

# 无刷直流电动机系统的电流相位闭环控制

王 强 李建春 陆永平  
(哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

Current Phase Close- loop of Brushless DCMotor (BLDCM) System

W ang Q iang L i J ianchun L u Yongping  
(H arbin Institute of Technology, H arbin 150001)

**【摘 要】** 分析了实现无刷电流电动机磁场定向运行的最佳超前角, 提出了一种带有相位闭环控制的无刷直流电动机系统, 完成了超前角的自动调节, 实现了系统的磁场定向运行。本文给出了该系统的完整描述, 并进行了实验验证。

**【关键词】** 无刷直流电动机 磁场定向控制 电流相位

**【Abstract】** After the analysis of the optimal leading angle for filed- oriented control of BLDCM system, this paper puts forward a new BLDCM system with current phase feedback, the leading angle is auto- tuned in the sys2 tem, and filed- oriented control of BLDCM system is real2 ized The whole system is described in detail in this paper, and experiments have been made to verify the method1

**【Keywords】** BLDCM field- oriented control current phase

## 1 引 言

无刷直流电动机系统, 随着运行转速的提高, 相电流相移增大, 使  $I_d$  成比例地增大, 对系统造成的不利影响体现在以下几方面:

(1) 增大驱动电路容量, 同样的转速、转矩条件下,  $I_d$  的出现使总驱动电流增大, 驱动电压升高, 所需的驱动容量明显大于磁场定向运行方式。

(2) 系统线性变差, 随着  $I_d$  的增大, 交、直轴之间的耦合增强, 使系统呈现出明显的非线性。

(3) 不利于抑制力矩波动, 相电流和相电势存在相位差, 谐波消去法抑制波动力矩的方法应用困难。

消除直轴电流  $I_d$  的方法主要有滞环电流控制

法<sup>[1]</sup>、查表法<sup>[2]</sup>和旋转参考坐标系下的电流控制法<sup>[3]</sup>。这些方法存在着一些不足, 其中, 滞环电流控制法控制精度受功率器件开关频率的限制, 不适合大功率驱动应用场合; 查表法是一种开环调节方法, 效果不够理想; 旋转参考坐标系下的电流控制法不存在上述问题, 但其结构复杂, 实现困难。在一般的 CRPWM 系统中, 采用增大电流调节器的增益  $K_p$  或增大电流反馈系数  $K_f$  的方法, 增大等效电阻, 以达到抑制  $I_d$  的目的,  $K_p$  和  $K_f$  的增大分别受系统分辨率和驱动功率的限制, 因此, 这种方法的作用是有限的。根据这种情况, 本文提出了一种用相位闭环控制方式实现无刷直流电动机磁场定向控制的新方法。

## 2 磁场定向运行的最佳超前角

CRPWM 无刷直流电动机系统三相电流指令与三相反电势同相位。X<sub>r</sub> 较低时, 相电流滞后相电流指令较小, 直轴电流  $I_d \approx 0$ 。随着 X<sub>r</sub> 的升高, 绕组电感的阻抗增大, 相电流将滞后于相电流指令, 产生直轴电流  $I_d$ 。图 1 是 CRPWM 无刷直流电动机系统的一相矢量图, 相电流滞后相电流指令的角度

$$\omega = \arctg\left(\frac{pX_r L}{r + K_p K_s K_f}\right) \quad (1)$$

其中:  $p$ —电机的极对数;

$X_r$ —系统的角速度;

$L$ —相电感,  $L$  包括了互感的影响;

$r$ —相电阻;

$K_p$ —电流调节器的增益;

$K_s$ —SPWM 逆变电路的等效增益;

$K_f$ —电流反馈系数。

交轴、直轴电流比:

本文 1996 年 6 月 10 日收到

式中:  $I_q$ 、 $I_d$ —交、直轴电流。

由式(2)可见, 直轴电流随  $x_f$  呈线性关系增长,  $\frac{L}{r + K_p K_s K_f}$  越大, 即系统的电气时间常数越大, 随  $x_f$  升高,  $I_d$  增大越快。

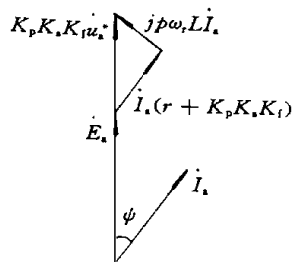
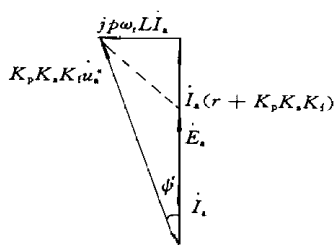


