

遥控弧焊机器人系统

张惠斌 周振丰 吴林 侯明

(长春 吉林工业大学)

(哈尔滨工业大学)

摘要 研制了一个六自由度主动操纵手、立体电视监视系统和计算机控制系统,与 PUMA 机器人组成主从式遥控弧焊机器人系统。分析了连续焊缝弧焊的运动特征,着重研究了主从式遥控弧焊的操纵控制方式和手眼协调性问题。试验结果表明,传统的主从遥控操纵方式难以达到满意的轨迹精度;手眼形式能显著地提高操纵效率,有利于提高轨迹精度和焊接速度;采用焊接速度计算机自动控制与主从遥控操纵相配合的方式可显著地改善操纵的平稳性,从而显著地提高了轨迹精度。

关键词 遥控焊接; 主从操纵; 焊接机器人; 远程监视

1 遥控弧焊中的主要问题

在空间站装配、海洋工程建设和核设施维修等过程中都大量地用到焊接,由于在上述极限环境中人类的生存条件十分恶劣,焊接工作必须要由机器人来完成。但就目前的机器人技术、人工智能和传感技术水平,难以实现全自主 (autonomous) 机器人焊接,因此,仍需要有人参与,于是提出了遥控焊接系统的概念,即人在离开现场的安全环境中对焊接设备和焊接过程进行远程监视和控制,从而完成完整的焊接工作。

早期的遥控焊接系统主要是用于核能设备维修的专用弧焊机头,由遥控机械手安装到焊缝上,人对其工作过程进行监视和简单的开关控制,因此,只能对特定规则形状和尺寸的焊缝进行自动焊接^[1]。但是,随着遥控焊接所面临的工作对象日益增多,特别是在空间和海洋领域中遥控焊接不仅用于维修,而且主要用于装配。由于这类结构一般都比较复杂,因此,迫切需要开发较通用的遥控弧焊机器人系统。英国曾于 1976 年用普通的双向力反应式主从遥控机械手进行 TIG 焊遥控焊接试验,并依靠在焊枪上安装的靠模支架进行接触式焊缝跟踪^[2]。MIT 的 Agapakis 等人测定了在满意的焊缝跟踪前提下,主从遥控机械手把持焊枪所能达到的焊接速度,证明传统的主从遥控方式难以达到弧焊所需的正常焊接速度^[3]。Hosegood 研究了多种主从遥控机械手,也认为焊接轨迹精度和焊接速度难以同时满足要求,并认为机械系统的惯性是主要的影响因素^[4]。由此可见,传统的主从遥控方式不能用于遥控弧焊,必须研究适合遥控弧焊的主从遥控方式。

远程监视系统的性能及其与遥控操纵系统的协调性对遥控操纵的效率有很大的影响。以装配为主要任务的主从遥控系统一般采用几台固定放置的摄像机和监视器作为监视系统,难以做到与遥控操纵系统的协调,其工作效率一般只有人工效率的四分之一至十分之一,由于遥控弧焊系统必须要有较高的遥控操纵效率,才能同时满足焊缝跟踪精度和焊接速度的要

求,所以研究适合焊接操作的监视系统是一个重要课题。

2 遥控弧焊机器人试验系统

弧焊过程中焊枪不与工件接触,所以,遥控弧焊机器人并不一定需要双向力反应。本文建立的无力反应主从遥控弧焊机器人系统由主动臂、PUMA560 机器人和计算机控制系统以及头盔式立体电视监视系统等组成,见图 1。主动臂有 6 个转动关节,每个关节上安装有光电编码器用于检测关节转角。手持主动臂手柄可以在 0.4m 边长的立体空间内灵活动作,位置精度为 0.2mm,姿态精度为 0.18°。主动臂各关节转角信号经接口电路输入计算机,从而计算出主动臂末端(主动焊枪)的位置和姿态。PUMA 机器人工作在主从状态,可由外部计算机直接控制其各关节的角度值。机器人与单片机串行接口电路进行独立的通讯,每隔 28ms 机器人输出当前其各关节的角度值,同时接收下一步各关节应达到的角度值,主计算机与该通讯接口电路进行高速的并行数据交换。主计算机需要运算主动臂正运动学方程、PUMA 机器人逆运动学方程和两者之间的运动转换方程,从而控制 PUMA 机器人及从动焊枪按照程序规定的运动转换关系跟随主动焊枪运动。

