

一种新型的五相混合式步进电动机驱动技术

李先峰, 于平, 李东景, 齐心达

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 空间光学一部, 吉林 长春 130033)

摘要:五相混合式步进电动机作为一种高性能电机,具有分辨率高、运行平稳等优点。首先介绍了一种五相混合式步进电动机的空间矢量 PWM 驱动技术,以及相应的电机绕组连接方式和功率拓扑结构;其次分析了这种驱动技术下电机运行的转矩合成原理;然后结合恒频恒总流峰值跟踪技术,介绍了该驱动技术的具体实现方式;最后通过原理样机验证了该驱动方式对绕组电流的改善,并进一步阐述了实现微步驱动的可行性。采用这种驱动方式的五相混合式步进电动机具有优良的动态性能和平稳性,具有良好的应用前景。

关键词:步进式电动机;微步驱动;空间矢量脉宽调制

中图分类号:TM383.6

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2011)09-0102-03

A New Drive Technique for Five-phase Hybrid Stepping Motor

LI Xian-feng, YU Ping, LI Dong-jing, QI Xin-da

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: Five-phase hybrid stepping motor as a high performance motor, has advantages of high resolution, smooth operation. This paper introduces the new space vector PWM drive technique for five-phase hybrid stepping motor, the corresponding motor winding connections and the power topology. The synthesis principle of the torque under this drive technique is analyzed. Combined with constant frequency-constant total current peak tracking technology, the specific implantation for driving is introduced. Finally, improving the winding currents under the drive technique is verified through the prototype. This drive mode for a five-phase hybrid stepping motor has excellent dynamic performance and superior steady performance, it is suitable for space in the field of precision motion occasions with good value.

Keywords: stepping motor; micro-step drive; space vector pulse width modulation

Foundation Project: Supported by National Defense Pre-research Fund (No.05001SA050)

1 引言

五相混合式步进电动机为一种高性能电机,与两相(四相)步进电动机相比,主要区别为结构和相数的差别。结构上,常见混合式步进电机的定子有 8 个极,五相混合式步进电机则有 10 个极。在分辨率上,两种电机的典型转子齿数均为 50,但由于五相混合式步进电机有 10 个定子磁极,每相两个极,转子需转动 1/10 个齿距;两相混合式步进电机有 8 个定子磁极,每相 4 个极,转子需转动 1/4 个齿距,即步距角为 1.8° ;五相混合式步进电机则每周需转动 500 步,即步距角为 0.72° 。五相混合式步进电机比两相混合式步进电机的分辨率高,这是电机自身结构导致的固有表征。

上述差别对电机的运行性能有不同影响作用,相数和定子磁极的结合方式不同对转子的吸力产生了变化,由此使得运行性能显著提高,优势在于:分辨率提高,起动-停止频率提升,运行的频域增宽,运行的平稳性增强,定位转矩减小^[1]。

目前五相混合式步进电动机常见的开环驱动技术包括恒相流驱动、恒总流驱动、升频升压驱动^[2]等。但作为高性能驱动方式的微步驱动在五相混合式步进电动机中的应用在国内至今鲜有文献报道^[3-4]。这里所提出的驱动技术可提高五相混合式步进电动机的运行平稳性,且可作为实现微步驱动的基础。

2 功率拓扑结构

2.1 绕组连接方式

五相混合式步进电动机常见绕组连接方式包括星型连接、5 边形连接、五相全 H 桥连接 3 种方式。这些连接方式下电机的电磁转矩波动较大,导致运行平稳性不佳。这里采用隔相 5 边形连接,这

基金项目:国防预研基金资助项目(05001SA050)

定稿日期:2011-01-29

作者简介:李先峰(1983-),男,吉林梨树人,硕士,研究方向为电机驱动控制。

种连接形式使得各绕组电流彼此关联,变化迅速,且相电流为梯形波,影响电机振荡特性,并改善其运行平稳性。

2.2 五相逆变器

为电机供电的逆变器采用五相半桥电路形式,并结合恒频恒总流斩波峰值控制技术,仅需 10 个功率管和 1 个电流检测环节,比五相全桥电路形式所使用的功率管和电流检测环节的数量大大减少,简化了电路,提高了可靠性。功率拓扑和绕组的连接示意图如图 1 所示,绕组连接顺序为 A→C→E→B→D。

