

摘要

交叉支撑组成是转 8G 型、转 8AG 型转向架用于提速、保证运行品质的关键部件，为保证交叉支撑组成的焊接质量，工厂从国外引进了 Rti2000 型弧焊机械手系统，用于交叉支撑组成的批量焊接生产。在弧焊机械手焊接过程中，采用接触式传感器进行寻位跟踪时，寻位比较准确，配以电弧传感器实时跟踪，其焊接质量达到了有关技术要求；而采用 ELS 激光传感器进行寻位跟踪时，其焊接质量不理想，焊接质量不稳定，造成焊缝返修；此外激光传感器还会出现寻找失败现象，这些问题影响了弧焊机械手焊接生产效率和使用效果。

本文从 ELS 激光传感器寻位跟踪的原理、编程技巧入手，分析和研究影响激光传感器寻位跟踪精度的因素，分析了弧焊机械手系统校零和激光传感器校零、编程、工件表面状态、工件表面粉尘、焊缝两侧金属色差以及工件组装质量对激光传感器跟踪精度的影响，提出提高激光传感器寻位跟踪精度的有效办法，尽量消除影响激光传感器寻位跟踪精度的因素，达到提高跟踪精度的目的。正确进行弧焊机械手系统校零和激光传感器校零，采取去除工件表面粉尘，减小焊缝两侧金属色差以及提高工件组装质量等措施，对提高激光传感器跟踪精度和提高激光传感器跟踪成功率是有效的。提高激光传感器的跟踪精度，保证了弧焊机械手系统焊接质量稳定性和可靠性，充分发挥弧焊机械手系统的优勢和作用，提高了生产效率。

关键词：弧焊机械手 激光传感器 跟踪 精度

Abstract

The cross-braced composition is a key component of ZHUAN 8G bogie and ZHUAN 8AG bogie in raising speed and ensuring the movement quality. In order to assure the quality of cross-braced composition, the factory has introduced the Rti2000 robot system in the batch welding production from abroad. In the working process of the robot system, the contact sensor is adopted to carry on seeking the position and tracking. The position sought is accurate, together with the electric arc sensor real-time tracking, the welding quality has achieved the related specification. When ELS laser sensor is used to seek the position and track, its welding quality is not acceptable and unstable, which result in the welded joint repaired. Furthermore, the laser sensor also can appear the phenomenon of seeking failing. All these affects the efficiency and quality of robot system .

Based on the seeking and tracking principle and programming skill of ELS laser sensor, this article analyzes the influence factors to the tracking accuracy of laser sensor, like the zero calibration of arc welding robot system and that of the laser sensor, the programming, the work piece surface condition, the work piece surface dust, the metal chromatic aberration of the two sides of welded joint, as well as the work piece assembly quality. From above analysis, Effective methods are proposed in improving the seeking and tracking accuracy of laser sensor, and eliminating the influence factor of side effect. By carrying on the right zero calibration of arc welding robot system and laser sensor, and taking the measures of removing the surface dust of working piece and decreasing the metal chromatic aberration of the two sides of the welded joint, and improving the assembly quality of working pieces,

the laser sensor tracking accuracy and the success ratio of laser sensor tracking is enhanced. By increasing the tracking accuracy of the laser sensor, the welding quality stability of arc welding robot system could be guaranteed. In this way, the advantage of arc welding robot system could be fully developed and the production efficiency is raised up.

Key words: arc welding robot, laser sensor, tracking, accuracy

第一章 绪论

随着机械、计算机和自动控制技术的发展，焊接机器人这一集多学科于一身的高科技产品得到迅猛发展。焊接机器人是国外发达国家应用较普遍的一种自动焊接技术，其焊接质量和效率大大好于手工电弧焊。近年来，国内工程机械、汽车、轨道车辆及船舶制造等行业积极引进焊接机器人，以此提高焊接技术水平和产品质量，焊接自动化已成为焊接行业的发展趋势。

在手工和半自动焊接过程中，一个高水平的焊工通过观察焊接接头型式、接头位置、熔池形貌、电弧形状和焊缝成形可以感知焊接过程中的状态，如果实际焊接过程同最佳状态不一致，可以调节各种规范参数使之达到最佳效果，以获得令人满意的焊缝。如果焊接过程实现自动化，首先需要类似人体感官的焊接传感器。利用焊接传感器能获得焊接接头、焊接位置信息并用于调节焊接操作参数，利用计算机技术实现合理的控制规律，完成焊接过程。在自动焊接过程中，开环控制或机器人示教系统无法补偿焊接状态的实时变化及各种意想不到的外来干扰，不能完全实现高质量的自动化焊接。焊缝跟踪问题是焊接机器人应用的一个难点，一直是业内人士关注的热点问题，可靠的焊缝跟踪方法一直是人们研究方向。

目前常用的焊缝跟踪方法有机械跟踪、电弧跟踪、光电跟踪和激光跟踪等，而激光跟踪，在焊缝跟踪领域，占有非常重要的地位，不论是位置寻找，还是实时跟踪，具有优异的性能而获得了高度重视和长足发展。激光跟踪传感器具有体积小，结构紧凑，跟踪精度高，跟踪速度快等优点，但影响因素比较复杂，对应用环境要求严格。

焊接机器人是一个柔性系统，其应用是一个复杂的系统工程，必须在应用对象、结构设计、设备配置、相关前道工序质量、人员素质上满足机器人应用的前提条件。否则最先进的系统，未必能获得满意的效果，甚至闲置不用。即使是最先进的激光跟踪传感器，也不例外。采用弧焊

机械手系统焊接时，激光跟踪传感器寻找焊缝位置时会产生偏差，引起焊接质量问题，不能满足焊接技术要求，造成焊缝返修，影响焊接机器人使用效果。

1.1 课题来源与背景

我国铁路是旅客、货物运输的主要力量，承担着繁重的客货运输任务，是国家运输大动脉，近年来，电煤、粮食运力不足的矛盾日益突出。由于我国铁路网基本上是客、货车共线运输的铁路网，这种铁路网要求客、货车运行速度合理匹配，否则就不能发挥最佳运输效能，制约国家经济健康高速发展，成为制约国民经济发展的瓶颈。近些年来客车经过多次大提速，主要干线铁路的客运最高运行速度已达 160 km/h 以上，而货车运行速度仅为 70~80 km/h。据资料介绍，由于货车运行速度大大低于客车运行速度，每开行一对提速客车将造成 3.7 对货车不能运行，对现有线路货物运输造成很大的影响，年运量将减少近 2 亿吨^[1]。随着客运速度的大幅提高，要求货运速度也相应提高，只有客、货车运行速度合理匹配，才能提高铁路运输的整体经济效益，实现客、货运双丰收，更好地发挥铁路运输在我国国民经济发展中的重要作用。铁路货车提速对铁路运输市场扩大至关重要，有利于提高市场竞争能力；铁路货运提速是我国铁路运输为加速货物周转、优化运输结构、缩短运输时间、提高运输能力，促进国民经济发展的重要措施；是国民经济发展和人民生活质量提高的需要，具有良好的经济效益和社会效益，对于国家、社会、人民生活及铁路运输业的发展都具有十分重要的意义，因此铁路货车提速势在必行。

货车提速对货车运输装备提出了更高要求，货车提速的关键在于要有能适应提速运行需要的转向架。要将货物列车的最高运行速度提高，那么全列车中所有货车的转向架性能，必须确保在最高运行速度范围内具有良好的运行平稳性、安全性及可靠性。我国现有铁路主型货车转向架是转 8A 型转向架，这种铸钢三大件式货车转向架，具有结构简单、检修方便、均载性好等优点，多年来为铁路货运做出了很大贡献。但是该转向架的抗菱刚度不足，特别是在其斜楔式摩擦减振器磨损后，抗菱刚

度值降低幅度很大，运行中容易导致车辆发生蛇行运动，临界速度低，危及行车安全。因此，转 8A 型转向架已不能适应目前货车提速要求，一方面研制适应高速要求的新型转向架，另一方面对现有转 8A 型转向架进行改造，以适应目前货车提速要求。

1.2 课题提出

为实现铁路货车提速，一方面要扩大提速转向架在新造货车中的应用；另一方面要加快对既有铁路货车进行提速改造。为了满足既有铁路货车的提速要求，铁道部决定采用交叉支撑技术对现有铁路货车转 8A 转向架进行改造。采用交叉支撑技术的货车转向架分为三种型号：采用美国标准车辆转向架公司交叉支撑装置的为转 K2 型转向架；采用转 8A 型转向架原型摇枕、改进型侧架和交叉支撑技术的为转 8G 型转向架；采用转 8A 型转向架原型摇枕、侧架和交叉支撑技术的为转 8AG 型转向架^[2]。而转 8G、转 8AG 型转向架所采用的交叉支撑组成的结构型式与尺寸是一致的。

交叉支撑组成是保证转 8G、转 8AG 型转向架性能的关键部件，尺寸精度较高，关键尺寸如杆体直线度，两对角线长度差及四个杆体中心线的平面度等，这些尺寸必须重点控制；对焊接质量提出了更高的要求，焊缝不得有裂纹，不得有夹渣、气孔、咬边、未熔合等任何缺陷。焊接质量的好坏将直接关系到交叉支撑组成的疲劳强度和使用寿命，关系到转 8AG 型转向架提速改造的成败。

鉴于交叉支撑组成结构和焊接质量要求，在焊接生产过程中，提高焊接质量的稳定性和可靠性是至关重要的。采用先进工艺装备和先进焊接技术是保证交叉支撑组成焊接质量的重要手段。为提高企业工艺装备水平，迅速提升企业在日益严峻市场环境中的竞争能力，保证转 8G 型转向架交叉支撑组成的生产效率和制造质量，我厂于 2001 年招标引进了国外先进的 Rti2000 型弧焊机械手系统，用于转 8G、转 8AG 型转向架交叉支撑组成的批量焊接生产。应用弧焊机械手系统进行焊接生产，可以消除人为因素对产品质量的影响，确保产品“上质量、上档次、上水平”的需要，不仅满足货车提速的要求，而且给企业带来合理的经济效益，

实现铁道部以装备保工艺，以工艺保质量，以质量保安全的要求。引进的弧焊机械手系统经安装、调试及编程，并设计制作了专门的组合夹具，实现了转 8G、转 8AG 型转向架交叉支撑组成焊缝的焊接。在弧焊机械手系统中，我们配置了接触式焊缝寻位传感器、ELS 激光传感器和电弧传感器。在弧焊机械手焊接过程中，采用接触式焊缝寻位传感器进行寻位跟踪，寻位比较准确，其焊接质量达到了有关技术要求；而采用 ELS 激光传感器进行寻位跟踪的焊缝，其焊接质量不理想，焊接质量不稳定，造成焊缝返修；此外激光传感器还会出现寻找失败现象，这些问题影响了弧焊机械手焊接生产效率和使用效果。

事实说明，在弧焊机械手焊接过程中，如果焊接条件基本稳定，则弧焊机械手能够保证焊接质量。但是，由于各种因素的影响，实际焊接条件会经常发生变化，例如，由于环境中粉尘、烟尘、坡口状况、加工误差、夹具装卡精度、工件表面状态和工件热变形等因素的影响，引起激光传感器跟踪精度下降，从而引起焊枪偏离焊缝，导致焊缝质量下降，甚至失败^[3]。

鉴于激光传感器在实际焊接过程中存在的问题，有必要对激光传感器在交叉支撑组成焊缝上跟踪精度进行研究，有必要对 ELS 激光传感器寻找失败现象进行分析、研究；分析影响激光传感器跟踪精度的影响因素，采取有效措施，从而保证激光传感器的跟踪精度，达到提高焊缝质量的目的。

本文从 ELS 激光传感器寻位跟踪的原理、编程技巧入手，分析和研究影响 ELS 激光传感器寻位跟踪精度的因素，提出提高 ELS 激光传感器寻位跟踪精度的有效办法，正确、精心编制焊接程序，尽量消除影响激光传感器寻位跟踪精度的因素，保证弧焊机械手系统焊接质量稳定性和可靠性，真正发挥弧焊机械手系统的优点和作用，保证焊接质量，提高生产效率。

第二章 交叉支撑组成结构简介

2.1 交叉支撑组成结构

转 8G、转 8AG 型转向架交叉支撑组成是在引进美国标准车辆转向架公司交叉支撑技术的基础上，结合我国国情自行设计开发的，是为适应装用转 8A 型转向架的既有铁路货车提速改造而研制的、能满足运营速度为 90~100Km/h 的转向架。从国外铁路货车实际使用经验和国内试验证明，运用交叉支撑技术对货车三大件式转向架进行改造，能显著地提高货车三大件式转向架的抗菱刚度，改善车辆动力学性能，有效地提高车辆临界速度和安全可靠性，减少零部件的磨耗，减少检修工作量^[4]。转 8G、转 8AG 型转向架最高运行速度可以达到 100Km/h，能够基本满足现有铁路货车提速要求。

转 8G、转 8AG 型转向架交叉支撑组成主要由端头、杆体、定位座及上下盖板组焊而成，其生产工艺流程见图 2.1，具体结构见图 2.2。交叉杆分组成由端头、杆体组成，其连接焊缝在自动焊接流水线上完成。定位座与上、下盖板连接焊缝由弧焊机械手焊接。弧焊机械手系统的任务是对定位座与上下盖板连接焊缝进行焊接，焊缝种类及数量见表 2.1。单边 V 形坡口锁底对接焊缝的结构见图 2.3，“直线”角焊缝的结构见图 2.4，“环形”角焊缝的结构见图 2.5。从交叉支撑组成的结构上看，其焊缝具有数量多，焊缝短，空间狭小，圆弧半径小等特点。

鉴于交叉支撑组成在转 8G、转 8AG 型转向架的重要作用，对其焊缝焊接质量提出了严格要求，焊缝不得产生裂纹、气孔、咬边、夹渣及未熔合等缺陷，焊缝经 100% 表面磁粉探伤检查。

