

无位置传感器无刷直流电机控制技术综述

郑笑咏^{1,2}, 邓锦祥¹, 胡荏¹, 王宏²

(1. 季华实验室, 广东 佛山 528000; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)

机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518000)

摘要: 无刷直流电机因寿命长、可靠性高、转矩大等特点, 在市场上有着广泛的应用。而采用无位置传感器控制方法能够避免位置传感器带来的一系列问题, 进一步拓展无刷直流电机的应用场合。与反电动势法等传统的无位置传感器控制方法相比, 状态观测器法和智能控制方法有更优异的控制性能, 但也需要大量的计算。随着计算机技术的突破, 这些方法得到了更多的关注。对近几年传统无位置传感器控制方法、状态观测器法、智能控制方法的发展做了分析与总结, 并简要介绍了几种常用的启动方法。

关键词: 无刷直流电机; 无位置传感器; 反电动势法; 状态观测器; 智能控制

中图分类号: TM33 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23625

Summary of Control Technology of Position Sensorless Brushless DC Motor

ZHENG Xiaoyong^{1,2}, DENG Jinxiang¹, HU Ren¹, WANG Hong²

(1. Ji Hua Laboratory, Foshan 528000, Guangdong, China; 2. School of Mechanical

Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen),

Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: Brushless DC motor has been widely used in the market because of its long life, high reliability and high torque. The sensorless control method can avoid a series of problems caused by the position sensor and further expand the application of the brushless DC motor. Compared with the traditional sensorless control methods such as the back-EMF method, the state observer method and the intelligent control method have better control performance, but they also need a lot of calculation. With the breakthrough of computer technology, these methods have also received more attention. The development of traditional sensorless control methods, state observer methods and intelligent control methods in recent years were analyzed and summarized, and several common starting methods were briefly introduced.

Key words: brushless DC motor; position sensorless; back-EMF method; state observer; intelligent control

随着工业的发展和自动化的普及, 作为电能转化装置的电机已经成为生活与生产中不可或缺的一部分。无刷直流电机寿命长、可靠性高、易于维护, 在自动化办公、家用电器、电动车、航天航空等领域有着广泛的应用。传统的无刷直流电机带有位置传感器, 使得电机系统体积增大、易受干扰且难以在恶劣环境下使用。为改善位置传感器带来的问题, 无位置传感器控制技术就成为了研究的热点, 也更加符合如今小型化、轻量化、智能化和高效化的发展趋势。目前反电动势法等传统的控制方法已有诸多应用, 但仍然存在不少缺陷。与之相比, 状态观测器法和智能控制方法在控制性能方面有着更为优异的表

现, 却也面临着计算量大的问题, 但随着数字信号处理器等高性能处理器的出现, 这些方法得到了更多的关注、研究和推广。接下来主要介绍几种传统无位置传感器控制方法、状态观测器法、智能控制方法以及启动方法。

1 传统无位置传感器控制方法

在无刷直流电机无位置传感器控制中, 传统的控制方法主要有反电动势法、电感法、磁链法、三次谐波法和续流二极管法。其中, 反电动势法是目前最成熟、使用最广泛的方法。电感法和磁链函数法也有应用, 且电感法因其特殊的原理可用于电机启动控制。与上述3种方法相比, 三次

谐波法和续流二极管法的研究与应用都不多。表1为传统无位置传感器控制方法优缺点对比。

表1 传统无位置传感器控制方法对比

Tab.1 Comparison of traditional sensorless control methods

控制方法	优点	缺点
反电势法	简单方便	高频信号干扰;静止或低速反电势难以测量;实际反电势波形不理想
电感法	启动或低速时可用	对电流检测精度要求高
磁链法	理论上可应用于全转速范围	需确定转子初始位置;计算量大;易受参数变化干扰;易受累计误差影响
三次谐波法	可应用于较广的转速范围、相位延迟小	易受累计误差影响
续流二极管法	可应用于较广的转速范围、检测灵敏	需增设6个独立的检测电源

1.1 反电动势法

反电动势法将通过端电压检测法得到的相反电动势过零点延时 30° 后得到换相点,图1是以A相为例的反电动势法过零点与换相点关系图。而采用线电压法则无需延时,测得的反电动势过零点即为换相点。

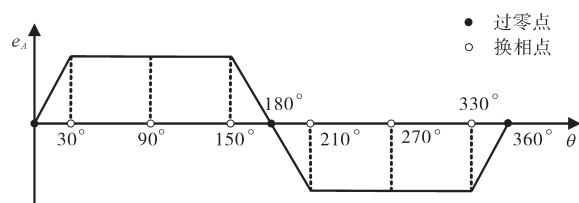


图1 反电动势法过零点与换相点关系图

Fig.1 Diagram of the zero crossing and commutation point of the back-EMF method

反电动势法原理简单、实现方便,在市场上应用广泛。但是,反电动势法同样存在着一些弊端,众多学者对此提出了各种的改进方法。

1)信号干扰问题。

在采集的三相电压信号中,存在高频干扰信号,使得反电动势过零点信号不准确。对此,一般采用低通滤波器过滤掉高频信号,但由此产生的相移需要在后续的控制中进行补偿。文献[1]构造了反电动势与反电动势斜率之比的函数,通过分析函数的单调性来得到电机的换相信号,该方法无需反电动势过零点信号,避免了低通滤波带来的延时,使电机能工作在更宽的工况范围。

续流阶段同样会对反电动势过零点信号采集造成干扰。文献[2]分析了PWM调制对反电动势过零点检测造成的影响,并对阻容滤波造成的

相移以及硬件与软件产生的延时进行了补偿。文献[3]在考虑续流影响的基础上,通过分析电机线电压差积分值与换相角度之间的关系,调制延时来控制线电压积分值为零,从而校正电机换相点,实现精准换相。