图 1 CRPWM 无刷直流电动机系统的一相矢量图

图 2  $I_d = 0$  时的系统一相的相量图

无刷直流电动机系统磁场定向控制就是保持定子磁势正交,也就是保持  $I_d=0$ 。不同的转速和负载条件下,实现磁场定向控制的最佳超前角可由图 2 获得。图 2 为对应特定的  $X_s$  和  $I_q$ (负载),  $I_d=0$  时,系统的一相相量图。由图可见,要使  $I_d=0$ ,相电流指令应超前相电势  $w$ ,  $w$  即实现磁场定向控制的超前角。

$$W = \arctg \left[ \frac{L}{\frac{r + K_p K_s K_f}{p X_r} + \frac{K_e}{I_q}} \right] \quad (3)$$

由式(3)可见,  $w$ 是  $x$  和  $I_q$  的函数,也就是负载转矩和转速的函数,  $w$ 与电机的工作点有关,若采用查表法调节超前角来实现磁场定向控制,则需存贮一张二维的最佳超前角表,由于  $x$  和  $I_q$  互相影响,查表操作比较烦琐,调节时间较长,这是高精度伺服驱动系统所不希望的。

本文采用相位闭环调节方法, 直接以相差  $w$  作为反馈量, 用反馈控制方法调节系统相电流指令的超前角, 使其达到最佳值  $w$ , 实现磁场定向控制, 构成了一种 CRPWM + 相位闭环控制的无刷直流电动机系统。该系统具有调节时间短、适应性强、简单可靠、易于实现的优点。由于采用积分调节规律, 稳态  $I_d = 0$ , 实现了磁场定向控制。

相位闭环控制是利用旋变输出包络与相反电势同相位这一特点实现的。通过检测相电流与旋变包络的相差得到电流滞后角  $W$  将  $W$  转化为电平信号进行积分调节, 控制 RDC 数字转角输出, 使三相电流指令超前或滞后于相反电势, 调节超前角, 构成了一个超前角自动调节的相位闭环系统, 最终使  $I_d = 0$ , 实现磁场定向运行。

系统原理图如图 3 所示。该系统由轴角转换、相电流指令合成、逆变驱动和相位调节四大功能电路组成。与永磁电机具有相同极对数的多极两相旋转变压器和 RDC 构成了轴角数字转换电路, 解算出 14 位数字角度信号  $U$  数字转角信号  $U$  和电流给定信号  $V_m$  通过三相电流指令合成电路形成三相电流指令信号:

$$\left. \begin{aligned} u_a^3 &= V_{in} \sin U \\ u_b^3 &= V_{in} \left[ \sin U \mp \sin \left( U \mp \frac{2}{3} P \right) \right] \\ u_c^3 &= V_{in} \sin \left( U \mp \frac{2}{3} P \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

逆变驱动电路采用 CRPWM 逆变驱动方式, 通过电流反馈的作用, 控制三相绕组电流, 使之跟随电流指令变化。

相位调节电路检测相电流和电势的相位差, 将其转换成电平信号, 完成积分调节, 控制 RDC 和偏置电平, 进而控制 RDC 的数字转角输出的偏置, 调整超前角, 实现相位闭环控制。

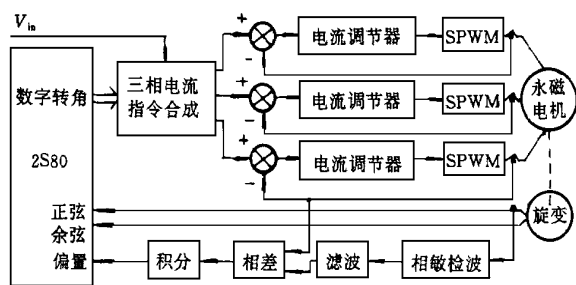


图3 CRPWM+相位闭环控制无刷直流电动机系统原理图

相位调节电路原理框图如图 4 所示。

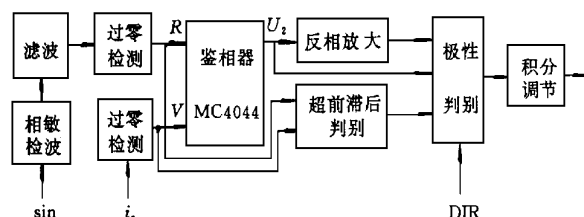


图 4 相位调节电路原理框图

由于旋变输出电势的包络与C相反电势同相位,因此对旋变的相应输出进行相敏检波、低通滤波后,即得到了包含电势相位信息的信号,该信号和电流信号经过零比较电路比较后,送入鉴相器,鉴相器的输出代表电流超前、滞后电势的角度。