从交叉支撑组成结构和对其焊缝质量要求上看，对焊接装备、人员素质以及焊接工艺提出严格要求，焊接难度大，采用焊接机器人进行焊接是比较好的选择。

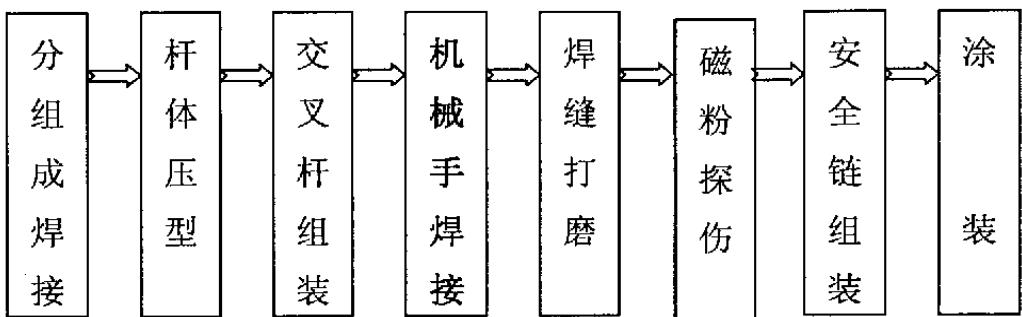


图 2.1 生产工艺流程

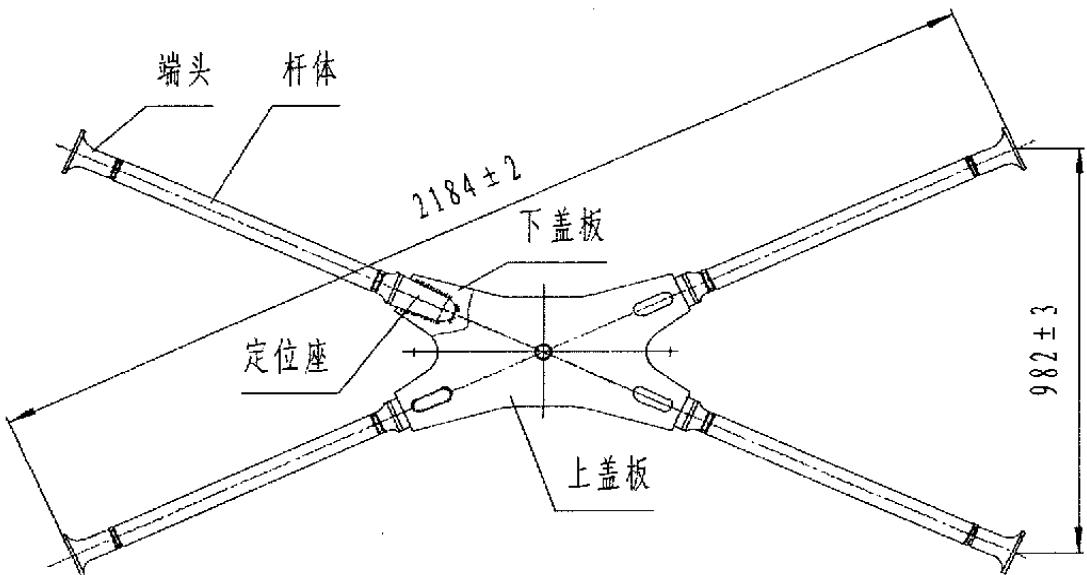


图 2.2 交叉支撑组成结构

表 2.1 交叉支撑组成焊缝类型与数量

焊缝类型	焊缝数量
单边 V 形坡口锁底对接焊缝	8 条
“直线”角焊缝	16 条
“环形”角焊缝	16 条

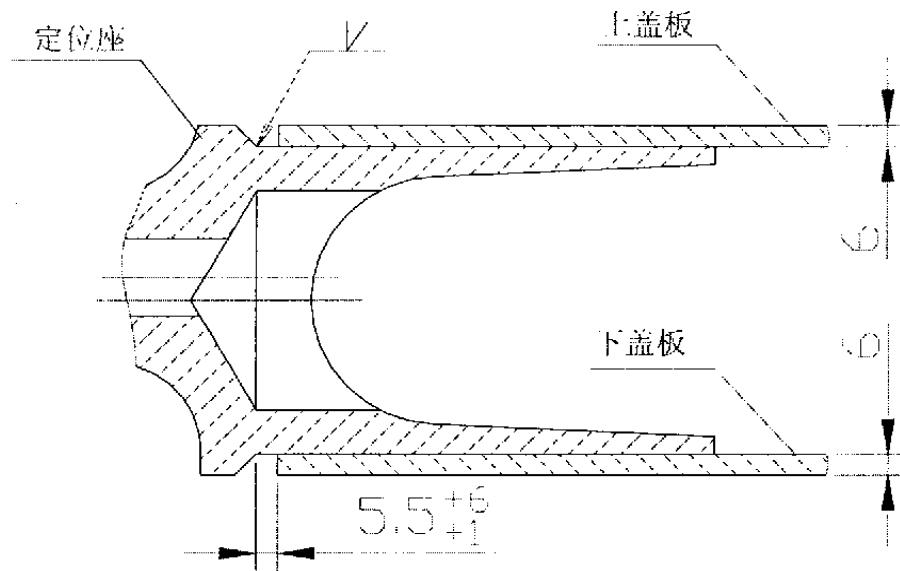


图 2.3 单边 V 形坡口锁底对接焊缝

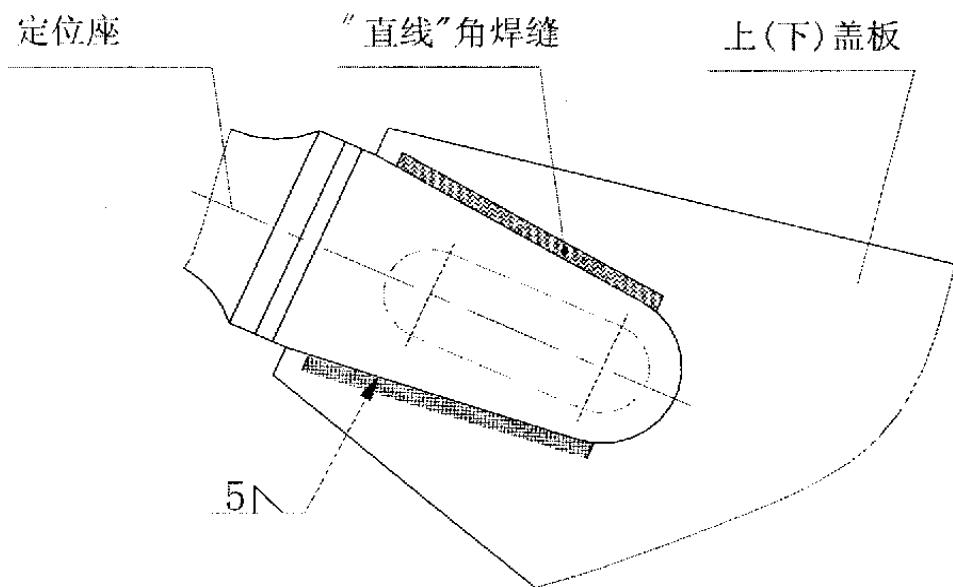


图 2.4 “直线”角焊缝

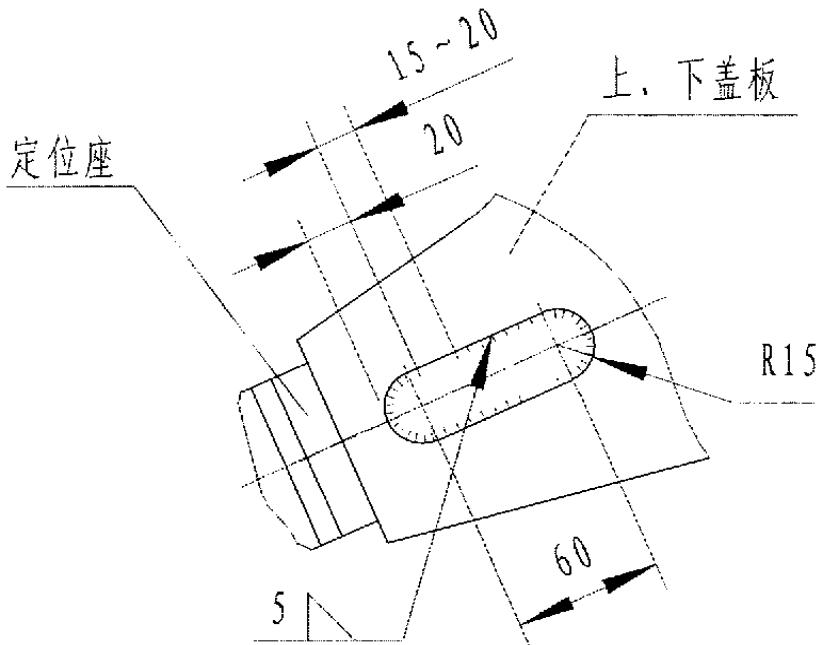


图 2.5 “环形”角焊缝

2.2 小结

- 交叉支撑组成焊缝具有种类多、数量多、焊缝短、焊缝空间狭小及圆弧半径小的特点。
- 对交叉支撑组成焊缝质量提出严格要求。
- 上述特点和质量要求决定交叉支撑组成焊缝焊接难度大,对焊接装备技术水平要求高。

第三章 弧焊机械手系统简介

弧焊机械手系统由 RTi2000 型弧焊机械手、跟踪传感器、焊接设备、可回转式双位单轴变位器和随机软件以及自动烟尘净化设备等组成。具体结构见图 3.1。

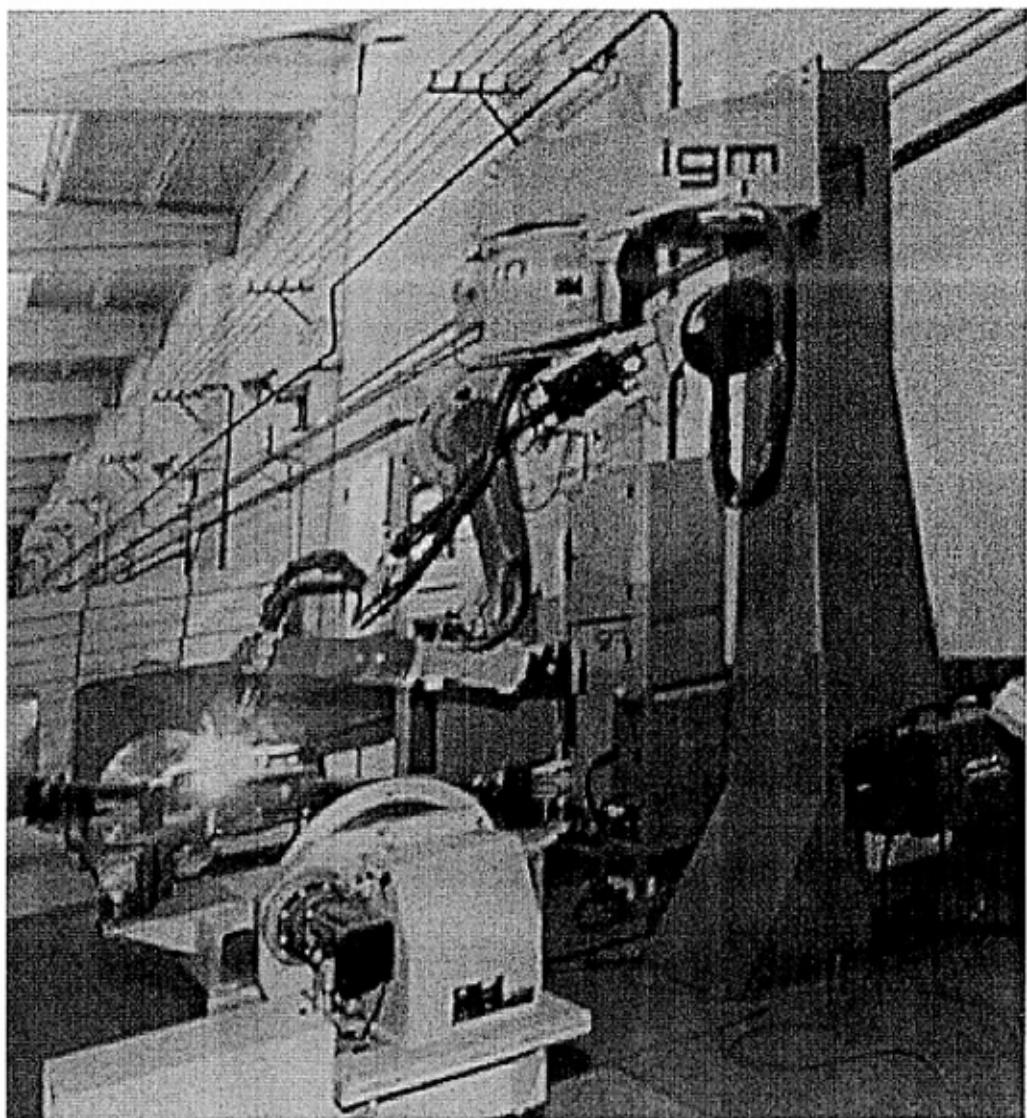


图 3.1 弧焊机械手系统

3.1 Rti2000 型弧焊机械手

Rti2000 型弧焊机械手为 6 轴系统，肘节式设计，重复精度为 ± 0.1 毫米，独特的第 6 轴配备焊枪连接器及焊枪防碰撞保护传感器，其偏置式设计可以避免焊枪电缆与机器人本体的缠绕，保证焊接过程稳定^[6]。

Rti2000 型弧焊机械手系统采用交流伺服驱动及独特的过程控制，可以保证整个系统的高速动态性能及精确的跟踪。

程序的编制通过带有显示屏的 K5 型示教器进行，K5 型示教器与中央控制系统通过总线连接。示教编程方式直观易于掌握，软件采用 Windows 平台及视窗界面。在示教器上相应的界面下选择所需功能并输入相关参数(如电流、焊接速度等) 即可完成焊接程序的编制，所有界面皆为中文显示。

3.2 跟踪传感器

该 Rti2000 型弧焊机械手系统配有接触式焊缝寻位传感器、ELS 激光传感器和电弧传感器。

使用接触式焊缝寻位传感器，焊缝起始点的寻找动作可以通过编程设定，进而用以判定工件上部件或零件的位置。在寻位过程中，可确定工件表面上参考点的实际位置与编程位置之间的偏差，相应的焊接程序即得以修正。

电弧传感器是利用电弧自身的电特性来测量电极到工件之间的距离。通过对垂直于焊接方向的横向摆动或旋转，可以测量出接头大致的几何面貌。

ELS 激光传感器可用于识别边缘、间隙和复杂结构。对于搭接及对接等焊缝，通过一次或几次寻找，即可以决定焊缝所处位置的偏差，然后自动将焊接程序整个或部分转移到适当的位置上。

对于对接焊缝，可根据所测定的焊缝间隙数值调用适当的焊接参数；当一条焊缝的组对间隙出现不均匀的情况（即焊缝起点与终点的间隙宽度不相同）时，也可根据所测定的焊缝间隙数值自动选

择逐渐加宽摆动幅度，同时减低焊接速度，或逐渐减小摆动幅度，同时相应增加焊接速度。

与通常采用的接触式传感器相比，这种激光传感器高速运行的情况下一次测出高度和横向的位置偏差，机器人非工作时间可大大减少。焊缝寻找效率约为接触式传感器的5~8倍。

编程可以非常简单的通过机器人示教器进行。配套的传感器设定及检测软件 Elsisb 可在 Windows 95/98 中运行。传感器与焊枪一起移动，在焊缝上方与焊缝成90°跨过所寻找的焊缝，即为一次焊缝寻找运行。一次焊缝寻找运行完成后，焊缝状况随即得到分析。

在检测记录下数据的基础上，分析单元计算检测各点位置，并将结果输送给机器人控制器。

激光跟踪传感器技术参数：

额定距离： 100 mm

高度方向精度： 0.03 mm

水平方向精度： 0.05 mm

重复精度： <0.2 mm

寻找速度： 50 mm/s

最小厚度/间隙： 0.65mm

3.3 数字焊接设备

TPS 5000 是全数字化控制的逆变焊接电源，它的心脏部分是一个微电脑处理芯片，由它集中处理所有焊接数据，控制和监测整个焊接过程。其控制前所未有的精确、可靠，焊接性能优越，焊接质量无与伦比。能够用于 CO₂、MIG/MAG 焊接。

