

工业4.0语义下智能焊接技术发展综述*

张广军,李永哲

(哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室,哈尔滨 150001)

[摘要] “工业 4.0”的提出为制造业的发展注入新的活力,并引发全球制造业智能化、信息化、网络化升级。在基于信息物理系统(CPSs)智能制造的发展热潮下,智能焊接技术是当前热点问题。介绍了信息物理系统、工业产业链等相关概念,解释了基于制造业产业链的“工业 4.0”的内涵。以历次工业革命为背景,阐明了焊接技术的发展脉络。通过对信息物理系统架构的分析,提出了智能焊接技术在各个层次中的关键技术,并对该领域的发展趋势进行了展望,对智能焊接更好的发展具有指导意义。

关键词:工业 4.0;智能制造;智能焊接;信息物理系统;传感器网络

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.11.028



张广军

哈尔滨工业大学教授,博士生导师。中国机械工程学会高级会员,中国再制造学会委员,中国焊接学会机器人分委会委员。研究方向为机器人与智能化焊接,弧焊新工艺,基于弧焊的增材制造工艺与设备。发表学术论文 70 余篇,承担各类科研项目 20 余项,获得国家科技进步二等奖 1 项。

*基金项目:国家自然科学基金项目(51575133)。

到 2015 年底,全球约有 66 亿件设备连入互联网,2020 年,这一数字将上升至 300 亿^[1]。以互联网为载体的信息技术在过去的 10 余年里逐渐影响甚至改变传统工业生产格局以及商业模式。尤其是在航空航天等零件加工产业中,柔性化、个性化、快速小批量生产逐渐成为飞机、火箭等航空航天产品零部件生产加工的新要求。信息技术的进步掀起了工业技术革新浪潮,引发全球工业产业链快速升级^[2]。

在这一背景下,德国政府在 2013 年 4 月汉诺威工业博览会上正式推出“工业 4.0”国家级战略^[3],旨在复杂多变的制造业格局中,提高德国工业竞争力。“工业 4.0”也被德国政府在《高技术战略 2020》中确立为 10 大未来项目之一^[4]。与此同时,美国先后出台“先进制造伙伴计划”和“先进制造业国家战略计划”等,旨在通过“工业互联网”战略,使

制造业向智能化转型^[5]。作为世界上“最大的工厂”,中国在制造领域发挥着巨大的作用。在中国制造业转型升级的当下,国务院于 2015 年 5 月提出了《中国制造 2025》国家战略规划^[6],以加快智能制造的技术创新为目的,着眼于夺取未来产业竞争的制高点和话语权。

无论是“工业 4.0”、“工业互联网”还是“中国制造 2025”,都描绘了未来工业的发展趋势,即凭借着高新信息通信技术的基本手段,将信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPSs)融合到制造业产业链的每个环节中,使制造业向更高的智能化方向转型,其技术基础为互联网、云计算、移动端应用、物联网和大数据等。

焊接技术是制造业中不可或缺的组成部分之一,是衡量工业化水平的重要指标。在现代化工业生产线上,手持焊枪作业已经一去不复返,取而代之的是以工业机器人为载体

的自动化焊接作业系统。然而,在焊接加工过程中,由于电弧的存在以及施焊环境和对象的差异,智能化焊接技术的发展总是滞后于人工智能、智能控制、大数据等相关技术的发展脚步^[7-9]。“工业 4.0”体系需求的焊接智能化程度与实际智能焊接技术发展速度之间的矛盾愈演愈烈。因此,为了顺应智能制造的工业改革浪潮,智能化、网络化焊接技术的发展已经呈现出蓄势待发的状态。本文将解释基于工业产业链的“工业 4.0”概念的核心,指出在这一背景下智能焊接的关键技术,并对该领域的发展趋势进行展望。

“工业 4.0”改变制造业模式

工业革命是现代文明的起点,是人类生产方式的根本性变革。德国技术科学院(ACDTECH)等机构提出的前 3 次工业技术革命分别为:18 世纪末蒸汽机的广泛使用,20 世纪初电力的发现及广泛使用,以及 20 世纪中期 PLC(可编程逻辑控制器)和 PC 机的应用^[4]。在这 3 次革命性的转变过程中,工业系统的复杂程度和智能化水平逐渐提高,而工业产品的生产周期以及人在工业系统中的参与程度逐渐降低。“工业 4.0”的核心是信息与物理系统的高度融合,以期高智能化、更加复杂的工业系统、更短的产品生产周期和更少量人的参与度。4 次工业革命的不同特征示意图如图 1 所示。

