

# 一种高效三相直流无刷电机驱动方法探讨

梁伟健

(广东万和新电气股份有限公司, 528305)

**摘要:** 燃气热水器的风机工作温升、风机工作效率问题一直是行业内关注的热点。直流风机包含单相整流电路的非线性负载,在运行时会产生严重的三次谐波电流,并且会在中性点上叠加。因此中性线上的三次谐波电流是三相中三次谐波电流的代数和,其值可以达到相线电流的 1.7 倍。对于该电机,三次谐波电流做功为无用功,会降低三相直流无刷电机的工作效率同时会使电机发热。为提高燃气热水器风机的传统三相直流无刷内转子电机工作效率,降低其工作温升,在不改变电机结构情况下,可通过去除浮动中性点,防止三次谐波在零点上叠加,减少无用功,从而提高三相直流无刷电机的效率。通过对比测试,能减少风机工作电流,对比原有电机效率提升约 8%,并降低电机绕组、晶闸管、驱动芯片工作状态下的温升。

**关键词:** 燃气热水器 风机 电机 直流 无刷 转子 谐波 温升

## Discussion on a High-Efficiency Method of Driving Three-Phase DC Brushless Motor

Liang Weijian

(Guangdong Vanward New Electric Co., Ltd., 528305)

**Abstract:** It has been the focus of attention that the fan temperature rise and work efficiency of the gas water heater. The DC motor contains the nonlinear load of the single-phase rectifier circuit, which will generate serious third harmonic current in operation, and will be superimposed on the neutral point. Therefore, the third harmonic current on the neutral line is the algebraic sum of the third harmonic current in the triphase, and its value can reach 1.7 times of the current in the phase line. For this motor, the work done by the third harmonic current is useless, which will reduce the working efficiency of the three-phase DC brushless motor and make the motor hot. To improve the efficiency of traditional three-phase DC brushless internal rotor motor and lower temperature during work, it can be eliminated the third harmonic of three-phase DC brushless motor by removing floating neutral point, which prevent third harmonic superposing on the zero point and reduce useless work. According to the comparison test, it is showed that it can promote the original motor efficiency by about 8% and decrease the temperature rising phenomenon during the motor windings, thyristors and driven chips working.

**Keywords:** Gas water heater, Fan, Motor, DC brushless, Rotor, Harmonic, Temperature rise

### 1 引言

近年来,随着晶闸管、驱动芯片的发展进步,电机驱动的方式不断演进,直流电机作为新的电机驱动方式进入家电行业,它以低功率、可调速、体积小、转矩大等优点逐渐扩大市场份额,并在汽车、医疗工业设备领域上也得到广泛的使用。三相直流无刷电机更是作为主流产品。家用燃气热水器的强抽风机的电机也由早

期的交流电机替换为三相直流无刷内转子电机。直流风机主要由直流电机、叶轮和蜗壳组成。由于在方波控制方式下,绕组电流高次谐波含量较大,所以其涡流损耗比在正弦波控制方式下高出近乎一倍,最终导致电机在方波控制方式下损耗高于正弦波控制方式<sup>[1]</sup>。因此三相直流无刷电机驱动的方式也从早期的方波控制演变为 PWM、SPWM、开关损耗最小正弦 PWM 驱动。解决了早期直流电机噪声尖锐、电机脉动高、电流

**第一作者简介:** 梁伟健,男,1996年8月出生,毕业于广州大学,电气工程及其自动化专业,本科,现任广东万和新电气股份有限公司研发工程师,主要从事家电电控硬件设计、单片机软件开发,邮箱 liangweijian@vanward.com。

波形畸变大、损耗高等缺点

除此之外传统的三相直流无刷电机,仍有许多问题需要改进,比如电机发热严重、晶闸管寿命短等。三次谐波是导致这类问题的元凶之一,本文所讲述的高效三相直流无刷电机驱动方法主要目的是在保持直流电机原有优点的情况下,消除中性点,防止三次谐波电流在中性点叠加,优化电机效率,减少电机发热。

2 传统的三相直流无刷电机

常见的家电产品三相直流无刷电机由 PWM 驱动晶闸管的开断,采用六步换相为一个电周期。如图 1,系统由 MCU 运算单元、晶闸管驱动单元、晶闸管以及三相直流电机组成。三相直流电机结构上分为定子和转子,一般定子为三相绕组通过电流方向控制磁场方向;转子一般为永磁体,分为内转子和外转子,目前家用燃气热水器使用主要是内转子。定子绕组的某一相通电时,该电流与转子永久磁铁的磁极产生的磁场相