TPS 系列焊机设计了最先进的引弧方法，每一步都实现数字程序化控制，保证了引弧的可靠性。为了保证重引弧容易，焊机还设计了回烧脉冲程序，焊后焊丝不会结球。TPS 系列数字化脉冲焊机可全方位监控电弧。在脉冲焊时，提供相适宜的脉冲波形，还可控制每个脉冲只过渡一滴金属。

3.4 可回转式双位单轴变位器

在 H 型框架回转台上安装两套头尾架式变位器，工件夹具组装在变位器的垂直面板上。回转台可作 $\pm 180^\circ$ 的左右转动。在工作位置上，回转台被气动锁定。变位器旋转由计算机控制，驱动端的转动作为机械手的一个外部轴，由交流伺服电机驱动，可在任意位置停下或焊接过程中同步转动。

变位器采用坚固的结构设计，在焊接工位可以进行精确的无振动工件定位；同时在另一工位可以手动或通过吊车进行工件装卸。可最大限度地利用机械手的工作时间。变位器可沿工件纵向中心轴 360 度旋转，任意角度锁定。

气动组合夹具就安装在 H 型框架回转变位器上，共安装两套气动组合夹具。

3.5 随机软件

该焊接系统软件采用 Windows 平台及视窗界面，配备了多层次焊软件、样板焊缝软件、弧坑填充软件、编程焊枪摆动软件、单点寻找软件、子站功能、工作站位移功能和故障自诊断显示软件等。

此外弧焊机械手系统还配备了焊接烟尘自动净化设备以及自动清枪装置等。

3.6 气动组焊夹具

为实现弧焊机械手焊接转 8G 型、转 8AG 型转向架交叉支撑组成上下盖板与定位座连接焊缝，我们设计制作了交叉支撑组成气动组合夹具，组合夹具结构见图 3.2。组合夹具安装在弧焊机械手系统的变位机上。在气动组合夹具上完成上、下盖板与定位座分组成的定位、夹紧。组装完毕后，编制焊接程序，实现自动焊接。

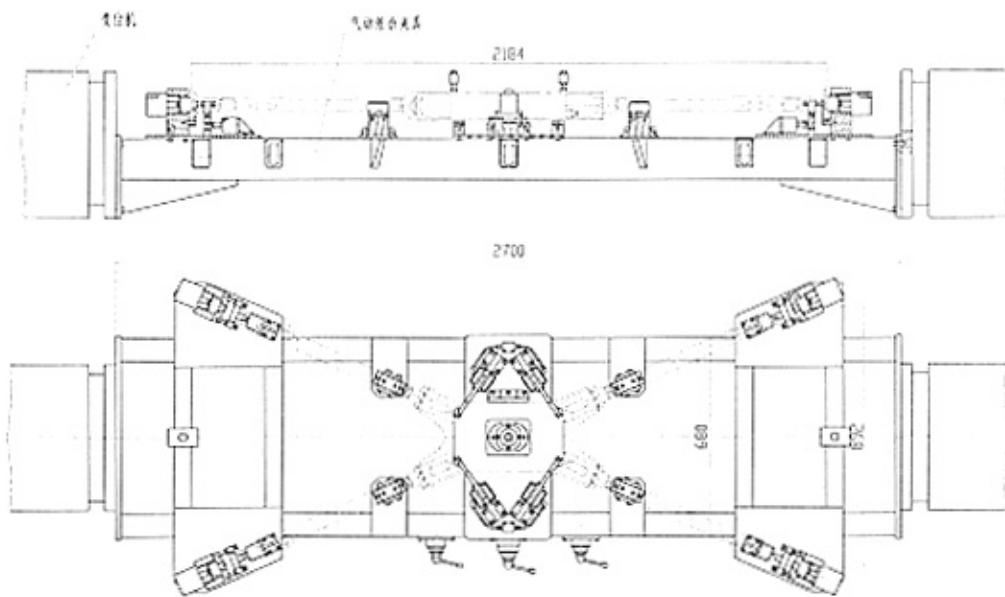


图 3.2 气动组合夹具

3.7 小结

- Rti2000 型弧焊机械手系统先进、功能比较齐全。
- 软件功能比较强。
- 在使用跟踪传感器时，弧焊机械手可以表现出具有一定的智能，可根据坡口尺寸的变化，调整焊接参数。

第四章 激光传感器

4.1 激光传感器跟踪原理

激光具有方向性、高能量、高亮度的特点^[6]，利用激光特性的技术应用已渗透到社会的各个领域。基于激光寻位测量原理的激光跟踪传感器是 RTi2000 弧焊机械手系统可选择的配置，用于焊缝位置的寻位跟踪。弧焊机械手激光传感器系统有激光传感器、计算机、焊接机器人本体、焊接设备及图像处理软件等组成，系统框图见图 4.1。

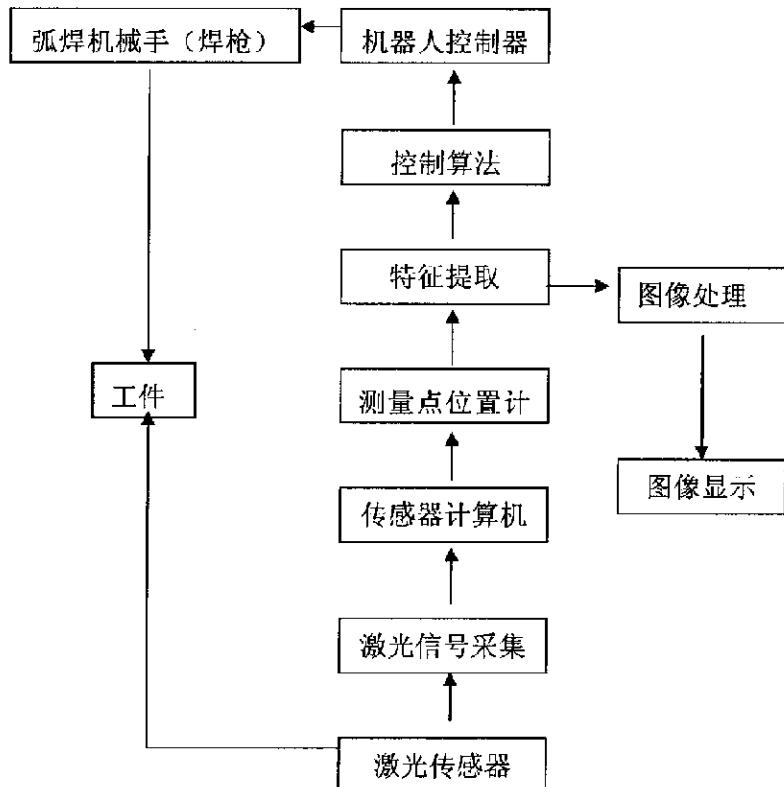


图 4.1 激光传感器系统框图
图 4.1 激光传感器系统框图

4.1.1 测量原理与分析

弧焊机械手激光传感在跟踪过程中，激光传感器在工件表面正上方垂直测量。激光器 1 发出光线，经会聚透镜 2 后垂直入射到被测工件表面 3 上，物体移动或表面变化，导致入射光点沿入射光轴移动。接受透镜 4 接收来自工件入射点处的散射光，并将其成像在光电位置探测器 5 敏感表面上，将光信号转换成电信号，不同的距离电压高低不同。若光点在成像面上的位移 y ，按下式可求出被测面的位移

$$x = ay / (bs \sin \theta - yc \cos \theta) \quad \text{式(4.1)}$$

式中， a 为激光束光轴和接收透镜光轴的交点到接收透镜前主面的距离；

b 为接收透镜后主面到成像面中心点的距离；

θ 为激光束光轴与接收透镜光轴之间的夹角^[7]。

小功率的激光器光点投射在漫反射表面上。漫反射光的一部分通过透镜在光学位置敏感器上成像。如果漫反射表面在与激光平行的方向有一定的位移，移动的光点在敏感器上所成的像也产生一定的偏移。据此偏移可以确定出漫反射表面点的位置。

为了对三角测量进行较为详细的分析，图 4.2 示出了通用的三角测量原理图。图中 P_1P_2 为激光束上的一段直线，代表测量深度范围 H 。为了使 H 线段上的点均能在敏感器上清晰地成像，且充分利用敏感器（PSD 或 CCD）的感光单元，传感器的设计应该满足以下条件：

① 光束、透镜轴线、线阵敏感器单元线在一个平面上。
此平面与敏感器件表面垂直；

② 漫反射主光轴 OPO 作为镜头光心 O 对 P_1P_2 所张角度的平分线。这样可以使所有光线尽量靠近主光轴以减少像差。

在图 4—2 中，产生漫反射的物点在 P_1P_2 上，其对应的像点用 F_1 、 F_2 等标记。 H 为深度测量范围， P_0 为透过光轴上的点。被测量点 P 的像 F 与 P_1 点的像 F_1 的距离 $F_1F=I$ 。可由图推导出：

$$h = L \cdot (S \cdot \tan \beta - I \cdot \tan \beta \cos \alpha + I \cdot \sin \alpha) / (S - I \cdot \cos \alpha - I \cdot \tan \beta \sin \alpha) \quad \text{式(4.2)}$$

式中 α —— 成像光束与传感器接收平面的夹角；

β ——传感器的观察角;

L——成像镜头到发射光束的距离;

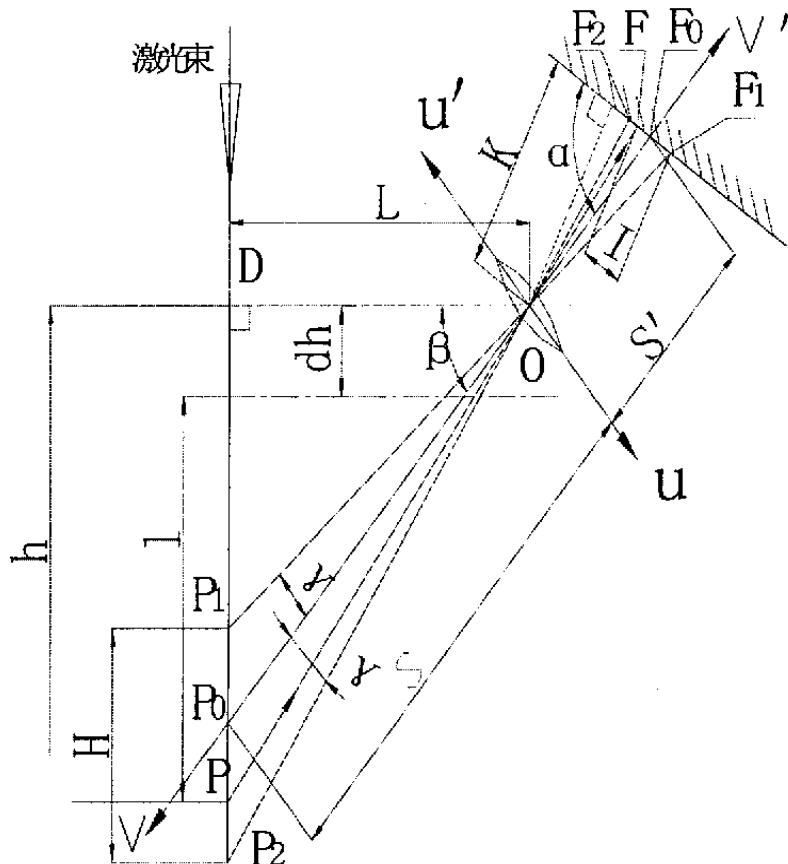


图 4.2 激光三角测量系统原理示意图

S' ——像距;

I——感光点位置的偏移量;

H——检测到的深度信息。

传感器结构确定后，上式中只有 I 是变量。

由图得： $\xi = h - dh$ 式(4.3)

式中， dh 表示旋转轴线与过光心的直线的距离。

我们先确定出传感器扫描时的零角度位置，在此位置设置坐标系，并设扫描电机其他位置与此零角度位置的夹角为 θ ，有：

$$x = \xi \sin \theta$$

$$z = \xi \cos \theta \quad \text{式(4.4)}$$

由于式(4-4)中只有 I 是变量且式(4-5)中 dh 是常量, 所以可以写成下式:

$$\begin{aligned} x &= \sin \theta (a + b \cdot I) / (c + d \cdot I) \\ z &= \cos \theta (a + b \cdot I) / (c + d \cdot I) \end{aligned} \quad \text{式(4.5)}$$

此式即为传感器的数学模型, 式中, a、b、c 和 d 是由结构决定的常数, 最后可通过标定获得。它说明距离 ξ 与 CCD 敏感器上测得的 I 值是一种双曲关系, 由角度传感器测得的角度值和 CCD 上算得的 I 值即可求得 x、y 的值, 而另一坐标由扫描光平面决定, 这样就可以确定出 P 点的三维坐标。P 点在扫描过程中逐点求值, 由此就可得到接头横断面的表面轮廓信息。

激光传感器的数学模型是激光视觉测量技术的核心内容, 所建模型越接近测量实际且模型参数能较准确地标定出来, 则可获得较高的测量精度。PSD 或 CCD 器件是激光视觉传感器的主要功能元件。被测物体的位置、形状等几何尺寸是从 PSD 或 CCD 器件获得的图像信息中计算出来的, 图像上每一点的亮度反映了空间物体表面某点散射光的强度信息, 而该点在图像上的位置与空间物体表面相应点的几何位置有关, 这些位置的相互关系, 由 PSD 或 CCD 器件成像模型决定, 即三维物体到二维图像的变换模型, 一般定义为

$$P = g(H) \quad \text{式(4.6)}$$

式中, g 是三维物体 $P = (xyz)^T$ 到二维图像点 $H = (XY)^T$ 之间的不可逆变换函数。

4.1.2 接头类型识别和特征参数提取

提取接头特征的目的是为弧焊机器人系统焊前的接头寻找和定位等提供所需要的信息。

a. V型接头

对 V 型坡口来说, 焊接参数控制需要接头根部间隙、钝边厚度和坡口面积等信息。

(1) 接头轮廓的分割方法

典型的 V 型接头剖视图如图 4.3 所示, A、B 两个面可能有一定的错边或不平行, 根部间隙宽度 d 也会有变化。当没有垫板 C 或间隙为零时, 钝边的厚度是很难测出来的。传感器测得的接头表面轮廓如图 4.4 所示。

