

一种关于无刷直流电机的调速控制系统

梁卫凯¹ 褚锦涛¹
LIANG Weikai CHU Jintao

摘要

针对无刷直流电机的控制问题，设计了一种新型电机控制系统。无刷直流电机保留了传统电动机调速好等优点，其中的电子换向器也从根本上解决了机械电刷带来的所有弊病。研究了无刷直流电机的工作原理，同时采用 PWM 控制方式对电机的运转进行控制并精准调节。所设计的系统大大提高了电机运行调节的精准度和可控度，也为之后使用新型 PID 技术控制（比例、积分、微分控制）奠定了基础。

关键词

无刷直流电机；电机控制系统；工作原理；PWM 调速

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.028

0 引言

无刷直流电机主要由三部分组成：一是电动机本体，二是电子换向线路，三是位置传感器。它由电子换向设备来代替传统电刷进行换相操作，其不仅不会对电机本身的运转造成影响，还保留了传统直流电机的调速性能好等特点^[1]。无刷直流电机的铁芯处安装了多组的对称绕组，其中绕组主要分为星形和三角形连接方式，这种常见的定子结构与传统的异步电机以及普通的同步电机的构成是一样的。其中转子的构成材料一般都是永磁材料，作为无刷直流电机的电磁转换以提供保障。下面具体介绍无刷直流电机的内部结构^[2]，如图 1 所示。

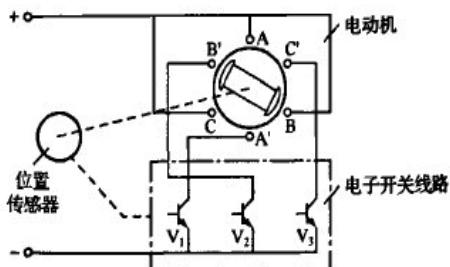


图 1 无刷直流电机结构示意图

通过图 1 可以了解到，图中的无刷直流电机包括三相两极，三相的定子绕组都相对应连接着其电子开关线路，并连接到与其相对应的功率开关元件。可以明显看到，A、B、C 这 3 相定子绕阻分别接应着与其相关的 V1、V2、V3 的功率开关^[3]。另外，位置传感器的转子部分连接着电动机的转子，用来实时监测转子位置，以确保无刷直流电机正常运转。

1 无刷直流电机的工作原理分析

当把定子绕组中的一相通上电流之后，电流和永磁材

料产生的磁场发生电磁效应就会产生转矩，使转子受力进行旋转，位置传感器就能通过感应转子的不同位置来使物理信号转换成电信号，反馈给微处理器进行数据处理，这样就控制了电子换向电路。微处理器经过数据分析后，控制定子的三相绕阻中的每一个绕组都能够以一定的顺序进行触发并导通，同时定子中所流过的电流由于转子的位置发生了变化也要按照一定的规律进行相应换相^[4]。其中，要注意的一点就是转子的转角和整个电子换向电路两者要有共同的换相导通规律，只有两者的步伐一致，才能起到换向作用，并可以给转子提供最大的转矩。

无刷直流电机的工作原理框图如图 2 所示。

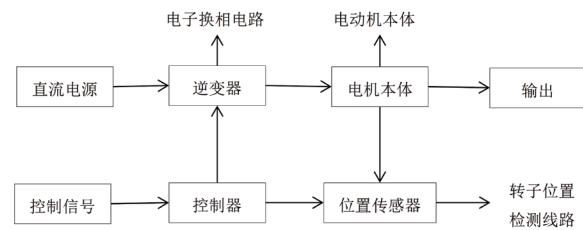


图 2 无刷直流电机工作原理

永磁有刷直流电机和永磁无刷直流电机中的磁钢部分在作用方面是极其相似的，只是安装磁钢的位置不同而已。在永磁有刷直流电机中，永久磁钢安装在电动机的定子部分，而无刷直流电机的绕组是在定子上安装的，永久磁钢则安装在电机的转子部分，但其产生的作用是一样的。

