

文章编号:1006-2467(2002)-S2-0029-04

# 用于激光焊接的关节型机器人运动误差分析

岁波, 都东, 何云峰, 韩翔宇, 张 骅

(清华大学 材料加工工程及自动化研究所, 北京 100084)

**摘 要:** 针对用于激光焊接的关节型工业机器人运动误差控制问题, 根据关节型工业机器人伺服控制和运动学原理, 分析了机器人运动误差的积累过程, 并对运动误差和伺服系统误差分别进行了测量和比较. 结果表明, 伺服系统误差是运动误差的重要组成部分. 该结论对机器人激光焊接的路径控制具有一定参考意义.

**关键词:** 工业机器人; 激光焊接; 运动误差

**中图分类号:** TP 242<sub>y</sub>      **文献标识码:** A

## Motion Error Analysis of Articulated Robot for Laser-Welding

SUI Bo, DU Dong, HE Yun-feng, HANG Xiang-yu, ZHANG Hua

(Research Inst. of Materials Process Eng. and Automation, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to control the motion error of articulated industrial robot for the application of laser welding, the accumulation process of motion error was analyzed based on the control and kinematics theory of the articulated robot. Both the motion error and the servo error were measured and compared. From the result, it is shown that the servo error is an important factor of the motion error. The control of robot laser welding path can be afford with reference to this conclusion.

**Key words:** industrial robot; laser welding; path accuracy

激光拼焊技术在提高汽车生产质量,降低生产成本等方面具有相当的发展潜力. 目前的激光拼焊设备一般采用坐标式门架结构, 这种设备体积笨重、运动灵活性差, 不适应汽车制造高度柔性化生产的需要. 采用关节型工业机器人是解决这一矛盾的最佳途径. 然而, 目前关节式工业机器人在应用于激光焊接这一高精度加工时还存在一定困难, 这主要集中在运动误差的控制方面. 对工业机器人精度进行理论分析, 指出误差来源, 建立误差模型, 从而寻找机器人运动精度补偿的方法, 可为激光焊接机器人的研究提供基础.

经典的 Denavit-Hartenberg (D-H) 方法给出了串联关节型工业机器人运动误差分析的基础<sup>[1~3]</sup>. 机器人的运动误差按根源可以分为静态误差、动态

误差和伺服误差<sup>[4]</sup>. 静态误差和动态误差都可以直接或折算表达成 D-H 参数的误差, 方便于利用机器人运动学和动力学模型来建立机器人的误差模型. 而伺服系统的误差具有不确定性, 一般采用随机数学的方法进行分析<sup>[5]</sup>. 这种方法计算过程复杂、模型建立困难、难以应用, 而实际上由伺服系统引起的误差是存在一定规律性的<sup>[6]</sup>, 因而研究伺服系统误差的产生规律以及对关节型机器人运动误差的影响, 可有效提高机器人激光焊接的加工质量.

本文针对激光焊接机器人系统的构成, 研究了系统对各组成部分参数尤其是机器人性能参数的要求. 并对关节型机器人的运动误差以及伺服系统误差进行了分析和测量.

## 1 用于激光焊接的机器人性能分析

与激光焊接性能有密切关系的机器人性能指标

主要有重复定位精度、轨迹位置准确度、轨迹姿态准确度和轨迹速度波动. 各项指标与激光焊接质量的关系与激光焊接系统有关.

激光焊接系统由激光器、光路传输系统、辅助气体输送系统、激光冷却系统、激光防护装置等组成. 其中激光器和光路传输系统与焊接质量密切相关.

目前, 可用于焊接的激光器有  $\text{CO}_2$  激光器和 Nd: YAG 激光器.  $\text{CO}_2$  激光波长分别为  $10.6 \mu\text{m}$ , 必须采用折射镜完成能量的传输, 光路传输系统复杂, 传输效率低. 只有 Nd: YAG 激光器波长为  $1.06 \mu\text{m}$  恰能通过普通的石英光纤进行传输, 柔性好, 效率高. 脉冲 Nd: YAG 激光器由于在相同输入功率的情况下可以获得更高的瞬时功率, 更适合激光焊接的需要.

