

基于无刷直流电机控制器设计

田双文, 刘雪松, 刘佳, 刘珊珊

(内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 无刷直流电机具有运行效率高、调速性能好、结构简单、维护方便、运行可靠的优点, 是电动汽车驱动系统的理想动力来源; 然而, 目前电机控制器响应速度慢、控制精度低、稳定性误差大、抗干扰力弱; 为了解决这些难题, 通过建立无刷直流电机的数学模型, 研究电机的矢量控制算法基本原理以及实现方式, 设计出了电流、转速双闭环的调速控制系统, 通过引入先进的控制策略来提高控制器性能; 最后, 在电机的阶跃响应测试中, 采用传统 PID 控制器作为转速控制外环的矢量控制策略, 在稳定时间以及超调量两个方面, 都不如 SPSO-PID 控制器; 不管是从 0 转速时刻启动, 还是转速突变的情况, 传统 PID 控制器的超调量基本都在 10% 以上, SPSO-PID 控制器的超调量基本控制在 5% 以内; 实验结果表明, 与传统 PID 控制相比, 在相同的调整频率下; 本次设计的控制器具有调节时间小, 调速范围广, 转速波动小的优点, 验证了设计的可行性。

关键词: 无刷直流电机; 矢量控制; 粒子群算法; PID 控制器; 闭环控制

Controller Design Based On Brushless DC Motor

TIAN Shuangwen, LIU Xuesong, LIU Jia, LIU Shanshan

(Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co., Ltd., Baotou 014010, China)

Abstract: Brushless DC motor has the advantages of high operating efficiency, good speed regulation performance, simple structure, convenient maintenance and reliable operation, and it is an ideal power source for electric vehicle drive system; However, at present, there are the shortages of slow response speed, low control accuracy, large stability error and weak anti-interference force in motor controller. In order to solve these problems, the mathematical model of brushless DC motor is established to study the basic principle and implementation method of the motor vector control algorithm, a double closed-loop speed regulation control system with the current and speed was designed, and the controller performance was improved by introducing advanced control strategies; Finally, in the step response test of the motor, traditional PID controller is taken as the outer ring of the speed control, the vector control strategy is inferior to the SPSO-PID controller in terms of settling time and overshoot. Whether it is started from the static start or sudden change of the speed, the overshoot of traditional PID controller is basically more than 10%, and the overshoot of SPSO-PID controller is basically controlled within 5%. Experimental results show that, compared with traditional PID control, the proposed controller has the advantages of small adjustment time, wide speed regulation range and small speed fluctuation at the same adjustment frequency, which verifies the feasibility of the controller.

Keywords: brushless DC motor; vector control; particle swarm algorithm; PID controller; closed-loop control

0 引言

在交通日益发达的今天, 汽车已经成为人们出行的常用交通工具, 全球汽车保有量不断增加。但汽车燃烧化石能源, 带给人们方便的同时, 也带来了严重的能源危机与环境问题。在当前全球能源结构调整和国家产业战略布局的大环境下, 世界各国对交通运输未来发展的解决方案也提出了更高的要求。纯电动汽车驱动系统的主要动力来源是电动机, 因此, 对于电动机的选型至关重要。作为电动汽车的驱动电机, 应具备调速范围宽、启动转矩大、电机体积小、质量轻、功率密度高的特点及要求。目前市面上电动汽车使用的电机主要有以下几种: 直流电机 (DCM)、开关磁阻电机 (SRM)、交流感应电机 (IM) 和无刷直流电机 (BLDC)。

无刷直流电机与其他电机相比, 具有转矩脉动小、运行较平滑、动态响应快、可靠性高等优点, 并能满足高性能电动汽车驱动控制的要求, 使得无刷直流电机在私家轿车中被普遍采用。尤其国内稀土资源丰富, 使得 BLDC 的制造和应用前景更为广泛。国产纯电动汽车基本都是使用无刷直流电机, 作为其电动汽车的驱动电机。所以, 作为电动汽车驱动系统的动力核心部件, BLDC 控制器性能的好坏, 将对电动汽车造成直接影响。国内对于无刷直流电机及其控制系统的研究虽然取得了一定的成果, 但比起科技发达国家起步稍晚, 仍有不足之处。特别是在电动汽车上所搭载的驱动电机, 所处的运行环境复杂、情况多变、频繁启停, 需要更为先进的电机控系统。因此, 对于 BLDC 及其先进控制技术的研究仍然有巨大发展空间以及实用价值。

国外对于无刷直流电机的控制技术的理论研究已经持

收稿日期: 2022-09-24; 修回日期: 2022-11-03。

作者简介: 田双文 (1990-), 男, 内蒙古包头人, 研究生, 高级工程师, 主要从事电机控制方向的研究。

引用格式: 田双文, 刘雪松, 刘佳, 等. 基于无刷直流电机控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5): 132-138.

