

赵燕云,马宪民.输送机用隔爆水冷异步电机的损耗计算[J].煤炭学报,2016,41(S2):571-575.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0310  
Zhao Yanyun, Ma Xianmin. Loss calculation of water-cooled explosive-proof asynchronous motor used in conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 571-575. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0310

## 输送机用隔爆水冷异步电机的损耗计算

赵燕云,马宪民

(西安科技大学 电气与控制工程学院 陕西 西安 710054)

**摘要:**输送机用隔爆异步电机在运行的过程中,经常处于空载、轻载和过载运行状态,导致电机的定转子电流和损耗不断发生变化,对电机的温升和可靠运行带来影响。以YBSD-525/263-4/8G电机为例,建立电机的二维有限元模型,对3种不同运行状态下电机损耗进行了分析。通过对电机铜耗分析可知,随着负载的增加,基波电流和谐波电流也逐渐增大,定转子的铜耗也增大。在对电机的铁耗进行分析时,考虑磁密分布不均的影响,将电机的定转子铁芯分成7个部分分别对磁密和铁损进行计算和分析。由分析结果可知:当电机负载增加时,定转子齿顶和齿身的铁损增加最快,齿根和齿轭的铁损变化不大。本研究为今后对隔爆水冷异步电机负载状态改变时内部温度场的分析奠定基础。

**关键词:**隔爆异步电机;负载变化;铜耗计算;铁耗分析

中图分类号:TD528;TM343

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2016)S2-0571-05

### Loss calculation of water-cooled explosive-proof asynchronous motor used in conveyor

ZHAO Yan-yun, MA Xian-min

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The flame-proof asynchronous motor used in conveyor often works in the state of no-load, light load and overload. It causes the changes of current and the loss of stator and rotor, which will influence the temperature rise and the reliable operation of the motor. In this paper, taking YBSD-525/263-4/8G motor as an example, the two-dimensional finite element model was established. The motor loss was analyzed in three running state. Through the analysis of copper loss, it showed that the current of the stator and rotor increased with the load increase. The harmonic current also increased. It led to the increase of copper loss. When the iron loss was analyzed, the iron core was divided into seven parts in order to reduce the impact of flux density distribution. The analysis result showed that the iron losses in the tooth top and tooth body increased fast and the change of the iron loss in the tooth root and tooth yoke was not big with load increase. This study provided a foundation for analyzing the temperature field of the motor with load states change.

**Key words:** explosion-proof asynchronous motor; load change; copper loss calculation; iron loss analysis

刮板输送机是煤矿井下主要的运输设备,随着煤炭开采综合化和集约化程度的提高,矿用刮板输送机

的功率越来越高,导致驱动电机的功率和功率密度也越来越大<sup>[1]</sup>。根据刮板输送机的运行特点,其电机

在运行的过程中处于频繁的起动、空载、满载和过载中,这就使得电机定转子的电流不断发生变化,磁场不断的变化,导致电机内部的损耗也不断发生变化,进一步导致电机的温升发生变化,严重时会引起电机绕组绝缘损坏,甚至烧坏电机<sup>[2]</sup>。因此对电机各种工作状态下损耗进行精确计算,并分析损耗对温升的影响对带式输送机电机的可靠运行至关重要。

以往有大量文献对电机的损耗计算进行了研究,文献[3]讨论了感应电机铁芯损耗的计算方并对计算结果进行了分析。文献[4]主要研究分析了感应电机空载时的铁芯损耗分布,在进行铁耗计算时,考虑磁密分布的不均匀,采用分块讨论电机的铁芯损耗。文献[5]对感应电机在空载、额定负载和过载3种运行状态小的铁芯损耗分布进行了分析。文献[6]采用非线性时步有限元分析了计及谐波影响下异步电机的铜耗和铁耗计算。文献[7-8]分析了受齿脉动和谐波影响下的铁耗进行了分析。文献[9-10]讨论了逆变器运行状态下电机铁耗的计算。但是针对隔爆电机,特别是输送机用隔爆异步电机的铜损和铁损计算的文献较少。

