

湖北省学术著作出版专项资金资助项目
数字制造科学与技术前沿研究丛书



埋弧焊质量检测的 电信号时频分析与处理

Time-frequency Analysis and Processing of Electrical Signal
for Submerged Arc Welding Quality Detection

李学军 何宽芳 著



武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

埋弧焊质量检测的电信号 时频分析与处理

李学军 何宽芳 著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

焊接过程质量检测是保证焊接产品质量的重要措施,是防止产生缺陷、避免返修的重要环节。对在线采集的非平稳电弧信号进行时频分析与处理,实现焊接过程的焊接质量特征信息的有效提取,不仅能丰富焊接电弧信号分析技术,同时也为实现高效率、高质量焊接的质量检测提供了新的途径,是当前焊接制造质量工程发展的方向和研究热点。本书面向高效埋弧焊质量检测的工程应用,详细地介绍了埋弧焊电信号采集与分析系统集成、埋弧焊电弧电信号短时傅里叶分析、埋弧焊电弧电信号 Wigner-Ville 分析、埋弧焊电弧电信号小波分析、埋弧焊电弧电信号 EMD 分析、埋弧焊电弧电信号 LMD 分析及埋弧焊数字化检测的信息处理。

本书对于焊接制造行业中从事焊接产品生产过程质量检测、使用、管理与维护的工程技术人员,是一本有较大指导作用或参考价值的书籍,也是高校教师和相关的研究人员从事焊接过程质量监控研究的重要参考著作,同时本书也可作为相关研究生教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

埋弧焊质量检测的电信号时频分析与处理/李学军,何宽芳著. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.12

(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5383-8

I. ①埋… II. ①李… ②何… III. ①埋弧焊-电信号特性测量-研究 IV. ①TG445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 266048 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:张明华

责任校对:雷红娟

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:11

字 数:191 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~1000 册

定 价:46.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书 编审委员会

顾问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁汉

副主任委员：黎明 严新平 孔祥东 陈新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田高

委员(按姓氏笔画排列)：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马辉	王德石
毛宽民	冯定	华林	关治洪	刘泉
刘强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等先进制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,最近大力倡导“再工业化、再制造化”战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入到制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)与制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及整个产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成,提供了他们宝贵的经验和知识,付出了他们辛勤的劳动成果,在此谨表示最衷心的感谢!

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》的出版得到了湖北省学术著作出版专项资金项目的资助。对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等我国制造领域资深专家及编委会讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇3个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

埋弧焊接技术作为焊接结构高效化生产的主要途径,在造船、石油化工、电力、冶金、汽车等领域应用广泛。由于在实际焊接过程中存在无法预知的随机干扰因素,影响焊接制造质量,因此,在可能产生诸多干扰因素的条件下,需要在焊接过程中采用实时的焊接质量信息检测与控制来得到比较满意的焊接质量。在埋弧焊接过程中,焊接电压、电流和焊接速度决定了焊缝的瞬时输入能量,直接影响焊缝成形质量。一方面焊接电流、电压可作为控制弧焊过程的可控变量,另一方面它们也是各种电弧物理现象丰富信息的载体,其中也必包含有与焊接过程稳定性、焊接质量相关的特征信息。因此,对焊接过程电弧能量信号进行采集和分析,通过特征提取来对焊接过程的稳定性和焊接质量进行定量评估,这为利用现代信号分析技术动态分析焊接过程的焊接质量提供了新的途径。因此,研究埋弧焊质量检测的电信号分析与处理方法,实现焊接过程的焊接质量特征信息的有效提取,不仅能丰富焊接电弧信号分析技术,同时也为实现高效率、高质量焊接的质量检测提供了新的途径,是当前焊接制造质量工程发展的方向和研究热点。

近年来,作者对埋弧焊质量检测的过程在线监测、电弧信号分析与处理、信息特征提取、工艺参数智能优化和电弧稳定性评估进行了系统的研究,并结合当前计算机、现代传感和时频信号分析与处理等技术在埋弧焊领域的应用现状,以形成埋弧焊质量数字化检测的电信号时频分析理论与方法为目标,撰写了本书。本书分别详细地介绍了埋弧焊电信号采集与分析系统集成、埋弧焊电弧电信号短时傅里叶分析、埋弧焊电弧电信号 Wigner-Ville 分析、埋弧焊电弧电信号小波分析、埋弧焊电弧电信号 EMD 分析、埋弧焊电弧电信号 LMD 分析及埋弧焊数字化检测的信息处理,并针对每部分内容给出了应用实例。这些理论方法和技术手段为提升高效埋弧焊装备自动化水平及运行高效率、高质量焊接制造提供了技术保障。

