

# 直流无刷电机无位置传感器控制方法

黄先伟<sup>1</sup> 祝大芬<sup>1</sup> 张矛盾<sup>2</sup> 何薇薇<sup>3</sup>

(1. 广州市百福电气设备有限公司, 广州 510370; 2. 佛山市和融数控软件有限公司, 佛山 528061;

3. 中山火炬职业技术学院, 中山 528437)

**摘要:** 由于换相信号提取的准确性较低, 导致直流无刷电机的换相控制效果较差, 因此提出直流无刷电机无位置传感器控制方法研究。利用电机内绕组、反电势以及转子之间的关系, 建立直流无刷电机模型, 根据反电势变化对换相位置产生的影响, 利用模型计算杂波的作用强度, 提取到准确的换相信号, 根据信号实现换相操作的控制。通过实验对所提方法进行测试, 结果表明, 该方法能够确保换相前后电机内电压和电流的一致性。

**关键词:** 直流无刷电机; 无位置传感器; 换相位置

## Sensorless Control Method of Brushless DC Motor

HUANG Xianwei<sup>1</sup>, ZHU Dafen<sup>1</sup>, ZHANG Maodun<sup>2</sup>, HE Weiwei<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Baifu Electrical Equipment Co., Ltd., Guangzhou 510370; 2. Foshan Herong CNC Software Co., Ltd., Foshan 528061;

3. Zhongshan Torch Vocational and Technical College, Zhongshan 528437)

**Abstract:** The low accuracy of commutation signal extraction, the commutation control effect of Brushless DC motor is poor. Therefore, the sensorless control method of Brushless DC motor is proposed. The model of Brushless DC motor is established by using the relationship between the winding, back EMF and rotor. According to the influence of the change of back EMF on the commutation position, The model is used to calculate the action intensity of clutter, extract the accurate commutation signal, and realize the control of commutation operation according to the signal. The experimental results show that the proposed method can ensure the consistency of voltage and current in the motor before and after commutation.

**Keywords:** brushless DC motor; no position sensor; commutation position

DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2022.0036

## 1 技术背景

随着生产需求的不断增加, 人们对电机的运行效率提出了更高的要求。在此条件下, 直流有刷电机的弊端突出。与传统电机相比, 直流无刷电机能够通过电子开关电路实现电刷的功能, 以此有效实现换相的稳定性, 避免火花问题<sup>[1-3]</sup>。在高密度的能量堆积作用下, 其直流调速范围和启动转矩也明显高于有刷电机, 因此在其使用过程中需要良好的控制方法<sup>[4]</sup>。文献[5]提出一种以幂次趋近律滑模观测器为基础的控制方法, 具有良好的控制效果, 但对硬件的要求较高, 对于小成本企业而言适用性较差。文献[6]将端电压平均值与准滑模观测器的观测结果相结合, 确定了转子位置, 其相位差具有较高的稳定性, 但波形的畸变程度较高。因此, 提高对直流无刷电机无位置传感器控制的研究十分必要。基于此, 本文提出直流无刷电机无位置传感器控制方法。

## 2 建立直流无刷电机模型

与传统的控制方法相比, 无位置传感器控制方法需要以开环控制的方式运行。因此, 为了确保准确判断电机内运行的状态, 本文首先建立了直流无刷电机模型。由于电机内绕组、反电势以及转子的位置以

60°等距存在, 则在电机的一个运转周内, 理想的换相位置也要以均匀分布的形式存在。假设绕组、反电势、转子对应的位置分别为 $x$ 、 $x+60$ 、 $x+120$ , 则换相的理想位置可以表示为:

$$p=x+30n \quad (1)$$

式中:  $p$  表示换相的理想位置;  $n$  表示换相位置的个数。一般情况下, 当  $n > 6$  时, 得到的位置信息与之前的计算结果重叠, 取  $n$  值为 6。

此时, 电机的无位置传感运行是在这 6 个位置上进行的。由于电机反电势信号的传递以电机运转周期为基础, 当转子经过反电势信号位置时, 会根据信号对转速作出调整, 并带动绕组功率产生相应变化, 此时反电势信号的能量值  $E$ 、转子的转速  $\omega$ 、电机的运转周期  $T$  以及绕组的功率  $P$  之间的关系为:

$$\begin{cases} E = \frac{\omega T}{30} \\ P = ET \end{cases} \quad (2)$$

因此, 可以将直流无刷电机的模型表示为:

