

五相混合式步进电动机电流反馈型 升频升压驱动方式的研究

郭 宏

(北京航空航天大学自动控制系, 北京, 100083)

王宏霞

(航空工业总公司 301 研究所, 北京, 100028)

RESEARCH ON THE CURRENT FEEDBACK RAISING FREQUENCY-RAISING VOLTAGE DRIVE MODES OF 5-PHASE HYBRID STEPPING MOTORS

Guo Hong

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Wang Hongxia

(Research Institute 301, Aeronautics Industry General Company, Beijing, 100028)

摘 要 分析了五相混合式步进电动机电流反馈型升频升压驱动系统的工作原理。从理论上和实验上,对五相混合式步进电动机电流反馈型升频升压驱动系统的绕组环形连接 4-5 相通电、星形连接 4-5 相通电和星形连接 2-3 相通电 3 种运行方式进行了详细的分析比较。

关键词 步进电动机 功率驱动 电流反馈 升频升压

中图分类号 TM383.6

Abstract In this paper, the principle of current feedback raising frequency-raising voltage drive systems of 5-phase hybrid stepping motors is analyzed. Three kinds of operation modes of the systems, which are the ring connection and 4-5 excitation, the star connection and 4-5 excitation, and the star connection and 2-3 excitation, are analyzed and compared in detail by theories and experiments.

Key words stepping motor, power drive, current feedback, raising frequency-raising voltage

从本质上讲,五相混合式步进电动机是一种电流控制器件,其绕组电流的波形对电动机的运行性能起决定性的影响。在低速时,希望绕组电流的前沿上升较平缓,以使转子在向新的平衡位置运动时不产生严重的过冲,而在高速时,则希望有较陡的电流前沿,以建立足够的绕组电流,提高负载能力。升频升压驱动方式可以很好地满足这一要求,其中电流反馈型升频升压驱动方式融合了开关电源理论和脉宽调制技术,实现了电流的自主调节,是当前高性能五相混合式步进电动机驱动器的主要发展方向之一^[1]。

1 电流反馈型升频升压驱动系统^[2]

五相混合式步进电动机电流反馈型升频升压驱动系统原理框图如图 1 所示。

系统的主要工作原理如下:电流检测是通过采样电阻将电路的总驱动电流转化为采样

电压, 送到脉宽调制器 TL494 的误差放大器的同相输入端, 反相输入端为设定的基准电压, TL494 的输出端得到 PWM 信号, 送入主回路功率开关管 MOSFET 管的栅极驱动电路, 以控制主回路的通断。该栅极驱动电路具有反相作用, 因而, PWM 信号的高电平对应于主回路的关断状态; PWM 信号的低电平对应于主回路的导通状态。步进电动机低速运行时, 电机的反电势低, 电流的反馈作用使 TL494 输出占空比较大的脉冲, 相应地, 主回路导通时间较短, 加到功率驱动桥上的直流电压较低, 从而得到由基准电压设定的总驱动电流; 当电机运行转速升高时, 电机的反电势增大, 电流反馈的作用使 TL494 输出脉冲的占空比减小, 对应的主回路导通时间加长, 加到功率驱动桥上的直流电压升高, 以维持与基准电压相应的总驱动电流。这样, 在电流反馈的作用下, PWM 发生器 TL494 的输出脉宽随电机运行频率的升高而变窄, 相应地, 加到功率驱动桥上的电压随着电机运行频率的升高而升高, 即升频升压, 其结果是使电机的总驱动电流随运行频率的变化不大。

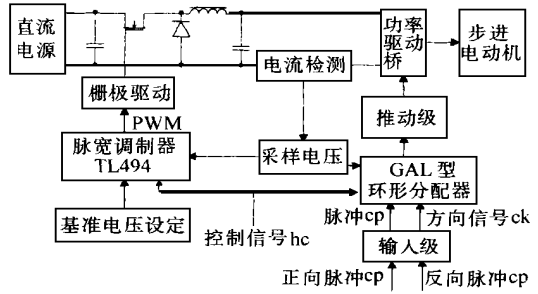


图 1 五相混合式步进电动机电流反馈型升频升压驱动系统原理框图

2 通电方式及绕组连接方法^[3]

对于五相混合式步进电动机系统来说, 为了实现 20 拍运行(半步运行方式), 可以采用 2-3 相通电方式, 也可采用 4-5 相通电方式; 五相混合式步进电动机绕组可接成环形, 也可接成星形。图 2 是五相桥式绕组环接和五相桥式绕组星接驱动器功放级的拓扑结构图。不同