本书所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金(51475159、51005073)和湖南省自然科学基金项目的资助及湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室

和湖南科技大学机电工程学院的大力支持,湖南科技大学沈意平、肖冬明和湖南省芙蓉学者特聘教授李鸿光参加了本书的编写工作,硕士研究生成勇、谭智、周志鹏、王超、杨庆和王勇承担了大量的书籍整理工作,特此一并致谢。

写作本书的目的主要是为从事高效埋弧焊制造动态检测与控制技术相关的科学研究、工程技术工作人员以及高等院校、科研院所的有关教学和学习提供一本参考书,本书尤其适合于研究生教学参考用书。本书针对性和实用性强,同时,为便于广大现场工作人员参考与使用,在结合基础理论与工程实际时,论述通俗易懂、深入浅出。由于作者学识水平有限,书中难免存在错误与疏漏,恳望读者指教。

著 者

2016年3月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 埋弧焊质量检测的电信号分析与处理任务与目的	(1)
1.2 埋弧焊质量检测的电信号分析与处理现状与发展	(3)
1.2.1 焊接过程动态测试	(3)
1.2.2 埋弧焊电弧信号分析方法	(4)
1.2.3 焊接电弧信息处理技术	(5)
1.3 埋弧焊质量检测的电信号时频分析与处理的内容安排	(7)
参考文献	(8)
2 埋弧焊电信号采集与分析系统集成	(12)
2.1 埋弧焊电信号采集中的传感元件	(12)
2.1.1 焊接质量检测常用传感器	(12)
2.1.2 传感器的选择	(13)
2.2 埋弧焊电信号采集中常用的电路	(15)
2.2.1 焊接电流检测电路	(15)
2.2.2 焊接电压检测电路	(16)
2.2.3 光电隔离电路	(17)
2.2.4 数据采集电路	(20)
2.3 焊接电弧电信号采集与分析编程	(23)
2.3.1 采集程序	(24)
2.3.2 上位机人机界面设计	(26)
2.4 埋弧焊电弧电信号采集与分析系统介绍	(29)
2.4.1 基于以太网卡技术的埋弧焊电弧信号检测系统	(29)
2.4.2 焊接电弧动态小波分析仪	(32)
参考文献	(33)
3 埋弧焊电弧电信号短时傅里叶分析	(36)
3.1 傅里叶变换在焊接电弧电信号分析的局限性	(37)
3.2 短时傅里叶变换定义与算法	(39)

3.2.1	基本定义	(39)
3.2.2	Gabor 变换	(39)
3.3	短时傅里叶变换的时频分辨率	(40)
3.4	窗函数和窗长选择	(42)
3.5	埋弧焊电弧电信号的 STFT 分析	(42)
3.5.1	STFT 分布的实现	(42)
3.5.2	窗函数选择分析	(43)
3.5.3	试验结果分析	(48)
	参考文献	(52)
4	埋弧焊电弧电信号 Wigner-Ville 分析	(54)
4.1	WVD 的定义与算法	(54)
4.2	基本性质	(55)
4.3	交叉干扰项及其抑制	(56)
4.4	埋弧焊电弧电信号的 WVD 分析	(58)
4.4.1	Wigner 分布的实现	(58)
4.4.2	抑制交叉项及噪声的能力分析	(59)
4.4.3	试验结果分析	(62)
	参考文献	(67)
5	埋弧焊电弧电信号小波分析	(68)
5.1	理论及算法	(68)
5.2	常用小波	(71)
5.3	信号小波的分解与重构 ^[13-19]	(73)
5.4	埋弧焊电弧信号小波分析	(75)
5.4.1	电弧信号的小波消噪	(75)
5.4.2	埋弧焊过程动态监测	(76)
5.4.3	电弧稳定性小波能谱熵评估	(78)
	参考文献	(88)
6	埋弧焊电弧电信号 EMD 分析	(91)
6.1	理论及算法	(91)
6.2	HHT 变换及时频熵	(94)
6.3	基于 EMD 电弧信号的消噪	(96)
6.4	电弧能量特征提取及稳定性评估	(98)