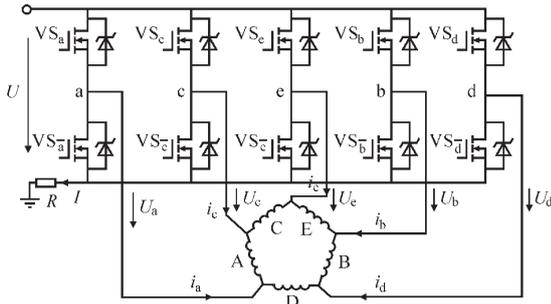


图 1 功率级和绕组连接示意图

当绕组线电压和线电流参考方向如图 1 所示时,相电流为:

$$i_{ac}=i_a-i_c, i_{ce}=i_c-i_e, i_{eb}=i_e-i_b, i_{bd}=i_b-i_d, i_{da}=i_d-i_a \quad (1)$$

因此 $i_{ac}+i_{ce}+i_{eb}+i_{bd}+i_{da}=0$ 。为提高电机的运行平稳性,需要平滑相电流波形。为进一步分析,首先建立五相混合式步进电动机数学模型,其绕组端电压方程为:

$$U_k=Ri_k+L\frac{di_k}{dt}+M\sum_{j=a}^e\frac{di_j}{dt}+u_k(\varphi) \quad k=a, b, c, d, e \quad (2)$$

式中 $j \neq k$; R 为相绕组电阻; L 为相绕组自感; M 为相绕组间互感; $u_k(\varphi)$ 为转子在 k 相绕组中感应的旋转电势。

五相混合式步进电动机的 $u_k(\varphi)$ 近似正弦波,可用正弦函数表示:

$$u_k(\varphi)=k_e\omega_m\sin(\omega t-\delta-\theta_k) \quad (3)$$

式中 k_e 为旋转电压系数; ω_m 为机械角速度; δ 为超前/滞后角,即相电压基本分量超前或滞后旋转电压的角度; θ_k 为旋转电压初始角。

因此,需在五相绕组中分别通以相位差 $2\pi/5$ 且幅值相同的正弦电流,在电机内建立均匀的圆形旋转磁场,合成磁势矢量在空间作幅值恒定的旋转运动。而在实际多相电机应用中,电机相数增多给驱动系统设计带来了更多困难,难以直接实现这种正弦波电流,都是利用梯形电流叠加近似。

3 空间矢量分析

五相混合步进电动机在一般整步 4-4 通电

10 拍工作方式下,绕组通电状态: $\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} \leftrightarrow \overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E} \leftrightarrow \overline{C}\overline{D}\overline{E}\overline{A} \leftrightarrow \overline{D}\overline{E}\overline{A}\overline{B} \leftrightarrow \overline{E}\overline{A}\overline{B}\overline{C} \leftrightarrow \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} \leftrightarrow \overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E} \leftrightarrow \overline{C}\overline{D}\overline{E}\overline{A} \leftrightarrow \overline{D}\overline{E}\overline{A}\overline{B} \leftrightarrow \overline{E}\overline{A}\overline{B}\overline{C} \leftrightarrow \dots$ 电机在绕组隔相 5 边形连接方式下合成力矩矢量如图 2 所示,假设每相绕组通额定电流 I_0 时产生的单位转矩大小为 T ,则转矩大小关系: $T_a=T_b=T_c=T_d=T_e=T$, T_N 为合成转矩。

