

基于 Ansoft Maxwell 对单相步进电机性能影响因素的分析^{*}

陈金学^{1,2}, 毛可意^{1,2}, 赵飞^{1,2}, 卓亮^{1,2}

(1. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550008;

2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550008)

摘要: 基于 Ansoft Maxwell 有限元分析软件, 对单相步进电机性能的影响因素进行分析。分析结果表明: 使用温度、输入电压显著影响电机性能, 在设计时应充分考虑电机的应用领域及工况; 同轴度、气隙会对电机的性能产生一定影响, 应确保同轴度和气隙的最佳设计; 形位公差对电机性能的影响最小, 可忽略不计。

关键词: Ansoft Maxwell; 单相步进电机; 输出力矩; 输出角度

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)11-0085-04

Analysis of the Performance Factors of Single Phase Stepping Motor Based on Ansoft Maxwell^{*}

CHEN Jinxue^{1,2}, MAO Keyi^{1,2}, ZHAO Fei^{1,2}, ZHUO Liang^{1,2}

(1. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550008, China;

2. National Engineering Research Center for Small and Special Precision Motors, Guiyang 550008, China)

Abstract: Based on the Ansoft Maxwell, the factors affecting the performance of single phase stepping motor were analyzed. The results showed that operating temperature and input voltage significantly affected the performance of the motor, therefore, the application field and condition of the machine should be fully considered. Axiality and air gap, to an extent, had an effect on the performance of the motor, hence the optimal design of them should be guaranteed. Geometrical tolerances had minimal impact on the performance of the motor, which could be neglected.

Key words: Ansoft Maxwell; single phase stepping motor; output torque; output angle

0 引言

单相步进电机是步进电机中较为特殊的一种。它具有单步运动角度大、控制简单等特点, 已在军用的各个领域得到广泛的应用。Ansoft Maxwell 是世界著名的商用低频电磁场有限元分析软件之一, 基于麦克斯韦微分方程, 采用有限元离散形式, 将工程中的电磁场计算转变为庞大的矩阵求解, 可针对不同的实际问题迅速建立数值模型并准确计算^[1-3]。

本文基于 Ansoft Maxwell 有限元分析软件, 对用于某重点型号的单相步进电机最大输出力矩

(简称输出力矩)及输出转矩角度(半步距角内输出力矩大于等于 30 mN·m 的角度范围, 简称角度)的影响因素进行分析。

1 电机工作原理

单相步进电机的工作原理为: 电机在轴伸端装入凸轮及弹簧组件后, 在电磁力矩和扭簧力矩的共同作用下输出驱动力矩^[4]。在电机收到驱动信号后, 其转子轴产生较大的输出力矩, 在每一个驱动信号作用时, 能够可靠地运动到相应位置, 运动时既不丢步又不运动超程, 单步动作角度(步距角)为 90°。该电机具有单步运动角度大、输出

^{*} 基金项目: 蒸发循环制冷装置用带位置反馈电子膨胀阀研究

作者简介: 陈金学(1987—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为步进电机及微特电机。

力矩大、运动可靠等特点。

2 电机仿真模型建立

2.1 电机电磁参数

电机电磁参数如表 1 所示。考虑到公差范围对电磁性能的影响,在仿真时,以电磁力最小状态为基准,保证所有尺寸均处于电磁力最小的极限公差范围内。

表 1 电磁参数			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子铁心尺寸/mm	25×25	转子铁心长度/mm	9
定子铁心内径/mm	Φ13	转子轭厚度/mm	1.5
定子铁心长度/mm	9	转子极弧系数	0.4
定子轭厚度/mm	2.0	绕组匝数	110
定子极弧系数	0.336 6	并联支路数	1.0
转子铁心外径/mm	Φ12.93	绕组电阻/Ω	8.5
转子铁心内径/mm	Φ5	定转子材料	20WW1500

2.2 电机模型建立

基于 Ansys Maxwell,建立电机的电磁场仿真模型如图 1(a)所示,以瞬态场进行求解,以 S 作为求解区域外边界,忽略电机的端部效应,当作二维磁场来处理。为了计算准确,适当选择各区域剖分网格的大小,气隙与绕组剖分较细。求解域的网格剖分如图 1(b)所示。