$$D = \frac{PE}{p} \omega (T - t) \quad (3)$$

式中:  $D$  表示电机的运行状态;  $t$  表示运行时刻。

### 3 直流无刷电机的无位置传感器控制

#### 3.1 提取换相信号

在信号提取过程中,主要的干扰来自电机母线电压中的杂波。因此,本文以单位周期内电机的理想反电势值的变化情况作为依据,判断杂波的作用强度。当反电势的位置为初始位置  $x$  时,能够表征的换相位置是以  $x$  位置为中心的  $x+30^\circ$  以及  $x-30^\circ$ ,它们与 4 个换相位置皆以隐藏状态存在。本文将初始位置  $x$  处的反电势值作为理想反电势,通过其对应的换相位置信息变动情况,间接计算第  $i$  个运转周期内的理想反电势变化并进行测量,得到结果精确度较低。假设  $i$  周期下的换相位置分别为  $p_1, p_2, \dots, p_i$ , 对应位置信息变化分别为  $p-p_1, p-p_2, p-p_i$ , 则初始位置  $x$  的延时相角可以表示为:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n (p - p_i)}{x} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  表示杂波干扰下反电势传递的延时相角。通过直流无刷电机模型对该延时相角对电机状态产生的影响进行计算,可以得到:

$$D' = (360 - \theta) \frac{PE}{p - \sum_{i=1}^n (p - p_i)} \omega(T - t) \quad (5)$$

得到其干扰强度后,提取到电机内实际的换相信号  $f$  为:

$$f = \frac{D'}{D} \quad (6)$$

#### 3.2 换相控制

得到准确的换相信号后,即可根据信号内容实现对电机的换相控制。本文利用转子的运行位置实施无位置传感器控制技术。实施时要先将电机启动,并将提取到的换相信号输入到电机转子的运行控制中心,在信号作用下转子的角速度会呈现出相应的变化。此时,可以根据最终转子的角速度值计算电机内其他部件的参数,其步骤如下:

(1) 将转子的角速度带入到其与反电势的计算关系中,得到新的反电势值,通过计算指出与原反电势的差异;

(2) 利用反电势的变化分析绕组的功率与换相位置功率的比值,并将该比值作为换相操作的调整依据,对理想换相位置信息进行更新;

(3) 更新后的理想换相位置会对转子的运行产生延时影响,此时要将延时均匀分散到各个换相位置,以实现电机换相的有效控制。

### 4 应用测试

为测试本文提出方法的应用效果,对其进行了试验测试,并将文献[5]和文献[6]提出的方法作为对照,通过分析 3 种方法的控制效果,分析本文方法的实际应用价值。

#### 4.1 测试对象介绍

实验应用的无刷直流电机的结构示意图如图 1 所示。该电机运行时直流母线电压的电压值为 220 V,  $D_1 \sim D_6$  均为电机内部逆变器的二极管构造,其主要作用是反并联和为电机运行机组续流,  $L_m$  为电机的驱动用功率控制开关,  $L_n$  为滤波装置驱动用功率控制开关。电机内共包含 8 个电阻,其中,  $R_1$  为均压电阻,  $R_2 \sim R_5$  均为相电阻,  $R_6$  和  $R_7$  均为电机泄放电阻,  $R_8$  为二极管保护电阻。无刷直流电机三相电感和互感稳定不变,电机的三相相反电势随着电机运行功率的增加而增高,换相信号在电机中的传递是按照顺时针的方向进行的。测试时,在该设备的  $R_2 \sim R_7$  位置分别连接 6 个控制器,对电机内电平的高低变化进行检测,并取其均值作为最终分析依据。

#### 4.2 测试方法

通过交替驱动功率控制开关的状态将电机在启动和停止两个状态上切换。为了提高测试结果的可靠性,本文采用两两导通方式在三相绕组间建立关联性。当每相绕组导通状态达到  $120^\circ$  后,再将其调整为关断状态,并持续  $60^\circ$ ,以此循环。分别记录不同控制方法下,母线电压和电流的结果曲线。为了降低电机转速对实验结果的影响,本文以  $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  作为数据采集节点。

#### 4.3 测试结果

测试完成后,对比 3 种方法下母线电压的变化情况,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,3 种方法中,文献[5]和文献[6]的方法控制效果并不理想,电压与换相前相比均出现了一定偏差。本文方法能够实现直流无刷电机的有效控制。另外,对比 3 种方法下母线电流的变化情况,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,电流结果与电压结果存在一定的对应关系,表明 2 组检测数据是可靠的。可以发现,文献[5]和文献[6]方法的控制效果与上文的分析结果一致,本文方法则始终保持较高的稳定性,并且与换相前的电流具有高度的一致性。可见,本文方法具有良好的控制效果。

