

文章编号: 0258-7025(2001)06-0565-05

基于激光测距的三维激光加工 示教编程系统*

谢耀辉 朱国力 段正澄

(华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

提要 为了提高激光加工中示教录返编程的精度和效率,克服原有系统在结构上的限制和操作上的不足,采用借机测量系统的概念,提出了基于激光测距的三维激光加工示教编程系统,通过保证三维曲面上点的精确测量来实现所需加工信息的测量,并对三维曲面上自由轨迹的示教编程进行了详细的探讨。

关键词 激光测距,借机测量系统,曲面法矢,示教录返编程

中图分类号 TG 485 文献标识码 A

Teaching and Playback Programming System for 3-dimension Laser Machining Based on Laser Ranging

XIE Yao-hui ZHU Guo-li DUAN Zheng-cheng

(School of Mechanical Sci. & Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Technol., Wuhan 430074)

Abstract In order to improve the precision and efficiency of teach-and-play-back programming for laser machining, and overcome the structural limitation and the manual deficiency of the old system, a programming system is presented by adopting the concept of borrowed-machine measurement to integrate the laser scanning measuring probe and the CNC system. Here's the key technology to change the measurement of surface normal vector of machined surface into the measurement of points. And, it also addresses the measurement of free-form trajectory on 3-dimension surface in detail.

Key words laser ranging, borrowed-machine measuring system, teaching and playback programming

五轴联动激光切割机广泛用于切割复杂三维曲面上的自由轨迹,但原有的示教录返过程是依靠操作者的视觉和手工点动来完成的^[1],整个过程不但费时费力,而且由于测头与工件的间距靠操作者肉眼确定,不易准确控制;同时由于测头结构的限制,导致精度不能得到有效保证。如何充分地利用已有的系统设备来提高示教录返编程的精度和效率,便成为一个迫切需要解决的实际工程问题。CCD 光电子传感器的问世,为非接触测量提供了一条新路^[2,3]。本文提出在精度允许的范围内,利用五轴联动激光切割机的数控系统构成一借机测量系统,进行三维曲面上切割轨迹的示教测量和数控编程。

所谓借机测量系统是指借助于其他设备或装置

的坐标测量功能来完成空间点坐标的测量。本系统在五轴联动激光切割机上,配置相应的数字化采集硬件和计算机软件,构成简易的三坐标测量仪,从而达到投资少、见效快、事半功倍的效果。该测量系统属于准在线测量系统,测量和加工在同一台设备上完成,工件一次装夹就完成测量和加工,省时且测量成本低,无二次装夹误差。同时,该系统容易实现自动控制测量的示教录返编程,比起原有的点动控制示教录返编程,具有速度快、精度高、可操作性强的优点,因而可以更好地满足五轴联动激光切割加工的要求。

1 系统的组成

本系统由切割机床、数控系统、激光数字化测头、PC 机、串行通讯接口和相应的控制软件组成。图 1 为其结构框图。

* 国家重点自然科学基金(59635170)和国家 863 计划 CIMS 领域 863-511-943-002 资助项目。

收稿日期 2000-01-14;收到修改稿日期 2000-03-27

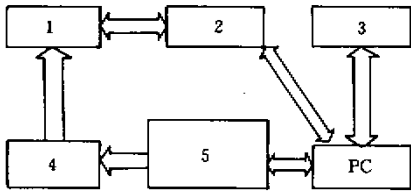


图 1 基于激光测距的示教编程系统结构框图

1 激光测头(含测头控制器) 2 数据采集, A/D 转换电路板 3 示教测量软件模块 4 待测工件 5 五轴联动激光切割机驱动单元

Fig. 1 Frame of teaching programming system based on laser ranging

1: laser measure-head (containing measure-head controller); 2: data sampling, A/D converting; 3: software module for teaching measurement; 4: workpiece; 5: driving unit of 5-axis laser cutting machine

它由以下几个部分组成:

(1) 激光测头。本系统采用了激光点光源非接触式测头, 安装于激光切割机 A 轴切割头的位置, 负责对测量信号的提取。该测头内置激光发射器和接收装置, 接收装置接收由待测工件反射回的激光。测头测量量程为 60 ~ 100 mm, 抗震性能好, 精度稳定, 可在 50°C 温差下正常工作, 非常适合工厂环境。测头输出信号中包括一个测量距离的模拟电压量和三个反应测头状态的开关量, 其中模拟电压量输出与量程成正比, 在 -5 V ~ +5 V 间线性变化; 三个开关量分别为近报警信号、远报警信号与有效测量信号, 通过充分利用这三个信号, 实现测量的自动控制。