2)启动和低速运行问题。

在静止或低速运行时,电机的反电动势很小,难以测量,故而反电动势法一般都需要配合单独的启动方法,比如三段式启动法等。文献[4]通过零序电压提取转子位置信息,并结合Bessel低通滤波器、中值滤波器和适用于零序电压基频的速率限制器来获取准确的换相瞬间。该方法启动速度最低可至额定速度的3.3%,避免了中性点,简化了结构,且与观测器方法相比对电机相电感和相电阻变化不敏感。

3)实际中的非理想情况。

在实际中难免会存在着一些不理想的情况,非理想的反电动势波形、不平衡不对称情况和电机参数的变化等都会对电机控制产生影响。

非理想的反电动势波形会对过零点采集造成影响,导致电机换相不准确。线反电动势法^[5]是一种减小梯形波波形不理想问题的可行方法,同时可以避免采用相反电动势过零点检测产生的中性点重构误差和滤波延迟。文献[6]通过磁滞比较器、变换的线电压以及滤波器设计来减小低电感、非理想反电动势高速电机的换相角误差。

对于不平衡不对称的问题,文献[7]提出了一种不平衡过零点检测补偿方法,来估计6个平衡的换相时刻,从而减少电流纹波。文献[8]则分析了电机参数不对称和反电动势测量回路的电阻容限对过零点检测造成的影响,并提出了一种自适应阈值校正策略来抑制由此导致的换相误差,但是文中并未分析非对称互感的问题。

对于电机参数变化的问题,文献[9]结合电机的机械模型和电气模型,推导出与采样周期无关的反电动势算法,能有效抑制反电动势纹波,对参数变化和瞬态变化有较好的鲁棒性,同时也提出了对参数误差的补偿方法。

1.2 其他传统控制方法

1.2.1 电感法

当电机运行时,电机定子绕组的电感值会随着转子位置的变化而变化。电感法的基本思想就是通过检测电感值变化来测定转子位置。不同于反电动势法,电感法不受反电动势影响,在

启动或低速运行时也有很好的应用效果,但是电感法对电流检测的精度要求很高。

文献[10]在保证检测脉冲数不变的情况下,通过同时分析脉冲电流的幅值与极性来提高检测精度,减小电机实际运行中参数误差造成的影响。图2是线电感、线电流差与转子电角度的关系图,假设三相电流差值 Δi_{AB} 、 Δi_{BC} 和 Δi_{CA} 为对应脉冲响应电流之差,可得:

$$\begin{cases} \Delta i_{AB} = i_{AB} - i_{BA} \\ \Delta i_{BC} = i_{BC} - i_{CB} \\ \Delta i_{CA} = i_{CA} - i_{AC} \end{cases} \quad (1)$$

定义脉冲电流系数 φ_{AB} 、 φ_{BC} 、 φ_{CA} 为

$$\begin{cases} \varphi_{AB} = \frac{\Delta i_{AB}}{|\Delta i_{MAX}|} \\ \varphi_{BC} = \frac{\Delta i_{BC}}{|\Delta i_{MAX}|} \\ \varphi_{CA} = \frac{\Delta i_{CA}}{|\Delta i_{MAX}|} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $|\Delta i_{MAX}|$ 为三相电流差值绝对值的最大值。

根据 φ_{AB} 、 φ_{BC} 、 φ_{CA} 状态与转子位置之间的对应关系,可将 360° 分为12个区间,即将精确度提升至 30° ,并根据改进的修正原则,即使位置检测结果与三相的状态距离最短,可消除检测盲区。文献中也同时提出了“滑动窗口”的切换方法,通过检测换向序列来实现电机运行状态切换,提高了电机运行的稳定性与可靠性。

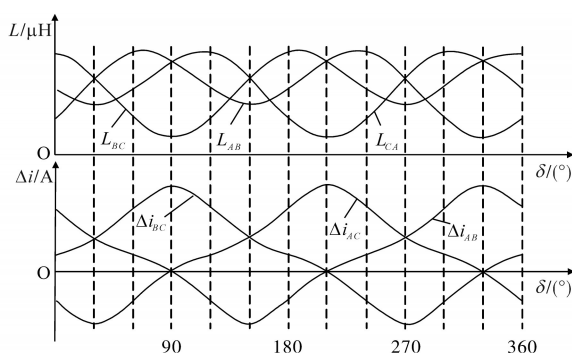


图2 线电感 L 、线电流差 Δi 与转子电角度 δ 关系图

Fig.2 Relationship between line inductance L , line current difference Δi and rotor electrical angles δ

1.2.2 磁链法

磁链法依据磁链与转子位置之间的关系,通过磁链信息来估算转子位置。磁链法构造了与转速无关的磁链函数^[11],通过对函数的分析,得到电机的换相点,所以理论上可以在全转速范围内使用。磁链法计算复杂,对电压电流的测量精度

要求高,而且容易受到电机参数变化的影响。此外,磁链法的使用也需要确定转子的初始位置,在实际使用中有一定的限制。

为了改进磁链法,拓展磁链法的应用范围,近年来学者们对磁链法也有进一步的研究。文献[12]通过对磁链函数的定性分析,简化了传统的磁链函数,并采用换相阈值闭环控制来滤去干扰脉冲,实现精准换相。文献[13]提出了无需磁链观测器的间接磁链法,提高了磁链控制的效果,简化了系统结构。文献[14]提出了一种基于磁链函数的新型自适应换相补偿方法,不仅滤除了高频噪声,同时补偿了换相误差,并提高了系统效率。这种控制策略在高低速时均有优良表现,低速可至约30 r/min(约额定速度的3%),同时在高速时可进行精确的换相补偿。

