

序言

随着我国十三五规划的完结，以及十四五规划的开展，未来我国在装备制造业中的“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念将更加深入展开，实现中国制造迈向中国创造升级的强国梦。

我们要充分利用当前蓬勃发展的互联网、物联网资源和工业数字化控制技术，开展围绕产品功能扩展和用户特殊需求的远程售后服务、全寿命周期服务。发展远程故障诊断、维护检修、检测检验、专家咨询、设计服务、产品定制、柔性制造、个性化制造等专业服务和跨界服务，已经成为我国焊接产业技术进步和企业升级转型的主要课题。

在此大环境下，我国焊接产业集中涌现出一大批以焊接机器人、复合焊接技术、搅拌摩擦焊技术、增材制造技术、激光焊接技术等为代表的高效焊接技术，为我国航空、航天、石油、化工、造船、机车制造等国家重大装备项目的胜利完成做出了巨大贡献。这与“中国焊接产业论坛”十五年来，对上述研究领域的技术导向和科技普及息息相关。

此次由中国焊接协会主办的“2020'中国焊接产业论坛——机器人焊接技术及应用”适时召开，顺应了社会快节奏发展的需求。希望通过各位专家、学者的研讨能够拓展思路，引导行业合理应用和推广高效焊接技术。

借此机会，我谨代表中国焊接协会向参加和支持本次论坛的国内外专家、学者、焊接同仁表示崇高的敬意和衷心的感谢！最后，预祝本次论坛取得圆满成功！

中国焊接协会会长 

工程机械智能化生产线的关键技术及应用

唐君才[1]，邱光[2]，魏占静[2]，李少农[2]，耿正[3]

1.珠海瑞凌焊接自动化有限公司　广东珠海　519075

2.深圳市瑞凌实业股份有限公司　广东深圳　518000

3.哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室　黑龙江哈尔滨　150001

摘要：介绍了一种适用于榫头式标准节主弦杆的重型角钢拼方焊接及其附件焊接的数字化焊接产线。为了实现自动化焊接，在数字化焊接生产线中采用了焊接机器人、搬运机器人、智能化高精度RGV、数字化高效双丝焊机等先进设备和相关技术，实现了榫头式标准节主弦杆的高效高质量焊接。PLC+SCADA（数据采集与监控）实现了生产线的全数字化分布式控制系统，SCADA系统实现对生产线的所有重要设备的运行状态进行实时监控，以图像、数据或曲线等直观的方式显示并记录。相关所述技术均已通过了工业化试验，其中大部分技术已经成功用于中联重科集团的榫头式标准节主弦杆的智能化焊接车间。文中的相关核心技术具有通用性，适用于其他工程机械的数字化与智能化焊接生产线。

关键词：高效电弧焊接；角钢自动拼方；自动物流

1　序言

工程机械是进行现代基础建设的最主要工具，也是造就大国工程不可或缺的利器。而在工程机械的制造过程中，焊接是一个最重要的技术手段，焊接的质量和效率也决定了工程机械的质量和产能，因此在工程机械制造过程中实现自动化焊接已经成为一种行业的共识。工程机械不仅是一种复杂的钢结构，而且具有零部件的多样性和前期准备的精度较低等一些列不利于自动化焊接的先决条件。因此，要在工程机械制造领域实现焊接自动化，通常会面临更多的挑战。例如，各种工程机械中的杆、臂或梁等，这类产品的特点：焊接工作量大，结构复杂，对变形有严格要求。

榫头式标准节的主弦杆就是一个这样的产品。主弦杆的主体部分由长度约6000mm、边长约200mm、壁厚约20mm重型角钢拼方后焊接而成，此外在上述拼焊而成的空心方钢结构上还焊接有踏步、节点板等重要附件。榫头式标准节主弦杆是承重部件，对焊缝强度要求高，同时由于榫头式标准节是需要4根主弦杆装配而成，因此要严格控制焊接变形。榫头式标准节的主弦杆传统生产方式是全部人工组装之后采用埋弧焊和焊条电弧焊完成焊接。这种生产方式的主要问题是生产效率低，且焊接变形大，整个生产线需要较大的面积和较多人员。生产过程中的不可控因素多，产品质量难以保证。因此，在工程机械制造领域实现自动化和数字化的焊接生产线成为产业提升的关键技术。

