

分类号: TM346

密 级: 公开

UDC:

单位代码: 10142

沈阳工业大学 硕士学位论文

潜水电机设计及屏蔽套损耗分析



学 号: 2014350
作 者: 史振超
学 位 类 别: 工程硕士
领 域: 电气工程
论 文 类 型: 工程设计与研究

2017 年 05 月 31 日

沈阳工业大学硕士学位论文

潜水电机设计及屏蔽套损耗分析

Design of Submersible Motor and Loss Analysis of Shield Sleeve

作 者： 史振超 单位： 电气工程学院

指 导 教 师： 胡岩 教授 单位： 沈阳工业大学

协助指导教师： 单位：

单位：

论文答辩日期： 2017 年 05 月 23 日

学位授予单位： 沈 阳 工 业 大 学

摘要

潜水电机一般分为充油式潜水电机，充水式潜水电机，充气式潜水电机和屏蔽式潜水电机。屏蔽电机和泵一起组成了屏蔽电泵，用来输送易燃、有毒、贵重、含腐蚀性及带放射性不含固体颗粒的介质，在输送液体时绝对无泄漏，而且运转噪音低。屏蔽电机具有体积小、重量轻、安装使用方便、可靠性能高等优点，广泛应用于从井下或湖泊取水，工矿企业排水，城乡建筑排水，居民生活用水，污水污物处理等。

屏蔽电机中因为屏蔽套的存在，使得电机的效率低于普通电机。本文从理论上分析了屏蔽套涡流损耗的产生，并推导了屏蔽套涡流损耗的理论公式。根据电机学设计原理，按照技术要求设计了一款电机，对比分析了电机适用的槽型，确定了电机的槽数和极数，并通过有限元分析法分析了电机的各种性能指标，如电机的转速，转矩，电流，转差率，效率以及功率因数均达到技术要求，验证了电机设计的合理性，并在此基础上分析了电机的屏蔽套涡流损耗以及屏蔽套涡流损耗对电机的影响。在屏蔽套损耗分析中，运用有限元法，分别单独分析了定子屏蔽套和转子屏蔽套对电机的影响。在分析屏蔽套涡流损耗对电机的影响中，分析了屏蔽套材料电阻率对电机的影响，同时也分析了屏蔽套厚度对电机性能的影响。

相同条件下，屏蔽套在电机定子涡流损耗比屏蔽套在电机转子上涡流损耗大的多，因此屏蔽套在定子上电机的效率比屏蔽套在转子上的电机效率上要低，而功率因数则相反。相同条件下，随着屏蔽套厚度的增加，屏蔽套涡流损耗随着增加，电机的效率也随着降低。本文通过对屏蔽套电阻率和屏蔽套厚度对电机影响的分析结果，对于屏蔽电机屏蔽套的选择具有一定的指导意义。

关键词：屏蔽电机，屏蔽套，有限元法，涡流损耗，电阻率，屏蔽套厚度

Abstract

Diving motor is generally divided into oil-filled submersible motor, water-filled submersible motor, inflatable submersible motor and shielded submersible motor. The shielded pump is consisted of a shielded motor and a pump, which is used for transporting non-solid particles medium of flammable, toxic, precious, corrosive or radioactive in low operating noise with no leakage during transportation. The shielded motor with advantages of small size, light weight, convenient installation and higher reliable performance, is widely used for water drainage from underground or lake, industrial and mining enterprises, urban and rural construction drainage, residents living water, sewage dirt treatment and so on.

The efficiency of shielded motor is lower than the ordinary motor due to the presence of shielding sleeve. In this paper, the eddy current loss of the shielding sleeve is analyzed theoretically, and the theoretical formula of the eddy current loss of the shielding sleeve is deduced. According to the principle of motor design, a motor is designed according to the technical requirements. The types of slots suitable for this kind of motor are compared, and the numbers of slots and poles of this motor are determined finally. The rationality of the motor design is verified by the finite element method, which is used to analyze the various performance of the shielding motor, such as the motor speed, torque, current, slip, efficiency and power factor to meet the technical requirements. On the basis of the above analysis, the eddy current loss of the motor and the influence of the eddy current loss on shielded motor is analyzed. In the analysis of the shielding sleeve loss, the finite element method is used to analyze the influence of the stator shielding sleeve and rotor shielding sleeved on the motor. In the analysis of the influence of the shielding eddy current loss on the motor, the influence of the shielding sleeve material resistivity on the motor is analyzed, and the influence of the thickness of the shielding sleeve on the performance of the motor is also analyzed in the paper.

