

# 无刷伺服直流电动机的电流换向函数

李晓明 于晓玲 杜坤梅

(哈尔滨电工学院)

## 摘 要

本文首先引入脉冲电流换向函数和正弦波电流换向函数的概念,对“方波运行原理”和“正弦波运行原理”的无刷直流电动机的力矩波动进行了分析。文中给出选择电流换向函数的一般准则,并介绍其实现的基本途径。

关键词: 电动机, 换向函数

## 1 引 言

无刷伺服直流电动机按其应用可分两类:一种是方波无刷直流电动机,它的气隙磁场是按准方波设计的;另一种是正弦波无刷直流电动机,它的气隙磁场是按准正弦波设计的。对无刷伺服直流电动机来说,不同的电流换向函数将直接影响其电动机的出力 and 力矩平稳性能指标。对无刷伺服直流电动机换向函数的分析和研究,既是无刷直流电动机工作在最佳状态的基础,也是对无刷直流电动机运行机理的本质认识。

## 2 电流换向函数

设无刷直流电动机有  $m$  相对称分布绕组,其永磁转子具有  $P$  对永磁体磁极。当电动机永磁转子以角速度  $\omega = P\Omega$  转动时,电动机定子的第  $k$  个相绕组中的感应电势(仅考虑切割电势,是时间周期函数,可表示为

$$e_k = e[\omega t + \varphi(k-1)] \quad k=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中,  $\varphi$  为相邻相绕组轴线间夹角(电角度)。 $\varphi$  的大小取决于相绕组的分布,  $m$  个相绕组在空间的分布,一般可取两种对称形式。即按  $2\pi$  对称分布的,  $\varphi = 2\pi/m$ ; 按  $\pi$  对称分布时  $\varphi = \pi/m$ , 可统一表示为  $\varphi = 2\pi/A m$ ,  $A$  表示绕组允许通电的方向,对单极性控制  $A=1$ , 对双极性控制  $A=2$ 。图1是几种最常见的绕组类型。

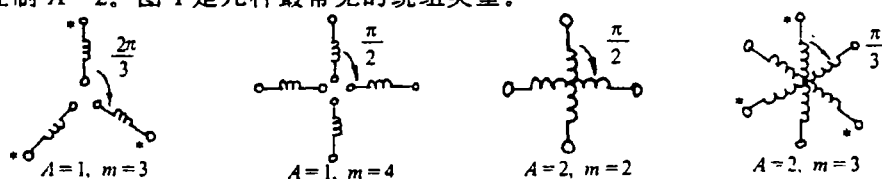


图1 绕组类型

本文于1995年9月14日收到。

根据机电能量转换原理,若要实现电动机运行,应满足输入的电磁功率大于零,即

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{k=1}^m i_k e_k d\omega t > 0 \quad (2)$$

式中,  $i_k$  为第  $K$  个相绕组的电流。

由于  $e_k$  是周期函数,故  $i_k$  应具有与  $e_k$  相同的周期(或频率)才能使式(2)持久地大于零。通过一些熟知的简单变换可以得到如下电磁转矩表达式

$$T_m = P_m / \Omega = \frac{1}{2\pi\Omega} \int_0^{2\pi} \sum_{k=1}^m K_k i_k \cdot B_k [\omega t + \varphi(k-1)] d\omega t \quad (3)$$

式中,  $K_k$  为电机常数 ( $K_k = RWL$ , 与转子半径  $R$ 、每相匝数  $W$  和导线有效长度  $L$  有关),  $B_k$  为等效第  $K$  相绕组的切割电势。

考虑到满足式(2),相电流  $i_k$  应具有与  $B_k$  相同的周期,记为

$$i_k = K_k(\theta) \cdot I_m \quad (4)$$

式中,  $K_k(\theta)$  称为电流换向函数,  $I_m$  为电流之峰值。此时式(3)可进一步写成

$$T_m = \frac{1}{2\pi\Omega} \int_0^{2\pi} K_k I_m \sum_{k=1}^m K_k(\theta) \cdot B_k [\theta + \varphi(K-1)] d\theta \quad (5)$$

显然,使瞬时力矩波动最小化的一般准则是,设法使电流换向函数  $K(\theta)$  与气隙磁密  $B(\theta)$  之乘积与时间无关。

### 3 基于“方波原理”的脉冲电流换向函数

基于“方波原理”,要求  $B(\theta)$  具有  $\varphi = \frac{2\pi}{Am}$  的平顶区,同时要求电流换向函数恰好能够控制第  $K$  个绕组在  $B_k(\theta)$  平顶区给于通电;在此理想情况下,电机将不产生原理性力矩波动。按此原则不难求出电流换向函数。

