

集成化柔性激光加工系统的误差检测及其补偿

刘荷辉 虞 钢

摘要:基于集成化柔性激光加工系统的特殊框架结构和为满足测量及加工精度要求,针对加工系统的整个框架和机器人腕部分别建立了相应的误差补偿几何模型。利用三维激光跟踪干涉仪对激光加工系统进行了检测,并根据检测结果结合相对应的补偿模型对系统进行了实时软件误差补偿。测量和加工试验及干涉仪的检测结果显示所建误差补偿模型合理,系统满足测量和激光加工的精度要求。

关键词:激光跟踪干涉仪;柔性激光加工;误差分析补偿;CIMS

中图分类号:TN241 **文献标识码:**A



刘荷辉 博士研究生

集成化柔性激光加工系统是基于光机电一体化、机器人和 CIMS 的概念由中国科学院力学研究所提出并实现的^[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。要保

证测量数据的准确性和加工数据转化为加工轨迹的精确性,就要求对系统结构本身的精度有全面细致的检测和了解,并能根据检测的结果对系统进行误差分析和补偿,完善原有结构,以满足高精度加工要求。

收稿日期:2001-11-14

基金项目:中国科学院大型仪器设备研制项目(中科院计字[1997]第167号);2000~2003年中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX-11)

1 精度要求及其检测设备选择

集成化柔性激光加工系统由5个部分组成:全数控工业 Nd:YAG 激光器、柔性激光传输和整

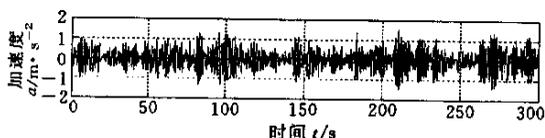


图5 塔顶起重机处加速度时程响应样本

机处加速度值大大超过了塔顶起重机处的设计加速度 0.28m/s^2 。所以,应采取有效的措施对塔顶起重机的振动加速度进行控制。

6 结语

本文建立了垂直运输机这一新型的混凝土提升机械的风振分析模型,采用计算机模拟的方法,得到了脉动风荷载在时域内的抽样,利用 Wilson- θ 法,求得了垂直运输机的动力响应。结果表明,塔顶起重机处的加速度大大超过了该处的设计加速度,应采取有效方法对该处的风振加速度进行控制,以满足设计要求。

参考文献:

- [1] 易静蓉. 新型混凝土提升机械的设计研究——塔罐机的设计研究:[硕士学位论文]. 武汉:武汉大学, 2001
- [2] 顾迪民. 工程起重机. 北京:中国建筑工业出版社,

- 1988
- [3] 瞿伟廉. 高层建筑和高耸结构的风振控制设计. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1991
- [4] 王之宏. 风荷载的模拟研究. 建筑结构学报,1994,15(1):44~52
- [5] 胡宗武,顾迪民. 起重机设计计算——遵循国际《起重机设计规范》的计算法. 北京:北京科学技术出版社,1989
- [6] 蔡丹绎,李爱群,张志强,等. 高耸电视塔脉动风荷载仿真及结构风振响应分析. 工业建筑,2001,31(4):60~62
- [7] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用. 上海:同济大学出版社,2001
- [8] [日]星谷胜著. 随机振动分析. 常宝琦译. 北京:地震出版社,1977
- [9] 王肇民. 高耸结构振动控制. 上海:同济大学出版社,1997

(编辑 周本盛)

作者简介:吴庆鸣,男,1947年生。武汉大学(武汉市 430072)动力与机械学院院长、教授、博士研究生导师,享受国务院津贴专家。研究方向为现代设计方法、大型水电工程机械设计。获电力部科技进步二等奖1项。发表论文40余篇。杨文清,男,1978年生。武汉大学动力与机械学院硕士研究生。涂治国,男,1977年生。武汉大学动力与机械学院硕士研究生。

型二元光学变换系统、框架式五轴机器人系统、电动双向加工运载平台和基于 PC 机的软件控制系统。图 1 为系统示意图。整个系统是以框架式机器人为载体,由 X 轴、Y 轴、Z 轴构成其直角坐标系中的三维运动,另外可绕 A 轴旋转、C 轴摆动。系统加工范围为 3000mm×2000mm×900mm,旋转为 370°,摆动为 ±120°,可满足大型模具的加工处理要求^[1]。

