

基于 DSP 的衍生式非圆车削数控系统设计

周惠兴 陈现敏 冯雪 傅华蕾 刘石创

(中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要 为使传统数控车床具备车削非圆截面零件的功能,根据衍生式数控系统的原理,采用一直线电机伺服单元为衍生模块,以 TMS320F2812DSP 为衍生模块的控制核心,设计了衍生式非圆车削数控系统。实验结果表明:该系统能对衍生模块直线电机进行高速伺服控制和 U 轴跟踪控制,分辨率 $< 0.5 \mu\text{m}$ 。新系统充分利用了原有数控系统,结构简单、目标明确、价格便宜、性能稳定。改造后的车床既能车削各种活塞、靠模等非圆截面零件,又具有通用数控车削的功能。

关键词 衍生式数控系统;直线电机;非圆车削;DSP

中图分类号 TM 359.4;TG 659

文章编号 1007-4333(2006)06-0087-05

文献标识码 A

Design of a DSP based derived CNC system for noncircular turning

Zhou Huixing, Chen Xianmin, Feng Xue, Fu Hualei, Liu Shichuang

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to obtain noncircular turning function for a traditional CNC system, a derived CNC system was designed based on the principle of a derived CNC. The derived block is a linear motor servo unit in which a TMS320F2812DSP is used as a control core of the derived block. The results show that the derived block can fulfill the needs of high speed servo control of a linear motor and tracking control of a U axis. The resolution of the system can reach $0.5 \mu\text{m}$. The new derived CNC system has a simple structure, definite goal and good stability. It can machine parts with noncircular section, like pistons, and has also turning function of a common CNC system.

Key words derived CNC system; linear motor; noncircular turning; DSP

在加工非圆截面零件时(如中凸变椭圆活塞),要求刀具在轴向移动的同时能在径向作高频振动^[1],一般的通用 CNC 系统不能满足速度和精度要求。目前,技术先进国家已发展了一种高精度加工非圆截面零件的新工艺,推出了各种 CNC 微机控制活塞加工系统。在我国清华大学于 1996 年与广州机床厂合作生产了全功能的活塞数控车床。长沙一派数控机床有限公司和南京四开电子企业有限公司等也推出了相关产品。然而新系统的价格仍然比同型号普通数控车床高 3~5 倍,改造普通数控车削系统使其具备加工非圆截面零件的功能是更经济合理的办法。基于此,笔者提出衍生式数控系统(extracted CNC system, ECNC)^[2],其中,传统的专用

数控系统作为一独立的部件被应用,其结构和功能不变;而系统的网络和其他扩充功能则由其他衍生的功能部件承担,衍生的功能部件可相对独立运行,不占原系统资源,其内部采样频率可不同于主系统。

本研究利用衍生式数控系统设计思想,设计基于 TMS320F2812DSP(digital signal processor)的高速衍生式非圆车削数控系统,即在普通数控车削系统的基础上衍生一高速直线伺服电机单元^[2],用于驱动刀具,并与原系统协调工作,使原有数控车床能够加工复杂非圆截面零件^[3-5]。

1 衍生式数控系统

ECNC 系统具有 2 种不同的体系结构:功能衍

收稿日期:2006-03-30

基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(2001102067)

作者简介:周惠兴,教授,博士生导师,主要从事直线电机和直线伺服单元、精密运动控制、多轴计算机数控车床和特种计算机数控系统等研究, E-mail: hzhou@cau.edu.cn

