

本文全文线上首发由  
上海电机系统节能工程技术  
研究中心有限公司

支持

赖文海,黄开胜,周游.  
永磁同步电机转子偏心电磁力和  
挠度的分析与计算.  
电机与控制应用,2022,49(1):74.

## MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐压测试仪



SEARI  
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063 邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 [www.seari.com.cn](http://www.seari.com.cn)

# 永磁同步电机转子偏心电磁力和挠度的分析与计算

赖文海<sup>1</sup>, 黄开胜<sup>2</sup>, 周游<sup>3</sup>

(1. 广东省东莞电机有限公司, 广东 东莞 523130;

2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006;

3. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411100)

**摘要:** 为了准确计算永磁同步电机(PMSM)转子的挠度,降低电机的生产制造成本,基于理论解析和有限元法,分析与计算了转子偏心电磁力和挠度。推导了PMSM不平衡磁拉力的解析表达式,详细介绍了不平衡磁拉力和转子挠度的有限元计算方法。以355 kW 1 500 r/min PMSM为例,对比了不平衡磁拉力、转子挠度的有限元和解析法的计算结果,验证了有限元法的可靠性,对PMSM转子机械的准确计算和振动噪声分析具有一定的参考意义。

**关键词:** 永磁同步电机; 转子偏心; 不平衡磁拉力; 转子挠度; 有限元

**中图分类号:** TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)01-0074-06

**doi:** 10.12177/emca.2021.160

## Analysis and Calculation of Eccentric Electromagnetic Force and Deflection of Permanent Magnet Synchronous Motor Rotor

LAI Wenhai<sup>1</sup>, HUANG Kaisheng<sup>2</sup>, ZHOU You<sup>3</sup>

(1. Guangdong Dongguan Electric Motor Co., Ltd., Dongguan 523130, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, China)

**Abstract:** In order to accurately calculate the deflection of permanent magnet synchronous motor (PMSM) rotor and reduce the production cost of motor, the eccentric electromagnetic force and deflection of the rotor are analyzed and calculated based on theoretical analysis and finite element method. The analytical expression of unbalanced magnetic pull of PMSM is derived, and the finite element calculation methods of unbalanced magnetic pull and rotor deflection are introduced in detail. Taking a 355 kW 1 500 r/min PMSM as an example, the calculation results of finite element method and analytical method of unbalanced magnetic pull and rotor deflection are compared, which verifies the reliability of finite element method and has certain reference significance for the accurate calculation of rotor machinery and the study of vibration and noise of PMSM.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); rotor eccentricity; unbalanced magnetic pull; rotor deflection; finite element

## 0 引言

随着居民生活用电和工业用电的不断攀升,

部分地区倡导工业生产错峰用电和采取拉闸限电来调整国内日益上涨的电力负荷。能源急缺的问题日益严重,合理用电和提升电器设备能效是当

收稿日期: 2021-09-30; 收到修改稿日期: 2021-12-10

作者简介: 赖文海(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为新型特种电机设计、电机降噪。

黄开胜(1961—),男,硕士,教授,研究方向为新型特种电动机设计及其控制、电机降噪、电机CAD。

周游(1988—),男,博士研究生,研究方向为计算结构动力学、结构优化。

务之急。国家在“十三五”节能减排综合工作方案中重点强调了电机系统能效提升的节能减排工作。2020年5月,国家标准化管理委员会发布标准 GB 18613—2020《电动机能效限定值及能效等级》,此标准于2021年6月强制实施。淘汰了YE2(旧三级能效)电机, YE3和YE4分别降为新三级和二级能效电机,电机产品开始进入高效节能的时代。

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度大、高效节能、控制精准、稳定性强等优点。采用标准三相异步电机铸铁外壳的PMSM,更具有安装方便、通用性强的优点,铸铁机壳PMSM在现代工业制造中得到了广泛应用。我国大部分国企转制民营的工业异步电机生产企业具有较深厚的技术沉淀,在铸铁机壳PMSM产品上可以实现快速延伸和转型。使用铸铁机壳的PMSM产品可以实现与标准三相异步电机相同的安装尺寸,根据不同使用工况,还可以降低1~3机座号,但是在相同的机座号下提高电机的功率,转子上产生的不平衡磁拉力将会变大,并且随着PMSM产品竞争的加剧,电机定转子之间的气隙通常做得较小,相同刚度的转子在较小气隙和较大不平衡磁拉力的情况下,转子挠曲程度会变大,造成不平衡磁拉力和挠度再次变大,进而导致电机振动噪音的加大、主轴和轴承寿命降低,严重时有可能造成电机托底等问题,对电机的机械结构造成了新的考验。

