

柔性激光加工系统中的测量功能 及其静态误差分析*

虞 钢 刘荷辉

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要:着重介绍了集成化柔性激光加工系统中测量功能的构成和工作原理,在此基础上分析和讨论了静态误差的来源以及补偿方法,并进行了测量试验。

叙词:测量系统 误差分析补偿 柔性激光加工 CIMS

中图分类号: TN241

0 前言

集成化柔性激光加工系统是在光机电一体化、框架式多轴机器人和 CIMS 的概念下由中科院力学所提出并实现的^[1]。系统的加工处理过程实质上是一个数据采集、存储、传递和转换的过程,最终产物可以看作是数据和信息的物质表现^[2]。举例来说,基于该系统的模具表面强化过程,首先由测量获取模具的面型数据,再由测量数据转换成加工数据后驱动加工系统,并配合激光控制系统和加工工艺数据库,最终完成对模具表面的强化处理和修补工作。测量数据能否满足一定的精度要求将对后续的加工质量产生决定性影响,因而对测量系统的误差分析和补偿就显得十分重要。

1 测量系统的构成及其工作原理

测量系统实际上是集成在柔性加工系统的结构之中,经过激光加工头和接触式测头装置的互换而实现其测量功能的^[1]。测量系统利用框架式机器人本体作为载体,其中 x 轴安装在框架之上, y 轴处于 x 轴之上, z 轴处于 y 轴之上,机器人腕部可以绕 A 轴旋转,绕 C 轴摆动^[1,3]。在机器人的工具夹持末端装载接触式 TP₂ 型测头,这就构成了一个能以任意姿态对曲面进行数据采集的测量系统^[1,3],见图 1 和图 2。其直角坐标的测量范围为 3 000 mm × 2 000 mm × 900 mm,旋转为 $\pm 370^\circ$,摆动为 $\pm 120^\circ$,可满足中、大型模具的加工处理要求。其结构与意大利 DEA 公司所生产的龙门式三坐标测量机

(DELTA 型)有相似之处^[4]。测量时测头以测量速度 (10 ~ 30 mm/s) 接近待测点,测头与工件接触时,测头发出一脉冲信号给机器人控制器和上位机。当机器人控制器(下位机)接到信号时,发出停止信号,测头停止运动。上位机读取该测量点的坐标值,完成一次测量。然后测头提起,快速靠近下一个测量点,重复上一过程。

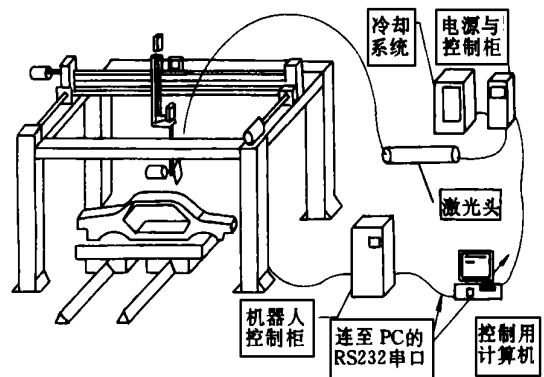


图 1 集成化系统示意图



图 2 系统实物图

2 主要误差来源

(1) 框架结构误差:主框架采用的是型材,焊接后经时效处理消除残余应力。由于外界温度的变化、振动,以及机器人本身的变形、运动等都会对框

* 中科院大型仪器设备研制项目。20000704 收到初稿,20010222 收到修改稿

架产生作用,使测量精度受到一定影响。

(2) x 轴、 y 轴、 z 轴的示值精度误差:主要是由机器人的加减速、传动单元的精度及其绝对码盘读数误差造成的。由于测量范围较大,其精度也在空间有不均匀性分布。

(3) 腕部结构误差:由于激光加工的特殊性,无法采用三坐标测量机式的主轴,而采用了腕部结构。腕部安装的不同轴度误差和位姿误差将对测量精度产生很大的影响。

(4) 测头本身的预行程误差及其从测头触发时刻到上位机获得数据时的延时误差:测头接触到工件表面到发出触发信号为其触发预行程,而从测头触发到上位机获取测点坐标将有一定的延时,这也是主要的误差来源。

(5) 测头半径误差:由于测量时,测头球面和工件的接触点是变化的,而且测头表面各点的半径并不相同,从而也带来一定的球径不确定度。如果不消除这种不确定度,同样会使测量结果带有一定误差。