1.2.3 三次谐波法

三次谐波法^[15-16]通过检测反电动势三次谐波的过零点来确定电机的换相点。三次谐波法能够应用于较广的转速范围,且具有较小的相位延迟,但是使用时需要附加检测电路,而且积分过程会累计低速时的误差,对其使用造成了一定的影响。

1.2.4 续流二极管法

续流二极管法^[17]通过检测非导通相反并联于开关管两端的续流二极管的电流来得到电机的换相点。续流二极管法与转速无关,检测灵敏,可以适用于较宽的转速范围。但是,这种方法需要增设6个独立的检测电源,并且只适用于上桥臂PWM调制、下桥臂恒导通的调制方式,具有很大的使用局限性。

2 状态观测器法

状态观测器法主要通过采集电机三相电压、三相电流以及转速等参数,构建观测器模型,从而估算转子位置。状态观测器法对于传统控制方法是控制性能上的一个提升,在低速运行、转矩脉动抑制和转速控制性能等方面都有优异的表现,但是相对的,它对处理器性能有更高的要求。目前,Kalman滤波器法和滑模观测器法是无刷直流电机无位置传感器控制中常用的状态观测器方法,也是热点的研究方向。两种状态观测器法优缺点对比如下:采用Kalman滤波器鲁棒性、抗扰性、适应性强,但存在运算量大和发散问题;采用滑模观测器鲁棒性、抗扰性、适应性强,

但系统存在抖振。

2.1 Kalman滤波器

在实际控制中,系统一般都会存在不确定性,包括数学模型不完善、系统扰动、测量误差和信号干扰等。Kalman滤波器是解决这些问题的一种常用的智能控制方法。其应用递推的思想,以无偏及最小估计偏差方差为最优准则^[18],通过前次估计值与当前值得到新的估计值,使估计误差最小,从而得到最优估计值。故而Kalman滤波器也曾被叫作线性最小均方估计值。在无刷直流电机控制系统中,根据三相电压方程、转矩方程,速度方程可以构建出相应的状态空间模型:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \Phi_k \mathbf{X}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{U}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 、 $\mathbf{U}_k$ 和 $\mathbf{Z}_k$ 分别为状态量、输入量和测量量; Φ_k 为状态转移矩阵; $\mathbf{H}_k$ 为量测矩阵; $\mathbf{B}_k$ 为输入系数矩阵; $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{v}_k$ 为系统噪声和量测噪声。

Kalman滤波主要包括预测和校正两个过程。在预测过程中,分别计算先验状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 和先验误差协方差 $\mathbf{P}_{k|k-1}$:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_{k-1} \mathbf{U}_{k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \Phi_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \end{cases} \quad (4)$$

在校正过程中,计算Kalman增益 $\mathbf{K}_k$ 、后验状态估计 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k}$ 和更新值 $\mathbf{P}_{k|k}$:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T}{\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k} \\ \hat{\mathbf{X}}_{k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Q}_k$ 、 $\mathbf{R}_k$ 为 $\mathbf{w}_k$ 和 $\mathbf{v}_k$ 的协方差矩阵。

根据上述方程,采集三相电流和电压,通过不断迭代可以估算出转子的位置,从而对电机进行换相控制。Kalman滤波器控制系统框图如图3所示。

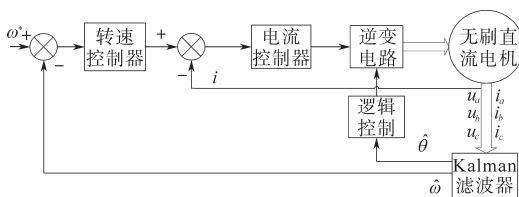


图3 Kalman滤波器控制系统框图

Fig.3 Diagram of Kalman filter control system

Kalman滤波器可解决控制系统中的噪声问题,具有较强的抗扰能力,可使电机换相控制更精确,且适应更多的工作环境,但是Kalman滤波器在使用过程中需要大量的计算。文献[19]将

Kalman滤波算法应用于直接转矩控制中,解决了微分运算噪声的干扰并且节省了滤波电路。

Kalman滤波算法适用于线性系统,而扩展Kalman滤波(extended Kalman filter, EKF)算法是其在非线性系统应用领域的拓展。EKF算法通过泰勒展开实现非线性系统的线性化。文献[20]为解决传统反电动势法中噪声与测量误差引起的观测不准确问题,提出了基于EKF算法的控制方法,并验证了系统具有良好的稳定性与控制性能。

此外,随着研究的深入,EKF算法在实际应用中也有诸多改进。文献[21]引入衰减因子,提高当前测量值中的估计比重,减少前期测量值的影响,从而减小累计误差印象,避免EKF算法在转子位置估计中可能存在的发散问题。文献[22]提出了一种采用自适应EKF估计相电流的方法,可以防止因测量灵敏度而导致的不稳定情况,提高电流控制的鲁棒性。文献[23]提出了一种基于降阶离散状态空间模型的EKF算法,根据定子电流测量值估计转子转速和位置,减少了滤波器的计算时间,简化了协方差矩阵的调整。

EKF算法一般为一阶近似算法,为提高近似精度,基于UT变换的无迹Kalman滤波(unscented Kalman filter, UKF)算法被提出可用于无刷直流电机位置检测^[24],且可达到二阶或三阶近似。文献[25]采用线磁链法并结合UKF算法来估算转子位置,经过与反电动势法的实验对比,证明提出的方法具有更好的换相精度且不受参数变化影响。针对其计算量大的问题,文献[26]采用球形采样策略取代传统的平方根对称采样策略,从而减少了采样点数量以及算法计算量。