文献[1]通过理论推导了分数槽集中绕组电机不平衡磁拉力的解析表达式。文献[2]通过区域法和摄动法研究计算了两极平行充磁实心圆柱式PMSM转子偏心磁场和不平衡磁拉力。文献[3-8]对转子偏心不平衡磁拉力进行理论推导和有限元法计算。文献[9]详细介绍了转子动力学的理论基础和相关计算方法。文献[10-13]通过解析计算和有限元法计算了转子挠度。但缺少对转子偏心电磁力和转子挠度有限元法计算的综合介绍与研究。

本文以目前新型节能的大功率PMSM产品为研究对象,重点研究转子偏心电磁力和挠度的准确计算方法。详细阐述转子偏心电磁力和转子挠度的理论解析和有限元计算过程,并将两种方法的计算结果进行对比,验证了所提方法的可行性和可靠性。

## 1 不平衡磁拉力产生的原因

造成PMSM不平衡磁拉力的主要因素可以分为电磁和机械两大类:

(1) 电磁因素。电磁设计造成的磁路不对称,如分数槽极配合、不均匀气隙、磁极偏移等。生产制造中造成的磁场不对称,比如装错磁钢、磁钢性能一致性差、绕错线圈、定子落线错误等。使用过程中造成的磁场不对称,比如供电电源不对称、高温过载造成部分磁钢退磁。

(2) 机械因素。结构设计造成的转子偏心,如没有充分考虑轴承游隙、轴承刚性变形、主轴挠度、电机气隙太小等。机械加工造成的转子偏心,这个因素主要取决于电机定子、转子、端盖和轴承的机械加工和配合的精度。装配和拆卸不当,各个零部件受力不均匀变形造成的转子偏心。轴承保养或者选用不当,轴承磨损造成的转子偏心。各个零部件质量不均匀,动平衡精度不达标等。

本文主要研究转子偏心造成的不平衡磁拉力,转子偏心结构示意图如图1所示,转子圆心和定子圆心偏心距为 $px$ ,  $\alpha$ 为机械角位置,  $\delta_0$ 为均匀气隙的长度,  $\gamma$ 为偏心气隙角位置。

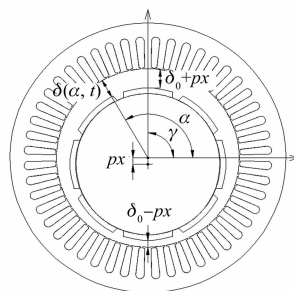


图1 转子偏心结构示意图

任意 $t$ 时刻,  $\alpha$ 位置的气隙大小可以表示为

$$\delta(\alpha, t) = \delta_0 + px(\alpha - \gamma) \quad (1)$$

任意 $t$ 时刻,  $\alpha$ 位置的气隙磁密可以表示为

$$B(\alpha, t) = \mu_0 \frac{F}{\delta(\alpha, t)} = \mu_0 \frac{F}{\delta_0 + px(\alpha - \gamma)} \quad (2)$$

根据麦克斯韦张量法,任意 $t$ 时刻,  $\alpha$ 位置的径向力密度和切向力密度可以表示为

$$f_n(\alpha, t) = \frac{B_n(\alpha, t)^2 - B_t(\alpha, t)^2}{2\mu_0} \quad (3)$$

$$f_t(\alpha, t) = \frac{1}{\mu_0} B_n(\alpha, t) \times B_t(\alpha, t) \quad (4)$$



式中： $\mu_0$  为真空磁导率； $B_n(\alpha, t)$  为径向磁密分量； $B_t(\alpha, t)$  为切向磁密分量。

由式(2)~式(4)可以看出，偏心转子的气隙不均匀，气隙小则磁阻小磁密大，气隙大则磁阻大磁密小，导致沿气隙圆周分布的磁密和电磁力密度发生改变以致不对称，最终将会在转子表面合成指向气隙较小一侧的不平衡电磁力。