续了几十年, 实际验证也已经趋于成熟。20 世纪上半叶, 由于有刷直流电机换向电刷的存在, 电机发热问题明显, 使用寿命很短, 而且能量转换效率低下, 所以就不断有人尝试用非接触式的电子换向器件替换传统的机械换向电刷。然而, 在研究的早期阶段, 用于制造电力电子器件的半导体材料技术及其配套产业并不发达, 没有合适的功率开关器件, 所以对电子换向器的研究停留在试验尝试阶段。一般认为, BLDC 控制系统的雏形, 是美国科学家 D·Harrison 在 1955 年, 成功使用晶体管完成了直流电机换向功能。德国 Mannesmann 公司研发的 MAC 系列无刷电机, 及其配套的控制器的 1978 量产上市, 标志着无刷直流电机在商业实践中进入到实用阶段。近几十年来, 无刷直流电机越来越多地应用于智能机器人、工业设备、3D 打印机、航空航天等领域, 其广阔的应用前景促使各国在该领域的投资增加, 尤其是美国、日本、欧美等发达国家。全球 BLDC 主流制造商主要有瑞士的 ABB、美国的 Ametek、日本的 Nidec、Minebea。国内对无刷直流电机控制的研究始于 20 世纪 70 年代, 而且研究力量主要集中在研究所和高校, 主要使用在军事特种武器以及航空航天器上。直到 20 世纪 80 年代, 无刷直流电机才在工业控制系统中逐步应用。进入 21 世纪之后, 国产无刷直流电机控制器相对于发达国家, 价格昂贵, 在技术水平上依然较为落后, 难以满足实际工业生产中高性价比以及高可靠性的要求。

无刷直流电机具有结构简单、运行效率高、调速性能好、维护方便等诸多优点, 是电动汽车驱动系统的理想动力来源。本文根据电动汽车的特点以及使用场景, 对无刷直流电机的控制系统进行分析。电动汽车上所搭载的驱动电机, 所处的环境复杂, 情况多变, 频繁启停, 但是目前电机控制器响应时间慢, 控制精度低, 稳态误差大, 抗干扰能力弱, 所以本文希望通过引入先进的控制策略来提高其运行性能, 为无刷直流电机在电动汽车上的推广应用打下基础。

1 控制系统结构及电机数学模型

1.1 控制系统基本结构

无刷直流电机控制系统是一种自调节变频同步电机系统, 主要组成部分包括: 功率控制器、电机本体、位置传感器以及控制器。如图 1 所示。

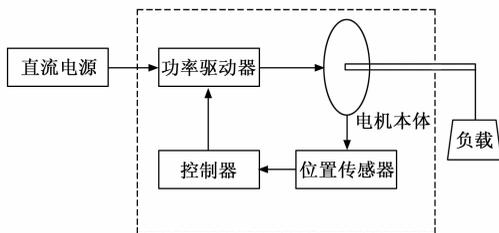


图 1 无刷电机控制系统结构框图

无刷直流电机采用半导体开关器件组成的电子换向器, 取代了传统的机械换向电刷。其主要工作原理是: 位置传

感器用于检测电机转子位置, 并反馈到控制器; 控制器对反馈信息作进一步处理, 实现控制算法; 功率驱动器主要由大功率开关管组成, 根据控制信号实现 DC-AC 变换, 完成电机驱动控制。

1.2 无刷电机数学模型

数学模型是对目标系统的近似模拟, 在数学定义上描述实际被控系统中, 各个物理量之间的数学关系。无刷直流电机是一个物理变量众多、变量间关系复杂的非线性时变系统。对于这样的电机控制系统设计时, 有必要先建立数学模型, 分析无刷电机的运行规律以及各个变量之间的因果定量关系。在准确而清晰的数学模型的基础上, 进行控制算法的研究和分析, 最后设计的控制器才能对电机实现优良的控制。

为了便于简化分析过程, 在建立模型之前, 首先假定:

- 1) 忽略电机铁芯饱和, 不计涡流和磁滞损耗;
- 2) 永磁体材料的电导率为零, 其内部的磁导率和空气一致;
- 3) 电机的气隙磁场在空气中呈正弦分布;
- 4) 转子上没有阻尼绕组;
- 5) 电机电流为对称三相电流。

基于上述假设, 电机定子绕组两端电压定义如下:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: v_a 、 v_b 、 v_c 是定子线圈绕组两端的相电压, R_s 是每个定子绕组线圈的等效电阻, i_a 、 i_b 、 i_c 是流经定子绕组线圈的相电流, ψ_a 、 ψ_b 、 ψ_c 是每个定子绕组线圈的总磁链, $p=d/dt$ 是微分算子。

三相绕组总磁链由定子绕组的永磁体磁链和 3 个绕组共同构成, 其定义如下:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: L_{aa} 、 L_{bb} 、 L_{cc} 是定子绕组的自感, M_{ac} 、 M_{ab} 、 M_{ba} 、 M_{bc} 、 M_{ca} 、 M_{cb} 是定子绕组的互感, ψ_{am} 、 ψ_{bm} 、 ψ_{cm} 是转子磁通链过定子 A、B、C 三相绕组时产生的磁链, 其定义如下:

$$\begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_m \cos \theta_e \\ \psi_m \cos (\theta_e - 2\pi/3) \\ \psi_m \cos (\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

