

高档机床主轴自动换挡 PLC 控制及实现^{*}

刘本刚¹, 刘天冬², 王碧玲¹

(1. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司技术中心, 沈阳 110034;

2. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司数控加工厂, 沈阳 110034)

[摘要] 通过修改数控系统机床参数与 PLC 编程, 实现了配套国产高档数控系统的大型五坐标双龙门铣床的自动换挡。执行换挡过程中控制主轴电机来回摆动, 换挡冲击小, 易于液压拨叉推动齿轮实现稳定配合, 可靠性高, 提高了国产数控系统在航空领域的应用水平。

关键词: 国产高档数控系统; 主轴; 自动换挡; PLC 编程; ASSEM 模块

Realization of High-Grade Spindle Automatic Shift by PLC Control

LIU Bengang¹, LIU Tiandong², WANG Biling¹

(1. AVIC Shenyang Aircraft Corporation Technique Center, Shenyang 110034, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Corporation Numerical Control Factory, Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] By modifying the CNC machine parameters and PLC programming, the automatic shift functions of the spindle supporting the domestic high-end CNC system for large five coordinate double milling machine was realized. During the execution of shifting, the spindle motor is controlled back and forth, with small shifting shock, easy for hydraulic fork to drive gear with stability and high reliability. The application level of the domestic CNC system in aviation is improved greatly.

Keywords: Domestic high-end CNC system; Spindle; Auto gear change; PLC programming; ASSEM module

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.120

高性能电主轴的不断应用,不但提供了很宽的变速范围,实现无极变速,而且易于实现高速、高精传动与定位,大幅提高了高端数控机床的切削性能,并简化了机床主轴传动系统。但是,由于其结构复杂、维护困难,尤其是提供大功率时,成本更高、系统更复杂,在强力切削、难加工材料(如钛合金)加工等对机床主轴功率要求高的特殊应用场合中,传统机械式主轴(齿轮变速箱变速)仍在广泛应用。机械主轴变速箱不但可以使主轴获得低速大扭矩,满足强力切削的要求,还可以通过换挡改变传动比满足不同工序对主轴切削性能的要求,充分发挥主轴电动机的性能。目前机械主轴换挡方式,主要有手动控制、半自动与自动换挡方式。手动方式主要用于普通机床的主轴换挡中,先进数控机床一般采用全自动换挡方式,该方式简单、可靠。自动换挡是指数控系统通过 PLC 执行相关指令,控制换挡机构改变变

速器传动比,满足转速指令要求并使主轴电机工作在最佳状态。由于涉及到数控系统与 PLC 系统之间的通信以及换挡时可能出现顶齿等造成齿轮无法啮合,导致换挡失败,甚至破坏齿轮传动系统。因此,要想提高国产数控系统在航空领域的应用水平,应实现主轴平稳地自动换挡。陈年华^[1]描述了自动换挡系统工作原理及系统参数调试过程,但未分析控制方法和换挡实现过程。潘月斗等^[2]针对主轴电机换挡过程中易出现顶齿现象,提出了换挡时主轴电机采用步进控制的策略,但换挡过程中,主轴易出现明显振动。邹方^[3]在西门子 840C 系统中通过 PLC 控制主轴摆动实现了自动换挡功能。目前,包括国产数控机床在内,航空企业的高档五轴数控机床全部配套国外主流数控系统,为实现国产高档数控系统在航空领域的突破,充分体现国产五轴数控系统的功能和性能,以正在现场进行国产数控系统改造的大型五坐标龙门铣床为例,在华中 848C 数控系统中,通过合理设计控制流程和 PLC 程序,实现了主轴的自动换挡功能。

^{*} 课题来源:“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项(课题编号:2013ZX04012-021)。

