

高速主轴在线动平衡机构驱动器设计

伍良生, 贺江波, 张云禧, 李智慧

(北京工业大学 机械工程及应用电子技术学院, 北京 100022)

摘要: 通过分析高速主轴电磁式在线动平衡机构的工作原理, 根据关键零件调整环和离合滑块在在线动平衡过程中的动作顺序, 利用单片机 AT89C51 和环形分配器 PMM8713 设计出对其执行动作的驱动电路, 实现对在线的动平衡机构的实时控制, 从而保证其正常运行, 确保零件加工质量。

关键词: 电磁式在线动平衡机构; 高速主轴; 单片机

中图分类号: TP 29

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2007)12-1233-06

旋转机械运行中常由于零件松动、介质对零件的冲蚀、粘附等造成的不平衡质量, 引起较大的振动。这时就需要停机进行动平衡调试, 为了降低动平衡的停机时间及其带来的经济损失, 最理想的方法是在不停机、不打乱操作状态下在线自动进行动平衡。

现有 2 类在线自动平衡方法。第 1 种是从外部对转子加上同步外力, 该力与转子上的离心力平衡, 来消除转子的同步振动, 在这种方法中通常使用的是电磁作用器, 优点是反应快速, 缺点是没有从根本上消除产生振动的不平衡; 第 2 种方法是使转子上的质量重新配置, 使转子质心轴线与转子弹性轴线趋近, 从而消除不平衡。包括喷涂型、喷液型、激光去重型以及电磁型^[1]。其中喷涂型、喷液型和激光去重型自动平衡法平衡精度偏低, 难于适应高速高精度旋转设备, 电磁型动平衡法被广泛应用于高速高精度的旋转设备在线动平衡中。

本文介绍的动平衡驱动器属于一种新型电磁式动平衡控制器, 其工作原理采用步进电机的工作原理, 操作简单可靠、平衡精度高。

1 工作原理

该控制器对调整环的相对位置做了精确定位, 调整环采用步进电机转子进行驱动, 以固定的角度一步一步旋转, 无累积误差。

电磁式在线动平衡机构依据步进电机的运行原理和在线动平衡原理设计而成^[2-3]。

如图 1(a)所示, U 为砂轮-主轴系统的不平衡量, 已知的 v_1 和 v_2 。通过分别旋转 2 个平衡量到适当角度获得合成 k , 实现与砂轮-主轴系统的 U 的平衡。即在平衡轴上放置 2 个带有偏心质量的调整环, 该调整环自身有一定的不平衡量。通过 2 个调整环在轴圆周方向的角度变化实现 2 个调整环的合成不平衡量和主轴的不平衡量大小相等, 方向相反。平衡后 2 平衡环与主轴紧固连接^[4]。

如图 1(b)所示, 在调节主轴平衡时, 首先由电涡流传感器测出主轴的振动信号。然后, 控制器对振动信号进行分析, 确定主轴的不平衡量的幅值和相位。再由驱动装置驱动 2 个调整环转到适当的位置, 抵消主轴的不平衡量。

图 2 是动平衡装置。它应用步进电机的工作原理, 由定子、调整环(转子)和一些离合器件组成。调整环具有一定的不平衡量, 用来平衡主轴上引起振动的不平衡量。离合器(离合滑块)随主轴转动, 当调整环调整到要求相位时用来跟调整环啮合使之与主轴同步旋转。平衡步骤分为

收稿日期: 2006-11-09。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375002); 北京市自然科学基金资助项目(3022003)。

作者简介: 伍良生(1949-), 男, 江西南昌人, 教授。

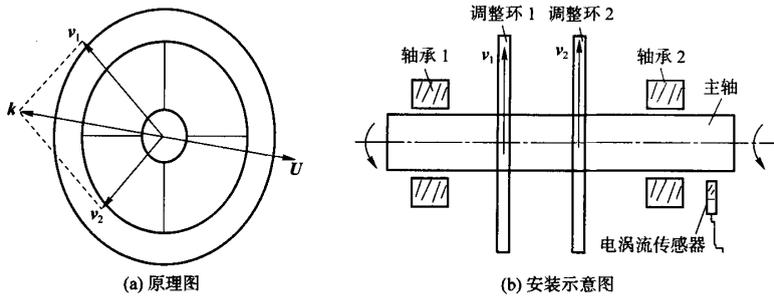


图1 高速主轴在线动平衡原理示意图

Fig.1 Principle of high-speed spindle dynamic balance

- 1) 传感器检测机床振动;
- 2) 控制系统分析传感器输出信号, 计算出不平衡量的大小和相位;
- 3) 计算调整环相对于主轴的位置;
- 4) 离合器与调整环分离, 然后向定子绕组发送脉冲, 驱动调整环达到主轴转速;
- 5) 使调整环到达与主轴要求的相对位置;
- 6) 离合器与调整环啮合, 停止工作.