Under the same conditions, the eddy current loss of the shield sleeve on the motor stator is much larger than that of the shield sleeve on the motor rotor, so the efficiency of the motor which the shield sleeve on the stator is lower than that of the shield sleeve on the rotor, but the power factor is the opposite. Under the same conditions, the eddy current loss of the shielding sleeve increases and the efficiency of the motor decreases with the increase of the thickness of

the shielding sleeve. In this paper, the influence of resistivity and thickness of shielding sleeve on the motor is analyzed, which is of guiding significance for the selection of shielding sleeves on shielded motors.

Key Words: Shielded motor, Shielding cover, Finite element method, Eddy current loss, Resistivity, Shielding sleeve thickness

目录

摘要.....	1
Abstract	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题的背景.....	1
1.2 课题的研究意义.....	2
1.2.1 潜水电机的分类.....	2
1.2.2 屏蔽套损耗国内外发展现状.....	3
1.3 课题的研究内容.....	6
第 2 章 屏蔽电机结构特点及屏蔽套涡流损耗理论研究	7
2.1 屏蔽电机结构特点.....	7
2.2 屏蔽套损耗的理论分析.....	8
2.3 影响屏蔽套损耗的因素.....	10
2.4 本章小结.....	11
第 3 章 潜水电机设计	12
3.1 电机主要尺寸的确定.....	12
3.2 电机气隙和绕组导线的选择.....	13
3.2.1 气隙系数的选择.....	13
3.2.2 电机绕组导线的选择.....	14
3.3 电机槽型的选择.....	15
3.3.1 定子槽数、槽型及尺寸的选择.....	15
3.3.2 电机转子槽型的确定.....	17
3.4 屏蔽式潜水电机结构及屏蔽套选材.....	21
3.4.1 屏蔽电机机构.....	21
3.4.2 屏蔽套的要求、结构、选材.....	21
3.5 本章小结.....	22
第 4 章 有限元软件仿真分析	23
4.1 有限元理论方法和有限元软件简介.....	23
4.1.1 有限元理论方法简介.....	23

4.1.2 有限元软件简介	23
4.2 有限元软件建模	24
4.2.1 模型的建立	24
4.2.2 各部分材料设置	25
4.2.3 激励源的添加和网格剖分	25
4.3 电机性能分析	25
4.3.1 电机的空载运行状态	25
4.3.2 额定负载下电机运行状态	28
4.4 本章小结	32
第5章 屏蔽套损耗分析	33
5.1 传统公式法与有限元法计算屏蔽套损耗	33
5.2 屏蔽套材料电阻率对电机的影响	34
5.3 屏蔽套厚度的影响	40
5.4 本章小结	42
第6章 结论	43
参考文献	44
致谢	47

第 1 章 绪论

1.1 课题的背景

潜水电机与泵组合使用，主要应用于以下场合：潜水电机和泵类部件一起构成了机泵合一的产品，这类产品可以潜入井下水中或江河湖泊，海洋以及其他场合的水域中工作。潜水电机具有以下诸多优点，如体积和重量不大，起动前不用引水，不受吸程限制，安装方便不需要专门另设泵房从而可以节约投入资本，更重要的是价格低廉，同时有着较高的可靠性和较高的效率。因而普遍应用于从井下或江河、湖泊中取水，农田灌溉，城市供水以及城乡居民用水，工矿企业排水以及城乡建设排水，城市或工厂污水污物处理等。近年来，潜水电机在关系国民经济的重要场合，得到了越来越普遍的关注，这些场合诸如农业的灌溉和排涝，开采矿产以及抢险救灾等，随着海内市场需求不断增长，现今我国已经研制出 4000kW 潜水电机，这也是世界上功率最大的潜水电机^[1]。

低压潜水电机是供电电压在 1000V 以下的电压，如单相 110V、220V，三相 110V、380V、660V 几种，它们的功率相对较小，一般在 300-400kW 以下。高压潜水电机的供电电压为 3000V、6000V、10000V 或更高的电压，功率一般在 300-400kW 以上，直至 3000kW 或更大，如 QKSG 型矿、井用高压潜水电机泵、YQSG 型井用充水式高压潜水电机等。

潜水电机与各种类型的泵类设备一起组合使用，可以在各种水质中长期安全稳定运行。由于工作环境比较恶劣，因此电机的密封结构与普通电机具有较大的不同。潜水电机按 GB/T2818-2002 标准生产，主要分为充油式潜水电机，充水式潜水电机，干式潜水电机，屏蔽式潜水电机。

