

工业机器人寻位及电弧追踪 对自动化MAG焊质量的影响

李志芳, 刘辉

徐工集团工程机械股份有限公司科技分公司 江苏徐州 221000

摘要: 在实际生产应用中, 90%的自动化MAG焊缺陷是由寻位及电弧追踪异常导致。通过详述自动化MAG焊缺陷与寻位及电弧追踪的机理关系, 解析寻位及电弧追踪的关键影响因子, 旨在为自动化焊接质量控制提供理论及案例支撑。

关键词: 工业机器人MAG焊; 寻位; 电弧追踪; 焊接缺陷

The influence of industrial robot positioning and arc tracking on the quality of automated MAG welding

LI Zhifang, LIU Hui

XCMG Wheel loader Business Unit, Xuzhou 221000, Jiangsu, China

Abstract: In the practical production application, 90% of automatic MAG welding defects are caused by abnormal positioning and arc tracking. This article elaborates on the mechanism relationship between automatic MAG welding defects and positioning and arc tracking, analyzes the key influencing factors of positioning and arc tracking, and aims to provide theoretical and case support for automatic welding quality control.

Keywords: industrial robot MAG welding; positioning; arc tracking; welding defects

1 序言

随着我国经济与科技的快速发展, 工业机器人在各产业得到了广泛应用, 但机器的工具坐标系影响运动准确性^[1]。工业机器人在中厚板自动化MAG焊中扮演着至关重要的角色, 其核心功能包括寻位和电弧追踪。寻位技术主要用于自动测量工件组对偏差, 并将偏差值修正给焊缝的示教点, 但由于示教点仅为焊缝的几个关键特征点, 因此无法保证整个焊接路径的准确性。为了解决这一问题, 电弧追踪技术应运而生, 它通过捕捉摆动周期的电流变化来实时判断焊道位置, 并进行修正, 从而补偿了寻

位精度不足、焊接过程中变形及焊道拼点质量的一致性等问题。这两种技术的结合, 确保了焊接路径的准确性和焊接质量的稳定性。在整个过程中, 不需要人员参与, 实现了完全智能化制造, 体现了工业机器人工作高效率、高精度及高度一致性的优点^[2]。

在寻位技术中, 接触寻位和激光寻位是两种主要形式。接触寻位因其受工件结构形式影响小、可达性及查找精度高, 所以在中厚板MAG焊领域中占据了主导地位。而激光寻位虽然查找效率高(约为焊丝接触寻位效率的3倍), 精度也优于接触寻

第一作者: 李志芳, 主要研究方向为焊接工艺、工艺与技术管理, E-mail: 3550389@qq.com。

位,尤其适合平对接形式焊缝,但由于激光器尺寸较大,因此影响焊接可达性,且采购及使用成本较高,其普及程度受到限制。在电弧追踪与激光追踪的比较中,激光追踪在精度和效率上具有明显优势,尤其适合平对接长直焊缝的实时路径追踪^[3],但其焊接结构适用范围较电弧追踪明显偏窄,特别是在船型位、同向焊接及空间狭小区域的工况下。

目前,接触寻位与电弧追踪的组合因其中厚板MAG焊领域具有超高的性价比,所以仍是中厚板MAG焊的绝对主力组合,在工程机械行业的应用占比超过95%。尽管如此,与其相关的焊接缺陷占有所有自动化焊接缺陷的90%,这表明在实际应用中仍存在挑战。本文通过深入分析接触焊丝寻位及电弧

追踪原理,并通过实际案例解读焊接接触寻位及电弧追踪对自动化焊接质量的影响机理,旨在为进一步优化自动化焊接过程提供理论和实践指导,以期提高焊接质量和效率,减少焊接缺陷,推动工业机器人焊接技术的发展。

2 焊丝接触寻位及电弧追踪原理

2.1 焊丝接触寻位原理

焊丝接触寻位功能,是在焊接工件的位置发生偏离时,为补偿该偏离而自动修正机器人路径的一种功能。工件的位置和外形偏差,使机器人示教的焊接轨迹被修正。机器人接触寻位功能可以在焊接之前修正这类偏差,其原理如图1所示。