6.4.1	埋弧焊电流信号 HHT 变换	(98)
6.4.2	埋弧焊电流信号时频熵计算	(102)
	参考文献	(106)
7	埋弧焊电弧电信号 LMD 分析	(108)
7.1	理论及算法	(108)
7.2	局部均值分解算法适应性分析	(111)
7.3	LMD 时频分布及能谱熵	(114)
7.3.1	LMD 时频谱变换	(114)
7.3.2	LMD 时频能谱熵	(115)
7.4	埋弧焊电弧电信号 LMD 分析	(117)
7.4.1	基于 LMD 电弧能量特征分析	(117)
7.4.2	焊接过程电弧稳定性评估	(120)
7.4.3	焊接工艺参数搭配合理性评估	(125)
	参考文献	(130)
8	埋弧焊数字化检测的信息处理	(131)
8.1	神经网络模型	(131)
8.1.1	BP 神经网络	(131)
8.1.2	工艺参数与电弧能量特征神经网络建模	(135)
8.1.3	非线性映射模型的测试与验证	(138)
8.2	支持向量机分类原理	(142)
8.3	基于 LMD 能量熵与 SVM 的焊接缺陷智能检测	(145)
8.3.1	原理与方法	(145)
8.3.2	应用	(147)
8.4	双丝埋弧焊工艺参数智能优化	(149)
8.4.1	双丝埋弧焊工艺参数优化模型	(149)
8.4.2	双丝埋弧焊工艺参数智能优化求解	(151)
8.4.3	应用	(157)
	参考文献	(160)

1

绪 论

数字化焊接生产过程作为数字信息处理技术与焊接制造相结合的产物,是现代制造技术数字化的一个重要组成部分。它以计算机、现代传感、信号分析与处理等技术集成,应用于焊接领域,实现焊接装备数字化、焊接过程质量监控数字化、焊接生产过程管理数字化等,通过数字化技术能有效提升焊接制造技术的自动化、智能化水平,进而显著提升焊接产品品质、稳定性、可靠性及生产效率,降低生产成本,提升整体效能,是现代焊接技术实现高速和高效化焊接制造的重要途径和方向。

1.1 埋弧焊质量检测的电信号分析与处理任务与目的

焊接质量检测是为了保证焊接结构的完整性、可靠性、安全性和使用性,是焊接结构质量管理的重要方法。传统焊接质量检测与控制主要依靠焊后超声、磁测法、X射线法等无损检测方法,或基于切割、拉伸、剪切和冲击试验的破坏性抽检方法^[1,2],经历一定的检验流程,凭经验调整工艺参数,作为工艺设置的参考。虽然这种焊后检验在埋弧焊工艺质量保证体系中必不可少,但不具实时性,无法在线、准确地获取反映焊接质量的关键信息。焊接过程数字化监测为实现焊接质量在线检测提供了有效手段,一方面,通过监测可以发现制造过程中发生的质量问题,找出原因,及时消除生产过程中的缺陷,防止类似的缺陷重复出现,减少返修次数,节约工时、材料,从而降低成本;另一方面,根据监测获取的信息与知识,获得能实际使用的最佳的焊接工艺、技术措施及规范参数,在提高生产效率的同时使焊接产品质量得到保证。

埋弧焊接技术作为焊接结构高效化生产的主要途径,在造船、石油化工、电

力、冶金、汽车等领域应用广泛^[3-7]。由于在实际焊接过程中存在无法预知的随机干扰因素,影响焊接制造质量,因此,在诸多干扰因素可能产生的条件下,需要在焊接过程中采用实时的焊接质量信息检测与控制来得到比较满意的焊接质量。由于埋弧焊电弧在焊剂中燃烧,人们无法通过光学和红外传感的方法对焊接过程中的熔池的物理特征进行传感,基于试验观测的定性分析措施难以实现高速焊缺陷焊道产生过程的在线检测。在埋弧焊接过程中,焊接电压、电流和焊接速度决定了焊缝的瞬时输入能量,直接影响焊缝的成形质量,一方面焊接电流、电压可作为控制弧焊过程的可控变量,另一方面它们也是各种电弧物理现象丰富信息的载体,其中也必包含有与焊接过程稳定性、焊接质量相关的特征信息。因此,对焊接过程电弧能量信号进行采集和分析,通过特征提取来对焊接过程的稳定性和焊接质量进行定量评估,这为利用现代信号分析技术动态分析焊接过程稳定性和焊接质量提供了新的途径。

