

# 无传感器无刷直流电机系统中的滤波器设计

程相权,王远钢,祁宏,郭治

(南京理工大学,江苏 南京 210094)

**摘 要:**对无传感器无刷直流电机的驱动系统进行了研究,详细论述了开关电容低通滤波器的设计方法,给出了电动自行车电机驱动的部分电路和信号波形。

**关键词:**无刷直流电机;位置传感器;开关电容;低通滤波器

**中图分类号:**TM345;TM301.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-6848(2001)01-0021-03

## Filter Design for Sensorless and Brushless DC Motor Driving System

CHENG Xiang-quan, WANG Yuan-gang, QI Hong, GUO Zhi

(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In this paper a driving system with sensorless and brushless DC motor is studied, the lowpass design method for switching capacitor is discussed in detail. And some circuit diagrams and signal waves for the motor driving system of motor-bicycle are given.

**Key words:** brushless DC motor; position sensor; switching capacitor; lowpass filter

## 1 引 言

无刷直流电机通常由逆变器、永磁同步电机本体、位置传感器及控制器组成。工作时,控制器根据传感器测得的电机转子位置有序地触发逆变器的各个功率器件,以实现换流。通常无刷电机采用 $120^\circ$ 型三相逆变器驱动。永磁体粘贴在转子表面时,可以不计凸极效应。在适当的控制条件下,无刷电机转矩脉动小,出力大,控制简单,具有普通直流电机良好的调速特性,又无需机械式换向结构,因此得到广泛应用。但是,传统的无刷电机都需要一套复杂的位置传感器,这对电机的可靠性、制造工艺要求等带来不利的影响,例如,①为安置传感器而增大电机尺寸。②传感器信号传输线太多,且易引入干扰。③高温、低温、污浊空气等恶劣的工作条件会降低传感器的可靠性。④传感器的安装精度和灵敏度直接影响电机运行性能。可见,省去无刷电机的传感器能进一步扩展其应用领域与生产规模,具有很大的实际意义,因此,国内学者对此做了大量的研究<sup>[1-7]</sup>。由于电机端电压包含反电势和高频斩波信号,所以,本文所阐述的方法,是利用开关电容滤波器对端电压滤波,用提取的反电势经过电压比较器及编码器后得到的逆变器触发信号控制逆变器。

当端电压经过低通滤波器后,必然带来相位滞

后,而滞后的角度因转速的不同而不同,必须对滞后的相位进行补偿之后才能得到正确的逆变器触发信号,这给软件或硬件的实现带来一定的难度。本文研究一种固定相位滞后的低通滤波器,使电机转速在一定范围内,相位滞后 $90^\circ$ (电角度)不变,得到的相位信号在无需使用相位补偿的情况下经过逻辑器件变换成逆变器触发信号的驱动系统,并成功地运用到电动自行车上,得到了满意的结果。

## 2 驱动系统的基本构成及原理

驱动系统包括滤波器、比较器、开关逻辑、逆变器、倍频器、窄脉冲生成电路、单片机等部分组成,框图如图1所示。

### 2.1 电机结构与触发原理

图2是本文所研究的无刷直流电机的主回路。逆变器由自关断功率器件G1~G6和续流二极管D1~D6构成。电枢绕组Y型连接,当电机不接通电源,并用外力使转子旋转时,其绕组出线端反电势波形如图3所示。合理控制逆变器的触发时序,使得相电流和图3所示的反电势的相位一致,则电机电磁转矩无脉动,且特性与普通直流电机类似。逆变器各个功率器件的触发时序如图4所示。而该电机在通电运行时的端电压是由图3所示的反电势和高频斩波信号叠加而成,因此,需对端电压进行深度低通滤波,而滤波后的反电势波形存在相位滞后,如图5所示。