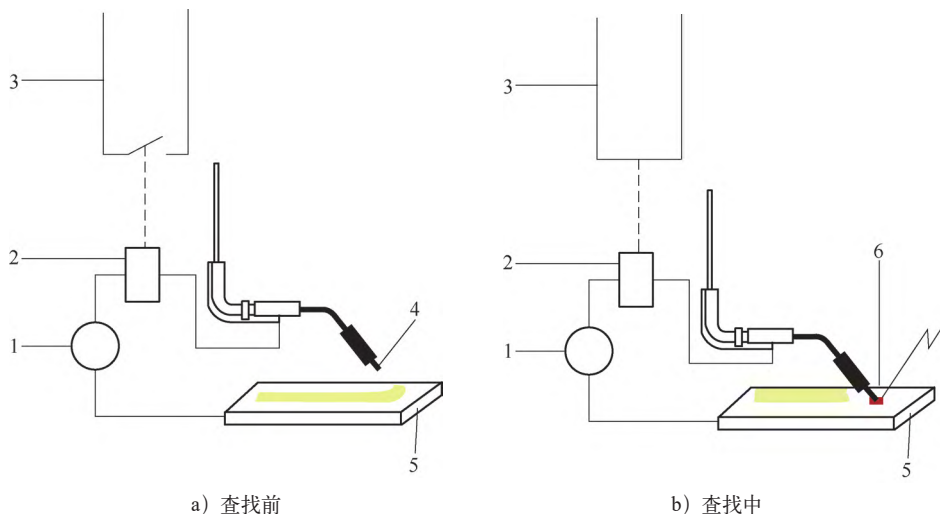


图1 焊丝接触寻位原理

1—电源 2—继电器 3—“快速测量”通道 4—焊丝 5—工件 6—24V电源信号

机器人在设定的范围内,用焊丝接触工件后形成电流回路,RDC内部继电器2吸合,“快速测量”通道3闭合并记录机器人当前位置信息。以一维方向偏差为例,假定初始条件下查找开始点距离工件5的垂直距离为 X 。第二次查找时,查找开始点距离工件5的垂直距离为 X_1 。当运行修正指令时,机器人会自动运算第二次查找与原始查找之间的距离偏差 $X_1 - X$,机器人的移动轨迹也相应得以修正。依次类推,进行其他维度的偏差查找及修正(见图2)。

2.2 电弧追踪原理

在焊接工件时,焊枪摆动、干伸长的不同,会导致实际的焊接电流与设定的不同,干伸长越短,

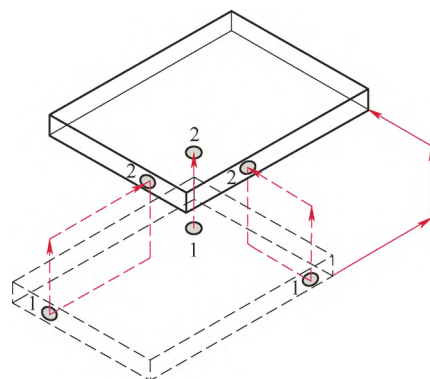


图2 焊丝接触寻位三维方向修正示意

实际焊接电流就越大;干伸长越长,实际焊接电流就越小。利用这个原理,相应的软件利用实时处理检测到的焊接电流变化,从而计算焊枪所在位置,

进而来修正机器人的实际轨迹，保证轨迹中心线始终在坡口中间，同时保证焊枪与焊缝高度方向上的一致。但电弧传感器只能在一定范围内适当修正焊缝路径。当焊接开始后，焊枪对焊缝中心的偏离距离可通过电弧传感器对此路径进行横向与纵向两个方向的修正。

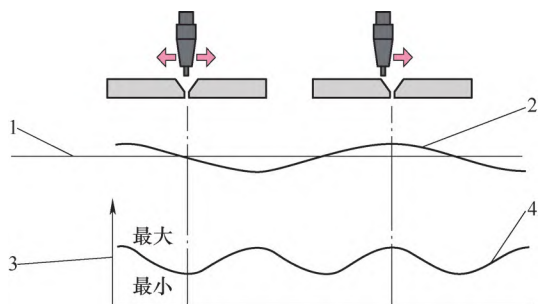


图3 电弧追踪原理示意

1—焊缝中心（编程路径与实际路径）
2—焊缝焊接路径摆动曲线 3—焊接电流 4—电流波动曲线

3 焊丝接触寻位对自动化焊接缺陷的影响

3.1 焊丝长度对自动化焊接缺陷的影响

在焊接机器人焊丝接触寻位前，需要依托清枪站进行清枪、剪丝。一方面，通过清枪站的清枪功能，清除喷嘴内焊渣，防止混合气体流量不足或气体紊流造成焊接气孔缺陷，同时避免焊渣焊接时掉入焊道造成焊接夹渣缺陷；另一方面，通过清枪站的“剪丝”功能和枪缆的“夹丝”功能保证寻位时焊丝的固定长度。当寻位焊丝长度与示教焊丝长度不一致时，机器人会将焊丝长度的变化“误计算”为工件的组对偏差，从而错误地对焊接路径进行修正，导致焊接缺陷。