电子换向电路是确保控制无刷直流电机三项绕组中的每一相换向都能够有正确的规律和顺序的唯一途径。电子换相电路主要是由两大部分组成。第一部分是位置传感器电路，第二部分则是功率逻辑开关电路。而对于无刷直流电机来讲，功率逻辑开关是整个控制电路的核心部分^[5]。它的作用是将电源所供给的功率能够合理分配到无刷直流电机定子上的每个绕组中去，但并不是盲目进行分配，要经过微处理器的计

1. 陕西国博汇能电力设计院有限公司 陕西西安 710000

算，按照一定的逻辑进行供给，这样就可以确保无刷直流电机的转子能够获得最大转矩。

2 霍尔传感器

霍尔传感器内部的主要元件和电路包括霍尔元件、稳压电路、信号放大电路、信号滤波电路和比较电路等，霍尔传感器输出的信号统一为数字信号，单片机等微处理器识别时也比较方便，被较多地使用在传感器领域。霍尔传感器有两种不同的工作方式，第一种是开关型工作方式（如图3），第二种是锁存型工作方式。

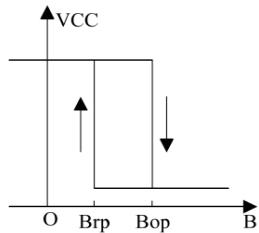


图3 开关型工作方式下的输出特性

由图3可以了解到， B 指的是外部磁场强度，当该强度从负值一直增长到正值，并持续增大到某一特定值如 BOP 值时，霍尔传感器就会从本来的高电平输出突变为低电平输出。如果此时外部磁场强度有降低趋势，即从正值向负值进行变化，并持续减少到某一特定值（小于刚才的 BOP ）时，如 BRP 值，霍尔传感器就会又突变为原来的高电平输出状态。这是霍尔传感器在持续交替变化的转子磁场中特有的输出特性，这种状态下的输出波形占空比往往大于50%^[6]。

另外一种锁存型霍尔传感器的输出特性如图4所示。

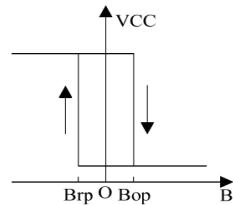


图4 锁存型工作方式下的输出特性

根据图3和图4可以得知，锁存型霍尔传感器比开关型霍尔传感器更适合作为无刷直流电机转子位置检测传感器，其原因是锁存型霍尔传感器的占空比更接近50%，这是本次设计更需要的。本次设计采用的安装方法是将霍尔传感器固定安装在定子上。无刷直流电机采用的是三相无刷电机，因此需要三个霍尔传感器对转子位置进行检测，这三个霍尔传感器在安装的时候一定要各自成120°电角度安装，三个霍尔传感器就会按照转子转动的不同位置向微处理器输出变化信号^[7]。

3 电压的平衡方程

无刷直流电机每相绕组的相电压由两部分组成，第一部

分是绕阻感应电势，第二部分是电阻压降。得到电压的平衡方程式为：

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中： e 为定子绕组的各相反电动势， i 代表定子的各相电流， u 代表定子的各相电压， R 代表定子各相的电阻， L 代表定子各相的自感，其中 L_{ab} 到 L_{cb} 指的是定子两相之间的互感。如果不考虑器件之间的相互影响，以及默认无刷直流电机三相绕阻相对称，这时就可以假设定子两相绕组之间的互感为常量，即所有的自感 $L=L_s$ ，所有的电阻大小为 R ，定子两相绕组之间的互感为 M ，则上式可以改为：

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

4 电磁转矩方程

当绕组在无刷电机启动后转动，经过带有电流的载流导体，在磁场中运动时产生力的作用，这就是电磁转矩的来源。假设一台无刷直流电机的最大电流是 I_p ，所形成的最大电动势是 E_p ，且三相绕阻中同一时间只有两相导通，这时的电磁功率为 $P_m = 2I_pE_p$ 。如果不考虑电机在换相时的损耗，可以得到电磁转矩式：