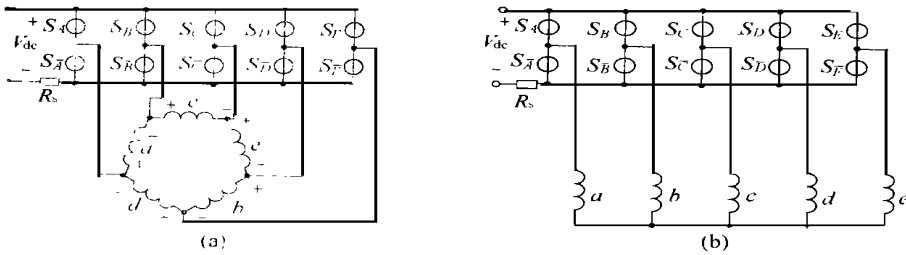


图 2 五相桥式驱动器功放级拓扑结构图

(a) 绕组环接; (b) 绕组星接

的通电方式及绕组连接方法, 使得五相混合式步进电动机系统具有不同的性能。本文下面将对电流反馈型升频升压五相混合式步进电动机系统, 在绕组环形连接 4-5 相通电、星形连接 4-5 相通电及星形连接 2-3 相通电 3 种方式下的运行性能进行分析和比较。

2.1 绕组电流

(1) 绕组环形连接 4-5 相通电 利用图 2(a) 所示的电路拓扑结构, 根据通电逻辑状态, 可以分析出电流反馈型升频升压五相混合式步进电动机系统采用绕组环接 4-5 相通电运行方式时的电流回路特点。具体分析可参见文献[3]。归纳 1 个通电逻辑状态周期的分析结果,

可知,绕组五相通电时一相绕组的终态电流为

$$i_k = \begin{cases} \pm \frac{2I}{5} & k \text{ 在三相串联侧} \\ \pm \frac{3I}{5} & k \text{ 在二相串联侧} \end{cases} \quad (1)$$

绕组四相通电时一相绕组的终态电流为

$$i_k = \pm I/2 \quad (2)$$

其中: I 为总驱动电流,即采样电阻流过的电流,由于电流反馈的作用,在任一频率下为恒值且随频率的变化很小;+、- 号分别对应绕组正向、反向通电。

电流反馈型升频升压五相混合式步进电动机系统的绕组环形连接 4-5 相通电运行方式,是一种相绕组电流可控的运行方式。图 3 是这种运行方式下的相绕组电流的实测波形。

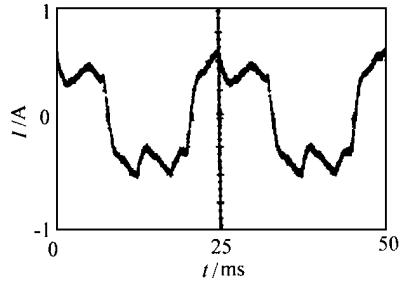


图 3 绕组环形连接 4-5 相通电时一相绕组电流波形($f_{cp} = 800\text{Hz}$)

(2) 绕组星形连接 4-5 相通电 利用图 2(b)所示的电路拓扑结构,根据通电逻辑状态,可以分析出电流反馈型升频升压五相混合式步进电动机系统采用绕组星形连接 4-5 相通电运行方式时的电流回路特点。归纳 1 个通电逻辑状态周期的分析结果,可知,当续流时间不少于 1 拍时间时,绕组电流就始终是连续的,一相绕组始终处于二相或三相并联侧,不论一相绕组是在通电还是在续流,忽略功率开关管的导通压降,其相电压可表示成,

$$V_k = \begin{cases} \pm \frac{2V_{dc}}{5} & k \text{ 在三相并联侧} \\ \pm \frac{3V_{dc}}{5} & k \text{ 在二相并联侧} \end{cases} \quad (3)$$

其中: +、- 号分别对应绕组正向通电及反向续流、反向通电及正向续流。

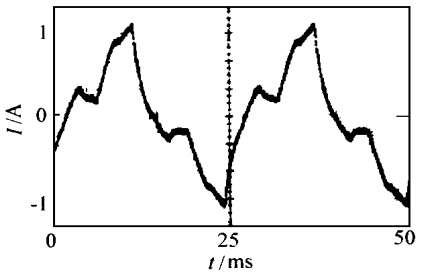


图 4 绕组星形连接 4-5 相通电时一相绕组电流波形($f_{cp} = 800\text{Hz}$)