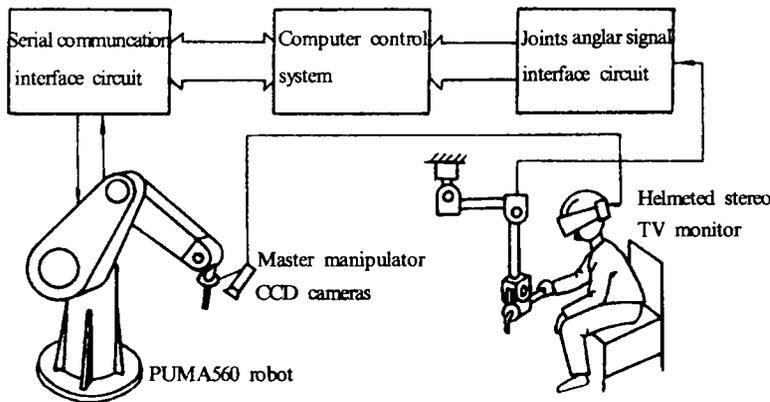


图 1 遥控弧焊机器人试验系统组成

Fig.1 Sketch of remote arc welding robot system

监视系统由两套闭路电视(CCTV)组成,见图 2,两台电荷耦合器件(CCD)摄像机相距 65mm,两条光轴在明视距离 0.25m 处相交构成立体摄像机。摄像机与从动焊枪一起安装在机器人的末端,并且两者之间按照人工施焊时的手眼位置关系固定。这是因为在人工施焊过程中,眼睛始终跟随着焊点运动,而且眼睛始终处于(右手操作)焊枪左上前方的固定位置上。在主动侧两台微型监视器及其光学系统分别安装在头盔的两侧,根据体视原理合成立体图象。这种头盔式立体电视监视系统提供了很好的视觉临场感,既可以保证整个系统的手眼协调性,又提供了跟踪焊缝所必需的深度信息。手眼形式(eye-in-hand)为在摄像机坐标系内操纵从动的 PUMA 机器人提供了方便。另外,本文还研制了焊枪位置姿态传感测量及数据分析处理系统^[5],用于实时检测和记录焊枪相对于焊缝的 6 个位置量:横向位置偏差、弧长、横向姿态角、纵向姿态角、方向角和焊接速度,为深入研究遥控焊接人机系统的特性提供了大量的试验数据。

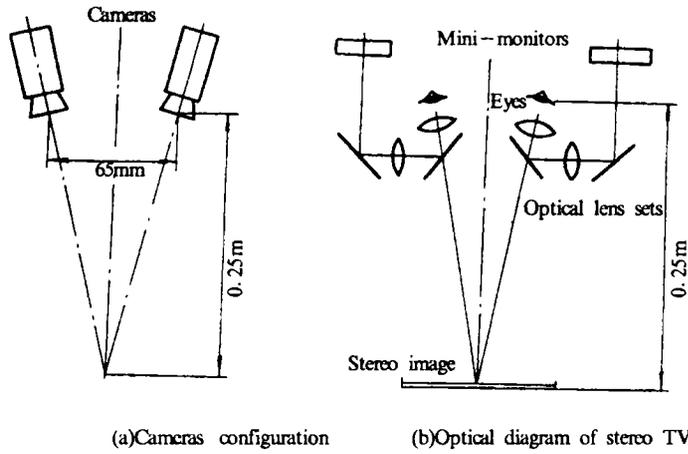


图2 监视系统光学原理图

Fig.2 Sketch of stereo TV monitor system

3 主从遥控弧焊操纵方式

主从遥控操纵系统中运动转换关系将主动臂和 PUMA 机器人的运动联系起来,下面讨论手眼式焊接速度自动控制与主从遥控操纵相结合的运动转换关系。弧焊过程中焊枪的运动范围较大,一般是分段光滑的连续轨迹运动,要求线速度恒定和保持焊枪姿态角基本稳定。因此对于焊枪的主要运动采用“方向盘”式的控制方式,比传统的主从方式更适合于连续焊缝的遥控操纵。然而,考虑到焊缝的复杂性和系统(包括人在内)性能的限制,需要在焊接运动自动控制方式的基础上叠加主从操纵进行小范围的位置和姿态调整,这样操纵人员可以在原地对各种形式的焊缝进行焊接。