A、B、C 三相定子绕组由转子永磁体磁场引起的感应电动势为:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = -p \begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_r \psi_m \sin \theta_e \\ \omega_r \psi_m \sin (\theta_e - 2\pi/3) \\ \omega_r \psi_m \sin (\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

无刷直流电机在运行过程中, 电流通过定子绕组, 并根据电磁感应原理在定子绕组线圈周围产生电磁场, 与永磁体磁场相互作用, 产生电磁转矩, 驱动电机的转子旋转,

这就是电机拖动的基本原理。电磁转矩方程为：

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega} \quad (5)$$

电机的机械运动方程为：

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (6)$$

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_l \quad (7)$$

无刷直流电机的相电压为控制系统的输入参数，则无刷直流电机的控制系统框图如图 2 所示。

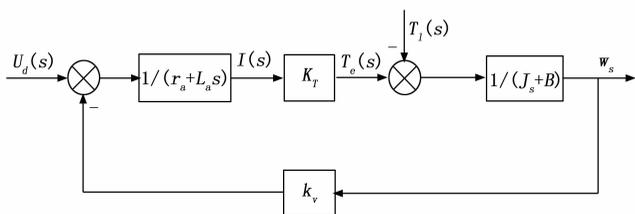


图 2 系统传递函数框图

如图 2 所示，可得无刷直流电机的传递函数为：

$$\omega(s) = \frac{K_T U_d(s) - (r_a + L_a s) T_l(s)}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + k_v K_T)} \quad (8)$$

其中： K_T 为电机的转矩系数， W 为电机输出转速。

2 电机控制算法分析与改进

基于 SPSO 算法改进的 PID 控制器，PID 控制器自从上世纪 30 年代被提出以来，已经经历了几十年的发展，被广泛应用与各个行业的各种控制系统中。经典 PID 控制器主要优势在于参数少、适应性强、方便数字实现、稳定性好，在许多工业控制过程中都能得到比较满意的控制效果，其一般表示形式如下：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

其中： $e(t)$ 表示系统的误差， K_p 、 K_i 和 K_d 分别表示对系统误差及其积分与微分量的加权值，最终的控制信号经过这样的加权计算后得出。由此可见 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数的设定决定了 PID 控制器的性能，也决定了系统的整体控制效果。如果参数选取合适，那么系统误差将会不断的减小，最终达到控制要求。PID 控制器框图如图 3 所示。

实际的电机控制系统中，特别是转速控制系统中，转速调节器常使用 PI 控制器，而不是采用 PID 控制器，因为微分项常用在位置闭环控制系统中，起到提前预判位置的作用，由于本设计针对无刷电机进行转速控制，所以略去

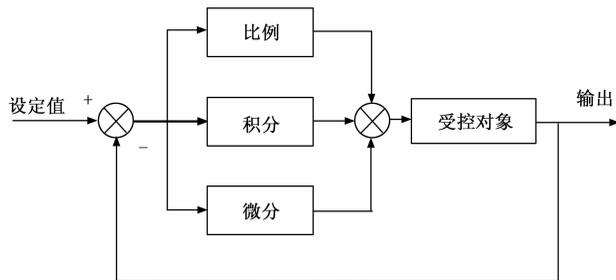


图 3 PID 控制器框图

微分项。

在基于简化粒子群算法改进的 PID 控制器中，把比例系数和积分系数 K_p 、 K_i ，采用编码的形式表达为 SPSO 中的粒子。由于已经略去，故将其设置为 0，不进行迭代调整。粒子的适应度函数选取设定转速和实测转速的误差的平方对于时间的积分（ISE），然后 PID 参数由算法迭代寻优求得。基于 SPSO 的参数自适应整定 PID 控制器框架如图 4 所示。

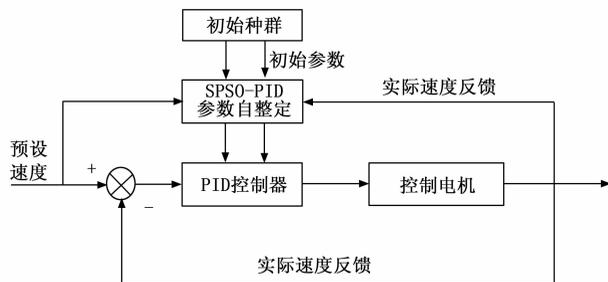


图 4 SPSO-PID 速度控制器架构

为了获得一组最优的控制器参数 K_p 、 K_i ，需要算法的优化目标进行设定，合适的适应度函数选取尤为重要。粒子群优化算法中，常用的性能标准主要有绝对误差积分（IAE）、平方误差积分（ISE）、时间乘平方误差积分（ITSE）和时间乘以绝对误差积分（ITAE）这几种方式。为了选取到和本设计匹配的适应度函数，对这几种性能标准进行了综合评比，发现当适应度函数选用 ISE 时，超调时间小、到达稳态时间短，稳态误差小。因此本文的目标适应度函数采用平方误差积分 ISE 方式，其表达式为：