生结构(FECNC)和开放衍生结构(OECNC)。二者开放程度不同,前者侧重于功能扩充,后者侧重于与外界的联系。

FECNC体系结构(图1(a))是指在专用数控系统的基础上扩展必要的功能,系统的主要部分仍是原专用数控系统。

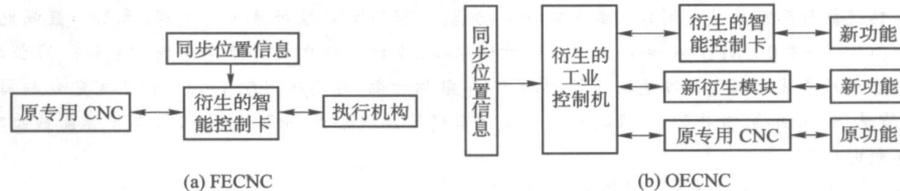


图1 FECNC和OECNC体系结构

Fig. 1 Structure of ECNC and OECNC

本研究利用功能衍生结构(FECNC)的ECNC系统,在普通数控车床的基础上增加非圆车削功能。这一新系统被称为衍生式非圆车削数控系统。

2 衍生式非圆车削数控系统

2.1 非圆车削的基本原理

非圆数控车削是一种高效、高柔性和高精度的非圆截面零件加工方法。其原理是:车床主轴带动非圆工件旋转,刀具则在高速直线电机的驱动及控制下,在径向(X 轴方向)跟踪工件表面,作与主轴转速相协调的往复精密直线运动,从而形成零件的非圆截面。更准确的说法是,通过 C 、 X 和 Y 轴的插补运动,形成零件的非圆表面。加工的困难在于刀具必须能够跟踪高速旋转的工件表面,并使加工工件具有要求的精度和粗糙度。通常非圆切削需要设计专用的数控系统,其中驱动刀具的直线电机或直线伺服单元是非圆数控车削技术的核心。它必须具备高频响,并在高频条件下仍然能够克服切削力等扰动,形成需要的曲面。直线电机的品种很多,但能够用于高速非圆加工的则以直流音圈电机、无铁芯交流直线电机^[6]和管型电机^[7]为主。直线电机的定子部分质量轻,运动惯量小,结构简洁,系统刚度高,快速响应特性好,产生的推力大(目前可达22 kN),同时具有良好的动态特性,在高速情况下能实现精密定位。为得到更好的频率响应特性,用于非圆加工的直线电机需要经过专门设计或采用特殊结构,如电磁铁驱动结构^[8],音圈和压电陶瓷复合驱动结构^[9]。

非圆数控车削系统通常是一个专门设计的数控

OECNC的基本部分是标准的工业控制计算机(图1(b)),原专用数控系统则作为整个控制系统的—个独立的功能部件。实际上OECNC系统就是一个基于工控机的开放式数控系统,除原有系统外,其他功能可任意更新或扩充。

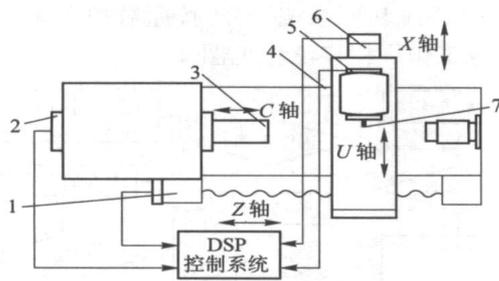
系统^[9],系统更新频率是普通数控系统的4~5倍,因此十分昂贵,用衍生方法实现非圆数控车削功能价格上要便宜得多。

2.2 衍生式非圆车削数控系统

衍生式非圆车削数控系统不仅能加工非圆截面零件,同时还具有普通数控车床的车削加工功能。本研究采用FECNC体系结构,将直线伺服单元及其非圆车削功能衍生到普通数控车削系统中。其中,高速直线伺服单元是其关键部件,用于数控车削非圆零件,并依靠原系统的位置信息与原系统同步运行。衍生式非圆数控车削系统具备比原系统高得多的采样更新频率,以控制高速直线电机。

衍生式非圆车削数控系统具体结构见图2。在原有数控车床的基础上增加一与 X 轴平行的高速直线位移伺服单元,形成 U 轴。工件轮廓确定后, U 轴的运动轨迹由 C 和 Z 轴的位置确定, U 轴和 C 轴的插补形成 Z 向某一位置上工件截面的非圆曲线。因此, U 轴的运动必须和 C 轴和 Z 轴同步,或者称 U 轴跟踪 C 轴和 Z 轴的位置而运动。 C 和 Z 轴的实时位置信号由脉冲编码器获得,并送入DSP控制系统(衍生的模块),经过计算得到 U 轴的实时目标值(非圆截面的目标值); U 轴的实际位置通过直线位置编码器测出,DSP计算出两者的偏差,并通过一定的控制算法得到控制信号,经功率放大器放大后控制直线电机输出所需要的运动。

显然,DSP控制系统是衍生式非圆数控系统的核心,除了实现跟踪 C 轴和 Z 轴并给出 U 轴控制信号外,还需实现和原有数控系统的通讯、数据存储运算,需要时通过接口和另一台计算机连接,以显示所