上述分析阐明了系统误差的主要来源,由于主框架误差涉及到外部环境和动态误差的补偿,可采取相应的处理方案,这里不作详细的介绍。下面重点介绍测头系统和腕部结构的误差分析和补偿方法。

3 误差分析与补偿

3.1 x 轴、 y 轴和 z 轴的示值精度补偿

传动过程中首先由机器人下位机发出脉冲信号,伺服电动机产生旋转运动,通过减速装置后由机械直线传动单元将旋转运动转化为直线运动,再驱动各轴运动。从理论上讲,由绝对码盘的分线数、减速器的减速比和伺服电动机的伺服特性决定了传动脉冲当量误差为 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。但由于各轴的机械结构与安装误差、机器人的传动装置误差等因素,实际值要远大于该值。而这些误差可用软件补偿的方法消除,即在机器人插补过程中根据某点的定位误差来补偿脉冲输出量,并在下位机中完成。在补偿试验中,通过激光跟踪仪对各轴的空间定位误差在整个测量空间(加工区)进行测定,补偿时还须考虑测量空间的均匀性和整体精度,其补偿原理类似于三坐标测量机的21项误差补偿原理^[5]。补偿后各轴的精度为 $0.01 \text{ mm}/200 \text{ mm}$ ^[6]。

3.2 测头及读数延时误差分析

测头接触工件表面时,触发信号电平经过一定的延时达到触发阈值后才发出触发信号。触发信号

通过测头处理板进行虚假信号识别、方波化等处理后立即传给下位机。机器人下位机接到此信号后,立即执行停止指令,并进入不再接收驱动脉冲信号状态,待测头停止运动后,下位机将绝对码盘的坐标值传给上位机。仔细分析一下从测头测球接触到工件表面到上位机获得测量数据这一过程(见图3),就可以知道该项测量精度存在以下环节的影响因素:

$t_0 \sim t_1$:测头触发信号的延时,即测头从接触表面到触发信号到达阈值的时间。此段时间约为 $200 \mu\text{s}$,它所造成的误差,称为测头本身预行程误差₁,是测量坐标值的误差来源之一。

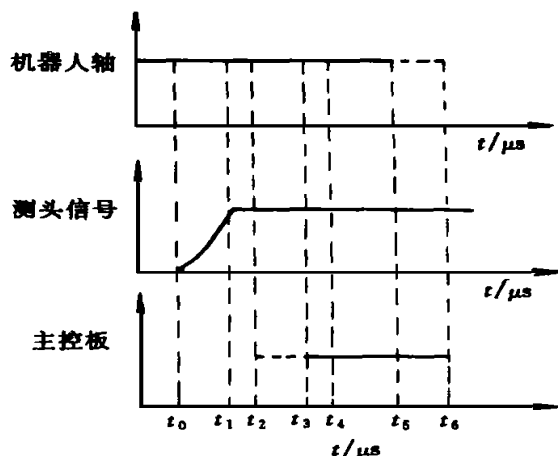


图3 测头信号和机器人响应关系时序图

$t_1 \sim t_2$:触发信号传输到机器人的传输时间。触发信号一旦达到阈值,经处理板处理后就立即传输到机器人,处理及传输时间相对恒定,且为微秒级,可忽略。

$t_2 \sim t_3$:机器人响应触发信号的时间。是从方波信号到达机器人,到机器人等到下一个循环周期采集信号所需的时间。由于机器人的特性,其最大影响误差量为机器人一个脉冲当量的距离,和测量过程进给速度无关,其带来的误差量为₂。

$t_3 \sim t_4$:机器人响应触发信号的时间,机器人接到方波信号到发出停止测头运动的指令的时间。由于机器人接到方波信号后立即封住该信号,并发出停止测头运动指令,此段时间可以忽略。

$t_4 \sim t_5$:机器人从发出停止指令到最终停下来的时间,此间机器人靠惯性行进一段时间后停下。由于依赖惯性,此段时间具有不确定性,行进距离误差可称为机器人动态误差,称为机器人系统动态误差₃。由于机器人的特性,在机器人速度允许的范围内,机器人可在一个脉冲当量内停下。