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (10)$$

其中： $e(t)$ 为预设转速与实际转速的差值。

基于简化 SPSO 算法改进的 PID 控制器参数自适应整定的流程如图 5 所示。

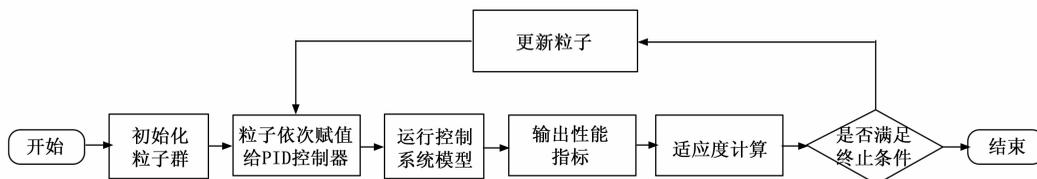


图 5 自适应整定 PID 控制器算法流程图

分别对采用传统 PID 控制器, 以及采用 SPSO-PID 控制器的矢量控制系统进行空载仿真, 负载突变仿真、转速突变仿真。

首先在电机空载运行的情况下, 设定电机转速为 4 000 RPM。对采用传统 PID 控制器与 SPSO-PID 的电机矢量控制系统分别仿真, 得到的转速响应曲线如图 6 所示。

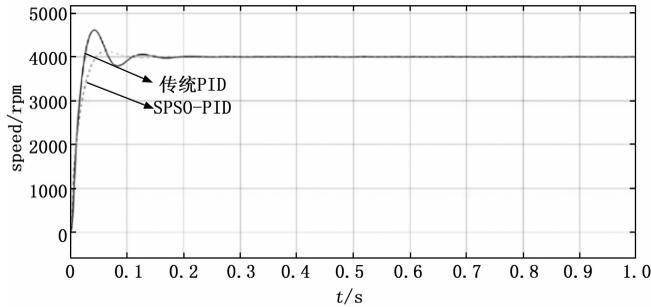


图 6 空载时传统 PID 与 SPSO-PID 转速响应

然后, 依然设定转速为 4 000 转, 初始负载为 $0.05 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在 0.4 s 时, 对电机突加 $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载扭矩, 仿真所得的转速响应曲线如图 7 所示。

最后, 在负载设定 $0.05 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转速在 0.5 s 由 2 000 rpm 跃变值 4 000 rpm, 两个控制器的仿真结果如图 8 所示。

通过前面三组仿真结果对比可以看出, 在矢量控制算法中的转速外环采用对控制参数进行自整定的 SPSO-PID 控制器。电机控制系统在启动时响应速度更快, 稳定后超调量更小。负载突变时调整时间更短, 转速失调更小。转速突变时响应时间更短, 超调量更小。从超调量, 响应时间, 抗干扰能力多方面进行分析的结果都表明, 采用 SPSO-PID 控制器的矢量控制算法性能更加优越。

3 控制器硬件设计

硬件电路系统分为核心控制模块和电机驱动模块两个模块。核心控制模块主要包括 DSP 控制器及其外围的复位电路、JTAG 接口电路、1.8 V 及 3.3 V 供电电路和串口通信电路等。功率驱动模块主要包括光电隔离电路、栅极驱动放大电路、开关逆变桥路以及信号采样反馈电路等。

核心控制模块是控制系统的数字电路部分, 对其的供电电压均不超过 5 V, 其中的 1.8 V 和 3.3 V 分别为 DSP 的内核以及 I/O 口供电, DSP 通过片上集成的 eQEP 模块和 ADC 模块接收到电机光电编码器以及电流采样电路的信号, 运行整个控制算法。同时在此板卡上加入串口转 USB 电路, 由此可以实现 DSP 与上位机的数据交换。硬件系统的总体