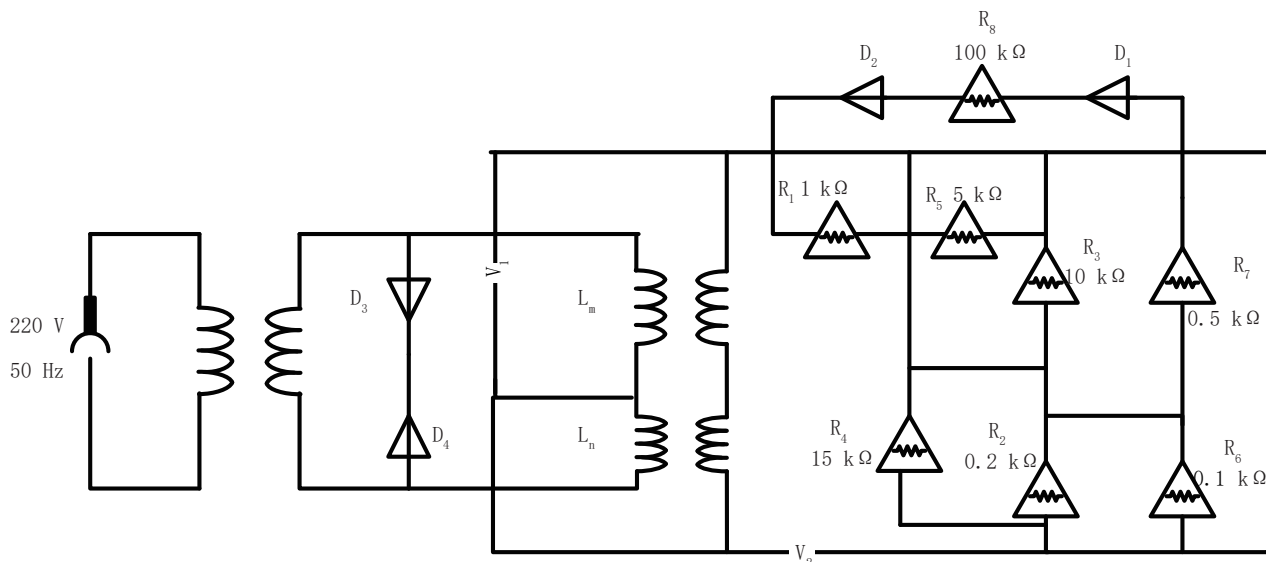


图1 直流无刷电机结构示意图

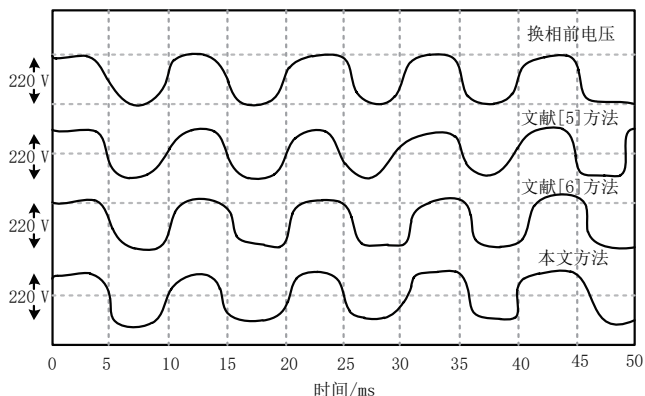


图2 不同控制方法下的母线电压曲线

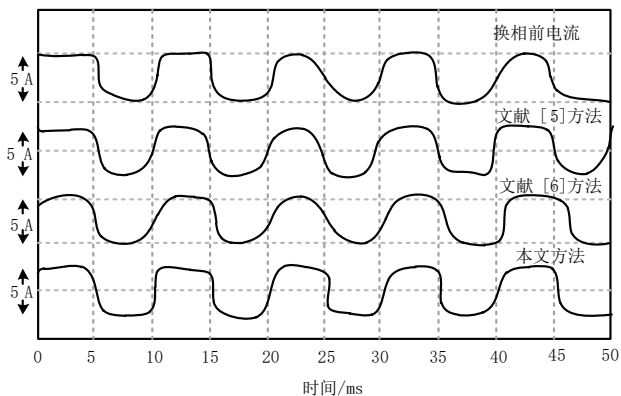


图3 不同控制方法下的母线电流曲线

## 5 结语

直流无刷电机的稳定运行离不开准确有效的控制方法，这不仅是确保换相后转子位置准确的基础，也是保护波形的重要条件。本文提出直流无刷电机无位置传感器控制方法研究，确保了换相前后电机电压和电流的一致性，可为直流无刷电机的运行控制提供有价值的参考。

## 参考文献

- [1] 尹一帆, 王琦. 基于线反电势的无刷直流电机无位置传感器控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2020(11): 151-157.
- [2] 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(5): 31-39.

- [3] 孙希凤, 秦斌, 王欣. 基于SVM的永磁无刷直流电机无位置传感器控制[J]. 电子产品世界, 2020(1): 39-42.
- [4] 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(22): 4651-4660.
- [5] 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(5): 27-32.
- [6] 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(5): 34-41.