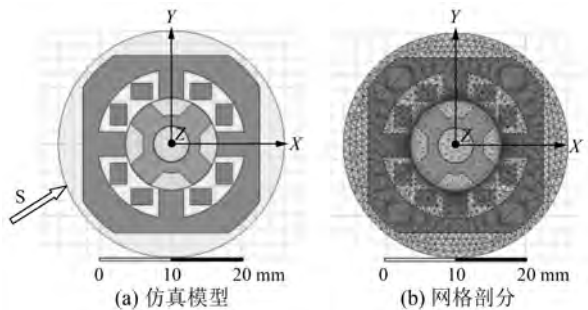


图 1 电磁场仿真分析模型与剖分

用磁矢位 A 描述场,瞬变电磁场的边界问题可以表达为^[5-7]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial y}\right) = -J_z + \sigma\frac{\partial A_z}{\partial t} \\ A_z|_s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ ——磁导率;
 A_z ——磁矢位轴向分量;

J_z ——电流源密度轴向分量;
 σ ——电导率。

因电机为单相直流电压供电,在电枢绕组中添加直流电压源激励即可。为了直观观察电机输出转矩宽度、角度,将电机转速设为 $1^\circ/\text{s}$,输出的时间曲线即为电机的角度曲线。

2.3 仿真与实测性能对比

电机在常温(20℃)、12 V 输入电压下,仿真与实测的矩角特性曲线对比如图 2 所示。由图 2 可知,仿真与实测的矩角特性曲线较吻合,仿真的输出转矩最大值为 53.7 mN·m,实测值为 51.5 mN·m,准确率达 95.9%;仿真角度为 26.5°,实测值为 25°,准确率达 94.3%。说明此仿真模型可以反映电机真实的输出特性,并进行电机的性能优化分析。

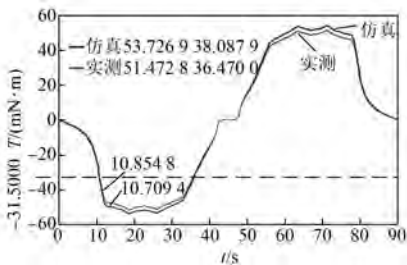


图 2 实测与仿真矩角特性对比

3 影响电机输出性能因素分析

3.1 温度(电阻)对输出性能的影响

Ansys Maxwell 对温度变化的分析是通过电阻来反映的。由式(2)可知,电机的工作温度直接影响绕组的阻值,当温度升高时,绕组阻值变大。

$$R_t = R_{20} \times (1 + 0.003\,8 \times \Delta t) \quad (2)$$

式中: R_t —— $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值;
 R_{20} ——20℃时的电阻值;
 $\Delta t = t - 20$ 。

所以电机在不同电阻下的输出性能即是在不同工作温度下的输出性能,如图 3 所示。

由图可知,在电压相同时,不同温度对输出转矩的影响极大,当温度越高时,电阻值越大,绕组相电流越小,所以电机安匝值越低,输出转矩越小。以图 3(c)为例,电压为 11 V 时,对应常温(20℃)的输出力矩为 50.0 mN·m,对应-40℃的输出力矩为 66.2 mN·m,增加了 32.4%;而 70℃

时对应的输出力矩为 $41.1 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 下降了 17.8%。还可以看出, 随着温度的升高, 角度也逐渐减小, 常温 (20°C) 时对应的输出角度为 25.6° , -40°C