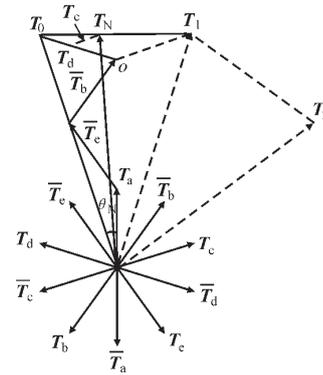


图 2 空间矢量合成图

图 2 中,从 T_0 到 T_1 ,即 $\overline{T_d}\overline{T_c}\overline{T_a}\overline{T_b} \rightarrow \overline{T_c}\overline{T_a}\overline{T_b}\overline{T_c}$ 的变化,导通的功率管从 $VS_c, VS_d, VS_e \rightarrow VS_d, VS_e, VS_a$ 变化,此变化过程从矢量合成图可见, T_d 变小, T_c 变大。 VS_c 管和 VS_a 管同时进行 PWM 调制,会导致 D 相绕组电流逐渐减小, C 相电流逐渐增加,控制二者变化量相等,可维持 A 相电流恒定。转矩合成图如图 3 所示。 T_d 和 T_c 按以下关系进行合成:

$$kT_d+(1-k)T_c=T_N \quad (4)$$

式中 $0 \leq k \leq 1$ 。

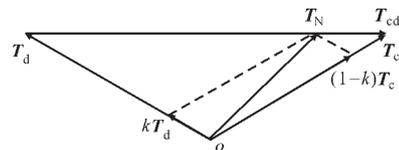


图 3 转矩合成图

则合成转矩将保持在 T_{cd} 方向上渐进变化,避免了发生转矩跳变,从而消减了转子动能。

4 空间矢量的 PWM 实现

整步方式工作时,满足 $i_{ac}+i_{ce}+i_{eb}+i_{bd}+i_{da}=0$ 的参考相电流如图 4 所示。以 $t_0 \sim t_1$ 时段为例,当 $i_{ac}=I_0, i_{eb}=-I_0, i_{bd}=-I_0$ 时,满足 $i_{ce}+i_{da}=I_0$,即 D, C 相绕组电流 i_{ce} 和 i_{da} 分别从零到 I_0 和从 I_0 再到零线性变化。

为达到这种效果,在 A, B, E 三相对应的桥臂功率管信号正常通电逻辑时序下, D, C 两相绕组对应的桥臂功率管信号进行 PWM 调制,控制占空比的变化,使以 o 点为基准位置的 T_d 与 T_c 满足式 (4)。这样,相电流的大小线性渐变,合成转矩 T_N 将在 $t_0 \sim t_1$ 时间内完成沿 $T_0 \sim T_1$ 方向渐变的过

程。依次类推,即可完成合成磁场的圆旋运动。

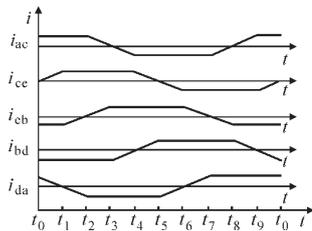


图 4 整步方式相电流参考波形

由于相电流的渐变需要控制功率管的通断而具体实现,采用图 4 所示的相位互差 $2\pi/5$ 的参考电流波,与固定频率的三角波比较,能产生恒频变脉宽 PWM 信号分别用来驱动对应功率桥的上半桥臂功率管,反相后的信号驱动下半桥臂功率管。这实际上就是在功率管断开前、导通后进行一定频率的斩波,控制了换向过程中绕组端电压,使各换向电流上升和下降的速率相当,从而抑制了换相时的转矩脉动。

为使电机具有良好的动态性能,且保持电机的输出力矩在较宽的频率范围内恒定,结合恒频恒总流斩波峰值跟踪技术^[5-6],原理如图 5 所示。

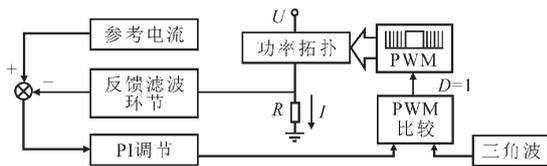


图 5 空间 PWM 矢量驱动的实现

通过采集功率拓扑上总电流,与理论值作差后利用 PI 调节,比较固定频率三角波获得斩波信号,这些斩波信号仅用于同时刻上半桥或下半桥所有功率管占空比为 1 的区间,从而维持总电流恒定。至此即可实现高性能的空间矢量 PWM 驱动。