图4所示为寻位焊丝长度对自动化焊接缺陷的影响。图4a为示教寻位焊丝干伸长不发生变化时，可实现机器人接触寻位，自动计算偏差值，将偏差值放在位置寄存器内，机器人的轨迹按照位置寄存器的数据进行相应修正；图4b为寻位焊丝长度变长的工况，相较于图4a，焊丝在寻位时会提前接触底板与立板；图4c为焊丝提前接触底板和立板的修正组合向量，并修正右侧的焊缝轨迹，从图4c可看出，修正后焊丝干伸长明显增加，焊接电流减少，根部熔深降低，混合气体保护效果变弱，严重时可能造成熔深不足及焊接气孔缺陷；图4d为组合向量修正左侧的焊缝轨迹，从图4d可看出，焊接轨迹线明显偏向立板并造成偏焊缺陷。

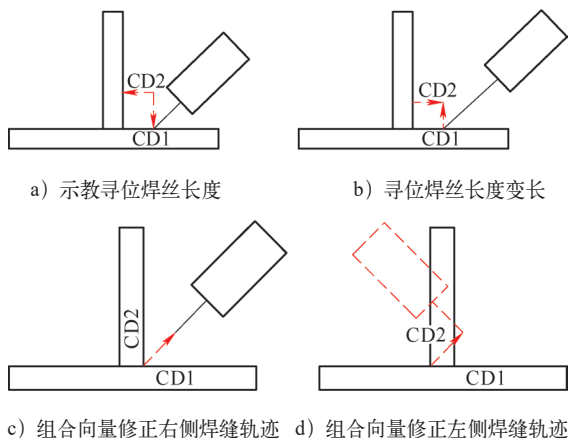


图4 寻位焊丝长度变化对焊接轨迹修正的影响

寻位焊丝干伸长变化的最主要原因为夹丝功能异常导致焊丝长度变化，常见的是气缸阻塞及V形槽磨损，如图5所示。由图5可知，夹丝气缸通过电磁阀控制活塞杆伸缩，当活塞杆伸出时，将焊丝压紧在V形槽内实现焊丝的夹紧。夹丝气缸润滑不良或有焊粉阻塞时，会导致活塞杆伸出不到位或夹丝无力。V形槽磨损严重时，活塞杆会出现焊丝夹紧无力情况，枪缆姿态变动时，会导致寻位焊丝长度变化。因此，除了加强夹丝气缸、V形槽等备件的保养外，还应尽可能地优化焊接程序，避免枪缆与机器人本体摩擦接触。

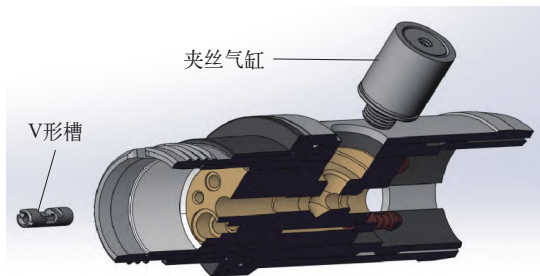


图5 夹丝气缸及V形槽对寻位焊丝长度的影响

3.2 工件表面质量对寻位精度的影响

工件表面质量对寻位精度的影响主要体现在工件的一致性及其表面的导电性上，如图6所示。由图6可知，铲斗主刀板内部的焊缝在查找X方向位置偏差时，只能通过主导板的切削刃进行查找。示教时确定切削刃距离焊缝X方向的距离为220mm（主刀板宽度），当主刀板宽度存在波动时，机器人仍会在距离切削刃220mm的地方开始焊接，从而导致主刀板焊缝偏焊。对于类似窄坡口平对接焊缝的偏差查找，激光寻位具有更高的精度及效率优势，焊丝“扎针寻位”也具有更高的查找精度，但焊丝扎