1. Z 向交流伺服电机; 2. 主轴位置检测传感器; 3. 非圆零件; 4. 直线电机; 5. 直线电机位置检测传感器; 6. X 向交流伺服电流; 7. 刀具

图 2 衍生式非圆车削数控系统示意图

Fig. 2 Sketch map of derived CNC system for non-circular turning

加工截面图形及实时误差值, 供调试或监测。

3 直线电机控制模块的设计

DSP 控制系统的硬件设计需考虑以下几个方面: 1) 高速运行状态下直线电机的伺服控制; 2) 控制系统与原有数控系统的通讯; 3) 非圆数据的描述和处理; 4) 实时非圆数据和位置误差信号的处理; 5) 衍生系统与调试或监测主机的通讯; 6) 其他接口。

3.1 速度要求

数控车削非圆截面零件时, 设主轴转速为 n (r/min), 主轴每转采样 s 点, 则要求的采样周期为

$$T = \frac{6 \times 10^7}{ns} \quad (1)$$

为保证精度, 主轴电机采用分辨率为 2048 增量式编码器, $s = 2048$, $n = 2400 r/min$, 则 T 约等于 $12.5 \mu s$, 即 DSP 控制系统必须在 $12.5 \mu s$ 内完成数据采样、控制算法的运算、数据存储和控制信号的输出, 实现正常加工时直线电机的实时控制。同时, 在故障发生时能进入中断服务程序执行保护功能。

3.2 DSP 主机

直线电机的控制器选用 TI 公司 (美国德州仪器公司) 最新推出的 TMS320F2812 32 位定点 DSP, 这是目前控制领域最先进的处理器之一: 主频 150 MHz (时钟周期 $6.67 ns$), 采用流水线技术和改进的哈佛结构, 能够在 1 个周期内完成 32×32 位的乘法累加运算, 对任何内存地址完成读取、修改和写入操作。TMS320F2812 处理器可满足加工时进行复杂的控制算法和加工程序的运算对速度的要求。

3.3 A/D 与 D/A

A/D 与 D/A 转换芯片应具有较高的转换速度和精度, 在本系统中采用 TI 公司的 ADS8361 和

DAC7731。ADS8361 是双路 500 kHz 16 位 $2+2$ 通道同步采样模数转换器, 具有很高的转换速度, 每个通道总的转换时间为 $2 \mu s$, 4 路差分输入提供较强的共模抑制比, 输入信号为 50 kHz 时共模抑制比 80 dB, 抗噪声能力强, 确保电机的位置精度。DAC7731 具有内部 +10 V 参考电源和串行 I/F 16 位单通道数模转换器, 输出灵活, 可以设置 $\pm 10 V$ 、 $\pm 5 V$ 和 +10 V 的输出范围, 同时, DAC7731 具有高速的转换速率, 输入数字量变化时, 输出电压变化到相应稳定电压值所需的时间为 $5 \mu s$, 误差仅为满刻度的 $\pm 0.003\%$ 。完成 1 次 A/D 与 D/A 转换的时间为 $7 \mu s$ 。

3.4 外扩 RAM

非圆车削时, 描述非圆面的数据较多, 为减少实时加工时 DSP 读取存放在 ROM 里的用户程序和数据的时间, 通常需对非圆面数据进行预处理, 并将处理好的数据放在 RAM 中。对一些规律性的数据, 则预先放在 DSP 的闪存。DSP 在实时工作时, 可以直接查表存取数据, 主要的计算时间放在控制算法上。另外, 当描述非圆面的数据为一组离散数据时, 则需大量的空间存放数据。DSP 控制程序本身也比较复杂, 包括伺服控制、故障诊断、监测保护和不同的接口等, 也需要一定的内存。

3.5 数据通讯、调试与运行监测

衍生的功能模块无显示能力, 为方便用户调试或实时监测直线电机的运动状况, DSP 控制模块需要将实时数据传输到上位机进行显示, 这需要高的数据传输速度, 传统串口 RS232 已不能满足实时性的要求。DSP 衍生模块设计时, 采用了 USB2.0 标准, 传输速率达到 60 MB/s, 足以保证 DSP 实时地把数据传到上位机。另外硬件上使用了 USB 总线的通用设备接口芯片 CH372, 在本地端, CH372 具有 8 位数据总线和读、写、片选控制线以及中断输出, 可以方便地挂接到 DSP 处理器的总线上。