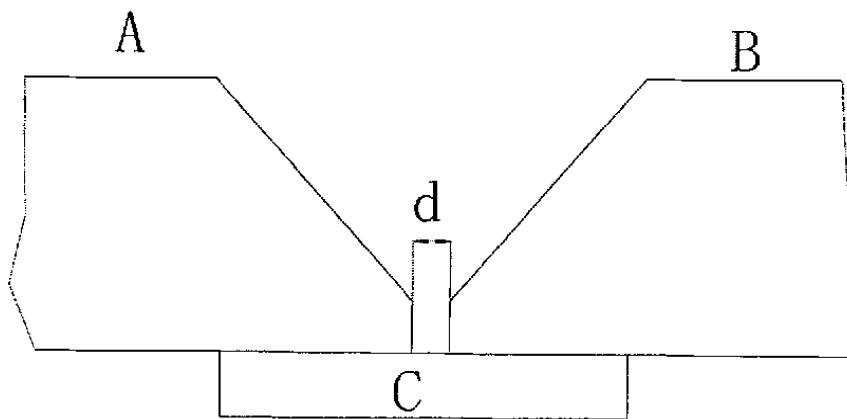


图 4.3 有间隙 V 型焊接接头

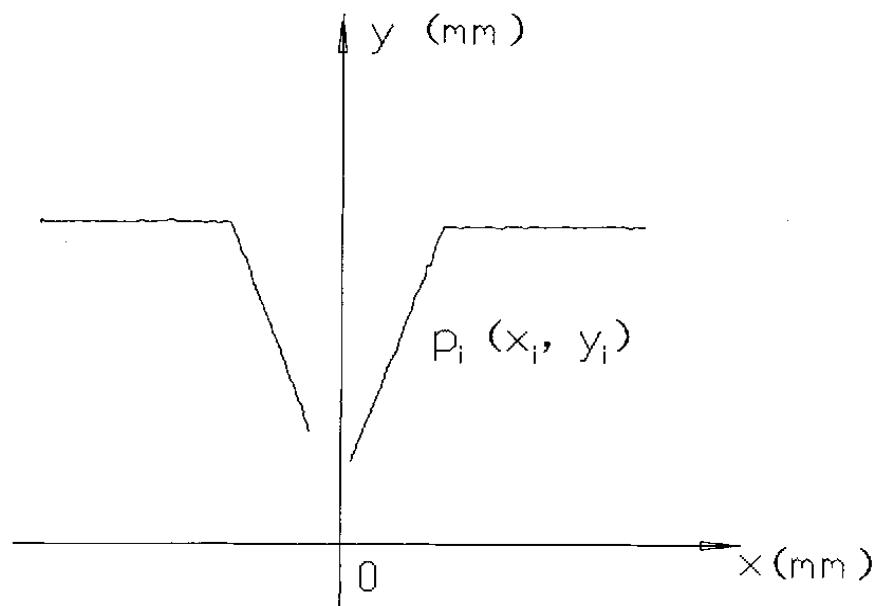


图 4.4 有间隙的 V 型坡口接头轮廓图

为从整体上研究接头的特征，需要采用合适的表示方法来描述接头。由于接头断面一般具有规则的几何形状并且主要由直线段所组成，采用直线段近似的方法来描述它。如果接头轮廓都是直线段分割结果将会非常好。如果接头轮廓包含高次曲线，可以在划分中加入弧线划分方法。本文采用的多线段近似的3分裂算法过程简述如下^[7]。

设接头轮廓线点集为 $P\{(x_i, y_i), I=1, 2, \dots, n\}$ ，点到直线的距离为 S_i ，其中某段曲线上的点集 $P\{(x_i, y_i), I=1, 2, \dots, n\}$ 到直线的距离可选择为最大距离 $E_a(S) = \max\{S_i\}$ 。

(1) 点集 P 应逐段地线性近似，其中在每一线段中，误差 $E_a(S)$ 不超过阀值 T 。

(2) 第一条近似直线的初始点及终止点选为 (x_1, y_1) 及 (x_n, y_n) 。

(3) 若对所有直线误差均不大于 T ，则近似过程结束，否则转向操作(4)。

(4) 对直到当前状态为止已找到的具有较大误差的直线，执行操作(5)和(6)。

(5) 计算直线上具有最大距离的点 P_m 。

(6) 用两条新的直线代替原直线。第一条新直线的初始点及终止点是原直线的初始点及 P_m 点；第二条新直线的初始点是 P_m 点及原直线的终止点。

(7) 转向操作(3)。

在曲线分裂过程中，记下每一个线段的起始点和终止点坐标、线段内的点数、长度、线段的斜率和完成分裂后的线段数。阀值 T 可视接头几何特征参数的大小而取。

为了抽取接头轮廓的主要特征，在轮廓线分裂之后，需要对相邻的线段进行共线性分析也即合并操作。这样就使有一定弯曲的面的轮廓线连续起来，也使小间隙处的两段线段合并为一段。其思想是对所有相邻的线段进行斜率比较，如果二者之差小于给定的阀值，则将其合并，此过程递归进行，直至没有可以合并的线段为止。合并后线段的斜率取二者的均值，并求出合并后相应的线段起止点坐标、线段内的点数、长度和最后的线段数。

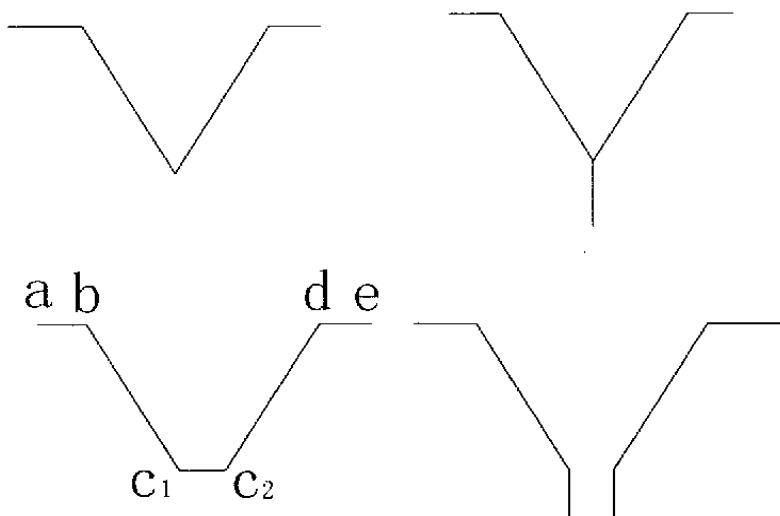


图 4.5 V型接头轮廓分割示意图

(2) 接头特征判断与提取

根据分析, 图 4.5 已包含了各种 V 型坡口接头的分割结果。

可以根据分裂合并后的数据判断接头特征并提取特征参数。其算法的简要过程如下。

① 根据线段数判断是否属于 V 型坡口。如果线段数不小于 4, 则转向②; 否则不是 V 型接头, 退出。

② 图 4.5 中线段 ab、bc₁、c₂d 和 de 都大于一定的长度, 并且 bc₁ 和 c₂d 的长度接近; ab 与 bc₁、c₂d 与 de 所成的夹角都大于 90°。并且此二者接近; c₁ 和 c₂ 点都在线段 ab 和 de 的下面。则此接头为 V 型接头。否则不是。

③ 比较线段 bc₁ 和 c₂d 的端点 c₁ 和 c₂, 如果合成为一个点, 则间隙为零; 否则判断 c₁ 和 c₂ 之间(包括多折线段)数据点数, 若大于一个数量阀值, 则此处为平底或定位焊点或有垫板; 否则取 c₁ 和 c₂ 之间距离作为间隙宽度。

④ 分别对线段 bc₁ 和 c₂d 作最小二乘拟合, 它们分别与由 c₁ 和 c₂ 连接所作直线的交点作为新的 c₁ 和 c₂, 此二点的中心作为接头跟踪的特征点。取线段 ab 和 de 的斜率的均值作为传感器相对工件的偏摆角。

如果需要, 还可以进一步识别出定位焊点, 其特征是 c₁ 和 c₂ 之间

这一段折线段多而且几乎没有断点。

b 搭接接头

搭接接头的轮廓分割算法同对接接头，分割后的搭接接头图像结构如图 4.6 所示。

下面简述接头类型判别过程和特征参数计算方法：

- ① 若分割后线段数为 3，则转向②，否则退出；
- ② 若两边线段的长度大于一定的长度阀值并且此二线段的斜率基本相等，则转向③，否则退出；
- ③ 若中间线段与两边线段所成的角度接近于 90° （如 $90^\circ \pm 10^\circ$ ），则转向④，否则退出；
- ④ 对 ab、bc 和 cd 线段内的点分别作最小二乘直线拟合，分别求三条直线的交点作为新的 b 和 cb 点和 c 点即为所求的特征点。取 ab 段的斜率为偏摆角参考值。

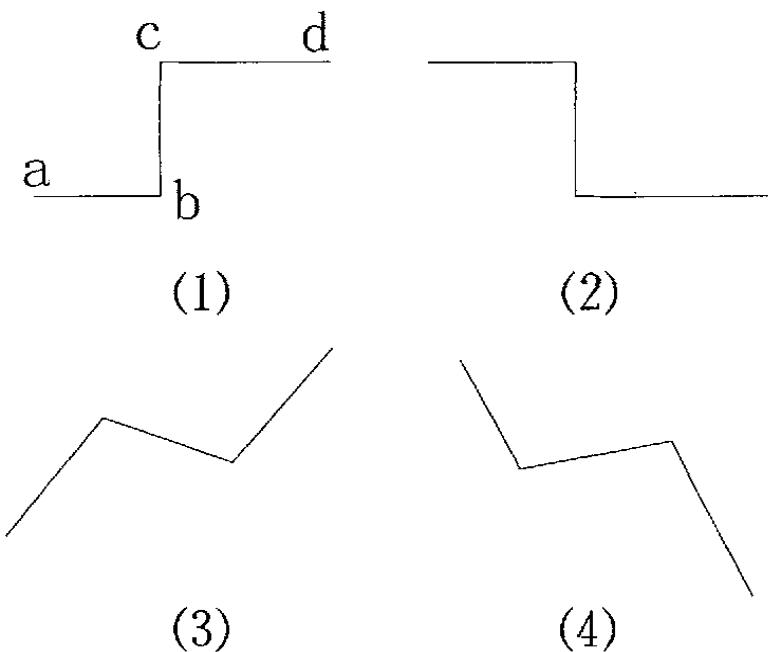


图 4.6 搭接接头轮廓分割示意图

实际中还可以作进一步验证，如线段 bc 的长度约等于板厚，图 4.6 的①、②情况时 bc 上点数非常少，③、④情况中间线段点数多一些。

找出搭接接头的特征点 b 和 c 之后，可根据实际情况取接头的跟踪点和焊枪的姿态，这与实际的焊接工艺有关，如可取距 b 点（b 为深度较大点）距离为 bc 长度三分之一处为跟踪点，姿态取与线段 ab 具有一定角度。

在弧焊机械手系统中，激光传感器在沿着预定轨迹扫描时，扫描产生一个表面的轮廓，这一轮廓通过计算机处理，寻找出工件位置及几何图形。计算机图像处理软件可以识别并处理（最多 9 处）扫描轮廓中的缺陷，缺陷包括飞溅、反光物、油污等。这些缺陷出现在扫描轮廓中，很有可能会给出错误的测量结果。如果激光头没有得到足够的光亮，软件就会报告“invalid”（不可用），该处就会记录并计算。如果有太多的“invalid”发生，扫描图象就会判断为“invalid”（例如，激光头盖未开或没有扫描物）。传感器依靠输入值寻找出特征位置并计算出几何图形。如果扫描的图象与标准几何图形偏离太远，计算将终止，防止发生碰撞事故、错误焊接等情形。

当目标位置找到后，位置的测量结果和几何数据会传送到机器人计算机进行处理，并发出进行位置的平移和焊接参数的调整的指令，然后通过各轴执行操作。

4.2 实际焊接时激光传感器寻找跟踪描述

根据转 8G 型转向架交叉支撑组成的结构，焊缝布置情况，结合弧焊机械手的焊缝跟踪功能，对于不同焊缝，我们采用了不同跟踪方法：

“直线”角焊缝：采用接触传感器寻找焊缝、电弧摆动跟踪

“环形”角焊缝：采用激光传感器寻找焊缝

盖板对接焊缝：采用接触传感器、激光传感器寻找焊缝

焊缝接头类型模板编号见表 4.1。

在实际焊接过程中，上下盖板与定位座连接“直线”角焊缝，采用接触传感器寻位，电弧摆动自动跟踪焊接；而“环形”角焊缝，采用激光传感器寻位跟踪，具体扫描编程过程见图 4.7，扫描程序见表 4.2；对

接焊缝采用接触传感器寻位，确定定位座的宽度尺寸，采用激光传感器扫描跟踪坡口尺寸。

通过接触传感器寻位跟踪、激光传感器寻位扫描跟踪，可以确定焊缝的位置，识别工件边缘。盖板与定位座连接环形搭接角焊缝及对接焊缝跟踪扫描，是通过多工步来完成的。通过几次寻找，即可以决定焊缝所处位置的偏差，然后自动将焊接程序整个或部分转移到适当的位置上，完成焊接过程。

表 4.1 焊缝接头类型模板编号^[8]

模板编号	接头类型	描述
0	搭接接头	下搭接接头模板
1	搭接接头	上搭接接头模板
2	对接接头	对接接头模板
255		激光传感器校零

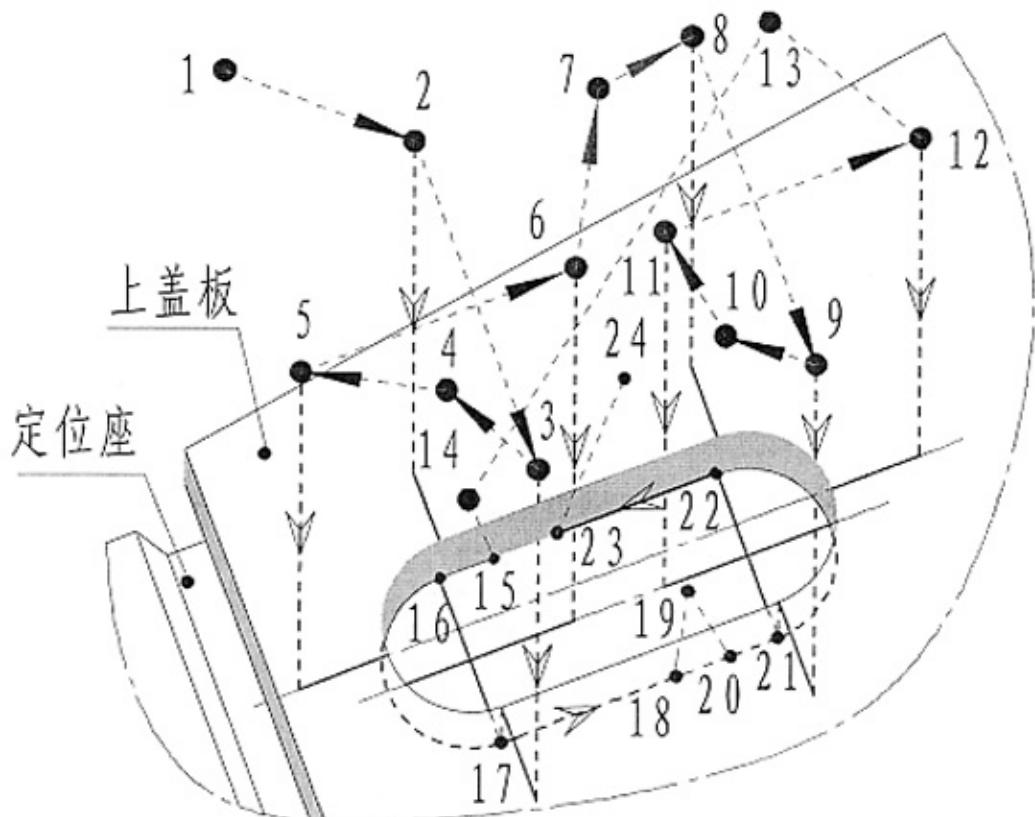


图 4.7 扫描路径示意图

表 4.2 扫描程序

序号	步点号	类 型	扩 展	备 注
1	2.0.0	空步		
2	3.0.0	空步	寻找开始	激光盖打开
3	3.1.0	空步线性	寻找组 1	激光+模板号 0=下搭接
4	3.2.0	空步	寻找中介	
5	3.3.0	空步	寻找中介	
6	3.4.0	空步线性	寻找组 2	激光+模板号 0=下搭接
7	3.5.0	空步	寻找中介	
8	3.6.0	空步	寻找中介	
9	3.7.0	空步线性	寻找组 3	激光+模板号 0=下搭接
10	3.8.0	空步	寻找中介	
11	3.9.0	空步	寻找中介	
12	3.10.0	空步线性	寻找组 4	激光+模板号 1=上搭接
13	4.0.0	空步	寻找结束	激光盖关闭
14	5.0.0	空步	位移开始	
15	6.0.0	空步		
16	7.0.0	线性工作步		
17	8.0.0	圆弧工作部		
18	9.0.0	线性工作步		
19	10.0.0	空步		
20	11.0.0	空步		
21	12.0.0	线性工作步		
22	13.0.0	圆弧工作部		
23	14.0.0	线性工作步		
24	15.0.0	空步	位移结束	

