

对旋轴流风机专用单绕组双速电机设计

孟大伟, 杨小妮, 刘金辉, 荆 超

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对对旋式轴流风机在偏离额定工况点的状态, 出现压升和功率不平衡, 以及效率严重降低的问题, 对风机的两级驱动电机进行了研究。采用变极调速的方式, 设计出单绕组双速变极调速电机作为对旋轴流风机前后两级叶轮的驱动电机。根据电机绕组理论, 利用对称轴线法设计出 6/8 极变极绕组型式, 对双速变极电机进行有限元仿真分析, 结果证明, 双速电机在两种极数下电机性能均好。风机可以根据不同工况, 调节前后两级叶轮的转速比, 使风机始终工作在高效运行区。此外, 所设计的单绕组双速电机对比原风机配用的电机降低了一个中心高, 制造成本也有所降低。

关键词: 对旋风机; 变极调速; 谐波分析; 电磁计算

DOI: 10.15938/j.jhust.2020.01.016

中图分类号: TM343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2020)01-0108-07

The Design of Special Single-winding Two-speed Motor for Contra-rotating Axial-flow Fan

MENG Da-wei, YANG Xiao-ni, LIU Jin-hui, JING Chao

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the problems of the pressure rise and power imbalance and the problem of serious reduction of efficiency when the contra-rotating axial flow-fan deviates from the rated operating point, the two-stage drive motor of the fan is studied. In this paper, the single winding and double speed motor is designed to drive the impeller of the contra-rotating axial flow-fan. According to motor winding theory, with the method of symmetry axis to design the 6/8 pole winding type. The finite element simulation analysis simulation analysis of the double speed pole motor show that the two-speed motor has good performance in two kinds of poles. The fan can adjust the speed ratio of the impeller according to different working conditions, so as to keep the fan working in efficient operation area. In addition, the design of single winding two-speed motor reduces the height of center and manufacturing costs by comparing the motor with the original fan.

Keywords: contra-rotating axial-flow fan; pole-changing control; harmonic analysis; electromagnetic calculation

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(51275137)。

作者简介: 孟大伟(1956—), 男, 教授, 博士研究生导师;

刘金辉(1992—), 男, 博士研究生。

通信作者: 杨小妮(1992—), 女, 硕士研究生, E-mail: yangxiaoni@163.com.

0 引言

对旋轴流风机由两个旋转方向相反的转子组成,两级叶轮分别安装在前后两级的轴伸端,由两台规格相同的三相感应电机直接驱动^[1],广泛应用于煤矿、隧道等需要通风的场合。伴随着煤井下长距离送风需求的增多,对风机的运行性能提出了更高的要求。近年来,很多学者对叶轮安装角度、风机轮毂结构、扩散器结构以及轴承等风机结构进行优化设计,大大提高了风机在设计工况点的运行性能^[2-3]。然而对于风机偏离设计运行点时,出现的两级叶轮的压升和功率趋于不平衡,运行效率大大降低的情况并未进行深入研究。在实际的工程作业中,随着送风距离变化,风压和流量需要改变,目前多数风机是采用挡板或者阀门来调节的。但这种方法相当于人为增大了阻力,不仅浪费电能,而且还会对设备造成损害,降低设备的寿命^[4]。

近年来,Pundhir Ds.^[5]、Chen等^[6]、刘红蕊等^[7]、艾子健等^[8]对旋轴流风机的变转速匹配特性进行研究,研究表明:调节前后两级叶轮转速,可以有效抑制失速和过载的问题,明显提高风机的运行效率。然而,变频器的使用不仅会增加投资,而且会因为井下、隧道中复杂恶劣的环境而无法满足防爆的要求。而变极调速可以实现电机转速的有级调节,并且凭借其简单、高效、安全、成本低且对设备运行环境要求低等优越性能,在这一工程领域应用更具有优势。此外,文^[4]对变频调速和变极调速分别进行了研究,证明对于风机类负载机械的调速运行,变极调速更具有优势。