3.6 线性功率放大

对 DAC7731 输出的控制信号进行功率放大进而驱动衍生的直线电机。功率放大部分要求大的驱动能力和快速转换时间。本研究采用了 PA05 功率运算放大器芯片。PA05 由美国 APEX 公司生产, 具有较高的转换速度, 可达 $100 V/\mu s$, 输出功率大, 瞬间峰值输出功率可达 500 W, 正常工作时功率为 250 W。PA05 采用独特的供电电压设计, 前置级的正负供电电压可以设计成始终比输出级高 5 V (绝

对值),因此前置级对输出级始终提供足够的驱动能力,并使 MOSFET 的损耗降至最小。同时 PA05 具有短路保护、故障保护和过流保护功能,确保直线电机安全稳定快速的工作,系统可靠性较高。

图 3 为衍生式非圆车削数控系统原理框图^[10]。除原系统外其余均为基于 DSP 的衍生模块,A/D 和 D/A 转换时间为 $7\mu\text{s}$,在 1 个周期中,实际用于 DSP 计算的时间为 $5.5\mu\text{s}$,TMS320F2812 的时钟周期为 6.67ns ,这个时间足以处理复杂的加工程序、实现故障诊断与监测保护等功能。完全满足直线电机工作时对实时性的要求。

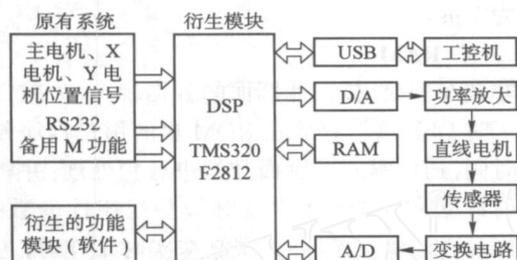


图 3 衍生式非圆车削数控系统原理图

Fig. 3 Principle chart of a derived CNC system

TMS320F2812 利用事件管理单元中的 QEP 从原系统的各电机位置信号接口取出各电机的位置信号^[11],并根据这个位置信息进行插补运算。通过原系统的 RS232 接口或并行口进行数据通讯,用原系统剩余的 M 功能对衍生模块给出起停信号或给出实时控制信号。工控机通过 USB 口取得数据并进行显示和误差分析。

4 软件设计^[12]

软件模块主要指由 DSP 实现的各种控制程序,其中原数控系统通过 M 功能给 DSP 发出控制信号。DSP 上的软件模块包括通讯、指令的解释和执行、控制接口诊断、控制卡配置、执行状况显示等。系统的执行过程为:首先,专用数控系统将用户程序及数据传送给 DSP 控制单元,其中含启动与停止 DSP 控制器的组合 M 指令及配置控制卡的专用指令;然后 DSP 对加工程序进行译码、静态配置和动态仿真,如果正确则进入等待加工状态,否则给出报警信号;最后,在进入加工状态后,DSP 控制器在原系统同步位置信号的作用下,输出直线电机的控制指令信号。

如果数控系统的程序代码中没有运行 DSP 的指令,则衍生的由 DSP 控制的直线电机模块不工

作,ECNC 系统和原系统一样,按原数控车床系统的代码指令工作。程序流程见图 4。

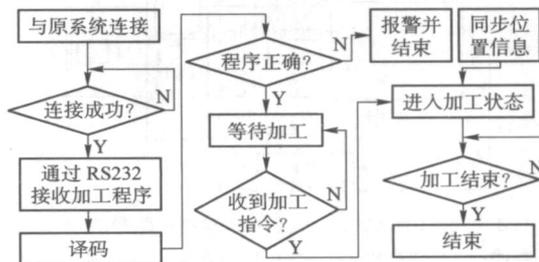


图 4 FECNC 系统的软件设计流程图

Fig. 4 Flow chart of software for FECNC

5 结束语

依据上述研究将普通数控车床改造成活塞加工数控系统,并进行实际加工。直线电机衍生模块频响大于 100Hz ,行程为 $\pm 1\text{mm}$,输出力 $> 300\text{N}$,系统分辨率达到 $0.5\mu\text{m}$,活塞的轮廓尺寸精度为 $\pm 5\mu\text{m}$ 。采用 CH372 通过 USB 接口以 300KB/s 的速度与工控机通讯,实时监测直线电机的运动状况。