2　高效电弧焊接技术

无论是数字化焊接还是智能化焊接，焊接方法都是首要的问题，因为无论是焊接效率还是焊接质量都是由所采用的焊接方法和具体的工艺技术所决定的。焊接工作量大是工程机械焊接中的一个共同特点，因此在保证焊接质量的前提下，如何提高焊接效率就成为首要的问题。选择高效焊接方法还必须考虑到如何适合于机器人焊接系统。综合以上问题，双丝熔化极气体保护焊就成为最佳选择。

目前，在生产中使用较广泛的是Tandem双丝气体保护焊[1, 2]，焊接设备如图1所示。Tandem双丝焊设备采用了两台协同控制的数字化脉冲焊接电源和一种特制的双丝焊枪，这种双丝焊枪的气体保护喷嘴中集合了两个相互绝缘的导电嘴。Tandem双丝焊的焊丝熔敷率可以达到单丝焊的两倍以上，

同时在相同焊丝熔敷率条件下，焊接热输入能降低15%~20%，因此有利于降低工件的焊接变形，减少焊后的人工矫形工作量。在中联重科集团榫头式主弦杆生产线中，使用16套Tandem双丝焊，组成8套双机器人焊接工作站，满足了生产的高节拍需要。



图1　Tandem双丝焊系统

图2是另一种新型Tri-Arc双丝焊系统[3-5]，Tri-Arc双丝焊可以视为Tandem双丝焊的升级版本，图3是两种双丝焊的电源电路原理对比[6, 7]，如果将图3中Tri-Arc双丝焊的VPPS关闭，就简化成为Tandem双丝焊，因此Tri-Arc双丝焊向下兼容Tandem双丝焊。Tri-Arc双丝焊具有与Tandem双丝焊相同，甚至更高的焊丝熔敷率，同时在相同焊丝熔敷率的条件下，可以进一步降低焊接热输入20%以上。对于这一点可以从后面SCADA系统获得的电流对比波形中加以理解：中间电弧的存在降低了流入焊接工件的电流[8]，因此Tri-Arc双丝焊是一种比Tandem双丝焊综合性能更优越的高效电弧焊接方法，其高焊丝熔敷率，低焊接热输入的特点不仅可以进一步降低焊接变形，而且具有优良焊缝间隙适应能力，在0~3mm内可以保证熔透且不烧穿。这点对于工程机械行业具有非常重要的意义，因为大多数产品不仅无法保证足够小的对接间隙，而且也不方便使用背面焊接衬垫。