对于绕组为  $\varphi = \frac{2\pi}{Am}$  分布的电动机系统 ( $A=1$ ) 脉冲电流换向函数为

$$K = \begin{cases} 1 & \theta_c < \theta < \theta_c + \theta_{om} \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (6)$$

$$K_k = K[\theta \pm \varphi(K-1)]$$

式中,控制角  $\theta_c = (\pi - \theta_{om})/2$ ; 导通角  $\theta_{om} = N \frac{2\pi}{Am} \leq \pi$  ( $N$  是同时导通的相数,  $N=1, 2, \dots, m-1$ )。

对于绕组为  $\varphi = \pi/m$  分布的电动机系统 ( $A=2$ ), 脉冲电流换向函数为

$$K(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta_c < \theta < \theta_c + \theta_{om} \\ -1 & (\pi + \theta_c) < \theta < (\pi + \theta_c + \theta_{om}) \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (7)$$

$$K_k(\theta) = K(\theta \pm \varphi(K-1))$$

式中,  $\theta_{om} = N \frac{2\pi}{Am} \leq \pi$ ,  $\theta_c = (\pi - \theta_{om})/2$ 。

几种典型的换向函数示于图 2 中。

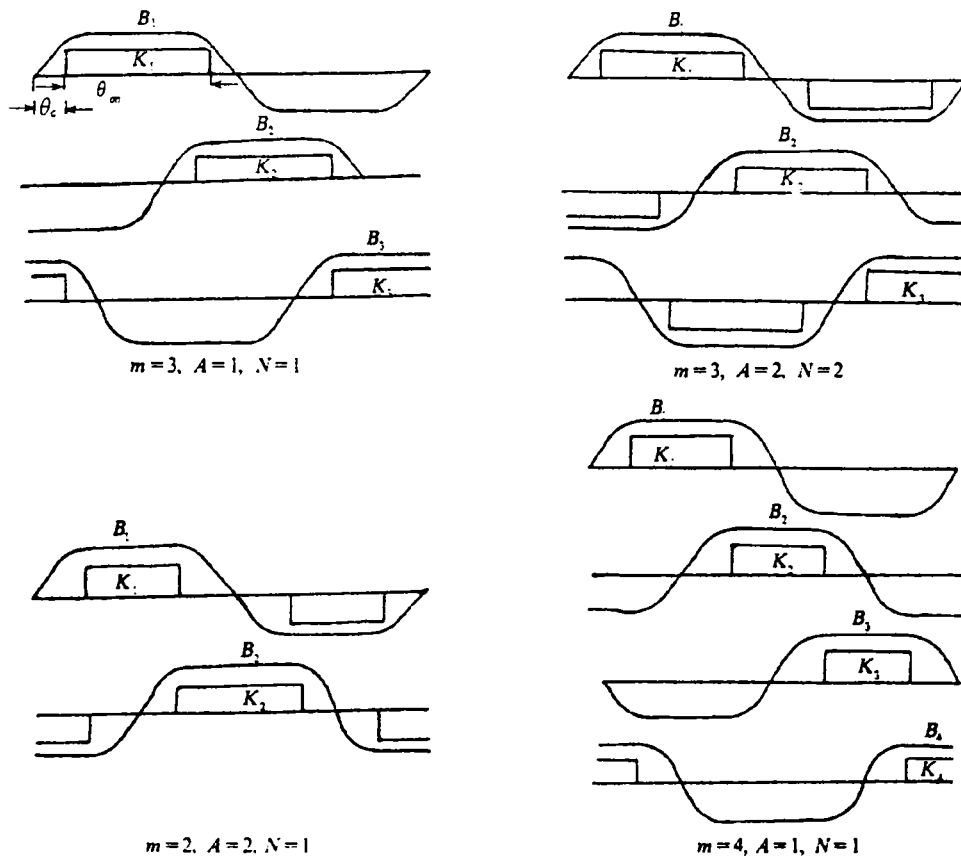


图2 典型脉冲电流换向函数

#### 4 基于“正弦波原理”的正弦波电流换向函数

基于“正弦波原理”求磁场  $B(\theta)$  按正弦分布, 即

$$B_K(\theta) = B_m \sin(\theta + \varphi(K-1)) \quad K=1, 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

则正弦波电流换向函数应为

$$K_K(\theta) = \sin[\theta \pm \varphi(K-1)] \quad K=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

对于图1所示的几种绕组类型的电机, 可以证明  $K_K(\theta) \cdot B_K(\theta) \equiv \text{常数}$ 。

对于以  $\frac{2\pi}{3}$  绕组相带分布的三相无刷直流电动机, 其正弦波电流换向函数为

$$K_K(\theta) = \sin[\theta \pm \frac{2\pi}{3}(K-1)] \quad K=1, 2, 3 \quad (10)$$