互作用,从而产生转矩,驱动转子旋转<sup>[2]</sup>。电机三相一般采用 Y 型接法,虚拟一个中性点,通过六步换相方法,在任意时刻三相直流电机只有两相通电,另外一相为开路状态,三相两两通电,一共只有六种组合,通过平均分布,按照转子磁性以及需要的旋转方向,以一定的顺序每隔 60° 电角度进行一次变化,每个开关管导通 120° 电角度。这样产生的旋转磁场能拉动永磁体转子按照我们需要的方向进行转动。一个电周期可能并不对应于一个完整的转子机械转动周期。完成一圈机械转动,需要重复的电周期数取决于转子的磁极对数。每对转子磁极需要完成一个电周期,因此,电周期数 / 转数等于转子磁极对数<sup>[3]</sup>。

为了准确换相,系统还需要知道转子的位置,传统的方法是霍尔传感器,或者是通过反电动势的过零检测检测不通电的那一相。由于这方面不是本论文核心这里不进行描述与深入探讨。表 1 为一种可行实例的六步换相法通电顺序。

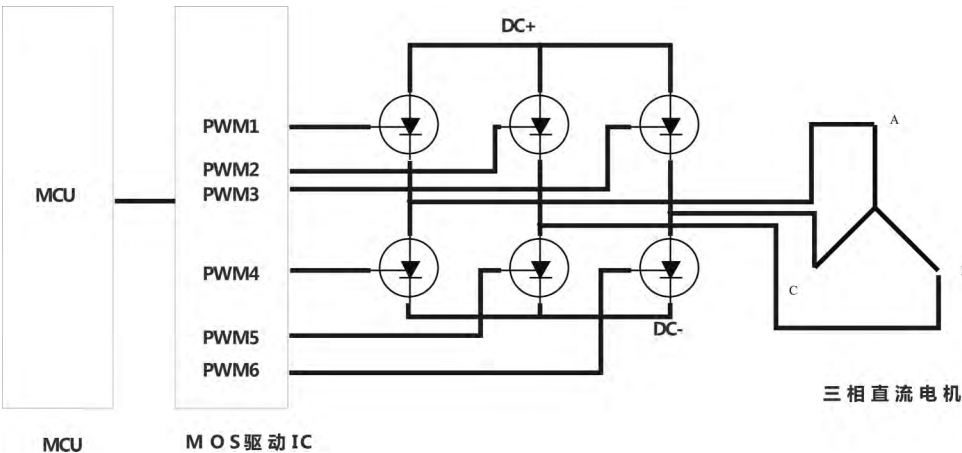
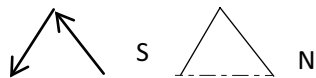
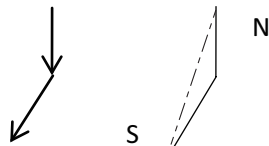
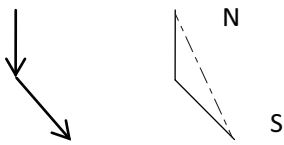
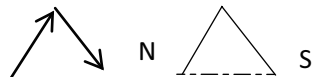


图 1 家用燃气热水器电机传统驱动电路组成

表 1 一种可行实例的六步换相法通电顺序

转子 N 极角度	A 相通电	B 相通电	C 相通电	电流流向和生成的磁场
0-60	GND	+	悬空	
60-120	GND	悬空	+	

续表

转子 N 极角度	A 相通电	B 相通电	C 相通电	电流流向和生成的磁场
120~180	悬空	GND	+	
180~240	+	GND	悬空	
240~300	+	悬空	GND	
300~360	悬空	+	GND	

三次谐波是一种正弦波分量,其频率为复杂波的基频的三倍。在三相系统中,三次谐波会在中性点上叠加,由于三次谐波及其倍数次谐波呈零序特征,因此中性线上的三次谐波电流是三相中三次谐波电流的代数和。三次谐波会导致电机发热、效率降低。

传统三相直流电机采用开关损耗最小正弦 PWM 是在 SPWM 调制波形添加零序分量,一般  $u_0 = -\min(S_U, S_V, S_W)$ , A 相的调制波波形为马鞍 PWM 线, B、C 相的调制波波形可类推出,并与之相差  $120^\circ$  的相位。开关损耗最小正弦 PWM 在开关功耗上是 SPWM 驱动的  $1/3$ ,但线电压输出能力是 SPWM 驱动的  $2/\sqrt{3}$ 。是目前传统的三相直流无刷电机来说,低功耗高输出的电机驱动方式<sup>[4]</sup>。