鉴相器采用M o t o r o l a 公司生产的专用芯片M C 4044 鉴频、鉴相器,M C 4044 内含两个鉴相器,用其中的一个鉴相器即可检测出电流与电势间的相位差。鉴相器输出 $U_2$ 的低电平宽度代表了电流与电势间的相位差,将该信号反相,再由运放进行反相放大,将相差信号转换成一系列正负脉冲,对积分调节器积分,其输出作为2S80的偏置调节信号,用以调节RDC 数字输出转角的相位,构成了相位反馈调节系统,实现了磁场定向控制。

为保证相位闭环调节系统稳定运行,积分调节器必须有两个方向的调节能力,即电流超前于电势时,积分调节器输出减小,减小超前角;电流滞后于电势时,调节器输出增大,增大超前角(对于正转情况),因此必须判定电流和反电势相位的超前滞后关系。超前滞后判别由D 触发器构成,C 相电流和旋变包络的过零信号分别加于D 触发器的“D ”和“时钟”输入端,触发器输出的逻辑电平代表了电流和电势的超前滞后关系。

由上述的调节原理可知,实现磁场定向运行的偏置电平的极性与电机转向和电流与电势相差的极性有关,因此需要综合电机转向和电流与电势的超前、滞后关系,选择代表相差的积分脉冲的极性。这一工作由模拟开关CD 4052 构成的极性辨识电路来实现,它完成下表所示的操作。

积分电压极性关系表		
方 向	相 位	积 分 极 性
正转	滞后	正
正转	超前	负
反转	滞后	负
反转	超前	正

相位闭环控制由于引入积分调节规律,所以稳态时,电流与旋变位置信号间没有相差,也就是电流与电势无相差, $I_d=0$ ,实现了磁场定向控制。图5是相位闭环前后,电流和旋变包络信号的波形图。

动态调节过程中,由于电流滞后电势的角度 $\theta$ 是 $\omega$ 的函数,而系统机电时间常数一般较长,远大于相位积分调节器的时间常数,所以在速度暂态过程中,也能保证电流与电势同相位,即 $I_d=0$ ,保证磁场定向运行(见图6)。

本文积分调节器参考信号设为零,实现了磁场

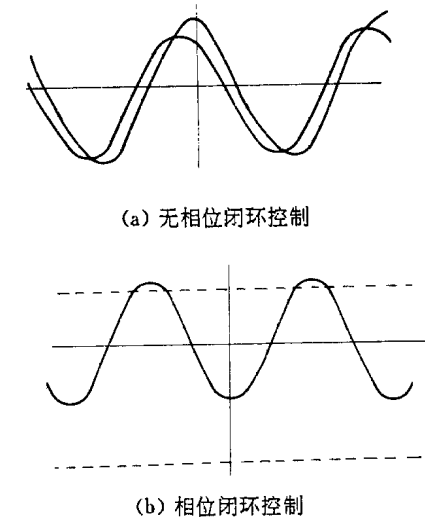


图5 相电流与旋变输出包络的波形图

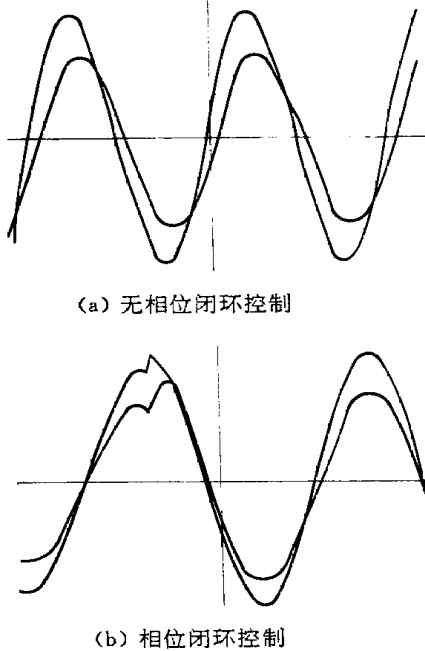


图6 速度暂态过程中相电流与旋变输出包络的波形图  
定向控制,应用本文的方法,通过参考信号的设定,可以准确地控制无刷直流电动机的内功率因数角,进而实现弱磁、增磁运行,拓展系统的运行范围。