为达到风机系统节能的目的,本文以型号为FBDCZNo. 14/2* 45的矿用对旋轴流风机为研究对象,采用变极调速的方式设计出适用于此型号风机的单绕组双速6/8极调速电机,作为对旋风机前后两级的驱动电机,并对其进行了谐波分析,对电机性能进行了有限元仿真分析。

1 变极双速电机设计原则

风机属于平方转矩负载,其转速 n 与流量 Q 、转矩 T 以及功率 P 有如下关系: $Q \propto n$, $T \propto n^2$, $P \propto n^3$,可见,风机调速可以实现了较大幅度的节能^[9]。设计风机专用单绕组双速电动机时,必须考虑到轴功

率与转速立方成正比的特点,否则会出现前后两级功率不平衡的情况,达不到节能的目的。

本文单绕组双速电机采用变极调速,其核心为变极绕组设计。随着单绕组变极调速应用越来越广泛,普遍存在的问题是往往变极的绕组系数非常低,电机性能较差,可能带来更多的能耗,这与高效节能的初衷背道而驰。因此,设计出变极前后的绕组利用率高,谐波含量少的双速变极绕组是关键。

本文单绕组双速变极电机遵循以下设计原则:

- 1) 受对旋风机安装尺寸的约束,新设计的电机的外形尺寸不宜与原电机尺寸相差过大,新电机的外形结构尺寸等于或稍小于原型号电机;
- 2) 按风机系统运行的高效区合理确定两种转速下电机的额定功率;
- 3) 定子绕组排列满足两种极数下电机的绕组利用率高,谐波含量低的要求;
- 4) 电机特性曲线应基本符合功率与转速立方成正比,转矩与转速平方成正比的特性;
- 5) 两种转速下电机性能均好;
- 6) 满足以上要求的情况下,尽量降低电机的制造成本,达到节能的目的。

为适应不同送风距离风机运行情况,电机功率选取依据风机运行在不同工况下的轴功率。根据文^[5],通过对型号为FBDCZNo. 14/2* 45的矿用对旋轴流风机进行研究,该风机原来配用电机为6极,转速为980 r/min,对风机进行不同转速匹配研究,得到对旋轴流风机在不同转速配合时的效率-流量曲线和轴功率-流量曲线,如图1和图2所示。

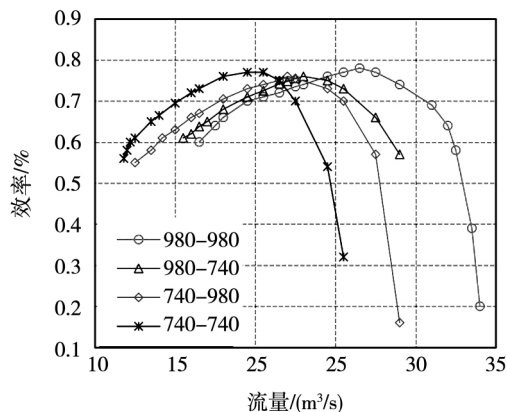


图1 不同转速匹配时的效率-流量曲线

Fig. 1 The curves of the efficiency against flow rate under different speed matching

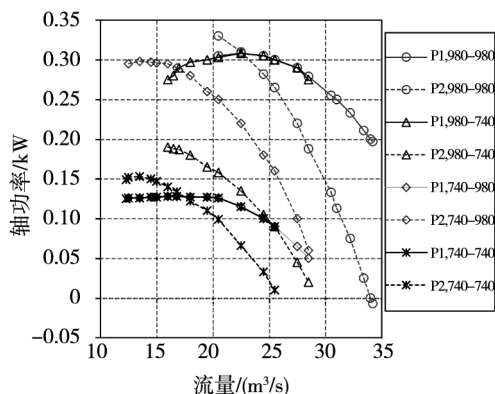


图2 不同转速匹配时的轴功率-流量曲线

Fig. 2 The curves of axial power against flow rate under different speed matching