1 “工业 4.0”的内涵

“工业 4.0”最显著的特征就是使工业产业链重构^[10]。工业产业链主要包括:技术研发、原料采购、物流供应、加工生产、市场销售以及用户调查 6 个部分,如图 2 所示。在当前制造业产业环境下,各业务部门相对独立完成工作,然而由于各部门沟通手段有限,极易形成信息孤岛,因此,工业制造的柔性很低,无法适应复杂多变的市场的的需求^[11]。例如,

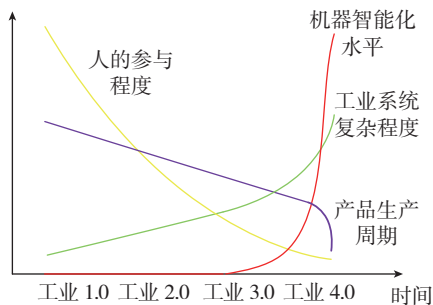


图1 4次工业革命的不同特征

Fig.1 Different characteristics of the four industrial revolutions



图2 基于信息物理系统的“工业4.0”产业链

Fig.2 Production chain of industry 4.0 based on CPSs

加工生产部门在生产过程中出现了产品合格率降低的问题,技术研发部门由于不在加工现场,可能并不知道实际影响产品合格率的真正问题所在,而在加工现场的工人可能并不知道技术细节。因此,产品合格率问题可能会经过很长时间的双方反复论证,与此同时,物流以及市场销售部门可能会继续按照原本的计划执行订单,从而导致整个产业链运转不畅。

在“工业 4.0”架构下,工作人员、仓储系统、物流系统、机器设备、制造设施、市场调查数据以及用户反馈信息被置于同一平台,共同形成信息物理系统(CPSs)。CPSs是指一套融合了信息流的物理或工程系统,该系统的操作执行过程被具有计算以及通讯能力的部件所监测、协调、控制及整合^[12],信息物理

系统框架见图 3。CPSs 核心是分布式、深度嵌入物理系统、具有高度自主能力的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)^[13]。在嵌入式传感器网络的应用下,产业链中各个单位的物理设备以及操作人员实现网络互联和信息分享,从而形成物联网(Internet of Things, IoT)或更高层次的万物互联(Internet of Everything, IoE)。“工业 4.0”的内涵不仅在于对信息的获取以及收集,更重要的是对现有的信息进行提取、融合、整合和推理,并且在此基础上对相应的问题进行决策和分析,并且最终通过通讯和控制手段执行决策策略的过程。这样,产业链各个环节的制造柔性得到极大的提高。因此,“工业 4.0”是通过“传感-决策-执行”的途径,对工业产业链全生命周期过程进行的智能化和信息化升级。

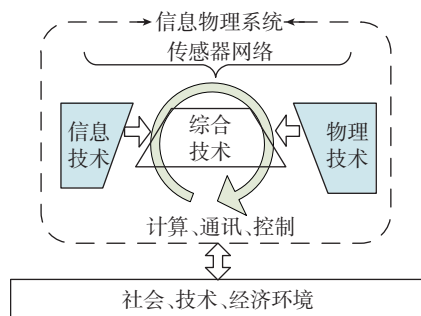


图3 信息物理系统框架

Fig.3 Framework of CPSs

“工业 4.0”框架下的工业产业链中最重要一环是加工生产过程中的智能化——智能制造。智能制造技术是在现代传感技术、网络技术、自动化技术以及人工智能的基础上,实现产品设计过程、制造过程和企业管理及服务的智能化,是信息技术与制造技术的深度融合与集成^[14]。智能制造的内涵是绿色化和人性化,单件小批量生产要能够达到大批量生产同样的效率和成本,构建能生产高精度、高质量、个性化智能产品的智能工厂^[15]。