4.3 小结

- RTi2000 弧焊机械手配置的 ELS 激光传感器基于激光三角测量原理，采用图像处理软件进行接头类型识别和特征参数提取。
- 激光传感器在沿着预定轨迹扫描时，扫描产生一个表面的轮廓，这一轮廓通过计算机图像处理软件处理，寻找出工件位置及几何图形，可用于识别边缘、间隙和复杂结构。对于搭接及对接等焊缝，通过一次或几次寻找，即可以决定焊缝所处位置的偏差。
- 对于交叉支撑组成单边 V 形坡口锁底对接焊缝，采用接触寻位传感器和激光传感器进行复合跟踪。接触寻位传感器确定定位座的宽度边缘和位置，而激光传感器确定单边 V 形坡口的位置和形状，并可根据识别的坡口宽度选择跳转程序。
- 对于交叉支撑组成“环形”角焊缝，由于空间关系，只能采用激光传感器一种跟踪方式进行扫描跟踪，对扫描路径和扫描程序进行了描述。

第五章 影响激光传感器跟踪精度因素及改进措施

Rti2000型弧焊机械手为可编程序的示教再现示机器人，这种机器人可以在其工作空间内精确地完成示教操作。在弧焊机械手焊接过程中，如果焊接条件基本稳定，则弧焊机械手能够保证焊接质量。但是，由于各种因素的影响，实际焊接条件经常发生变化，例如，由于环境中粉尘、烟尘、坡口状况、加工误差、夹具装卡精度、工件表面状态和工件热变形等影响，引起激光传感器跟踪精度下降，从而引起焊枪偏离焊缝，导致焊缝质量下降，甚至失败^[7]。影响激光传感器跟踪精度的因素很多，我们从以下几方面加以分析。

5.1 系统校零及激光传感器校零对跟踪精度的影响

按照测量误差理论，任一测量结果都可以用下式表示：

$$\text{测量值} = \text{真实值} + \text{测量误差}$$

其中测量误差又分为过失误差、系统误差和随机误差三大类。过失误差是由于粗心大意引起的，是不该发生的，可以避免的。系统误差决定了测量结果的正确度，系统误差在数值上往往比随机误差大得多。随机误差是由许多对测定值影响较小、又不相关的多种因素综合引起的，随机误差决定了测量结果的精密度。

在弧焊机械手系统中，系统各轴的重复精度、激光传感器重复精度、系统所建立或选用数学模型及数值算法、激光本身特性对系统误差都有影响，这种系统误差是我们无法解决的，本文只考虑上述因素以外的其他因素对ELS激光传感器跟踪精度的影响。

应用弧焊机械手焊接时，首先在编制焊接程序前，应对系统及激光传感器进行校零。校零精度对系统误差的影响至关重要，弧焊机械手系统校零及激光传感器校零精度过低将引起系统误差，将直接影响激光传感器的跟踪精度和焊接效果。当系统发生碰撞或撞枪之后，原来建立的系统精度遭到了严重破坏，系统产生了较大误差，焊接不能正常进行，

这时必须立即进行系统校零及激光传感器校零。

为保证系统校零及激光传感器校零精度，我们采取了如下措施：

1. 认真阅读弧焊机械手使用操作说明书，严格依照操作程序进行系统校零及激光传感器校零。

2. 采取正确的校零方法和耐心细致工作态度，保证系统误差在允许限度内。特别是激光传感器校零更需要细心观察、耐心调整，并注意周围照明环境及电焊弧光对激光传感器校零的影响。

3. 每天焊接之前应检查确认系统零点与系统参考点是否重合，否则应重新进行系统校零。特别是在撞枪之后，必须马上进行系统校零及激光传感器校零，恢复系统原有精度，否则不得继续焊接。

通过上述分析可知，只有消除了系统校零及激光传感器校零不精确而引起的系统误差之后，随机误差愈小的测量才是既正确又精密的测量，弧焊机械手激光传感器跟踪精度才能得到保证。系统误差减小，弧焊机械手系统激光传感器跟踪精度才有保证，工件焊接质量才能够满足要求。弧焊机械手系统校零及激光传感器校零是保证激光传感器跟踪精度基本要求。

5.2 编程对激光传感器跟踪精度的影响

激光传感器的跟踪精度不仅在扫描寻位过程中形成，而且在编程过程中也会形成误差，称为程编误差。一方面程编误差是由程序控制原理和数学算法本身决定的，它是不可避免的；另一方面对于提取工件实物特征线、点的准确程度而引起的误差，就可通过适当的措施来减小程编误差。

编程前，首先要选择好工件，确保编程使用的工件与其他工件在形状、尺寸方面的一致性，并控制好组装质量，保证上、下盖板与定位座之间组装间隙不大于0.2mm，定位座、上下盖板定位准确。此外，工件表面状态良好，工件表面不得有粉尘、锈垢，上下盖板预处理底漆漆膜厚度均匀等。

在编制定位座与上下盖板焊接程序过程中，提取上下盖板长圆孔特征线、点时，事先用划针划出圆弧中心线、圆心、垂直线、切点，

然后在划出激光传感器扫描轨迹线，见图 4.7，其划线精度，决定弧焊机械手系统激光传感器跟踪精度，提高划线准确性和精度可以保证激光传感器跟踪精度，减小跟踪误差。

编写激光传感器跟踪程序时，正确选用焊缝接头类型模板及相关参数，确保激光传感器跟踪轨迹与事先设定的工件特征线重合，其误差不得大于 0.1mm。如果划线误差及激光传感器跟踪扫描时的运行轨迹偏离工件特征线，其精度超过 0.3mm 时，这时引起系统误差将会对跟踪结果产生较大影响，从而影响焊接效果，造成焊缝不对称或焊缝成形不良，见图 5.1，焊接实物照片见 5.2。

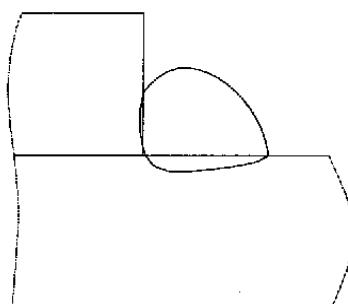
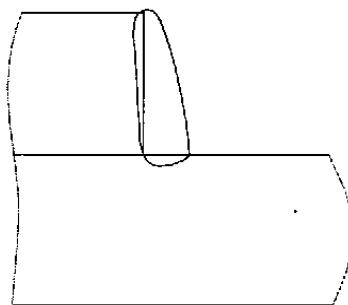


图 5.1 焊缝成形不良示意图

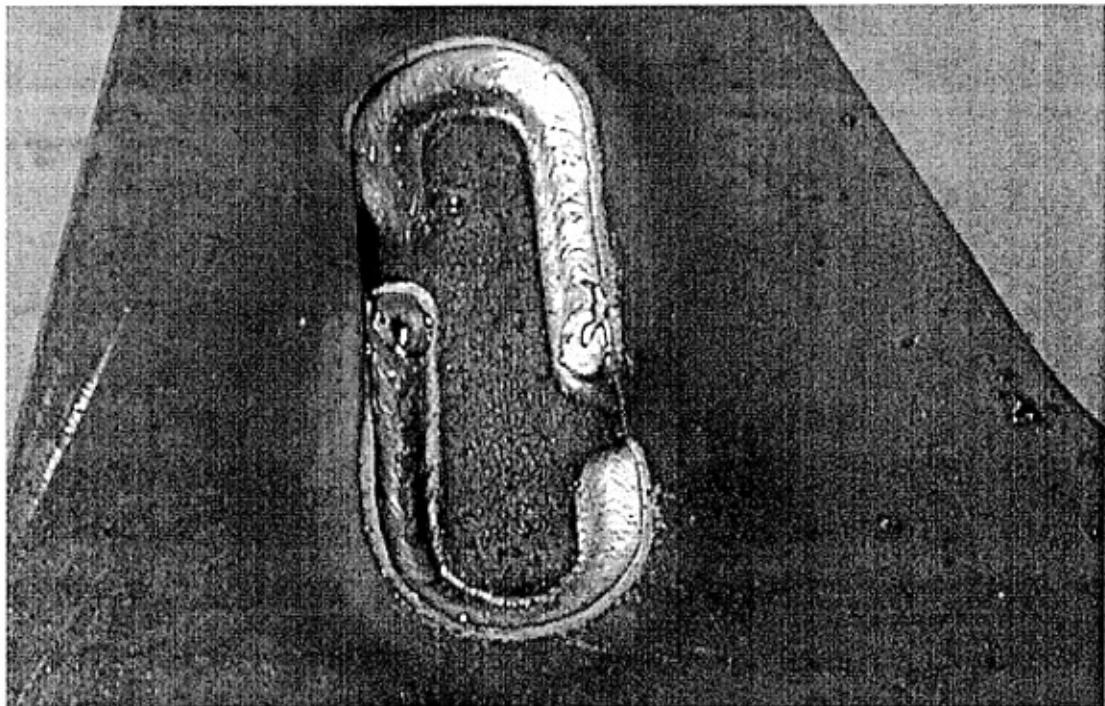


图 5.2 焊缝成形不良实物照片

经过多次反复摸索，我们最终确定了激光传感器最佳扫描轨迹，见图 4.7，并依此进行编程。

5.3 工件表面状态对跟踪精度的影响

激光传感器跟踪精度分为横向精度和纵向精度。横向精度和分辨率取决于激光光斑直径的大小和光电码盘值的精度。纵向精度和分辨率取决于点光的像在 CCD 上的位置、光的强弱及计算的精度。正常状态下，激光传感器光斑在 CCD 上成像的光强基本符合正态分布，光点中心在最大值附近。而工件表面漫反射比较强烈，暴光过度时，光强分布出现了一个很长的平坦区域，其值变化不大，出现所谓光晕现象。对于不同的材料，漫反射光所成的像在 CCD 上的光强变化是非常强烈的，对于表面光洁的工件，其光强可以使 CCD 器件一下子饱和，光强变化可以相差几千倍或几万倍甚至更高。即使是在同一工件中，由于表面加工粗糙度、

反射角度、锈斑等状态差别很大，其漫反射的光强变化也非常大，严重时导致跟踪失败，见图 5.3。

在实际焊接过程中，我们发现工件表面加工粗糙、盖板表面有粉尘时以及工件色差明显，对激光传感器跟踪精度有很大影响，严重时导致跟踪失败，提取不到工件的外形面貌及特征点，于是焊接过程自动停止。

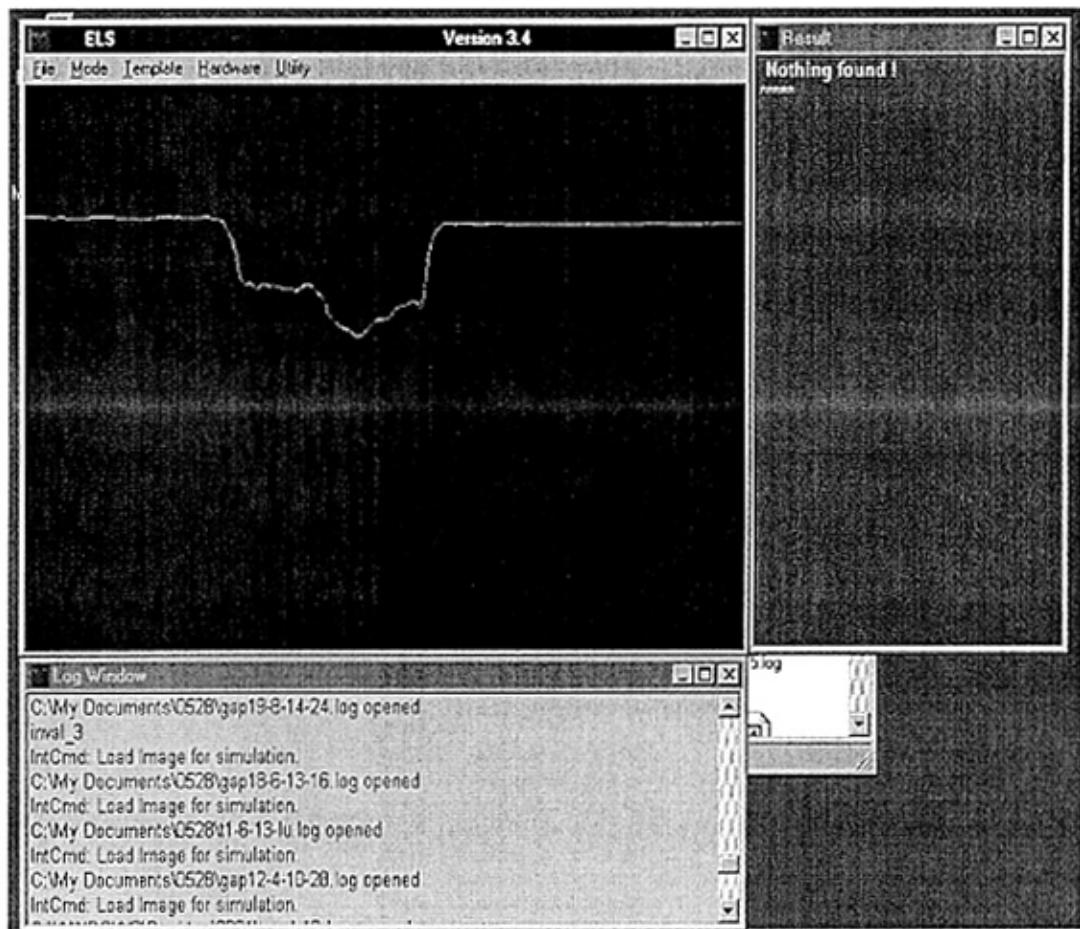


图 5.3 扫描跟踪失败图像

5.3.1 工件表面粉尘对跟踪精度的影响

如果工件表面有粉尘，采用激光传感器扫描跟踪时，一方面激光束照射的光能被粉尘颗粒吸收，于是反射光线大大减弱；另一方面反射角度改变，CCD 元件接受到光的信号大大减弱，对工件尺寸或距离产生误

