

一种燃油流量调节阀用双余度控制器设计

邹金花

1.贵州航天林泉电机有限公司 贵阳 550008

2.国家精密微特电机工程技术研究中心 贵阳 550008

【摘要】：介绍了双余度控制器在燃油流量调节阀中的应用，给出了双余度控制器的总体设计方案，本文基于双 DSP28035 数字信号处理器，完成了硬件电路和软件的设计，给出了实现系统功能的部分硬件原理图和软件流程图，并使用样机进行了试验验证，试验结果表明所提出的设计方案可靠性高、能降低维修成本、满足任务需求。

【关键词】：双余度技术；控制器；调节阀

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.084

1 引言

燃油流量调节阀是发动机燃油系统的关键执行部件，其控制器的可靠性间接关系到燃油系统的工作连续性和安全性，单通道的控制器在长期工作中易出现单点失效，导致控制器控制燃油流量调节阀的功能丧失，进而引起燃油系统工作故障，难以满足燃油系统长寿命、高可靠性的要求。余度技术是指通过为系统增加多重资源，包括硬件与软件的重复配置，实现对多重资源的合理管理，从而提高产品和系统可靠性的设计方法^[1]。余度设计不仅能降低产品的单点失效率，增加其寿命，同时可以减少维修次数，降低生产和维修成本。

本文基于双 DSP28035 数字信号处理器，完成了燃油流量调节阀用双余度控制器的软件和硬件设计，控制器互为冷备份，能够根据通道选择信号选择相应的通道进行工作；根据硬

线信号，实现阀门的挡位调节；当运行通道故障时，自动进行通道切换，并上传故障信号；且实时上传阀门位置信号。

2 工作原理

双余度控制器的工作原理如下图 1 所示，控制器上电后首先根据通道选择信号选择相应的通道工作，对应通道的 DSP 控制电路根据输入的硬线信号以及采集的霍尔信号和阀门位置信号，输出 PWM 信号和正反转信号给功率驱动电路，功率驱动电路控制内部的三相桥电路功率管的开关，输出三相交流电给无刷直流电机，驱动电机运行进而控制阀门到达指定位置。同时阀门的位置信号通过 V/I 电路转换为电流信号后上传给主机。

当运行通道出现故障后，通过故障切换电路切换到另一通道进行工作，并通过故障反馈电路将故障信号上传给主机。

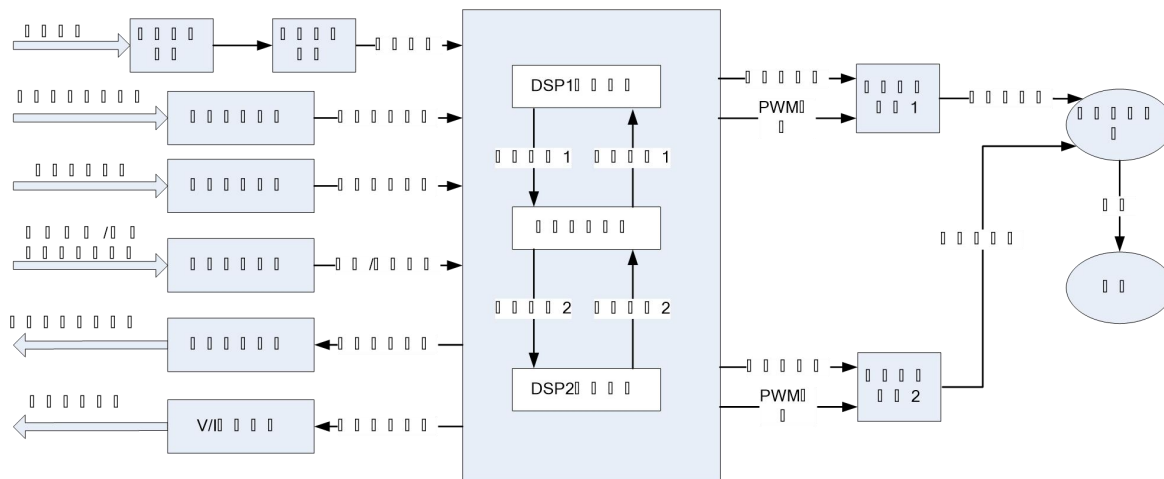


图 1 控制器原理框图

3 控制器硬件设计

3.1 控制电路设计

根据控制器的功能需求以及控制器的体积要求，本文采用双 DSP28035 作为核心处理器，其功能方框图如下图 2 所示，工作频率 60MHz，内置 64K*16 位 FLASH、8K*16 位 SRAM，