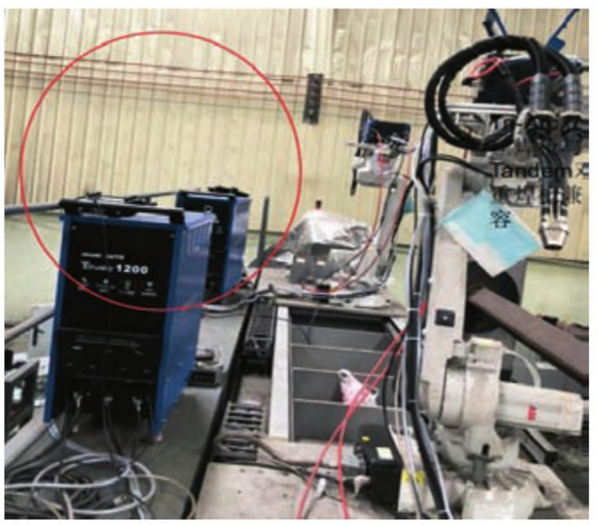
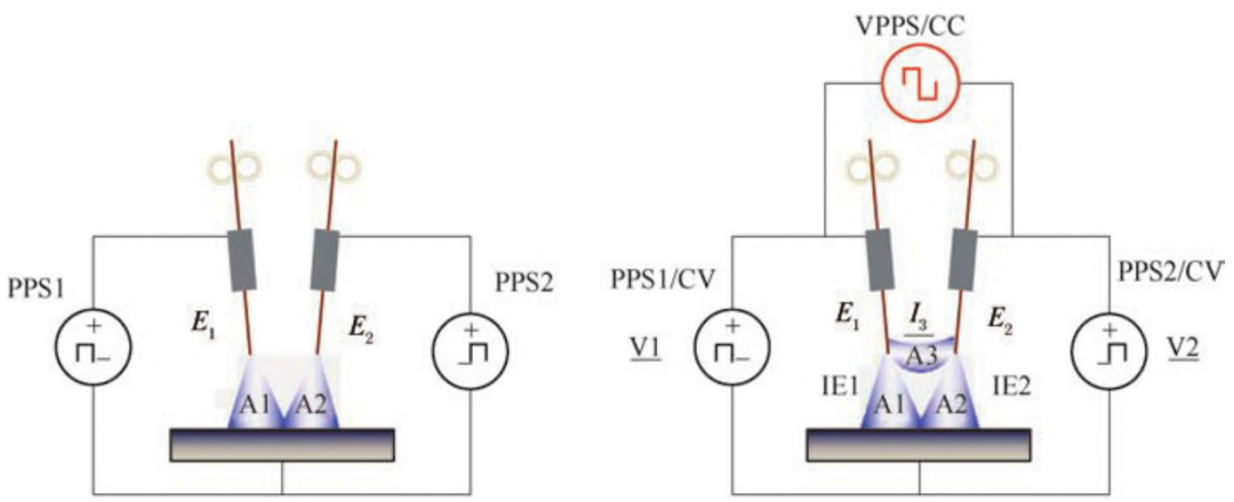


图2　Tri-Arc双丝焊系统



a）Tandem双丝焊　　b）Tri-Arc双丝焊

图3　Tandem双丝焊与Tri-Arc双丝焊电路原理对比

3　数字化焊接生产线的关键装备

自动化焊接生产线中的焊接效率除了采用高效焊接工艺之外，焊接工件的自动装配和自动物流都是非常重要的环节。

3.1 角钢自动拼方

使用两根角钢拼成一个方形的空心梁是一种常用的钢结构方式，榫头式标准节主弦杆的主体部分就是由两根长度约6000mm、边长约200mm，壁厚约20mm重型角钢拼方后焊接而成。自动拼方机构3D设计如图4所示。

图5为自动拼方机构才有的液压压紧方式，该机构可以适应角钢边长尺寸在±2mm、角钢开口尺寸在±2mm内的变化。在上述尺寸发生波动时，可以保证拼方的外廓尺寸精度。该机构可以