光纤传输对 Nd: YAG 激光的焊接性能有一定程度的影响, 主要表现在光斑截面的能量分布上. 试验表明<sup>[7]</sup>, 在由光纤传输的脉冲 Nd: YAG 激光焊接中, 激光焦点相对工件表面垂直位置变化  $0.5 \text{ mm}$ , 激光与工件表面的人射角度在  $\pm 8^\circ$  范围内时对焊接成形质量影响不大. 对于激光拼焊来说, 要求激光在连接间隙小于  $0.05 \text{ mm}$  的对接缝隙上进行焊接. 对焦点位置的精度要求更高. 所以机器人的轨迹位置精度必须控制在  $0.2 \text{ mm}$  以下, 轨迹姿态精度必须控制在  $5^\circ$  以内才能够满足加工的要求.

由于激光耦合镜头和气体喷嘴的总重不超过  $4 \text{ kg}$ , 因而, 一般选择抓重能力大于  $4 \text{ kg}$ , 运动空间半径在  $1 \text{ m}$  左右的关节型机器人. 目前这种类型的机器人重复定位精度较高, 一般在  $0.1 \text{ mm}$  以下; 轨迹姿态准确度和轨迹速度波动也基本满足激光焊接的要求. 只有运动轨迹位置准确度较大, 往往比重定位精度大一个数量级, 在  $1 \sim 2 \text{ mm}$  以上, 必须采取一定措施提高其运动轨迹精度, 才能满足激光焊接的要求.

## 2 关节型机器人运动误差分析

关节型工业机器人的运动误差积累模型如图 1 所示. 造成关节机器人运动误差的因素包括编码器测量误差、计算误差、伺服误差、静态误差以及动态误差.

由于编码器测量精度和微处理机计算能力的提高使得编码器测量误差和由计算字长的限制而引起的计算误差都变得越来越小, 不会对机器人整体运动误差造成太大影响, 可以忽略不计. 而静态误差为机器人各构件的结构参数误差, 它是由制造和装配误差引起的; 静态误差属于固定系统误差, 在相当长

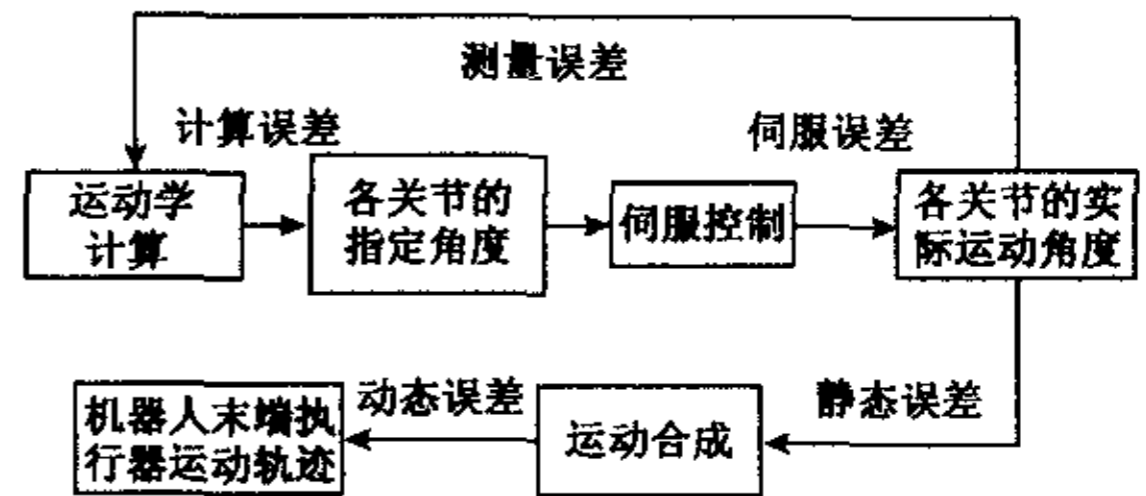


图 1 关节型工业机器人的运动误差积累模型

Fig. 1 Dynamic error accumulation model of articulated robot

的时间内保持不变, 容易补偿消除.