由图1和图2可知,在风机的高效运行区,高速(980 r/min)运行状态下,叶轮最大轴功率为30.5 kW,低速(740 r/min)运行状态下,叶轮最大的轴功率为14 kW,由此可以计算得出最适合的一、二级电动机功率。

对旋轴流风机的电动机功率 P 按下式计算:

$$P \geq K P_{sh} \quad (1)$$

其中 K 为功率储备系数,取值 $K = 1.05 \sim 1.10$ 。

从整个风机系统高效运行的角度,高速运行转速为980 r/min,低速运行转速为740 r/min,两种极状态为6/8极。高速运行状态下电动机功率取值为: $P = 33$ kW; 低速运行状态下电动机功率取值为:

$P = 15$ kW。功率的选用基本符合轴功率与转速的立方成正比的关系。

2 绕组设计及谐波分析

2.1 6/8极绕组设计

为获得较大的基波分布系数和减小谐波含量,变前极为6极,采用正规 60° 相带绕组; 按移相变极思路,采用对称轴线法得到8极正规 60° 相带绕组。

图3为6极下槽号相位图。对其进行 60° 相带划分,把每一相绕组分为6段。8极下的槽号相位图如图4所示。将6极下每相所占的槽号按照8极槽号相位图排列,用对称轴线划出每相六段槽号,把每相邻两根对称轴线之间的六段槽号串联作为变后极的同一相: A I、B I、C I 串联作为变后极的 a 相; A III、B III、C III 串联作为变后极的 b 相; A V、B V、C V 串联作为变后极的 c 相; 为了得到正规 60° 相带的变后极绕组,将 A II、B II、C II 改变电流方向后串联给 c 相,将 A IV、B IV、C IV 改变电流方向后串联给 a 相,将 A VI、B VI、C VI 改变电流方向后串联给 b 相。可以看出,变后极每相绕组的分布完全相同,则说明三相绕组的磁动势矢量合成必定对称,满足绕组变极的要求。