(2) CCD 驱动及采样信号处理电路主要由两部分组成: 线阵 CCD 驱动电路与线阵 CCD 连接在一起, 共同安装在激光测头内; CCD 的 A/D 转换电路和数据传输电路插在 PC 机的扩展槽内。它们分别完成光信号向电信号的转换、模拟信号向数字信号的转换以及相应控制信号的传输。

(3) 五轴联动激光切割机的驱动系统和相应的执行机构, 由它们来完成示教录返编程测量过程中计算机发出的运动指令。

(4) 数控系统中的示教测量软件模块。借机测量系统的功能实现, 很大程度上取决于系统的软件, 它主要完成测头运动控制, 如测头运动速度和空间位置的控制; 采样数据处理, 获取机床当前三轴坐标的空间位置; 测量数据的处理与存储; 数控加工程序行的生成等。

测头测量原理在文献[4]中已有叙及, 不再赘述。

2 三维曲面激光切割加工示教录返编程^[5]

在三维曲面的激光切割加工中, 获取被加工曲面的法矢是关键技术之一。本系统采用激光测头与加工机床形成借机测量系统这一新的示教方案, 其目的就是将难以直接测量的曲面法矢转化为容易测量的空间点, 再利用微分几何的方法, 通过处理得到较为精确的法矢值。此方案避免了示教者主观因素、被测工件复杂程度和机床结构形式的过多影响。

文献[5]提出了一种新的法矢二次测量方法, 主要是通过算法来提高测得法矢的精度, 但它仍是利用原有的激光喷嘴作测头, 由于本身结构的限制, 无法获取高的测量精度, 所以本系统采用测量精度较高的激光测头。同时采用半自动测量方式, 它是在操作者一定程度的干预下, 系统自动完成对示教点的法矢测量工作。这不仅能提高工作效率, 而且可保证测量结果的连续性和一致性, 并使测量精度在一定范围内得到保证。具体过程如图 2 所示。

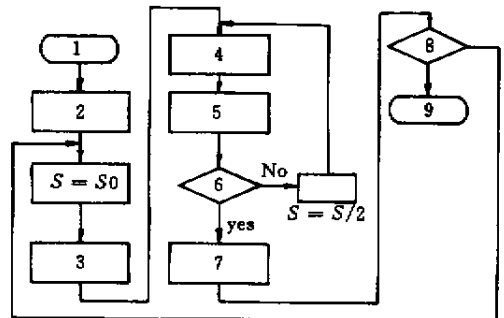


图 2 加工轨迹的示教录返编程流程图

1 示教开始 2 给定精度 a , 初始邻域半径 S_0 3 手工示教测量示教点的 X, Y, Z 坐标 4 以该示教点为圆心, S 为半径, 自动测量获取邻域信息 5 构建示教点的微切平面, 并计算法矢 6 满足精度要求 7 根据焦点恒定算法, 生成数控加工程序行 8 是否为终点 9 示教结束

Fig. 2 Flowchart for teaching and playback programming of machining trajectory

1: teaching start; 2: set that the precision is a and the original radius of the adjacent region is S_0 ; 3: manually teach to measure the coordinates X, Y, Z of the taught point; 4: set that the taught point is center and S is radius, automatically measure in the adjacent region; 5: construct a mini tangential plane of the taught point and calculate its normal vector; 6: fit the requirement of the precision; 7: give the NC codes by the algorithm of laser focus position keeping fixed; 8: Is it a end-point? 9: teaching end

2.1 手工点动示教获取示教点的三维坐值与自动获取该点所在曲面片法矢

由前述可知,计算机中的 CNC 系统,通过测量软件模块迭加计算获得待测工件曲面上示教点的三维坐标数据。即当 A, C 两轴的坐标值为零时,测头测得数据为 ΔZ , 示教点的三维坐标为

$$X = X' \quad Y = Y' \quad Z = Z' + \Delta Z \quad (1)$$

其中 X', Y', Z' 为测量该示教点时的各轴伺服驱动量。

虽然本系统采用的激光测头允许被测表面法矢与摄像头光轴的最大倾斜角 α 达到 $\pm 70^\circ$, 但过大将导致测量精度的降低。为了更好地发挥系统五轴联动的功能,可通过 A, C 两轴摆动 $\pm 90^\circ$ 转换工件测量平面来最大限度地减少由于倾角过大所造成的测量误差。即通过测头姿态的变换可保证在整个测量过程中,测量倾斜角不大于 45° 。

采用激光测头测量的目的除了提高示教点的位置精度外,更主要是为了提高示教点所在曲面片的法矢精度。本文采用以所测示教点为圆心, S 为半径,自动驱动测头对其邻域圆周轨迹上的点进行数字化采集。通过将难以测量的测头姿态转化为容易测量的点位,利用微分几何的方法,实现示教点所在曲面片法矢的自动测量。