收稿日期:2000-10-18

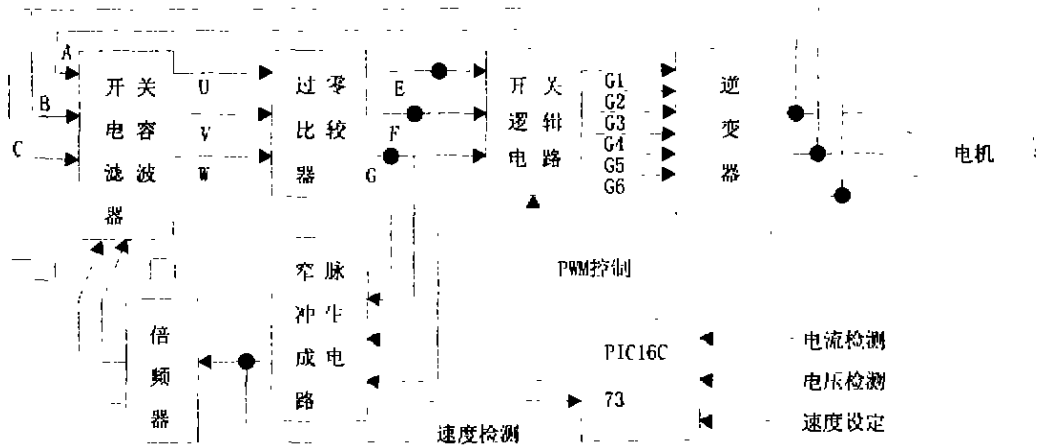


图1 驱动系统原理框图

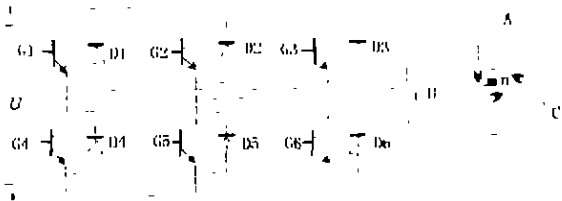


图2 逆变器与电机回路

$$\begin{cases} H(j\omega) = \frac{k/R_1 R_2 C_1 C_2}{1/R_1 R_2 C_1 C_2 - \omega^2 + j\omega[1/R_1 C_1 + 1/R_2 C_1 + (1-k)/R_2 C_2]} \\ k = 1 + R_4/R_3 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,若反电势角频率 $\omega$ 满足:

$$\omega = \sqrt{1/R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3)$$

则反电势相位滞后 $\pi/2$ 弧度,波形如图5所示。

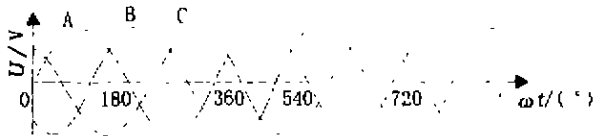


图3 反电势波形(无高频斩波信号迭加)

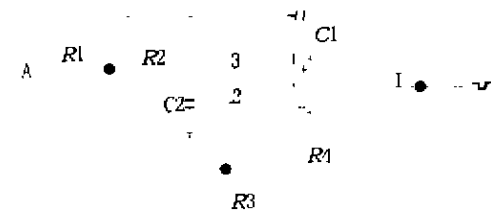


图6 低通滤波器

在具体系统中,取 $R_1=R_2=R, C_1=C_2=C, k=1.5$ ,式(3)可写为:

$$\omega = 1/RC \quad (4)$$

为保证电机在一定工作频率范围内式(4)恒成立,电阻 $R$ 应与 $\omega$ 成反比关系。在本文所论述的系统中,电阻 $R$ 用开关电容等效,它受开关频率 $f_R$ 控制,如图7所示。

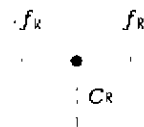


图7 开关电容

令反电势波形 $\omega=2\pi f$ ,当 $f_k$ 远远大于 $f$ 时,开关电容等效电阻为:

$$R = 1/f_R C_R \quad (5)$$

利用倍频器可得: $f_R = 6\lambda f$ , $\lambda$ 为倍频器固定放大倍数。当满足 $2\pi C = 6\lambda C_R$ 的约束条件时,式(4)恒

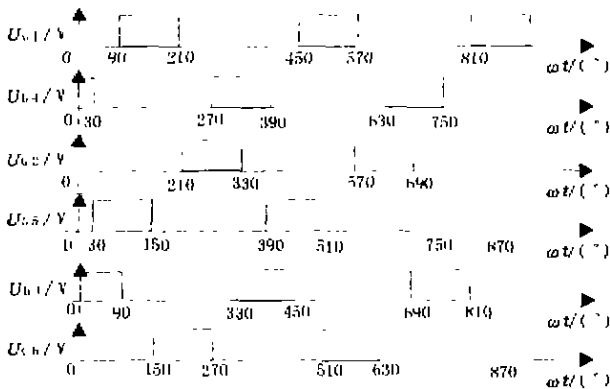


图4 触发逻辑波形

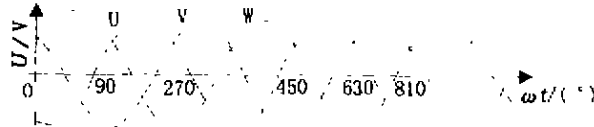


图5 滤波电势波形

## 2.2 开关电容滤波器及开关信号的设计

图6所示的低通滤波器的传递函数为:

$$\begin{cases} H(s) = \frac{k/R_1 R_2 C_1 C_2}{s^2 + [1/R_1 C_1 + 1/R_2 C_1 + (1-k)/R_2 C_2]s + 1/R_1 R_2 C_1 C_2} \\ k = 1 + R_4/R_3 \end{cases} \quad (1)$$

