

文章编号:1006-5911(2007)10-1997-04

集成激光制造系统的开放式控制研究

颜永振, 虞钢⁺, 王立新, 宁伟建

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 针对激光制造系统的发展要求,提出了一种开放式集成激光制造系统,该系统将激光器控制模块、测量模块、机器人模块和计算机控制模块等进行集成,采用模块化设计方法,各模块功能独立,实现了主控计算机对各控制模块的协调控制。其中激光器由 PROFIBUS-DP 现场总线控制,机器人由运动控制器控制。解决了传统激光制造系统结构封闭,专用性强,难于实现柔性化制造的难题。通过实际应用,进一步证明了该系统的开放性和可控性。

关键词: 开放式控制;现场总线;集成激光制造系统;运动控制器

中图分类号: TP23

文献标识码: A

Open control of integrated laser manufacturing system

YAN Yong-zhen, YU Gang⁺, WANG Li-xin, NING Wei-jian

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: To meet the requirements of laser manufacturing system, an open integrated laser manufacturing system based on PROess FieIdBUS Distributive Peripheral (PROFIBUS-DP) and open motion controller was presented. This system integrated modules of laser, robot, measurement, controlling computer, etc. By using the modularized designing concept, each module was functionally independent, whereas coordinated control for each control module by main control computer was realized. Laser was controlled by PROFIBUS-DP field bus, and robot was controlled by motion controller. This architecture overcame difficult problems in traditional laser manufacturing system such as close structure, special usage and stiffness. The new system was proved to be open and have better controllability by practical application.

Key words: open control; fieldbus; integrated laser manufacturing system; motion controller

0 引言

激光加工技术已经在工业中得到了广泛应用。激光制造系统作为激光应用的平台,一般由激光器系统、机器人系统或计算机数字控制(Computerized Numerical Control, CNC)系统、测量系统、计算机控制系统等子系统组成^[1],集成化、智能化和柔性化^[1]是其发展的必然方向。因此,对各子系统的可控性提出了更高的要求。在制造过程中,为了适应不同的加工目的(如切割、打孔、强化,以及快速成型等),需要激光和机器人实时、准确地协调控制。目前,集

成激光制造系统中的激光器大都通过 I/O 并口控制,但存在成本高、可维护性差等缺点;也有通过串口控制,但这种方法抗干扰能力差,传输速率低,实时性差,尤其对不断需要有握手信号的激光器控制存在极大的挑战^[1]。机器人控制系统或 CNC 系统则大都采用专用计算机、专用机器人语言、专用操作系统和专用微处理器,这种封闭式结构导致很多缺陷:开放性、可扩展性差;软件独立性差,软件结构依赖于处理器硬件,难于在不同的系统之间移植;缺少网络功能^[2-3,5]。由于这些缺陷的存在,激光和机器人的协调控制受到了很大的限制,往往只

收稿日期:2006-11-14;修订日期:2007-03-05。Received 14 Nov. 2006;accepted 05 Mar. 2007.

作者简介:颜永振(1982—),男,湖北潜江人,中国科学院力学研究所硕士研究生,主要从事激光智能制造系统的研究。

E-mail: yanyongzhen1982@163.com。+ 通讯作者:gyu@imech.ac.cn。

能在机器人运动过程中简单控制激光的出光和停光,因而很难满足高精度激光加工的要求。

本文在中科院重大装备项目——激光智能制造工艺力学实验研究系统(Y2003004)的支持下,设计了基于过程现场总线(PROcess FieldBUS, PROFIBUS)的激光器控制和基于数字运动控制(Digital Motion Control, DMC)开放式运动控制器的机器人控制系统方案,解决了集成激光制造系统中各子系统难于柔性协调控制的问题,并为系统的扩展和改善留下了很大的空间。

1 过程现场总线和 DMC 运动控制器的特点

PROFIBUS 是一种国际化、开放式、不依赖于设备生产商的现场总线标准。PROFIBUS 的协议结构是建立在 ISO7498 国际标准(其标准为 IEC61158)的基础上,简化了第三层到第六层,适应性强,应用广泛。应用于现场级的是 PROFIBUS-DP (Distributive Peripheral) 协议结构,它是一种高速廉价、可用于设备级控制和分散 I/O 通信的模块。由 PROFIBUS 总线存取协议,主站之间采用令牌传送方式,主站与从站之间采用主从方式。主站周期地读取从站的输入信息,并周期地向从站发送输出信息,通信可以采用点对点逻辑数据传输或广播,因此在通信网络中可以快速简洁地完成数据的实时传输。基于 PROFIBUS-DP 的特点,可实现对激光功率和时间的实时调制。