采用上述的操纵方式后主动侧和从动侧都具有手眼结构方式,所不同的是主动侧的手和眼处于主动臂基坐标系中,而从动侧的手和眼处于 PUMA 的 TOOL 坐标系中,

$$\text{因而有: } \begin{cases} M_{(n+1)}^m = R^m M_{(n)}^m \\ S_{(n+1)}^p = S_{(n)}^p (R^t + W^t) \\ R^m = R^t \end{cases}$$

其中 $M_{(n)}^m$ 为时刻 n 时主动焊枪 M 在主动臂基坐标系 $\{m\}$ 中的齐次变换矩阵, $S_{(n)}^p$ 为时刻 n 时焊枪 S 在 PUMA 基坐标系 $\{p\}$ 中的齐次变换矩阵, R^m 为主动焊枪 M 相对于主动臂基坐标系 $\{m\}$ 的微分变量, R^t 为焊枪 S 相对于 TOOL 坐标系 $\{t\}$ 的微分变量, W^t 为焊接速度矢量。

4 试验结果和分析

本文分别对传统的主从遥控方式和上述手眼式焊接速度自动控制与主从遥控操纵相结合的遥控方式进行了大量的试验,图3和图4分别是用两种遥控方式时,焊枪相对于焊缝的横向位置偏差和焊接速度的实测的过程曲线。