令 $s=j\omega$ ,代入式(1)得:

成立。

为了得到倍频器的输入频率信号,必须将图 5 所示反电势波形经过图 8 所示的比较器,得到如图 9 所示的波形,再经过图 10 所示的等脉宽窄脉冲生成电路得到频率为  $6f$  的窄脉冲信号。由于倍频器的末端电路含有 D 触发器,于是,倍频器输出所需要的频率为  $f_R$  相位相反的两列方波信号。

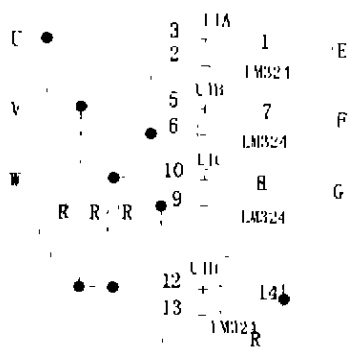


图 8 过零比较器

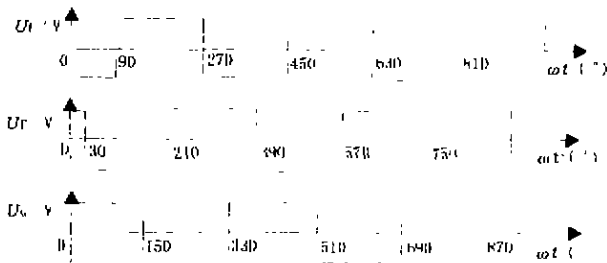


图 9 过零比较器波形

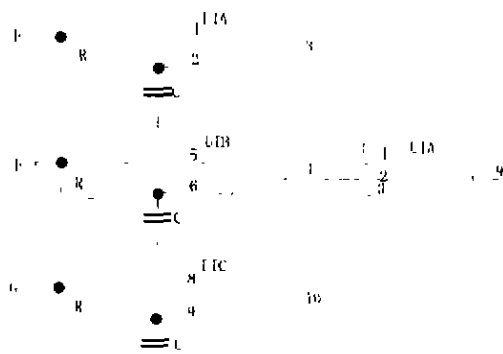


图 10 窄脉冲生成电路

### 2.3 系统驱动简述

当电机转速很低或起动时,反电势很小,不能作为换向信号,因此,在负载不大时,电机起动采用升

频升压同步起动方式<sup>[6-7]</sup>。

当反电势频率  $f < f_{min}$  时,倍频器输出频率为  $f_R = 6\lambda f_{min}$ ,以保证开关电容滤波器工作正常。电机转速增加,反电势频率  $f \geq f_{min}$  时,按照上述原理得到如图 9 所示的反电势过零比较信号波形,通过开关逻辑电路得到图 4 所示逆变器的触发信号驱动电机。

系统中的单片机,用于完成起动与运行切换、欠压保护、过流保护、PWM 调节、速度设定等功能。

### 3 结论

将本文所论述的驱动系统用于电动自行车上的无刷直流电机的驱动,当车速超过 4.5km/h 时,系统工作正常,噪声大为降低。原先的电机因霍尔元件的安装精度和对磁场的灵敏度的原因,使电机在运行过程中产生阻转矩,使得电机的噪声和损耗均较大。因此,在相同的条件下,电动自行车续航里程增加了 2.1km。

若将图 1 中的开关电容滤波器、过零比较器、窄脉冲生成电路、倍频器集成到一个芯片上,那么在没有传感器无刷直流电机的驱动系统中将会有很大的利用价值。

### 参考文献:

- [1] 郝晓辉. 无传感器无刷直流电机的自适应闭环调速系统[J]. 微电机, 1996, (3).
- [2] 黄声华. 空调压缩机的变速控制[J]. 压缩机技术, 1997, (6).
- [3] 郝晓辉. 无位置检测器无刷直流电机自寻最佳点切换法[J]. 微电机, 1998, (1).
- [4] 李天洋. 无位置传感器无刷直流电机起动过程研究[J]. 电力电子技术, 1998, (2).
- [5] 高金行. 反电势换向无刷直流电动机驱动线路的探讨[J]. 中小型电机, 1998, (2).
- [6] 吕晓春. 方波无刷直流电动机无传感器控制与弱磁控制[J]. 微电机, 1997, (4).
- [7] 沈建新. 无传感器无刷直流电机三段式起动技术的深入分析[J]. 微特电机, 1998, (5).

作者简介:程相权(1973—),男,博士生,从事电机控制的研究。

欢迎订阅《微电机》

报刊代号:52-92