## 2 不平衡磁拉力和挠度的解析计算

### 2.1 不平衡磁拉力的解析计算

PMSM 常采用转子外圆偏心技术，使定转子间的气隙不均匀，进而可以改善转子磁场<sup>[14]</sup>，图2为不均匀气隙的内置式永磁电机(IPM)单元电机结构示意图。

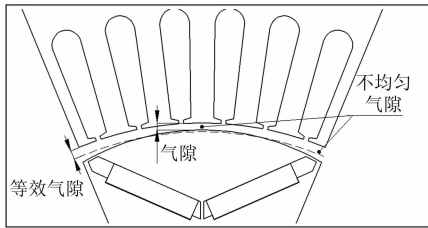


图2 不均匀气隙 IPM 结构示意图

本文以 355 kW 1 500 r/min IPM 结构的铸铁机壳 PMSM 为例，计算转子偏心的不平衡磁拉力和转子挠度，电机的电磁和尺寸参数如表 1 所示。

表 1 电磁和尺寸参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电机极数	8	平均气隙磁密/T	0.7
定子内圆/mm	390	气隙最大处磁密/T	0.705
转子铁心外圆/mm	387.2	气隙最小处磁密/T	0.697
转子铁心内圆/mm	143	转轴材料	45 钢
有效铁心长度/mm	400	转轴弹性模量/GPa	210
气隙/mm	1.4	转轴重量/N	1 976
转子外圆偏心/mm	50	转子铁心重量/N	2 710
等效气隙/mm	3.08	动平衡板重量/N	262

假设转子在垂直方向上发生偏心，考虑不同电机类型、磁场分布、磁路饱和、开槽等结构影响，可以推导出初始单边磁拉力的解析表达式<sup>[15]</sup>：

$$F_M = \frac{\beta \pi D_2 l_{ef}}{\delta_{avg}} \times \frac{B_{\delta}^2}{2\mu_0} e_0 \quad (5)$$

式中： $\beta$  为经验系数，感应电机  $\beta = 0.3$ ，凸极同步

电机、直流电机  $\beta = 0.5$ ，汽轮发电机  $\beta = 0.2$ ，此处 PMSM 取  $\beta = 0.3$ ； $D_2$  为转子外圆直径； $l_{ef}$  为有效铁心长度； $B_{\delta}$  为平均气隙磁密； $\delta_{avg}$  为等效气隙长度； $e_0$  为初始偏心，此处取  $0.1\delta$ 。

文中所有公式的单位标准参考标准 GB 3101—1993，根据表 1 参数计算得到不平衡磁拉力为 1 293.6 N。

由于目前 PMSM 不断优化出现新的转子结构，例如转子外圆偏心、转子外圆开辅助槽、增大交直轴磁阻比设计等结构，使得式(5)中的经验系数  $\beta$  取值无法具有普适性。文献[10]忽略大中型高压高速电机端部效应的影响，推导了单边磁拉力的解析表达式：

$$F_M = \frac{\pi D_2 l_{ef} (B_{\delta 2}^2 - B_{\delta 1}^2)}{4\mu_0} \quad (6)$$

式中： $B_{\delta 2}$  为气隙最小处磁极平均磁密； $B_{\delta 1}$  为气隙最大处磁极平均磁密。

根据式(6)计算得到不平衡磁拉力为 1 085.7 N。这种方法需要获得较为精确的最大和最小处气隙磁密来保证计算结果的准确性。针对目前 PMSM 转子设计越来越精细和缩短开发周期的要求，可以依靠有限元软件来计算。

### 2.2 转子挠度的解析计算

本文采用能量法<sup>[15]</sup>和当量直径法<sup>[16]</sup>来计算转子挠度，不平衡磁拉力采用式(5)的计算结果。将转子前后轴承简化为铰支约束，不平衡磁拉力和轴上零部件的重力简化为集中力作用，转子的简化模型如图 3 所示， $a_i, b_i$  表示距 A、B 铰支的距离， $i = 1, 2, 3$ ； $G$  为转轴、转子铁心重力和两侧平板的重力之和； $F_M$  为不平衡磁拉力。