本文以一台YBSD-525/263-4/8G输送机用隔爆电机为例,首先建立该电机的时步有限元模型并对电机的电磁场进行计算,然后通过对空载、额定负载和过载3种运行状态下电机的铜耗和铁耗进行计算和分析。为后续对电机的温度场计算和故障分析提供依据。

## 1 隔爆异步电机的二维有限元分析

### 1.1 电机的基本参数和模型

YBSD-525/263-4/8G电机的基本参数见表1,该电机为双速电机,为了分析方便,本文只分析定子绕组接成两对极的情况。分别讨论该电机在空载、额定负载和过载进行时的损耗,为了简化计算,采用1/4模型,模型如图1所示。在分析过程中,为了精确计算电机内部各部分的铁耗,将定子铁芯分为定子轭、定子齿根、定子齿身和定子齿顶4部分,转子铁芯分为转子齿顶、转子齿身和转子轭。

表1 电机的基本参数

Table 1 Basic parameters of the motor

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	525/263	定子内径/mm	400
额定电压/kV	3.3	定子外径/mm	590
极数	4/8	定子槽数	72
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 485/740	转子外径/mm	397.6
气隙长度/mm	1.2	转子槽数	64

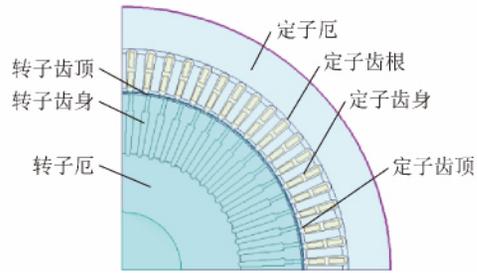


图1 电机的模型

Fig. 1 Model of the motor

### 1.2 电机电磁场分析的基本假设

在进行电机电磁场的有限元分析过程中,为了简化分析和节约计算时间,计算时做如下假设。

(1) 电机内部的磁场沿轴向无变化,为二维平行平面场;

(2) 在进行电机的铁耗计算时,端部磁场产生的损耗用常值电感代替;

(3) 计算定子绕组和转子导条的铜耗时,认为损耗是均匀分布的;

(4) 铁心的电导率和磁导率不随温度的变化而变化;

(5) 定子铁心外缘和转子铁心内缘的漏磁忽略不计。

### 1.3 电机电磁场的基本计算方程

在对电机的电磁场进行计算时,取电机截面的1/4作为求解域,由于电机内部的电磁场沿轴向无变化,所以在计算矢量磁位时,只有Z轴分量。磁场的求解方程为

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \\ A_z|_{\Gamma_1 \Gamma_2} = 0 \\ A_z|_{\overline{AB}} = -A_z|_{\overline{CD}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Gamma_1$ 和 $\Gamma_2$ 分别为定子外缘边界和转子内缘边界; $A_z$ 为轴向磁矢位; $\mu$ 为磁导率; $J_z$ 为电流密度; $\sigma$ 为电导率。

## 2 3种运行状态下电机铜耗分析

### 2.1 定子铜耗计算

电机的铜耗主要分为定子绕组的铜耗和转子绕组的铜耗,一般电机分析和设计时,定子绕组的铜耗采用公式 $P_{Cu1} = mI^2R_1$ 来进行计算,其中, $m$ 为定子绕组的相数; $R_1$ 为定子每相绕组的电阻; $I$ 为定子电流的有效值。这种方法求解简单,直观,但是计算的过程中,忽略了定子谐波电流产生的铜耗和定子绕组三角形接法时环流产生的损耗。在计算定子绕组铜耗

