

# 基于PC的三维激光加工数控系统构架与关键问题研究\*

迟关心, 吴 湘, 崔丽娟

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘要] 提出了以微步距硬件插补为核心的三维激光切割数控系统构架, 分析了软件任务并构建了控制功能的实时调度模型, 实现了 Windows 平台的实时性及多任务协调控制。开发了基于 DDA 精插补的微步距硬件插补模块, 满足运动控制的速度与精度要求; 构建了内核驱动模块实现中断响应与伺服控制; 结合空间圆弧转接理论与前推-回溯算法开发了轨迹速度预测与平滑模块; 提出了硬件变频调节法实现进给倍率的改变。该三维激光切割数控系统能够实现高速高精度运动控制, 并且软硬件结合的开放式结构提高了系统的实时性以及功能的可扩展性。

关键词: 三维激光切割; 数控系统; 硬件插补; Windows 系统

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.040



迟关心

教授、工学博士, 主要研究方向为高效节能电火花加工脉冲电源技术、微细电加工技术、多轴联动数控电火花加工系统等。完成和承担了国家“863”计划、自然科学基金等 20 余项科研课题, 发表学术论文 60 余篇。

三维激光切割能够灵活地对空间曲线进行加工, 满足各领域立体工件切割需求, 是激光加工的重要研究方向。目前, 市面上应用在大功率激光切割机的常见数控系统有 PA 数控系统、法格 (FAGOR) 数控系统以及倍福 (Beckhoff) 数控系统, 其中只有 PA 数控系统与中国有关, 该系统是由深圳大族激光科技股份有限公司与德国 Power Automation 公司 (PA) 共同出资组建的深圳大族彼岸数字控制软件技术有限公司研发的, 但其关键核心技术还是掌握在德国 PA 公司。

国内很多学者进行了基于 PC 的 Windows 数控系统的构建和实时性能研究<sup>[1-3]</sup>、基于 CPLD 技术的数控系统精插补算法的研究<sup>[4]</sup>以及轨迹优化、速度平滑处理、三维光斑半径补偿及偏置式激光头激光加工单点指向功能等方面研究<sup>[5-7]</sup>。然而这些研究都是独立进行的, 因此, 本文基于作者的多年研究基础, 系统阐述

基于 PC 的三维激光加工数控系统构架及其关键问题。

基于 PC 的三维激光加工数控系统以通用 PC 加标准化 I/O 转接硬件为基本结构, 搭载具有强大管理功能及友好界面的 Windows 操作系统, 各复杂的功能均可通过软件实现并以模块的形式添加到系统中, 具有很强的开放性。但 Windows 操作系统在实时性方面的限制使其不能满足插补、位控等强实时性功能需求。因而如何实现扩展 Windows 系统实时性, 实现多任务的协调控制, 并满足三维激光切割的高速高精度运动控制需求, 是三维激光切割数控系统设计的关键问题。

## 三维激光切割数控系统构架

本文设计的三维激光切割数控系统采用 PC+ 微步距插补硬件结构形式, 以实现数据采集插补并扩展 Windows 系统的实时性, 满足系统高速高精度运动及强实时性的功能需

\*基金项目: 国家科技重大专项 (2009ZX04003-032)。

求。图1具体说明了基于微步距硬件插补的数控系统硬件结构。

微步距插补硬件主要提供高精度的外部定时中断,并进行微步距硬件精插补运算与控制脉冲输出。

### 1 Windows 系统的实时性

在 Windows 操作系统中进行实时控制时,针对数控系统中各软件任务对实时性及定时精度的要求不同,常用的实现方式有利用系统常规定时器、多媒体定时器、系统定时中断或引入外部高精度定时时钟等<sup>[1]</sup>。常规定时器及多媒体定时器运行于用户模式,定时间隔长、精度低,只能完成非实时任务。本文采用引入外部高精度定时时钟方式,系统在内核层以执行中断服务例程(ISR)或申请延时过程调用(DPC)的方式对中断做出响应,具有高响应优先级,响应延时一般是微秒级,能够满足实时任务需求。