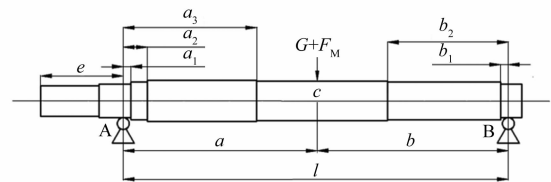


图3 转子的简化模型

#### 2.2.1 基于能量法的挠度计算

根据材料力学，弯矩  $M$  作用在一端固定长度为  $l$  的等截面梁上，所储存的变形能为<sup>[17]</sup>

$$d\omega = \int_0^l \frac{M^2}{2EJ} dx \quad (7)$$

对图 3 变截面梁采取分段计算,  $a$  段轴内所储存的变形能为

$$\omega_a = \sum_0^a \int_0^{a_i} \frac{M^2}{2E \times J_{ai}} dx \quad (8)$$

式中:  $E$  为转轴的弹性模量;  $J_{ai}$  为铰支 A 侧第  $i$  段轴最大轴径的截面惯性矩。根据卡斯奇诺定理得到  $a$  段轴的假想挠度:

$$f_a = \frac{Gb}{3E(a+b)} \sum \frac{a_i - a_{i-1}}{J_{ai}} \quad (9)$$

同理可以得到  $b$  段轴的假想挠度  $f_b$ 。根据几何关系可知重力  $G$  引起的挠度为

$$f_G = \frac{Gb}{3E(a+b)^2} \left( b^2 \sum \frac{a_i - a_{i-1}}{J_{ai}} + a^2 \sum \frac{b_i - b_{i-1}}{J_{bi}} \right) \quad (10)$$

考虑不平衡磁拉力的挠度为

$$f = \frac{f_a \times (F_M + G - f_a e_0 F_M)}{G - f_a e_0 F_M} \quad (11)$$

根据式(9)~式(11)以及表 1 和表 2 中的参数, 可以计算得到本文案例转子的挠度。

表 2 基于能量法的转子挠度计算

计算项	轴段号参数及计算结果			
	1	2	3	4
$a_i/\text{mm}$	27.5	87.5	480.5	698.5
$d_{a_i}/\text{mm}$	120	135	148	143
$b_i/\text{mm}$	27.5	408	688.5	27.5
$d_{b_i}/\text{mm}$	120	135	143	120
$f_a/\text{mm}$		0.062 1		
$f_b/\text{mm}$		0.066 3		
$f_G/\text{mm}$		0.081		
$f/\text{mm}$		0.102 2		

注:  $d_{a_i}$  表示铰支 A 侧第  $i$  段最大的轴径

### 2.2.2 基于当量直径法的挠度计算

当量直径法是将不等截面梁等效为等截面梁的一种简化计算方法, 等截面的当量直径为

$$d_m = \sqrt[4]{\frac{a+b}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{d_i^4}}} \quad (12)$$

将图 3 转轴不同直径的轴端分别分段,  $l_i$  表示为不同轴段的长度;  $d_i$  表示为各轴段直径。本案例基于当量直径法的转轴最大挠度为

$$f = \frac{(G + F_M) b(a+b)^2}{9\sqrt{3} \times 10^4 d_m^4} \left[ 1 - \left( \frac{b}{a+b} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

最大挠度计算结果为 0.090 6 mm。

## 3 偏心电磁力的有限元分析与计算

目前已有较多电机振动噪声的相关研究, 并且提到了采用 Maxwell 软件, 该软件可以准确分析计算各种复杂结构电机的电磁场, 特别是转子偏心的电磁力计算方面, 但却缺乏相关内容的详细介绍, 下面将对此进行详细阐述。

### 3.1 转子偏心电磁力理论

通过几何关系, 可以将式(3)和式(4)转化成任意  $t$  时刻  $x$  和  $y$  方向电磁力密度:

$$f_x = \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{B_n^2 - B_t^2}{2} \cos\theta - B_n B_t \sin\theta \right] \quad (14)$$

$$f_y = \frac{1}{\mu_0} \left[ \frac{B_n^2 - B_t^2}{2} \sin\theta + B_n B_t \cos\theta \right] \quad (15)$$

沿转子表面积分再乘以铁心长度, 即可得到  $x$  和  $y$  方向以及合成电磁力:

$$F_x = \int_0^{2\pi} f_x \cdot r \cdot l_{ef} d\theta \quad (16)$$

$$F_y = \int_0^{2\pi} f_y \cdot r \cdot l_{ef} d\theta \quad (17)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (18)$$