现代信号处理技术,例如时域、频域、小波变换等作为焊接电弧信号特征提取的有力工具,在焊接电弧特征检测中得到了应用,主要集中在对焊接电弧信号进行时域统计、绘制频谱和消噪处理。然而,针对焊接强噪声背景、非平稳电弧信号,这些方法在焊接质量检测过程中无法准确、可靠地提取反映焊接质量的信息,进而不能实现对焊接质量进行有效的监控。考虑到焊接过程是一个多因素相互作用的复杂动态过程,各种随机因素的影响,使焊接状态与各种焊接信号实时发生变化,实际监测得到的电弧电信号属于非平稳信号,不少学者将处理非平稳信号的有力工具——时频分析方法应用到焊接电弧电信号的分析与处理上,旨在挖掘焊接过程中反映电弧稳定特性和焊缝成形质量的电弧特征信息,以便实现焊接过程在线检测与控制。时频分析方法比较适合对焊接电弧信号蕴含的信息进行分析和挖掘,目前时频分析方法的研究主要集中在电弧信号消噪处理、奇异点检测和动态、实时反映焊接过程电弧稳定性及焊缝成形质量的电弧电能量时频特征信息的有效提取方面。

埋弧焊接过程质量检测是保证焊接产品质量的重要措施,是防止产生缺陷、避免返修的重要环节。利用对在线采集的电弧信号进行分析与处理,获取实时表征焊接质量的信息是保证焊接质量的重要方法。一方面,通过检测可以发现制造过程中发生的质量问题,找出原因,及时消除生产过程中的缺陷,防止类似的缺陷重复出现,减少返修次数,节约工时、材料,从而降低成本;另一方面,根据检测获取的信息与知识,获得能实际使用的最佳的焊接工艺、技术措施及规范参数,在提

高生产效率的同时使焊接产品质量得到保证。因此,研究埋弧焊质量检测的电信号分析与处理方法,实现焊接过程的焊接质量特征信息的有效提取,不仅能丰富焊接电弧信号分析技术,同时也为实现高效率、高质量焊接的质量检测提供了新的途径,是当前焊接制造质量工程发展的方向和研究热点^[8-10]。

1.2 埋弧焊质量检测的电信号分析与处理现状与发展

1.2.1 焊接过程动态测试

焊接工艺过程监测与控制复杂,而且针对不同工况,工艺控制及参数存在较大的差异,属于复杂的监控群体^[11],一般指针仪表加示波器的测试方式已满足不了其过程测量、分析的要求。利用计算机接口技术,采用高级语言(如 VB、VC、DELPHI 等)进行焊接过程监控系统的研制与开发,是实现多电弧埋弧焊过程监测的重要手段之一^[12]。华南理工大学薛家祥在计算机平台上采用 VC6.0 编程实现了埋弧焊电信号的频谱分析和小波分析^[13,14],从而为弧焊工艺参数规范的设计提供了依据。南昌航空工业学院的罗贤星等人在计算机平台上利用 Visual Basic 语言编程,对硬铝进行点焊电流和压力的实时监测,通过对参数的监测,可以直观地分析和再现不同的点焊影响因素,焊接电流和电极压力的变化特征与所对应的焊点质量之间的关系,为多参数联合监控奠定了基础^[15]。天津大学的高战蛟等人利用虚拟软件 Labview 对铝合金点焊电流和电极压力监控系统进行了研究,实现了信号的实时采集和监控^[16]。甘肃工业大学马跃洲等人研制了以 AduC812 单片机为核心,选用程序设计语言 Visual Basic 和 AC6115 系列数据采集卡开发了电阻焊数据采集及分析系统^[17]。2005 年,天津大学史涛等人设计了基于 Labview 平台的铝合金点焊过程电压、电流、声信号和电极位移等信号的实时采集系统,该系统能够正确采集铝合金在电阻点焊过程中的各个特征信号,实现了焊接参数的实时监测^[18]。文献^[19-21]介绍了以 Labview 和 Labwindows/CVI 为开发平台、以线性回归模型和非线性回归模型为核心算法的电弧焊品质在线定量评价系统。湖南科技大学研发了基于以太网通信技术的双丝焊接过程电弧能量信号数据采集与分析系统,实现了对双丝埋弧焊过程的动态监测与控制^[22,23]。