针寻位效率较低，对坡口尺寸一致性要求也较高。因此，控制来料的一致性避免因焊丝接触寻位“误修正”而造成偏焊缺陷的关键。

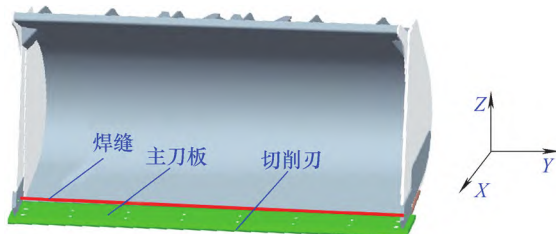


图6 工件表面质量对寻位精度的影响示意

此外，工件表面的导电性对寻位精度的影响也很大，当焊丝查找过程中碰到氧化皮时，因导电性较差，所以焊丝接触工件瞬间没有停止运动，而是继续沿查找方向运动，从而导致焊丝变弯划擦工件表面导电而停止（或达到最大查找距离），机器人多移动的距离均会以工件组对偏差的形式赋值给焊缝，从而造成偏焊。除了控制工件表面质量（无铁锈、油污等）外，选用高压寻位则具有更好的查找精度及查找效率。高压寻位一般 $>50V$ ，可以更容易击穿氧化皮薄膜，同时高压寻位具有更高的电流传导速度，可以保证焊丝接触工件瞬间停止运动，从而具有更高的查找精度及查找速度，查找速度比低压寻位（ $12\sim24V$ ）可提升一倍。

3.3 定位焊拼点质量对寻位精度的影响

定位焊大小及定位焊位置对焊丝接触寻位影响精度较大，当寻位的位置存在焊点时，焊丝寻位会因提前接触焊点而导电，从而导致焊道向焊点侧偏移形成偏焊缺陷。对于冷裂纹敏感倾向较小的钢材，建议定位焊高度 $4\sim6mm$ ，定位焊长度 $30\sim40mm$ ，间距 $300\sim400mm$ 。焊缝的起弧位置、收弧位置、直线圆弧切点位置区域禁止进行定位焊。

3.4 寻位顺序对寻位精度的影响

寻位顺序对寻位精度的影响主要体现在寻位顺序及寻位赋值上。在查找搭边量较小的焊缝结构形式时，应优先查找面积较大的基础面，然后将基准面的位置赋值给面积较小的另一个基准面。如图7所示，应先查找 $-Z$ 方向的底板高度偏差，然后将底板高度信息赋值给立板，再沿 $-Y$ 方向查找立板的位置。如果先查找 $-Y$ 方向的偏差，因为底板的高低方向不一致，则很容易导致 $-Y$ 方向无法查找找到工件（底板下移），或焊丝提前与底板接触（底板上移）。

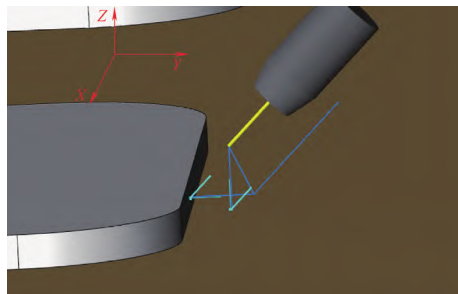


图7 寻位顺序对寻位精度的影响示意

4 电弧追踪对自动化焊接缺陷的影响

4.1 焊接参数选择对电弧追踪的影响

焊接参数选择对电弧追踪的影响关键在于电流大小、电弧稳定性、摆动条件和焊接速度。通常条件下电弧追踪所需要的焊接电流应大于射流过渡的临界值，对于 $\phi 1.2mm$ 焊丝富氩气体保护焊，推荐焊接电流 $>240A$ 。图8所示为焊接电流、电弧电压匹配与电弧过渡形式关系曲线^[4]，在调试电弧追踪灵敏度之前，需要先匹配好焊接参数范围，保证电弧稳定且焊缝无焊接缺陷。

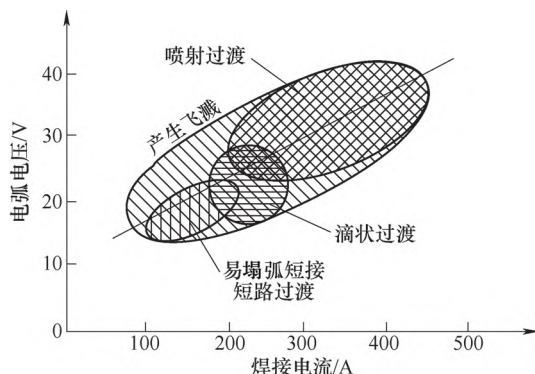


图8 电流电压匹配与电弧过渡形式关系曲线

由于电弧追踪的原理是通过焊接摆动捕捉电流（焊接电流通过霍尔效应仪转换成电压信号发送至机器人进行分析）周期波动规律来判断焊缝的位置是否出现偏焊^[5]，因此摆动是电弧追踪使用的必备条件之一，摆幅推荐 $>1.5mm$ 。对于无坡口或窄坡口平对接结构形式焊缝，由于焊接过程中焊接干伸长变化不大，焊接电流波动较小，机器人无法获取周期性电流波动规律，因此不建议使用电弧追踪功能。图9所示为在电弧稳定的前提下，建议焊接摆长、频率及焊接速度对电弧追踪的影响。由图9可看出，为获得较稳定电弧追踪状态，焊接摆长为 $1.5\sim3.5mm$ 、焊接频率 $<3Hz$ 、焊接速度 $<0.6m/min$ 。目