32 位浮点算术加速器，3 个 32 位 CPU 定时器，一个 SCI 模块，两个 SPI 模块等资源，软件库和工具端固件除 USB 模块外全兼容，可满足控制器的控制要求。DSP 实现的主要功能如下：

- (a) 上电后对通道选择信号进行判断，按要求选择对应通道工作；

(b) 接收硬线控制信号，执行控制功能，调节阀的开启度；

(c) 运行过程中当前工作通道出现故障后输出故障信号和另一通道的使能信号。

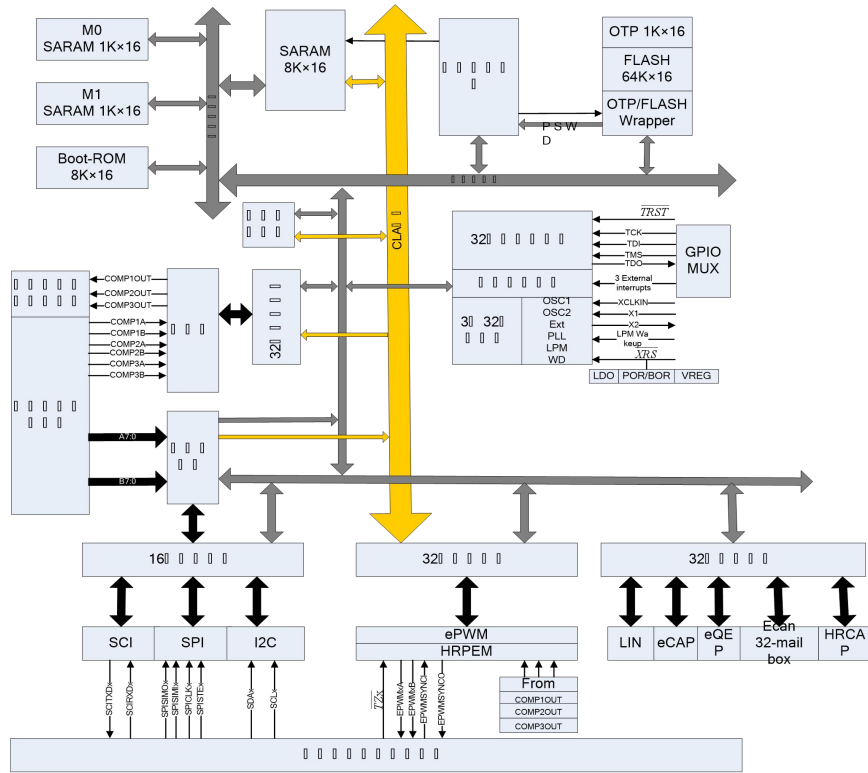


图 2 DSP 功能方框图

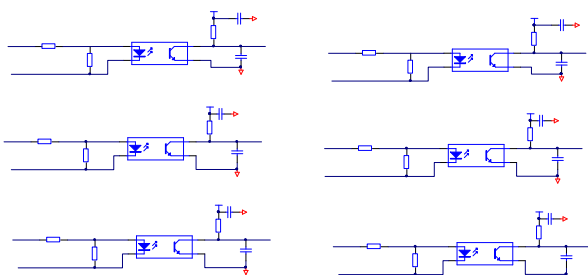
图 3 硬线控制电路

3.2 通道选择电路设计

外部输入的通道选择信号为地/开信号，当为地信号时，控制 1 路通道电机工作，当为开信号时，控制 2 路通道电机工作，通道选择电路采用光耦器件对信号进行隔离处理，电路采用双冗余设计，考虑到光耦器件常见故障为断路故障，DSP 控制器单元对通道选择电路的两路输出均进行采集，当输出信号均为高电平时，选择电机 2 工作，其余情况选择电机 1 工作。

3.3 硬线控制电路设计

硬线控制电路如下图 3 所示，外部输入三路硬线信号为地/开信号，硬线信号分别进入 1 路硬线控制电路和 2 路硬线控制电路后，将信号分别传递给 DSP 控制电路，DSP 控制电路根据输入的硬线信号，控制阀门达到指定的档位。



3.4 故障切换电路设计

故障切换电路的功能是当产品运行过程中判断出运行通道出现故障时，则自动切换到另一路通道运行。故障切换电路如下图 4 所示，当电机 1 正常运行时，电机 2 的使能信号为高电平（不使能），当电机 1 故障时，电机 2 的使能信号跳变为低电平（使能），当电机 2 运行出现故障时，故障切换原理与电机 1 相同。

