

高功率密度立式隔爆电动机电磁性能计算与分析

针对传统路法在定量分析电动机电磁性能时表现出的狭隘性特点,以一台710 kW、11 kV高压立式隔爆电动机为例,建立了场-路耦合的二维瞬态电磁场时步有限元模型,应用ANSYS有限元软件分别对电动机在起动、额定运行时电动机的电磁场进行了计算,分析了电动机内气隙磁通密度、转子齿磁通密度、损耗和径向电磁力等电磁特征量。并以此为基础,计算了电动机在起动、运行时的性能参数。最后,通过对电动机有限元计算结果与试验结果对比,验证了计算方法的准确性,为高功率密度大容量隔爆电动机的优化设计提供了理论依据。

刘玉宝 孙庆玲 陈 辉 金 红/卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司

0 引言

高压立式隔爆电动机是电工行业主导产品之一,用来驱动风机泵类压缩机及各种大型机械,被广泛应用在煤炭、冶金、钢铁、化工和电力等行业中,作为驱动元件重要性不言而喻。因此,准确地计算出电动机的起动、额定运行性能显得至关重要,也是未来电动机行业的发展趋势。

然而,应用传统路法并不能准确地计算出电动机内磁场、电动机参数特征量及性能。时步有限元法可以充分考虑到齿槽效应、饱和效应等影响电动机性能的各种因素,从而准确获得气隙磁场分布,为分析计算电动机性能提供有效的计算方法^[1-4]。本文以一台高压立式隔爆电动机为例,首先通过建立二维场-路耦合的电动机数学模型和物理模型,其中磁场与外电路采用直接耦合方式,对电动机进行了时步有限元分析,从理论分析和数值仿真两个角度详细分析气

隙磁通密度分布、电动机附加损耗、电磁力及电动机运行性能等问题,所得结论为合理地优化设计隔爆电动机提供了一定的理论依据。

1 电动机二维全域电磁场模型

1.1 高压立式隔爆电动机的模型及基本数据

本文研究的高压立式隔爆电动机基本数据如表1所示。

表1 高压立式隔爆电动机基本数据

参数	值	参数	值
额定功率/kW	710	频率/Hz	50
额定电压/kV	11	极数	2
定子外径/mm	880	定子槽数	48
定子内径/mm	475	转子槽数	40

为了研究高压立式隔爆电动机的电磁性能,同时考虑电动机端部结构的复杂性,为减小计算模型尺寸及有限元剖分数目,本文建立了电动机的二维电磁场计算模型,如图1所示。

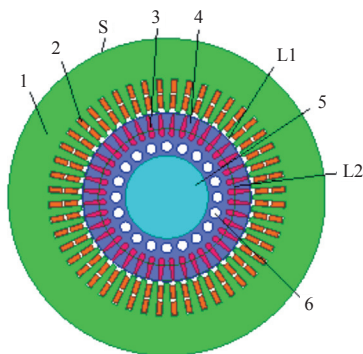


图1 高压立式隔爆电动机二维电磁场计算模型

1—定子铁心 2—定子绕组 3—转子导条 4—转子铁心
5—转轴 6—通风孔 S—定子外边界
L1—转子齿顶处圆周曲线 L2—转子齿中部圆周曲线



刘玉宝/工程师

关键词/Keywords

隔爆·
电动机·
电磁场·
性能·

1.2 电磁场的基本方程

首先建立场—路耦合时步有限元模型，磁场与电路直接耦合，端部效应以端部阻抗的形式在外电路中予以考虑，根据求解条件及要求给出如下假设^[5]：

1) 铁心轴向有效长度内的电磁场按照二维场来处理，模型中定、转子内外边界的漏磁忽略不计。

2) 忽略位移电流及其影响，忽略电网电压中的高次谐波分量及定子绕组中的趋肤效应。

3) 不计相间和槽间绝缘的影响。

4) 材料为各向同性，材料的磁导率均匀且不计磁导率随温度的变化。

5) 忽略磁性槽楔的导电性，不计由此产生的电气损耗。

基于上述文中假设，在计算的二维场中，由矢量磁位 A_z 表示的电动机二维瞬态电磁场的边值问题为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z + \mu \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \\ S: A_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， A_z 为磁矢位； J_z 为传导电流密度； μ 为磁导率； σ 为电导率； t 为时间； S 为齐次第一类边界条件。