判断，进而影响跟踪精度，严重时导致跟踪失败，见图 5.4。将工件表面粉尘清理干净，重新进行扫描跟踪时，激光传感器跟踪恢复正常，提取到工件坡口的特征点见图 5.5，从而判断扫描跟踪成功。

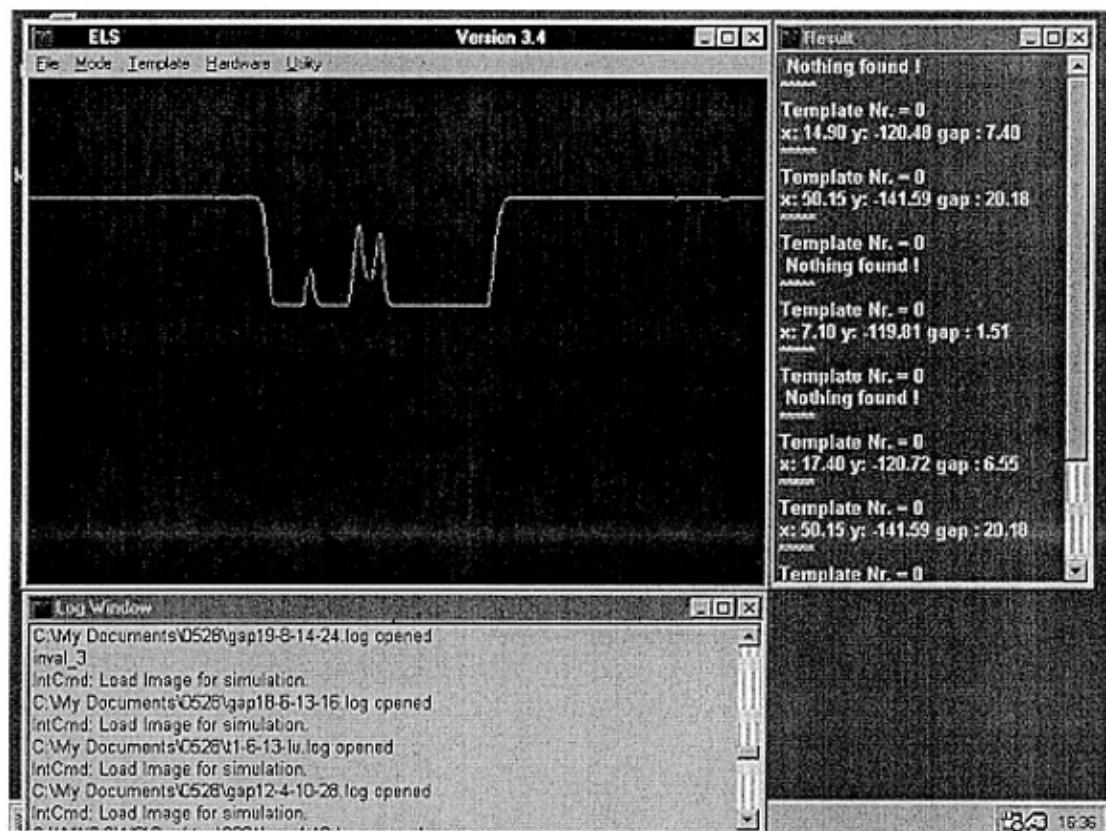


图 5.4 激光传感器跟踪失败图像

通过上述现象分析，工件表面粉尘及异物对激光传感器跟踪精度和扫描成功与否有影响。于是，我们对操作人员提出明确要求，工件组装时，要事先清除工件表面上粉尘及异物，避免粉尘颗粒引起激光光束折射，从而提高激光传感器跟踪精度和跟踪成功率，消除工件表面上粉尘及异物对激光传感器跟踪效果的影响。经过采取上述措施后，取得了比较好的效果，一次扫描成功率有所提高。

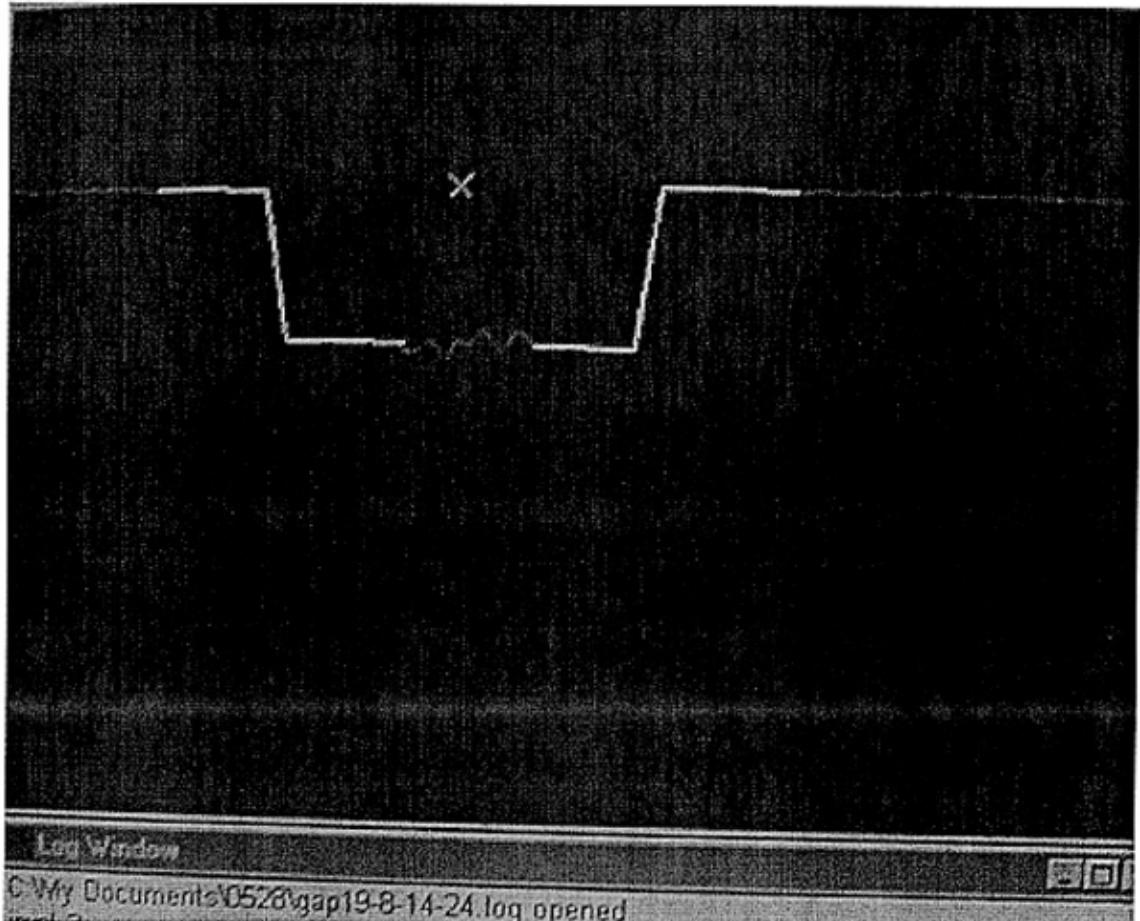


图 5.5 激光传感器扫描轮廓图

5.3.2 工件表面粗糙度对跟踪精度的影响

在交叉支撑组成结构中，定位座由锻造毛坯经机加工而成。由于加工原因，定位座机加工表面粗糙、纹理明显，见图 5.6，激光扫描时激光束经过工件表面时会引起激光光束漫反射的角度变化，CCD 器件不能接受到足够的光线，导致跟踪精度降低，从而影响焊接效果，严重时激光传感器跟踪失败，见图 5.7，跟踪成功率不足 40%。

在认识到工件表面质量对激光传感器跟踪精度和效果有影响后，我们对定位座配件表面加工质量提出了明确要求，表面粗糙度在 Ra6.3 以下，并要求工件不得有明显的加工纹理。定位座配件表面加工质量提高

后，激光传感器跟踪效果有所改善。

为进一步提高激光传感器跟踪成功率和跟踪寻位效果，我们尝试在定位座坡口表面涂“品蓝”或防飞溅膏等措施，减小工件表面金属光泽对激光传感器扫描光束的折射，激光传感器跟踪成功率提高到80%以上，跟踪效果非常好。

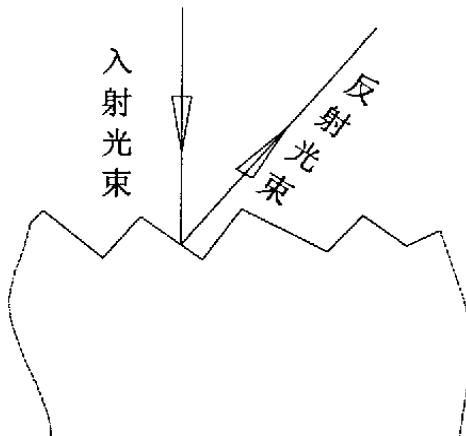


图 5.6 定位座粗糙表面激光束反射示意图

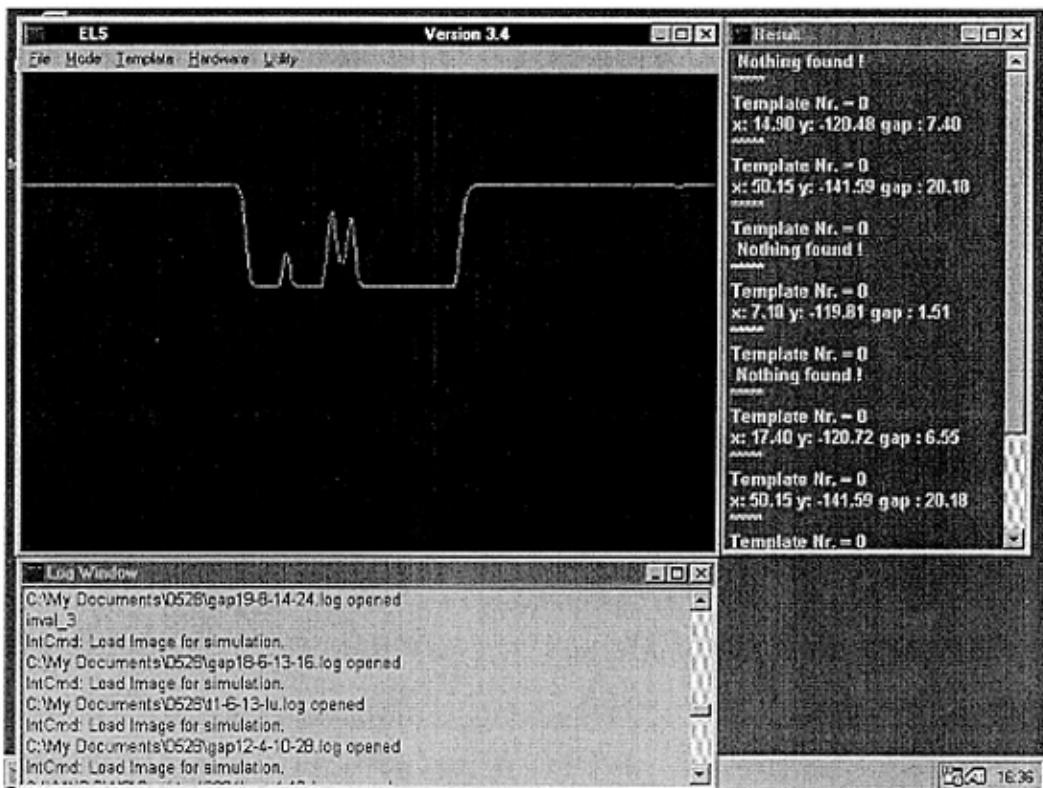


图 5.7 激光传感器跟踪失败图像

5.3.3 上下盖板冲裁边缘压痕对跟踪精度的影响

在交叉支撑组成结构中，上、下盖板由钢板落料冲裁而成，在冲压过程中其边缘会产生压痕，见图 5.8。当盖板压痕向上组装时，在激光传感器扫描过程中，激光光束照射压痕时，产生散射条件变化，会造成测量高度发生变化，扫描跟踪结果不能反映实际高度，产生较大测量误差，从而影响激光传感器跟踪精度，进而影响焊接效果。

鉴于上、下盖板边缘冲裁压痕的影响，在组装盖板时我们将有压痕的一侧向下组装。这样，环形搭接角焊缝边缘与盖板表面齐平，焊缝边缘表面状态与其它部位一致，激光光束照射焊缝边缘附近时不会发生明显变化，为激光传感器准确识别焊缝位置和形态创造了条件，跟踪效果有所改善，焊接时焊缝焊角尺寸达到技术要求，减少了焊缝“熔边”现象产生，见图 5.9。