### 2 数控系统硬件结构

数控系统硬件主要由工业 PC 及微步距插补硬件两部分组成。微步距插补硬件包括 NC 主控板、NC 轴控板及轴接口板。其中 NC 主控板与 NC 轴控板的开发均基于大规模可编程逻辑器件(CPLD),主控板通过 ISA 总线与工业 PC 连接,完成总线地址译码、插补数据传输及 IO 点控制等功能,外部高精度定时时钟与 PC 通过 IRQ7 连接。轴控板则接收精插补数据并控制 5 轴进行同步微步距精插补运算及位控脉冲输出,控制脉冲经过轴接口板进行隔离与驱动后控制伺服放大器驱动电机运动。

### 3 数控系统软件任务

数控系统软件所实现的功能主要可分为控制和管理两类,控制类功能主要包含机床的加工控制、运动控制以及 I/O 控制。管理类功能则主要实现用户与数控系统间的信息交互与数据管理。数控系统要实现多任务的实时协调控制,需要将实现功

能的软件任务按实时性进行划分,如图2所示。

### 4 数控系统控制功能实时调度模型

数控系统的管理类功能利用 Windows 系统的控件实现,对任务的响应机制是基于消息的,而对于控制类功能,需要对软件任务建实时调度模型,以满足系统控制实时性需求。

硬实时任务通过编写内核空间中的 WDM 驱动程序完成。当外部硬件中断触发时,由中断服务程序(ISR)申请延时过程调用(DPC),判断运行状态并进行各轴的位控计算,将下一周期的进给增量锁存到硬件插补器的缓存中。为避免强实时任务出现数据饥饿,在插补任务和底层位控任务间开辟位控缓存区,在预处理阶段将缓存区填满并由弱实时插补任务实时检测与补充,设置与位控周期相匹配的插补速度及缓存区深度时,就可保证强实时性任务的正确执行,并且在位控周期内只涉及进给增量的简单计算及端口读写,能够满足位控任务的硬实时性要求。

非实时任务及软实时任务在系统用户空间中执行,为避免耗时任务执行对用户消息响应的影响,提出多线程结构。主线程负责响应由用户发送的控制消息,若与加工或运动控制相关,则进行插补准备,结果存放于用户空间预设的插补缓存中,并设置运行状态位。加工线程则在检测到运行状态后实时获取内核空间位控缓存区状态,非满时则执行加减速控制与粗插补任务并填充位控缓存区,用户空间与内核空间的通信由 DeviceIOControl 函数调用实现。多线程结构避免了耗时任务运行可能引起的系统冻结状况,有助于提高数控软件的整体性能。整个数控系统控制功能软件任务实时调度模型可归纳为图3所示。

## 数控系统关键问题

数控系统功能需要在 Windows 系统的用户空间、内核空间及硬件协同实现,因而将数控系统关键功能划分为若干模块。微步距插补硬件

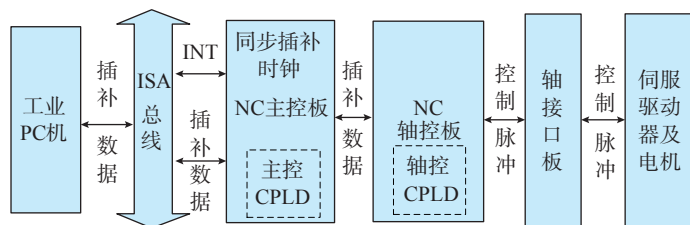


图1 数控系统硬件结构

Fig.1 Hardware structure of CNC system

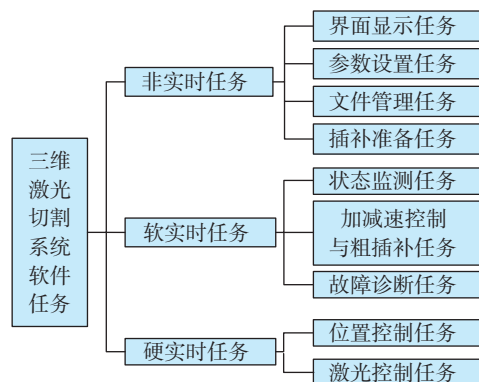


图2 数控系统软件任务实时性划分

Fig.2 Real-time partitioning of software tasks in CNC system

采用自顶而下的设计思路,将硬件功能划分成单元并实现。软件利用 VC++6.0 开发,以面向对象的编程思想对模块按类进行封装,模块间的耦合性小,具有很好的可扩展性和易维护性。