将式(1)依据变分原理简化为条件泛函方程，然后对条件泛函方程离散化，在满足相应边界条件的基础上对多元方程组进行求解。在实际求解时，为了提高计算准确度，对不同的区域采取不同的剖分准确度，高压电动机的剖分图如图2所示。

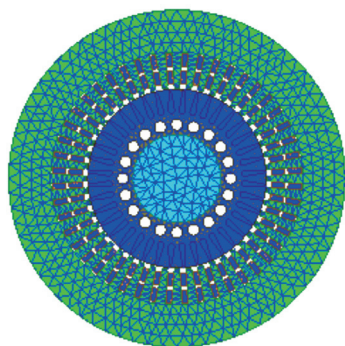


图2 高压立式隔爆电动机剖分图

2 电动机的起动性能计算及磁通密度分析

电动机的起动性能主要包括起动电流和起动转矩。起动电流通过电磁场计算，迭代收敛后的定子电流即为电动机的起动电流，由于起动时电动机的转速为0，转差率为1，因此需要对转差率进行迭代。

高压立式隔爆电动机起动时的磁场分布如图3所示，由于起动时趋肤效应作用，磁力线集中在转子的表面，所设计的高功率密度立式隔爆电动机（每槽导体数32匝）的起动转矩计算值为2461 N·m，而起动电流为205.6 A。

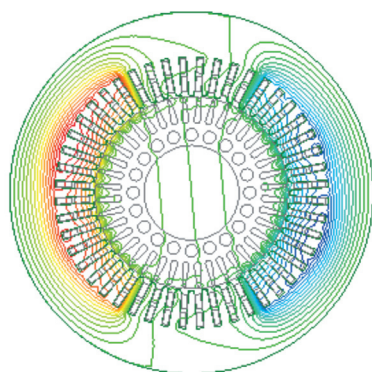
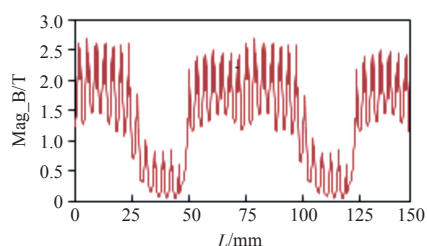


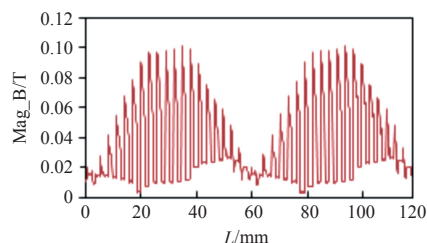
图3 高压立式隔爆电动机起动时磁场分布

电动机铁心的磁滞损耗及涡流损耗影响电动机运行时的效率，而损耗与磁通密度有着紧密的联系。此外，起动时电动机铁心处于高度饱和状态，齿顶处的磁通密度过高会引起齿顶严重发热，因此分析电动机铁心的磁通密度是十分必要的^[6-7]。在转子铁心的不同位置取了两条圆周曲线（见图1），分析电动机起动时圆周上磁通密度分布。

由于铁磁特性的因素，电动机内部的磁力线走向并不是完全径向或切向的，为了定量地分析转子部位的磁通密度分布趋势，给出了电动机起动时转子铁心齿顶、齿中部磁通密度的绝对数值，具体的磁通密度分布曲线如图4所示。由图4a可见，电动机起动时转子齿顶磁通密度较高，磁通密度的峰值达到2.7 T，电动机起动时磁通集中在转子表层，沿着转子外圆周向转轴径向方向上磁通密度逐渐降低，在转子齿中部磁通密度峰值下降到0.1 T以下，如图4b所示，变化非常明显。依此