伺服误差由各关节伺服控制系统的插补控制引起. 机器人的关节信号指令只是定期地(如每  $15 \text{ ms}$  一次)由微处理机或协处理器发出, 以便处理器有足够的时间完成路径规划等运动学的各种计算. 而在这一时间周期内, 机器人各关节的运动是由各关节处理器根据信号指令以一定频率进行插补运算来控制的. 由于局部插补运算并不考虑机器人末端位置, 必然造成机器人的运动误差. 此外伺服电机对于处理器的指令的动态响应为毫秒量级, 这一响应过程也是造成伺服误差的重要因素.

动态误差由构件运动惯性、弹性变形和机械传动中的间隙而产生, 动态误差不是固定值, 但是有确定性, 可以通过建立机器人的动力学模型进行分析和估算.

上面所说的测量误差和计算误差一般数值较小可以忽略不计. 静态误差是固定值, 所以矫正方法简单. 动态误差和伺服误差受各种因素影响, 难于建模分析. 但他们都受机器人的运动速度影响. 速度越大惯性越大, 运动路径上插补点越少, 机器人的精度越差. 另外, 由于关节型工业机器人的特点, 机器人在不同的位姿、不同的路径下运动, 由于各关节的角度数值不同, 造成误差的传递积累的结果也各不相同. 这使得机器人的运动误差受运动轨迹方向、位置等因素的影响.

因此, 可从不同速度和不同轨迹角度两个方面研究机器人的运动误差的变化特点, 寻找减少机器人运动误差的方法.

## 3 关节型机器人运动误差的测量

### 3.1 运动误差的测量

运动误差的测量由双目视觉系统完成, 如图 2 所示, 该系统由标定基座、两台 CCD 摄像机和若干相关紧固装置组成. 其中基座上固定两条拉成直线但不平行的钢丝. 通过两台摄像机获取两钢丝在

CCD 中的成像,借助图像处理和视觉重构的相关理论,计算出机器人末端的轨迹位置.该测量系统的测量精度为0.2 mm.

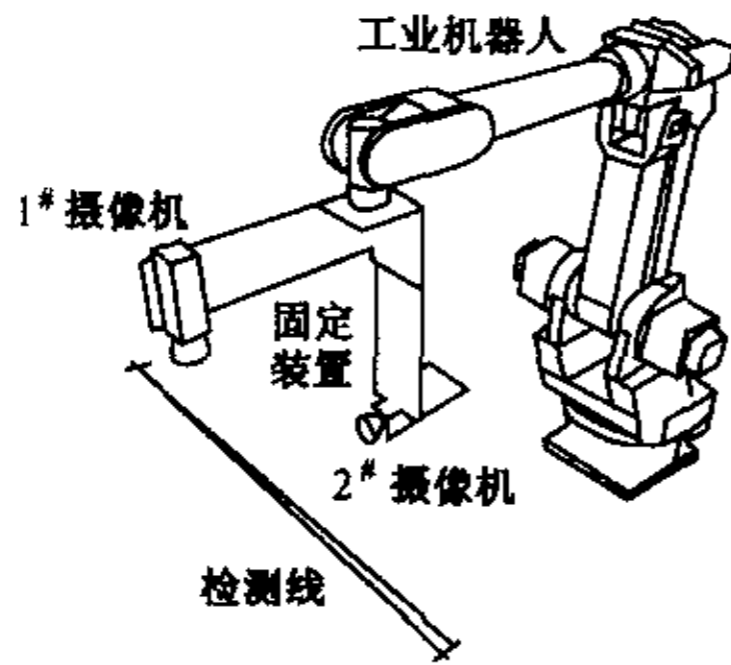


图2 机器人路径精度的双目视觉测量系统

Fig. 2 Binocular visual measuring system for path accuracy of the robot

借助该系统对本文机器人在直线轨迹运动情况下的运动误差进行了测量.不同速度  $v$ 、不同角度  $\varphi$  运动情况下的测量结果如图3所示.