适应角钢规格在一定范围内的变化，包括角钢边长和角钢长度。角钢拼方过程全部自动化，无需人工干预。

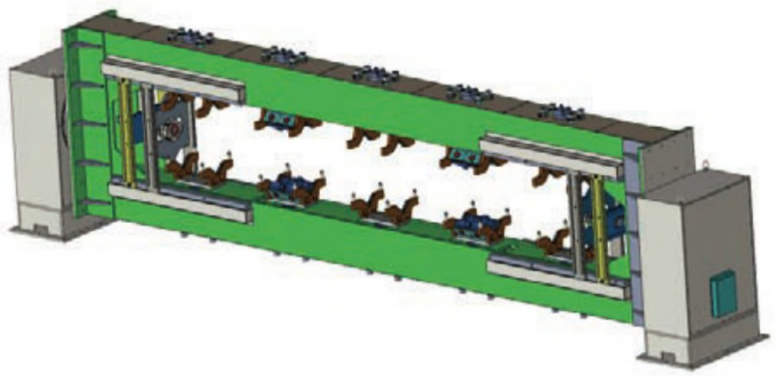


图4　角钢自动拼方机构3D设计图



图5　用于中联重科的角钢自动拼方机构实物

3.2 高精度RGV

为了实现生产线物流的自动化，RGV/AGV是必须的装备。尽管RGV/AGV是非常平常的装备，但是对于本自动化生产线来说，目前市场上难以找到满足要求的产品。这是因为普通的RGV/AGV都是针对一般的物料搬运设计的，运动精度都是在±5mm的水平。而在本项目中，RGV实际上承担了远距离装配机械手的作用，要求行走和提升的定位精度都在±1mm。为此，我们研发了自动焊接生产线装配用高精度RGV，RGV的外形与一般的RGV基本一致，关键在轨道行走使用数控切割等级的轨道和齿轮齿条传动，提升部分采用了液压-电动复合精密驱动，如图6、图7所示。

3.3 机器人自动装配与焊接协同系统

图8是中联重科集团榫头式标准节主弦杆自动焊接产线上的装配机器人与焊接机器人协同工作状态之一（右边是装配机器人，左边是焊接机器人）。图9是拼方后的附件装配机器人、焊接机器人的焊接工作状态。

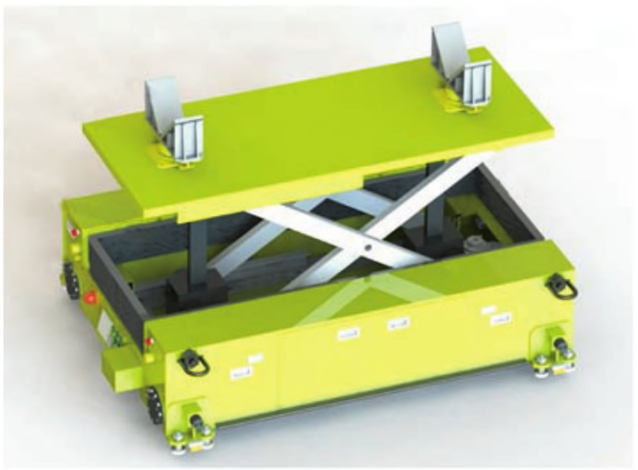


图6　带提升机构的RGV3D设计图



图7　用于中联重科的高精度RGV实物



图8　装配机器人与焊接机器人的现场实物

图10是包括RGV在内的自动装配与焊接工作站的3D设计图，从中可以看出各部分的相互关系。



图9　装配机器人与焊接机器人的焊接工作状态

4 焊接自动化产线的SCADA系统

SCADA（数据采集与监控）在自动化生产线中是必不可少的信息化技术，为此我们开发了专门针对焊接自动化生产线的专用SCADA系统，其主要特点表现在对生产线全状态的图形化显示，特别是针对焊接过程中的重要参数做高速、高精度的波形及记录，并附有针对电弧焊接波形的数据分析功能。SCADA系统对全线使用30余台焊接机器人和搬运机器人，以及配套的数字化周边设备进行全面监控，实时显示关键部位的工作状态，如图11所示。图11也可作为一种自动化车间超级看板，所显示的内容可以根据需要采用多画面方式，显示更多，更细节的内容。

在监控设备运行的同时，对于故障设备提供故障代码的说明，处理方式以及维护保养的历史记录，为设备的稳定可靠运行提供技术支持，如图12所示。

除了上述一般通用性功能外，该SCADA系统更关注的是对最重要双丝焊过程的焊接参数进行高速数据采集，可以实现焊接电流波形显示，如图13所示。

使用上述SCADA系统可以获得实际焊接过程中Tandem双丝焊与Tri-Arc双丝焊电流波形，通过两者的比较，可以进一步说明Tri-Arc双丝焊在降低焊接热输入方面的技术优势。如图14所示，在相同的送丝速度，即焊丝熔敷率的条件下，Tri-Arc双丝焊流入焊接工件的电流较Tandem双丝焊更低，这是因为建立在两根焊丝之间的第三电弧分流了焊接电流，这部分电流只熔化焊丝，不加热工件。在图14的波形图中有三条波形，其中上面两条电流波形分别是流经两根焊丝的电流波形，最下面的那条电流波形为流入焊接工件的电流。