由此可得变极前后绕组的连接方法如图5和图6,图5为变前极的绕组 Y 接,图6为变后极的绕组 Y 接。

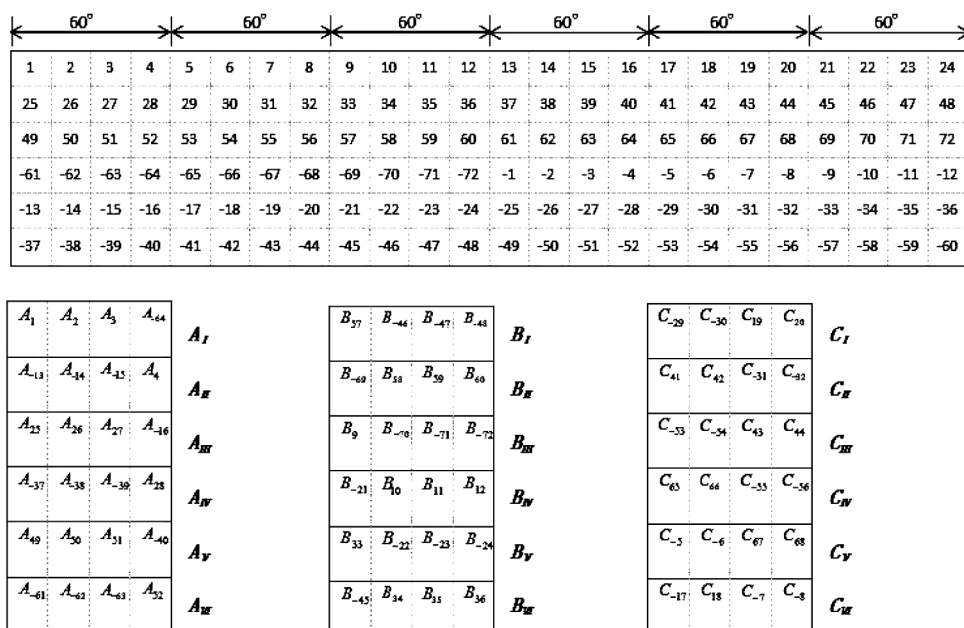


图3 6极下槽号相位图

Fig. 3 Slot number phase diagram of 6-pole

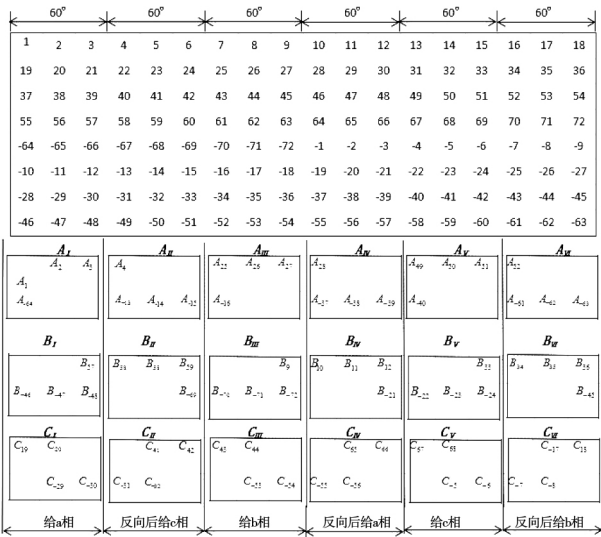


图 4 8 极下槽号相位图

Fig. 4 Slot number phase diagram of 8-pole

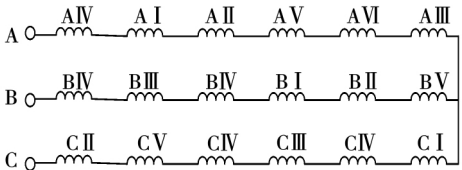


图 5 6 极下绕组连接方式

Fig. 5 Connection mode of 6-pole winding

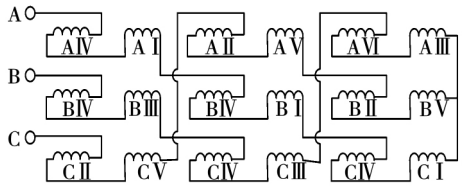


图 6 8 极下绕组连接方式

Fig. 6 Connection mode of 8-pole winding

2.2 谐波分析

本文的单绕组双速电机在两个极状态下都是“空间分布正规 60°相带绕组”,当通入三相对称电流时,每相正、负两个相带的磁势相互抵消,因此不存在偶数次谐波;相绕组磁势中幅值相等,相位相等者,三相合成磁势为零,因此也不存在 3 次或 3 的倍数次谐波^[14]。绕组设计目的在于,使绕组磁势的基波有尽可能大的幅值,磁势谐波幅值越小越好。

已知绕组所占槽号和节距,计算出分布系数 k_{qAv} , k_{qBv} , k_{qCv} 和短距系数 k_{yv} 。

若 $k_{qAv} = k_{qBv} = k_{qCv} = k_{qv}$, 三相绕组空间分布互差 120°, 绕组通过三相对称电流时,绕组系数 k_{uv} 按下式计算:

$$k_{uv} = k_{yv} k_{qv} \quad (2)$$

三相合成磁势中 v 对极的圆形旋转磁势幅值为

$$F_v = \frac{3\sqrt{2}}{\pi v} k_{uv} \omega I \quad (3)$$

式中, I 为每相电流有效值; ω 为每相每条并联支路的有效匝数; v 为次谐波磁势幅值不需要计算实际值,而只需要知道相对于基波幅值的百分比,设基波为 p 对极,则各谐波幅值用基波的百分值表示为