DMC 数字运动控制器的主要特征是:开放式结构、使用简单、功能丰富、可靠性高。在硬件上,所有输入输出信号均用光电隔离,提高了控制器的可靠性和抗干扰能力;在软件上,提供了丰富的运动控制指令,如直线、圆弧插补以及轮廓方式,电子齿轮、电子凸轮功能,虚拟轴功能,示教功能,多任务功能等。该控制器采用 32 位处理器、FLASH 存储器、随机存取存储器(Random Access Memory, RAM),先进先出(First In First Out, FIFO)原理,可独立运行。在应用编程方面,它有功能强大的应用编程接口(Application Programming Interface, API),可以在 DOS, Windows, Linux, QNX 环境下,用 VB, VC, Labview, Delphi 等工具进行应用程序开发。因此,以 DMC 运动控制器控制的机器人,可以实现各种复杂的运动轨迹。

2 集成激光制造系统的控制系统设计

2.1 系统组成及结构原理

传统激光加工系统多采用工控机作为主控计算机,它完成机器人的运动规划、插补和位置伺服,以及激光器控制、主控逻辑、数字 I/O 等功能,机器人各关节伺服驱动控制全部由伺服放大器完成。但这种上位机加伺服放大器的机器人控制系统,结构封闭,可扩展性差。在激光加工过程中,主控计算机需要实时处理激光器状态和机器人状态,导致计算机资源被大量占用,影响加工速度和稳定性,控制的实时性难以保证。

新设计的集成激光制造系统如图 1 所示。该系统由控制上位机、示教盒、机器人控制模块、机器人本体模块、激光器、激光器专用控制计算机(含 Winlas 专用激光控制软件),以及辅助设备构成(如位置传感器等)。

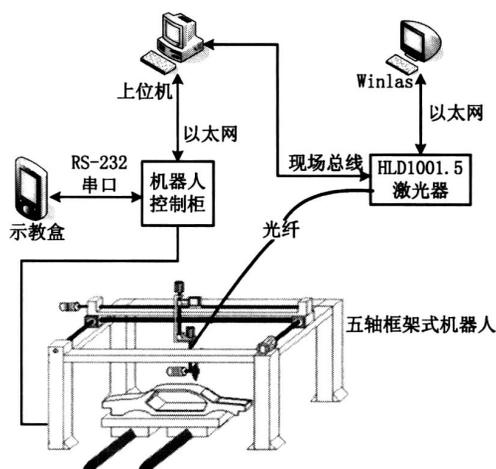


图1 以PROFIBUS-DP和DMC运动控制器构建的集成激光制造系统

(1) 激光器控制 激光器由控制上位机和其专用计算机控制,两者可以同时控制激光器。控制上位机通过 PROFIBUS 现场总线与激光器通讯,采用单主站的线型网络拓扑结构,控制上位机设为 PROFIBUS-DP 的主站,将带有 PROFIBUS-DP 通信协议的激光器设计为从站。激光器专用控制计算机通过以太网控制激光器,并具有远程诊断功能。在激光加工过程中,激光器主要由上位机控制;对激光器进行测试或远程诊断,则主要由专用计算机完成。

(2) 机器人控制 机器人控制模块由上位机、运动控制器和伺服放大器组成。上位机与运动控制器

通过以太网 (Ethernet) 连接, 运动控制器的 CPU 与上位机的 CPU 构成主从式双 CPU 控制模: 上位机专注于人机界面、仿真、实时监控和发送指令等系统管理工作; 运动控制器处理所有运动控制细节, 如