2.2 滑模观测器

滑模观测器根据需要的系统动态性能来设计切换平面,并通过控制作用将系统状态从切换平面外调节至切换平面内,最后在切换平面内将系统收束至平衡点。滑模控制具有很好的鲁棒性和抗扰性。

无刷直流电机的线电压方程为

$$\begin{cases} u_{ab} = Ri_{ab} + (L - M) \frac{di_{ab}}{dt} + e_{ab} \\ u_{bc} = Ri_{bc} + (L - M) \frac{di_{bc}}{dt} + e_{bc} \\ u_{ca} = Ri_{ca} + (L - M) \frac{di_{ca}}{dt} + e_{ca} \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_{ab} 、 u_{bc} 、 u_{ca} 为三相线电压; i_{ab} 、 i_{bc} 、 i_{ca} 为三相电

流之差; e_{ab}, e_{bc} 和 e_{ca} 为三相线反电动势; R, L 和 M 分别为相电阻、绕组自感和绕组互感。

令 $\dot{\mathbf{i}} = [\dot{i}_{ab} \ \dot{i}_{bc}]^T$ 和 $\mathbf{e} = [e_{ab} \ e_{bc}]^T$ 为状态量、 $\mathbf{u} = [u_{ab} \ u_{bc}]^T$ 为输入量,可构建如下状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (7)$$

根据上述状态方程可建立滑模观测器:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{i}}} \\ \dot{\hat{\mathbf{e}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}} \\ \hat{\mathbf{e}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} \\ -\mathbf{KL} \end{bmatrix} \text{sgn}(\hat{\mathbf{i}} - \mathbf{i}) \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= -\mathbf{R}/L' & \mathbf{B} &= -\mathbf{I}/L' \\ \mathbf{C} &= \mathbf{I}/L' & \mathbf{L}' &= \mathbf{L} - \mathbf{M} \\ \mathbf{I} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} & \mathbf{L} &= \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \\ \hat{\mathbf{i}} &= [\hat{i}_{ab} \ \hat{i}_{bc}] & \hat{\mathbf{e}} &= [\hat{e}_{ab} \ \hat{e}_{bc}] \end{aligned}$$

式中: $\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{e}}$ 为相电流之差和线反电动势的估计值; k_1, k_2, l_1 和 l_2 均为滑模增益; sgn 为符号函数。

结合滑模存在条件以及 Lyapunov 稳定性判据可以得到滑模增益取值。根据建立的滑模观测器就可以得到线反电动势,从而得到电机换相点信息。

传统的滑模观测器采用了符号函数 sgn ,由于符号函数存在过零点时的正负切换,所以导致系统存在抖振的现象。为解决这个问题,一些学者考虑采用不同的函数取代符号函数。文献[27]采用了 sigmoid 函数取代传统滑模观测器中的 sgn 函数,利用设计函数光滑连续等特点来减小系统的抖振。图4和图5分别是改进滑模观测器框图以及传统滑模观测器与改进滑模观测器在3000 r/min时的反电动势观测误差波形^[27]。文献[28–29]则分别考虑了采用双曲正切函数和一种新型饱和函数。

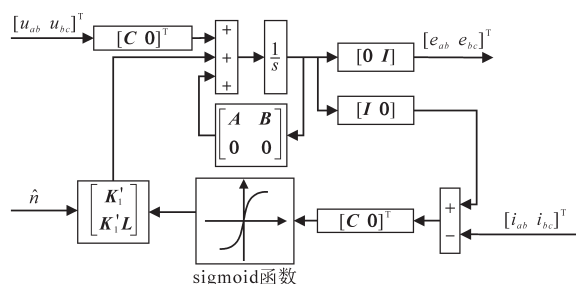


图4 改进滑模观测器框图

Fig.4 Diagram of improved sliding mode observer

幂次趋近律^[30–31]同样是一种可以有效削弱抖振影响的方法。文献[31]采用幂次趋近律 $\dot{S} = -K|S|^\alpha \text{sgn}(S)$,通过调节幂指数来优化系统

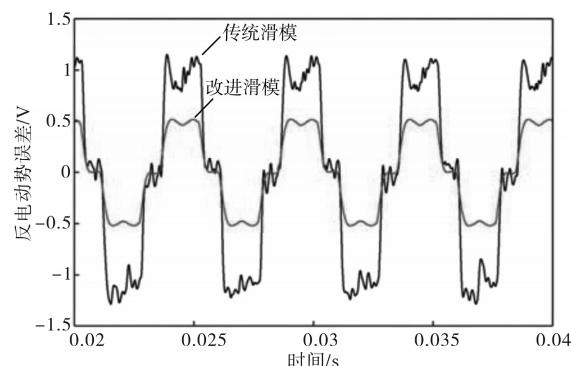


图5 3000 r/min时反电动势观测误差波形

Fig.5 Waveforms of back-EMF error observation at 3000 r/min

的控制性能,并结合构建的饱和函数,减低系统的抖振。此外,也可以考虑结合其他控制算法,文献[29]便结合了自适应控制算法,减小了切换波动对转速控制的影响。

在滑模控制方法中,滑模增益的选取是对系统控制来说比较重要的因素。文献[32]采用了多种群遗传算法来取代单种群遗传算法,优化了滑模观测器的增益参数,减少了参数选取时间与误差。

3 智能控制方法

智能控制方法对电机系统的数学模型要求不高,具备优异的控制性能与广泛的适用性。高性能处理器的出现满足了智能控制方法对计算能力的需求,使智能控制方法在实际中的广泛应用成为可能。表2为各种智能控制方法的优缺点对比。