1 自动换挡结构及方式

目前,在强力切削、难加工材料等数控加工设备中,为充分发挥主轴性能,实现高性能加工,往往使用机械主轴,以满足大变速范围和低速大扭矩等加工特性。图1所示为大型双龙门铣床机械主轴的机械特性。在数控设备中,机械主轴变速器换挡一般采用自动换挡方式,通过 PLC 控制液压拨叉或离合器自动完成档位切换。其中,以液压拨叉控制方式最为常见,其原理如图2所示。PLC 根据当前加工程序中主轴指令转速与换挡比较值判断所需档位,并控制液压阀拨叉推动齿轮移动。同时,主轴电机按照指定控制策略带动变速器输入端齿轮运动,直到档位到达。

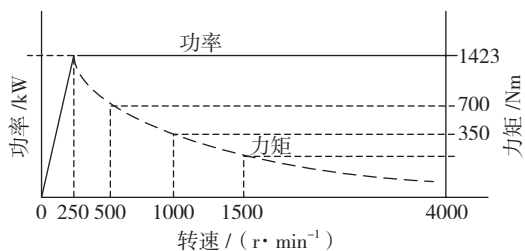


图1 大型双龙门铣床机械主轴的机械特性图

Fig.1 Mechanical characteristics of the spindle for large double gantry milling machine

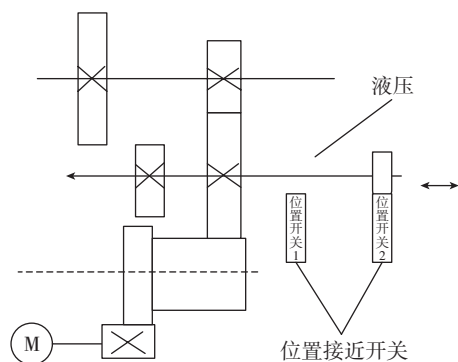


图2 液压拨叉结构示意图

Fig.2 Diagram of hydraulic fork structure

根据 PLC 指令实现形式,自动换挡可分为读 M 指令 and S 指令两种方式。读 M 指令方式是指在 PLC 中首先定义换挡的 M 指令,并在数控程序中的换挡位置添加相应的 M 换挡指令,数控系统在执行加工程序过程中 PLC 就会同其他 M 代码一样,执行该代码,完成换挡。该方法需要工艺员在零件加工编程或后处理中确定档位,节省了加工时系统判断档位的时间,但是增加了工作量,要求工艺员熟悉具体机床主轴换挡的功能和特点,并占用辅助代码。读 S 指令方式是指在数控加工过程中,PLC 通过数控系统获取当前加工程序中转速 S 指令值,根据换挡比较值实时判断当前所需档位,自动完

成换挡。此时,工艺员不需关注档位,只需在加工程序中指定主轴转速即可,由 PLC 自动判断实现换挡,简单可靠。因此,本文选择读 S 指令实现大型双龙门铣床主轴自动换挡功能。

2 自动换挡控制与编程

在换挡时,齿轮啮合可能出现顶齿的现象,导致换挡超时报警,甚至破坏齿轮传动机构,因此在换挡过程中需要对变速器输入端齿轮的运动进行控制^[4-5]。比如在换挡时允许主轴低速运动实现变速器齿轮的配合,该方式简单,但齿轮副间轴向运动过程中产生摩擦,在啮合过程中输出端齿轮一直承受低速负载,尤其是在刚开始啮合时,两齿轮轮齿接触面积小,冲击明显,易导致齿轮加速疲劳,甚至导致齿根断裂。本方案所采用的策略是在换挡过程中控制主轴电机低速摆动带动变速器输入端齿轮来回摆动,摆动幅度为大于齿距的整数倍,避免了顶齿现象,克服了主轴电机低速转动的不足。