就目前国内的应用状况，潜水电机大面积应用于农田水利，矿山排水，城市生活用水等诸多领域。因为潜水电机的运行环境多种多样，有些潜水电机运行在井下数百米甚至更深处，若这些潜水电机运行过程中出现故障，通常需要将泵吊出水面后加以维修才能解决故障问题，因而使得对潜水电机的维护相当艰难。潜水电泵运行在正常工作状态时，其工作稳定性基本上是靠潜水电机来保证的，故而保证潜水电机的正常运行就相当于保证了潜水电泵的正常工作的^[2]。

相较于普通鼠笼型感应电机，屏蔽式潜水电机的定子、转子之间的间隙中有定、转子屏蔽套。屏蔽套宜采用不导磁、不易腐蚀、电导率低、易导热、易焊接、机械强度高的非磁性材料，常采用 1Cr18Ni9Ti，也可以采用 sus316L、IN-CONEL、

HASTELLnY-C 等不锈钢材料^[3]。由于屏蔽套材料多采用不锈钢材料,电机屏蔽套与气隙磁场存在相对运动,因而在屏蔽套内产生涡流损耗,由于屏蔽套的存在,电机的效率和功率因数会比普通感应电机低很多,气隙有效距离(定转子之间)将相对变大^[4]。故而,屏蔽电机的各参数值以及屏蔽套涡流损耗的正确计算就显得非常有意义了。

1.2 课题的研究意义

1.2.1 潜水电机的分类

潜水电机的定子和转子结构,相较于常规的三相鼠笼型感应电动机的定转子结构基本相同,因此电磁设计方面可以参照三相异步电动机。因为电机的负载为泵类负载,是以对电机的起动转矩不做特殊要求,故而对于潜水电机的设计要在着重考虑其效率和功率因数。由于潜电机特殊的运行环境,其定子通常采用闭口槽结构,同时要求定子绝缘性满足其电场的要求^[5, 6]。

潜电机除了不可缺少的定子、转子外,与普通鼠笼型感应电机最大的不同之处在于其内部复杂的密封构造和在线监保系统。潜电机主要分为充油式、充水式、干式、屏蔽式四种。潜电机的防护等级为 IP68,绝缘等级为 F 级,电机的总体结构为细长型,安装方式一般采用立式安装。

充水式潜电机可以运行在水下数百米甚至几千米,电机定子槽型常采用闭口槽,转子采用铜棒或铜条结构。电机使用闭口槽型,利于减少电机的机械损耗、表面损耗和脉振损耗,以及振动与噪声等带来的诸多问题^[7]。充水式潜电机内部被清水充满了,故而定子绕组采用耐水绕组线。每根绕组线对地的绝缘性能务必确保优良,因此用耐额定电压的绝缘材料紧密缠绕在每根绕组线外部,绕制方法用散线法。充水式潜电机的嵌线方式是把带主绝缘的耐水绕组线穿入定子槽中,由于绝缘导体在槽内的排列不规则,因而生产时槽满率低于 70%^[8]。

干式潜电机内部充满空气,与常规防护式鼠笼式感应电机类似,主要和下泵式潜水泵配套使用。为了有效防止水分和潮气进入电动机内部,干式潜电机轴伸端使用动态机械密封,因此得以维持电动机的内部干燥^[9]。

屏蔽电机相较于普通鼠笼型感应电机,电机的定转子结构与其基本相同,区别在于屏蔽电机的定子、转子之间的气隙中有屏蔽套,屏蔽套的存在使得电机在运行中在屏蔽套上产生涡流损耗。此外,由于屏蔽套的使用,在一定程度上增加了气隙的有效长度,使得电机的功率因数和效率下降了^[10]。屏蔽电动机与泵组成一体成为屏蔽电泵,主要用于输送有害气体或腐蚀性液体。电机运行在有毒有害、易腐蚀液体或气体介质环境中,为防止电机运行中受到伤害,在定子内表面和转子外表面各用一层非磁性不

锈钢薄套焊封在定转子的两端上，从而将定子和转子部分保护起来，使得电机不受输送介质的伤害^[11, 12]。其中，定子屏蔽套用来防止定子铁心及绕组中泄漏进入运送物质而受到腐蚀，转子屏蔽套用来保护转子不受输送物质的侵蚀。屏蔽电机的屏蔽套由机械强度高、可塑性强、电导率低、不导磁、耐腐蚀的不锈钢薄板焊接而成，电机绕组完全密封，运输的物质可以进入电机内部，由于屏蔽套的存在，不会进入定、转子及铁心^[13]。