### 1 微步距硬件插补模块

数据采集插补计算分两步进行,粗插补由软件完成,用若干条微小线段逼近给定曲线,线段长度由运动速度决定。精插补由硬件完成,它对粗插补及位置控制计算结果进行数据密化,文献 [2] 利用 CPLD 设计了硬件精插补算法,但每个插补中断获取本周插补数据会造成一定的插补延时。

本文设计的微步距硬件插补功能是利用 Quartus-II 软件在 CPLD 内编写 VHDL 硬件描述语言实现的,它为 PC 提供外部高精度定时中断,并协同五轴同步进行精插补计算与脉冲输出,设置单级硬件缓存保证连续插补的同时节省硬件资源。微步距插补硬件模块的整体原理图如图 4 所示,可将其分为译码单元、时钟分频单元、插补缓存单元和多轴插补器单元。由于各单元之间相对独立且 CPLD 门数有限,将译码单元置于 NC 主控板的主控 CPLD 内实现,而其余单元置于 NC 轴控板的轴控 CPLD 内完成。

多轴插补器单元由可扩展的多个单轴插补器组成,由经驱动脉冲分频产生的插补同步信号(Com)控制进行同步插补,实现多轴联动功能。Com 信号还作为外部高精度定时中断信号,文中设定中断周期为 75 $\mu$ s,此时 Com 信号为占空比为 29/30 的方波信号。

单轴插补器开发基于 DDA 插补原理,实现原理图如图 5 所示,单轴进给量由 4 位运动数据与 1 位方向数据组成,DDA 积分器容量为 30,并进行预置半数累加值以增强脉冲均匀性。该设计能使每个位控周期单轴插补器输出 0~15 个正向或反向控制脉冲,以正/负脉冲模式驱动数

字伺服电机。当伺服单位脉冲进给为 1 $\mu$ m 时,机床单轴运动最大速度为 12m/min,而当运动速度小于单周期单脉冲输出时,以多个周期输出一个脉冲实现,能够提高运动速度及运动精度。

单轴插补器的关键信号时序如图 6 所示,在驱动 CLK 作用下,当插

补同步信号(Com)为低电平时,若同时数据有效(EN),则进给增量值寄存器从缓存中读取已锁存的插补数据并开始累加输出。在下一时钟周期,Com 信号变为高电平,使能控制电路使 EN 信号失效,防止无效数据重复使用。由于软件对中断的处理存在延时,在数据累加并输出脉冲

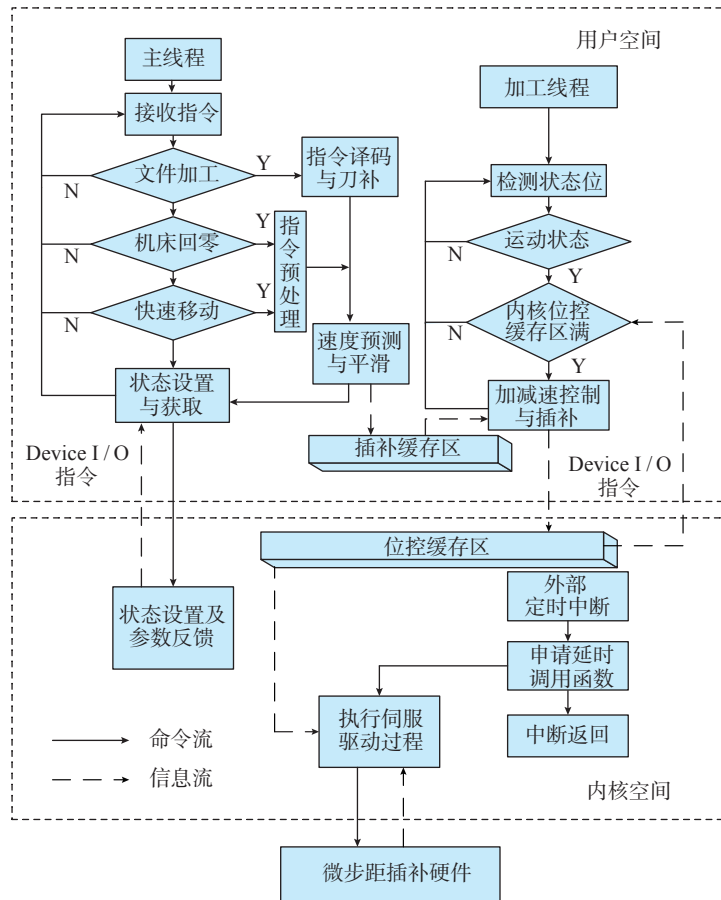


图3 数控系统控制功能软件任务实时调度模型  
Fig.3 Real-time scheduling model of control function software in CNC system