$t_5 \sim t_6$:机器人读取码盘坐标值的时间,此段为传输时间,很小且相对稳定,可忽略。机器人停下以

后才去读取码盘坐标值。在机器人停下期间,码盘坐标值保持不变,因此,此段时间不影响测量结果。

综合上面的分析,产生误差的时段为: $t_0 \sim t_1$, $t_2 \sim t_3$, $t_4 \sim t_5$ 。三个时段误差分别记为 δ_1 , δ_2 , δ_3 。则测头系统误差为 $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ 。由各个测量方向测试的结果得知,在满足精度要求(0.01 mm)的条件下,在允许的测量角度内表现出各向同性,由引起的总的行程误差恒为 0.582 mm^[6],则在实际测量中补偿上该量即可消除测头系统带来的误差。

3.3 测头半径误差分析和补偿

利用接触式测头对复杂曲面进行点位测量时,必须进行测头半径的补偿。一般的补偿办法是,利用微平面法和测量通过被测点两个相互垂直的经纬线以求被测量点的法线,进行软件补偿。在本系统的自动测量软件中,我们是基于自适应测量概念^[7],通过预测曲面法向,最后沿曲面法向进行测量的方式解决球半径补偿问题的。事实上,这是解决球半径补偿问题的最直接的方式。但预测总存在一定误差。此外可通过测球球心坐标点曲面拟合的方式来求出测球中心点形成的曲面函数,用这一已知的曲面法矢量代替被测曲面法矢量^[8],可得测量点的补偿坐标为

$$(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) - \frac{D}{2} \frac{N(i, j, k)}{|N(i, j, k)|} \quad (1)$$

式中 (x, y, z) ——测量点补偿后的坐标

(x_0, y_0, z_0) ——球心坐标

$N(i, j, k)$ ——曲面拟合法矢量

D ——测球直径(mm)

3.4 激光加工机的腕部误差和安装误差的补偿

由于腕部结构及其测头安装时引入的偏差,给测量结果带来了不可忽视的误差。通过建立坐标系,然后建立各项误差之间的关系数学模型^[9],再进行标定,就可以对测量值进行补偿。机器人腕部结构及其坐标示意图如图 4 所示。在激光加工机器人系统中可以建立多个坐标系,具体如下。

(1) 首先在主体框架的左上角建立机器坐标系 $O_0 x_0 y_0 z_0$ 。

(2) 在以法兰盘中心 R 为原点,其 x, y, z 轴方向和机器坐标系保持一致,建立移动坐标系 $O_1 x_1 y_1 z_1$ 。

(3) 当 A, C 角都为零时,以 R 为原点,以 A 轴为 z 轴, C 轴为 x 轴, y 轴用右手规则产生,就建立了腕部的初始姿态坐标系 $O_2 x_2 y_2 z_2$ 。

(4) 以 R 为原点,以当 A 轴转过任意角度时的 C 轴为 x 轴,以 A 轴为 z 轴, y 轴由右手规则产生,建立了腕部的任意坐标系 $O_3 x_3 y_3 z_3$ 。

(5) 以 R 为坐标原点,以 C 轴为 x 轴,以测杆方向为 z 轴, y 轴由右手规则确定,建立了测头坐标系 $O_4 x_4 y_4 z_4 (T)$,在测头坐标系中,测头球心坐标值总是 $(0, 0, L)$,其中 L 为测头的长度。