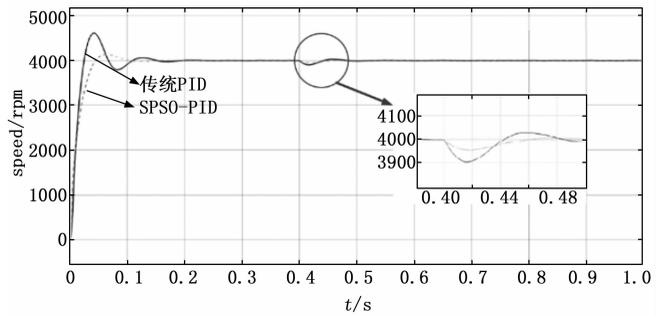


图 7 负载突变时仿真对比

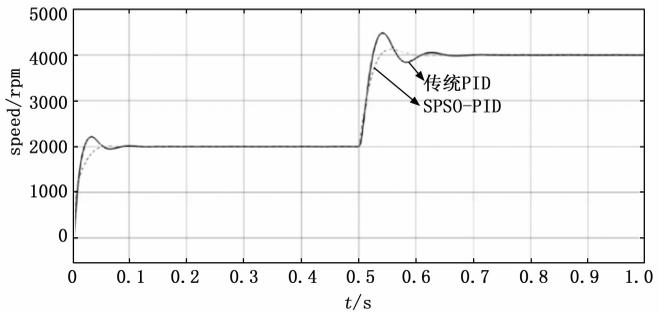


图 8 转速突变时仿真对比

结构如图 9 所示。

功率驱动模块的核心电路是 6 个开关 MOS 管组成的开关桥臂, 此模块前级连接控制模块的输出信号, 后级直接与无刷直流电机相连, 由于无刷直流电机工作电流较大, 为了防止后级电路对数字电路部分造成干扰, 在功率驱动模块的信号输入部分加入了光电隔离电路, 既保证了电信号的单向传输, 又降低了扰动, 同时防止后级短路等故障影响前级。由于 MOS 管需要较强的驱动信号, 才能快速通

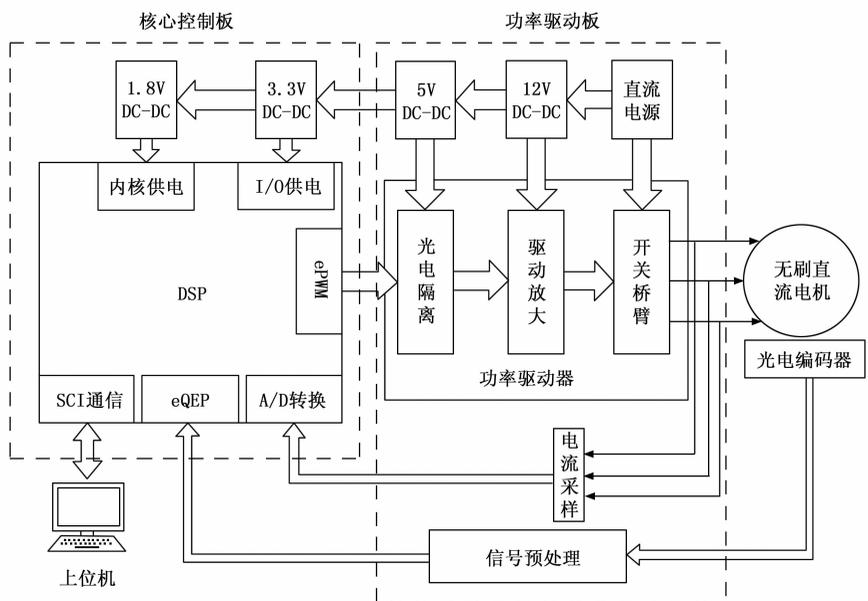


图 9 硬件系统总体结构框图

断，提高控制系统的实时性，因此加入了栅极驱动电路，提升 MOS 驱动信号的强度。此外，功率模块上还有相电流隔离采样，光电编码器电平转换电路等。除以上模块，还设计了一些外围滤波整形电路。

本设计的无刷直流电机控制系统采用矢量控制策略，作为转速闭环控制系统，算法的运行需要 3 个重要的反馈信息：三相定子电流、电机转速以及转子角度。所以信号采集模块主要包括电流采样电路和光电编码器电平转换电路。

4 控制器软件设计

为了使电机控制器对无刷直流电机达到优良得控制效果，除了要设计良好的硬件平台之外，还要结合优秀的控制算法，并且将控制算法在具体的控制器中运行。

对整个控制系统程序设计时，要根据具体需求出发。本次设计的无刷直流电机控制系统，需要对电机进行高性能控制。所以在对程序进行设计时，首先就要考虑实时性。设计的控制系统，电流控制内环的调节周期为 $50\ \mu\text{s}$ ，转速控制外环的调节时间为 $50\ \text{ms}$ 。控制器需要在极短的时间内，处理大量数据，进行大量运算。因此，要保证程序设计以及代码编写时，尽可能精简指令，避免冗余，以提高系统响应的实时性。

除了实时性之外，还要保证系统的稳定可靠。作为闭环调速控制系统，需要处理大量的反馈信号。虽然在硬件反馈电路上做了优化设计，但所有电路都有缺陷，不能保证完美无瑕。所以在程序设计时，加入容错机制，以提高系统的稳定性与可靠性。

4.1 控制系统主程序结构设计

为了产生周期性的 PWM 调制信号，矢量控制算法的核心程序，被设计在了定时器中断程序中。因此，控制系统的主程序只是执行一些基本的初始化操作。主要包括系统参数初始化，系统函数初始化，使能中断，配置中断向量表，各个模块初始化，然后进入中断管理程序。在中断管理程序中，包括了 DSP 串口中断、定时器中断以及 ADC 采样中断等。直流无刷控制系统的主程序流程图如图 10 所示。