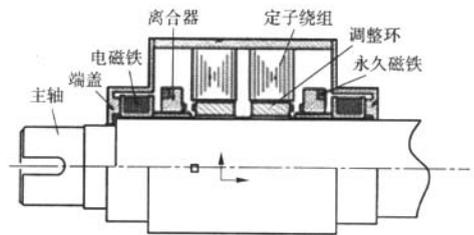


图2 在线动平衡设备

Fig.2 Diagram of dynamic balancing device

2 高速主轴平衡器驱动系统的组成

系统总体框图如图3所示.



图3 高速主轴平衡器驱动系统组成原理图

Fig.3 Diagram of high-speed spindle balancing device's drive system

2.1 系统硬件电路设计^[5-8]

控制电路由调整环的驱动电路和调整环的定位锁紧电路构成.

调整环的驱动电路包括单片机 AT89C51、环形分配器 PMM8713、光电隔离、功率驱动、调整环等组成. 该电路主要完成调整环相对主轴转动, 使调整环的不平衡量达到与主轴基准一定的相位, 从而完成对主轴的在线动平衡. 调整环驱动电路如图4所示.

A)AT89C51 控制部分

该驱动系统采用 MCS - 51 系列单片机 AT89C51 作为处理器. AT89C51 内部有 4K 的可编程 EPROM, 128 字节的 RAM, 21 个特殊功能寄存器、2 个 16 位的定时器或计数器以及一个全双工串行口, 对外有 4 个端口、32 条 I/O 线, 都具有位寻址功能, 通过 AT89C51 的 P1.0 口输出一定频率的方波信号控制动平衡执行机构.

由单片机给出脉冲信号, 经环形分配器 PMM8713 产生调整环工作方式所需的各相脉冲信号, 功率驱动电路对脉冲分配回路输出的弱信号进行放大, 产生驱动调整环所需的激励电流^[3].

B)PMM8713 环形分配器的应用

开关 S_1 分别控制着调整环的旋转方向, S_2 、 S_3 控制励磁模式, S_4 控制 3、4 相切换, 可以根据实际情况设置开关状态, 满足实际需要.

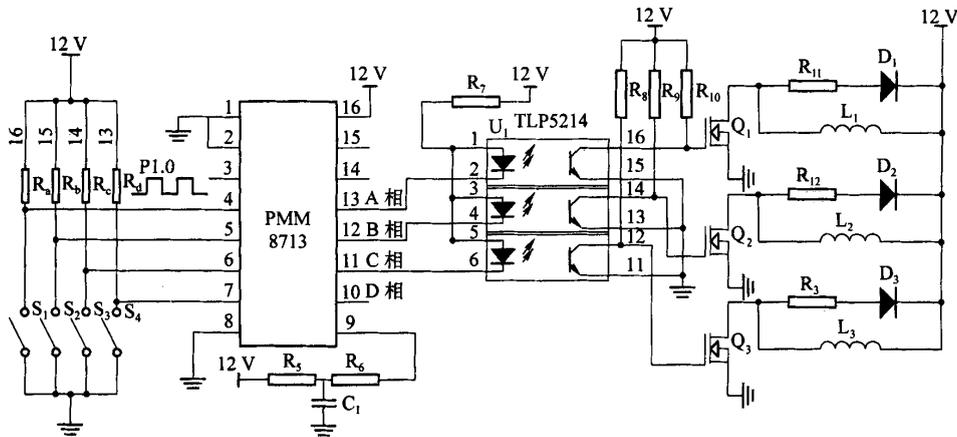


图 4 调整环的驱动电路原理图

Fig. 4 Diagram of driving circuit about the equilibrator

当用微处理器输出控制大功率电器时，需要将弱电与强电隔离。一般情况下对信号进行隔离的方法有变压器隔离和光隔离^[4]。由于信号频率相对较高，故这里采用光电隔离器进行隔离。本驱动系统中选用光电隔离器的型号为 TLP521-4。