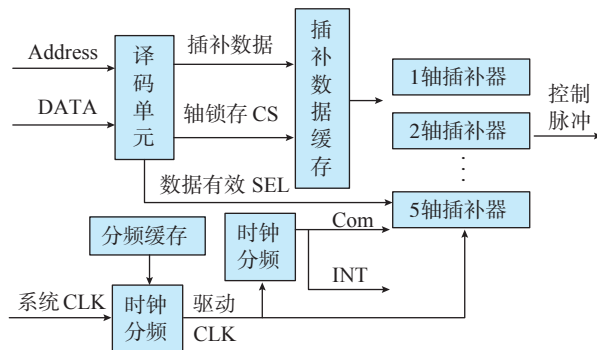


图4 微步距硬件插补模块原理图  
Fig.4 Schematic diagram of micro step hardware interpolation module

的过程中硬件获取并锁存软件计算的下一周期进给增量值,并通过同步使能信号(SEL)重置EN信号,等待下一次插补同步信号到来。软件部分对中断处理的延时及锁存插补数据的时间小于插补周期值,可以保证插补连续准确地进行。

利用 Quartus-II 软件自带的波形仿真工具验证微步距插补功能。鉴于 NC 轴控板中单块 CPLD 所含门数的限制,进行四轴联动仿真。插补模块驱动时钟频率为 400kHz,同步插补中断周期为 75 $\mu$ s。为模拟软件系统响应实时性,假设软件响应中断及延时调用时间与插补计算造成的延时为 15 $\mu$ s,数据锁存时的端口读取时间为 5 $\mu$ s。分时传输四轴的运动方向 d7 及运动数据 PulDat,最终由 SEL 信号使能锁存,在下一插补周期能够获得对应的脉冲输出。波形仿真如图 7 所示, PUL 与 SIG 为输出的正负向脉冲,可以看出四轴插补能同步进行,并且插补周期内输出脉冲均匀,满足运动控制实时性及插补控制要求。

## 2 内核驱动模块

数控系统中对硬实时任务的响应及对硬件的操作只能在内核空间完成。文中通过编写 WDM 驱动程序对外部定时中断进行响应,计算并向硬件输出位控数据。按面向对象的编程思想在驱动中建立中断响应类、伺服驱动类、数据服务类、端口操作类等。

利用 Driver Studio 提供的 WDM 驱动程序模板,在初始化外部设备时,将中断服务例程 ISR 及延时调用例程 DPC 与设备建立连接。当外部中断到来时,系统首先响应中断服务例程,在 ISR 中申请 DPC,在 DPC 中判断设备运行状态并执行任务函数。

伺服驱动类 Motor 用于驱动微步距插补硬件,控制伺服电机完成运动。根据轴运行所需的状况及控制

方式,可以确定驱动对象的参数及驱动服务函数。驱动参数包含各轴的轴索引、轴类型、机械坐标、行程、正负向限位、零点、定位误差补偿间隔、补偿数值等。对应的驱动服务函数有:伺服初始化、伺服状态获取、错误状态判断、插补计算、定位误差补偿、运动脉冲输出等。

在内核空间建立位控缓存区,接收由用户空间发送的指令数据,为简化位控计算,控制指令均为含有距离与运动速度的匀速直线段。若当前指令段插补结束时,需要从缓存中读取并重新对各轴的运动距离与速度进行设置,为减小由于运动离散化造成的误差,将上一段小于运动速度的剩余距离累加到新一段指令中,完成一次伺服驱动的流程如图 8 所示。

对硬件的操作采用内存映射机制实现<sup>[3]</sup>,微步距插补硬件设计时具有固有的物理地址,则在内存中开辟与硬件地址一一对应的缓存区,通过对映射内存区的读写操作就能够实现对外部硬件物理内存的直接操作,在 WDM 驱动中提供了 KMemoryRange 类,能够完成映射内存的空间申请及读写操作,使得系统与外围硬件的交互具有强实时性。

