

# 稀土永磁无刷电动机的调速机理

□ 郑朝简 陈效民 王直

稀土永磁无刷直流电动机自问世以来, 在世界上得到了迅速的发展, 特别在欧美一些发达国家及日本等国, 无刷永磁电动机的产值每年都以10%~15%的速度增长。

## 1. 永磁无刷直流电动机的特点

### (1) 与永磁有刷电动机的比较

永磁无刷直流电动机与有刷直流电动机都有线性的机械特性和调节特性, 起动转矩大、过载能力强、调节方便、动态特性好、效率高的优点, 但有刷直流电动机存在难以克服的固有弱点。

1) 电刷和换向器的相对滑动、磨损, 造成接触不良和火花, 引起故障, 故可靠性低、寿命短, 需经常维修。

2) 产生电磁干扰。电刷接触面火花具有很强的无线电干扰, 对某些设备运行不利, 甚至可能发生工作不正常。

3) 高速运行受限制。高速运行造成电刷跳动、磨损加快、火花加大。

4) 结构效复杂。转子上有换向器和绕组, 制造工艺复杂。有时定子需加换向极。

5) 散热条件差。转子上有绕组铜损耗, 铁心涡流、磁滞损耗及换器磨擦损耗

等产生的热量, 散热条件差。

而永磁无刷直流电动机用电子换向器替代了电刷和换向器, 在结构上将磁钢放在转子上, 则电机的转子不产生热量, 定子热量可通过机壳直接散热, 从而避免了永磁有刷电动机的所有缺点, 可以实现高性能、高可靠性、长寿命、免维护的目的。

### (2) 与交流异步电动机的比较

交流异步电动机具有结构简单、工作可靠、寿命长、维修保养方便的优点。但与永磁直流电动机比较, 其机械性能差、起动转矩小、过载能力低、调速性差、效率低。

永磁无刷直流电动机的结构与交流异步电动机极其相似, 定子上都来是三相绕组, 鼠笼转子被磁钢转子取代。因此交流异步电动机各种系列产品基本上可在相同结构和安装方式的基础上派生出永磁无刷直流电动机各种系列产品。有利于工业生产的标准化、通用化、系列化。由于采用了高性能稀土永磁材料, 同功率的无刷直流电动机的体积和重量可明显小于交流异步电动机。例如: 室内空调器风扇电动机, 原均采用交流单相异步电动机, 现在开始采用永磁无刷直流电动机, 在相同的额定功率和转速下, 后者的体积是前者的38.6%; 重量为

34.8%; 用铜量为20.9%; 用铁量为36.5%, 效率却提高了10%, 并且调速方便, 适应了空调器的升级换代的需要。

## 2. 基本工作原理和主要特性参数

无刷直流电动机由电机本体和驱动器组成, 是一种典型的机电一体化产品。下面针对几种常见的结构形式介绍其工作原理。

### (1) 基本工作原理

#### 1) 无刷电动机旋转的机理

无刷直流电动机的定子结构和三相交流异步电动机定子一样, 在定子铁心槽内按星形接法布置A、B、C三相绕组。驱动器的输出对绕组按A、B→A、C→B、C→B、A→C、A→C、B→A、B的6拍次序循环通电, 则电动机定子绕组就会产生一个旋转磁场。这个磁场与转子磁钢的相互作用, 就带动转子旋转, 如图1所示。

#### 2) 无刷电动机换向机理

无刷电动机通过位置传感器, 检测到转子磁钢的位置, 给出高电平1或低电平0组成编码信号触发功率管的栅极, 令相应绕组通电, 就完成了电子换向过程。在定子上安装3个位置传感器, 可获得触发编码, 如附表所示。

#### 3) 无刷电动机调速原理

众所周知, 永磁有刷直流电动机通过改变输入端电压的大小, 可以方便地实现无极调速; 永磁无刷直流电动机是借助电子控制技术, 将交流整流后的直流电压(即母线电压 $U_d$ )转换成固定频率的、等幅值的高频脉冲调制