2.1 自动换挡控制策略

大型五坐标双龙门铣床主轴的变速器结构,如图3所示,具有2档变速。

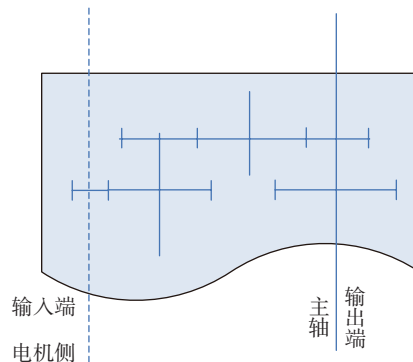


图3 大型双龙门铣床主轴变速器示意图

Fig.3 Diagram of spindle gearboxes for large double gantry milling machine

图4为根据自动换挡结构及华中高档848C数控系统控制特点,设计的主轴自动换挡控制流程图。在加工过程中,PLC 首先向 CNC 系统请求转速 S 指令值,获得该值后,与系统用户参数 P 中定义的档位比较值对比,确定当前转速所需档位后,检查当前所在档位并判断是否需要换挡。若需换挡,则 PLC 向 CNC 系统发送主轴停请求,并等待主轴零速到达信号,若在指定时间内收到 CNC 系统主轴零速到达信号,则 PLC 向 CNC 系统发送主轴运动控制指令,要求主轴电机低速摆动,如此反复,直到检测到档位接近开关的有效到达信号。与此同时,PLC 输出有效信号,启动液压站电机,保持该信号持续一定时间,防止液压电机频繁启动,影响电

机使用寿命和系统电气特性,并输出有效信号打开液压阀,使液压拨叉推动滑动齿轮,直到 PLC 检测到档位到位信号,结束换挡。在执行换挡过程中,若超出定时器设定值,系统会发出相应的超时报警,如换挡超时、零速到达信号超时等。针对液电机、电磁阀等非正常工作状态,都会触发系统报警,通过定义的复位可清除上述报警。

2.2 ASSEM 功能模块

在实现自动换挡的过程中,PLC 与 CNC 系统频繁进行通信,PLC 从 CNC 系统中获取指令转速、主轴状态等信息,需要换挡时,PLC 向 CNC 系统发送主轴电机运动控制指令等。为简化 PLC 编程,华中 848C 系统的 PLC 提供了很多专用功能模块。在自动换挡编程时,通过使用这部分功能模块,可大大提高编程效率和减少程序量,其中本方案使用的最主要的功能模块就是 ASSEM 模块,其梯形图如图 5 所示。ASSEM 模块的功能是 PLC 向 CNC 系统请求当前转速 S 指令值及方向,并将该值复制到 PLC 内部寄存器中,以便在 PLC 中对其进行数据处理。该模块在本方案中的应用是:请求系统 F2570~F2571 共四字节中的数据,通过计算将当前转速 S 指令值和转动方向保存到内部双字寄存器 D5 中,程序段如图 6 所示。

2.3 PLC 编程及实现过程

按照模块化编程思想,将设计的主轴自动换挡程序作为整个 PLC 程序的一个子程序,并通过用户参数 P50.1 的值进行调用。经现场多次调试与优化后,剩余自动换挡子程序梯形图如图 7~ 图 9 所示。图 7 中 D5 为保存 CNC 系统反馈的当前转速指令 S 寄存器, F402.15 为系统主轴零速标志位寄存器。图中 1427 行作用是将系统获得的 S 指令转速值单位转换为 RPM。图 8 中 1429~1432 行,用来控制主轴电机来回摆动。如图 9 所示是液压控制的程序段,通过控制液压拨叉实现自动换挡。

3 常见问题及解决方案

结合现场调试经验,对主轴自动换挡实现过程中常遇到的问题及

解决方案总结如下:

(1) S 指令数据获取错误。根据 ASSEM 功能模块的功能和参数意义,必须将参数 1 的值设定为 2,即连续读取 F2570、F2571 两个字节中的值,才能正确获取当前指令转速 S,包括方向和大小。否则,PLC 读到的值不是加工程序中的 S 值,如调试时,发现 D5 中的数据与加工程序中的指令转速值不一致,经检查,发现参数 1 被设定为 1,修改为 2 后问题解决。