电流反馈型升频升压五相混合式步进电动机系统的绕组星形连接 4-5 相通电运行方式,是一种相绕组电压可控的运行方式。图 4 是这种运行方式下的相绕组电流的实测波形。

(3) 绕组星形连接 2-3 相通电 绕组星形连接 2-3 相通电是一种比较接近于相绕组电流可控的运行方式,但其绕组电流特征点不如绕组环形连接 4-5 相通电那样明确。运用(1)的分析方法可以对其绕组电流进行分析,这里就不再赘述了。图 5 是这种运行方式下的相绕组电流的实测波形。由图 3、图 4 和图 5 可以看出,电流反馈型升频升压五相混合式步进电动机系统绕组环形连接 4-5 相通电运行方式下的绕组电流波形要优于绕组星形连接 4-5 相通电和绕组星形连接 2-3 相通电运行方式下的绕组电流波形。

2.2 极低频运行时的电磁转矩

在极低频运行时,绕组环形连接 4-5 相通电运行方式下,电磁转矩波动 $T_H = 2.5\%$; 绕

组星形连接 4-5 相通电运行方式下,电磁转矩波动 $T_{X45} = 6.62\%$; 绕组星形连接 2-3 相通电运行方式下,电磁转矩波动 $T_{X23} = 2.5\%$ 。

2.3 牵出转矩特性^[4]

采用同一台五相混合式步进电动机和同一套原理如图 1 所示的电流反馈型升频升压驱动器,在其它条件完全相同的条件下,只改变电机绕组接法和环形分配器的通电逻辑,本文对绕组环形连接 4-5 相通电、星形连接 4-5 相通电和星形连接 2-3 相通电 3 种运行方式下的电机牵出转矩进行了实际的测试,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出环形连接 4-5 相通电运行方式下的电机牵出转矩频域最宽。

3 结 论

(1) 电流反馈型升频升压驱动方式融合了开关电源理论和脉宽调制技术,实现了电流的自主调节,大大地提高了步进电动机系统的运行性能,是当前高性能五相混合式步进电动机驱动器的主要发展方向之一。

(2) 电流反馈型升频升压五相混合式步进电动机系统的绕组环形连接 4-5 相通电运行方式,具有绕组电流波形好、牵出转矩的频域宽、转矩波动小、连续运行频率高等优点,其综合性能优于星形连接 4-5 相通电和星形连接 2-3 相通电运行方式。

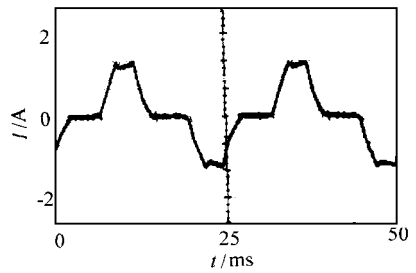


图 5 绕组星形连接 2-3 相通电时一相绕组电流波形($f_{cp} = 800\text{Hz}$)

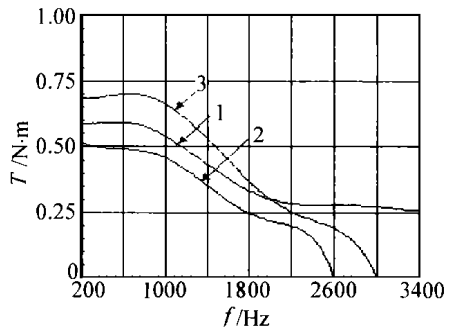


图 6 3 种运行方式下牵出转矩实测曲线
1- 环形连接 4-5 相通电; 2- 星形连接 4-5 相通电; 3- 星形连接 2-3 相通电

参 考 文 献

- 程智. 电流型驱动的二相混合式步进电动机系统的研究: [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997
- 叶志政, 叶靖国. 开关稳压电源. 北京: 高等教育出版社, 1988
- 王宏鑫. CT 床用五相混合式步进电动机系统的研究: [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1998
- Leenhouts A C. Prediction and measurement of the pullout torque in step motor systems. In: Kuo B C ed. Proc of the 23rd Annual Symp on Incremental Motion Control System and Devices. Illinois: Incremental Motion Control Systems Society, 1994. 1~9