3 高效的三相直流无刷电机

结构上,和传统的三相直流无刷电机一样,采用三相绕组作为定子,永磁铁作为内转子,三相绕组通过特定的通电时序控制着磁场方向,进而控制转子的转动。接线方式有所变化,去除中性点,每项绕组的末端接

入到驱动板,受晶闸管的控制,也就是每个绕组可以独立形成回路,可单独驱动。系统电路组成如图 2 所示。将传统的三相直流无刷电机的中性点断开,每项的末端接入到驱动板,受晶闸管控制。虽然晶闸管的数量增加了一倍,但能去除三相直流电机的中性点,有效的消除三次谐波,减少无用功。该方法还有一个优点,对比原有的传统三相直流电机,只需要更改电机接口以及电机驱动板就可以实现,改动周期短。

由于独立控制没有了中性点,因此只需通过模拟正弦波控制晶闸管的通断,和传统三相直流无刷电机驱动一样,采用六步换相法,通电时序参照表 1。A 相的调制波波形为正弦波形, B、C 相的调制波波形可类推出,并与之相差  $120^\circ$  的相位。

三次谐波一直以来都是三相电机令人头疼的地方,它属于无用功会降低电机的效率;很多情况下谐波使得正弦波变的更尖,使物体受到电应力增大的同时会导致局部发热严重引起火灾危机人身财产安全;谐波会对断路器等元器件干扰、冲击,使得开断功能有严重影响。

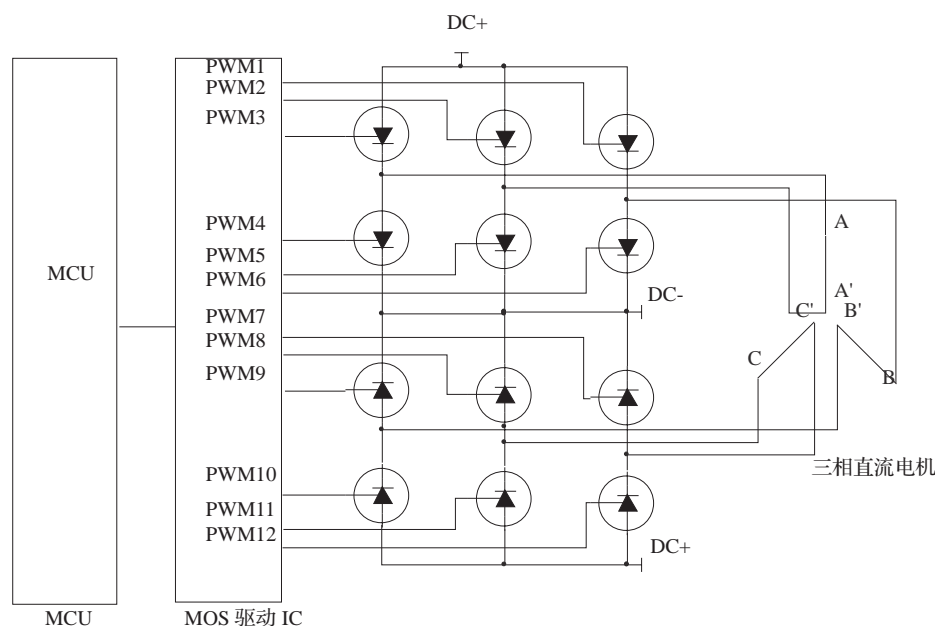


图2 高效三相直流无刷电机电路组成

4 数据验证

根据控制变量法,排除供电电源、电机绕组、线径、结构等情况对实验数据的影响,两种驱动方式,均采用相同的电机结构,包括绕组、线径等。两种驱动板的电子元器件也遵从控制变量法原则,MCU、晶闸管以及供电电源均一致。

4.1 电机效率对比测试方法

使用电机带相同负载(叶轮和蜗壳),在相同电源36V直流电源输入(功率足够驱动电机)供电的情况下,对比电机的转速与电流的关系。

测试样机:三相直流风机总成;

风机额定电压:36V;

风机额定电流:1.2A;

风机额定转速:3400rpm;

测试环境:室内温度40℃,常压下,无强对流空气。

测试方法:控制两个驱动方式的风机输出功率一致,输入电压一致下,比较电流大小。测试测3组,取平均值。此处测试使风机在同一环境下带相同负载,控制电机转速一致,输入电压恒定36V,记录电流值。