$$F_v(\%) = \frac{k_{uv} p}{k_{up} v} \times 100 \quad (4)$$

由此可得变前极和变后极绕组各次谐波含量,负号代表反转波,如表 1 所示。

可以看出,变前极和变后极的基波绕组系数分别为 0.925、0.945,绕组利用率较高,且各次谐波较小,绕组性能较好。

表 1 6 极和 8 极绕组磁势谐波分析

Tab. 1 Harmonic analysis of magnetic potential of 6-pole and 8-pole windings

谐波次数	6 极				8 极			
	分布系数	短距系数	绕组系数	幅值百分比/%	分布系数	短距系数	绕组系数	幅值百分比/%
1	0.958	0.966	0.925	100	0.96	0.985	0.945	100
-5	0.205	0.259	0.053	1.149	0.218	0.643	0.14	2.96
7	0.158	0.259	0.041	0.63	0.177	0.342	0.061	0.917
-11	0.126	0.966	0.122	1.197	0.177	0.342	0.061	0.584
13	0.126	0.966	0.122	1.013	0.218	0.643	0.14	1.138

3 电机设计与性能仿真

3.1 电磁设计

根据本文双速变极绕组感应电机的设计原则和

电磁设计原理,利用第一节选取的功率和第二节设计的绕组型式,所设计的电动机主要参数如表 2 所示。此双速变极电机除了绕组设计方案、线规、匝数以及铁芯长度缩短了 20 mm 以外,其余所用材料和尺寸都与 Y250-6 37 kW 型号电机完全一致,制造上

不会增加额外成本;电机采用标准件、标准尺寸与标准结构,提高了电机零部件的互换性和通用性,降低生产成本的同时,方便了维护和检修。

表2 变极电机主要参数

Tab. 2 Main parameters of double speed motor

参数	数值
额定功率/kW	33/16
额定电压/V	380
电源频率/Hz	50
定子外径/mm	400
定子内径/mm	285
转子外径/mm	283.9
转子内径/mm	85
铁芯总长/mm	195
定子轭高/mm	28.93
转子轭高/mm	51.31
极数	6/8
槽配合	72/58
绕组接法	Y/Y
绕组节距	10
线圈层数	2
线规/mm	6 × 1.30
定子槽内导体数	8
定子槽满率/%	77.15
转子斜槽度	100

对旋轴流风机用本文设计的变极双速电动机取代原前后两台所用型号为 Y280s-6 的电动机,不仅可以调节两级叶轮转速,使风机始终运行在高效区,而且此电动机比原风机配用的电机降低了一个中心高,制造成本有所降低。

3.2 电机电磁性能仿真分析

根据表1电机参数,在 Maxwell 中建立电机仿真计算模型,并对两种极数下电机模型的磁场进行仿真实验,图7和图8分别为负载状态下,电机在两种极数下稳定运行以后的磁力线分布图。