衍生式数控系统的一个典型应用实例就是非圆车削。在普通数控车床系统上衍生一高速直线伺服单元,加上相应的控制软件,即成为可加工非圆截面零件的数控非圆车削系统。它充分利用了原系统,且新系统成本低、可靠性高,开发周期缩短。其核心是直线电机的伺服控制模块、接口及同步跟踪控制,TMS320F2812 DSP 为系统提供了速度保障。所设计的衍生式数控非圆车削系统是一个开放式系统,可以利用衍生模块扩充更多新功能。

进一步,可设计标准的智能控制卡并批量生产,企业若有数控系统需进行功能扩展,就可用此智能控制卡方便的改造原有数控系统。这方面还有待研究。

参 考 文 献

- [1] 王大庆,丁崇生,葛思华. 中凸变椭圆活塞加工数控车床数控系统的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2000, 42(4): 40~44
- [2] 周惠兴,王先逵. 衍生式计算机数控系统[J]. 中国机械工程, 1998, 9(5): 23~25
- [3] 江思敏,王先逵,钱磊,等. 非圆截面开放式数控车削系统的研究[J]. 制造技术与机床, 2002, 52(2): 15~16
- [4] 吴丹,王先逵,赵彤,等. 非圆车削中刀具运动实现方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2003, 43(11): 73~

- 76
- [5] Zhou Huixing, Brian H, Wang Xiankui. Extracted control approach for CNC non-circular turning [J]. Asian Journal of Control, 2005, 7(3): 50-55
- [6] Gyu H K, Jung P H, Gyu T K. A novel design of an air-core type permanent magnet linear brushless motor by space harmonics field analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001:3732-3736
- [7] Nicola B. Analytical field computation of a tubular permanent magnet linear motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000:3798-3801
- [8] 通口 俊朗, 三口知富. 电磁铁高速定位机构在非圆加工中的应用[C]. 精密工学春季学术讲演会论文集. 1989:441-442
- [9] 大川详二. CNC 高速非真圆创成加工系统[J]. 应用机械工学, 1990, 12: 94-99
- [10] 刘明灯, 陆启建. 直线电机与 DSP 高速运动控制器的应用[J]. 中国机械工程, 1999, 10(10): 71-72
- [11] 曲智勇, 董申, 张飞虎. 基于 DSP 的直线电机位置伺服系统[J]. 机械工程师, 2002, 34(5): 15-17
- [12] 王先逵, 钱磊, 吴丹. 典型非圆截面零件数控车削系统[J]. 机电信息, 1998, 11(1): 12-15

科研简讯

“973 计划”猪、鸡重要经济性状遗传的分子机制项目正式启动

2006 年 11 月 15—16 日, “973 计划”猪、鸡重要经济性状遗传的分子机制项目启动会在我校召开, 会议由首席科学家李宁教授主持。

李宁教授介绍了前期该项目总体情况和本期项目总体研究思路, 并对项目执行过程中材料报送、成果标注等管理工作提出具体要求。各课题负责人和骨干分别汇报了研究思路、研究基础、工作状态以及潜在成果, 并集中讨论了课题间的科研协作以及重大科研成果的产生等事宜。

该项目于 2006 年批准立项(项目编号为 2006CB102100), 执行期限为 2006—2011 年, 依托部门为教育部, 由我校和浙江大学、华中农业大学等 9 家科研院所共同承担。项目将在前期“973”项目工作积累的基础上, 利用功能基因组学、比较基因组学、生物信息学和表观遗传学等研究方法, 针对猪鸡品质、遗传抗性、生长繁殖等典型的复杂性状, 以及定位、分离和克隆影响这些复杂经济性状的基因和基因网络, 阐明其形成和调控这些复杂经济性状表型的分子遗传机理。同时, 还将研制高通量基因型诊断技术平台, 发展优质基因的平衡集成方法, 建立创新性的系统平衡育种理论。

项目共设置 7 个研究课题, 包括生长发育性状的功能基因组、品质性状形成的分子基础、繁殖性状形成的遗传机理、抗病和抗逆基因的克隆分析、重要复杂性状比较基因组、表观遗传和 miRNA 影响性状形成的机制和重要经济性状的分子改良。

(科学技术处供稿)