综上所述,近年来随着电弧焊在工业上的应用,国内外电焊专家对电弧焊的研究比较广泛,涉及焊接动态机械性能、焊接动态参数的测试系统及测试方法等方面的研究,他们所建立的测试系统及选用的测试手段有所不同,但目的都是通过测试系统和测试方法来获得焊接过程动态参数,实现焊接过程的在线监测,其研究结果为埋弧焊过程参数与质量实时监控技术提供了基础条件。

1.2.2 埋弧焊电弧信号分析方法

利用电弧信号获取焊接质量信息以实现焊接质量的监控,是保证焊接质量的重要方法,也是焊接质量监控研究的热点。焊接过程中电弧电压和电流直接影响电弧稳定性、热传输特性、熔池几何形状等,同时焊接过程将产生声、光、磁、热等信号。这些信号与焊接参数有着密切关系,是不同焊接状态下的产物,间接反映了焊接稳定性与焊接质量。国内外专家学者利用电弧信号在焊接质量的在线监测与控制方面做了大量的工作。20世纪80年代至90年代,Shea^[24]、Arata Yoshiaki^[25,26]、Saini^[27]、Johnson^[28]、Quinn^[29]等利用熔化极气体保护焊电弧的光谱信号、声信号、电弧电流和电压,分析焊接过程各种物理和化学变化,进行焊接熔滴过渡,监控导电嘴的磨损情况等。这一阶段的研究主要集中在分析电弧信号与焊接物理现象的关系或直接通过电弧信号对焊接过程进行监控,并没有通过电弧信号的采集进行深入分析提取焊接质量信息。电弧信号中焊接电压及电流物理意义较明确,采集方便,具有周期短、频率高、信号频率幅值变化剧烈等特点,且与电弧稳定性、熔滴过渡以及焊接质量直接相关,因此成为焊接过程质量监控最常用的源信号。20世纪90年代末,Cho Y^[30]、区智明^[31]、曾安^[32]、俞建荣^[33]等从实时采集电阻焊、熔化极气体保护焊接电流、电压信号中,研究了动态电阻、电流、电压的统计参数概率等对焊接过程燃弧电弧稳定性和焊接质量的影响,为焊接过程质量的监控、评判提供了依据。这阶段的研究均以焊接电压与电流作为信息源进行焊接质量检测,其中分析方法以信号时域特征的统计分析为主,即通过时域内的统计学特征进行焊接过程稳定性或焊接质量的检测。由于影响焊接质量的因素的不确定性、非线性相互耦合,实际监测得到的电弧信号属于非平稳信号。目前有见关于电弧信号小波分析的报道^[14,34-39],这方面的报道主要集中在电弧信号消噪处理和奇异点检测方面。也有学者将时频分析方法引入电弧信号分析与处理,对电弧电信号进行分析,提取电弧特征信息,实现对焊接过程稳定性、焊接质

量的评定,常用的时频分析方法有窗口傅里叶变换(Gabor 变换)、连续小波变换、Wigner-Ville 分布、HHT(希尔伯特-黄变换, Hilbert-Huang Transformation—HHT)和 LMD(局域均值分解, Local Mean Distribution—LMD)^[39-44]。

近年来,笔者在埋弧焊电弧电信号分析与处理方面做了大量的工作,从系统论和非线性角度,揭示了焊接电弧稳定性与混沌动力学特征量——最大 Lyapunov 指数之间的关系,证明了最大 Lyapunov 指数可以用来定量表征高速焊接系统的稳定性,同时也验证了焊接电流、电压信号作为非线性时间序列蕴含了丰富的焊接物理信息,利用现代信号分析技术能有效提取反映焊接质量的信息^[45];将小波变换和信息熵理论结合,提出了焊接电弧稳定性动态评估的小波能谱熵分析方法,实现了高速埋弧焊电弧稳定性和焊接质量的定量评估;应用 EMD(经验模态分解, Empirical Mode Decomposition—EMD)定量描述焊接电弧能量分布特征及其与焊接质量的关系,提出了基于 EMD 的焊接电弧能量特征提取方法,实现了对高速焊电弧稳定性和工艺搭配合理性的定量评估;将 LMD 应用到埋弧焊电弧能量特征分析与工艺参数合理性搭配的评价,提出了基于 LMD 焊接电弧能量信号特征的提取方法。这些研究成果不仅丰富了焊接电弧信号分析技术,也为定量评判焊接电弧稳定性、识别焊缝成形状况及评估焊接工艺参数搭配合理性方面提供了新途径和数值指标。