式中:  $r$  为转子外圆半径。

Maxwell 软件可以方便得到模型上任意半径  $r$ , 位置角为  $\theta$  的点的磁场矢量  $B(\theta, r)$ , 再通过几何关系可以得到径向和切向磁场分量:

$$B_n(\theta, r) = B_x(\theta, r) \cos\theta + B_y(\theta, r) \sin\theta \quad (19)$$

$$B_t(\theta, r) = B_y(\theta, r) \cos\theta - B_x(\theta, r) \sin\theta \quad (20)$$

由于 Maxwell 软件输出的磁场曲线为求解路径上  $n$  个点数值的拟合曲线, 故可以将式(16)和式(17)的曲线积分计算转化为  $n$  个点电磁力的算数平均计算:

$$F_x = \frac{l_{ef}}{\mu_0} \sum_{i=1}^n \frac{f_{xi} \times 2\pi r}{n} \quad (21)$$

$$F_y = \frac{l_{ef}}{\mu_0} \sum_{i=1}^n \frac{f_{yi} \times 2\pi r}{n} \quad (22)$$

### 3.2 转子偏心电磁力有限元计算

方法 1: 根据式(18)~式(22)在 Maxwell 软件

中创建电磁力输出项,在转子模型外圆表面绘制圆形求解路径<sup>[18]</sup>,可以通过软件求解偏心转子的电磁力。为了便于得到不同求解路径和铁心长度计算,本文讨论力密度的公式,电磁力仅需要再乘以圆形路径半径和铁心长度即可得到。电机负载时,沿转子圆周表面的 $f_x$ 和 $f_y$ 分布如图4和图5所示。

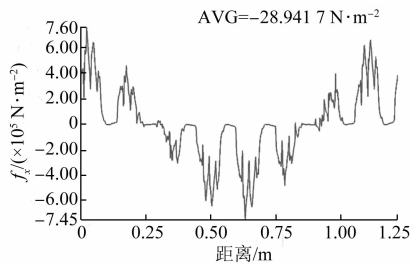


图4 x方向力密度分布

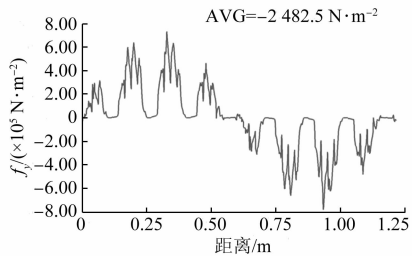


图5 y方向力密度分布

方法2:通过前面的数据可以计算得到 $F_x = 14.1 \text{ N}$ ,  $F_y = 1\ 208 \text{ N}$ ,  $F = 1\ 208.1 \text{ N}$ 。此外,通过软件可以在转子模型上设置 Force parameter 直接计算得到 $F_x$ 和 $F_y$ ,根据式(18)关系,进而可以计算得到电机负载时随时间变化的不平衡磁拉力曲线如图6所示,其平均值为 $1\ 256.4 \text{ N}$ 。

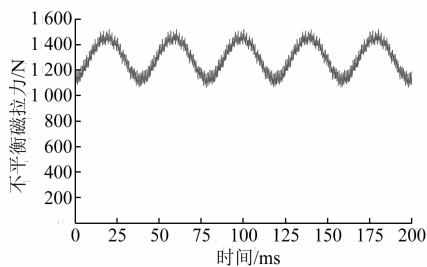


图6 不平衡磁拉力的时间变化曲线

解析法和有限元法电磁力计算结果接近,结果如表3所示。有限元方法可以充分考虑转子的复杂模型、齿槽效应、磁饱和等影响,不需要设置经验系数,计算结果更可靠。

表3 不平衡磁拉力结果对比

计算方法	不平衡磁拉力/N	对应公式
解析计算方法1	1 293.6	式(5)
解析计算方法2	1 085.7	式(6)
有限元计算方法1	1 208.1	式(14)~式(22)
有限元计算方法2	1 256.4	-

#### 4 转子挠度的有限元分析与计算

下文主要介绍转子挠度有限元计算过程中转子模型的简化,负载及约束的施加。

##### 4.1 转子模型简化

转子挠度静力学分析常采用三维有限元计算。转子铁心由一定数量的矽钢片叠压而成,PMSM的转子铁心常采用铆钉、自扣槽、螺杆、螺母等方式紧固,转子模型如图7所示。



图7 转子模型

在转子受力挠曲时,矽钢片之间的挤压摩擦,以及磁钢、铆钉、螺杆的嵌套会减小主轴的挠曲,但影响有限。另外,因为实际转子铁心的三维模型很复杂,有限元的计算量过于庞大,计算机容易出现内存溢出,所以转子铁心、磁钢简化为对主轴的重力作用。