在此基础上,利用齿层比磁导动态分析法^[7]建立模型可算出电机牵入过程中每一瞬间的各相电流值,能获得细分情况下的相电流参考波形,根据空间矢量 PWM 驱动的原理,就能完成一定阶数的微步驱动。

5 样机实验结果

根据上述原理制作了样机,利用 XCV300 型 FPGA 作为核心控制器实现空间矢量 PWM 驱动的算法,用于驱动 PK544PMA 型五相混合式步进电动机,其主要参数为:基本步距角 $0.36^\circ/\text{步}$,保持转矩 $0.24 \text{ N}\cdot\text{m}$,绕组电阻 2.2Ω 。当三角波频率为 16 kHz ,给定电机控制频率 $f_{cp}=80 \text{ Hz}$ 时,在整步的情况下,分别测量绕组相电流 i_a 和线电流 i_{ac} ,

结果如图 6a、b 所示。在此基础上还实现了两细分,电流波形如图 6c、d 所示。可从图 6a、c 测得的相电流波形观察出阶梯形渐变的变化特征,这种相电流波形的正弦化,使电机的谐波电磁转矩减小,实际中电机行进的振荡明显减小。

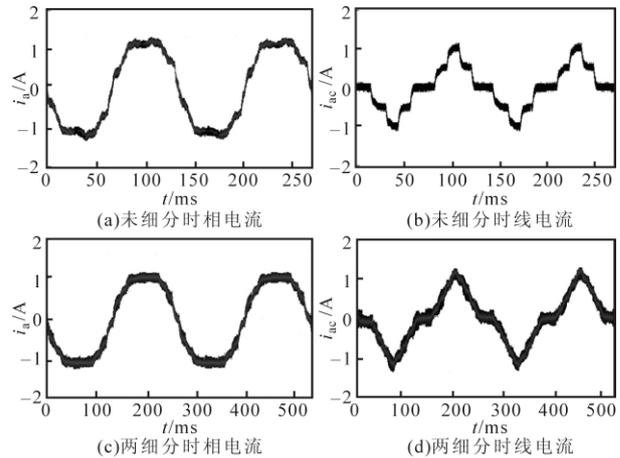


图 6 实验波形

6 结论

作为一种新型五相混合式步进电动机驱动方式,空间矢量 PWM 的方法能够平滑电机相电流,使电机运行更加平稳,结合恒频恒总流斩波峰值跟踪技术,依旧能保持五相混合式步进电动机的较宽的矩频特性和优良的动态性能,还可作为微步驱动的基础,值得深入研究。因此,该技术在实际工程应用中有广泛的应用前景,适合于在工业领域中需要精密控制的场合。

参考文献

- [1] 王宗培,赵书韬,任雷,等.混合式步进电动机的研究[J].电工技术,1998,17(3):3-6.
- [2] 史敬灼,王宗培.步进电动机驱动控制技术的发展[J].微特电机,2007,35(7):50-54.
- [3] 陈敏祥.五相混合式步进电动机驱动新技术[J].电机与控制学报,1998,2(1):38-41.
- [4] 郭宏,王宏霞.五相混合式步进电动机电流反馈型变频升压驱动方式的研究[J].航空学报,1998,19(7):71-74.
- [5] 王英,王宗培,辜承林.五相混合式步进电动机的隔相五边形驱动[J].华中理工大学学报,1998,26(6):40-42.
- [6] 王宗培,程智,史敬灼,等.混合式步进电动机恒总流驱动系统的稳态仿真[J].微电机,1999,32(5):11-15.
- [7] 董怀,王宗培.五相混合式步进电机牵入特性的齿层比磁导分析模型[J].中国电机工程学报,1994,14(1):20-26.