology, and collaborative technology, are identified to support the implementation of Quality 4.0. Finally, the problems of Quality 4.0 implementation in the Chinese manufacturing industry and the possible solutions to address them are discussed.

Keywords Quality 4.0; Industry 4.0; quality management; intelligent manufacturing ●



(责任编辑 祝叶华)