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_1 / n_p} = \frac{2n_p E_p I_p}{\omega_1} = 2n_p \psi_p I_p \quad (3)$$

式中： ψ_p 为无刷直流电机的磁链峰值。通过公式可以了解到，无刷直流电机的电磁转矩和电流成正比，这个理论与普通电机是相同的。

运动方程为：

$$T_{em} = T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

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

式中： T_{em} 为磁转矩， T_L 为负载转矩。 ω 为转动角速度， B 为摩擦系数， J 为无刷直流电机转子的转动惯量。

5 无刷直流电机的特性分析

5.1 调速特性分析

无刷直流电机的调速特性指的是，在电磁转矩 T_{em} 一定的情况下，直流电机的转动速度与直流端电压 U_d 两者之间的变化关系。假定不考虑元器件之间的损耗，在无刷直流电机工作稳定时：

$$U_d = r_a I + \frac{60}{2\pi} k_e n \quad (6)$$

$$K_T I - T_L = \frac{60}{2\pi} Zn \quad (7)$$

$$n = \frac{60}{2\pi(K_T k_e + r_a Z)} (K_T U_d - r_a T_L) \quad (8)$$

由已知的公式可以得出，在不同转矩的情况下，无刷直流电机的运转速度和直流端电压 U_d 变化曲线如图 5 所示。

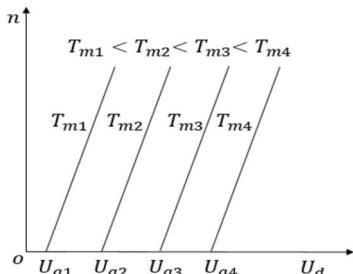


图 5 无刷直流电机调速特性曲线

其中， $T_{em1} < T_{em2} < T_{em3} < T_{em4}$ ，图中 U_a 指电机启动时的临界电压，即电机即将启动但还没有启动时的电压，0 到 U_a 之间没有转速，即为电机的转动死区。当逐渐大于死区时，电机开始转动，并且达到稳定状态。 T_{em} 越大， U_a 越大，由于有摩擦力的存在，使得性能曲线不能通过原点。

5.2 机械特性分析

无刷直流电机的机械特性指在直流电压 U_d 一定的基础上，电机的转动速度 n 与磁转矩 T_{em} 两者之间存在的变化规律。无刷直流电机机械特性方程为：

$$n = \frac{60(K_T U_d - 2RT_{em})}{2\pi k_e K_T} \quad (9)$$

式中： K_T 为电机转矩常量， k_e 为反电势常数。

通过上式可以得到，当具有不同的直流端电压时的机械特性曲线如图 6。

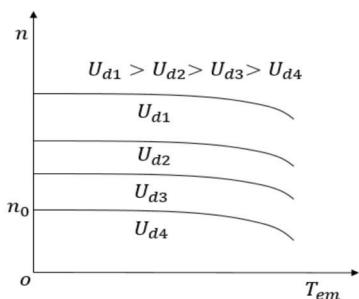


图 6 无刷直流电机的机械特性曲线

其中， $U_{d1} > U_{d2} > U_{d3} > U_{d4}$ 。在上述公式中，简单分析可知，其表示的是直线方程，然而在现实中，机械特性曲线只是被当作直线处理，原因是电机损耗不定，电枢反应也不定。分析图 6 可以知道，当端电压 U 一定时，电磁转矩越大，直流电机的转动速度越小。用于电子换相的机械器件一般特点是非线性的，然而在堵转转矩的附近，管压降得快慢和电枢电流升高是呈正相关关系的。因此，机械特性曲线的末端会有

显著向下弯曲现象。

6 无刷直流电机的控制策略分析

无刷直流电机具有多种运行方式，包括单相、两相和三相，同时每种不同的无刷直流电机类型分别对应各自的驱动方式。人们使用最多的驱动方式分为半桥驱动和全桥驱动两种。其中，全桥驱动又可以分为很多种，主要有星形连接和角形连接。选择适合当前电机的驱动方式，可以极大地节约成本，并且最大程度发挥电机性能。本次设计采用三相全桥二导通星形联接方式。