动平衡板与主轴过盈配合可以增大所在轴段的截面惯性矩,提高抗弯能力,但两端的动平衡板轴向尺寸较小,因此本文忽略动平衡板模型,将其简化成动平衡板对主轴的重力作用。

轴承可以简化成等效的铰支约束,最终可以将图7模型简化为只有转轴与载荷和约束的模型。

##### 4.2 载荷和约束的施加

为了便于施加载荷和约束,需要将转轴分割出轴承和铁心轴段位,如图8所示,并且在软件中把分段模型合成一个整体。

在图8铁心段y负方向上施加不平衡磁拉力

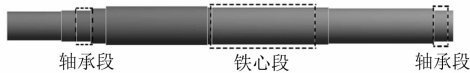


图8 转子分段示意图

1 208.1 N,再叠加上转子铁心、动平衡板和磁钢的重力 2 972 N,最后对转轴模型  $y$  负方向上赋予重力加速度完成载荷施加。

施加约束时需要分析实际模型的空间自由度。本文所述转子采用深沟球轴承,在后轴承外圈采用波形弹簧对转子轴向方向进行预紧,故可以将前、后轴承作用分别近似等效为固定铰支(自由度为 3 个正交轴向转动)和可动铰支约束(自由度为 3 个正交轴向转动和 1 个轴向平动)。

#### 4.3 挠度计算结果

计算结果如图 9 和图 10 所示,图 9 中转轴的  $y$  方向的变形量用灰度图体现,变形量越大颜色越深。图 10 为沿轴中心线,转子在  $y$  方向的挠度分布,转轴挠度最大发生在距离轴伸前端面 1 000 mm 处,最大挠度为 0.092 6 mm。

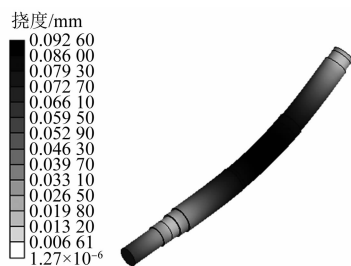


图9 转子挠度灰度图

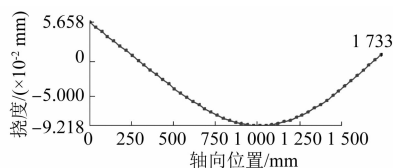


图10 转子挠度分布图

## 5 计算结果对比

有限元挠度计算值 0.092 6 mm 是使用不平衡磁拉力有限元计算值 1 208.1 N 代入计算的结果,将该不平衡磁拉力有限元计算结果代入能量法以后的挠度值为 0.099 4 mm,代入当量直径法以后的挠度值为 0.089 4 mm,三种方法的计算结果接近,验证了转子挠度有限元计算方法的可靠性。

有限元计算的转子挠度占电机气隙的 6.6%,根据经验,PMSM 转子挠度不超过电机气隙的 8%可以保证安全可靠运行。测试的电机振动值符合国家标准 GB/T 10068—2020 中机械振动限值要求。

## 6 结 语

本文以新型节能产品 355 kW 1 500 r/min 铸铁机壳 PMSM 为例,推导得到 PMSM 不平衡磁拉力的解析表达式,解析表达式适当转化以后,便于将不平衡磁拉力公式输入到 Maxwell 软件并求解。本文详细介绍了转子不平衡磁拉力和挠度的有限元分析计算方法,通过对比解析计算方法和结果,验证了所提方法的可行性和可靠性,有限元方法可以考虑各种复杂模型、磁场饱和影响,不需要设置经验系数,尤其是对转子结构较为复杂的 PMSM,所提出的有限元方法计算结果更可靠。