2 信息物理系统的基本架构

文献[16]更进一步提出了在“工业4.0”体系中CPSs的5C架构,由低到高分别为:智能连接层(smart connection layer)、数据解释层(data-to-information conversion layer)、信息层(cyber layer)、认知层(cognition layer)和自主调节层(configuration layer)。各层级及其所要求实现的功能如表1所示。智能连接层和数据解释层重点强调了CPSs中对传感器的要求,即多源信息(物理世界中的数据和信息世界中的反馈信息)的实时获取与通讯。信息层和认知层主要针对决策提出了相应的要求,即多维信息的分析、管理、存储和综合以及基于所获取信息的推理和决策。自主调节层满足了执行过程的需求,通过信息世界中的决策信息的执行,从而对物理世界做出相应的改变。

3 焊接产业的革新

在历次工业改革的改革进程中,焊接技术始终在制造业领域扮演着不可或缺的角色。在工业进入电气化时代之前,焊接技术主要停留在简单的铸焊、钎焊及锻焊等层面上,使用的热源都是炉火,温度低、热源不集中,无法用于大截面、长焊缝焊件的焊接;所加工的材料有限,成形零

件性能低下^[17],只能用以制造装饰品和简单的工具(图4(a))。在第二次工业革命改革进程中,电气化技术的进步为焊接技术的蓬勃发展打下坚实的基础。在这一时期,电弧焊、电阻焊的工业化应用标志着现代焊接技术的起源。药皮焊条的发明确立了手工电弧焊正式进入实用化阶段(图4(b))。美国诺布尔里发明的自动电弧焊机,标志着焊接进入机械化、自动化时代^[18]。此后各种焊接技术如雨后春笋般被发明并应用到实际生产过程中。焊接技术的第二次重大飞跃出现在第三次工业革命。随着电子技术的发展,工业机器人被应用到实际生产过程中,使得工业焊接过程从以单工位手工加工模式转变为大型流水线机械化加工模式(图4(c)),工业焊接过程实现了完全的自动化和初步的智能化。与此同时,新能源、新材料、微电子技术取得重大突破,推动了新型焊接方法的发明和应用。随着发达国家第三次工业革命进程的逐步完善,焊接技术的发展速度也逐渐趋于平缓。

在“工业4.0”的改革浪潮中,很多相关制造业都争先恐后抢占领域制高点。“工业4.0”也对焊接产业的发展提出了更高的要求。信息技术和网络技术的发展再一次为焊接

技术的发展注入新活力,使得焊接技术更进一步智能化和网络化。现阶段,相对于材料冷加工诸多方法,焊接加工过程更加复杂,影响参数更多,但对其机理的认识过程十分有限。与此同时,用户对不同焊件的要求不尽相同,焊接加工零件的实际服役环境又有很大差别。这就急需整个焊接产业在“工业4.0”体系下实现信息共享,从而在产业链的每一环节都能够考虑待焊零件整个生命周期的全方位信息。例如,对每个焊接结构件进行产品质量评估并且跟踪零件服役状态,可以促进加工工艺的改善,提高焊接结构件性能并且提升

表1 工业4.0语义下CPSs的5C架构

CPSs的5C架构	主要目的	主要功能
自主调节层	决策的执行	(1) 自主复原; (2) 自主适应变化; (3) 抗干扰自优化
认知层	知识的认知与推理	(1) 集成模拟和综合; (2) 远程可视化; (3) 协作诊断与决策
信息层	管理信息的中央集线器	(1) 部件和机器的虚拟建模; (2) 变量的识别和存储; (3) 数据分类
数据解释层	从获取的数据中推断出有用信息	(1) 部件和机器的健康分析; (2) 多维数据关联; (3) 数据融合与预测
智能连接层	从机构和传感器中获取准确可靠的信息	(1) 即插即用; (2) 非接触式通讯; (3) 传感器网络



(a) 古代用铸焊加工的青铜兵马俑



(b) 工业2.0中手工电弧焊的应用



(c) 工业3.0中现代化焊接流水线

图4 工业革命进程中焊接技术的发展
Fig.4 Development of welding technologies during the industrial revolutions