图7为CRPWM 系统和CRPWM + 相位闭环

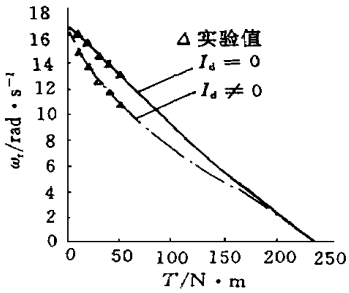


图7 两种无刷直流电动机系统机械特性

(下转第33页)

$$SW = \frac{ST}{tn} \tag{5}$$

式中:  $tn$ —走一步所需的时间。

根据以上的计算可得整步和半步加速延时数据,如下表所示。

整步(半步)加速延时数据表					
项目 序号	频率 $f$ (步/秒)	步进延时 时间 $tn$ (ms)	20 步/秒对应 的时间间隔 $ST$ (ms)	计数值 (十六进制)	步长 $SW$
1	$f_0$	$tn_1$	$ST_1$	$N_1$	$SW_1$
2	$f_1$	$tn_2$	$ST_2$	$N_2$	$SW_2$
3	$f_2$	$tn_3$	$ST_3$	$N_3$	$SW_3$
	...	...	...	...	...

将每个频率数据存于内存的某一数据区,而将各个频率下对应的步进延时数据  $SW$  存在内存的另一数据区,这样便可在升频过程中用查表方法实现升频控制,相应的程序框图如图 5 所示。

#### 4 系统联试

采用二台四相 1.8 步距角的混合式步进电动机进行试验,用上述设计的软硬件系统控制步进电动机运行:整步加速时可达 906 步/秒的运行频率;半步加速可达 1076 步/秒的运行频率。如果不采用优化的加速规律,而改用线性加速时,整步/半步最高速可达 850/6953 步/秒的运行频率。试验结果表明,该系统可以灵活方便地实现两台步进电动机的快速起动并稳定地运行在不同的转速。

(上接第 30 页)

无刷直流电动机系统的机械特性。

由图 7 可见,CRPWM + 相位闭环控制无刷直流电动机系统较 CRPWM 无刷直流电动机系统具有两个明显的优点:

- (a) 同样的外加电压 ( $V_m$  相同) 条件下,前者由于实现了磁场定向控制,因此输出功率较大,也就是输出同样的机械功率,系统驱动容量较小。
- (b) 磁场定向运行,系统特性的线性好。

#### 4 结 论

无刷直流电动机磁场定向运行的最佳超前角是转速和转矩的二元函数,查表法应用困难。

用相位闭环控制方式实现无刷直流电动机磁场定向运行的方法,实现了超前角自动调节,消除了直轴电流  $I_d$ ,提高了系统的输出功率和特性的

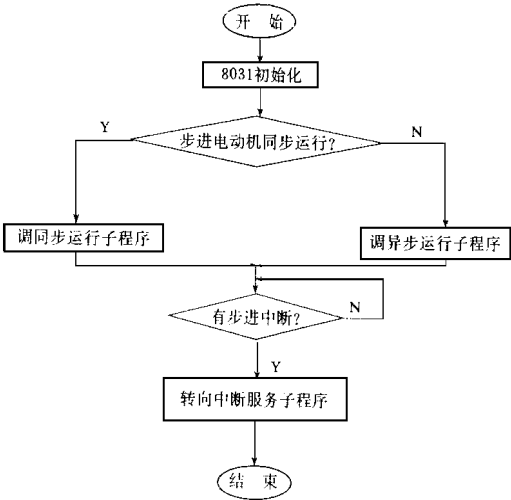


图 5 二台步进电动机运行主程序框图

#### 5 结 论

研究和试验表明,本文提出的一种利用单片机控制二台步进电动机运行的方法可以灵活方便地实现优化的加速规律,并控制二台步进电机以不同的转速稳定运行。

#### 参 考 文 献

- 1 何立民 MCS-51 单片机系统配置与应用 北京:北京航空航天大学出版社,1991 年
- 2 王鸿钰 步进电动机控制技术入门 上海:同济大学出版社,1990 年

线性度。

本文介绍的方法结构简单、易于实现。

#### 参 考 文 献

- 1 Pfaff G and Weschta A. Design and Experimental Results of A Brushless AC Servo Drive IAS Annual Meeting, IEEE, New York, 1982
- 2 Morimoto S and Yoji Takeda Current Phase Control Methods for PM SM. IEEE Trans On Power Electronics, 1990, PE-5 (2).
- 3 Rekiou T and Meiboth F. A New Approach for The Field-oriented Control of Brushless Synchronous Permanent Magnet Machines PESC, IEEE, New York, 1991.
- 4 王强,陆永平,李建春. 正弦波无刷直流电动机系统电磁转矩公式 微特电机, 1995, (5).
- 5 王强 大力矩低脉动无刷直流电动机系统及其特殊问题的研究 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1996