(a) 转子铁心齿顶部 (L1)



(b) 转子铁心齿中部 (L2)

图4 起动时转子铁心齿部磁通密度分布曲线

类推, 转子铁心轭部的磁通密度更小。

3 电动机负载下磁通密度、损耗、性能及电磁力计算分析

3.1 负载气隙磁场分析

设计高功率密度立式隔爆电动机时, 为了降低铁耗、杂耗并得到良好的运行性能, 降低电动机运行时气隙中的谐波成分显得尤为重要。图5给出了电动机额定运行时的气隙磁通密度及其谐波分解曲线, 从图中可以看出气隙磁通密度波形由于齿槽的存在, 导致气隙磁路对应的磁导大小不同, 进而气隙磁通密度形成的并不是一个标准正弦波, 而是呈现出锯齿状波形^[8]。

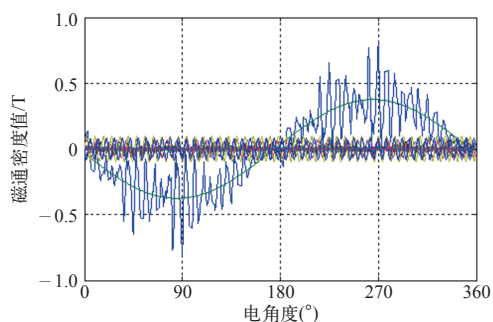


图5 电动机内气隙磁通密度及谐波曲线

为了定量地分析额定运行时电动机谐波含量

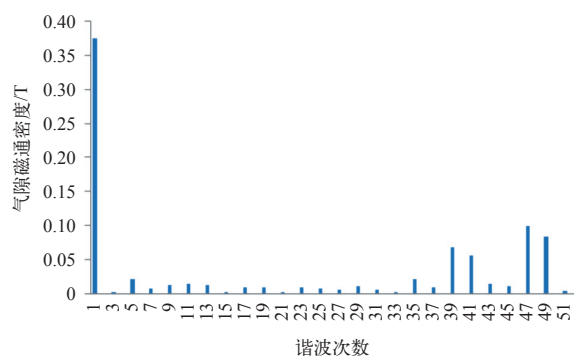
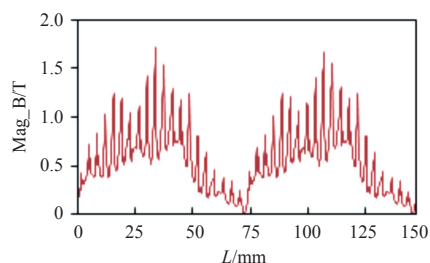


图6 电动机内气隙磁通密度的谐波含量

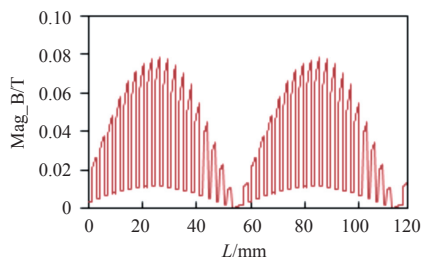
的分布, 给出了电动机内气隙磁通密度的傅里叶分解值, 如图6所示。

由图6中的数据可得, 气隙磁通密度中的5次谐波幅值为基波幅值的5.62%, 7次谐波幅值为基波幅值的1.97%, 39次谐波幅值为基波幅值的17.99%, 41次谐波幅值为基波幅值的14.89%, 47次谐波幅值为基波幅值的26.65%, 49次谐波幅值为基波幅值的22.46%。其中39、41次谐波为转子一阶齿谐波, 而47、49次谐波为定子一阶齿谐波, 从以上分析数据可知, 定、转子一阶齿谐波的含量较明显。