时对应的输出角度为 27.4° , 增加了 7.0%; 而 70°C 时对应的输出角度为 24.2° , 下降了 5.5%。可见温度对输出性能的影响较大。

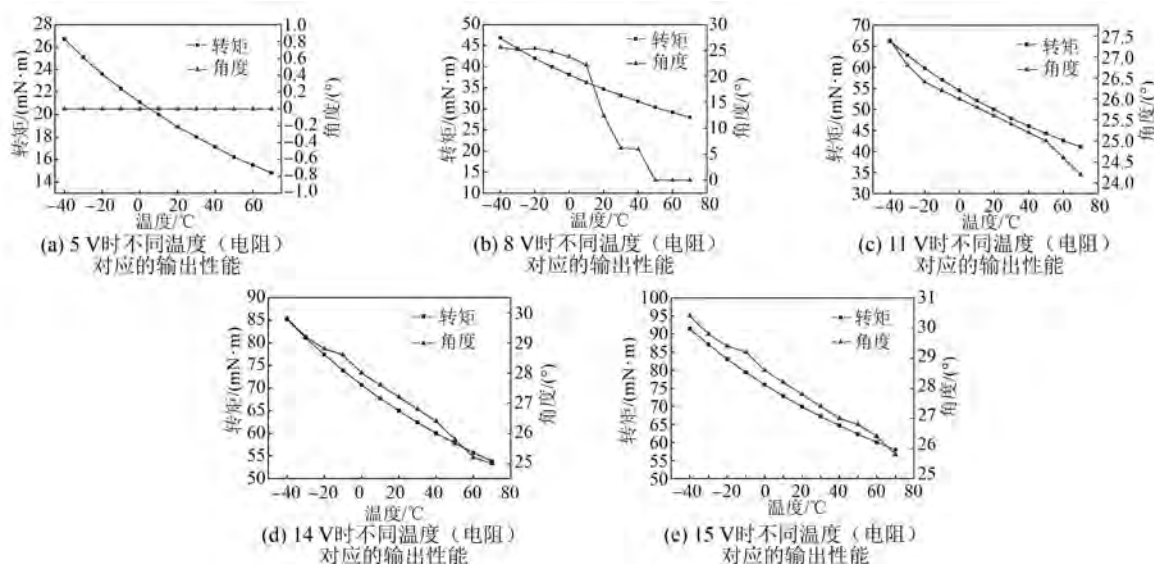


图3 温度(电阻)对输出性能的影响

3.2 电压对输出性能的影响

当温度不变时, 绕组阻值也恒定, 这时电压直接影响电流值的大小。电压越小, 电流也越小, 导致安匝值降低, 使得电机的输出性能变差。图4是温度分别为 -40°C 、 20°C 、 70°C 时不同电压对电机输出性能的影响。以图4(b)为例: 常温

(20°C) 时, 12 V 时输出力矩为 $55.0 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 5 V 时输出力矩为 $18.9 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 下降了 65.6%; 15 V 时的输出力矩为 $69.9 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 增加了 27.1%。由图4还可知, 在电压低于 7.5 V 时, 角度为 0, 随着电压的升高, 角度逐渐增大。结合三幅图还可看出, 在同一电压下, 温度越高, 输出性能越差。

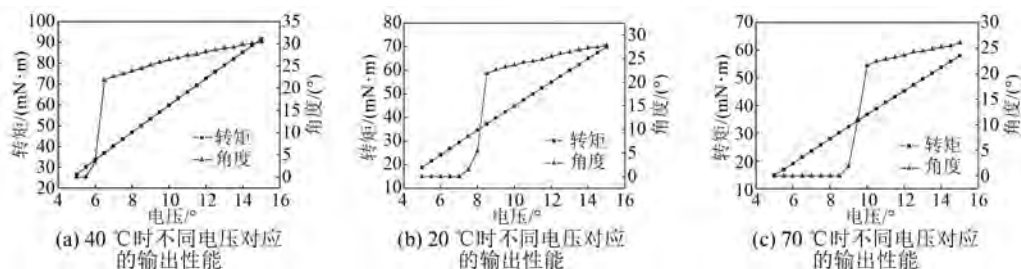


图4 电压对输出性能的影响

3.3 气隙对输出性能的影响

电机的气隙磁场与气隙大小有关, 气隙较大时, 气隙磁场变小, 导致电机的输出转矩减小, 输出性能变差。气隙对电机输出性能的影响如图5所示, 气隙分析范围为 $0.01 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。

由图5可知, 随着气隙的增大, 输出性能逐渐降低。其中输出转矩呈直线下降趋势。输出转矩从 $77.3 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 减小到 $66.1 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 降低了 14.5%;