(2) 执行换挡过程中主轴电机不能实现低速正反摆动。必须合理设定定时器或延时导通定时器的定时时间及单位,才能控制主轴电机正反摆动,实现平稳换挡,避免主轴出现较大冲击。

(3) 出现换挡超时报警。换挡超时报警的意义,在于通过设定定时器,保护主轴。根据电气原理图及液压流程图分析,可能存在的问题:①液电机未启动,应检查液电机控制继电器是否得电;②液压阀未打开,应

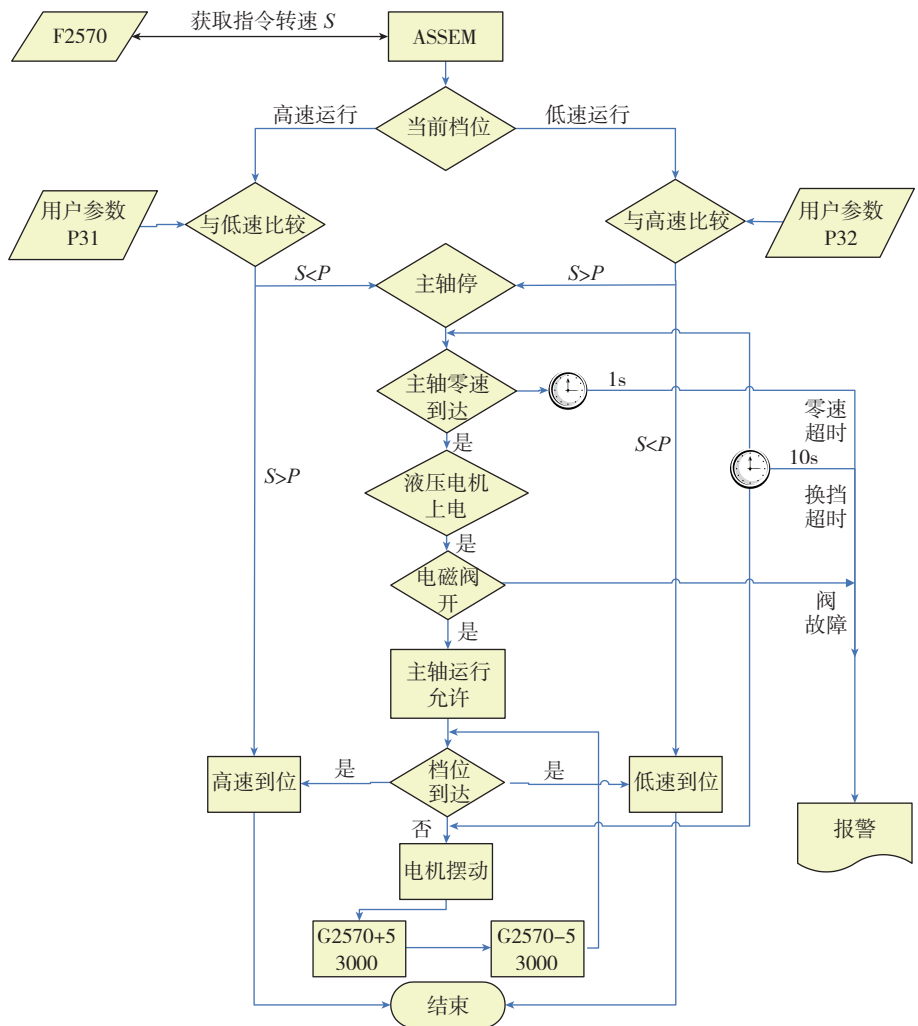


图4 本方案主轴自动换挡控制流程图
Fig.4 Automatic gear-shift control flow chart for spindle

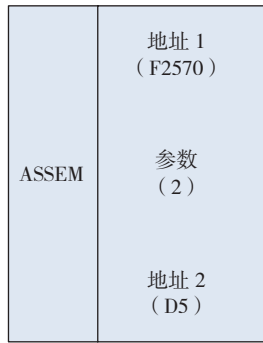


图5 ASSEM模块梯形图

Fig.5 Ladder diagram of ASSEM model

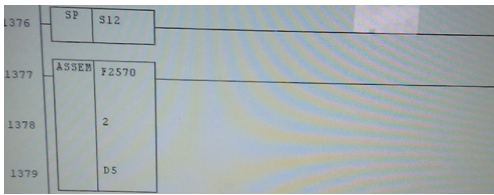


图6 PLC读取指令转速S程序段

Fig.6 Instruction of S program segment read by PLC



图7 档位判断程序段

Fig.7 Program segment of gear-shift stage judgment instruction

检查控制继电器是否得电、排查液压阀本身故障；③主轴零速到达信号一直没有，需检查电路；④排查档位到达接近开关是否存在故障。

(4) 液压低报警。由于压力不到，不能推动液压拨叉拨动齿轮换挡，触发报警。需排查液压电机、液压阀及控制线路是否发生故障。

4 结论

通过在引进的法国 FOREST-LINE 大型双动龙门