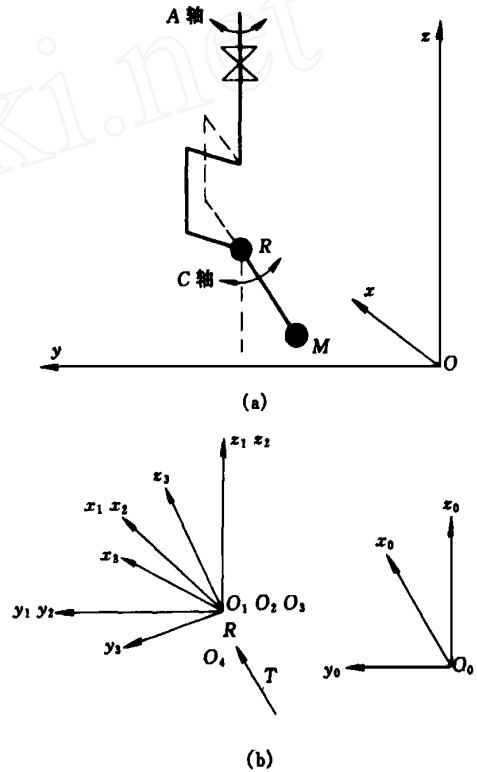


图 4 腕部结构及其坐标系示意图

以上就建立了整个测量系统的坐标系(如图 4b)。由直角坐标系的平移和旋转变换可以建立相应的数学模型

$$P_0 = R_1^2 R_2^3 (R_3^4 Q_4 + Q_3^4) + P_0^1 \quad (2)$$

式中 P_0 ——测点在机器坐标系中的齐次坐标值

R_1^2 ——腕部在 A 角和 C 角为零时候的腕部原始姿态

R_2^3 ——绕 A, C 轴转动的旋转矩阵

R_3^4 ——测头的安装位姿

Q_4 ——测点在测头坐标系中的坐标,恒为 $(0, 0, -(L - D/2), 1)$,其中 L 为测头的总预行程误差, D 为测球直径

Q_3^4 ——测头的安装偏移量(事实上在标定时,由矩阵乘法知它还包括腕部同轴度误差)

P_0^1 ——法兰盘中心的坐标值

通过标定,可以求得 R_1^2, R_3^4, Q_3^4 ,在每次安装测头都要对 R_1^2, R_3^4, Q_3^4 进行标定,以满足精度要求。

因为 A、C 轴采用的是绝对码盘读数,减速后其转角的最小刻度值为 0.001° ,所以在标定时可以忽略 R_2^3 带来的误差。其中

$$R_2^3 = \begin{bmatrix} \cos & -\sin & \cos & \sin & \sin & 0 \\ \sin & \cos & \cos & -\cos & \sin & 0 \\ 0 & \sin & \cos & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 ——绕 A 轴的转角

——绕 C 轴的转角

4 测量试验

4.1 示值精度检测试验

试验采用 0 级精度的长度为 199.520 mm 花岗岩平尺,将其置放在空间大致沿 x 轴方向(根据激光跟踪仪检测的结果, x 轴相对 y 轴、z 轴精度要差^[6],因此选择 x 轴方向更具代表意义)。通过测量平尺两端中心点(已用十字线标出)获得测点的空间坐标值,利用两点之间的距离公式和获得的坐标值来计算测量长度,测量结果如表所示。

表 平尺的测量结果

| 试验 | 补偿措施 | 测量的长度 L/mm |
|----|----------------------------------|---------------|
| 1 | 无 | 201.370 |
| 2 | 各轴精度误差补偿、 读数延时误差补偿、 测头半径补偿 | 199.527 |

表中所示的结果是在若干次测量(在不同的空间位置的多次测量)基础上获得的。可以看出,补偿后的示值精度完全达到了设计要求。

4.2 对空间自由曲面的测量试验

通过对一直径为 34.90 mm 的标准钢球进行了补偿后的测量,由测量结果拟合的球体示意图如图 5 所示。拟合球直径为 35.05 mm,实际偏差为 +0.15 mm。(对于球体测量,需要腕部结构的转动和摆动,测量系统此时处于最大误差状态)。从激光加工工艺参数试验要求来看,特别是对于工模具表面强化过程,由于经过光束变换后处理光斑处于远场(焦平面)并具有一定的焦深^[10],因此对于 ± 0.15 mm 的精度,其表面处理的效果没有根本区别。换句话说,实际加工过程可以“容忍”一定的误差,这同样适用于打孔、切割和焊接过程。图 6 为经过面形测量—加工数据转化后,覆盖件模具激光表面强化处理的局部效果图。变换后的处理光斑为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$, 6×6 阵列。由金相分析、显微硬

度试验和耐磨性试验表明,激光强化处理后,模具表面的性能获得了很大程度上的改善^[3]。

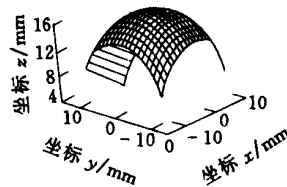


图 5 测量曲面拟合示意图

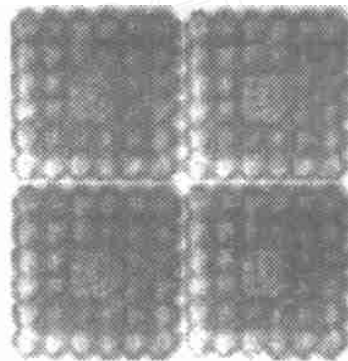


图 6 实际加工图

5 结论

通过对集成化柔性激光加工装备中测量系统的结构分析,指出了其主要的误差来源。特别是对腕部结构和测头系统进行了详细分析,建立了数学模型,并提出了相应的补偿方案。通过测量和加工实验,表明了这种补偿方案是实际可行的。柔性加工系统测量功能的完善,为后续的加工提供了坚实的基础。