升降速计算、行程控制、多轴插补等, 控制过程无需占用上位机资源。运动控制器与伺服放大器通过互联电缆连接完成电机的运动控制。图 2 是控制系统的结构原理图。

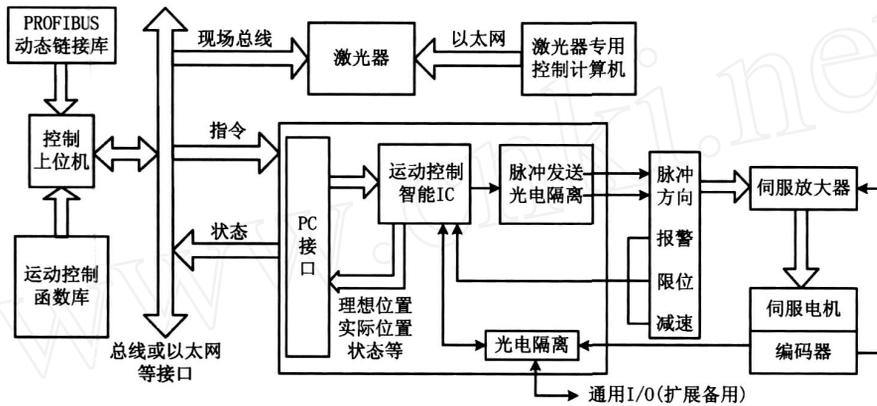


图2 控制系统结构原理图

2.2 系统开放性分析

2.2.1 激光控制的开放性

控制上位机对激光器的控制是通过调用动态链接库(如图 2), 利用 VC++ 编写 PROFIBUS-DP 的控制类, 将上位机主站对激光器从站的控制归结为对类的操作, 发送与接收的信息为类的属性, 控制指令以功能归类为类的方法, 这些类分为通讯口设置类(通信模式、传输初始化、读入信息、发送信息等)和功能指令类(激光器待机、出光、停光、开效验灯等)。在激光与材料相互作用过程中, 输出波形控制了光束能量随时间的分布, 从而在很大程度上影响加工效果^[1]。问题的关键是激光波形的精确控制。通过调用控制类, 可以编程实现任意波形的激光束输出, 图 3 给出了三种波形的示意, 其控制的激光幅度精度为 1%, 波形时间步长精确到 1 ms。因此, 通过 PROFIBUS-DP 控制的激光器完全可以满足实时的控制要求, 是其开放性和柔性的很好体现。

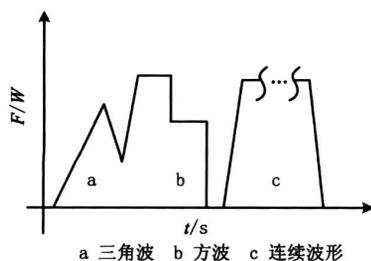


图3 任意激光波形输出

激光器专用控制计算机与 Ethernet 连接, 实现了与管理层的互联和远程控制, 将工业现场的微观

控制与企业决策的宏观控制融入一体, 进一步提高了工厂系统的柔性。

2.2.2 机器人控制的开放性

在软件上, 与编写 PROFIBUS-DP 的控制类类似, 利用 VC++ 将运动控制器的控制指令编写成函数类库, 在应用编程时根据不同加工需要来调用类库, 可以编写出不同的机器人控制程序。由于机器人运动的规律性, 可以将基本运动和常用运动轨迹编写成文件库, 如直线运动、圆弧运动、回零等, 将这些基本运动组合, 就可以得到不同的运动轨迹, 所有参数都通过集成程序界面修改。如下为调用直线运动的例子:

```
char filename[80] = "D:\\program \\ line.txt"; // 直线文件
m_motor.DownloadFile(filename); // 将文件下载到运动控制器
char cmd[80] = "XQ # line"; // 需要执行的文件
m_motor.ExecuteFile(cmd); // 执行文件
```

在这种方式下, 上位机主要负责管理, 而具体的运动执行、逻辑运算都靠运动控制器去完成, 极大地节约了上位机资源, 又提高了编程的灵活性。而现有激光制造系统的机器人或 CNC 系统的编程语言专用性太强, 二次开发的空问小, 影响了系统的开放性。

在硬件上, 开放式运动控制器除了有报警、限位、回零等特殊 I/O 口外, 还有通用 I/O 口, 它们可以根据需要随时扩展, 这样就可以很容易地将一些

传感器,如位置传感器、视觉传感器等集成到系统中。运动控制器与伺服放大器构成的运动控制系统相比上位机加伺服放大器的控制系统结构更加开放,后者的伺服放大器只能工作于位置模式,伺服算法固化在伺服放大器的 ROM 中,用户无法修改控制模块和伺服算法。前者的伺服放大器既可以工作于位置模式又可以工作于速度模式和力矩模式。在速度模式下位置控制由运动控制器完成,位置环控制算法对用户开放;在力矩模式下位置和速度控制都由运动控制器完成,位置环和速度环控制算法对用户开放。因此,用户可以根据机器人的具体状态,编写相匹配的伺服算法,机器人的控制性能不再仅仅由伺服放大器的性能决定,另外用户还可以调用函数库来修改内置比例积分微分(Proportion Integral Derivative, PID)算法参数。