1.2.3 焊接电弧信息处理技术

通过获取实时反映焊接电弧稳定性和质量的电弧能量特征信息,应用各种信息处理技术,对焊接质量进行在线、准确的检测与识别,揭示影响焊接质量状态变化的关键因素,为焊接缺陷抑制提供先验信息,实现对焊接质量进行在线、准确的识别及工艺参数优化设计,其核心在于构建电弧能量特征信息与焊接工艺及质量的映射关系。然而,焊接过程的高度非线性、多变量、强耦合的特点,检测到的特征信息对焊接质量指标的表征呈非线性关系,加上其他影响因素交互作用和影响,所以难以从理论上建立精确的数学模型。

随着人工智能方法在焊接领域中的应用,研究者们采用人工智能技术在焊接质量检测方面进行了研究工作, Masnata^[46]采用神经网络技术结合超声检测方法,实现焊接气孔、夹渣和裂纹缺陷的检测;刚铁^[47]采用 BP 神经网络方法研究了气孔、裂纹和未焊透三种焊接缺陷的诊断与分类,获得了良好的识别效果; Huang^[48]

将神经网络和多元回归方法应用于激光焊接焊缝熔深的深度表征;高向东^[49]将神经网络技术与嵌入卡尔曼滤波器应用在高功率光纤激光焊接的焊缝跟踪监测上。这些研究表明神经网络在焊接质量检测中具有一定的成绩,神经网络模型建立在对大量的样本进行训练的基础上。有学者将支持向量机(Support Vector Machine—SVM)应用到焊接质量检测上,刘鹏飞^[50]建立了两类支持向量机检测模型,实现了对点焊飞溅和小尺寸熔核两种缺陷的综合检测;申俊琦^[51]建立了CO₂焊接焊缝尺寸SVM模型,分别运用线性核函数、多项式核函数、高斯径向基核函数以及指数径向基核函数对焊缝熔宽、焊缝熔深以及焊缝余高进行预测;Mu^[52]将主成分分析和SVM结合起来,应用于焊接缺陷检测,实现焊接缺陷的自动分类。SVM适合于处理状态分类,在焊接质量检测建模过程中,即使在小样本情况下,也可以得到较好的训练与识别结果。虽然先进信息处理技术在焊接质量检测方面得到了广泛的应用和发展,然而,当前应用信息处理技术实现对焊接质量有效检测及工艺参数自动、精确的优化选择主要存在以下两个方面的问题:问题一,目前建立的焊接工艺参数与焊缝成形质量指标非线性映射关系中,焊缝成形质量指标为焊缝成形熔宽和熔深,这些焊缝成形质量指标为几何参数,属于静态参数,不能实时、全面、动态地反映出焊接过程工艺条件对焊接质量的影响程度;问题二,建立的焊接工艺参数与反映焊接质量指标之间的关系模型表现为多变量、非线性、多约束、多极值,常规的优化方法如单纯形法、牛顿法、共轭梯度法、模式搜索法和填充函数法等,对于这类问题最优求解往往束手无策。

近年来,作者研究了不同工况下高速焊工艺参数、电弧能量特征参数与焊缝成形质量之间的影响关系,分析并总结了各高速焊工艺参数对电弧能量特征参数及焊缝成形状况(焊缝熔宽、熔深及余高)的影响,揭示了影响焊接电弧能量特征、焊缝缺陷形成的关键工艺因素。在此基础上,①针对焊接质量检测识别中存在的小样本、状态演化、随机、多信息输入和非线性等问题,将智能模式识别神经网络、SVM等技术应用于焊接质量缺陷检测与识别中,提出基于电弧能量敏感特征向量的焊接质量检测模型,利用焊接电弧能量特征信息提取方法,构建电弧能量特征向量,并以此作为支持向量机分类器的输入,动态评价焊接工艺规范是否合理和焊缝成形状况,实现了对焊接工艺参数搭配合理性、电弧的稳定性和焊缝成形质量的有效识别^[53]。②针对双丝高速焊工艺参数调整难度大,易出现咬边、驼峰等缺陷的难题,综合利用提取的焊接电弧能量时频特征参数、BP神经网络、粒子群智能优化算法,提出了基于电弧能量特征的双丝高速焊工艺混合智能优化模