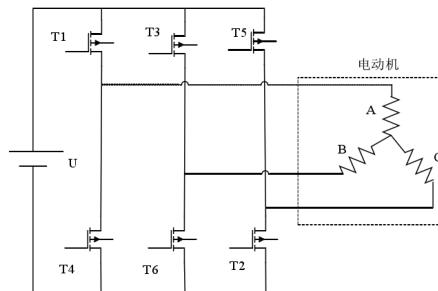


图 7 三相全桥二导通星形联接

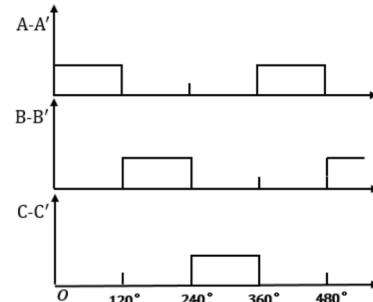


图 8 三相开关管导通顺序情况

由图 7 可知，该种驱动电路主要是指同一时间内只有两个开关管导通，导通顺序为 T1, T2; T2, T3; ……依此类推直到 T6, T1 循环往复。每一个周期都会有六种导通状态，每个开关管导通需要保持 120° 电角度，以此来保持无刷直流电机顺畅运行。其中 T1, T3, T5 为逆变电路的上桥臂，这三个功率开关管的主要作用是给逆变电路输送正向电流，从而可以产生正向的转矩给电机转动提供动力，另一方面 T2, T4, T6 这三个功率开关管为逆变电路的下桥臂，主要作用是给逆变电路输送反向电流，这样就能提供反向转矩来对无刷直流电机进行速度调节。搭建三相逆变全桥电路并配合霍尔传感器检测转子位置，从而控制六个开关管开通顺序，进而控制无刷直流电机运转。

7 脉宽调制技术（PWM）

PWM 是现代电气设备中比较常见的控制技术，比传统的模拟电路控制有更加优越的抗干扰性，同时可以极大程度地缩小设备空间，具有良好的经济实用性。传统的模拟电路始终存在着一些问题，比如，其中的功率管使用一段时间之

后就存在着潜在的损耗，又要人力进行维护和更换，并且随着时间的推移，模拟电路可能会发生漂移现象。因此，本次设计采用了数字电路进行调制，不仅可以改善整个系统的性能，也可以降低系统工程的成本。

7.1 PWM 控制的原理

在驱动电路中，可以通过单片机改变开关时间在一个通断周期内接通的比例，即占空比的大小，就可以改变平均电压，由此改变电动机的转速，如图 9 所示。

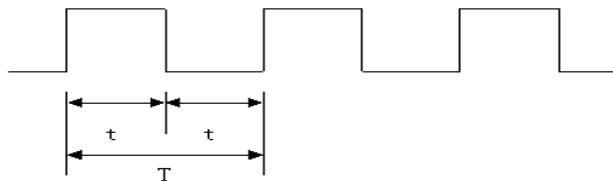


图 9 PWM 占空比原理

$$D = t_1 \div T \quad (10)$$

$$V_a = V_{\max} \times D \quad (11)$$

式中： V_a 指的是无刷直流电机的平均速度； V_{\max} 定义为电机在整个通电过程中能够达到的最大速度； D 指占空比。

因此，改变占空比时，开关管的导通时间就会发生变化，使得电机的运转速度变化，也就实现了调速的目的。另外，在 PWM 调制技术下，占空比是可以进行连续变化的，因此电机的运转速度也可以进行平滑加快或者减慢，加速即将高电平的比例加大，反之缩小^[8]。