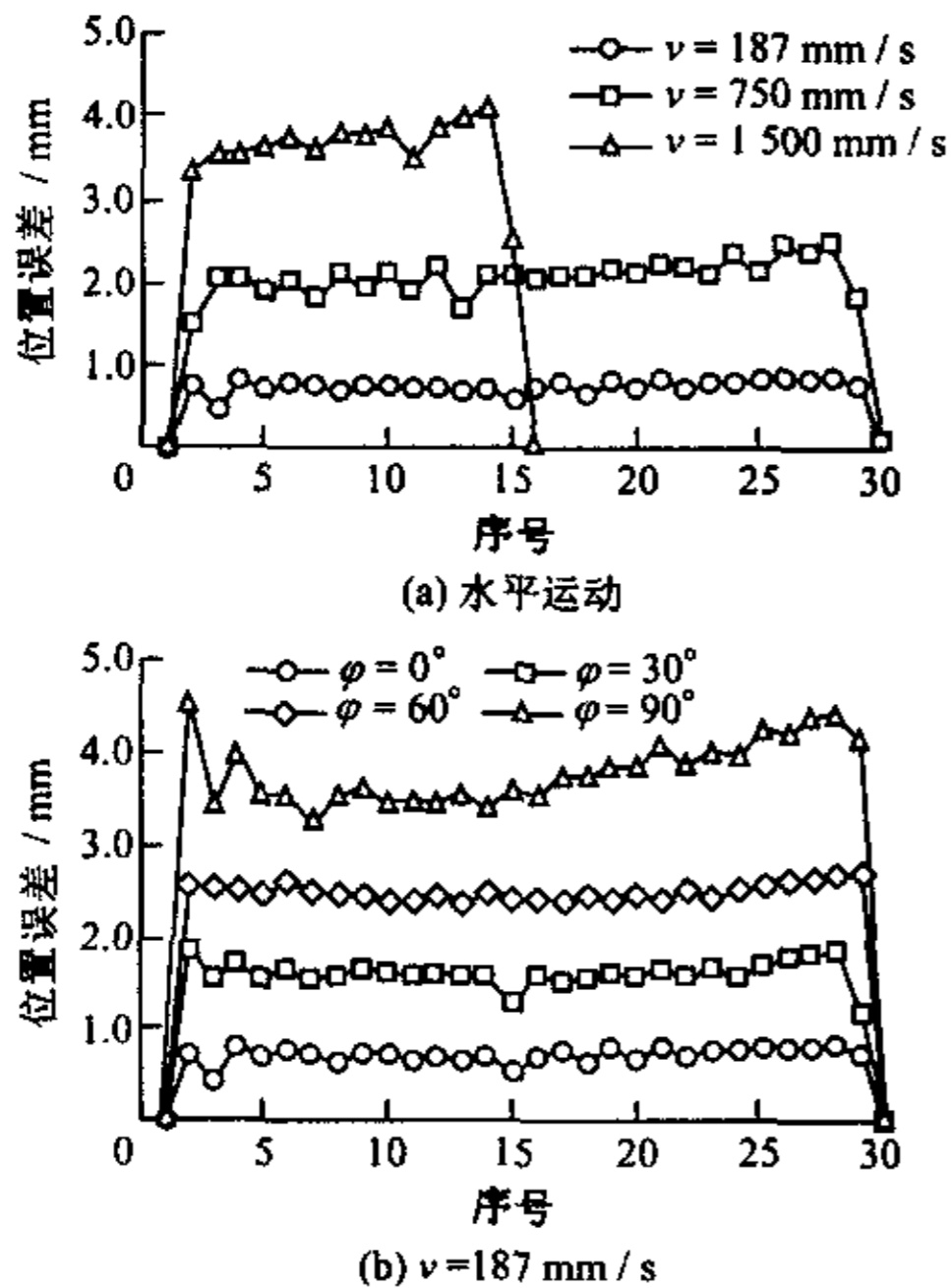


图3 轨迹位置误差

Fig. 3 Path position error of the robot

由测量结果可见,机器人的运动误差受运动速度和运动轨迹角度的影响很大.因此,在激光焊接机器人系统中,高速运动时的机器人的运动轨迹准确度是影响激光焊接成形质量的重要因素.