在激光加工时,要求光束垂直于加工表面,有确定的焦距。从模具表面强化试验来看,当离焦量超过 0.25mm 时加工质量将受影响^[2]。要在大范围工作空间内达到加工所需精度,就需了解 X 轴、Y 轴、Z 轴的定位误差、直线度运动误差、角运动误差和各轴之间的垂直度误差。同时还要了解 A、C 轴的旋转和摆动的角度误差和各自旋转主轴在系统框架中的姿态,以便建立数学补偿模型来提高系统精度。系统集成了测量功能和加工功能,测量为加工提供工件的面型数据而不作加工误差检测(因为本系统的主要目的是用来强化模具),测量功能和加工功能是利用同一夹具,通过互换测量头和激光加工头来实现测量、加工之间的切换。故要求保证夹具具有较高精度的重复性。

上面各项检测精度是在静态情况下获得的,而测量和加工是在比较高的速度下进行的,所以还需测试系统在高速下的动态性能。整个系统需要检测的项目繁多且精度类型各异,利用普通量仪不但需要多台仪器,而且费时。例如,检测 X 轴、Y 轴、Z 轴的定位精度,传统方法是采用激光干涉仪,而各轴对应的直线度误差则采用平尺或激光准直仪,检测角运动误差则需要角度激光干涉仪或电子水平仪等。各量仪之间的测量精度也不一样,尤其是无法测量出 A、C 轴相对于整个框架的姿态。传统测量仪器很难获得系统的动态性能指标,所以在对整个柔性系统的检测中采用的是近年才发展起来的激光跟踪干涉仪。

激光跟踪干涉技术是基于激光干涉原理和伺服控制原理,用来测量物体空间位置和姿态并随着机器人计量学的需要而发展起来的一门新型技术^[3]。如图 2 所示,整个测量系统立于一个立柱上,测量头可绕水平轴和垂直轴转动。仪器能以 1000 次/s 的采样速度测量光束的空间方位角 θ_i 、 φ_i 和测量头至目标反射镜中心之间的距离 L_i 。将极坐标数据转换成直角坐标,就获得了测量点的空间坐标值。在实际的检测中采用的是 LTD500 型激光跟踪干涉仪。该仪器由国防科工委第一计量测试研究中心进行过检测校准。

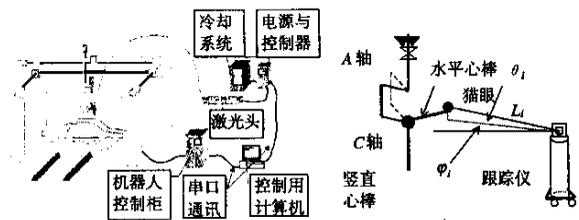


图 1 集成化柔性激光加工系统图

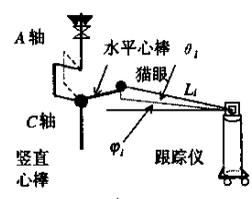


图 2 利用激光跟踪干涉仪测量机器人腕部示意图

2 检测及其补偿

2.1 X、Y、Z 轴的精度检测和补偿

系统加工范围是 3000mm×2000mm×900mm,为保证补偿的均匀性,要对整个空间进行网格检测。网格划分见图 3。沿 Z 方向分为 3 层,在同一个 Z 值上沿 X 方向等间隔测量 5 条线,沿 Y 方向等间隔测量 5 条线。在每一条线上,利用激光跟踪干涉仪每 200mm 测量一点。最后在 Z 向补测 5 条线,每条线每隔 100mm 测一点。在柔性激光加工系统的整个加工空间共测量 785 点。这样布线是因为 X 轴和 Y 轴的行程大,精度比 Z 轴低,所以在 X 轴、Y 轴方向上多测量一些点,用于后续软件补偿。