时,先将定子电流进行傅里叶分解,然后计算基波和各次谐波电流的有效值,再利用式(2)进行计算。

$$P_{Cu1} = \sum_v m I_v^2 R_1 \quad (2)$$

3种状态下定子铜耗计算结果见表2。由表2可以看出,1.5倍额定负载时定子的铜耗最大,空载时的铜耗最小,主要是因为随着负载的增加,定子电流也在逐渐增大,铜耗的大小与电流的平方成正比。由表2还可以看出,当负载为1.5倍额定负载时,谐波损耗也大大增加,约占总损耗的25%。

表2 电机定子铜耗计算结果

Table 2 Result of the stator copper loss

铜耗	空载	额定负载	1.5倍额定负载
基波损耗/kW	0.875 98	19.147	41.62
总损耗/kW	0.903 92	19.188	55.48

### 2.2 转子导条铜耗计算

在计算转子铜耗时,采用先计算端环电流,再计算每根导条的瞬时功率,再利用式(3)计算转子导条的铜耗。

$$P_{Cu2} = m \frac{1}{T_r} \int_{t_1}^{t_1+T_r} p_{Cu2} dt \quad (3)$$

其中,  $T_r$  为导条电流的周期;  $m$  为导条的数目;  $p_{Cu2}$  为单根导条的瞬时功率。可计算求得空载时由于转子转速和同步转速近似相等,所以导条电流很小,损耗也很小,计算出的转子铜耗为 76.60 W,额定负载时的转子铜耗为 12.52 kW,1.5倍额定负载时,转子铜耗为 142.61 kW,比额定负载时的铜耗增加了 11.39 倍,转子铜耗大大增加。

## 3 3种运行状态下电机铁耗分析

### 3.1 铁芯损耗的分析

目前对于电机铁芯损耗进行计算时,提出了很多不同的计算模型,但是每一种计算模型都不能实现铁耗的精确计算,主要问题是在进行计算时,不能对铁芯的旋转磁化和非正弦实现精确处理。采用 Bertotti 模型进行铁芯损耗的计算<sup>[11-12]</sup>,在计算的过程中,为了能够减小计算误差,将分别对定子齿身、定子齿顶、定子齿根、定子轭、转子齿身、转子齿顶和转子轭进行铁耗的计算。计算模型如图1所示。

Bertotti 模型铁耗计算模型采用常数 3 项式模型,将铁芯损耗分离成磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗(巴克豪森跃变产生的损耗),计算公式为

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_{ea} = k_h f B^2 + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (4)$$

式中,  $P_h$  为磁滞损耗;  $P_e$  为涡流损耗;  $P_{ea}$  为附加损耗;  $f$  为磁场频率;  $k_h$ 、 $k_e$  和  $k_{ea}$  为相应的损耗系数。

### 3.2 额定负载时的铁芯损耗分析

#### 3.2.1 额定负载时的电磁场分析

为了计算电机的铁芯损耗,必须对电机内的电磁场进行精确分析,利用有限元分析,额定负载下的磁通密度分布如图2所示,由图2可以看出,电机的极对数为2,磁极附近磁力线较密,磁通密度较强,磁极与磁极的分割处磁力线比较稀疏,磁通密度较弱。有少量的磁力线穿过气隙、定子槽、转子槽和转轴,为漏磁现象,但是数目很少,可忽略不计。

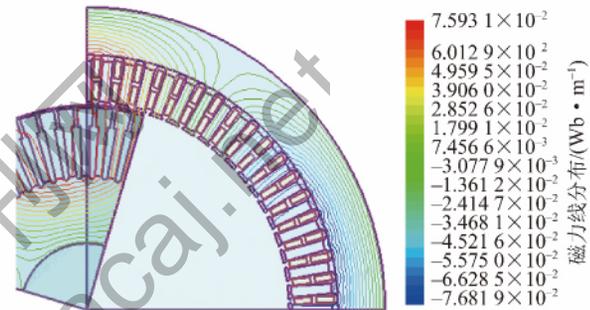
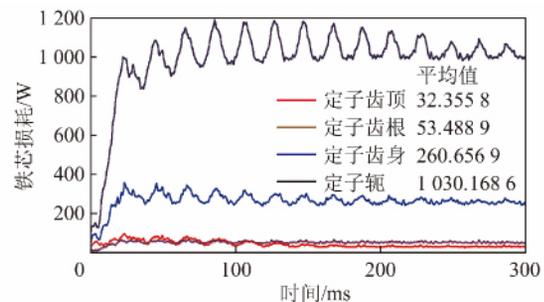