在对棱边、尖角、边界线等特殊区域进行测量时,通过人工干预的方式采用点动测量。

2.2 计算示教点所在曲面片的法矢

以 XOY 平面内测量为例,为简化计算,将机床坐标系平移至待测示教点 P , 建立如图 3 所示的坐标系。

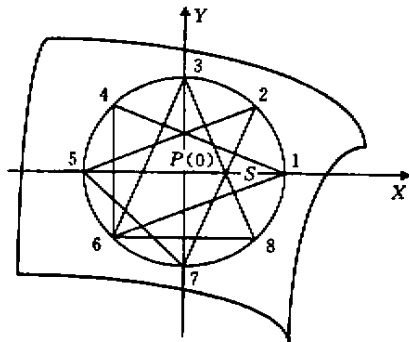


图3 示教点邻域信息获取的示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch for acquiring of neighborhood information of teaching point

经自动测量后,得到数据点列 $P_i(X_i, Y_i, Z_i) (i$

$= 1, 2, \dots, 8)$, 其中

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{i-1}{4} \pi S \\ \sin \frac{i-1}{4} \pi S \\ \Delta Z_i - \Delta Z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)中的 ΔZ_i 为测量点 P_i 时激光测头输出的测量值, ΔZ_0 为测量示教点 P 时的输出值, S 为测量过程中采用的邻域半径。

以 $P_1, P_4, P_6; P_2, P_5, P_7; P_3, P_6, P_8$ 分别构建示教点的微切平面,并计算法矢,即

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{P_1 P_4 \times P_1 P_6}{|P_1 P_4| |P_1 P_6|} \\ n_2 &= \frac{P_2 P_5 \times P_2 P_7}{|P_2 P_5| |P_2 P_7|} \\ n_3 &= \frac{P_3 P_6 \times P_3 P_8}{|P_3 P_6| |P_3 P_8|} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 精度评价

根据式(3)所得法矢量进行精度评价。取 $n_{\max} = \max\{n_i\}, n_{\min} = \min\{n_i\} (i = 1, 2, 3)$, 若 $\Delta = n_{\max} - n_{\min} > a$, 则认为该次选定的邻域半径无效,重新设置 S 为原值的一半,重复邻域信息的测量直至满足精度要求为止。

最后取其均值为该示教点法矢的报告值,即 n

$$= \bar{n}_i = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 n_i$$

2.4 数控加工程序的生成

激光加工时,入射到加工表面的激光束必须垂直于加工表面,而 A 轴或 C 轴旋转时,激光焦点的 X, Y, Z 轴坐标会随之变化,因而需要机床保持“焦点恒定”状态的实时补偿算法。再根据该算法,将上面示教测量得到的示教点位置坐标、所在曲面片法矢转换生成数控加工程序行。

在“焦点恒定”状态下,当调整旋转轴而使焦点位置改变时,机床的三个直线运动轴随之运动,以保证激光焦点位置的 X, Y, Z 轴坐标不会受旋转轴的变化而变化。此时, CNC 系统必须实时计算光头姿态变化对焦点位置(示教点)的改变,控制机床的三个直线运动轴运动,补偿焦点位置的改变,这样,激光焦点空间位置就仿佛是“恒定”地停留在示教参考点处。

3 系统精度影响因素及补偿措施

激光测头以其高响应、高分辨力、受电磁场环境

影响小、工作距离大、测量精度高、易于实现测量自动化等特点而被本系统采用。但它也存在一些不足之处,主要有:原理上的非线性、易受环境温度影响,测量结果与被测表面的光泽、颜色、粗糙度以及倾斜角度有关等。实践中通过采取一定的补偿措施可保证测量的精度,从而满足激光切割加工示教录返编程的要求。

3.1 影响测量精度的内部因素及补偿措施

影响测量精度的测头本身因素主要包括光学系统的像差,光点大小和形状,PSD 器件固有的位置检测误差和分辨力,PSD 暗电流和外界杂射光的影响,PSD 检测电路的测量精度和噪声,电路和光学系统的温度漂移等。

消除内部影响因素采取了如下措施:

使用单片机和高精度的 A/D 转换器设计传感器电路,在传感器制作完毕后进行标定,不同的被测物体,其表面特性变化很大,导致反射光的能量差别很大,因此根据接收信号的大小改变激光管的发光强度或改变 PSD 检测电路的放大倍数;采用方波调制来消除杂射光的影响。