后续服务质量。

“工业 4.0” 架构下的智能焊接技术

智能焊接属于智能制造的范畴,指在焊接加工过程中对相关机器与构件进行智能化、信息化升级^[19-20]。智能焊接仍旧以“传感-决策-执行”为着眼点,对焊接过程参数进行监测与控制。一方面,智能焊接强调在加工过程中引入信息流,通过安装多种传感器的方式,更全面、具体地获取加工过程信息,从而认识加工过程;另一方面,智能焊接强调信息与人之间的转换与融合,从而实现智能焊接加工系统与系统操作者无缝的人机交互。“工业 4.0”中智能焊接技术的实现着力于 CPSs 的基本 5C

架构的各个层次,如图 5 所示。

(1) 智能连接层中智能焊接相关技术。

在 CPSs 框架下构建智能焊接系统,对焊接加工过程中信息的准确、有效获取是关键^[21]。在焊接加工现场,需要对焊接参数(电流、电压等)、焊接质量(温度场、应力等)、焊道尺寸(焊道宽度、高度等)等信息进行检测。因此,需要在焊接系统中合理部署虚拟传感器(焊接电压、电流、网络通信流量等)和物理传感器(结构光传感器、熔池检测 CCD 传感器、焊道温度传感器等),并且通过有线或无线的方式组成传感器网络,从而实现对加工过程参数的在线检测。单工位的传感器网络还可以与其他工位传感器网络进行数据实时传输和

分享。传感器、传感器网络之间的实时通讯,使得多传感器、传感器网络之间的控制、协作变为可能,为实现基于态势数据的获取打下良好基础。例如,针对大型薄壁结构件多机器人协调焊接曲线焊缝作业时,需要在各机械臂上部署的传感器之间协调通讯,可以更准确地获取待加工零件信息。

(2) 数据解释层中智能焊接相关技术。

在数据解释层中,对实时获取的数据进行信息层次上的转换,从而提高对它的认识。多传感器的数据分析和多源数据融合可有效避免信息冗余和信息不足,与此同时提高检测信息的可靠性等。基于直接检测的信息,系统也可以推理出派生的信息,如统计数据分布、预测数据变化的趋势等。另外,智能焊接系统也根据获取的信息,对加工子系统的健康情况进行实时分析监控,从而实现焊接过程信息的自主感知。例如:焊接机构在加工过程中可对焊材(焊丝、保护气)的剩余情况进行监控,从而判断是否可以连续完成一个焊接任务。

(3) 信息层中智能焊接相关技术。

信息层需要对物理过程进行进一步的认识以及对获取的信息进行管理。通过构建焊接过程模型和焊接相关数据存储模型,智能焊接系统可以对自身操作的性能进行评估,对当前所处状态进行感知。例如:一方面可以对获取信息的可靠性、准确性进行评估,从而决定是否依赖于所获取的信息进行决策。另一方面,根据相关模型,可以通过分析系统在时域下的不同状态来预测未来的状态。例如:对焊道尺寸在线检测,可以通过预测控制算法,提升焊道尺寸控制器性能。另外,通过网络共享、云计算等信息技术,可以获取不同时空状态下的加工参数和过程信息等。例



图5 CPSs 5C架构下的智能焊接系统

Fig.5 Intelligent welding system based on the 5C architecture of CPSs

如,通过本地系统访问云空间中的焊接加工工艺参数数据库,不仅能提升系统的智能,也可以实现对自动焊接过程的遥监控、遥操作等。

(4) 认知层中智能焊接相关技术。

对焊接过程相关知识进行推理和表达以及基于知识的自主决策是焊接走向智能化的有效途径。现阶段,受限于机器的智能水平,焊接过程中的很大一部分问题仍然需要专家操作者做出决策。对此,可通过建立焊接专家系统的方式,在机器中固化一部分专家知识,使得机器可以自主完成比较简单的决策过程。另外,这一过程的实现,需要机器对所获取的知识进行提炼,并且通过可以理解的语言与操作者实现交互,通过人机协同作用共同完成针对复杂任务的决策。例如:增强焊接机器人的在线学习能力,可以模拟操作者在实际加工过程中经验积累的过程。

(5) 自主调节层中智能焊接相关技术。

针对认知层中推理出的决策信息,自主调节层需要控制执行机构来实现相应的行动。这就要求机器能够通过一定的控制器自主改变所检测的参数信息。针对焊接过程多干扰、不稳定的因素,控制器的设计应该满足自调节、自适应以及抗干扰等特性。例如,通过监督控制、回弹控制等方式将决策信息演绎出来,实现虚拟世界与物理世界的深度融合。