### 3.2 伺服误差的测量

伺服误差的测量通过实时读取机器人各关节传感器的测量数据完成,测量系统如图4所示.运动控制接口板与机器人控制器中的处理器总线连接,可

以实时(每隔 15 ms)获取各关节角度数据,并调用机器人内部程序计算出轨迹点位姿数据,通过控制卡上的串行通信口可将测量数据读出以便分析处理.

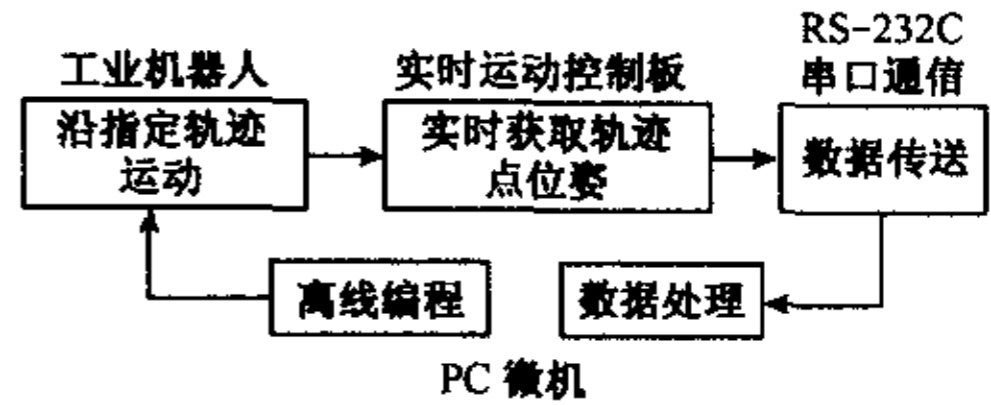


图4 伺服误差测量系统

Fig. 4 Measuring system for servo error of the robot

借助该系统,对本文的机器人在直线轨迹运动情况下的伺服系统误差进行了同样的测量,不同速度,不同角度运动情况下的测量结果如图5所示.