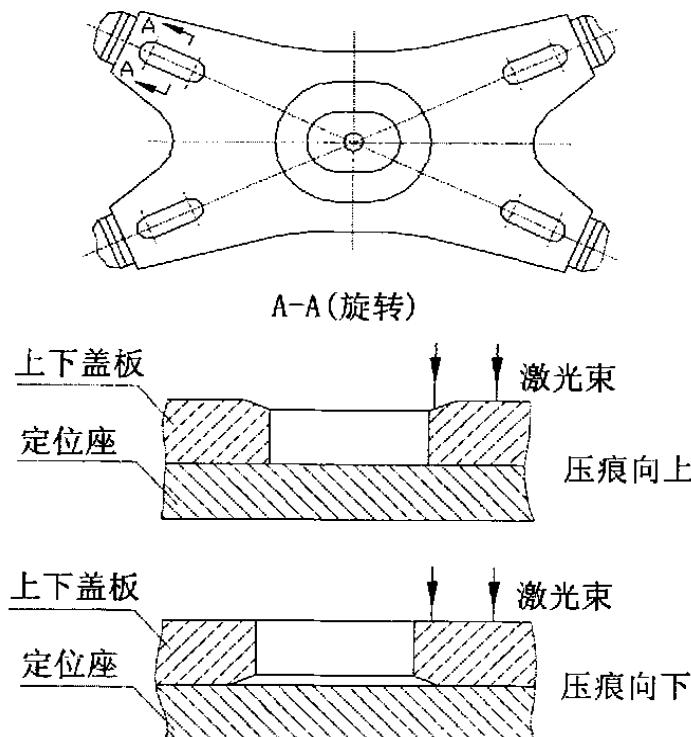


图 5.8 上下盖板边缘冲裁压痕组装示意图

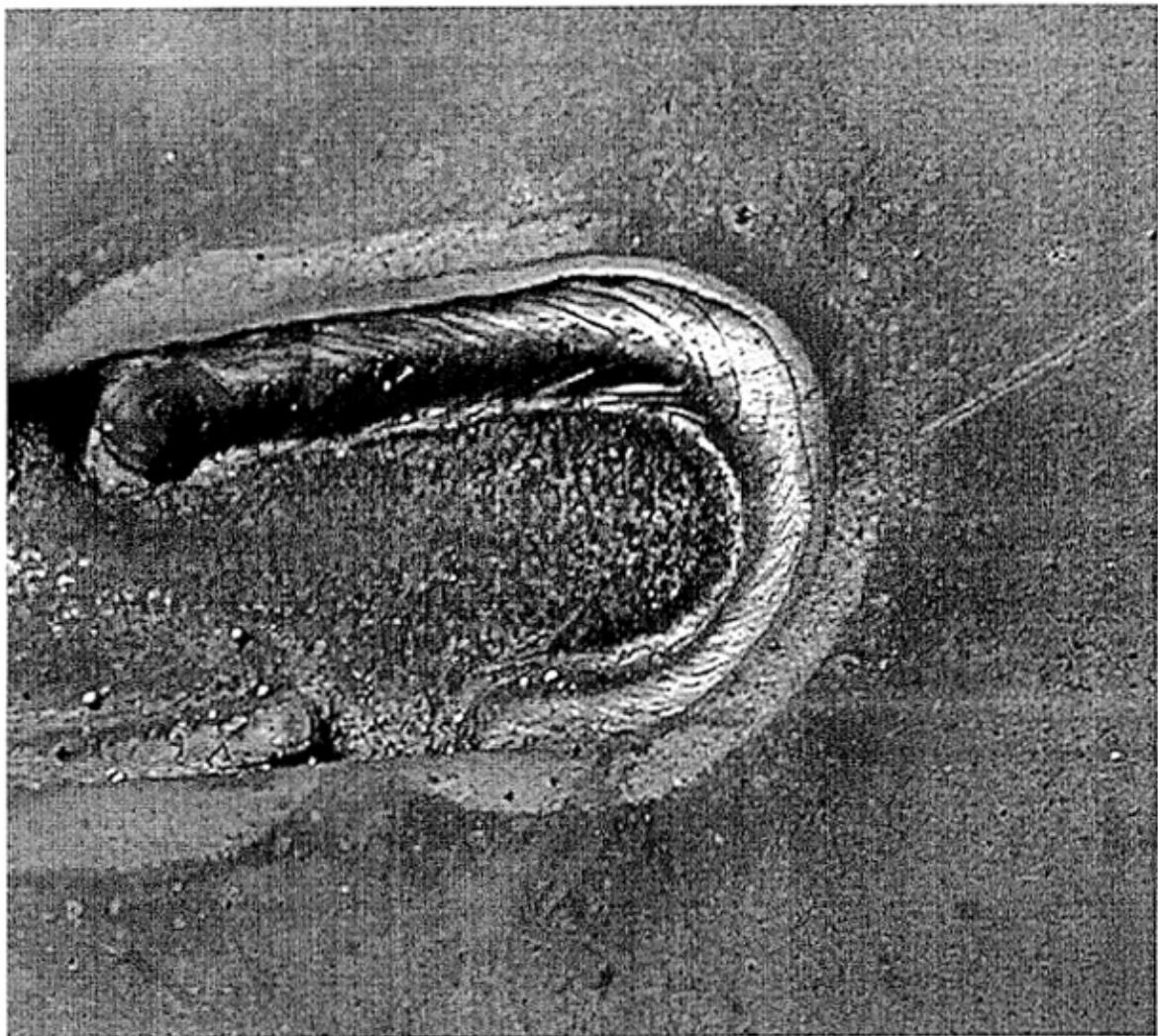


图 5.9 焊缝熔边现象图片

5.4 焊缝两侧金属色差对跟踪精度的影响

根据转 8G 转向架交叉支撑组成的设计结构，定位座与上下盖板组装面经过机械加工，呈金属光泽，而上下盖板表面经抛丸处理，并涂刷预处理底漆，二者色差明显。激光扫描时，定位座焊缝表面散射光比较强烈，激光传感器跟踪成功率很低，而上下盖板表面散射光强度降低，二者产生明显差异，影响激光传感器的跟踪效果和跟踪精度。实际经验证明，焊缝两侧金属色差要小，如果色差过大，会造成激光传感器的跟踪偏移^[9]，见图 5.10。

为解决工件色差问题，我们采取了在定位座机加工表面涂抹防飞溅膏或“品蓝”措施。定位座涂抹防飞溅膏或“品蓝”后，激光传感器跟踪扫描时，定位座表面散射光不再强烈，有效地减少了激光光束折射，

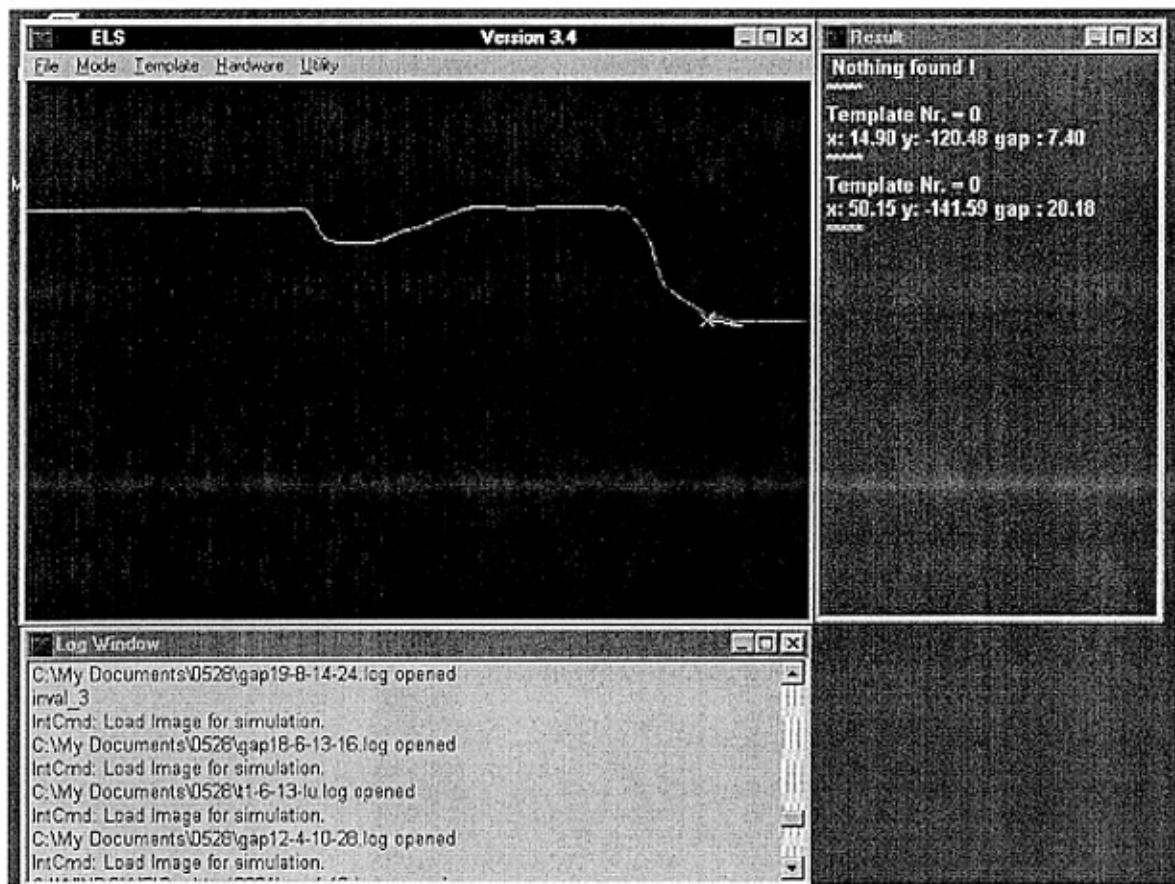


图 5.10 跟踪偏移图像

激光传感器跟踪精度和跟踪成功率明显提高，成功地解决了定位座机加工表面反射和色差对激光传感器的跟踪效果和跟踪精度问题，保证弧焊机械手系统正常生产，图 5.11 为消除色差影响跟踪图像。

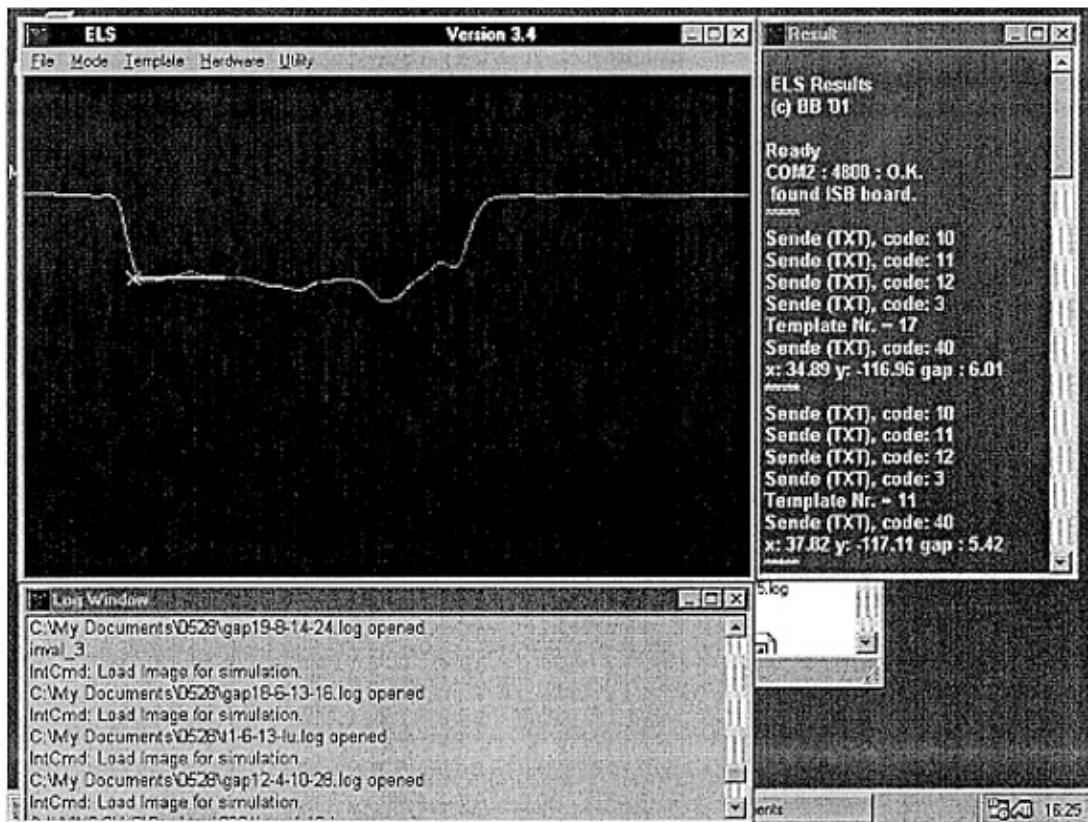


图 5.11 消除色差影响跟踪图像

5.5 上下盖板与定位座组装间隙对跟踪精度的影响

在交叉支撑组成组裝过程中,由于上下盖板本身平面度超差、定位座高度差异及组焊夹具等原因,往往定位座与上下盖板之间产生组裝间隙。定位座高度差异及组裝间隙的存在会使盖板上平面的绝对高度相对发生变化,激光传感器会检测到相应变化,其计算机会发出z方向调整指令,自动调整的结果引起焊枪实际焊接位置发生变化,见图5.12,焊枪高度变化量为:

$$\Delta H = f(h_1 + \Delta h)$$

式中: ΔH —表示焊枪高度变化量

h_1 —表示定位座与上下盖板之间组裝间隙

Δh —表示定位座与编程时采用的定位座高度差

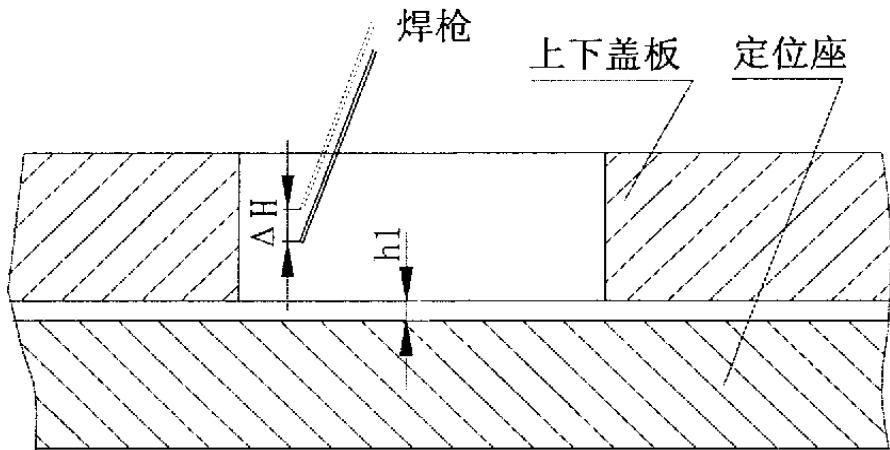


图 5.12 组装间隙对跟踪效果的影响

弧焊机械手焊接时，根据激光传感器跟踪结果会自动调整焊枪位置及姿态，必然会影响焊缝质量。大家知道，定位座与上下盖板之间的组装间隙越大，需要更多的填充金属，才能保证焊缝外形尺寸规定要求，组装间隙不均匀，实际焊缝外形尺寸不均匀变化，焊缝成型不理想，有的焊缝“溢出”，有的焊缝填不满，实际焊接效果见图 5.13。

上下盖板与定位座组装间隙与编程时间隙的差异和变化对激光传感器跟踪精度是有影响的，其差异越小，影响程度越小。减小工件组装间隙，可以提高激光传感器跟踪精度，当盖板组装间隙超过一定数值时，焊缝尺寸难以保证。将上下盖板与定位座组装间隙控制在一定数值以下，才能确保焊接质量。

于是我们要求焊接操作人员加强责任心，提高工件组装质量。组装前检查上下盖板的平面度，不平度不得超过 0.5mm，上、下盖板与定位座组装间隙不得大于 0.2mm，并对定位座高度尺寸进行严格控制。经过采取上述措施后，工件组装质量得到了保证，弧焊机械手焊接效果有所改善，从而减小了工件组装间隙对激光传感器跟踪精度和焊接效果的影响。