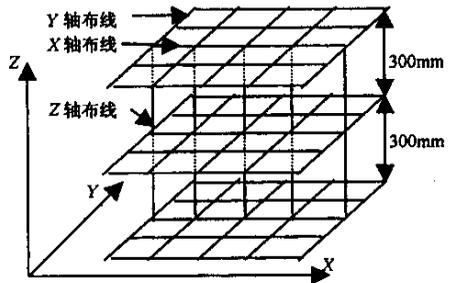


图 3 测量布线图

为了消除大部分接近系统固有频率(约为 10Hz)的周期性振动的影响,测量时激光跟踪干涉仪对每个点采样 200 次/s,保证测量数据反映的是系统本身精度。激光跟踪干涉仪在测量单轴时,同时将系统在其它两个轴向的偏移量也测量出来,也就将系统各轴的定位误差、直线度运动误差和角运动误差的综合作用误差测量出来,正是利用激光跟踪干涉仪这一特点,就可以省去分离各项误差的工作。

对测量结果传统的处理方法是将检定结果存入软件中,在系统获得测量数据后再对测量数据根据检定结果进行修正,这是一种非实时误差补偿。考虑到柔性激光加工系统是测量加工一体化,测量和加工要求保证同一精度,所以在实际的补偿中是采用实时误差补偿。具体做法是将网格点上的 3 个方向的偏移量直接写入可重写、可编程

的识读存储器(EPROM)中,机器人主控逻辑控制板则根据各轴误差计算各点补偿量,实时补偿各轴相应的脉冲量,从而减小各轴的运动误差。X方向的补偿量为

$$\Delta x_j = \Delta x_i + (\Delta x_{i+1} - \Delta x_i)(x_j - x_i)/(x_{i+1} - x_i) \quad (1)$$

式中, j 为待补偿的点; $i, i+1$ 为测量点; Δx_j 为 j 点的偏移量; x_i 为对应点的 X 轴的坐标值。

图 4 显示了 X 轴实时误差补偿前后的精度对比。

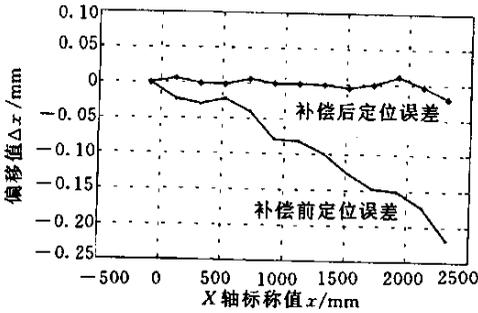


图 4 X 轴补偿效果图

2.2 A、C 轴的精度检测和误差补偿

为了能对自由曲面进行加工,激光加工系统增加了 A、C 轴的转动和摆动,它们构成了系统的加工执行末端,最后的加工精度很大程度上取决于这两个轴的精度。检测 A、C 轴的转动精度和各自旋转主轴在整个系统坐标中的姿态对后面补偿工作有重要意义。

为了检测 A、C 轴,制作了测量专用的心棒。测量时 A、C 轴与心棒的组合如图 2 所示。测量 A 轴时,将猫眼用磁性座固定在水平心棒的末端,对 A 轴从 $0^\circ \sim 280^\circ$ 每隔 10° 测量一个点,再回程测量,共测 57 点。利用所测数据,通过迭代拟合最小二乘圆,算出圆心位置和半径,拟合出圆面法向并以此作为 A 轴的实际姿态,进而反算所测量的角度。圆心位置和半径为

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S_{12}^2 - S_{11}S_{22}} \\ y_0 &= \frac{S_{12}S_{13} - S_{11}S_{23}}{S_{12}^2 - S_{11}S_{22}} \\ C &= \frac{1}{N} [2x_0 \sum_{i=1}^N x_i + 2y_0 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)] \\ S_{11} &= 2 \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right] \\ S_{12} &= 2 \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \right) \\ S_{13} &= \sum_{i=1}^N (x_i^3 + x_i y_i^2) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \\ S_{22} &= 2 \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right] \\ S_{23} &= \sum_{i=1}^N (x_i^2 y_i + y_i^3) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \\ R &= \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - C} \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{11} &= 2 \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right] \\ S_{12} &= 2 \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i \right) \\ S_{13} &= \sum_{i=1}^N (x_i^3 + x_i y_i^2) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \\ S_{22} &= 2 \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right] \\ S_{23} &= \sum_{i=1}^N (x_i^2 y_i + y_i^3) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \\ R &= \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - C} \end{aligned} \right\} (3)$$