### 【参考文献】

- [1] 田园园,莫会成. 分数槽集中绕组永磁交流伺服电机定子磁动势及绕组系数分析[J]. 微电机,2012,45(4): 1.
- [2] 张岩岩,耿海鹏,周健,等. 永磁同步电机转子偏心磁场解析计算[J]. 西安交通大学学报,2019,53(2): 96.
- [3] PERERS R, LUNDIN U, LEIJON M. Saturation effects on unbalanced magnetic pull in a hydroelectric generator with an eccentric rotor [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(10): 3884.
- [4] DORRELL DG, SHEK JKH, MUELLER MA, et al. Damper windings in induction machines for reduction of unbalanced magnetic pull and bearing wear [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2013,49(5): 2206.
- [5] 于慎波. 永磁同步电动机振动与噪声特性研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2006.
- [6] 肖丰义. 永磁同步电主轴设计与动态特性分析 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2012.
- [7] 李嘉明. 永磁同步电主轴转子疲劳强度分析 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [8] 左曙光,高丽华,吴旭东,等. 电动车用永磁同步电机转子偏心对电磁力影响分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2014,32(2): 166.

(下转第 95 页)

电磁方案进行温度场分析。结果表明,按照最小转矩进行电磁设计,电机长时间运行在过载状态,发热严重,动态效率低;按照最大转矩进行电磁设计,尽管发热程度最低,但是材料用量过大,电机大部分运行在轻载状态;基于中间转矩且留有一定裕度下的电磁性能良好,发热程度适中,适用于负载呈波动规律下电磁方案的校核。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 顾溶时. 交流永磁同步电动机在纺织机械中的应用[J]. 电世界, 2000, 41(1): 6.
- [ 2 ] 杨江飞, 管华, 杨春华, 等. 负载变化对永磁同步电机性能的影响分析[J]. 电气工程学报, 2018, 13(9): 20.
- [ 3 ] 祝天利, 韩雪岩, 朱龙飞. 基于场路耦合的机器人永磁电动机损耗及其温升分析[J]. 电气技术, 2020, 21(6): 7.
- [ 4 ] WANG M, ZHU H, ZHOU C, et al. Analysis and optimization of a V-shape combined pole interior permanent magnet synchronous machine with temperature rise and demagnetization considered[J]. IEEE Access, 2021, 9: 64761.
- [ 5 ] 李立毅, 张江鹏, 赵国平, 等. 考虑极限热负荷下高过载永磁同步电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 845.
- [ 6 ] 刘毓希, 李立毅, 曹继伟, 等. 短时高过载永磁同步电机电磁热研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2296.
- [ 7 ] CHU S, LIANG D, JIA S, et al. Research and analysis on design characteristics of high temperature and high-speed permanent magnet motor [C] // 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020.
- [ 8 ] 陈世坤. 电机设计(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [ 9 ] PARK J B, MOOSAVI M, TOLIYAT H A. Electromagnetic thermal coupled analysis method for interior PMSM [C] // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015.
- [ 10 ] 胡田, 唐任远, 李岩, 等. 永磁风力发电机三维温度场计算及分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 122.
- [ 11 ] 冯威, 杨松, 张炳义. 高温超细长潜油永磁电机温升研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 50.
- [ 12 ] 韩雪岩, 宋聪. 基于磁热耦合法车用永磁同步电机温升计算及影响因素的研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(2): 28.
- [ 13 ] 孔汉, 刘景林. 单相匝间短路对永磁电机损耗及温度分布的影响研究[J]. 微特电机, 2015, 43(7): 30.
- [ 14 ] 马雷, 姚守猷, 曹志彤. 周期性负载下永磁同步电动机动态效率分析[J]. 中小型电机, 1993(6): 3.
- [ 9 ] 闻邦椿. 高等转子动力学: 理论, 技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [ 10 ] 韦福东, 李光耀, 姚丙雷, 等. 大中型高压高速电动机转轴静力学仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(7): 62.
- [ 11 ] 王龙华. 直驱潜油螺杆泵用永磁同步电动机关键结构设计[D]. 青岛: 中国石油大学, 2014.
- [ 12 ] 刘伟. 350 kW 高速永磁同步发电机的设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [ 13 ] 王天煜. 高速永磁电机转子综合设计方法及动力学特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- [ 14 ] 王秀和. 永磁电机[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [ 15 ] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [ 16 ] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [ 17 ] 闵行, 刘书静, 诸文俊. 材料力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009.
- [ 18 ] 赖文海, 黄开胜, 杨国龙, 等. 电机气隙磁场谐波分析程序设计[J]. 微电机, 2015, 48(11): 21.

(上接第 79 页)