4.2 电机效率对比测试数据

测试环境温度40℃,大气压101.3kPa。对比数据见表2。

表2 电机效率对比测试数据

转速 (rpm)	传统三相直流 电机电流(A)	高效三相直流 电机电流(A)	优化电 流(A)	优化电 流占比
3600	1.38	1.25	0.13	9%
3400	1.21	1.11	0.1	8%
3200	1.04	0.95	0.09	9%
3000	0.86	0.78	0.08	9%
2700	0.68	0.62	0.06	9%
2550	0.51	0.47	0.04	8%
2200	0.34	0.32	0.02	5%
1700	0.17	0.17	0	0%

4.3 电机温升测试方法

热电偶法,测试电机绕组、晶闸管、驱动IC温升:

(1)用热电偶胶将热电偶的一端紧贴在绕组表面(要注意绕组与热电偶间需进行绝缘处理);热电偶的另一端接到温升测试仪上;被测电机带额定负载,在工作环境下,额定电压,1.2倍额定电流下运行4h,温升测试仪的值为绕组的温升。

(2)对驱动电路内置式电机;用热电偶胶将热电偶的一端紧贴在晶闸管边缘处;热电偶的另一端接到温升测试仪上;被测电机带额定负载,在工作环境下,额定电压,1.2倍额定电流下运行2h,温升测试仪的值为晶闸管的温升。

(3)对驱动电路内置式电机;用热电偶胶将热电偶的一端紧贴在驱动 IC 边缘处;热电偶的另一端接到温升测试仪上;被测电机带额定负载,在工作环境下,额定电压,1.2 倍额定电流下运行 2h,温升测试仪的值为驱动 IC 的温升。

(4)在采用热电偶法测量绕组的温度时应考虑:由于热电偶的读数滞后于绕组的温度变化,当电机断电后,热电偶的温度可能还会继续上升,因此电机绕组的温度应记录其最高温度,该温度可能是断电以后才能达到。

测试测 3 组,取平均值。

如果试验结束时冷却介质温度与使用地点所指定的冷却介质温度之差大于 30K,应按照 GB 755-2008 的规定对温升限值进行修正<sup>[5]</sup>。

4.4 电机温升测试数据

温升测试对比数据见表 3。

表 3 电机温升测试对比数据

	传统三相 直流电机	高效三相 直流电机	温升 下降	温升下 降占比
电机绕组温升(K)	24.3	21.8	2.5	10%
晶闸管温升(K)	20.5	18.6	1.9	9%
驱动 IC 温升(K)	30.2	29.5	0.7	2%

4.5 测试数据分析

电机的效率计算公式为输出功率与输入功率的比值,上述测试保持风机在同一环境,同一负载,并且处于同一转速,使得风机的输出功率约为一致。则此时输入功率的比值为电机效率的比值,即优化电流比为该环境下风机效率优化比。

从上述实验数据能得出,在同一输出功率下,中性

点去除的三相直流风机接法对比传统的三相直流风机接法,其输入功率明显降低,即提高电机效率。同时电机温升显著减少。

(1)三相直流电机,从星接改为去除中性点后,能提高风机工作效率。

(2)三相直流电机,从星接改为去除中性点后,能降低风机工作状态下的温升。

5 结论

从实验数据上看,三相直流电机的去除中性点的接法能明显提高风机的工作效率,以及降低风机工作状态下的温升。结果分析,由于控制原理上以及元器件是一致的,主要是接线方式不同,去除了中性点。在三相系统中,中性点会有谐波电流的产生和叠加,尤其是三次谐波,会消耗功率,做无用功。实验也验证消除中性点能提供风机工作效率。三次谐波的减少与晶闸管的数量增加总体来说对驱动芯片的寿命影响仍需要深入探讨、测试验证。

参考文献

[1] 邹继斌,李建军,徐永向,魏延羽. 驱动方式对永磁无刷直流电机损耗的影响[J]. 电工技术学报, 2011(09).

[2] 郭庆鼎,赵希梅. 直流无刷电动机原理与技术应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.4

[3] 王宁. 汽车电动液压助力转向控制系统[D]. 天津大学, 2014.

[4] 曾兹鸿. 直流无刷电机 PWM 驱动芯片设计[D]. 西南交通大学, 2012.

[5] GB/T GB 755-2008 旋转电机 定额和性能[S].