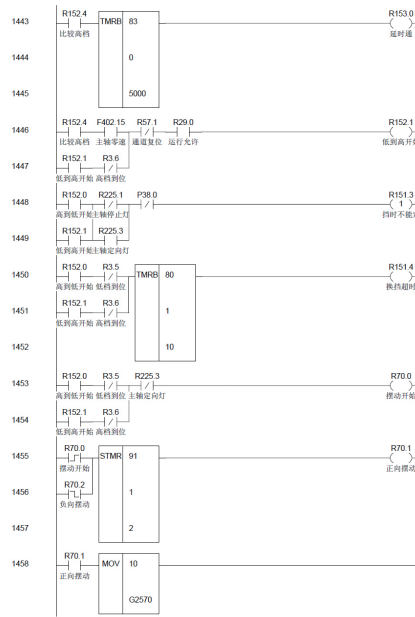


图8 执行换挡及主轴电机摆动控制程序段

Fig.8 Control program segment of perform gear-shift and spindle motor swinging

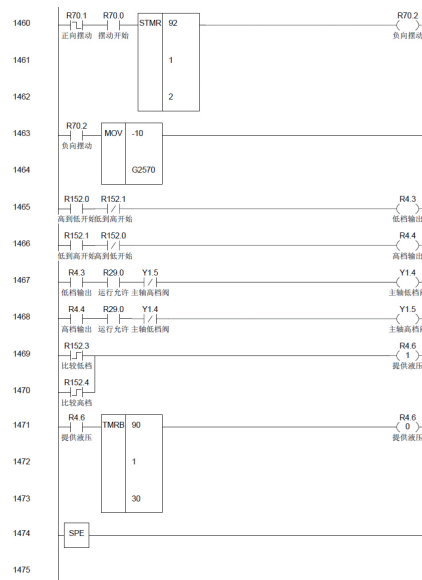


图9 自动换挡机构液压控制程序段

Fig.9 Program segment of hydraulic control for automatic gear-shift institutions

数控铣床上实施配套国产化数控系统，为提高国产数控系统功能与可靠性水平积累了大量经验。通过本方案，在国产高档数控系统中实现了主轴自动换挡功能，在执行换挡过程中，控制主轴电机低速摆动，易于液压拨叉推动齿轮实现稳定配合。在换挡时，机械冲击小，可靠性高，消除了主轴低速运动换挡不稳定、主轴振动明显，以及对传动系统齿轮强度和使用寿命造成的不利影响，

(下转第 127 页)

2.4 结果讨论

激光选区熔化成形过程中,通常用激光能量密度 E ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$) 来衡量层片扫描时激光照射到单位体积粉末材料上的能量:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

其中, P 为激光功率(单位为 W); v 为激光扫描速度(单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); h 为扫描线间距(单位为 m); t 为分层厚度(单位为 m)^[9]。