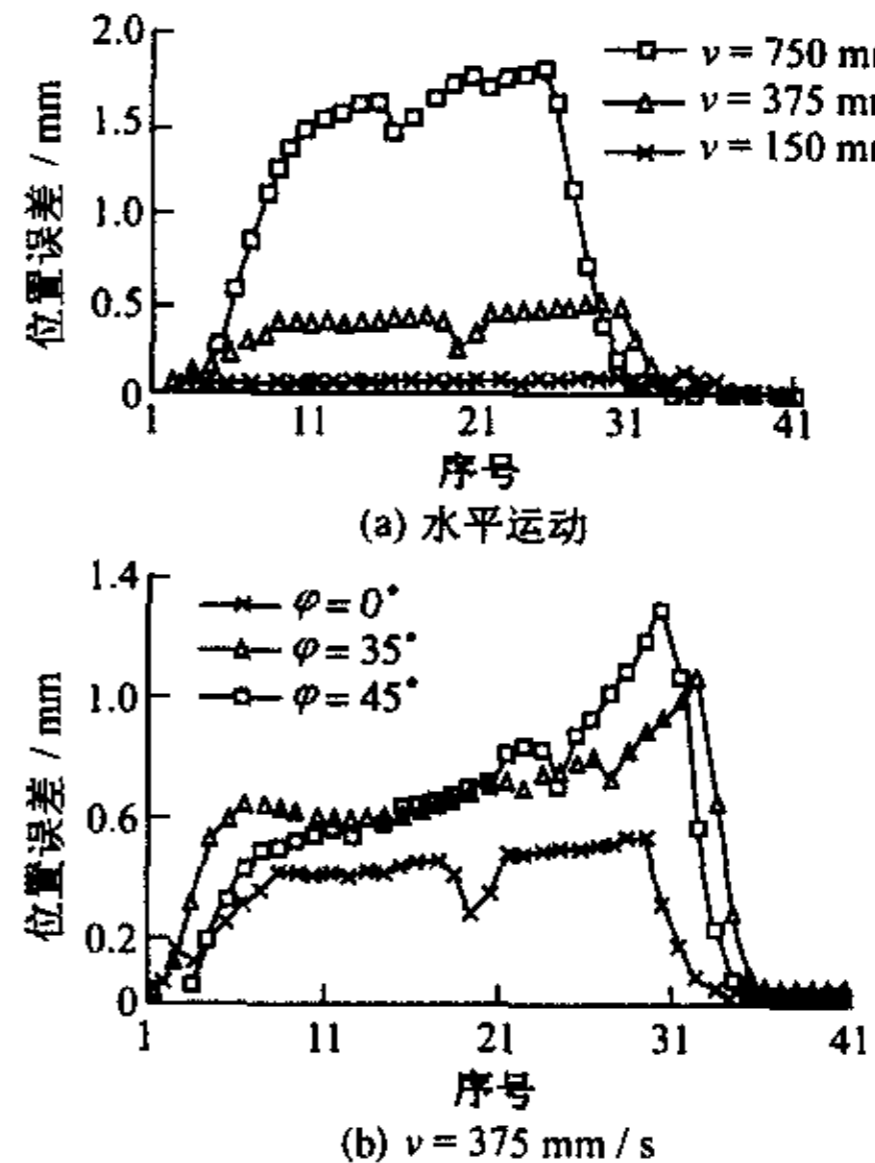


图5 伺服误差造成的轨迹位置误差

Fig. 5 Path position error induced by servo error

由测量结果可见,伺服误差随速度的增大而变大.机器人的形位对伺服误差的影响也很大,不同的角度伺服误差相差较大.

### 3.3 结果分析

将测得的机器人轨迹位置准确度和由伺服误差引起的轨迹位置准确度进行对比,如图6所示.

图中伺服误差和最终误差在数值上比较接近,可见由伺服误差引起得机器人轨迹位置准确度在机器人总体运动误差中占有重要比重.因此尽管伺服误差和动态误差都是造成机器人运动误差的重要因素,而且两者都受机器人运动速度和机器人形位的影响.但是机器人各关节的伺服误差在机器人运动