图2 额定负载时的磁力线分布

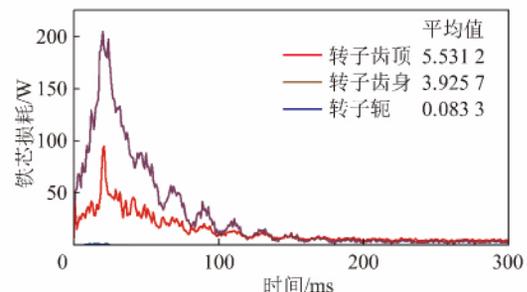
Fig. 2 Magnetic lines distribution on the rated condition

#### 3.2.2 额定负载时的铁耗分析

额定负载时,各部分的铁芯损耗变化如图3所示,其中图3(a)为定子各部铁损随时间变化的曲线,图3(b)为转子各部铁耗随时间变化的曲线。图3中各部损耗的平均值是取电机进入稳定运行后损耗的平均值。另外图3中的损耗是对电机的1/4模型进



(a) 定子各部铁损



(b) 转子各部铁耗

图3 额定负载时各部分的铁芯损耗

Fig. 3 Iron loss of each area on the rated condition

行计算的,所以全模型中各部的损耗为图3中各部的损耗乘以4,通过运算可得电机的各部分损耗以及占总损耗的百分比见表2。

表2 电机各部铁耗分布

Table 2 Iron loss distribution of each area

划分区域	铁芯损耗/W	占总铁耗百分比/%	
定子	齿顶	129.42	2.33
	齿身	1 042.91	18.8
	齿根	213.90	3.86
	轭	4 121.18	74.32
转子	齿顶	22.13	0.4
	齿身	15.70	0.28
	轭	0.35	0.006

通过分析和计算可知,电机的总损耗为5 544.79 W,其中铁芯损耗4 120.7 W,占总铁耗的

74.32%。整个定子铁芯的损耗占总损耗的99.3%,由此可得额定负载时铁芯损耗主要在定子侧,转子侧的铁芯损耗相对较小。这主要是因为铁耗不仅与磁密的大小有关,而且与铁芯的质量和定转子磁密交变的频率有关。额定状态下,由于转子铁芯磁通交变的频率较小,仅为0.34 Hz,所以在额定负载运行时,转子铁芯的损耗占总损耗的比重非常小,而且主要集中在齿顶和齿身区域。

### 3.3 3种运行状态下铁耗的计算和分析

#### 3.3.1 3种运行状态下电机的磁密分布

输送机用三相异步电机运行的过程中,负载经常会发生变化,会不断的处于空载、轻载、额定负载和过载的运行状态,随着负载的增加,根据电机自适应负载的能力,转速会逐渐减小,转差率增加,会使得定转子铁芯磁密的大小和转子铁芯交变的频率发生变化。3种运行状态下铁芯各部平均磁密的大小见表3。

表3 负载变化时定、转子侧各部平均磁密和铁耗的变化

Table 3 Changes of the average flux density and iron loss with load changing

参数	定子				转子			
	齿顶	齿身	齿根	轭	齿顶	齿身	轭	
平均磁密/T	空载	0.819 6	0.918 1	1.070 7	1.174 2	0.759 4	0.966	1.014 5
	额定负载	0.885 5	0.920 0	1.064 9	1.170 6	0.868 2	0.971 2	1.005 8
	1.5倍负载	1.646 5	1.051 9	1.047 6	1.156 5	1.941 9	0.772 0	0.038 2
铁耗/W	空载	89.19	1 005.26	212.89	4 188.05	16.56	8.51	0.02
	额定负载	129.42	1 042.91	213.90	4 121.18	22.13	15.70	0.35
	1.5倍负载	270.78	1 304.57	220.46	3 979.47	146.41	151.92	1.06