## 3 速度预测与平滑模块

插补准备过程完成数控代码译码及速度预测与平滑任务,这类任务属于非实时任务。数控代码译码的实现本文不再赘述。

速度预测与平滑模块能够对三维激光自动编程软件产生的微小直线段进行速度规划,预测路径危险点

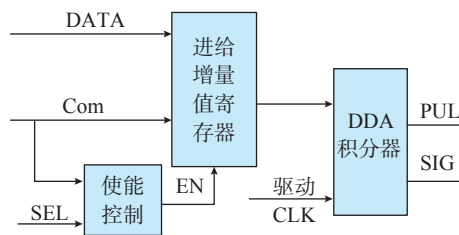


图5 单轴插补器原理图

Fig.5 Schematic diagram of uniaxial interpolator

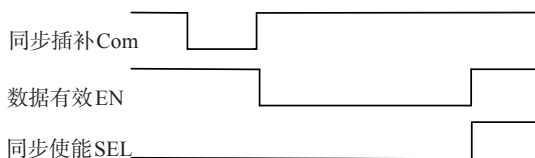


图6 单轴插补器关键信号时序

Fig.6 Key signal timing of uniaxial interpolator

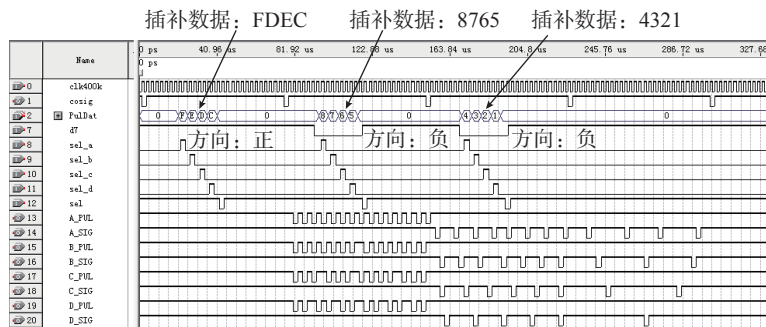


图7 微距硬件插补仿真

Fig.7 Simulation of macro hardware interpolation

并提前减速,提高整体运动的平均速度并避免频繁加减速。由于本系统中运动冲击主要来自于直线轴速度方向改变,因而速度平滑主要针对直线轴,旋转轴仅在不能满足运动跟随时对速度进行修正。

文献 [4] 提出了连续短线段空间圆弧转接方案,如图 9 所示,遍历加工指令缓存,在相邻两线段间加入相切圆弧,能够有效提高转接点处运动速度,拟合误差易于控制,并且圆弧插补简单,易于工程实现。本文采用该转接方法,根据相邻加工段长度  $L_i$ 、 $L_{i+1}$ ,空间夹角  $\varphi_i$  及轨迹最大允许误差  $\delta_{\max}$  获取各转接点的圆弧半径  $B_i$ 、过渡距离  $S_i$  及转接点预设运行速度  $V_{P_i}$ ,并调整加工段长度为  $L'_i$ 。

运动过程中的起始与终止速度应设定为零,并且对于快速移动与加工状态转换、激光头姿态调整等有特殊需求的加工指令,也应将对对应段的预设转接速度  $V_{P_i}$  修正为零,之后提出前推-回溯算法计算各加工段的始末速度及加减速距离,前推过程从首段开始考虑加速距离约束及设定进给速度  $V_{mset}$  约束,按式 (1) 前向计算各运动段的最大运动速度  $V_{mi}$  及末速度  $V_{ei}$ ,至末段结束。

$$V_{mi} = \min(V_{mset}, \sqrt{V_{si}^2 + 2aL_i}) \quad (1)$$

$$V_{s(i+1)} = V_{ei} = \min(V_{mi}, V_{P_i})$$

回溯过程是为保证运动中减速过程有足够的距离,在前推结果的基础上从未段开始考虑减速距离约束,按式 (2) 反向修正各运动段的最大速度  $V_{mi}$  及初速度  $V_{si}$ 。回溯过程假设全段距离减速的各段计算初速度  $V'_{si}$  为:

$$V'_{si} = \sqrt{V_{ei}^2 + 2aL_i} \quad (2)$$

以其验证减速距离约束,若  $V_{si} < V'_{si}$ ,则减速距离足够,此时仅修正最大速度  $V_{mi} = \min(V_{mi}, V'_{si})$ 。若  $V_{si} > V'_{si}$ ,则减速距离不足,修正该段初速度及最大速度使  $V_{mi} = V_{si} = V'_{si}$ ,重复回溯计算至首段,即可获得连续的运动