定子屏蔽套厚度一般为 0.3~1.0mm，转子屏蔽套厚度比定子屏蔽套薄些，这样利于减小间隙，便于提升电机性能，转子屏蔽套厚度一般为 0.3~0.5mm。定子屏蔽套用来防止运输物质泄入定子绕组及定子铁心，转子屏蔽套用来保护转子不受运输物质的侵蚀。电机使用径向滑动轴承和轴向止推滑动轴承支承转子，轴伸端装有防砂密封装置。它的特点是定子绕组构成采用漆包线，由于屏蔽套的存在，电机转子腔允许进水，对轴伸端密封的防泄漏要求不高，一般只要求能阻止砂粒或固体小颗粒进入，安全性和可靠性很高。但定子密封构造相对复杂，生产和配套工艺上，非磁性不锈钢薄壁管的生产和装配较困难。一旦定子屏蔽套泄漏，电机将被烧毁，甚至发生严重事故^[14-17]。

1.2.2 屏蔽套损耗国内外发展现状

屏蔽套的存在，在一定程度上加大了电机定子与转子间的有效气隙长度，产生较大的涡流损耗，从而降低了电机效率和功率因数。由于定子与转子间有效气隙长度变大，如果要在转子内达到同样的感应电动势，就需要加大励磁电流。因此，屏蔽电机设计时电机铁心采用细长形，且相同定子外径时，定子内径比普通电机要小，这样可以进一步降低定子屏蔽套损耗和转子表面摩擦损耗，从而进一步提升屏蔽电机的效率。屏蔽式异步电动机，其电磁设计方案可参考常规异步电动机的电磁方案进行设计。它与后者的区别在于定子与转子之间加入屏蔽套，同时屏蔽套间允许有液体物质流过，因而使得电机的设计参数选择和电机性能与常规电机有所差异。（1）定、转子铁心间的间隙的确定及其对电机性能的影响：其间隙主要取决于屏蔽套厚度和定转子工作气隙，其运行特性与普通异步电机的运行特性相似，但是由于屏蔽套的存在，使得和同功率同极数的普通异步电机相比效率要低 10%左右，影响屏蔽电机定子屏蔽套损耗和转子表面摩擦损耗的因素是定、转子铁心的直径和长度尺寸，因此屏蔽电机一般做成细长形，有着较大的长径比。（2）降低屏蔽套损耗和定转子损耗：a）电机铁心采用细长形；b）电磁负荷和气隙磁密的选择，定子槽型和转子槽型开得较大，而齿很窄，在定、转子齿磁密一定时，由于齿部较窄而使气隙磁密降低^[18-20]。

国内在屏蔽电机损耗方面的研究，早期的一些学者都是根据经验公式的方法对涡流损耗和介质摩擦损耗进行计算。再后来的一些国内学者研究并分析了屏蔽电机的特点，相较于同功率同极数的常规异步电机，效率要低 10%左右，影响屏蔽电机定子屏蔽套损耗和转子表面摩擦损耗的因素是定、转子铁心的长径比。是以，屏蔽电机采用较大的长径比，设计成细长型，定子内径尽量小些，从而进一步减少定子屏蔽套损耗和转子表面损耗。因为屏蔽电机有效气隙长度比普通异步电机大，因此屏蔽电机的励磁电流较大，功率因数低于常规电机。选择合适材料，合适的气隙长度和屏蔽套的厚度，可以提高屏蔽电机的功率因数^[21-24]。

哈尔滨理工大学的孙树林和李觉民^[25]的研究，对定子屏蔽套进行分割，而后分析旋转磁场中元导体产生的感应电势和电损耗，通过积分的方法，得到定子屏蔽套上的涡流损耗，并提供了该公式的修正系数曲线。位于感应电动机气隙中的屏蔽套对电机有如下主要影响：（1）随着电机的定子铁心损耗和绕组损耗的增加，电机效率和功率因数降低；（2）维持电机输出有效功率不变，定子的铁心损耗和绕组损耗随屏蔽套厚度的增加近似呈线性关系增加，而其中和绕组损耗增加速度较之铁心损耗慢；（3）转子铁损、铜损及附加损耗与屏蔽套关系不大，与普通电机相近，约占电机总有效功率的 3~5%。后来又有学者，依照电磁感应定律和涡流场理论，推导出屏蔽套上涡流损耗的计算公式，对屏蔽套的涡流损耗进行定性分析^[26]，减小屏蔽套损耗最有效最直接的方法，就是把电机做成细长型。涡流集中分布在屏蔽套表面上，通过改变屏蔽套表层的晶粒组织结构从而降低电导率或磁导率也是减小涡流损耗的一个办法。