通过分析可知,电机由空载到额定负载状态下运行时,随着负载的增加,各部的磁密变化的幅度不大,其中定转子齿顶的磁密变化幅度较大,转子齿顶大约增加了0.06 T,定子齿顶增加约为0.1 T。当电机有额定负载增大到1.5倍额定负载时,定转子齿顶的磁密差不多增加了一倍,定转子齿顶磁密严重饱和,磁阻大大增加,导致齿身和磁轭的磁密下降。

#### 3.3.2 3种运行状态下电机的铁耗分布

以上讨论了3种不同运行状态下,电机定转子磁场中的磁密分布特点,可知随着负载的增加,电机齿顶的磁密变化最快,很快达到饱和状态,齿身和轭中的磁密受齿顶饱和的影响,随着负载的增加反而下降。磁密是影响定转子铁芯损耗的主要因素之一,但是除了磁密以外,定转子的铁芯损耗还受磁场交变频率等因素上的影响。

表3和图4分别给出了3种运行状态下定转子铁芯各部的损耗分布情况,从中可以得到空载运行时,总的铁芯损耗为5 520 W,额定运行时为

5 547 W,1.5倍负载运行时为6 075 W。随着负载的增加总铁耗在增加,但由空载到额定负载运行时,总的铁耗增加了27 W,占额定运行时铁耗的0.47%,铁耗的变化不大。但由额定负载到1.5倍负载运行时,铁耗增加了528 W,为额定负载时的9.5%。随着负载的增加,电机各部分铁耗的变化也不同,由图4可以看出,定转子齿顶和齿身损耗变化的最快,齿根和轭的损耗变化较慢。

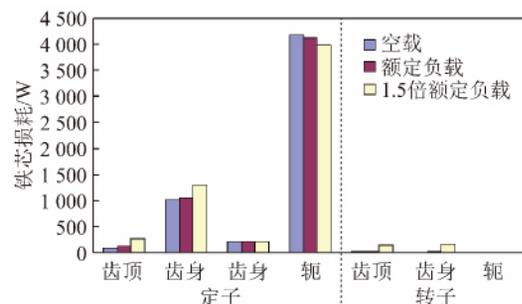


图4 3种运行状态时各部分的铁芯损耗

Fig. 4 Iron loss of each area in three running states

因为负载变化时,定转子齿顶和齿身的损耗增加最快。定子齿顶和齿身的铁耗额定负载比空载时分别增加 40 W 左右,分别占额定负载时的 30.7% 和 3.83%,额定负载到 1.5 倍额定负载时,增加 141 和 262 W,分别占额定负载时的 109% 和 25%。所以如果电机如果长时间过载运行时,可能造成定子齿顶和齿身的损耗大大增加,如果不能采取有效的措施使热量散发出去,造成电机局部过热,绝缘老化,影响电机的安全可靠运行。转子齿顶和齿身的损耗随着负载的增加也在增大,但空载和额定负载时,由于转子磁场交变的频率较小,所以损耗本身很小,对电机的影响较小,分析时可忽略转子铁耗的影响。但当从额定负载到 1.5 倍负载运行时,转子齿顶和齿身的铁芯损耗增加很快,数值也较大,这时就不能忽视转子铁耗的影响。