段速度规划结果。前推-回溯过程不含有迭代计算,算法简单。

速度预测与平滑过程以圆弧过渡为基础,考虑各约束条件并利用前推-回溯算法获得各直线运动段的初末速度、最大运行速度以及加减速距离、圆弧段的插补半径及运动速度。最终,将运算结果存入到插补缓存区中,由后续功能模块进行粗插补计算。

#### 4 加减速控制及粗插补模块

加减速控制与粗插补模块对插补缓存区中的数据进行处理,包含对空间直线的加减速控制与粗插补以及空间圆弧转接段的圆弧粗插补过程。该任务属于弱实时性任务,在用户空间的加工线程中实现。文献 [4-5] 中详述了空间圆弧与直线插补算法,本文不作为重点介绍。

#### 5 进给倍率改变解决方案

在加工调试阶段,往往要改变进

给倍率以完成试切等功能,传统的进给倍率改变方案一般在粗插补中完成,仅保留部分插补结果并重新进行速度规划与插补计算。在运动控制算法复杂的情况下,该方案将加重软件计算负担,影响系统任务响应的实时性,并可能造成数据饥饿。

轴运动速度大小是由输出到伺服驱动器的脉冲频率控制。当各精插补周期控制脉冲个数不变,而改变精插补中断周期时,同样可完成速度调节。基于以上思想,本文提出硬件分频调节法,改变微步距插补硬件插补驱动脉冲频率,使插补周期改变,实现进给倍率的调节,避免了进给倍率调节时重复计算带来的软件负担。

机床初始以 100% 的倍率运行,速度为  $V$ ,插补硬件中的驱动脉冲时钟频率为  $F$ 。若某时刻将目标进给倍率调整为  $K$ ,则目标速度为  $KV$ ,目

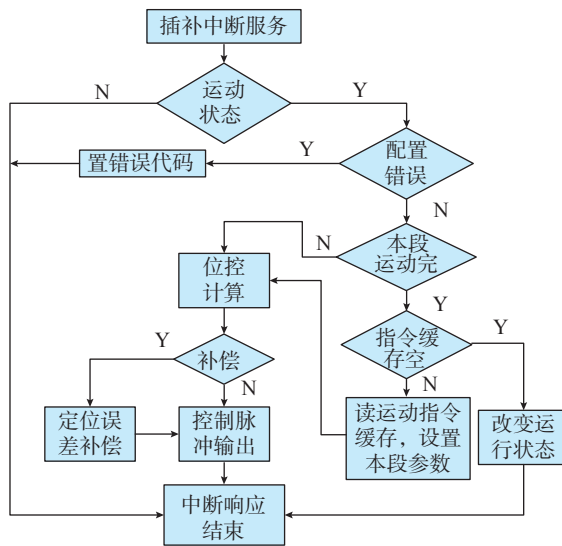


图8 伺服驱动流程图  
Fig.8 Servo drive flow chart

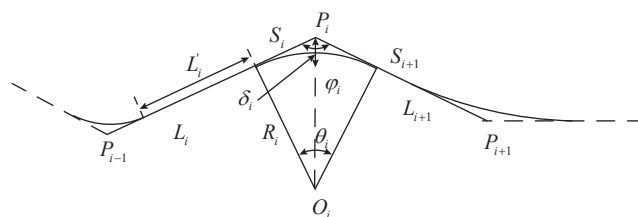


图9 空间小线段圆弧转接示意图  
Fig.9 Schematic diagram of arc transfer of small line segments in space