运用解析方法来求磁场分布和气隙磁密的还有哈尔滨工业大学的孙桂瑛^[27]等人，这些学者们分析屏蔽套涡流损耗使用坡印亭定律，将电机磁场做二维磁场对待，对于定子端部绕组对损耗的影响，则采用把计算结果与端部系数相乘的方法。当存在屏蔽套时，定子等效励磁电流受气隙磁密和屏蔽套涡流影响，保持主磁通稳定，加大屏蔽套厚度会使得励磁电流的幅值增大。江苏大学的孔祥花^[28]等人分析了屏蔽电机与常规电机的能量损失差别，总结了屏蔽套能量损耗的分析方法，计算结果与屏蔽套选材、厚度、定转子的参数、输送介质的粘度等之间的关系。他们的研究认为，在满足要求的情况下，应使屏蔽套越薄越好。在他们的文章中，定子屏蔽套厚度一般为 0.4~0.8mm，转子屏蔽套厚度一般为 0.3~0.5mm，定、转子间隙为 1.0~2.0 mm，这样在某种程度上可以提高电机的效率及功率因数。由于经验公式的计算直接使用，虽然对屏蔽电机的屏蔽套损耗进行了定性定量分析，但是经验公式计算值与实测值误差很大，同时，作者也没有考虑电机端部绕组对屏蔽套损耗的影响，这方面也加大了两者的计算误差。沈阳工业大学的安跃军^[29]等人使用有限元软件 ANSOFT 和有限元分析法得出了屏

蔽电机空载损耗的实验值，试验分析了屏蔽套材料的特性参数，研究了电阻率对电机屏蔽套温升的影响，实验结果表明使用有限元分析法得出的结果比使用经验公式得出结果要精确的多。由于感应涡流会使得电机的温度升高，影响屏蔽电泵和整个运输系统的安全。由于假设太多，屏蔽套涡流损耗的传统解析法存在较大的误差，王诗雨^[30]分析了核反应堆冷却泵内屏蔽式感应电机的结构，对屏蔽套涡流损耗进行了分析与计算，以电磁场涡流理论为基点，结合有限元法推导出屏蔽套涡流损耗公式，建立二维涡流场数学模型进行分析计算。为精确的得到屏蔽套涡流损耗结果，通过与传统解析计算方法与实验数据比较，仿真结果通过傅里叶时域变换，再次进行计算分析，进而证明了有限元方法的准确性。

Katsui Yamazaki 结合 3D-2D 的有限元方法来对鼠笼电机的损耗进行分析，首先用 3D 有限元法线性分析端部情况，接着用 2D 有限元非线性时变法，分析电机定子铁心内的磁场分布，这两者互相补充，既有较高的计算准确度，也节省了计算资源和计算时间。但是，作者忽略了转子铜条的感应磁漏和电机温升的影响，因而用此方法计算所得结果相较于实验测得的数据仍有误差^[31]。Yahiaoui A 和 Bouillault F^[32]使用等效路算法，改进参数变为常数，更适用于起动和全负荷状态的计算，他们提出使用 2D 有限元分析法，电机定子铁心范围内电磁场分布采用参数计算，再用 3D 有限元分析法，分析等效路算法对转子铜条端环上的影响。两位学者在文中重点分析了转子端部的影响，毕竟缺乏基于定子端部绕组的种种计算，研究定子端部的情况比转子端部困难的多。

美国西屋公司的两位学者 Garg V K. 和 Raymond J.^[33]，日本千葉大学的学者 Katsumi Yamazaki^[34-36]，土耳其的学者 Ergene L T. 和 Salon S J^[37, 38]等人，这几位国外专家在常规三相鼠笼感应电机 T 等效电路的基础上，提出了实心转子屏蔽电机等效电路模型和电感矩阵，并用有限元法分析研究了等效电路的参数。槽数越多，磁动势波形越好，谐波损耗和谐波磁场越小，电机的功率因数就越高且转子阻抗减小；在槽宽不变时，槽越深转子阻抗越小，但由于有效气隙的增加，功率因数有待于提高^[39]。