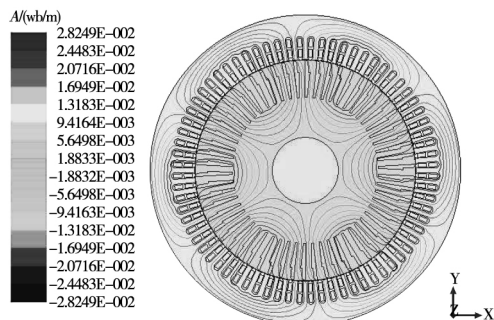


图7 6极运行状态下的磁力线分布

Fig. 7 Distribution of magnetic field lines under 6-pole

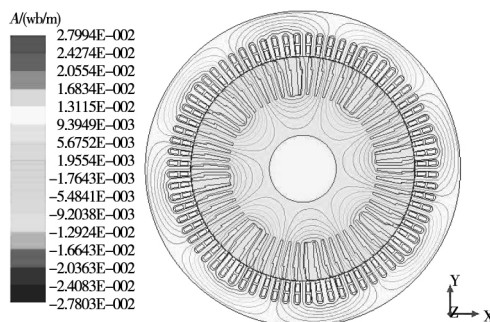


图8 8极运行状态下的磁力线分布

Fig. 8 Distribution of magnetic field lines under 8-pole

由图7和图8可以看出,在两种极数下,电机的磁力线均匀对称的分布。

图9和图10分别为两极数下感应电机负载情况下的磁密云图,可以看出,电机各部分磁密均匀对称。

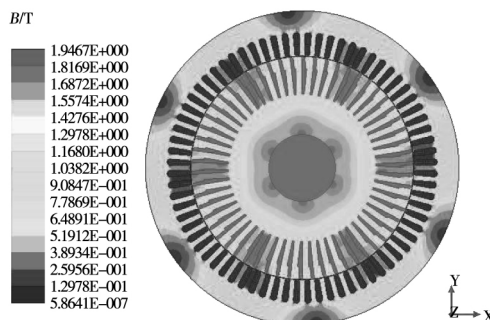


图9 6极运行状态下的磁密云图

Fig. 9 Magnetic density distribution of 6-pole

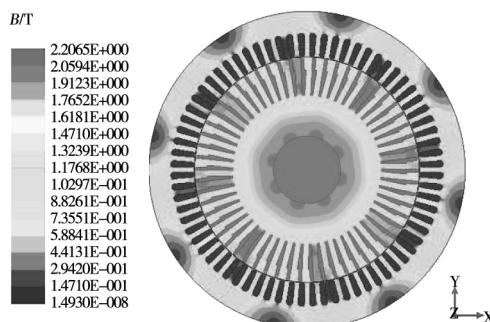


图10 8极运行状态下的磁密云图

Fig. 10 Magnetic density distribution of 8-pole

气隙磁场的波形对于感应电机影响极大,气隙磁密所含高次谐波越多,对电机的转矩影响越大,同时还会增加电机的铜耗和涡流损耗,图11和图12分别为两极运行状态下电机的气隙径向磁密波形图,以及对其进行谐波分析的结果,由波形图可以看出,气隙磁密波形接近正弦波形,幅值在0.8~1T之间,可以充分利用铁芯又不会造成饱和。从谐波

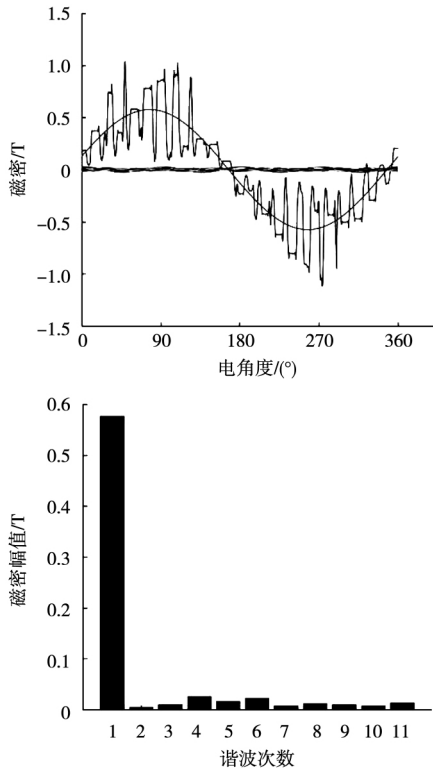


图 11 6 极状态下的气隙磁密及其谐波分析
Fig. 11 Distribution of air gap magnetic density and its Fourier decomposition of 6-pole