式中, (x_0, y_0) 为圆心坐标; (x_i, y_i) 为所测量点的坐标; R 为拟合圆半径; $S_{i,j}$ 为迭代中间量。

迭代过程中,每次都以前得到的 (x_0, y_0) 为新的坐标原点,对测点进行坐标平移后再进行最小二乘法拟合,直到 (x_0, y_0) 足够小。

同理测量 C 轴精度,不同的是此时猫眼处在垂直心棒末端。表 1 为由测量数据直线插补后 A 轴、C 轴的精度。

表 1 A 轴、C 轴的相关精度

精度	回转半径 误差(mm)	Z 向跳动 (mm)	转动角度 误差(")	回程误差 (")
A 轴	± 0.020	± 0.015	± 30	± 30
C 轴	± 0.010	± 0.003	± 15	± 5

2.3 系统各轴相对位置测试

对系统而言,获得各部件之间的相对姿态同样重要。只有知道各运动部件的相对位置,才能通过补偿提高系统的整体精度。在检测中,让机器人沿各轴贴近导轨运动(这样更能反映导轨的真实状况),利用激光跟踪干涉仪在合适的位置测量 4 点,拟合最小二乘平面并求出平面法矢量。由于这是最小误差平面^[4],可以将该平面和它的法矢量作为理想坐标轴。定出参考坐标系后就可以测量各部件的姿态。

测量 X 轴、Y 轴、Z 轴的姿态和测量单轴误差方法相同,测量时靠近各自的导轨测量一条线,这样测量数据反应的是导轨自身精度。对测量点用最小二乘法拟合直线,以此代替实际轴线。再测量 A 轴、C 轴的实际旋转轴线,测量方法和检测单轴旋转轴方法相同,以计算所得的拟合圆面法矢替代实际轴的姿态。最后测量加工头轴的姿态,试验中以心棒轴线代替加工头轴线,由人手持猫眼沿心棒表面以“S”线来回扫描,获得数据后用最小二乘法拟合出圆柱轴线,以此代替加工头轴线。表 2 为各轴在拟合坐标系中的姿态角。这些数据将用在后面的系统误差建模补偿中。

表 2 各轴在拟合坐标系下的姿态角

夹角($^\circ$)	X 轴	Y 轴	Z 轴	A 轴	C 轴	加工头轴
拟合 X 轴	0.002	90.001	89.952	89.935	91.158	89.944
拟合 Y 轴	89.998	0.008	90.024	90.337	1.201	90.928
拟合 Z 轴	90.000	89.992	0.053	0.344	89.684	0.930

2.4 夹具重复性检测

集成化柔性激光加工系统的测量和加工之间的转化是通过互换测量头和激光加工头来实现的。

由于测量头和加工头使用的是同一套夹具,确保夹具良好的重复性精度至关重要。试验中用垂直心棒代替加工头和测量头,利用激光跟踪干涉仪按测量加工头轴的方法获得心棒轴线。测量结果表明两次装卡的对应轴线夹角为 0.01° ,满足加工要求。

2.5 系统动态性能检测

以上进行的测试都是在 10mm/s 的低速下进行的,但有时实际测量和加工是在很高的速度下进行,此时系统精度是否会变坏,需要检测验证。试验中,利用激光跟踪干涉仪的动态跟踪功能,让系统以 100mm/s 从加工区的左下角沿直线轨迹运动到右上角,激光跟踪干涉仪每 50mm 测量一个点,总长为 5000mm ,用测量的 101 点拟合最小二乘法直线,拟合标准偏差为 0.05mm ,表明系统的动态性能是稳定的。因为激光加工是一种非接触无加工反作用力的加工方式,动态测试的精度直接反映了加工精度。