7.2 无刷直流电机的调速控制方式

无刷直流电机的速度控制系统可以分为两种，第一种是开环控制，第二种则是闭环控制。开环控制即没有反馈系统，只是由控制部分和受控部分两部分组成，其中控制器和驱动也仅仅是起到信号放大的作用。该控制办法理论较为简单，因此电路的搭建也非常单一，可以直接对输入的电压大小和电机的运转速度进行调控，由于开环控制没有反馈系统，这就造成了许多缺点，最主要的就是速度调节不精确，没有较好的抗干扰能力。开环控制系统框图如图 10 所示。

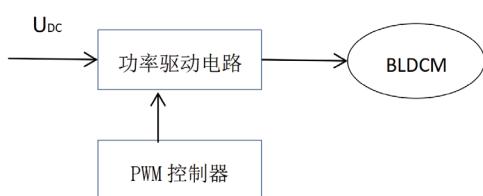


图 10 开环控制系统框图

闭环调速系统是在开环调速系统的基础上加入了反馈系统，反馈系统能够实时检测到系统的输出量，然后反馈给控制器。通过与输入量的比较之后，控制器会根据偏差大小对其进行调控，使得偏差缩小，直至达到预期的效果。这种调控方式比开环控制更加精确，提高了速度调节性能，同时抗干扰能力比较强^[9]。图 11 为闭环调速系统。

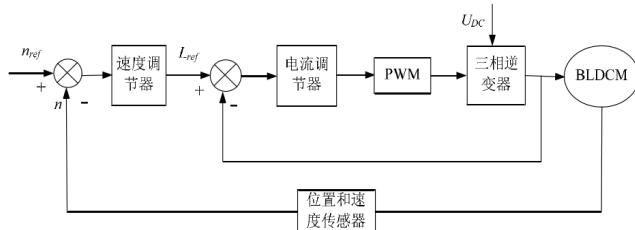


图 11 闭环调速系统框图

其中， n_{ref} 是系统的输入量即给定速度。 n 是系统的反馈量即反馈速度。 I_{ref} 是速度控制器的输出电流。

图 11 是电机调速系统中较为常见的闭环调速系统，其中不仅有电流环，还有位置和速度环，经过两个值的反馈，就会达到电机的速度精准调节。

8 结语

目前无刷直流电机技术和对应的控制系统发展较快，但底层原理并不会因技术的提升而改变。本文主要介绍了无刷直流电机的内部结构细则和工作原理，基于其调速特性和机械特性引申出 PWM 脉宽调制控制技术，从而大大提高了电机运行调节的精准度和可控度，也为其后使用新型 PID 技术控制（比例、积分、微分控制）奠定了基础。

参考文献：

- [1] 陈北辰, 伍思哲, 张海德, 等. 基于鲸鱼算法的无刷直流电机控制系统设计 [J]. 电脑与电信, 2023(10):82-85.
- [2] 王露露. 无刷直流电机驱动烟箱输送机的控制系统设计及应用 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [3] 许晨. 基于霍尔信号的无刷直流电机直接转矩控制系统设计 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2023, 41(4):56-59.
- [4] 鲜大帅. 三相 BLDCM 无位置传感器控制芯片研究与设计 [D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- [5] 郑鹏飞, 侯哲生, 白又丹, 等. 一种直流无刷电机驱动器设计与仿真 [J]. 电子制作, 2023, 31(17):16-18+15.
- [6] 王世铎. 无刷直流电机转矩脉动抑制方法研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [7] 杨宇. 基于单片机的 2 种 PWM 控制算法探析 [J]. 有色金属设计, 2021, 48(3):71-73.
- [8] 张玉霖, 卢涛, 蒋志军, 等. 基于滑模观测器无位置控制的 PWM 整流技术 [J]. 微电机, 2023, 56(11):45-48.
- [9] 唐婷. 基于单片机的直流电机 PWM 控制系统改进 [J]. 技术与市场, 2023, 30(11):77-79.

【作者简介】

梁卫凯 (1997—)，男，陕西渭南人，本科，助理工程师，技术专责，研究方向：新能源储能。

褚锦涛 (1989—)，男，山东潍坊人，本科，助理工程师，技术专责，研究方向：新能源储能。

(收稿日期: 2024-05-16)