电动机额定运行时转子铁心齿部磁通密度分布曲线如图7所示。由图7a可见, 电动机额定运行时转子齿顶磁通密度峰值为1.7 T, 数值上比起动



(a) 转子铁心齿顶部 (L1)



(b) 转子铁心齿中部 (L2)

图7 额定运行时转子铁心齿部磁通密度分布曲线

时低很多,沿着转子外圆周向转轴径向方向上磁通密度逐渐降低,在转子齿中部磁通密度峰值下降到0.08 T以下,如图7b所示,变化非常明显。依此类推,转子铁心轭部的磁通密度更小。

3.2 电动机表面损耗的计算

定子开槽引起的气隙磁导齿谐波磁场会在转子表面产生表面损耗,反之也是。由电动机定、转子铁心开槽导致的气隙磁导不均匀,会在气隙磁场中产生大量的谐波,而谐波是产生铁心附加损耗的主要原因,包括表面损耗和脉振损耗。本文对比计算了电动机气隙尺寸变化时的铁心表面附加损耗。由于定子开槽在转子表面形成的损耗为^[9]

$$P_{02} = 0.5k_0(Z_1 n)^{1.5} (B_{01} t_1)^2 \pi D_2 l'_{12} \frac{t_2 - b_{02}}{t_2} \quad (2)$$

式中, t_1 、 t_2 和 b_{02} 分别为定子齿距、转子齿距和槽口宽; Z_1 、 D_2 和 l'_{12} 分别为定子槽数、转子铁心外径和铁心长度; B_{01} 为定子开槽引起的齿谐波磁通密度幅值,由有限元计算所得气隙磁通密度谐波分解求得。

计算的电动机转子表面损耗如表2所示。由文中的谐波傅里叶分解可知,定、转子的二阶齿谐波磁通密度幅值均较小,因此,转子的表面损耗分别只计算了一阶齿谐波时的对应数值。

表2 电动机转子表面损耗

(单位: W)

谐波次数	损耗值
47	993.5
49	749.7

需要说明的是,一般感应电动机中,由于转子开槽,在定子铁心表面也会产生附加铁耗,在样机中,由于转子槽口尺寸较小,因而忽略了由于转子开槽而在定子铁心表面产生的附加损耗。

3.3 电动机铁耗、定转子焦耳损耗的计算

电动机额定工况运行时,电动机内电磁场磁通密度分布及饱和程度不同,不仅会对电动机的铁耗产生影响;与此同时,磁通密度谐波含量、电流

(包括谐波电流)的数值变化也会对定子绕组、转子导条的焦耳损耗产生影响^[10-11];表3给出了负载工况下电动机铁耗、定转子绕组损耗数值计算,从图中可以看出电动机内各损耗的分配较合理。

表3 额定工况下,电动机的损耗值

(单位: W)

计算类型	损耗值
铁耗	4 280.5
定子绕组损耗	6 421.7
转子导条损耗	3 258.5

3.4 电动机性能的计算

考虑磁路饱和等因素影响,通过时步有限元法计算的电动机额定工况下的性能如表4所示。

表4 额定工况下,电动机性能指标

性能指标	计算值
额定功率因数	0.911
额定电流/A	42.5

3.5 径向电磁力波的分析

对于功率较大的感应电动机而言,振动和噪声也是倍受关注的问题。振动和噪声不但影响电动机本身的使用寿命,也影响其拖动设备的工作质量和效率,同时更严重地污染了人们的生活环境并对人体造成危害。