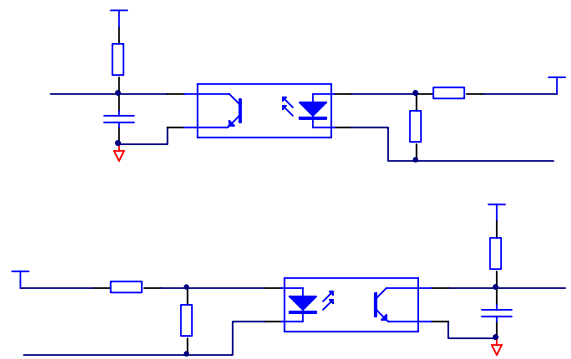


图 4 故障切换电路

3.5 功率驱动电路设计

功率驱动电路选用成熟的无刷电机驱动器，其功能框图如

下图5所示,主要由九个部分组成,分别是滤波电路、稳压电路、输入电路、逻辑控制电路、驱动电路、三相桥电路、限流保护电路、闭环调速电路、正反转电路组成。逻辑控制电路根据输入的三相霍尔信号、正反转信号、PWM信号输出电机换向信号给驱动电路,驱动电路对换向信号进行放大后控制三相桥电路功率管的开关,从而控制电机的运行。28V供电经过滤波电路和稳压电路后输出基准电压12V给霍尔元件供电;当控制器存在母线过流情况时,模块内部过流保护电流电路将信号传递给逻辑控制电路,逻辑控制电路停止输出换向信号,进而实现过载保护功能。

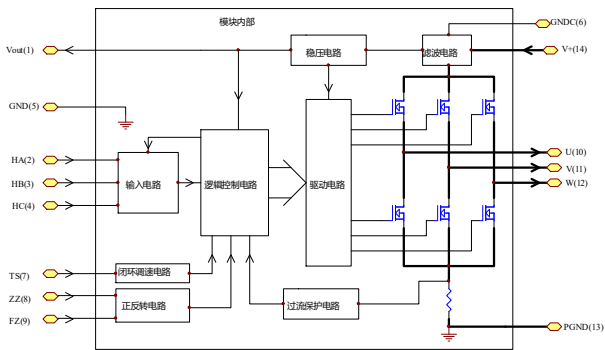


图5 无刷电机驱动器功能框图

3.6 故障反馈电路设计

故障反馈电路的功能是当任一通道出现故障时,将故障信号上传,电路芯片选用固体继电器,其具备电气隔离、开关速度快等优点,当前运行通道正常时,故障反馈信号输出开信号,当通道出现故障时,输出地信号。

4 控制器软件设计

软件的主要功能如下:

- (a) 软件执行上电自检、周期自检功能;
- (b) 采集通道选择信号,并选择对应通道的控制器工作;
- (c) 采集12V电压,对电压进行补偿,提高角位移传感器信号的精度,采集阀门的角位移传感器信号,并与输入的硬线指令进行比较,实现位置环控制;
- (d) 采集电机的霍尔信号,计算电机当前转速,实现速度环控制;
- (e) 运行过程中,当采集的通道选择信号、硬线控制信号、角位移传感器信号、霍尔信号、12V电压以及阀门超时达到时,判定该通道故障,对工作通道进行切换。

4.1 软件控制策略

控制器的控制策略采用“位置-速度”闭环控制策略,外环为位置环、内环为速度环,位置环保证了阀门位置到达指定的角度,速度环保证了阀门到达指定的角度后可以快速停止,减小位置超调的情况。

控制器为双冗余设计,初始上电时,控制器接收到通道选择信号,先判断采用哪一路通道进行工作,同时接收硬线控制信号,识别阀门目标角度,DSP芯片采集霍尔信号和角位移传感器信号用于位置和速度环的相关计算,通过输出PWM信号和正反转信号控制功率模块的输出,进而控制电机的运行,使得阀门到达目标位置,当运行通道出现故障时,自动切换另一通道运行,并输出故障反馈信号。

4.2 软件主流程

软件的工作流程图如下图6所示。产品接通电源后,首先是上电初始化,完成DSP运行的各寄存器初始化,将输出引脚配置在正确的工作状态;初始化后执行上电自检操作,上电自检的参数为角位移传感器信号和12V电压信号,若自检异常,则切换通道,并输出故障信号。若自检正常,则采集通道选择信号、硬线控制信号、角位移传感器信号、霍尔信号、12V电压进行周期自检,周期自检正常,将采样的模拟量和数字量用于速度环和位置环运算,以控制电机运行来驱动燃油流量调节阀到达指定角度。