前，通过提高单位时间内焊丝熔覆量来提升焊接效率已经逐渐形成行业发展趋势，建议行业从业者在技改规划前考虑电弧追踪最大速度限制（0.6m/min），必要时引入激光追踪功能，以保证高速焊接潜力的有效释放。

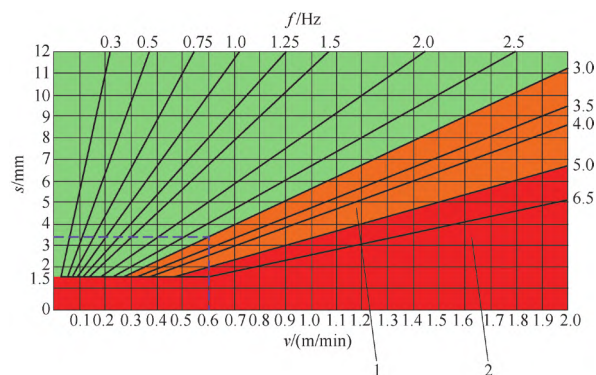


图9 焊接摆幅、频率及焊接速度对电弧追踪影响

注： s 为摆长， f 为频率， v 为焊接速度，虚线区域为电弧追踪推荐选择范围。

4.2 工艺搭边量对电弧追踪的影响

工艺搭边量应 $>(\text{焊脚尺寸}+3)\text{mm}$ ，主要原因为搭边量小的板散热条件较差，对于金属材料而言，温度越高的一侧，板材的电阻越大。由于焊接电源的恒压特性，焊接时电弧电压波动较小，当焊枪摆动到搭边量小的一侧时，采集的电流比搭边量大的一侧偏小，机器人会误判为焊道远离搭边量小的一侧，电弧追踪功能会自动调整焊枪向搭边量小的一侧偏移，进一步加剧搭边量小的一侧板材的散热，最终导致偏焊缺陷甚至焊穿。工件表面导电性对电弧追踪的影响规律也类似，导电性差的一侧焊接电流偏小，电弧追踪会引导机器人向导电性差的一侧偏移。当出现焊道习惯性地向一侧偏移时，可以重点考虑板材的搭边量及导电性差异。

4.3 拼点质量对电弧追踪的影响

拼点质量对电弧追踪的影响也较大，尤其在定位焊焊点偏向一侧母材时。当焊道焊接至焊点位置时，机器人会将焊点所在位置误认为母材，因此会在焊点处出现偏焊现象（见图10）。除了控制拼点质量外，适当降低电弧追踪灵敏度，也会缓解因定位焊质量而导致的焊偏现象。

电弧追踪灵敏度的选择可以依据编程经验，当出现跟踪不到位时，可适当增加电弧追踪灵敏度。当焊道不直、存在明显“绕焊点”情况时，就需要适当地降低电弧追踪灵敏度。具体参数需要根据焊



a) 焊点偏向立板



b) 焊缝向底板方向偏移

图10 定位焊质量对电弧追踪的影响

缝结构形式和拼点工况灵活掌握。

5 结束语

寻位及电弧追踪稳定性对自动化MAG焊质量控制至关重要，除选择合理的焊接参数外，还需要重点关注拼点质量（焊点位置、焊点大小、拼点间隙）、来料质量（表面清洁度、尺寸一致性）、设备保养情况（夹丝气缸可靠性及V形槽磨损情况）及焊缝结构设计形式（避免搭边量过小及导电性差异较大的异常材料焊接使用电弧追踪功能）。工艺技术人员通过寻位及电弧追踪原理，可以有效指导焊缝结构设计及焊接过程控制。

参考文献：

- [1] 赵远情，高东，谭宁，等. 浅谈工业机器人零点标定[J]. 现代制造技术与装备，2023，59（5）：171-173.
- [2] 李成伟，朱秀丽，负超. 码垛机器人机构设计与控制系统研究[J]. 机电工程，2021，25（12）：81-84，99.
- [3] 陈洪芳，孙衍强，王亚韦，等. 高精度激光追踪测量方法及实验研究[J]. 中国激光，2018，45（1）：166-173.
- [4] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.
- [5] 吴金锋. 基于摆动电弧传感器的焊缝跟踪技术研究[D]. 北京：北京化工大学，2012.

MW 20240519