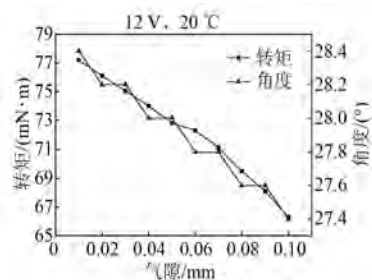


图5 气隙对输出性能的影响

输出角度从 28.4° 减小至 27.6° , 降低了 2.8%。所以理论上气隙越小越好, 但是在实际工程设计中, 也要综合考虑设计要求、加工条件和制造成本等因素, 同时气隙过小, 易导致电机卡滞, 所以设计时应综合考虑。

3.4 同轴度对输出性能的影响

电机的同轴度会对气隙场分布的均匀性产生一定影响。由于电机的气隙较小, 同轴度分析范围设为 $0 \sim 0.04$ mm, 步距为 0.01 mm, 同轴度对电机输出性能的影响如图 6 所示。

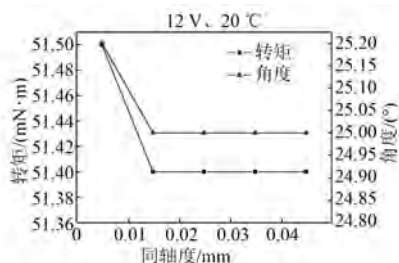


图6 同轴度对输出性能的影响

从图6可以看出, 同轴度对输出性能和电机的输出角度的影响均不大, 但是由于同轴度对电机转动的平稳性有一定的影响, 所以在设计电机同轴度时以 $0 \sim 0.02$ mm 为宜。

3.5 形位公差对输出性能的影响

3.5.1 铁心长度公差对输出性能的影响

从式(3)中可以直观看出, 电机的安匝值与铁心长度 l 成正比, 又因为输出性能与安匝值成正比, 所以, 输出性能与铁心长度成正比。即随着铁心长度的增加, 电机输出性能也随之提高。

$$F = Ni = Hl = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu A} = \Phi R_m \quad (3)$$

式中: N ——线圈匝数;

F ——作用在铁心磁路上的安匝值, 称为磁路的磁动势, A;

H ——磁场强度, $A \cdot m^{-1}$;

B ——磁感应强度, T;

μ ——铁磁材料的磁导率, H/m;

Φ ——磁通量, Wb;

R_m ——磁路中的磁阻, A/Wb。

铁心长度公差对电机输出性能的影响如图7所示。

由图7可知, 随着电机长度的增加, 电机输出

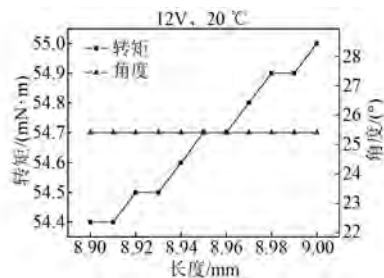


图7 铁心长度公差对输出性能的影响

转矩随之增加, 但是由于公差较小 ($0.01 \sim 0.1$ mm), 输出转矩的变化幅值在 0.6 mN·m 以内。从图7中还可知, 该铁心长度公差对驱动器输出转矩的角度无影响。

3.5.2 磁极宽度公差对输出性能的影响

增加定子铁心磁极宽度可以增加磁路面积, 改善磁路饱和状态, 增强磁路中的有效磁感应强度, 从而提高输出性能。Ansoft 中磁极宽度与极弧系数相对应, 可以通过改变极弧系数来改变磁极宽度。铁心磁极宽度公差对电机输出性能的影响如图8所示。

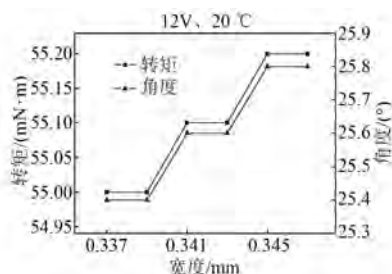


图8 磁极宽度公差对输出性能的影响

由图8可知, 极弧系数的变化范围为 $0.3366 \sim 0.3466$, 步距为 0.01, 对应的磁极宽度为 $3.44 \sim 3.54$ mm, 随着磁极宽度的增加, 输出转矩会随之增加, 但增加幅值较小, 在 0.2 mN·m 以内。从图中还可看出铁心宽度对角度影响较小, 增加幅值在 0.4° 以内。