激光选区熔化成形过程中液态熔池的形态、温度与激光能量密度、材料对激光的吸收率及成形件散热条件等因素有关。本次试验中激光功率、激光扫描速度、扫描线间距及分层厚度均相同,即激光能量密度相同,只有层片扫描方式不同,1# 试样采用整体扫描,扫描线长,如图 3(a) 所示,2# 试样采用分区扫描,扫描线短,如图 3(b) 所示。

与采用整体扫描方式相比,采用分区扫描方式时,激光扫描线变短,相邻两条扫描线加工的时间间隔减少,已加工区域散热时间减少,能量散失减少,即能量积累增加,使得熔池温度升高,熔池变宽变深,液态熔池凝固结晶的时间更长,这样就有利于熔池内部气体的逸出和熔池内部柱状晶的生长。与此同时,由于熔池温度较高,熔池附近基体温度也较高,更有利于材料对激光能量的吸收,这也进一步的促进了熔池温度的升高,延长了熔池凝固结晶的时间。

3 结论

(1) 激光选区熔化成形 316 不锈钢零件时,层片扫描方式采用分区域扫描可以大大减少成形件内部的气孔缺陷,提高零件的成形质量。

(2) 激光选区熔化成形 316 不锈钢零件中,层片扫描方式采用分区域扫描成形的零件内部晶粒更为粗大。

(3) 激光选区熔化成形 316 不锈钢零件过程中,采用两种扫描方式扫描成形对室温性能影响不大。

参考文献

- [1] SANTOS E C, SHIOMI M, OSAKADA K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 2006, 46(12/13):1459-1468.
- [2] DUTTA MAJUMDAR J, PINKERTON A, Liu Z, et al. Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel[J]. Appl. Surf. Sci., 2005, 247: 320-327.
- [3] GU D D, SHEN Y F. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder[J]. Alloy Compd., 2007, 432(1/2):163-166.
- [4] KRUTH J P, FROYEN L, VAN VAERENBERGH J, et al.

Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1-3):616-622.

[5] MORGAN R, SUTCLIFFE C J, NEILL W O. Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39:1195-1205.

[6] LI R D, LIU J H, SHI Y S, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9-12):1025-1035.

[7] MERCELIS P, KRUTH J P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(5):254-265.

[8] 王迪, 杨永强, 黄延禄, 等. 层间扫描策略对 SLM 直接成型金属零件质量的影响[J]. 激光技术, 2010, 34(4):447-451.

WANG D, YANG Y Q, HUANG Y L, et al. Impact of inter-layer scan strategy on quality of direct fabrication metal parts in SLM process [J]. Laser Technology, 2010, 34(4):447-451.

[9] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58:3303-3312.

(责编 李丹)

(上接第 123 页)

提升了国产数控系统在航空领域的应用水平。最后,对主轴自动换挡过程中常见的问题进行了分析和总结,为国产数控系统安装调试与维护提供了重要实践经验。

参考文献

- [1] 陈年华. 数控机床自动换挡控制及常见故障诊断[J]. 机床电器, 2012(6):14-20.
- CHEN N H. Numerical control lathe to be automatic shift control and the common fault diagnosis[J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2012(6): 14-20.
- [2] 潘月斗, 许镇琳, 喻志火, 等. PLC 实现机床主轴的换挡控制[J]. 制造业自动化, 2001(6):14-17.
- PAN Y D, XU Z L, YU Z H, et al. PLC control of gear shift for machine spindle[J]. Manufacturing Automation, 2001(6):14-17.
- [3] 邹方. PLC 实现机床主轴自动换挡[J]. 航空制造技术, 1999(5): 53-56.
- ZOU F. Auto gear change of machine spindle by PLC[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1999(5): 53-56.
- [4] 杜坤梅, 李铁才. 机电控制技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- DU K M, LI T C. Mechanical and electrical control technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000.
- [5] 冯清秀, 邓星钟. 机电传动控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
- FENG Q X, DENG X Z. Mechanical and electrical transmission control[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2000.

(责编 李丹)