美国的 Garg V K. 和 Raymond J.^[33]两位专家以有限元法为基础，在二维涡流场中预先分析电机的损耗，再使用温度场分析，将二维涡流场中的计算结果作为热源，以此建立了屏蔽电机转子的单槽模型，并对堵转情况下转子导条温升进行分析。日本的专家 Katsumi Yamazaki^[35, 40]在屏蔽电机性能研究中将有限元法在二维场和三维场中结合应用，充分考虑了因齿槽效应产生的定转子杂散损耗，并对屏蔽电机的损耗进行了有限元分析。通过经试验得到的涡流损耗修正系数 K_e 和磁滞损耗系数 K_f ，由此计算定转子铁心不同位置处的功率损耗，加上屏蔽损耗等，再使用电机的效率计算公式得出屏蔽电机的最终效率。同时对比分析了空载和负载两种工况下，有屏蔽套和无屏蔽套感

应电机内各种功率损耗所占的百分比。从文中可以看出，铁心材质的磁滞损耗和涡流损耗系数均通过试验获得，结果的准确性试验精度高度相关。土耳其的 Ergene L T.和 Salon S J.^[41-43]等专家们通过 Flux2D 有限元软件，建立实心转子屏蔽电机转子单槽模型，得出结果后对气隙磁密做 FFT 变换，得到气隙磁密的幅频和相频特性，并分别对高频和低频条件下的模型进行分析和损耗对比。并且，根据单槽模型，他们还计算了实心转子屏蔽电机的等效参数，根据常规三相鼠笼感应电机的 T 等效电路，提出了实心转子屏蔽电机等效电路模型和电感矩阵。

Katsumi Yamazaki 和 T Tokumasu^[44-46]等人结合 2D-3D 时步有限元法分析了电机的铜耗和磁场的时间变化，考虑到磁场的时变方向和时谐场的最小磁滞回线，用计算机资源得出了近似的计算铁耗。这种方法可用于实心转子电机，有槽感应电机，无槽电机和鼠笼型感应电机。Ergene L T.和 Salon S J.^[43, 47]几位专家在实心转子屏蔽电机的等效电路上，确定了每个参数，然而文中只对如何简化电路中的参数给出了说明。其中，定转子的漏抗、电阻及励磁阻抗是通过试验测量得出的。在确定电感参数时，与之不相关的地方按真空处理，这种做法具有一定的参考价值，其主要目的是将磁链分开来计算电感。。该文也没能对全参数等效电路进行分析，因而在等效电路建立及参数运算求解等方面，仍有很长的路要走。

1.3 课题的研究内容

本课题的主要内容分为以下几个方面：

- (1) 根据屏蔽电机的结构特点，对屏蔽电机屏蔽套涡流损耗进行理论分析与推导。
- (2) 根据电机的设计要求，确定电机的尺寸，导线绕组，并选择适当的槽型和槽数配合，结合屏蔽电机的特点，分析屏蔽套材料。
- (3) 结合有限元软件，分析电机的性能，验证电机设计的合理性，同时也为电机加屏蔽套以后屏蔽电机的性能做对比，以便分析屏蔽套对电机的影响。
- (4) 运用有限元分析方法，在屏蔽套在相同厚度的条件下，分析不同电阻率下转子屏蔽套和定子屏蔽套分别对电机的影响；在相同电阻率条件下，分析不同屏蔽套厚度对电机性能的影响。

第 2 章 屏蔽电机结构特点及屏蔽套涡流损耗理论研究

2.1 屏蔽电机结构特点

屏蔽泵由屏蔽电机和泵一起配套使用，因为屏蔽电机在结构上具有以下特点：

(1) 输送液体介质过程中，有液体介质流过其气隙，而屏蔽套材料是由非导磁材料做成的，这使得屏蔽电机的有效气隙变大；

(2) 屏蔽套在原则上要求要薄，越薄越好，但又不能太薄，因为其要具有耐介质腐蚀性的同时还要可以承受一定的机械压力；

(3) 屏蔽电机的轴承要能经得起杂质磨擦与所运输液体的介质腐蚀考验，否则将引起屏蔽套的破裂，从而使定子绕组因所运输液体腐蚀而被烧坏，同时介质的泄漏更将引起更加严重的后果，因此必须要慎重对待。通常轴承采用质地较硬的合金和石墨等材料来做，同时根据所输送到液体为碱性、中性还是酸性添加其所需要的添加剂。