#### 4 结 论

(1) 随着负载增加,定子绕组的电流逐渐增大,定子电流的基波和谐波成分都逐渐增大,造成定子的铜耗大大增加。

(2) 转子导条的铜耗随着负载的增加,铜耗也逐渐增加,主要是随着负载的增加,转子导条电流增加,铜耗也增加。

(3) 通过对额定负载时的电机铁芯各部的铁耗进行分析,可得电机的铁芯损耗主要分布在定子侧,占到总铁耗的 99%。定子轭的铁耗占到总损耗的 74%。

(4) 通过 3 种运行状态下定转子各部的铁耗分析,可得负载增加时,定转子齿顶和齿身的铁损增加最快,定子齿根和定转子轭的损耗变化不明显,主要是由于随着负载的增加造成齿顶和齿身磁密过饱和造成的。

#### 参考文献:

- [1] 毛君,师建国,张东升,等.重型刮板输送机动力建模与仿真[J].煤炭学报,2008,33(1):103-106.  
Mao Jun, Shi Jianguo, Zhang Dongsheng, et al. Dynamic modeling and simulation of heavy scraper conveyor [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 103-106.
- [2] 侯向远,张连光,刘兴虎.刮板输送机电机烧毁原因分析及预防对策[J].煤矿机械,2001(2):63-64.  
Hou Xiangyuan, Zhang Lianguang, Liu Xinghu. Causes analysis and counter measures for the scraper conveyor motor burn down [J]. Coal Mine Machinery, 2001(2): 63-64.
- [3] Gmyrek Z, Boglietti A, Cavagnino A. Estimation of iron losses in induction motors: calculation method, results, and analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2010, 57(1): 161-171.
- [4] 赵海森,罗应立,刘晓芳,等.异步电机空载铁耗分布的时步有限元分析[J].中国电机工程学报,2010,30(30):99-106.  
Zhao Haisen, Luo Yingli, Liu Xiaofang, et al. Analysis on no-load iron losses distribution of asynchronous motors with time-stepping finite element method [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 99-106.
- [5] 丁树业,李冠男,冯海军,等.驱动用异步电机负载变化对损耗影响数值计算[J].电机与控制学报,2013,17(9):36-41.  
Ding Shuye, Li Guannan, Feng Haijun, et al. Numerical calculation of loss under load variation for driving asynchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(9): 36-41.
- [6] Yamazaki, Katsumi. Harmonic copper and iron losses calculation of induction motor using nonlinear time-stepping finite element method [A]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference [C]. 2001: 551-553.
- [7] Tatis K B, Kladas A G, Tegopoulos J A. Harmonic iron loss determination in laminated iron cores by using a particular 3-D finite-element model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 960-963.
- [8] Vinay Jaiswal, Deshmukh N K. Determination of iron loss considering spatial harmonics and tooth pulsation effects for cage motor [A]. 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications [C]. 2014: 348-353.
- [9] 黄平林,胡虔生,崔杨,等. PWM 逆变器供电下电机铁心损耗的解析计算[J].中国电机工程学报,2007,27(12):19-23.  
Huang Pinglin, Hu Qiansheng, Cui Yang, et al. Analytical calculation of the iron losses of electric machine fed by PWM inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 19-23.
- [10] Nam H, Ha K H, Lee J J, et al. A study on iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using iron loss curves tested on Epstein samples [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1472-1472.
- [11] 孔晓光,王凤翔,邢军强.高速永磁电机的损耗计算与温度场分析[J].电工技术学报,2012,27(9):166-172.  
Kong Xiaoguang, Wang Fengxiang, Xing Junqiang. Losses calculation and temperature field analysis of high speed permanent magnet machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 166-172.
- [12] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic material [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 621-630.
- [13] 张艳丽,李玉梅,刘洋,等.考虑不同磁特性模型的感应电机铁心损耗分析[J].中国电机工程学报,2013,33(27):120-125.  
Zhang Yanli, Li Yumei, Liu Yang, et al. Analysis of core losses in induction motors considering different magnetic property models [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 120-125.
- [14] Hernandez-Aramburo C A, Green T C, Smith A C. Estimating rotational iron losses in an induction machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(6): 3527-3533.