标驱动脉冲频率为  $KF$ 。为避免最高档进给倍率运动超出速度限制,在速度预测与平滑时使用最高倍率进行规划。考虑到运动速度改变过程中可能产生的冲击,应按照一定的加减速规则缓驱动脉冲频率。文中采用直线加减速方案,取许用合加速度  $a$ ,按加减速规则计算下一周期速度值  $V_{i+1}=V_i+aT_i$ ,则此时过渡倍率系数  $K_i=V_{i+1}/V_i$ ,对应的驱动脉冲频率  $F_i=K_iF$ ,计算对应的硬件系统时钟分频比,并存入时钟分频单元的分频缓存中,就能够使硬件按规律改变插补驱动脉冲频率,实现平稳的硬件进给倍率改变。

## 结论

本文在 PC+ 微步距硬件插补的硬件结构基础上,基于 Windows 平台,设计了三维激光切割数控系统。建立了数控系统控制功能实时调度模型,实现了数控系统多任务的协调控制;对数控系统功能模块的设计与开发能够满足三维激光切割的高速高精度运动需求;整个数控系统具有稳定性及实时性好,可扩展性强等优点;该系统已在国家科技重大

专项“大功率厚板数控激光切割机 and 三维数控激光切割机”中验证。

## 参考文献

- [1] 王芳,王琨琦,梅雪松.基于 Windows 全软件数控系统实时性的研究[J].西安工业大学学报,2009,29(3):228-233.
- WANG Fang, WANG Kunqi, MEI Xuesong. Research on real-time control of full software CNC system of based on windows[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2009, 29(3): 228-233.
- [2] 黄海鹏,迟关心,王振龙,等.多轴联动电火花加工数控系统开发[J].计算机集成制造系统,2010,16(2):372-379.
- HUANG Haipeng, CHI Guanxin, WANG Zhenlong, et al. Development of multi-axis electro-discharge machining CNC system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(2): 372-379.
- [3] 吕占喆.基于 PC 的三维激光切割数控系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- LÜ Zhanzhe. Research on 3-D laser cutting numerical control system based on PC[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [4] 李宏胜,李少卿.采用 CPLD 技术实现数控系统精插补算法的研究[J].组合机

床与自动化加工技术,2003(12):63-66.

LI Hongsheng, LI Shaoqin. Realization of CNC fine interpolation with CPLD device[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2003(12): 63-66.

[5] 何均,游有鹏,陈浩,等.连续短线段空间圆弧转接与插补[J].航空学报,2010,31(5):1086-1092.

HE Jun, YOU Youpeng, CHEN Hao, et al. An Interpolation for continuous short-segments based on space arc transition[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 1086-1092.

[6] 黄序,周祖德,周云飞,等.五轴联动激光切割机数控系统空间直线和圆弧插补算法的研究[J].自动化学报,1995,21(2):238-243.

HUANG Xu, ZHOU Zude, ZHOU Yunfei, et al. A reasearch on interpolation algorithm of space line and arc for numerical control system of five-axis laser cutting machine[J]. Acta Automatica Sinica, 1995, 21(2): 238-243.

[7] 迟关心,顾明江,王励勤,等.偏置式激光头激光加工单点指向功能实现方法的探讨[J].电加工与模具,2012(2):43-45.

CHI Guanxin, GU Mingjiang, WANG Liqin, et al. Study on implementation methods of one point steering function in laser machine with offset laser head[J]. Electromachining & Mould, 2012(2): 43-45.

通讯作者:迟关心, E-mail: chigx@hit.edu.cn.

# Research on Architecture and Key Issues of PC-Based 3D Laser Machining CNC System

CHI Guanxin, WU Xiang, CUI Lijuan

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[ABSTRACT]** A three-dimensional laser cutting CNC system architecture with micro-step hardware interpolation as the core is proposed. The software tasks are analyzed and a real-time scheduling model of control functions is constructed. The real-time and multi-task coordinated control of the Windows platform is realized. Developed a micro-step hardware interpolation module based on DDA precision interpolation to meet the speed and accuracy requirements of motion control; built a core drive module to achieve interrupt response and servo control; combined space arc transfer theory and forward-backtracking algorithm to develop the trajectory speed prediction and smoothing module; proposed the hardware frequency division adjustment method to realize the change of the feed rate. The 3D laser cutting numerical control system can realize high-speed and high-precision motion control, and the open structure of the combination of software and hardware improves the real-time performance of the system and the scalability of functions.

**Keywords:** 3D laser cutting; Computer numerical control system; Hardware interpolation; Windows system

(责编 古系)