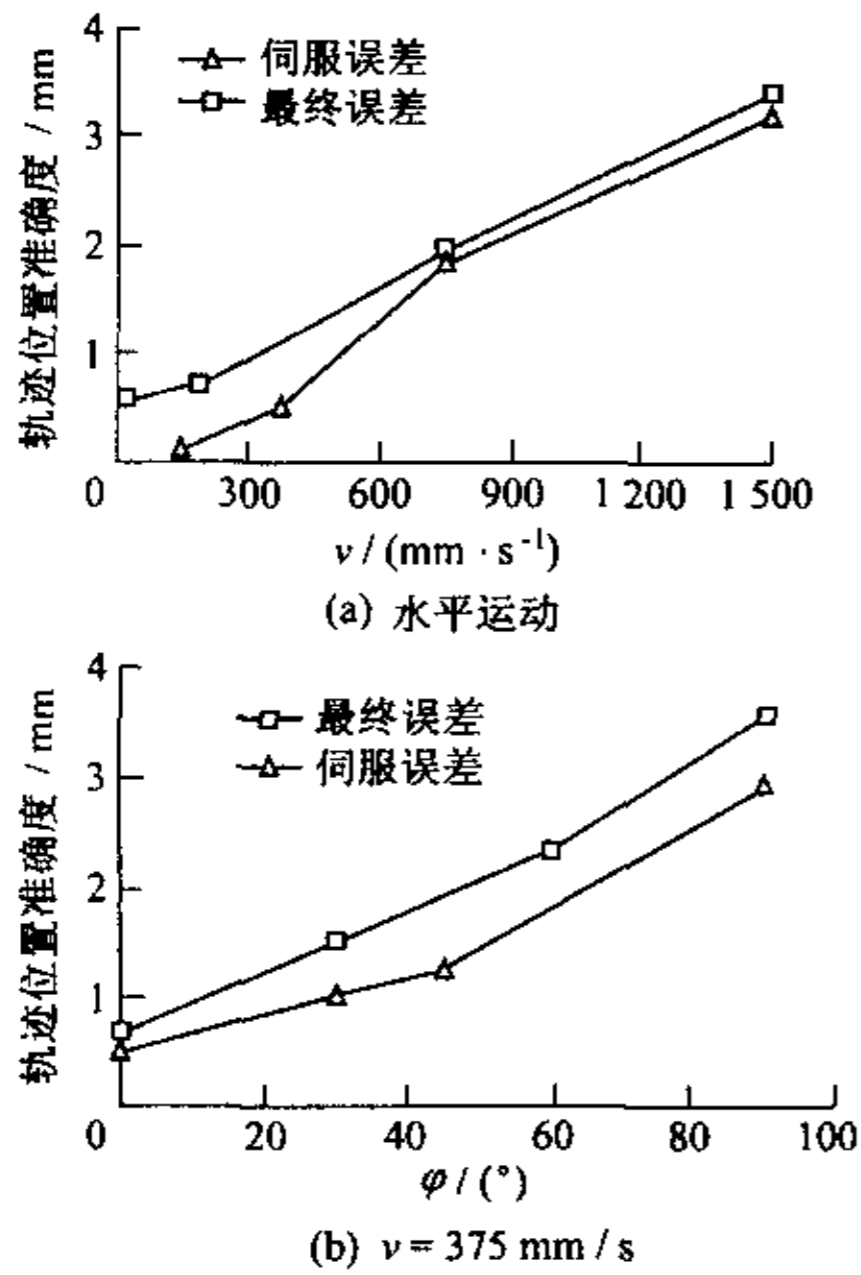


图6 运动误差与机器人形位的关系

Fig. 6 Path position accuracy comparison

误差中占有重要比重. 因而, 通过伺服系统控制矫正来减少伺服误差, 可有效降低激光机器人的路径位置准确度.

#### 4 结 语

机器人运动轨迹位置准确度是影响激光焊接质量的重要因素. 机器人动态误差和伺服误差是构成机器人运动误差的重要因素. 对关节型工业机器人的运动误差和伺服误差的测量和分析表明, 伺服误差在工业机器人运动误差中占有重要比重. 因此可以通过视觉伺服控制或改进伺服系统控制模型的方法

来提高机器人的运动精度.

#### 参考文献:

- [1] Iuliu N, Ioan V, Zoltan F. Inverse modelling of the kinematical errors of industrial robots [A]. *IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems Proceedings INES* [C]. Piscataway: IEEE, 1997. 135-140.
- [2] Naren V, Tesfaye S. Higher order approximation of the generalized kinematic error compensation model for robots [J]. *Computers in Industry*, 1989, 12(4): 313-328.
- [3] Edward T, Naren V. Computer generation of geometrical error equations applicable for improvement of robots' positioning accuracy [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1991, 7(1): 3-26.
- [4] Szkodny T. The sensitivities of industrial robot manipulators to errors of motion models' parameters [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(6): 673-682.
- [5] Zhuang Hanqi. Error-model-based robot calibration using a modified CPC model [J]. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 1993, 10(4): 287-299.
- [6] 韩翔宇, 都 东. 基于运动学分析的工业机器人轨迹精度测量的研究[J]. *机器人*, 2002, 24(1): 1-5.
- [7] Kunihiko W, Hiroo T. Welding and cutting car-body metal sheets with fiber delivered output from high-power Nd:YAG lasers [J]. *NEC Research & Development*, 1992, 33(1): 102-109.

# 用于激光焊接的关节型机器人运动误差分析

作者: [岁波](#), [都东](#), [何云峰](#), [韩翔宇](#), [张骅](#)  
作者单位: [清华大学材料加工工程及自动化研究所\(北京\)](#)



本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference\\_4102118.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_4102118.aspx)  
授权使用: 沈阳自动化所(syzdhs), 授权号: 52b11179-c8c6-48d8-8cbb-9ddd01666e39

下载时间: 2010年8月25日