智能焊接发展趋势

智能焊接技术是“工业 4.0”体系中的重点发展方向之一。“工业 4.0”体系强调工业制造业、产品和服务的全方位交叉渗透。智能焊接系统需要对焊接机器和构件进行智能化集成,从而实现全流程的协同制造。目前,焊接系统的智能化水平仍然有限,制造业用的工业焊接机器人仍停留在示教再现阶段。对智能焊

接的初步研究也局限于针对焊接过程中某一参数的控制。在未来一段时间内,智能焊接的发展趋势主要体现在以下几个方面:

(1) 多种传感手段的使用。在焊接加工现场部署多传感器,对焊接过程的上下文信息进行在线检测,包括加工过程相关参数、加工环境信息、操作者状态以及机器健康状态。尤其是通过机器对全方位信息检测和预测,是机器进行自我感知和情景感知的前提条件。

(2) 加工数据的管理与共享。针对不同来源、多种类数据的管理与分析,可以有效地提高关键信息的可靠性和准确性。另外,通过数据共享,与“大数据”、“云计算”等信息技术相结合,可快速制定焊接加工方案,并实现焊接加工的遥操作、监督控制。

(3) 机器智能的实现。机器智能的实现主要依托于计算机技术、信息技术等的发展。一方面,将焊接知识和人的经验进行规则化,转化为机器可以理解的语言,使得机器具有理解焊接加工问题的能力。另一方面,以此为基础,制定合适的推理规则和算法,使得机器具有对简单问题决策的能力。

(4) 良好的人机交互。智能焊接系统应该通过合理的手段与操作者进行“对话”。使得人和机器各自发挥所长。促进人与机器之间的合作,从而提高焊接系统解决复杂问题的能力。更进一步说,智能机器与人的交互过程应该是建立在机器对操作者当前状态感知的前提下的。机器需要针对操作者不同的工作状态、疲劳程度以及业务熟练程度采取不同的交互策略和自主等级。

(5) 柔性化、个性化焊接服务的制定与实现。通过灵活的焊接系统集成方案,为用户提供个性化的焊接加工服务是“工业 4.0”体系所强调的一个发展趋势。通过基于焊接的

增材制造技术的发展,可以有效缩短产品生产周期,并且降低加工制造成本。另外,柔性化加工促进“云工厂”概念的实现,可以通过共享焊接加工流水线的方式,利用空闲加工设备,实现绿色、高效、人性化的焊接加工服务。

(6) 统一焊接设备的通讯接口。智能焊接系统中,要求机器与机器、人与机器之间的紧密通信。这就需要确定相应的通信标准,与整个“工业 4.0”体系的通信标准相一致,从而促进分布式多智能焊接加工平台的发展。另外,统一的通信标准可以促进传感器、控制器、数字化焊机数据终端的即插即用,可以有效缩短焊接系统的搭建时间。

(7) 信息安全需要全面升级。在焊接加工过程的信息化升级过程中,网络、信息和数据的安全性需要得到高度的重视。发展信息安全防护技术,可以防止用户的相关信息和企业加工关键技术的泄露,并且防止通过网络漏洞进行的恶意攻击,从而保障加工过程的顺利进行。

结束语

“工业 4.0”对智能焊接技术的发展来说既是机遇也是挑战。本文对基于工业产业链下“工业 4.0”体系进行了介绍,并且根据 CPSs 的基本 5C 架构分析了各层次中智能焊接的关键技术。最后,对智能焊接技术的发展趋势进行了展望。“工业 4.0”体系下的智能焊接的发展不仅仅局限于对焊接过程的智能决策和控制,而且还需要考虑整个焊接产业,从而满足绿色、柔性化、个性化的焊接加工方案,在计算机、信息技术的发展潮流中保持产业活力。

参考文献

- [1] 沃尔克马尔·邓纳尔. 工业 4.0 将融入中国制造 2025[J]. 经理人, 2015(7):24-26.
DENNER Volkmar. Integration of the