由于内部影响因素更多的是靠测头本身来保证,所以在示教中更关心影响测量精度的外部因素。

3.2 影响测量精度的外部因素及补偿措施

3.2.1 被测表面倾斜的影响

由于示教录返编程更多的是应用于三维自由曲面的测量,所以被测表面倾斜的情况经常遇到,这样

在实际测量中被测表面倾斜对精度所造成的影响最为严重。如前所述,通过限定测头轴线与被测表面法矢的夹角 $\leq 45^\circ$ 来最大限度地保证测量精度。

3.2.2 被测表面光泽和粗糙度的影响

实验证明,表面粗糙度最好控制在 $1.6 \mu\text{m} < R_a < 12.5 \mu\text{m}$ 。如果不满足该要求,示教时可通过对被测表面涂上辅助材料来解决。

3.2.3 被测表面颜色的影响

以上三种因素的影响由于无法定量计算,而且不同的测头在实际使用中也会表现出不同的性质,故采用了实验标定的方法来实现误差补偿。

另外,为尽量减少光散射或其他原因造成测量数据中的坏点,使该点偏离原曲面,形成测量误差。本系统在同一测量条件下,对同一示教点进行多次测量数据采集,这对激光测头是很容易实现的,然后对采集到的数据点列进行数据处理,最后用其有效数据点列的均值作为测量该点的报告值。

除了采用以上措施外,同时还对数据采集电路进行了相应的抗干扰设计。

4 实验结果和方案分析

根据三维激光切割中加工曲面片法矢与测头轴线所形成的夹角,本验证实验以角度量块作为测量的标定值,采集了 $0^\circ \sim 45^\circ$ 间共 16 组关键角度的数据。结果如表 1 所示。

表 1 各角度示教值绝对误差表

Table 1 Absolute error for angle teaching

Standard value	0°	10°	11°	12°	13°	14°	15°	16°
Absolute error	0.201°	0.204°	-0.824°	0.538°	0.658°	-0.045°	-0.694°	0.251°
Standard value	18°	20°	25°	30°	33°	35°	40°	45°
Absolute error	0.726°	-0.838°	0.196°	-1.168°	0.978°	-0.942°	1.299°	1.896°

表 2 法矢示教精度和效率的比较

Table 2 Comparing for precision and efficiency of normal vector

	Teaching precision	Teaching efficiency
The present method	Within $\pm 2^\circ$	About 1 min/a taught point
The previous method	Beyond $\pm 6^\circ$	About 3 min/a taught point

从表 1 可知,在对法矢的示教获取过程中,测得法矢的绝对误差随着被测法矢与测头轴线所形成角度的增大而增大,但可控制在 $\pm 2^\circ$ 以内。而实际加工表明:被加工曲面法矢与切割头轴线所形成夹角

的允许误差为 $\pm 7^\circ$ 。再将本方案的法矢示教精度和效率与现有系统作一比较,如表 2 所示。

本文介绍的借机测量示教编程系统充分发挥了激光测头的测量精度和五轴联动激光切割机 CNC

系统的功能,对解决激光加工中曲面法矢获取难这一工程实际问题起到了有效的作用,具体如下:

(1) 由于本系统采用激光非接触式测量,既解决了接触压力引起的测量误差问题,也解决了测头半径三维补偿的难题,特别适合于对三维大型覆盖件等薄壁、易变形工件的示教;

(2) 只要光可以到达的区域,便可以进行测量;同时测量精度不再取决于示教者所确定的测量间距精度,系统的实际应用证明原理正确、结构简单,操作性强;

(3) 测量范围只与数控机床的 X, Y, Z 轴行程有关,大大增强了示教空间;

(4) 从法矢示教精度和示教效率两个方面与现有系统进行对比,新方案均可比现有系统提高 3 倍以上,有效地解决了示教编程费时、费力的缺陷。

参 考 文 献

- 1 Huang Sheng, Zhu Guoli, Feng Qingxiu *et al.*. Design of teaching and playback programming device for five-axis laser cutting machine. Proc 7th National Colleges & Universities Conf Manufacturing Automation. Mechanical Industry Press. 1996 (in Chinese)
- 2 K. Satio, T. Miyoshi. Noncontact 3-D digitizing and machining system for free-form surface. *Annal of the CIRP*, 1991, **40**(1): 483 ~ 486
- 3 Shao Zhiyong, Lu Jiechi, Lai Kangsheng *et al.*. Research on laser digitizing collecting system of 3-D surface. *Journal of Dalian University of Technology* (大连理工大学学报), 1997, **37**(3) 301 ~ 305 (in Chinese)
- 4 Tang Xiaoqi, Wang Pingjiang, Chen Jihong *et al.*. On a laser non-contact position sensor of coaxial imaging. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Technol.* (华中理工大学学报), 1996, **24**(9) 42 ~ 45 (in Chinese)
- 5 Xie Yaohui, Zhu Guoli, Duan Zhengcheng *et al.*. Research on the surface normal vector computing in 3-dimension laser cutting. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Technol.* (华中理工大学学报), 1999, **27**(1) 50 ~ 52 (in Chinese)