参考文献

- 1 虞钢,王红才,张凤林,等.一种具有柔性传输和多轴联动的激光加工装置.中国专利,ZL98101217.5,1998
- 2 张根保,王时龙.先进制造技术.重庆◇重庆出版社,1996
- 3 Yu G, Zhang S, Qiao R. A computer integrated multi-functional 5-axis laser processing system. In ◇Johnny K Larsson, Alberto Broggi eds. Programme Tracks on Lasers & Joining Applications/ Robotics, Motion & Machine Vision Including Optical Metrology, ISA TA 2000, Dublin, Ireland, 2000, Epsom ◇ Epsom House, 2000 ◇145 ~ 152
- 4 郭慧明,谈世椿.三坐标测量机.北京◇国防工业出版社,1984
- 5 张国雄.三坐标测量机.天津◇天津大学出版社,1999
- 6 航空工业总公司第三零四研究所.五轴激光加工系统的测试报告,2000

(下转第 95 页)

- 4 Liang, Rogers C A. One - dimensional thermo - mechanical constitutive relations for shape memory materials. *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 1997(8)
- 5 熊克,陶宝祺,何存富. 镍钛形状记忆合金丝的性能测试分析. *南京航空航天大学学报*, 1999, 31(4)
- 6 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体. 北京 科学出版社, 1980
- 7 贾宝贤,刘永红,吴志坚. 形状记忆合金螺旋弹簧的设计方法. *机械设计*, 1999, 16(4)

STUDY ON THERMOMECHANICAL PROPERTIES OF Cu - BASED SHAPE MEMORY ALLOY SPRING

Qiu Zixue

(Nantong Institute of Technology)

Zhang He

(Nanjing University of Science and Technology)

Abstract: The relationships among stress, strain, temperature and phase transformation of Cu - based shape memory alloy spring are investigated. The experimental results and their mechanisms are systematically analyzed. The results show that the relationships about stress - strain, stress - temperature and strain - temperature of SMA helical spring in the three basic application forms are non - linear, and Hooke's law can not be directly used in design. Experimental results are very useful to reveal the actuating behaviors and to design actuators of SMA spring.

Key words: Shape memory alloy Actuator

Thermomechanical property Measure

作者简介:邱自学,男,1963年出生,讲师,博士。主要从事智能材料与结构系统、测试技术、机电一体化技术研究,发表论文10多篇。

(上接第87页)

- 7 张省. 柔性激光加工系统中的测控加工一体化研究 [博士后报告]. 北京 ◇中科院力学所, 2000
- 8 王建华,林其俊,乔桂芳. 复杂型面测量中测头中心的轨迹曲面及测头半径的三维补偿. *计量学报*, 1994, 15(2) ◇ 108 ~ 113
- 9 宋开臣. 三坐标测量机激光扫描测量系统的研究 ◇[博士学位论文]. 天津 ◇天津大学, 1997
- 10 Yu G, Gao C L, An Y Q. Diffractive optics enhancing laser performance in surface modification. In ◇ Veli Kujanp aa, John Ion eds. *The 7th Nordic Conference in Laser Processing of Materials, The 7th NOLAMP International Conference, Finland, 1999, Acta University* ◇ Lappeenranta, 1999

ERROR ANALYSIS AND DIAGNOSTICS ON MEASURING STRUCTURE OF A FLEXIBLE LASER MACHINE SYSTEM

Yu Gang Liu Hehui

(Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The principle and theory of the measuring structure system integrated into the flexible laser machine are introduced. In addition, analysis and minimization of the measuring error due to the wrist structure joint is described as emphasis. Based on the above mentioned, some measuring experiments are carried out.

Key words: Measuring system Error analysis and correction

Flexible laser machining CIMS

作者简介:虞钢,男,1958年出生,中科院力学所研究员,博士生导师。先后主持、承担了多项科研计划,共发表论文40余篇,申报国家专利4项。