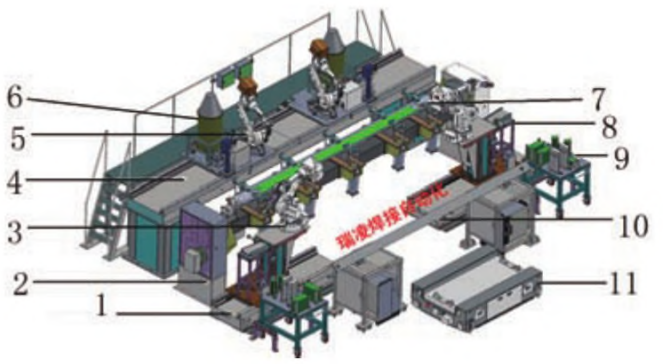


图10 包括RGV在内的自动装配与焊接工作站的3D设计图

1.伺服滑台2 2.伺服变位机 3.组对机器人 4.伺服滑台1
5.弧焊机器人 6.桶装焊丝 7.焊接夹具 8.二次定位夹具
9.一次定位夹具 10.工件缓存工位 11.RGV物流小车

5 结束语

1）双丝熔化极气体保护焊是一种最适合机器人自动化焊接的高效电弧焊接方法，尤其是在高熔敷

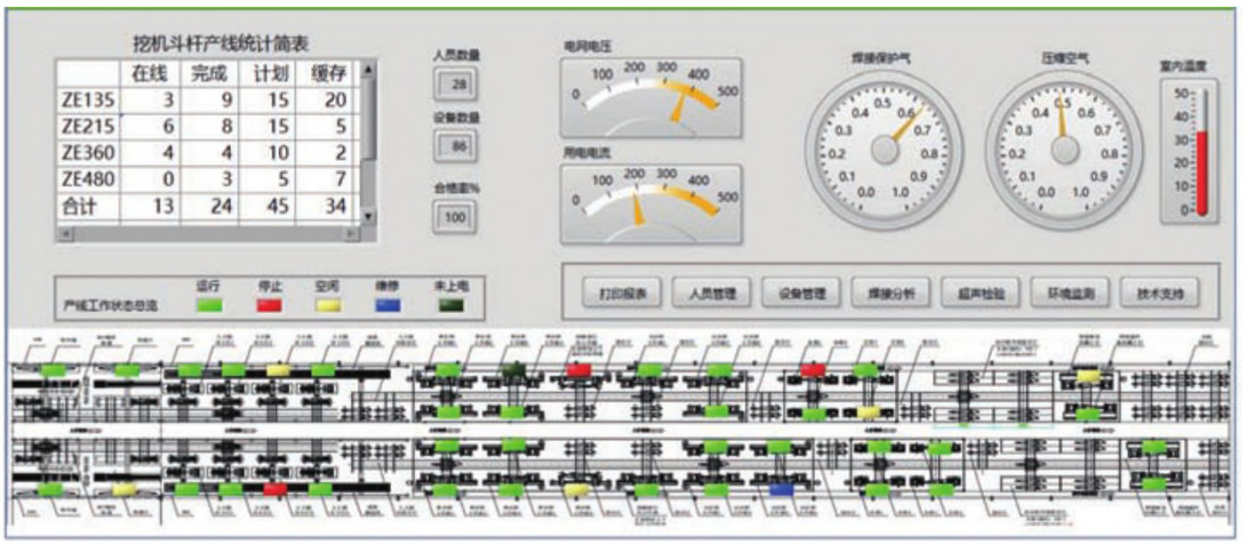


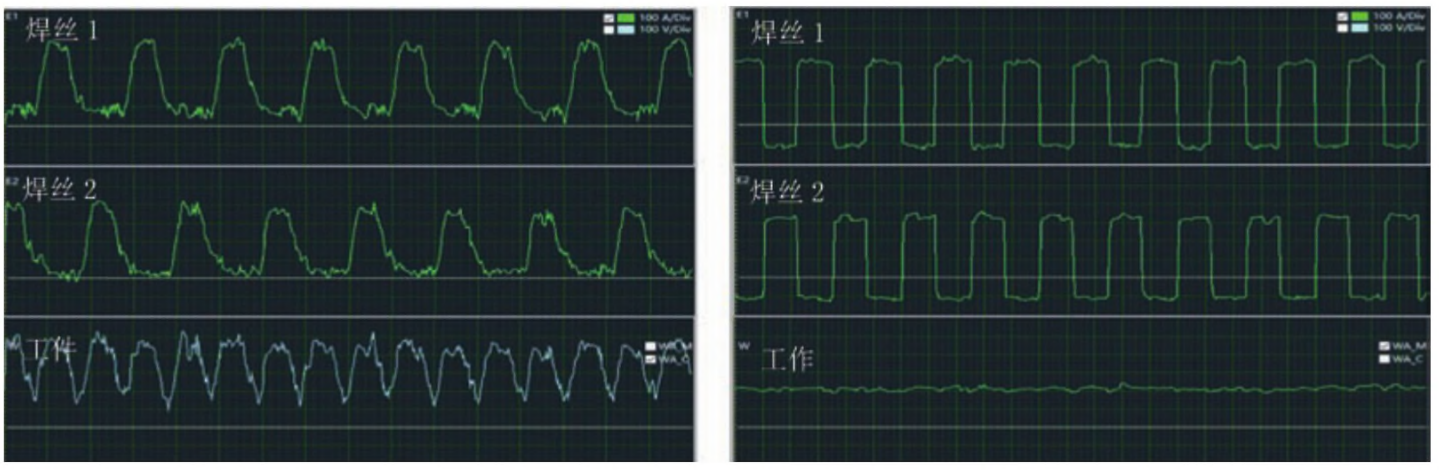
图11 生产线实时状态显示



图12 设备故障代码处理



图13　双丝焊电流波形显示



a）Tandem双丝焊电流波形　　b）Tri-Arc双丝焊电流波形

图14　Tandem双丝焊与Tri-Arc双丝焊焊接电流波形的比较

率、低热输入方面较传统熔化极气体保护焊具有更优越的焊接特性。

2）基于液压与数控技术相结合的角钢自动拼方机构具有自动化程度和装配精度高的优点，是实现主焊缝全自动化焊接的关键。

3）高精度RGV是自动化焊接生产线中的重要环节，高精度RGV是现实自动物流和自动装配的关键设备，相当于一种长距离移动的专用搬运机器人。

4）SCADA系统对于保证自动化焊接生产线的稳定运行是非常重要的监控手段，特别是对焊接过程的波形及数据采集与分析，有助于焊接工艺的提高和焊接质量的分析。

参考文献：

[1] 魏占静.Tandem高速、高效MIG/MAG双丝焊技术[J].机械工人（热加工），2002（12）：32-33.

[2] Ken Michie，Stephen Blackman.Twin-Wire GMAW: Process Characteristics and Applications[J].Welding Journal，1999（15）：31-34.

[3] 耿正.双丝动态三电弧焊接方法：CN 102069265 B[P].2012-08-22.

[4] 耿正.多态双丝电弧焊接装置及焊接方法：CN 103341681 B[P].2015-05-06.

[5] 耿正，魏占静，韩雪飞，等.高熔敷率低热输入的Tri-Arc双丝电弧焊接方法[J].金属加工(热加工)，2014（22）：36-39,42.

[6] 刘丹，常云龙.双丝三电弧铝合金熔丝电弧行为[J].焊接，2018（5）：16-20,65-66.

[7] 郑佳，李亮玉，钟蒲，等.双丝三电弧焊中熔滴过渡及焊缝成形机理[J].焊接学报，2019（7）：31-36,162.

MW 20201117