2.2.3 系统集成控制开放性

在传统的激光制造系统中,上位机(机器人控制器)既要控制机器人运动,又要控制激光器的状态,因此需要开辟实时监测线程,判断上位机是否给出到位信号。当上位机接收到到位信号,再判断激光器状态和发送什么信号给激光器,因此上位机任务比较繁重。为保证系统的可靠性,系统开放的指令较少,在一定程度上限制了激光加工的柔性。而在新构建的集成系统下,利用运动控制器运算速度快的特点,控制激光器的到位信号由运动控制器给出,再根据控制需要调用 PROFIBUS-DP 的控制类和运动控制类进行混合编程,上位机只负责对各子系统的反馈信号协调处理,不再充当“执行者”和“管理者”的双重角色,提高了系统的稳定性,也保证了实时性。图 4 给出了传统激光制造系统和新设计集成激光制造系统的控制逻辑图。

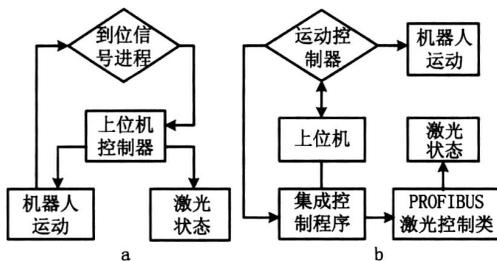


图4 传统激光制造系统(a)和新设计集成激光制造系统(b)的控制逻辑图

3 系统开放性验证

以薄壁型零件(长 60 mm)直接成型为例。在现有激光加工系统上加工,其效果如图 5 所示,在新构建的系统上加工,其效果如图 6 所示。由图 5 可以看出,薄壁型零件两边高,中间低,且两端的厚度也大于中间部分的厚度,而图 6 中的薄壁型零件则几何尺寸相对准确,质地也相对均匀,没有明显的厚度差别。

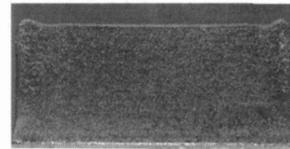


图5 薄壁零件主视图

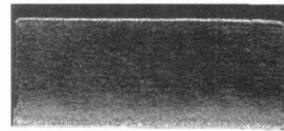


图6 薄壁零件主视图

现有激光加工系统在运动过程中只能出光和停光,不能随加工轨迹改变激光功率,而此运动为一个加速、匀速、减速的过程,因此两端的金属熔液凝固时间大于中间部分金属熔液的凝固时间,从而就导致两端凝固的金属多于中间部分,形成如图 5 的形貌。在新构建的集成系统上,利用 PROFIBUS-DP 控制的激光器可以输出随时间变化的任意波形,运动控制器通过内部运算给出控制激光的到位信号,初步将激光功率变化规律设定为如图 7 所示(考虑两端形貌近似为楔形),使两端功率线性变化,中间部分为恒功率,通过参数优化,可使每层两端和中间部分熔覆的金属基本相同。可以看出,在几何形貌上,新构建的集成系统的加工效果明显好于现有激光加工系统的加工效果。而图 6 中的加工效果往往是一些闭环控制系统^[8]才能完成的。

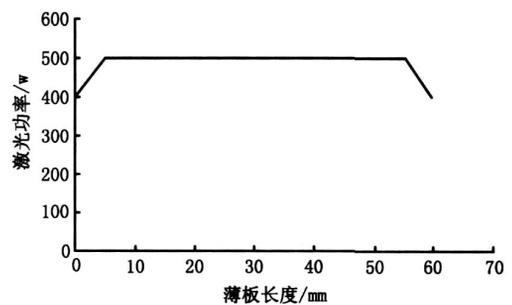


图7 激光功率随运动轨迹变化规律

(下转第 2008 页)