表2 智能控制方法对比

Tab.2 Comparison of intelligent control methods

控制方法	优点	缺点
模糊控制	鲁棒性、抗扰性、适应性、推理能力强	学习能力弱、需要专家经验
神经网络控制	鲁棒性、抗扰性、适应性、学习能力强	运算量大、推理能力弱、需要大量样本数据、局部收敛
遗传算法	鲁棒性强、全局搜索能力好	效率不高、易于过早收敛
蚁群算法	鲁棒性强、全局搜索能力好	运算量大、初期速度慢、局部收敛
粒子群算法	鲁棒性强、收敛快、设置参数少	部分问题不适用、运算量大、局部收敛

3.1 模糊控制

模糊控制是一种具有较好鲁棒性的智能控制方法,它无需知道精确的数学模型,在推理逻辑上更近似人类的思维方式,所以有很好的适应性和抗扰性。由于其优异的推理能力,故而在电

机这种不确定性较多的系统中也有着较好的应用。模糊PID控制^[33-35]是常用的控制方法,图6是无刷直流电机的模糊PID控制结构原理图。转速误差与误差变化率作为输入,通过合适的模糊规则,经过模糊推理后可以得到PID控制器 K_p 、 K_i 和 K_d 的修正量,从而完成控制器参数的自整定,提高系统自适应能力。

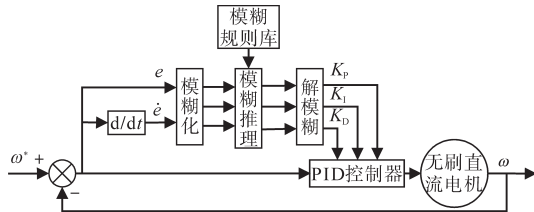


图6 模糊PID控制结构原理图

Fig.6 Diagram of fuzzy PID control structure

模糊控制本身存在一些问题:一方面,规则库的建立需要依托于大量的专家经验;另一方面,模糊控制推理能力强,但是学习能力弱。在实际使用中,为实现更优的控制性能,模糊控制一般也会结合其他控制方法一起使用,如模糊神经网络控制^[36]等。

3.2 神经网络控制

随着计算机技术的进步,神经网络控制方法在控制领域已有广泛的应用。神经网络种类很多,不同的神经网络有不同的特性,故而神经网络控制能够满足很多的使用需求。在无刷直流电机的控制中,单神经元网络^[37]、BP网络^[38]、RBF网络^[39]和小波网络是较常用的神经网络类型。

单神经元网络结构简单,运算量相对其他网络较少,所以使用也较为灵活,也常用于优化电机PID控制性能。

BP神经网络存在局部收敛且收敛速度慢的问题,对此许多文献也提出了优化方法。文献[40]提出一种在线调整学习速率的BP神经网络,提高了控制性能,减小了系统的超调和振荡问题。文献[41-42]分别提出Q学习优化^[41]和LQR优化方法^[42],改善了电机速度控制性能。

RBF网络可以看作是一种特殊的BP网络,有着很好的逼近和收敛能力。文献[43-44]分别将RBF神经网络与模糊控制和滑模控制相结合,实现速度精准控制。文献[45]提出了以反电动势差作为返回信号的基本补偿策略以及基于自适应RBF神经网络的补偿方法,有效地补偿了高速电机从加速到稳态的换相误差。

小波网络结合了神经网络和小波分析,具有

收敛速度快和精度高的特点。文献[46]采用自适应小波神经网络模型,并用遗传算法优化,可精确估计转子位置。

神经网络控制在实际使用中需要有足够强的处理器来支撑神经网络的运算,并且需要足够的样本数据来完成神经网络的训练。此外,神经网络控制虽然有着较强的计算能力,但是推理能力相对较差,所以可以结合模糊控制^[47-48]、遗传算法等控制方法来提高系统的性能。由于计算能力限制,在大多数情况下,神经网络方法都是离线学习的,而近年来成为研究热度的深度学习方法也同样因此难以在电机控制中使用。但是相信随着科技的进步,深度学习方法也能成功应用在电机控制领域中。

3.3 其他智能控制方法

在模糊控制和神经网络控制之外,学者们对遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等方法亦有研究。遗传算法^[49]的思想来源于生物遗传,根据评价函数、选择运算、交叉运算和变异运算实现寻优,具有较好的鲁棒性和全局搜索能力,多用于对模糊控制等方法的优化。但其效率不高,易过早收敛,且对优化问题的约束多表达不全。蚁群算法^[50]模仿了蚂蚁的觅食行为,通过多样性和释放信息素的正反馈机制来得到最优解,但蚁群算法在初期速度慢,且容易陷入局部收敛。粒子群算法通过粒子不断迭代寻求个体最优解来得到全局的最优解,算法收敛快、设置参数少,但在部分问题中并不适用。对于该算法同样存在的局部收敛问题,文献[51]提出了自适应惯性权重法来进行优化。

4 启动方法

启动方法是无位置传感器控制中不可避免的一个问题。在静止或低速运行时,反电动势等电参数过小而不易测量,故而难以直接启动。对此,众多学者提出了不少的方法来解决无刷直流电机无位置传感器控制中的启动问题。

预定位启动法^[52]相对简单,将任意两相绕组通电可使转子转到某一确定位置,从而实现转子预定位,然后给电机导通逻辑与占空比信号,并在适当转速时切换到正常运行状态。预定位法原理简单,适用性广,但是需要的切换时间比较长。