其电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{1}{2\pi\Omega} \int_0^{2\pi} K J_m \sum_{K=1}^3 K_K(\theta) \cdot B_K(\theta) d\theta \\ &= \pm \frac{\sqrt{3}}{2\Omega} K J_m B_m \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} d\theta \end{aligned}$$

显见,无原理性力矩波动。

## 5 脉冲电流换向函数的实现

由于脉冲电流换向函数在  $2\pi$  电角度内的换向次数为  $Am \leq 2\pi/\varphi$  次,且换向函数应随转子磁极位置的改变而同步变化,所以一般需要  $m$  个独立的对称布置的磁极位置传感器,而由于  $m$  个传感器布置在圆周上,所以每个传感器在轴旋转  $2\pi$  电角度中能产生  $2m$  个特定位置信息。为形成脉冲电流换向函数,磁极位置传感器可按以下原则布置:

- (1) 当  $A=1$  时,由于  $Am/2m = \frac{1}{2}$ ,  $m$  个传感器有  $\frac{1}{2}$  冗余信息,所以可以采用非对称输出的位置传感器,以便降低成本。
- (2) 当  $A=2$  时,由于  $Am/2m = 1$ ,  $m$  个传感器没有冗余信息,所以它要求对称输出的位置传感器。
- (3)  $m$  个传感器在空间以夹角  $\varphi = 2\pi/Am$  对称分布,第  $K$  个传感器与第  $K$  个相绕组轴线之间的夹角为  $\theta_c$ 。
- (4) 可采用光断续器、霍尔开关、码盘作为传感器与逻辑译码电路组合成实用电路<sup>[1]</sup>。

## 6 正弦波电流换向函数的实现

正弦波电流换向函数与脉冲电流换向函数的区别在于,它需要敏感、完整的转子位置信息。常见的实现电路有三类:

(1) 采用专用的轴角变换器 RDC (Variable Resolution, Monolithic Resolver to Digital Converter) 构成<sup>[2]</sup>。如图 3 所示,这种电路可以将旋转变压器的输出信号变换成以数字量表示的位置信息,其位置检测分辨率可达 16 位。由于采用跟踪变换技术,相位滞后很小。

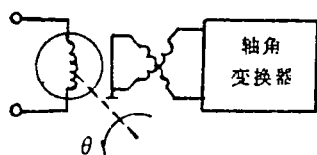


图 3 RDC 电路

(2) 采用多极旋转变压器构成。如图 4 所示,这种电路可以将旋转变压器之输出变换成  $m$  相位置信号,其精度取决于旋变,变换过程中的相位滞后,将对高速旋转的电机产生不良影响。

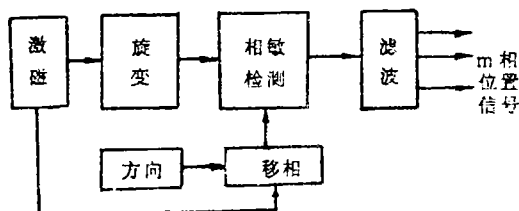


图 4 变压器输出变换位置信号

(3) 采用混合型光电编码器构成。绝对光电编码器由于价格高很难被采用,所以通常是将磁极位置传感器(绝对编码器)与增量式编码器组合在一起构成混合型光电编码器来检测转子位置。这种编码器在启动旋转时的位置精度由绝对光电编码器的分辨率确定,所以此时精度不高(如图 5 所示)。

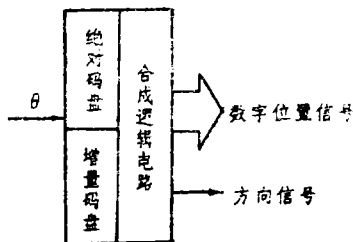


图 5 混合光电编码器

## 7 结束语

引入电流换向函数的概念可以对“方波”和“正弦波”无刷直流电动机的运行原理作出统一的解释。根据力矩波动最小原则,可以构造出适用于不同绕组型式的无刷直流电动机的换向函数。

#### 参 考 文 献

- 1 崔明,李铁才等.方波无刷直流电动机的最佳换向逻辑.微特电机, 1992, (2)
- 2 [苏]И.П.科佩洛夫, В.Л.伏鲁明著;罗应力等译.晶体管电动机中的机电能量转换.北京:机械工业出版社, 1993

## The Current Commutation Function of Brushless DC Servomotors

*Li Xiaoming Yu Xiaoling Du Kunmei*

(Harbin Institute of Electrical Technology)

#### Abstract

This paper first introduces the concept of pulse current commutation function and sinusoidal current commutation function. Different current commutation functions directly affect the output and the smoothness index of torque of motors. The paper also gives out the general criterion for the choice of current commutation function and introduces basic means of realizing current commutation function.

**Key words:** motor, commutation function