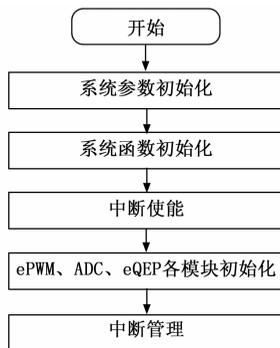


图 10 主程序流程图

4.2 定时器中断程序设计

为了满足电机控制系统实时性的要求，电流环控制周期设置较小。采用 $20\ \text{kHz}$ 的 PWM 控制信号，定时器 $50\ \mu\text{s}$ 触发一次中断，对三相逆变电路的 MOSFET 控制信号进行更新。本设计的转速控制系统，采用电流内环和电压外环，双闭环串级控制。由于电机转速响应无需达到微秒级别，同时也是为了减缓处理器的计算压力，所以此处将转速外环的控制周期设置为 $50\ \text{ms}$ 。即完成 100 次电流调节之后，再进行一次转速调整。转速外环调节周期设置较大，还有一个原因在于，本设计转速外环使用 SPSO-PID 控制器，因此可以留有足够的时间，对 PID 控制器的参数进行自适应调整。中断服务程序流程图如图 11 所示。

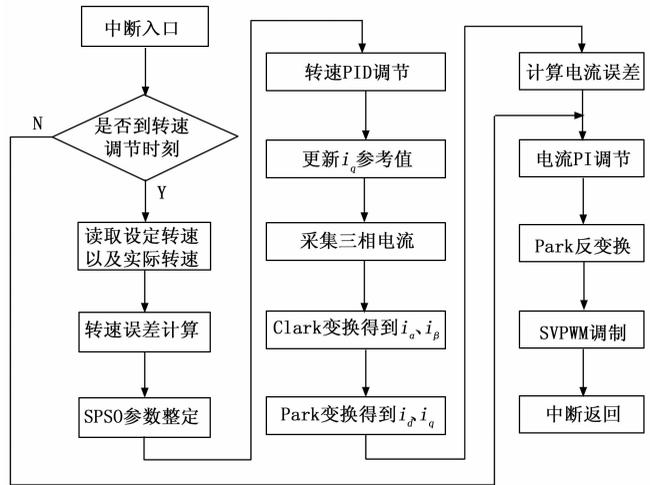


图 11 转速调节中断服务程序流程图

进入定时器中断后，首先判断是否到达转速调节时刻，即定时器是否计数值为 $50\ \text{ms}$ 。若到达转速调节时刻，则比较转速误差，采用简化粒子群算法，对转速外环控制器参数自适应整定，接下来进行转速调整。由于采用 $di=0$ 控制策略，所以只需计算到期望的交轴电流大小即可。

若是没有到达转速调节时刻，则跳转到电流控制环路。电流环路通过对采集到的电机三相电流，进行 Clarke 变换和 Park 变换，得到实际的交轴电流 qi 和直轴电流 di 。并且与上个转速调节周期得到的期望交轴电流求得差值，再与期望值为 0 的直轴电流求得差值。进入电流调节器，再进行 Park 逆变换，然后通过 SVPWM 调制技术，生成周期为 $50\ \mu\text{s}$ ，但脉冲宽度随着系统需求实时改变的 PWM 信号。通过执行此中断控制程序，就完成了电机控制系统的矢量控制算法，达到了转速闭环控制的目的。

4.3 SVPWM 调制程序设计

矢量控制算法的中断实现程序中，SVPWM 调制环节用于产生 PWM 控制信号。为了得到接近于理想圆形的磁链轨迹，本设计采用的是空间矢量脉冲宽度调制技术产生 PWM 信号。