三段式启动法在预定位之后增加了外同步

加速以及状态切换两个阶段,即根据设定好的外同步信号提升电机转速,并在某一转速后切换至自同步运行。三段式启动法一般只适用于轻载和小惯量负载情况下,且影响因素较多,如负载转矩、外施电压、急速曲线和转动惯量等^[53]。其在切换阶段往往不稳,并且重载情况下的切换阶段容易失步。文献[54]采用空间电压矢量方法,优化传统的三段式启动策略,有效减少了启动和加速过程中需要检测脉冲的数量。文献[55]结合SVPWM算法和三相定子合成磁势闭环策略,抑制了启动时的转矩脉动,提高了启动性能。

短时检测脉冲转子定位启动法通过测定施加检测脉冲后的电感值差异,实现对转子位置的估计。这种结合电感法原理^[56]的启动方法应用也较多。文献[10]提出的高精度电感法在保证检测脉冲数不变的情况下,将定位精度从60°提升至30°。

除了上述三种较为常用的启动方法外,还有升压升频同步启动法^[53]、电压插值启动法^[57]以及 I/f 启动法^[58]等。

5 结论

本文主要介绍了无刷直流电机无位置传感器控制中常用的传统控制方法、状态观测器法及智能控制方法,并简单介绍了几种启动方法。无位置传感器控制技术使无刷直流电机能进一步适应市场对轻量化、小型化和便捷化的需求,具有很大的研究价值与意义。目前,反电动势法仍是技术最成熟、使用最广泛的控制方法。状态观测器法和智能控制方法一般都有较好的鲁棒性、抗干扰性和适应性,但普遍对处理器的运算能力有较高的要求。随着处理器性能的不断提高,这些先进的控制方法将会有更多的应用场合。

参考文献

- [1] 陈炜,刘会民,谷鑫,等. 基于反电动势函数的无刷直流电机无位置传感器控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4661-4669.
Chen Wei, Liu Huimin, Gu Xin, *et al.* A position sensorless control strategy for brushless DC motor based on the back-electromotive force function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4661-4669.
- [2] 张兰红,杨婷婷,王韧纲,等. 无位置传感器无刷直流电机换相位置的检测与修正[J]. 微电机, 2019, 52(10): 60-65, 97.
Zhang Lanhong, Yang Tingting, Wang Rengang, *et al.* Detection and correction of commutation position for sensorless BLDCM [J]. Micromotors, 2019, 52(10): 60-65, 97.
- [3] 姚绪梁,林浩,鲁光旭,等. 一种基于线电压差积分的无位置传感器无刷直流电机换相误差检测和校正方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4651-4660.
Yao Xuliang, Lin Hao, Lu Guangxu, *et al.* Line voltage difference integral method of commutation error adjustment for sensorless brushless DC motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4651-4660.
- [4] Tsotoulidis S, Safacas A N. Deployment of an adaptable sensorless commutation technique on BLDC motor drives exploiting zero sequence voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 877-886.
- [5] 李凤祥,徐浩,袁野,等. 无刷直流电机无位置传感器转子位置辨识策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 107-112.
Li Fengxiang, Xu Hao, Yuan Ye, *et al.* Rotor position identification strategy for brushless DC motor without position sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 107-112.
- [6] Li W, Fang J, Li H, *et al.* Position sensorless control without phase shifter for high-speed BLDC motors with low inductance and nonideal back EMF[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1354-1366.
- [7] Park J S, Lee K, Lee S G, *et al.* Unbalanced ZCP compensation method for position sensorless BLDC motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3020-3024.
- [8] Yang L, Zhu Z, Shuang B, *et al.* Adaptive threshold correction strategy for sensorless high-speed brushless DC drives considering zero-crossing-point deviation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5246-5257.
- [9] Kim Dong-Youn, Moon Jong-Joo, Kim Jang-Mok, *et al.* Sensorless control method of 3-phase BLDC motor through the real time compensation of back-EMF constant[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), IEEE, 2016: 3361-3367.
- [10] 弓箭,廖力清,叶冰清. 基于高精度电感法的无刷直流电机启动及反电动势同步检测稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 105-112.
Gong Jian, Liao Liqing, Ye Bingqing. Brushless DC motor starting based on high precision inductance method and study on the stability of BEMF synchronous detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 105-112.
- [11] 胡银全,刘和平,伍小兵. 基于磁链函数的BLDC无速度传感器控制策略[J]. 电气传动, 2019, 49(10): 23-29.
Hu Yinquan, Liu Heping, Wu Xiaobing. BLDC speed sensorless control strategy based on flux linkage function[J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 23-29.
- [12] 王晓东,白国长. 无刷直流钻井电机无位置传感器控制方法研究[J]. 机电工程技术, 2018, 47(2): 98-102.
Wang Xiaodong, Bai Guochang. The study of no position sensor control of brushless DC drilling motor[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2018, 47(2): 98-102.
- [13] 陈建龙,汪亮,李孟秋,等. 间接磁链控制BLDCM直接转矩