- 统, 2003, 9(10): 873-878.]
- [10] SAKO M. Prices, quality and trust: inter-firm relations in Britain and Japan [M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 1992.
- [11] LIU Li. Huarong event in Fuzhou [N]. The Economic Observer, 2002-02-07 (42) (in Chinese). [刘俐. 福州惊爆“华榕事变”[N]. 经济观察报, 2002-02-07 (42).]
- [12] STUART F I, MCCUTCHEON D. Sustaining strategic supplier alliances - profiling the dynamic requirements for continued development [J]. International Journal of Operations & Production Management, 1996, 16(10): 5-22.
- [13] LIAO S H. Expert system methodologies and applications - a decade review from 1995 to 2004 [J]. Expert Systems with Applications, 2005, 28(1): 93-103.
- [14] QUAH T, TAN C, RAMAN K S, et al. Towards integrating rule-based expert systems and neural networks [J]. Decision Support Systems, 1996, 17(2): 99-118.
- [15] LI Hui, LI Xiangyang, GU Jie. Intelligent data engineering and automated learning [C]// Proceedings of Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Germany: Springer, 2006: 637-644.
- [16] SUN Jie, HUI Xiaofeng. Advanced data mining and applications [C]// Proceedings of Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Germany: Springer, 2006: 947-958.

(上接第 2000 页)

未来将进一步从零件的微观结构和力学性能摸索更优化的加工参数,使系统的开放性和柔性优势得到更好的发挥。

4 结束语

由 PROFIBUS-DP 控制的激光器和开放式运动控制器控制的机器人构建的集成激光制造系统,结构开放,应用灵活、方便。其优势体现在:率先提出了开放式结构的集成激光制造系统概念;同时解决了激光器和机器人的开放式控制,进一步提高了激光制造系统的柔性;加工效果达到了闭环控制系统的加工水平(见文献[8]),解决了常用激光制造系统中由于硬件系统的专用性,无法发挥激光加工优势的缺陷。

由于运动控制器制造厂商的不同,其控制语言仍然各不相同,离真正的开放还有一定的距离,用户可以通过开发具有一定通用性的软件来刺激各厂商统一标准,开发类似于 BASIC, C 等的标准控制语言。关于 PROFIBUS 的控制算法和机器人的控制算法,以及集成控制软件的实现,将在其他文章中介绍。下一步将在该系统中引入温度和位置传感器,实现各种加工过程的实时闭环控制。激光制造系统的智能化研究将是后一阶段的重点和长期目标。

参考文献:

- [1] YU Gang, YU Heji. Integrated laser intelligent manufacturing engineering [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001 (in Chinese). [虞钢, 虞和济. 集成化激光智能加工工程 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.]
- [2] WAN Junjun, DAI Xianzhong, MENG Zhengda. Design and realization of an open robot controller [J]. Modern Electronics Technique, 2004, 27(15): 57-61 (in Chinese). [万俊君, 戴先中, 孟正大. 开放式机器人控制器设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2004, 27(15): 57-61.]
- [3] SUN Bin, YANG Ruqing. A summarization of open architecture robot controller [J]. Robot, 2001, 23(4): 374-378 (in Chinese). [孙斌, 杨汝清. 开放式机器人控制器综述 [J]. 机器人, 2001, 23(4): 374-378.]
- [4] YU Wancheng, WANG Taiyong, LI Hongwei, et al. The research on five-coordinate robot based on open motion controller [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2004(9): 12-14 (in Chinese). [于万成, 王太勇, 李宏伟, 等. 基于开放式运动控制器的五坐标机器人的系统结构研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(9): 12-14.]
- [5] CAI Hegao, JIANG Li. Review and prospect of robot in China [M]// The Foreland of Chinese Science and Technology: the Edition of Chinese Academy of Engineering. Beijing: Higher Education Press, 2005 (in Chinese). [蔡鹤皋, 姜力. 我国机器人的回顾与展望 [M]// 中国科学技术前沿, 北京: 高等教育出版社, 2005.]
- [6] WANG Xiaocheng, YUAN Lihong, ZHANG Shirong. The motion controlling technology of programmable logic controller [M]. Beijing: China Machine Press, 2006 (in Chinese). [汪小澄, 袁立宏, 张世荣. 可编程控制器运动控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.]
- [7] DAVID J K, SCOT W, GEORES S. Inside visual C++ 6.0 [M]. Beijing: Beijing Hope Press, 1999 (in Chinese). [DAVID J K, SCOT W, GEORES S. Visual C++ 技术内幕 6.0 [M]. 北京: 北京希望出版社, 1999.]
- [8] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A. A mechatronics approach to laser powder deposition process [J]. Mechatronics, 2006, 16(10): 631-641.