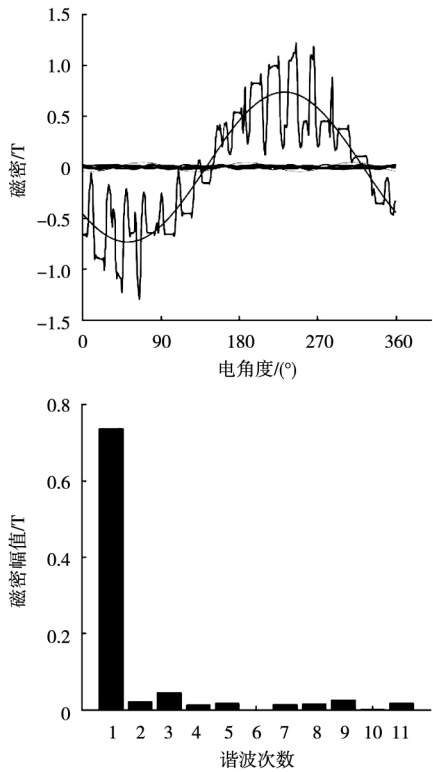


图 12 8 极状态下的气隙磁密及其谐波分析
Fig. 12 Distribution of air gap magnetic density and its Fourier decomposition of 8-pole

分析情况可以看出,多极数的气隙磁密大于少极数的气隙磁密,在两极运行情况下,谐波含量均较低。对电机在额定负载下的工作情况仿真分析,感应电动机在 $P=6$ 和 $P=8$ 状态下的电磁转矩如图 13 所示。稳定状态下,6 极下转矩为 $329 \text{ N}\cdot\text{m}$,8 极下转矩为 $212 \text{ N}\cdot\text{m}$,满足电机的运行要求。

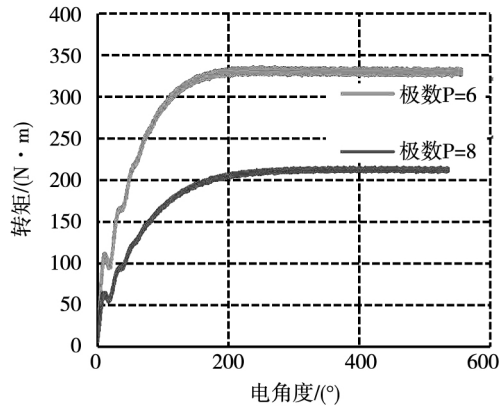


图 13 极数 $P=6$ 和极数 $P=8$ 状态下的电磁转矩
Fig. 13 Electromagnetic torque of 6-pole and 8-pole

3.3 电机主要运行指标

从三相感应电机的电磁计算得到电机的电磁性能,从电机性能数值结果来看,电机各项性能指标完全符合要求,具体数据见表 3。

表 3 6/8 极运行情况下的电机性能指标
Tab. 3 Motor performance index under 6/8-pole operation

性能指标	数值
效率/%	89/90.72
功率因数	0.88/0.79
最大转矩倍数	1.42/3.01
起动转矩倍数	1.10/2.56
起动电流倍数	3.29/6.46

4 结 论

本文对对旋轴流风机的专用双速电机进行研究,利用电机绕组理论和电机设计原理设计出了适合对旋轴流风机的专用双速电机,并对其进行有限元仿真分析,重点分析其电磁性能和机械性能。得出以下结论:

- 1) 用对称轴线法进行绕组变极,设计出单绕组 6/8 极双速变极绕组排列型式,对绕组利用率进行分析计算,变极前后绕组系数分别是 0.925 和 0.945,绕组利用率较高。

2) 依据电磁设计原理,设计出双速电机,并建立模型,对两种极数下的电磁性能进行有限元仿真分析,重点分析了两种状态下磁密分布、径向磁密谐波含量和电磁转矩;最后得出结论:双速变极电机运行性能较好,效率较高,满足风机的要求。

3) 本文设计的电机不仅在制作成本上有所降低,而且双速电机驱动风机运行,实现按需送风,大大提高风机的运行效率,达到节能的目的。

变极调速电机可以有级调节电机转速,可应用到各种机械负载类设备中,成本低,而且运行维护方便。

参考文献:

- [1] WALLIS R A. AXIAL Flow Fans: Design and Practice [M]. Academic Press, 2014.
- [2] 向毅. 对旋主通风机调节性能的试验研究 [J]. 矿业安全与环保, 2004, 31: 58.
XIANG Yi. Experimental Study on Regulation Performance of Counter Rotating Main Fan [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2004, 31: 58.
- [3] 叶学民, 李新颖, 李春曦. 第一级叶轮单动叶安装角异常对动叶可调轴流风机性能的影响 [J]. 中国机电工程学报, 2014, 34(14): 2297.
YE Xuemin, LI Xinying, LI Chunxi. Effect of the First-stage Impeller with Single Abnormal Blade on the Performance of a Variable Pitch Axial Fan [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(14): 2297.
- [4] 李春曦, 尹攀, 叶学民. 单动叶安装角深度异常对轴流风机性能及噪声影响的数值模拟 [J]. 中国机电工程学报, 2012, 32(35): 122.
LI Chunxi, YIN Pan, YE Xuemin. Simulation on Performance and Acoustic Characteristics with Deeply Abnormal Installation Angle of Single Blade in a Variable Pitch Axial Fan [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(35): 122.
- [5] 叶学民, 李鹏敏, 李春曦. 叶顶开槽对轴流风机性能影响的数值研究 [J]. 中国机电工程学报, 2015, 35(3): 652.
YE Xuemin, LI Pengmin, LI Chunxi. Numerical Investigation of Grooved Blade Tips Effect on the Performance of an Axial Flow Fan [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 652.
- [6] 王军, 宋文艳. 对旋式轴流风机的轮毂结构优化设计研究 [J]. 流体机械, 2000, 28(7): 18.
WANG Jun, SONG Wenyan. Research on Optimization Design of Hub Structure of Counter Rotating Axial Flow Fan [J]. Fluid Machinery, 2000, 28(7): 18.
- [7] 戴巨川, 刘德顺, 金永平, 等. 矿用对旋式轴流风机扩散器结构多目标优化设计 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(3): 386.
DAI Juchun, LIU Deshun, JIN Yongping, et al. Multi-objective Optimization Design of Diffuser Structure of Mine Contra-rotating Axial Fan [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(3): 386.
- [8] 郑海荣. 新型煤矿对旋风机用电动机的轴承结构 [J]. 防爆电机, 2010, 45(5): 2.
ZHENG Hairong. The Structure of Motor Bearing for Opposed-rotating Fan Used in New Type Coal Mine [J]. Explosion Proof Motor, 2010, 45(5): 2.
- [9] 唐子辉. 风机电机的变极调速与变频调速 [J]. 变流技术与电力牵引, 2008(5): 28.
TANG Zihui. Pole-changing Control and Frequency-changing Control of Fan Motor [J]. Converter Technology and Electric Traction, 2008(5): 28.
- [10] PUNDHIR Ds. A Study of Some Factors Affecting the Effectiveness of Casing Treatment in A Contrar-otating Axial Compressor Stage [J]. Indian Journal of Engineering and Material Sciences, 1994, 1: 199.
- [11] CHEN, Y. Y., LIU B., XUAN Y., et al. A Study of Speed Ratio Affecting the Performance of a Contra-rotating Axial Compressor [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2008, 222(7), 985.
- [12] 刘红蕊, 耿少娟, 方杭安, 等. 对旋轴流风机变转速匹配性能研究 [J]. 机械设计与制造, 2012, 3: 116.
LIU Hongrui, GENG Shaojuan, FANG Hangan, et al. Research on Matching Performance of Variable Speed of Counter Rotating Axial Flow Fan [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2012, 3: 116.
- [13] 艾子健, 秦国良, 文强, 等. 对旋风机变工况下两级叶轮变速匹配研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(4): 2.
AI Zijian, QIN Guoliang, HE Wenqiang, et al. Study on Two Impellers Speed-matching of Counter-rotating Fan Under Variable Operating Conditions [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(4): 592.
- [14] 付建华. 发电厂循环水泵变极调速系统节能研究及应用 [J]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [15] SUN Xiaobo, MENG Dawei. Numerical Investigation of Differential Speed Operation of Two Impeller of Contra-rotating Axial-flow Fan [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(10): 1.
- [16] 许实章. 电机绕组理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

(编辑: 王 萍)