- 控制系统[J]. 电力电子技术, 2016, 50(1): 66-69.
- Chen Jianlong, Wang Liang, Li Mengqiu, *et al.* Indirect flux linkage control of BLDCM direct torque system[J]. Power Electronics, 2016, 50(1): 66-69.
- [14] Chen S, Zhou X, Bai G, *et al.* Adaptive commutation error compensation strategy based on a flux linkage function for sensorless brushless DC motor drives in a wide speed range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3752-3764.
- [15] 韦鲲, 任军军, 张仲超. 三次谐波检测无刷直流电机转子位置的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 167-171.
- Wei Kun, Ren Junjun, Zhang Zhongchao. Research on the scheme of sensing rotor position of BLDCM based on the third harmonic component[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 167-171.
- [16] 窦满峰, 苏超, 谭博, 等. 优化磁链算法的稀土永磁无刷电机位置检测方法[J]. 微电机, 2017, 50(5): 81-86.
- Dou Manfeng, Su Chao, Tan Bo, *et al.* A position detection method for BLDCM based on optimized algorithm of flux linkage[J]. Micromotors, 2017, 50(5): 81-86.
- [17] 冯培磊, 刘冲, 陈潇雅, 等. 基于续流二极管法的无位置传感器控制系统设计[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(6): 102-107.
- Feng Peilei, Liu Chong, Chen Xiaoya, *et al.* Design of sensorless control system based on freewheeling diode method[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(6): 102-107.
- [18] 王可东. Kalman滤波基础及MATLAB仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019.
- Wang Kedong. Kalman filtering basics and MATLAB simulation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2019.
- [19] 郭子钊, 佃松宜, 向国菲. 基于卡尔曼滤波算法的无刷直流电机直接转矩控制[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(17): 49-55.
- Guo Zizhao, Dian Songyi, Xiang Guofei. Direct torque control of brushless DC motor based on Kalman filter algorithm[J]. Science, Technology and Engineering, 2016, 16(17): 49-55.
- [20] 徐会风, 苏少平, 杜庆诚, 等. 基于扩展卡尔曼滤波观测器的无刷直流电机无位置传感器控制系统研究[J]. 微电机, 2020, 53(5): 31-39, 50.
- Xu Huifeng, Su Shaoping, Du Qingcheng, *et al.* Research on sensorless control system of brushless DC motor based on extended Kalman filter observer[J]. Micromotors, 2020, 53(5): 31-39, 50.
- [21] 詹国兵. 基于衰减记忆卡尔曼滤波的无刷直流电机转子位置估计[J]. 微特电机, 2017, 45(5): 32-35, 39.
- Zhan Guobing. Rotor position estimation of brushless DC motor based on memory attenuated Kalman filter[J]. Small & Special Electrical Machines, 2017, 45(5): 32-35, 39.
- [22] Oh J, Bae H, Jeong H, *et al.* BLDC motor current control using filtered single DC link current based on adaptive extended Kalman filter[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2017: 2213-2218.
- [23] Alex S S, Daniel A E, Jayanand B. Reduced order extended Kalman filter for state estimation of brushless DC motor[C]//2016 Sixth International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED), IEEE, 2016: 239-244.
- [24] 史婷娜, 张倩, 夏长亮, 等. 基于UKF算法的无刷直流电机转子位置和速度的估计[J]. 天津大学学报, 2008(3): 338-343.
- Shi Tingna, Zhang Qian, Xia Changliang, *et al.* Estimates of rotor position and velocity of brushless DC motor with UKF algorithm[J]. Journal of Tianjin University, 2008(3): 338-343.
- [25] Jafarboland M, Silabi M H R. New sensorless commutation method for BLDC motors based on the line-to-line flux linkage theory[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(6): 703-711.
- [26] 王桂荣, 李建勇. 改进UKF算法在PMLSM无位置传感控制中的应用[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(2): 158-160.
- Wang Guirong, Li Jianyong. Application of modified UKF algorithm in PMLSM sensorless control[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(2): 158-160.
- [27] 白国长, 姚记亮. 基于改进滑模观测器的BLDCM无传感器控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(2): 25-31.
- Bai Guochang, Yao Jiliang. Sensorless control of BLDCM based on improved sliding mode observer[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(2): 25-31.
- [28] 史婷娜, 肖竹欣, 肖有文, 等. 基于改进型滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2043-2051.
- Shi Tingna, Xiao Zhuxin, Xiao Youwen, *et al.* A position sensorless control strategy for BLDCM based on an improved sliding mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2043-2051.
- [29] 杨沛豪, 王晓兰, 刘向辰, 等. 基于新型自适应滑模观测器的BLDC控制[J]. 电气传动, 2019, 49(4): 6-10.
- Yang Peihao, Wang Xiaolan, Liu Xiangchen, *et al.* New adaptive sliding mode observer based BLDC control[J]. Electric Drive, 2019, 49(4): 6-10.
- [30] 倪有源, 余长城, 陈浩. 基于端电压平均值和准滑模观测器的无刷直流电机控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 34-41, 50.
- Ni Youyuan, Yu Changcheng, Chen Hao. Control of BLDC motor based on average terminal voltage and quasi sliding mode[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(5): 34-41, 50.
- [31] 周贝贝, 苏少平, 徐会风, 等. 基于幂次趋近律滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制系统研究[J]. 微电机, 2019, 52(5): 27-32.
- Zhou Beibei, Su Shaoping, Xu Huifeng, *et al.* Research on sensorless control system of brushless DC motor based on power reaching law sliding mode observer[J]. Micromotors, 2019, 52(5): 27-32.
- [32] 武紫玉, 王海峰, 顾国彪. 无刷直流电机滑模观测器参数优化设计方法[J]. 电气传动, 2016, 46(6): 7-10.
- Wu Ziyu, Wang Haifeng, Gu Guobiao. Brushless DC motor sliding mode observer parameters design method[J]. Electric Drive, 2016, 46(6): 7-10.
- [33] 张国栋, 祁瑞敏. 无刷直流电机模糊PID控制系统设计与仿