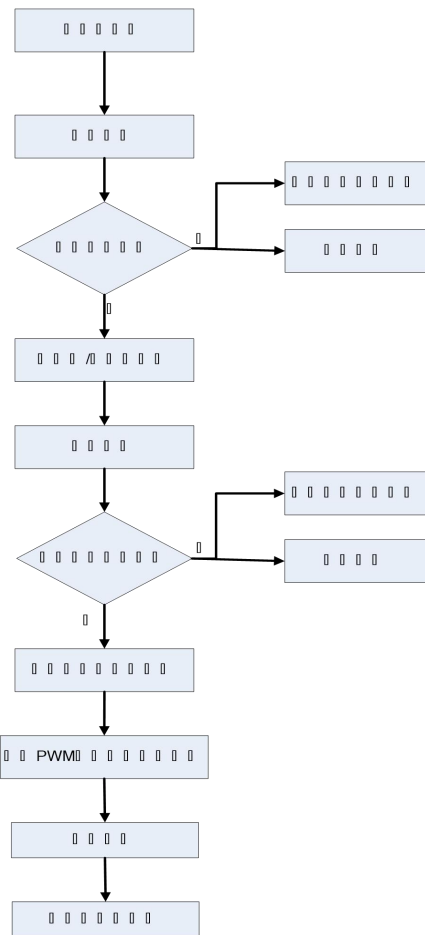


图6 软件系统流程图

5 试验验证

本文以某型号双绕组双霍尔结构形式的无刷直流电机以及带两个角位移的某型号流量调节阀为试验对象进行试验验证, 试验结果如下表 1 所示, 测试过程如下:

通道选择功能测试: 当通道选择信号输入地信号时, 测试 1 通道的三相绕组信号输出正常, 通道 2 三相绕组信号无输出, 当通道选择信号输入开信号时, 测试 1 通道的三相绕组信号无输出, 通道 2 三相绕组信号输出正常。

硬线控制功能测试: 硬线控制共 5 个档位, 分别输入 5 个档位的阀门目标位置信号, 待阀门运行到位后, 使用工装测量阀门开度, 阀门实际开度与阀门目标位置一致, 误差满足 $\pm 0.1^\circ$ 要求。同时测量位置反馈信号, 信号与阀门实际开度一致。

通道切换与故障反馈功能测试: 使用电位计模拟阀门超时到达故障, 在规定的时间内, 控制器采集到的电位计位置与阀门目标位置不一致, 判定该通道故障, 对通道进行切换, 切换后阀门到达指定位置, 同时测量故障反馈输出信号, 信号输出为地信号, 故障反馈功能正常。

拉偏电压试验: 在供电电压为 18V、28V、32V 的情况下, 测试电机转速和额定电流, 电机转速和额定电流满足要求。

浪涌电流测试: 使用示波器抓取继电器关闭瞬间浪涌电流幅值, 浪涌电流满足要求。

运行时间测试: 使用示波器测试阀门全开到全关、全关到全开的运行时间, 运行时间满足要求。

表 1 测试结果

序号	参数名称	指标要求	试验数据
----	------	------	------

1	通道选择功能	为地信号时, 选择通道 1 工作 为开信号时, 选择通道 2 工作	满足要求
2	硬线控制功能	根据硬线信号, 控制阀门到达指定档位	满足要求
3	通道切换功能	运行通道故障时, 自动切换通道信号	满足要求
4	故障反馈功能	运行通道故障时, 输出故障信号	满足要求
5	位置反馈功能	将位置信号转换为 4~20mA 的信号输出	满足要求
6	额定转速	$\geq 3500\text{rpm}$	6225 rpm
7	额定电流	$\leq 3\text{A}$	1.69 A
8	浪涌电流	$\leq 15\text{A}$	4.8A
9	运行时间	1s~3s	1.6s

表 1 的测试结果表明, 双余度控制器的功能和性能的均符合指标要求, 因此控制器的设计正确、可靠。

6 结论

本文介绍了燃油流量调节阀用双余度控制器的软硬件设计, 基于双 DSP28035 数字信号处理器实现了双余度控制器的通道选择、硬线控制、通道切换、故障反馈、位置反馈功能, 并通过试验证明了该设计满足控制器的使用工况, 互为冷备份的双余度控制器方案在一定程度上提高了控制器的可靠性、降低了维修成本。该方案的实现为后续燃油流量调节阀用控制器的研究提供一定的工程经验。

参考文献:

- [1] 刘卫国, 马瑞卿. 双余度无刷直流电机控制系统[J]. 电气技术, 2006, (07): 11-13.
- [2] 吴红星. 电动机驱动与控制专用集成电路及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 段丽娜, 赵金. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统的研究[J]. 微电机, 2014, 47(03): 60-63+68.
- [4] 姚华, 黄金泉. 航空发动机燃油及控制系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2022.