- “industry 4.0” to the “made in China 2025” [J]. *Manager*, 2015(7):24–26.
- [2] WANG S, WAN J, ZHANG D, et al. Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination[J]. *Computer Networks*, DOI: 10.1016/j.comnet.2015.12.017, 2016.
- [3] 胡杰. 从德国“工业 4.0”看中国未来制造业的发展 [J]. *民营科技*, 2014(12):268.
- HU Jie. The development of Chinese manufacturing industry in the future: from the view of industry 4.0[J]. *Min Ying Ke Ji*, 2014(12):268.
- [4] The industrie 4.0 working group. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0[R]. *The Industrie 4.0 Working Group*, 2013.
- [5] 董鹏. “工业 4.0”之思考 [J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2014(6):30–33.
- DONG Peng. Thinking of “industrial 4.0” [J]. *Jixie Zhizao Wenzhai (Hanjie Fence)*, 2014(6):30–33.
- [6] 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知 [EB/OL]. [2015–05–08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- “Made in China 2025” plan issued [EB/OL]. [2015–05–08]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [7] CHEN S B, LV N. Research evolution on intelligent robotic welding technologies[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014,16(1):109–122.
- [8] WEI S C, MA H B, LIN T, et al. Autonomous guidance of initial welding position with single camera and double positions method[J]. *Sensor Review*, 2010,30(1):62–68.
- [9] CHEN X Z, CHEN S B. The autonomous detection and guiding of start welding position for arc welding robot[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2010,37(1):70–78.
- [10] CHRISTOPOULOS D, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015,14(9):1–17.
- [11] LEE J. Industry 4.0 in big data environment[J]. *German Harting Magazine Technology Newsletter*, 2013,26:8–10.
- [12] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems: The next computing revolution[C]//*Proceedings of the 47th ACM/IEEE Design Automation Conference*, Anaheim, 2010.
- [13] LI X, LI D, WAN J, et al. A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0[J]. *Wireless Networks*, 2015:1–19.
- [14] 张曙. 工业 4.0 和智能制造 [J]. *机械设计与制造工程*, 2014,43(8):1–5.
- ZHANG Shu. The industry 4.0 and intelligent manufacturing[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2014,43(8):1–5.
- [15] 张曙. 中国制造企业如何迈向工业 4.0[J]. *机械设计与制造工程*, 2014,43(12):1–5.
- ZHANG Shu. The discussion about Chinese manufacturing enterprises to industry 4.0[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2014,43(12):1–5.
- [16] LEE J, BAGHERI B, KAO H. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing Letters*, 2015,3:18–23.
- [17] CARY H, HELZER S. *Modern welding technology*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [18] DAVAID S. Trends in welding research[C]//*Proceedings of the 6th International Conference*, Phoenix, USA, 2002:15–19.
- [19] ALFARO S, DREWS P. Intelligent systems for welding process automation[J]. *Mechanical Science & Engineering*, 2006,28(1):25–29.
- [20] GAN Z X, ZHANG H, WANG J J. Behavior-based intelligent robotic technologies in industrial applications[M]//*Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Springer Berlin Heidelberg, 2007:1–12.
- [21] DAEINABI K, TESHNEHLAB M. Seam tracking of intelligent arc welding robot[C]//*Proceedings of the 6th WSEAS Int. Conf. on Systems Theory & Scientific Computation*. Elounda, Greece, 2006:161–166.

Towards Intelligent Welding in the Context of Industry 4.0

ZHANG Guangjun, LI Yongzhe

(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] The proliferation of the industry 4.0 promotes the development of manufacturing technologies. In this context, advanced information technologies have paved ways for increasing the intelligence and networking capabilities of current industrial systems. Thus, there is a trend to focus on the research of intelligent manufacturing technologies, in which intelligent welding technologies is an important aspect. This paper explains several crucial concepts related to the industry 4.0 including the cyber-physical systems (CPSs) and the production chain in industry. Conceptual fundamentals of the industry 4.0 are further illustrated. After reviewing the role of welding technologies in each industrial revolution, we propose the core of intelligent welding technologies based on a 5C architecture of CPSs. The research directions and challenges of intelligent welding technologies in the context of the industry 4.0 in the future are pointed out as well. This paper summarizes the characteristics of the industry 4.0 and the key technologies of intelligent welding, which provides guidance for further research in this domain.

Keywords: Industry 4.0; Intelligent manufacturing; Intelligent welding; Cyber-physical systems (CPSs); Wireless sensor networks (WSNs)

(责编 李丹)