- 真[J]. 煤矿机械, 2018, 39(1): 13-15.
- Zhang Guodong, Qi Ruimin. Design and simulation of fuzzy PID control system for brushless DC motor[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(1): 13-15.
- [34] 赵红, 赵德润, 罗鹏, 等. 无刷直流电机模糊自适应控制系统的研究[J]. 微电机, 2020, 53(1): 72-78.
- Zhao Hong, Zhao Derun, Luo Peng, *et al.* Research on fuzzy adaptive control system of brushless DC motor[J]. Micromotors, 2020, 53(1): 72-78.
- [35] 顾祖成, 耿小江, 王永娟, 等. 模糊自适应PID控制在无刷直流电机调速系统中的应用[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(1): 39-41.
- Gu Zucheng, Geng Xiaojiao, Wang Yongjuan, *et al.* Application of fuzzy adaptive PID control in brushless DC motor speed control system[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(1): 39-41.
- [36] 周晓华, 张银, 王荔芳, 等. 无刷直流电机调速系统模糊神经元PID控制[J]. 现代电子技术, 2017, 40(23): 140-143.
- Zhou Xiaohua, Zhang Yin, Wang Lifang, *et al.* Fuzzy neuron PID control of BLDCM speed regulation system[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(23): 140-143.
- [37] 潘雷, 孙鹤旭, 王贝贝, 等. 基于单神经元自适应PID的无刷直流电机反电势与磁链观测及无位置传感器直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 69-75.
- Pan Lei, Sun Hexu, Wang Beibei, *et al.* Back-EMF and flux observation based on single neuron adaptive PID and sensorless direct torque control for brushless DC motor[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 69-75.
- [38] 张闯, 王勋, 黄亮程. 基于BP神经网络的无刷直流电机控制系统[J]. 机电信息, 2020(32): 25-26.
- Zhang Chuang, Wang Xun, Huang Liangcheng. Brushless DC motor control system based on BP neural network[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(32): 25-26.
- [39] 李强, 李波, 李玉娇, 等. 基于RBF神经网络的直驱式AMT无传感控制技术研究[J]. 微电机, 2020, 53(5): 56-61.
- Li Qiang, Li Bo, Li Yujiao, *et al.* Research on direct-drive type AMT sensorless control technology based on RBF neural network[J]. Micromotors, 2020, 53(5): 56-61.
- [40] 李涛, 邵光保, 孙楚杰, 等. 改进型BP神经网络无刷直流电机速度控制方法[J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(5): 1-5.
- Li Tao, Shao Guangbao, Sun Chujie, *et al.* Speed control method of brushless DC motor based on improved BP neural network[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2019, 34(5): 1-5.
- [41] 王宏志, 王婷婷, 胡黄水, 等. 基于Q学习优化BP神经网络的BLDCM转速PID控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2280-2286.
- Wang Hongzhi, Wang Tingting, Hu Huangshui, *et al.* PID control based on BP neural network optimized by Q-learning for speed control of BLDCM[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2280-2286.
- [42] 唐伎玲, 赵宏伟, 王婷婷, 等. LQR优化的BP神经网络PID控制器设计[J]. 吉林大学学报(理学版), 2020, 58(3): 651-658.
- Tang Jiling, Zhao Hongwei, Wang Tingting, *et al.* Design of BP neural network PID controller optimized by LQR[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2020, 58(3): 651-658.
- [43] 张世维, 林莘, 张大鹏, 等. 基于模糊RBF神经网络PID算法的无刷直流电机控制[J]. 电工技术, 2021(2): 16-18, 52.
- Zhang Shiwei, Lin Xin, Zhang Dapeng, *et al.* Application of fuzzy RBF neural network PID controller in motion control technology of high voltage circuit[J]. Electric Engineering, 2021(2): 16-18, 52.
- [44] 王浩, 白国振, 刘世交. 无刷直流电机RBF神经网络滑模控制器设计[J]. 软件导刊, 2021, 20(3): 176-181.
- Wang Hao, Bai Guozhen, Liu Shijiao. The design of RBF neural network sliding mode controller for brushless DC motor[J]. Software Guide, 2021, 20(3): 176-181.
- [45] Chen X, Li H, Sun M, *et al.* Sensorless commutation error compensation of high speed brushless DC motor based on RBF neural network method[C]//IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2018: 683-688.
- [46] 刘扬, 张振海. 小波神经网络的无刷直流电机转子位置检测方法[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(10): 66-70.
- Liu Yang, Zhang Zhenhai. Rotor position detection method of brushless motor based on wavelet neural network[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(10): 66-70.
- [47] Ganesan R, Suresh S, Sivaraju S S. ANFIS based multi-sector space vector PWM scheme for sensorless BLDC motor drive[J]. Microprocessors and Microsystems, 2020, 76(Jul.): 10309.
- [48] Zhou X, Zhou Y, Peng C, *et al.* Sensorless BLDC motor commutation point detection and phase deviation correction method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5880-5892.
- [49] 王婷婷, 王宏志, 刘清雪, 等. 遗传算法优化的无刷直流电机模糊PID控制器设计[J]. 吉林大学学报(理学版), 2020, 58(6): 1421-1428.
- Wang Tingting, Wang Hongzhi, Liu Qingxue, *et al.* Design of fuzzy PID controller for brushless DC motor optimized by GA[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2020, 58(6): 1421-1428.
- [50] 徐红梅. 蚁群算法的舰船电机智能调速系统参数整定[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(2): 109-111.
- Xu Hongmei. Parameter tuning of ship motor intelligent speed regulation system based on ant colony algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(2): 109-111.
- [51] 远世明, 杨明发. 基于改进型粒子群算法的无刷直流电机速度控制研究[J]. 电气开关, 2021, 59(1): 34-38.
- Yuan Shiming, Yang Mingfa. Research on speed control of brushless DC motor based on improved particle swarm optimization[J]. Electric Switchgear, 2021, 59(1): 34-38.
- [52] 张勇, 程小华. 无位置传感器无刷直流电机起动方法研究[J]. 微电机, 2013, 46(11): 88-91.

(下转第66页)