4 结 语

(1) 文中所提仿真模型的精度达到 94% 以上, 可用于仿真分析及改进设计。

(2) 使用温度、输入电压对电机性能的影响最大, 在设计时要充分考虑电机的工况及使用范围。
(下转第 94 页)

表 2 程序计算结果与实体电机数据的对比			
对比参数	计算结果	实际数据	误差/%
水流量/(m ³ ·h ⁻¹)	8.17	8.1	0.9
进水温度/℃	13	13.2	1.5
出水温度/℃	14.5	14.5	0
环境温度/℃	16.5	16.5	0
水路结构型式	推荐轴向式	轴向式	-
水套外径/mm	875	875	0
水套内径/mm	770	770	0
水道宽度/mm	45	45	0
水道高度/mm	15	16	6.25
隔水台宽度/mm	18.7	20	6.5
水套壁厚/mm	18.8/18.8	22/14.5	22
水路轴向设计长度/mm	1 150	1 145	0.45
水道条数	40	40	0
机壳水路带走热量/kW	14.25	12.23	16.5
水阻压差损失/MPa	0.59	给定水压 2.0	-
定子温度/℃	90.97	93.8	3.0
转子温度/℃	99.80	无数据	-
机壳表面温度/℃	19.61	18.2	7.7

3 结 语

本文在流体力学及电机传热学理论计算的基础上,利用 VB 语言开发编制了具有参数化和可

视化的水冷电机水路结构设计与温升计算程序。同时,以 YBSD 矿用隔爆型三相异步电机为例,应用计算程序对其机壳水路进行了结构设计、热力计算与电机温升计算;通过与实际电机结构尺寸及试验数据对比,表明了该程序方法的可行性与准确性,并可在其他水冷电机水路结构设计中推广应用。

【参 考 文 献】

[1] 丁舜年.大型电机的发热与冷却[M].北京:科学出版社,1992.

[2] 魏永田,孟大伟,温嘉斌.电机内热交换[M].北京:机械工业出版社,1998.

[3] 吴望一.流体力学[M].北京:北京大学出版社,1982.

[4] 李青青,黄勤,杨立,等.永磁同步电机水冷系统散热参数分析与热仿真[J].机械设计与制造,2014(4): 188-191.

[5] 温嘉斌,许明宇.防爆型水冷电机内换热与温度场计算[J].电机与控制学报,2009,13(2): 393-397.

[6] 梁培鑫,柴凤,李翠萍,等.水冷电机水路设计的研究[J].微电机,2013,46(5): 1-4.

[7] 李子健.电动车用水冷感应电机温度场及其水冷系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

收稿日期: 2016 -08 -15

(上接第 88 页)

(3) 同轴度、气隙对电机性能的影响不大,应追求最好的同轴度和最小的气隙,但气隙过小,存在定转子卡滞的风险,设计时应综合考虑。

(4) 形位公差对电机性能的影响较小,基本可忽略不计。

【参 考 文 献】

[1] 坂本正文.步进电机应用技术[M].王自强,译.北京:科学出版社,2010.

[2] 赵博,张洪亮.Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[3] 王宗培,姚宏.步进电机计算和设计方法的研究

[M].南京:东南大学出版社,1994.

[4] 刘宝廷,程树康.步进电机及其驱动控制系统[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.

[5] CHARI M V K, SILVESTER P P.电磁场问题的有限元解法[M].史乃,唐任远,译.北京:科学出版社,1985.

[6] 陈晔.两自由度电机矩角特性的计算与分析[D].杭州:浙江大学,2005.

[7] WALE J D, POOLLOCK C. Hybrid stepping mortors and drives[J].Power Engineering Journal, 2001, 15(1): 5-12.

收稿日期: 2017 -09 -19