图 2.1 为屏蔽电机剖面示意图，图中所示屏蔽电机为双屏蔽电机，也就是定子和转子上各有一个屏蔽套，即，图 2.1 中部件 13 和部件 14 所示，保护电机定子和转子不受侵害。

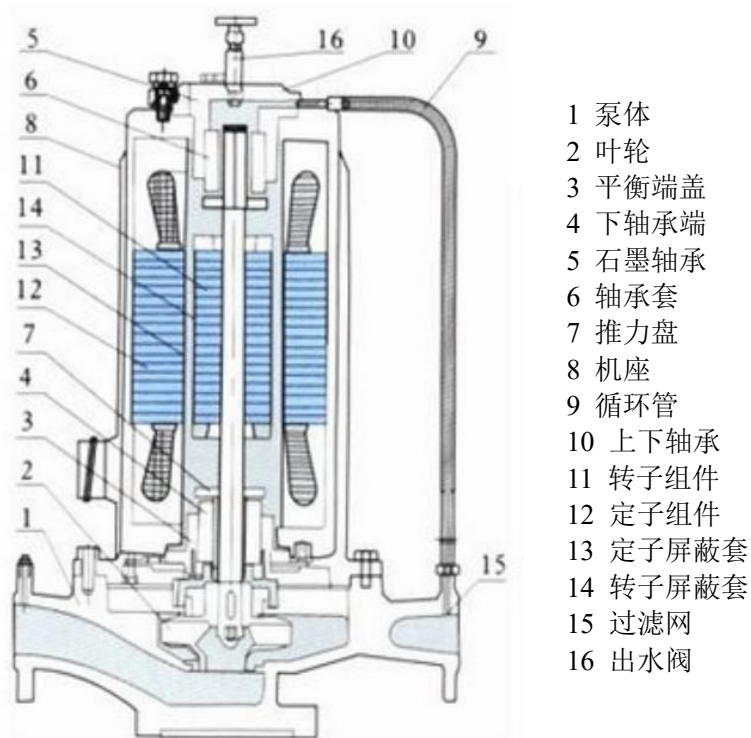


图 2.1 屏蔽电机剖面示意图

Fig. 2.1 Sectional schematic of shield motor

屏蔽电机和泵类部件一起配套使用构成了屏蔽电泵，用来输送易燃、有毒、贵重、

易腐蚀性及带放射性不含固体颗粒的多种液体介质，在输送液体物质时绝对无泄漏，而且运转噪音低。因此，屏蔽电机的上述特点，使得具有屏蔽泵以下优点：

(1) 全封闭。电机只在泵的外壳处存在静密封，因此可以做到全部无泄漏，尤其适合输送易燃烧、易爆炸、有毒、腐蚀性、放射性液体和贵重液体。

(2) 安全性高。因为屏蔽套的存在，使得电机转子和定子不与物料直接接触，避免了腐蚀性物料对电机铁心的伤害，即使屏蔽套破损，也不会发生外泄漏的危险。

(3) 结构紧凑占地少。泵与电机一起配套使用，拆装简洁方便。对底座和基建要求不高，且日常维护工作内容少，运维费用少。

(4) 运行平稳，噪声低，无需润滑油。因为没有滚动轴承和电机散热风扇，因此无需加润滑油，且噪声低。

(5) 使用范围广。对高温、高压、低温、高熔点等多种工况都能安全运行。

2.2 屏蔽套损耗的理论分析

屏蔽电机中由于屏蔽套的存在，虽然使得屏蔽电机在较为恶劣的环境下工作而不受恶劣环境的侵害，但是同样由于屏蔽套的存在，使得电机的效率较之普通电机的效率偏低。^[48, 49]屏蔽电机中定子屏蔽套静止不动，气隙磁场以同步转速切割定子屏蔽套，在定子屏蔽套中产生感应电压，从而形成涡流损耗，相较于磁场和涡流的透入深度 δ ，尽管屏蔽套非常薄，但是其产生的涡流损耗非常大，使得电机的效率偏低于常规电机。因此，有必要对屏蔽电机屏蔽套涡流损耗进行分析，设法将其降低，进而提高电机的效率。