由于 PMM8713 输出驱动电流只有 20 mA，而驱动调整环的静态电流为 1.5 A，需要外接功率驱动放大电路。Q₁、Q₂、Q₃ 是晶体管功率放大器。该驱动系统采用了功率场效应晶体管 IRLZ24。功率场效应晶体管主要应用于开关电路中。开关电路的目的是要将所有的电压全部加到负载上(开启的情形)或者不在负载上加上任何电压(关断的情形)。改变来自 P1.0 脚的脉冲信号的频率就可以控制 PMM8713 的输出脉冲频率，从而改变步进电机的运行速度。

驱动系统选用日本 Sanyo(三洋)电机公司生产的 PMM8713 作为此步进电机的脉冲分配器。它适用于控制三相和四相步进电机，有：1 相、2 相以及 1-2 相 3 种激励方式。S 输入方式可选择单时钟(加方向信号)和双时钟(正转或反转时钟)方式，它具有正反转控制、初始化复位、原点监视、激励方式监视和输入脉冲监视等功能。使用的电源为 4~18 V，相输出驱动能力为 20 mA。其管脚功能见表 1。

表 1 PMM8713 管脚功能简介

Table 1 The introduce of PMM8713 pin function

管脚号	符号	功能	管脚号	符号	功能
1	C _U	正转时钟脉冲输入	9	R	复位
2	C _D	反转时钟脉冲输入	10	Φ ₄	四相输出
3	C _K	时钟脉冲输入	11	Φ ₃	
4	C/D	旋转方向切换, 0-反转, 1-正转	12	Φ ₂	三相输出
5	E _A	励磁模式切换	13	Φ ₁	
6	E _B	00-2 相; 01、10-1 相; 11-1~2 相	14	E _M	励磁检测
7	Φ _C	3、4 相切换 0-3 相; 1-4 相	15	C _O	输入脉冲检测
8	E _{SS}	地	16	V _{DD}	电源 + 4~18 V

调整环的定位锁紧电路主要包括 AT89C51、光电隔离、功率驱动、离合滑块等。调整环与单片机的连接如图 5 所示。

调整环的定位锁紧电路如图 6 所示，R₁₅ 为电磁线圈内阻，单片机 P2.0 引脚的置高(4.5~5 V)，使光

电隔离器 TLP 521-4 处于关闭状态,从而使功率场效应晶体管 Q_4 (IRLZ24)导通,电磁铁通电,其电磁力使的离合滑块沿轴向与调整环脱离,此时平衡环可相对主轴做 360° 自由旋转,同时 AT89C51 的 P1.0 引脚,输出一定频率的脉冲,驱动调整环转动.反之,当 P2.0 为低电平时,电磁铁断电,离合滑块在推力弹簧的作用下与调整环啮合调整环定位锁紧在主轴上,随主轴同步运行.

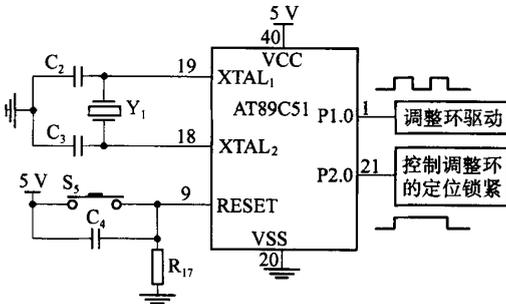


图5 单片机 AT89C51 的控制连接
Fig.5 The control connection for AT89C51

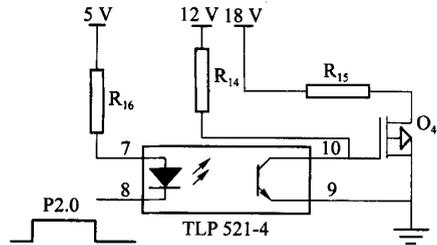


图6 调整环锁紧电路原理图
Fig.6 Circuit diagram of the locked equilibrator

2.2 系统软件设计

系统软件编制采用单片机 AT89C51 中定时器定时中断产生周期性脉冲序列,不使用软件延时,不占用 CPU. CPU 在非中断时间内可以处理其他事件,唯有到了中断时间驱动调整环转动一步.在线动平衡装置的驱动系统中通过单片机 AT89C51 的 P1.0 口发送脉冲序列,产生驱动调整环转动的控制信号,同时使 P2.0 口产生高低电平,驱动离合滑块动作.系统程序流程图如图 7 所示.