SVPWM 调制程序设计流程图如 12 所示。

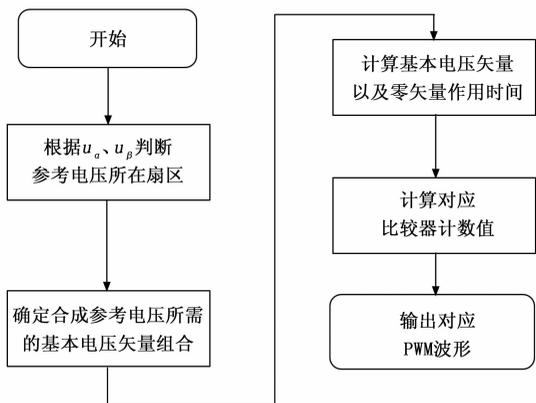


图 12 SVPWM 调制程序设计

4.4 基于 SPSO 算法的 PID 控制器程序设计

整个 SPSO 参数整定的流程如图 13 所示。

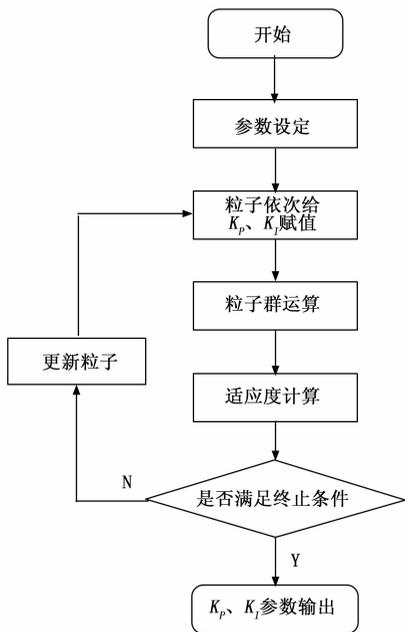


图 13 简化粒子群算法设计流程

5 实验结果与分析

对无刷直流电机控制系统进行实际测试, 为了更加直观的对电机控制系统进行测试, 首先使用 MATLAB 的 APP Designer 工具设计了上位机调试控制界面, 然后搭建了测试平台, 对控制系统进行了基础功能测试, 以及闭环调速控制测试, 验证设计的无刷直流电机控制系统的性能。

一般的, 无刷直流电机运行时允许有一个小范围的速度波动。所以本节对两个 PID 控制器采取相同的整定频次, 进行对比测试。在测试过程中, 通过光电编码器采集的脉冲信号计算出转速信息, 然后通过串口转 USB 电路, 将 DSP 采集计算的转速信息, 传入上位机控制软件, 进行显

示。为了确保数据的可靠性, 还使用了手持式非接触转速计, 对电机转速进行测量。在电机码盘上粘贴反光片, 通过接收反光片的反射光信号进行测速。测速分别对传统 PID 以及 SPSO-PID 进行闭环调速测试, 并记录在表 1 中。

表 1 稳态转速及误差统计

| 预设转速 | 传统 PID | | SPSO-PID | | 自整定参数 |
|-------|-------------|------|-------------|------|--------------------------|
| | 实测转速 | 误差范围 | 实测转速 | 误差范围 | |
| 400 | 385~316 | ±16 | 391~408 | ±9 | $K_p=0.42$ $K_i=0.19$ |
| 1 200 | 1 177~1 222 | ±23 | 1 194~1 206 | ±6 | $K_p=0.55$ $K_i=0.24$ |
| 3 000 | 2 988~3 011 | ±12 | 2 995~3 006 | ±6 | $K_p=0.73$ $K_i=0.4$ |
| 5 500 | 5 471~5 533 | ±39 | 5 488~5 513 | ±13 | $K_p=0.89$ $K_i=0.51$ |

除了进行稳态测试, 还对电机空载情况下的阶跃响应进行了测试。具体实施方式是通过观测上位机测试界面中时间-转速响应曲线, 对不同转速情况下的电机控制器响应情况进行记录, 如表 2 所示。

表 2 电机阶跃响应测试情况

| 转化变速区间 | 稳定时间 | 传统 PID 超调量 | 超调量百分比 | 稳定时间 | SPSO-PID 超调量 | 超调量百分比 |
|-------------|------|------------|--------|------|--------------|--------|
| 0~400 | 230 | 45 | 11.25% | 150 | 19 | 4.75% |
| 0~2 000 | 250 | 210 | 10.5% | 170 | 85 | 4.25% |
| 0~5 000 | 280 | 510 | 10.2% | 180 | 180 | 3.6% |
| 2 000~4 000 | 240 | 415 | 10.38% | 170 | 150 | 3.75% |

从表中数据可以看出, 在电机的阶跃响应测试中, 采用传统 PID 控制器作为转速控制外环的矢量控制策略, 在稳定时间以及超调量两个方面, 都不如 SPSO-PID 控制器。不管是从 0 转速时刻启动, 还是转速突变的情况, 传统 PID 控制器的超调量基本都在 10% 以上, SPSO-PID 控制器的超调量基本控制在 5% 以内。

综上所述, 采用 SPSO-PID 控制器, 作为转速控制外环的电机控制器, 从稳态误差、稳定时间和超调 3 个方面的表现, 都优于传统的 PID 控制器, 基本实现了对电机转速的高精度控制。

6 结束语

本文以电动汽车搭载的无刷直流电机为背景, 根据电机所处环境复杂, 情况多变, 频繁启停的情况, 针对目前电机控制器响应时间慢, 控制精度低, 稳态误差大, 抗干扰能力弱的现状, 引入先进的控制策略来提高其运行性能, 为无刷直流电机在电动汽车上的推广应用打下基础。

在传统无刷电机矢量控制策略的基础上, 对其转速外环的 PID 控制器加入 SPSO-PID 参数自定算法, 使得电机系统可以实时根据运行情况与需求速度, 调整转速外环调节器的控制参数。最后对本文所设计的电机控制器进行了验证测试。实验结果表明, 本文设计的无刷电机控制器系

统调节时间短、调速范围广、转速波动小、转矩脉动低、电机控制系统在各个调速范围内都能保持可靠运行。

参考文献:

- [1] 李金培. 城市公共交通发展对绿色经济效率的影响研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [2] 胡登峰, 冯楠, 黄紫薇, 等. 新能源汽车产业创新生态系统演进及企业竞争优势构建——以江淮和比亚迪汽车为例 [J]. 中国软科学, 2021 (11): 150-160.
- [3] 许秀瑞, 田善武, 王俊鹏, 等. 全球新能源汽车技术创新合作网络演化分析 [J]. 工业技术经济, 2020, 39 (10): 65-73.
- [4] 戴慧, 等. 新能源汽车补贴政策效果回顾及未来调整建议 [J]. 价格理论与实践, 2021 (9): 28-30.
- [5] 张蕾, 秦全德, 谢丽娇, 等. 中国新能源汽车产业的政策协同研究——评估与演化 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2020, 22 (3): 26-35.
- [6] 高运胜, 金添阳, 等. 新形势下中国新能源汽车国际竞争力分析 [J]. 国际经济合作, 2021 (4): 65-76.
- [7] 张厚明, 等. 我国新能源汽车市场复苏态势及推进策略 [J]. 经济纵横, 2021 (10): 70-76.
- [8] 孙宇健, 等. 双极性变磁阻无刷电机的设计与分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [9] 夏长亮, 方红伟, 等. 永磁无刷直流电机及其控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (3): 25-34.
- [10] 吴迪, 钱贵霞, 等. 中国稀土产业经济研究现状与发展趋势分析 [J]. 稀土, 2014, 35 (5): 104-112.
- [11] 潘峰, 周运杰, 卢沁雄, 等. 基于占空比调节的无刷直流电机直接转矩控制 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44 (11): 42-49.
- [12] 王维强, 曾晓松, 夏茂树, 等. 电动汽车永磁无刷直流电机控制器设计 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (1): 20-25.
- [13] 童钟良. 直流电动机向无换向器化发展的归宿不是同步电机而是广义的直流电动机 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44 (11): 95-99.
- [14] 吴昊. 电动汽车用无刷直流电机控制系统研究 [D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2020.
- [15] Yedamale P. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals [J]. Microchip Technology Inc, 2003, 20 (1): 3-15.
- [16] Sharma P K, Sindekar A. Performance analysis and comparison of BLDC motor drive using PI and FOC [C] // 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC), 2016: 485-492.
- [17] 于波峰. 大功率无刷直流电机控制器的研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- [18] 荆福琪, 蔡家斌, 潘正, 等. 永磁无刷直流电机的力矩波动分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (9): 46-51.
- [19] SHAO J, NOLAN D, TEISSIER M, et al. A novel microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (6): 1734-1740.
- [20] KAZMIERKOWSKI M P, FRANQUELO L G, RODRIGUEZ J, et al. High-performance motor drives [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011, 5 (3): 6-26.
- [21] WANG G, ZHANG G, XU D. Position Sensorless Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Machine Drives [M]. Springer, 2020.
- [22] KIM H-S, KWON B-I. Optimal design of motor shape and magnetisation direction to obtain vibration reduction and average torque improvement in IPM BLDC motor [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11 (3): 378-385.
- [23] 邱国平. 永磁同步电机使用设计及应用技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020.
- [24] 林程, 邢济奎, 黄卓然, 等. 电动汽车永磁同步电机最优弱磁控制策略 [J]. 汽车工程, 2018, 40 (11): 1346-1353.
- [25] 苏鹏. 电动汽车用模块化转子永磁型磁通切换电机分析与设计 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [26] 刘国友, 王彦刚, 李想, 等. 大功率半导体技术现状及其进展 [J]. 机电传动, 2021 (5): 1-11.
- [27] 田超, 岳伟, 陈焕明, 等. 基于模糊 PI 的表贴式永磁同步电机矢量控制 [J]. 青岛大学学报 (工程技术版), 2021, 36 (4): 8-15.
- [18] 姜鸿儒, 徐利, 邱令存, 等. 基于扩张状态观测器的反馈线性化无人飞行器姿态控制 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 6.
- [19] KUHN H W. The hungarian method for the assignment problem [J]. Naval Research Logistics, 1955, 2 (1/2): 83-97.
- [20] MACDONALD E A. Multi-robot assignment and formation control [M]. Lap Lambert Academic Publishing, 2011.
- [21] SUN Z, XIA Y. Consensus-based formation control with dynamic role assignment [C] // Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference, Changsha, 2014, 3681-3686.
- [14] 刘明威, 高兵兵, 王鹏飞, 等. 基于神经网络自适应 PID 的无人机编队避障飞行控制研究 [J]. 无人系统技术, 2022, 5 (2): 22-32.
- [15] 曹志斌, 邵星灵, 杨卫, 等. 基于神经网络的多四旋翼保性能编队控制 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (15): 6347-6353.
- [16] 赵启, 甄子洋, 龚华军, 等. 基于深度强化学习的无人机编队控制 [J]. 电光与控制, 2022, 29 (10): 29-33.
- [17] PROCTOR A A, KANNAN S K, RAABE C, et al. Development of an autonomous aerial reconnaissance system at Georgia Tech [C] // Proceedings of 1st UAV Conference Portsmouth, Virginia, 2002, 1-9.

(上接第 131 页)