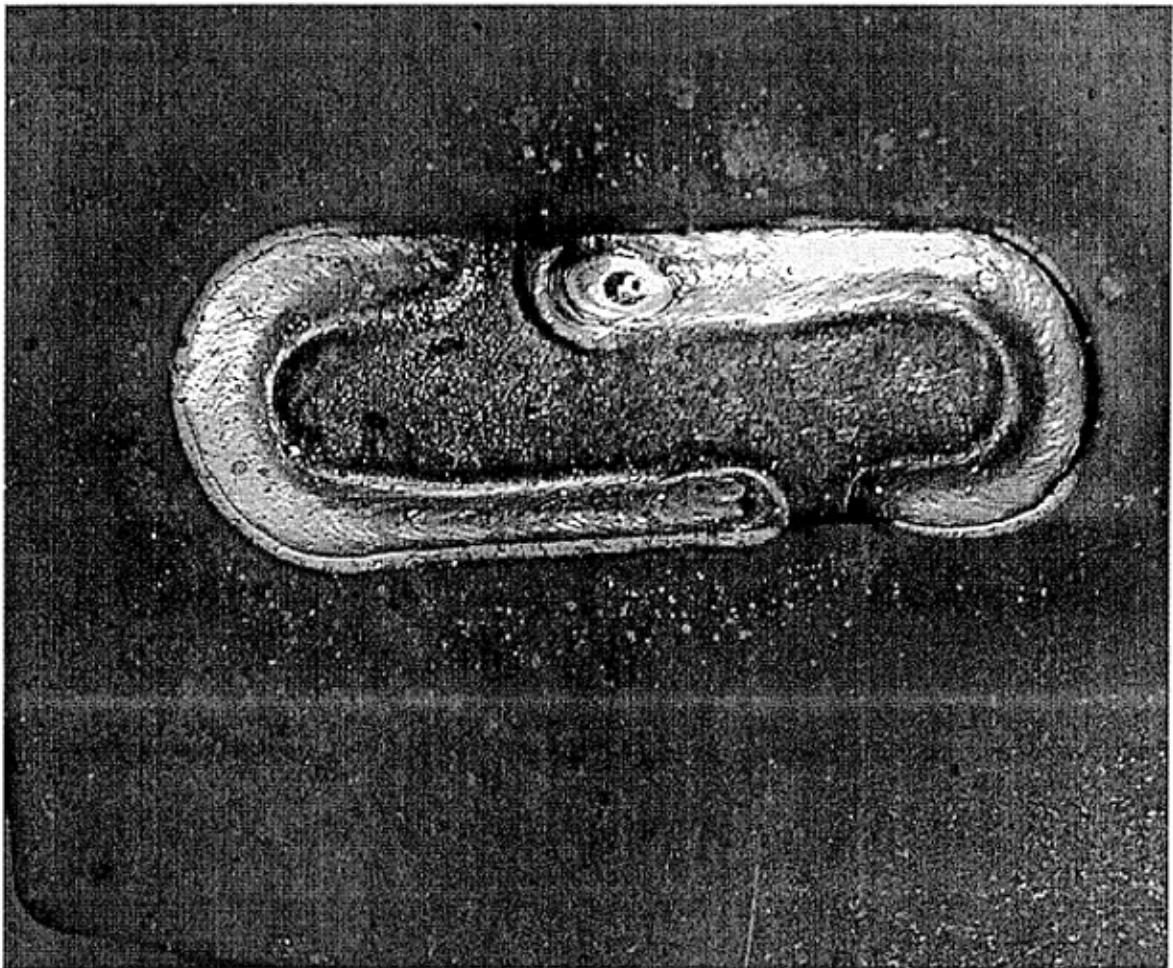


图 5.13 焊缝实物照片

目前弧焊机械手还不能自动检测到组装间隙的变化，并根据这一变化而自动调整焊接规范的功能，在实际焊接过程中，会造成组装间隙增大焊脚尺寸减小的现象，需要在数学模型方面加以解决，需要完善机器人程序。

5.6 工件旋转及平移对跟踪精度的影响

在交叉支撑组成组装过程中，由于组焊夹具定位精度原因及组焊人员的责任心问题，往往产生盖板旋转或平移现象。

当上下盖板绕组焊夹具定位杆中心 O 旋转时，旋转角度为 α 。激光传感器沿示教设定轨迹 AB（绝对坐标）进行扫描，激光光束与工件上半

圆 O_2 交于 D、E 点，计算机则自动提取线段 DE 中心特征点 O_3 ；再沿特征点 O_3 继续扫描，扫描轨迹与直线 OM 平行，与工件上半圆 O_2 交于 F 点。

根据上述扫描结果，计算机随即判断工件圆心点 O_3 ，圆弧半径为 O_3F ，从扫描轨迹上可以看出，弧焊机械手判断工件的圆心位置偏离了工件实际中心，并且圆弧半径有所减小，见图 5-14。

在直角三角形 $\triangle O_0G$ 中

$$OG = O_0G / \cos \alpha = L / \cos \alpha \quad \text{式(5.1)}$$

式中 L 为给定数值， $L = 285\text{mm}$ 。

$$\text{于是有 } O_2G = OG - O_0G = L (1 / \cos \alpha - 1) \quad \text{式(5.2)}$$

在直角三角形 $\triangle O_2O_3G$ 中

$$O_2O_3 = O_2G \cos \alpha = L (1 - \cos \alpha) \quad \text{式(5.3)}$$

式中 L 为给定数值， $L = 285\text{mm}$ 。

$$\text{于是有 } O_3F = O_2F - O_2O_3 = R - L (1 - \cos \alpha) \quad \text{式(5.4)}$$

式中 $R = O_2F$ 为圆弧半径， $R = 15\text{mm}$ 。

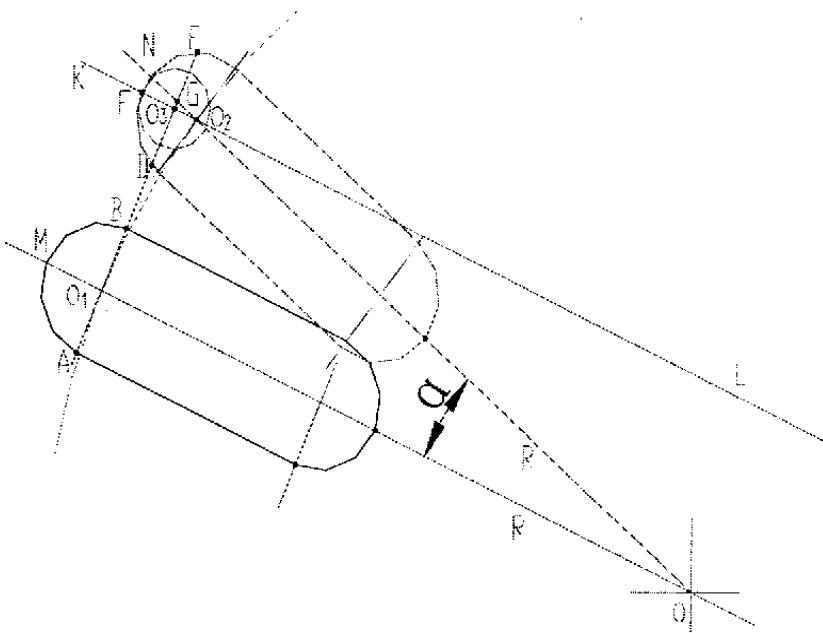


图 5.14 工件组装旋转时扫描示意图

表 5.1 工件旋转对扫描结果的影响

工件旋转角度 α (度)	圆弧中心偏移量 O_2O_3 (mm)	判断圆弧半径 O_3F (mm)	工件圆弧半径 (mm)
1	0.04	14.96	15
1.5	0.10	14.90	
2	0.17	14.83	
2.5	0.27	14.73	
3	0.39	14.61	

为了防止工件组装时产生平移或绕中心轴旋转组装误差，消除或减小激光传感器跟踪误差，根据以上分析结论，我们对气动组合卡具进行了整改并采取提高组装质量措施：

措施一，更换工件中心定位轴，增加中心定位轴直径；盖板冲孔模具磨损后，及时进行修理或更换，这样可以减小工件中心定位轴与工件中心孔的间隙，防止工件产生比较大的偏移。

措施二，增加盖板旋转限位装置，防止盖板产生过大的旋转角度，把工件组装时产生的旋转角度控制在 1.5° 以下。

措施三，增强操作人员的工作责任心，保证组装质量，把组装时产生的旋转偏差、平移偏差控制在最小程度。

通过采取上述有效措施，保证了工件组装质量，确保了激光传感器扫描跟踪精度，焊接质量稳定提高。

5.7 其他因素对跟踪精度的影响

激光传感器安装在焊枪上，与焊枪平行。激光传感器外面设置了防护盖和防护玻璃。保护仓盖上防护玻璃长时间使用后，表面不洁净，也会影响激光传感器的跟踪精度和跟踪效果。一方面，要求经常检查并维持防护玻璃整洁；另一方面，要定期更换新的防护玻璃，从而维持激光传感器的跟踪精度，保证跟踪正常。

弧焊机械手安装在厂房中间，没有设置独立操作间，与临近电焊、打磨工序也未设置屏障，弧焊机械手操作场所极易受到电焊弧光的干扰、

打磨粉尘的侵袭，这些因素都不利于激光传感器正常工作。此外，弧焊机械手周围大气的热流、风速、密度变化都会引起大气折射率的变化，从而使激光束产生极微小的偏离^[6]。

通过上述分析，我们知道，影响激光传感器跟踪精度和效果的因素是多方面的，其应用是一个复杂的系统工程。在实际应用弧焊机械手焊接过程中，我们应运用系统的观点，从多方面采取提高激光传感器跟踪精度和跟踪成功率的措施，从多方面创造良好的应用环境。

经过精心组织并实施，采取改善工作环境，提高工件机加工质量、提高工件组装质量等一系列综合措施后，保证了激光传感器跟踪精度和跟踪效果，焊缝质量明显改善，取得了令人满意的效果，在弧焊机械手焊接交叉支撑组成方面积累了丰富经验。

5.8 小结

- 影响激光传感器跟踪精度和效果的因素是多方面的，其应用是一个复杂的系统工程，某一环节出现问题，将影响激光传感器跟踪精度和跟踪效果。
- 弧焊机械手对工件的加工尺寸、表面质量及工件装配精度要求十分严格，接头坡口、组装间隙、装配等误差要足够小，在弧焊机械手焊接过程中，如果焊接上述条件基本稳定，激光传感器跟踪精度得到保证，则弧焊机械手能够保证焊接质量。
- 由于环境中粉尘、烟尘、坡口状况、加工误差、夹具装卡精度、工件表面状态和工件热变形等影响，将引起激光传感器跟踪精度下降，从而引起焊枪偏离焊缝，导致焊缝质量下降，甚至失败。
- 采取提高系统校零精度、激光传感器校零精度，减小工件色差，减少环境中粉尘、烟尘的危害以及提高工件装配质量等措施，对提高激光传感器跟踪精度和跟踪效果是有效的。
- 编程时所使用的工件的尺寸精度、装配质量、表面状态与正常焊接时的状况要尽量一致，对于保证激光传感器跟踪精度和跟

踪效果是非常重要的。

- 当工件组装出现偏差时,激光传感器通过扫描可以决定焊缝所处位置的偏差,然后自动将焊接程序整个或部分转移到适当的位置上。如果偏差超过允许限度,激光传感器跟踪精度下降。

第六章 结 论

从转 8G、转 8AG 型转向架交叉支撑组成结构和对其焊缝质量要求上看，采用焊接机器人进行焊接是比较好的选择。采用弧焊机械手焊接交叉支撑组成时，对工件的加工尺寸、表面质量、工件装配精度以及人员素质等诸多方面要求十分严格，接头坡口、组装间隙、装配等误差要足够小^[10]，在弧焊机械手焊接过程中，如果焊接上述条件基本稳定，激光传感器跟踪精度得到保证，则弧焊机械手能够保证焊接质量。如果周围环境、工件表面状态以及工件装配质量不能满足要求，激光传感器寻找焊缝位置时将产生偏差，引起跟踪精度下降，严重时跟踪失败。采取有效措施可以，提高激光传感器跟踪精度和跟踪效果。通过研究与分析得出以下结论：

- 6.1 弧焊机械手系统校零和激光传感器校零并保证校零精度，减小系统误差，是保证激光传感器跟踪精度的前提。
- 6.2 编制焊接程序时，提取工件位置及形状的特征点、线的精度，对激光传感器跟踪精度有影响。划线精度越高，有利于保证激光传感器跟踪精度。
- 6.3 减小定位座加工表面粗糙度，提高表面光洁度，可以提高弧焊机械手系统激光传感器跟踪精度。采取在定位座机加工表面涂抹防飞溅膏或“品蓝”措施，能有效地减少激光光束折射，激光传感器跟踪精度和跟踪成功率明显提高，成功地解决了定位座机加工表面反射和色差问题。减小工件表面色差，可以提高激光传感器跟踪精度，减小跟踪误差，提高跟踪可靠性。
- 6.4 工件表面上杂物、粉尘、飞溅颗粒对弧焊机械手系统激光传感器跟踪精度有影响。保证工件表面干净，减少粉尘是提高激光传感器跟踪精度重要手段。
- 6.5 实际焊接工件与编程工件状态不同时，系统能够在一定范围内自动调

整和纠正，但超过允许限度时，激光传感器跟踪精度将受到影响，焊缝质量变差。

上、下盖板平面度，上、下盖板与定位座组装间隙，工件组装时发生旋转、平移对激光传感器跟踪精度和焊接效果产生影响。当盖板组装间隙超过一定数值时，焊缝尺寸难以保证；工件旋转角度超过一定数值时，激光传感器跟踪精度下降，焊缝质量变差。

6.6 建立适应转 8AG 型转向架交叉支撑组成弧焊机械手系统激光传感器跟踪精度的数学模型，进一步完善弧焊机械手焊接交叉支撑组成焊缝程序，调整好焊枪姿态，从而提高激光传感器跟踪精度和跟踪效果。

致 谢

在论文即将完成之际，作者谨向为作者提供帮助的老师、同学、同事以及亲朋好友表示衷心感谢。

作者谨向导师宋永增、吴鑫表示诚挚谢意和衷心感谢，感谢两位导师在论文选题、研究和论文撰写过程中给予的精心指导。两位严谨的学术作风和求实精神给作者留下了深刻印象，是作者学习的楷模，对作者在今后工作中将产生深远影响。

作者谨向北京二七车辆厂王古信高级工程师衷心感谢，感谢在论文写作过程中给予作者的帮助和指导。

参考文献

- [1] 北京二七车辆厂. 交叉支撑装置技术改造可行性研究报告, 2001.
- [2] 铁道部运输局装备部. 2001 年货车交叉支撑技术转向架实施工作计划(运装货车〔2001〕28号)
- [3] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 陈伯施. 铁路货车交叉支撑转向架. 中国铁道出版社
- [5] igm 机器股份有限公司. 操作使用说明书. 2002. 5
- [6] 孙长库, 叶声华. 激光测量技术. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- [7] 吴林, 陈善本. 智能化焊接技术. 国防工业出版社, 2000.
- [8] igm Robotersysteme AG. Programming ELS-Distance Sensor. 2001. 12
- [9] 王炎金. 焊接机器人在铁路客车制造上的应用. 焊接技术, 2001 (7): 21~23
- [10] 俞尚知. 焊接工艺人员手册. 上海科学技术出版社. 1991. 2

攻读硕士学位期间发表的论文及科研成果

作者在攻读工程硕士学位期间,发表论文和科研获奖情况如下:

发表的论文:

《C 级钢锁座焊缝裂纹原因分析及对策》,《机车车辆工艺》, 2006 年第 2 期。

科研获奖情况:

1. “转 8G 交叉支撑组分组成自动焊接生产线”项目获北京二七车辆厂 2003 年科技立项三等奖。
2. “转 8G 交叉支撑组成弧焊机械手自动焊”项目获北京二七车辆厂 2003 年科技立项二等奖。