在确定调整环的转动方向之后,只需要改变给定脉冲的频率就可改变调整环的转速,控制调整环的转速,使与主轴转速相差很小,这样主轴和调整环就会产生相对转动,直到转到所需要的角度即可,然后通过电磁线圈断电,使离合滑块(只做轴向运动,离合滑块与轴用花键连接)与调整环啮合,从而将调整环固定在轴上,与轴一块转动.

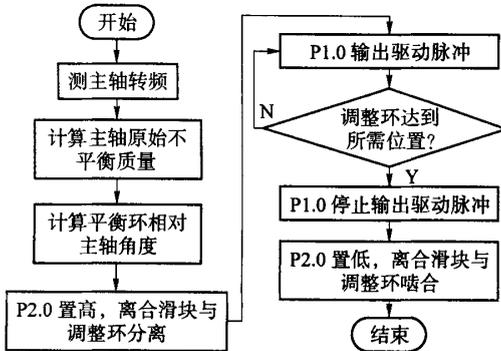


图7 在线动平衡驱动控制流程图
Fig.7 The flow chart of dynamic balance drive and control

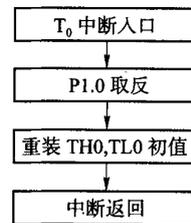


图8 定时器 T0 中断子程序流程图
Fig.8 The flow chart of subprogram to interrupt of timer T0

定时器 T0 中断子程如图 8 所示序流程图.采用定时器中断输出控制脉冲,设 T0 中断入口地址标号为 INT_T0,则利用定时器中断使 P1.0 产生脉冲输出子程序为

```
INT_T0: CPL P1.0;
    令 P1.0 管脚电平取反
    MOV TH0, #off H;
    恢复 T0 计数初始值
```

```
MOV TL0, #0b0H
RETI
```

3 高速主轴驱动系统的实现

该驱动在高速主轴在线电磁式平衡机构上进行测试, 其中高速主轴在线电磁式动平衡机构中, 测得电磁线圈电阻 $R_{15} = 6.8 \Omega$, 实验表明, 若使离合滑块在主轴上稳定执行对调整环的锁紧定位动作, 需要电磁线圈电流 $I = 2 \sim 3 \text{ A}$, 故选用开关电源为额定电压为 18 V , 电流为 5 A . 使用三相三拍励磁模式, 驱动调整环所需要的静态电流为 1.5 A .

设主轴转速为 3000 r/min , 若需要调整调整环与基准的角度为 60° , 为了使调整环及时通过检测到的信号判断到位, 可在程序中设定允许到位的角度为 $57^\circ \sim 63^\circ$.

1) 分别用光电传感器 A、B 监测调整环不平衡量和主轴基准的脉冲信号, 用动态分析仪观察, 从而判断平衡环与基准的相对位置, 开机使主轴转速达到 3000 r/min . 此时, 调整环与主轴同速, 从动态分析仪上连续记录 3 个脉冲横坐标.

光电传感器 A

$$a_1 = 30.5459 \quad a_2 = 50.6875 \quad a_3 = 70.8291$$

光电传感器 B:

$$b_1 = 24.9023 \quad b_2 = 45.0740 \quad b_3 = 65.4297$$

则此时调整环与主轴基准的相对角度为

$$\Delta\alpha_1 = \frac{a_1 - b_1}{b_2 - b_1} \times 360^\circ \approx 100.72^\circ$$

2) 启动驱动器, 此时可观察到调整环与离合滑块分离, 调整环相对主轴基准有角位移.