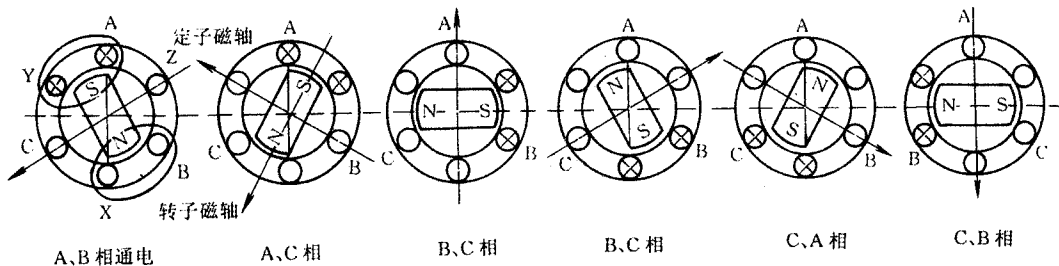


图 1

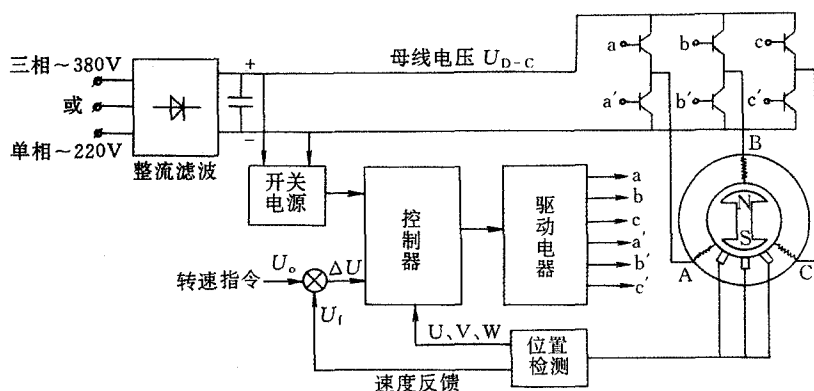


图2 无刷直流电动机原理图

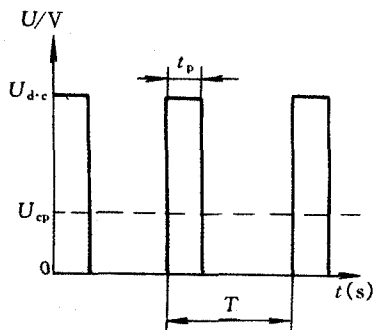


图3 无刷直流电动机电路原理

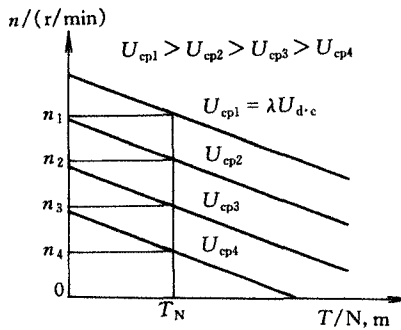


图4 无刷电动机机械特性

波,通过改变脉宽的大小,相应改变了加在电动机输入端的平均电压实现电动机的调速,这就是所谓的脉冲宽度调制技术,简称PWM技术,调制频率一般选4~10kHz。

调制波频率  $f=1/T$

脉冲占空比  $\lambda=t_p/T$

附表						
传感器	U	1	1	1	0	0
输出	V	0	0	1	1	1
状态	W	1	0	0	0	1
通电绕组	AB	AC	BC	BA	CA	CB

改变脉冲占空比就得到平均电压(见图3)

$$U_{cp}=\lambda U_{D-C}$$

直流电动机端电压与转速的关系式

$$U_{D-C}=K_e \omega + I_a R_a$$

用  $U_{cp}$  取代  $U_{D-C}$ , 得到调制波占空比与转速的关系式

$$\lambda U_{D-C}=K_e \omega + I_a R_a$$

$$\text{得 } n=(\lambda U_{D-C}-I_a R_a)/(2\pi/60)K_e$$

式中,  $K_e$  为反电势常数,单位[V/(cr/min)]