电磁噪声是电动机运行过程中定、转子磁场相互作用产生的一系列电磁力波。根据麦克斯韦应力张量法,得出作用在电动机定子或转子上的径向力密度和切向力密度为^[12-13]

$$f_n = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{B_n^2}{2} - \frac{B_t^2}{2} \right) \quad (3)$$

$$f_t = \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \quad (4)$$

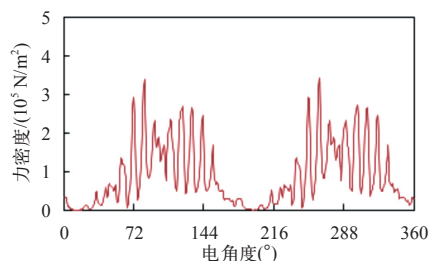


图8 电动机径向电磁力波

其中,引起电动机振动和噪声的主要是电磁力的径向分量。根据式(3)计算电动机负载运行时,电动机一对极下电磁力波分布如图8所示。由图中的数据可知,设计电动机的电磁力密度并不是很大,这对抑制2极电动机的电磁噪声和振动会带来很大的好处。

4 实测数据与计算结果的比较与分析

基于时步有限元方法对所建的电动机数学模型进行求解,可以获得电动机稳态运行参数的计算值及样机起动转矩的计算值。电动机起动转矩和稳定运行时定子电流计算值及实测值如表5所示。

表5 样机稳态运行参数计算值和实测值

物理量	计算值	实测值	误差
定子电流/A	42.5	43.7	-0.72%
起动转矩/kN·m	2.46	2.54	-1.69%

由表5可知,定子电流计算值与实测值的误差为-2.74%,起动转矩值与实测值的误差为-3.15%。由此可知计算值与实测值比较接近,计算值与实测值的误差小于5%,满足计算准确度的要求,验证了所建模型的准确性。

5 结束语

本文利用场-路耦合时步有限元法对一台2极、710 kW、11 kV高压立式隔爆电动机进行了数值计算,分别对在起动、额定运行时电动机内电磁场进行了计算,分析了电动机内气隙磁通密度、损耗及径向电磁力等电磁特征量。并以此为基础,探讨了电动机在起动、运行时的性能参数。计算结果表明,应用场的数值解法能够有效地解决由定、转子齿槽配合及磁路饱和等因素引起的算法误差问题,时步有限元法能够更加准确地计算电动机内电磁场,并由后处理可得到相应的场量、场图和性能参数等,为高功率密度大容量隔爆电动机的优化设计提供了科学有力的手段。

参考文献

- [1] 汤蕴璆. 电机内的电磁场 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 胡敏强, 黄学良. 电机运行性能数值计算方法及其应用 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.
- [3] 段晓田, 张新燕, 张俊, 等. 双馈风力发电机电磁场计算与分析 [J]. 电网技术, 2012, 36 (2): 231-236.
- [4] Mikami H, Ide K, Arai K, et al. Dynamic harmonic field analysis of a cage type induction motor when magnetic slot wedges are applied [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12 (4): 337-343.
- [5] 梁艳萍, 陈晶. 磁性槽楔对高压感应电动机电磁参数和性能的影响 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (3): 1-5.
- [6] 李隆年. 电机设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [7] 曹君慈, 李伟力, 张晓晨. 高性能低谐波绕组感应电动机电磁性能的数值分析 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (3): 97-103.
- [8] B. 海勒尔, V. 哈马塔. 异步电机中谐波磁场的作用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [9] 李海成, 王庆东, 尹志华. 中小型笼型异步电机杂散损耗的降低措施 [J]. 电机与控制应用, 2015, 42 (4): 70-74.
- [10] 严登俊, 刘瑞芳, 胡敏强, 等. 鼠笼异步电机起动性能的时步有限元计算 [J]. 电机与控制学报, 2003, 7 (3): 177-190.
- [11] 李军, 刘颖, 许自贵, 等. 层压型磁性槽楔的性能及其对电机性能的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (16): 126-131.
- [12] 王荀, 邱阿瑞. 笼型异步电动机径向电磁力波的有限元计算 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (7): 109-117.
- [13] 刘海龙. 大型感应电动机电磁力及振动特性分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.

(收稿日期: 2017-04-12) EA