3) 运行几秒 ($< 10 \text{ s}$) 后, 驱动器自动关闭. 此时调整环与离合滑块啮合, 使调整环与主轴同速, 无相对角位移. 从动态分析仪上连续记录 3 个脉冲横坐标, 数据为

光电传感器 A

$$a_1 = 30.1418 \quad a_2 = 50.2834 \quad a_3 = 70.4250$$

光电传感器 B

$$b_1 = 26.8555 \quad b_2 = 46.9971 \quad b_3 = 67.1387$$

则此时调整环与主轴基准的相对角度为

$$\Delta\alpha_1 = \frac{a_1 - b_1}{b_2 - b_1} \times 360^\circ \approx 58.72^\circ$$

通过实验表明驱动系统可以可靠地控制驱动离合滑块与调整环啮合和分离, 能精确定位调整环与主轴的相对角度, 并达到与主轴同步旋转, 驱动系统运行良好, 状态较稳定.

4 结论

本文研究了电磁式在线动平衡机构的原理, 根据机构所需要执行的动作, 设计出高速主轴电磁式在线动平衡机构的驱动器, 控制系统可使平衡机构的平衡环在主轴高速旋转的情况下分离、旋转到指定位置、重新结合, 达到快速实现高速主轴的在线动平衡.

参考文献:

[1] 汪希萱, 曾胜. 电磁式在线自动平衡系统及其动平衡方法研究[J]. 热能动力工程, 2003, 103(18): 53-57.

WANG Xi-xuan, ZENG Sheng. The study of an on-line automatic dynamic balancing system and its dynamic balancing method when used on a flexible rotor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2003, 103(18): 53-57. (in

- Chinese)
- [2] 毛玉蓉, 翁惠辉, 刘钢. 一种基于单片微机的步进电机控制系统[J]. 电气传动, 2003(6): 32-34.
MAO Yu-rong, WENG Hui-hui, LIU Gang. A stepping motor control system based on microcomputer[J]. Electricity Drive, 2003(6): 32-34. (in Chinese)
- [3] 陶利民, 葛哲学, 温熙森. 刚性转子自动平衡控制策略[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(2): 140-146.
TAO Li-min, GE Zhe-xue, WEN Xi-sen. A control method for automatic balancing of rigid rotors[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(2): 140-146. (in Chinese)
- [4] 伍良生. 高速磨削中的快速现场动平衡技术[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004, 140(2): 10-13.
WU Liang-sheng. Quick field balancing technique in high speed grinding[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2004, 140(2): 10-13. (in Chinese)
- [5] 唐诗, 苗汇静. 单片机控制系统中步进电机接口电路的设计[J]. 山东工程学院学报, 2002, 16(2): 64-67.
TANG Shi, MIAO Hui-jing. Interface circuit design for step motor in SCM control system[J]. Journal of Shandong Institute of Technology, 2002, 16(2): 64-67. (in Chinese)
- [6] 李碧鹏, 翁惠辉. 基于PMM8713脉冲分配器的步进电机控制系统设计[J]. 江汉石油学报, 2003, 25(4): 128-129.
LI Bi-peng, WONG Hui-hui. Design of a motor control system based on PWM8713 pulse distributing controller[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2003, 25(4): 128-129. (in Chinese)
- [7] 蔡志健, 丁爱萍. 小功率步进电机控制器的设计[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2005, 34(4): 42-46.
CAI Zhi-jian, DING Ai-ping. The design of a controller for small power step electrical motors[J]. Journal of Shanghai Normal University(National Sciences), 2005, 34(4): 42-46. (in Chinese)
- [8] 张金波, 辛宇, 曹爱华. 一种实用的三相步进电机驱动器的设计[J]. 工矿自动化, 2006(3): 80-82.
ZHANG Jin-bo, XIN Yu, CAO Ai-hua. The design of driver for step motors[J]. Industry and Mine Automation, 2006(3): 80-82. (in Chinese)

Design of High-speed Spindle Dynamic Balancing Device's Drive

WU Liang-sheng, HE Jiang-bo, ZHANG Yun-xi, LI Zhi-hui

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: This paper analyzes the principle of electromagnetic dynamic balancing device of high-speed spindle. According to the equilibrator and clutch working sequence, the drive to activate the balancing device was designed, based on AT89C51 and PMM8713, to control the electromagnetic dynamic balancing device in real time. Designing the system can ensure dynamic balancing device work well and improve the quality of machined part in the machining process.

Key words: electromagnetic dynamic balancing device; high-speed spindle; microcontroller