72

$I_a$  为电动机绕组平均电流,单位(A);

$R_a$  为电动机两相串联绕组电阻之和。

图2中驱动器电路a、b、c端输出脉冲调制波(见图3)给逆变器上桥臂三管同名的栅极a'、b'、c'端输出高(或低)电平给下桥臂三管同名栅极,控制功率管导通或截止,例如传感器输出“101”编码时b'管导通,a管在栅极调制脉冲波的作用下开通或截止,则电动机绕组A、B被施加一个调制脉冲电压,改变调制波的占空比 $\lambda$ ,就可以实现调速。

#### 4) 无刷电动机稳速机理

运用反馈原理实现电动机的稳速工作。设转速指令为电压  $U_o$  (V), 调速反馈信号电压为  $U_i$  (V)。

则,误差电压  $\Delta U=U_o-U_i$

当  $U_i \ll U_o$  时表示转速低于给定值,  $\Delta U$  大,控制  $\lambda$  增大,即调制波脉宽增大,电动机绕组端平均电压  $U_{cp}$  增大,转速上升,反馈电压  $U_i$  增大,使  $\Delta U$  下降,脉宽减小,转速上升势头减缓;当转速达到给定值后,将维持一个恒定的误差电压  $\Delta U_o$ ,电动机即工作在稳速状态。

#### (2) 主要特性参数

##### 1) 反电势常数 $K_e$

$K_e$  用于衡量电动机以转速  $n$  旋转时,永磁转子对通电两相绕组产生的感应电势大小。数值上以每 r/min 产生感应电压的伏数表示。单位 V/(r/min) 或 V/(弧度/s)。

$K_e$  值与电动机绕组匝数、气隙磁通密度、定子铁心长度及铁心外径尺寸有关,当电动机制造出来后,  $K_e$  值就被确定。

当母线电压  $U_{D-C}$  确定后,例如单相 AC220V, 整流滤波后  $U_{D-C} \approx 310V$ ; 三相 AC380V 得  $U_{D-C} \approx 513V$ , 忽略电动机绕组和线路电阻压降时,最高转速为

$$n_{\max} \approx 9.55/U_{D-C}/K_e (\text{r/min})$$

##### 2) 力矩常数 $K_T$

$K_T$  表示电动机绕组的平均电流  $I_a$  能产生的电磁转矩值  $T_m$

$$K_T=T_m/I_a (\text{N}\cdot\text{m/A})$$

$K_T$  与  $K_e$  相同,也是电动机结构和参数有关的常数。当取  $K_e$  单位为[V/(弧度/s)],  $K_T$  单位为  $(\text{N}\cdot\text{m/A})$  时两者数值上相等。

3) 输出功率  $P_2$  与转速  $n$ , 负载转矩  $T$  的关系

$$P_2=0.1047Tn (\text{W})$$

在负载  $T$  已知情况下, 应按负载转矩运行最高转速  $n_{\max}$  计算输出功率  $P_2$ 。

##### 4) 机械特性

机械特性表示电动机输出转矩与转速关系(如图4示), 特性表示, 当电动机两相绕组端平均电压为  $U_{cp}$  时, 额定负载转矩  $T_N$  下的转速为  $n_1$ 。调速时  $U_{cp}$  减少。表达式:

$$n=(9.55 \lambda U_{D-C}/K_e)-(9.55 R_a/K_e K_T) T$$

根据给定的  $\lambda$ 、 $U_{D-C}$ 、 $K_e$ 、 $K_T$ 、 $R_a$  值, 给出不同  $T$ , 可计算出  $n$  值, 改变占空比  $\lambda$ , 可得出电动机机械特性曲线族。

无刷直流电动机是一种集多种高新技术的机电一体化产品, 目前已从视听设备、信息产业应用逐步扩展到家用电器、工业自动化、商用设备、医疗器械等领域, 21 世纪将是无刷直流电动机应用大发展时期。

(收稿 2002 03 02)

电气时代 2002 年第 8 期