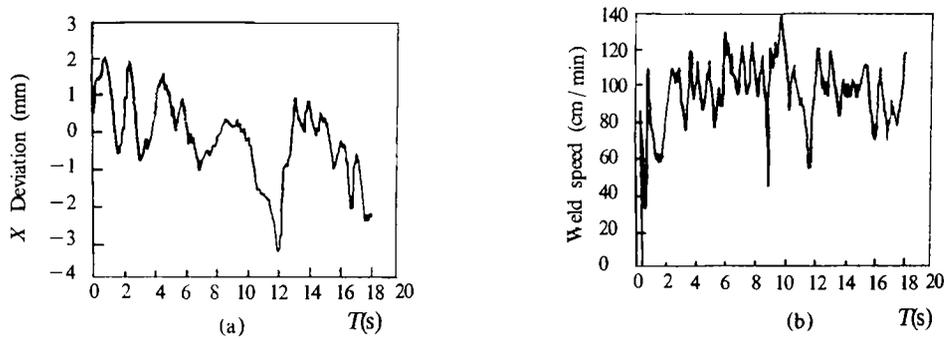


图3 传统方式时的过程曲线

Fig.3 Curves under traditional master-slave mode

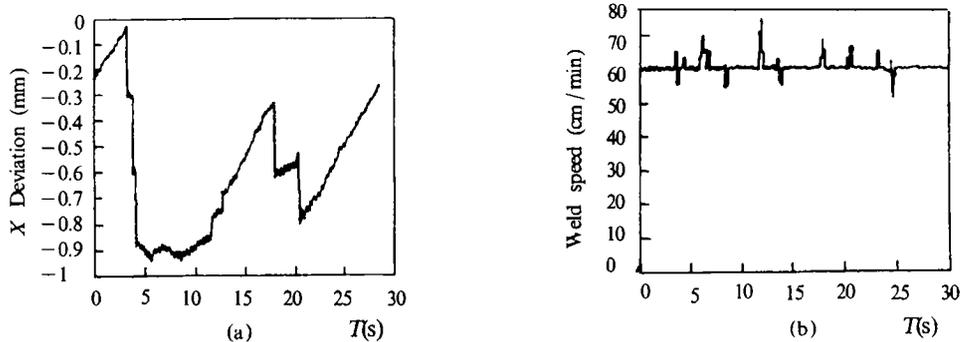


图4 遥控方式时的过程曲线

Fig.4 Curves under welding speed automatic control mode

对上述曲线进行分析后得出,采用传统的主从遥控方式时横向位置偏差经常大到3mm以上,焊枪的运动轨迹在焊缝附近波折,这显然是由于人机系统的时间常数过大,使得闭环系统的动态误差较大。人机系统的时间常数包括机械系统时间常数,也包括人实施有效操纵控制的速度。在不同的观察条件下人对客观尺寸的观测所得到的主观尺寸是不同的,当人在所习惯的距离和角度进行观察时观察误差就小;另一方面,大量的实验已证明,遥控操纵过程中人的工作量越大则动作精度就越低。传统的主从遥控方式要求操纵人员必须同时控制6个量;如果采用固定摄像机进行观察,在焊枪运动过程中,摄像机相对于焊枪的位置和角度不能保证人工施焊时所习惯的关系。大工作量和不适的观察条件必然降低实施有效操纵控制的速度。当焊接速度由计算机自动控制时,由人控制的量虽然还剩5个,但是,由于不必在快速运动中进行操纵控制,所以,人的工作量实际被大大减少。同时,手眼结构方式完全避免了摄像机固定所带来的监视器屏幕坐标系与主动手坐标系之间时变,因而,减少了人脑中变换两个坐标系所需的时间。上述结果表明,提高操纵控制的效率是改善主从遥控弧焊系统焊缝跟踪精度的有效途径。

不仅如此,由两种操纵控制方式的焊接速度曲线还可以看出,在传统的主从遥控方式下焊接速度难以均匀,实际上也难以提高。而焊接速度由计算机自动控制能保证较平稳的焊枪运动,试验表明,当要求焊缝跟踪精度为 $\pm 0.5\text{mm}$ 时,焊接速度可以达到 50cm/min ,已基本满足小规范焊接的要求。

然而,焊接速度自动控制与主从遥控操纵相结合的遥控方式所体现出的最大的局限性是,仍然难以完全消除由于系统惯性和延迟对遥控操纵性能的影响,这有待于进一步的研究。

5 结 论

焊接速度自动控制与主从遥控操纵相结合的遥控方式,及手眼结构的监视方式符合弧焊的操作的特点,可以显著地提高工作效率,从而有利于改善焊缝的跟踪精度和焊接速度及焊枪遥控操作的平稳性。

(1995年2月10日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 Pothier N E. Remote Repair Welding of Auxiliary Pipe at Douglas Point NGS. Proc. of the 32th Conf. on Remote Sys. Tech., 1984 (2): 148 ~ 152
- 2 Raimondi T. Remote Handling in the Joint European Tonus Fusion Experiment. Proc. of the 24th Conf. on Remote Sys. Tech., 1976, 188 ~ 190
- 3 Agapakis J E. Fundamentals and Advances in the Development of Remote Welding Fabrication System. Welding Journal, Sept. 1986, 21 ~ 25
- 4 Hosegood. CEBG Work on In-reactor Maintenance Techniques, Proc. of the 29th Conf. on Remote Sys. Tech., 1981, (2): 155 ~ 160
- 5 侯明.遥控弧焊实验系统中焊枪检测系统的研制及操作特性分析.哈尔滨工业大学硕士论文,1994.

Research on remote arc welding robot system

Zhang Huibin, Zhou Zhenfeng
(*Jilin University of Technology, Changchun*)

Wu Lin, Hou Ming
(*Harbin Institute of Technology*)

Abstract A remote arc welding robot system has been built, consisting of a six DOF master manipulator, a helmeted stereo TV monitor system, a computer control system and a PUMA robot. The operation characteristics of the arc welding master-slave system and the coordination between eye and hand are studied. The experiments reveal that the eye-in-hand monitor mode can raise operation efficiency and the mode compounding the welding speed automatic control with slave-master operation can improve the operation steadiness and trajectory accuracy obviously.

Key words remote welding; master-slave operation; welding robot; telepresence