3 系统误差补偿模型和测量加工试验

对系统各单项误差进行检测和补偿后,就可以建立几何模型对系统误差进行补偿^[5]。

几何模型为

$$P_0 = R_1^3 R_2^3 (R_3^3 Q_1 + Q_2^3) + P_1^3 \quad (4)$$

式中, P_0 为测点在绝对坐标系中的坐标值; R_1^3 为腕部在 A 角和 C 角为零时的原始姿态; R_2^3 为绕 A 、 C 轴转动的旋转矩阵; R_3^3 为测头的安装位姿; Q_1 为测点在测头坐标系中的坐标; Q_2^3 为测头安装偏移量; P_1^3 为机器人法兰盘中心坐标值。

其中 R_1^3 由激光跟踪干涉仪检定, R_2^3 、 Q_2^3 则由安装测头或激光加工头后标定。图 5a 显示系统根据直径为 34.900mm 的精确球的测量结果拟合的球体示意图,拟合球直径为 35.05mm ,实际偏差为 $+0.15\text{mm}$ 。图 5b 为经过测量—加工数据转化后,覆

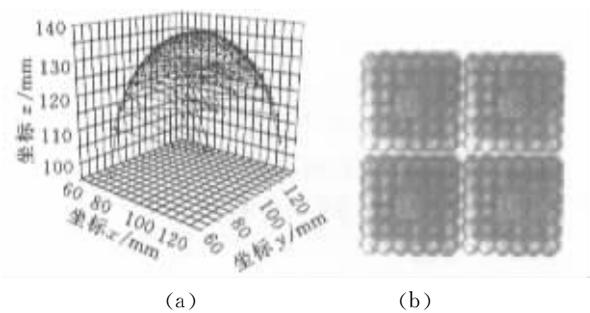


图 5 测量和加工图

盖件模具激光表面强化处理后的局部效果图。二元光学变换后的处理光斑为 $3.5\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 的正方形, 6×6 阵列,图示共有 4 个光斑。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的改善。这说明经过检测补偿后系统精度满足测量加工精度要求^[6]。

4 结论

对激光加工系统和机器人腕部建立了误差补偿几何模型,利用激光跟踪干涉测量技术实现了对集成化柔性激光加工系统各项误差的检测和补偿,结果显示各单轴的精度优于 $0.02\text{mm}/\text{全程}$,转动精度优于 $30''/\text{全程}$,系统的动态精度优于 $0.05\text{mm}/\text{全程}$ 。综合测量加工试验表明系统的测量加工综合精度优于 $0.20\text{mm}/\text{全空间}$ 。从检测所需时间来看,利用激光跟踪干涉技术只用 3 天就完成了整个系统的检测和补偿工作,而采用传统检测技术则需要 $10 \sim 15$ 天。这表明对类似于集成化柔性激光加工系统这样的大型柔性系统的检测,激光跟踪干涉检测有其优越性。从测量和加工试验来看,系统达到了理想的测量和加工精度。

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, 1998-03-20
- [2] Yu G, Gao C L, An Y Q. Diffractive Optics Enhancing Laser Performance in Surface Modification. In: Veli Kujanpää John Ion eds. The 7th NO-LAMP International Conference, Lappeenranta, 1999;545~551
- [3] 王佳,路刚. 激光自动跟踪空间坐标测量系统的发展(一)、(二). 航空计测技术, 1997, 17(3): 34~39
- [4] 张国雄. 三坐标测量机. 天津:天津大学出版社, 1999
- [5] 虞钢,刘荷辉. 柔性激光加工系统中的测量功能及其静态误差分析. 机械工程学报, 2001, 37(8): 84~87
- [6] Yu G, Zhang S, Qiao R. A Computer Integrated Multifunctional 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, Epsom House, Ireland: ISATA, 2000;145~152

(编辑 周本盛)

作者简介:刘荷辉,男,1975年生。中国科学院力学研究所(北京市100080)技术发展部博士研究生。研究方向为集成化智能制造、精密测量、CAD/CAM及机器人应用技术。发表论文3篇。虞钢,男,1958年生。中国科学院力学研究所技术发展部研究员、博士研究生导师。