由于屏蔽套材料为非导磁材料，以定子屏蔽套为例，对其进行理论分析时，可以不考虑磁滞损耗。在进行理论分析时，一般采用如下假设条件：

(1) 磁通为正弦波形，磁密在每极下均按正弦分布，即只考虑气隙磁场中的基波分量，忽略各高次谐波分量；

(2) 屏蔽套的厚度远小于电机的定子内径和转子外径，也就是屏蔽套的厚度要远小于屏蔽套的直径；

(3) 屏蔽套的漏抗可以忽略不计；

(4) 定子铁心以外的屏蔽套端部电阻，可以不考虑，定子屏蔽套内涡流沿定子铁心长度方向轴向流动。

基于以上假设，每极下气隙磁场所感应出的最大电势为

$$E_m = B_m l v \quad (2.1)$$

式中， E_m ——感应电势最大值，V；

B_m ——气隙磁密最大值, T;

l ——定子铁心长度, m;

v ——气隙磁场切割屏蔽套的速度, m/s。

气隙磁场在每极下感应出的电势有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

每极下定子屏蔽套损耗 P_0 为

$$P_0 = \frac{E^2}{R} \quad (2.3)$$

式中, P_0 ——每极下屏蔽套的涡流损耗, W。

由此, 每极下定子屏蔽套的电阻为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.4)$$

式中, ρ ——定子屏蔽套材料的电阻率, $\Omega \cdot m$;

S ——定子屏蔽套轴向截面积, m^2 。

由于定子屏蔽套的厚度相对于定子的内径非常小, 则电机每极下定子屏蔽套沿定子轴向截面积为

$$S = \frac{\pi D_i t}{2p} \quad (2.5)$$

式中, D_i ——定子内径, m;

t ——定子屏蔽套厚度, m;

p ——电机极对数。

联立公式 (2.4) 和公式 (2.5), 可以得出每极下定子屏蔽套电为

$$R = \rho \frac{2pl}{\pi D_i t} \quad (2.6)$$

由此, 公式 (2.3) 可以表述为

$$P_0 = \frac{B_m^2 l v^2 D_i t}{4 \rho p} \quad (2.7)$$

因此, 定子屏蔽套的涡流损耗 P' 为

$$P' = 2p \frac{B_m^2 l v^2 \pi D_i t}{4 \rho p} = \frac{B_m^2 l v^2 \pi D_i t}{2 \rho} \quad (2.8)$$

$$v = \pi D_i n \quad (2.9)$$

式中, n ——气隙磁场每秒的转数, r/s。

于是，定子屏蔽套的涡流损耗 P' 为

$$P' = \frac{B_m^2 l \pi^3 D_i^3 n^2 t}{2\rho} \quad (2.10)$$

式子 (2.10) 是通过假设条件 (4) 推导得出的，也就是将定子铁心外屏蔽套端部电阻忽略不计，屏蔽套内涡流流动方向为铁心长度轴向方向。事实上，屏蔽套的端部电阻在客观上是存在的，涡流从一个极至另一个极接近椭圆散布。

把定子屏蔽套的端部电阻考虑在内，实际损耗要比式子 (2.10) 计算的值偏小，其减小系数为

$$k_s = \frac{1}{1.8 + \tau / l} \quad (2.11)$$

式中， τ ——极距，m。

$$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} \quad (2.12)$$

于是，每极下定子屏蔽套中，实际损耗 P 为

$$P = \frac{k_s B_m^2 l \pi^3 D_i^3 n^2 t}{2\rho} \quad (2.13)$$

式子 (2.13) 在推导上，有着比较清晰的物理概念，可以用来对屏蔽套损耗的进行初步估算，但是在磁场计算上，时变电磁场被静态电磁场取代，计算数据和实验结果有所误差。

2.3 影响屏蔽套损耗的因素

从式子(2.13)中可以得出，一些影响屏蔽套涡流损耗的物理因素，现阐述如下：

(1) 保持通过屏蔽套磁通不变，因此屏蔽套上的感应电动势变化不大，而屏蔽套厚度的增大，屏蔽套的等效电阻却减小了，于是电机屏蔽套的涡流损耗就会增大，屏蔽套对磁场的影响逐渐增强。

(2) 增大屏蔽套电导率产生的影响与增大屏蔽套厚度所产生的影响基本差不多，这两者都能够引起屏蔽套涡流损耗的增加，只是增大屏蔽套的厚度，可以等效为电机的有效气隙长度有所增大，从而加长了电机的磁路。通过计算可以发现，随着屏蔽套厚度的增大，如果要保持气隙磁密不变，对应的励磁电流务必增大；而屏蔽套电导率增大时，如果保持气隙磁通密度不变，对应的励磁电流增幅小于屏蔽套厚度增大带来的影响。是以，对此种电机设计时，屏蔽套材料应尽可能选择电导率小的材料，同时屏蔽套的厚度越小越好，以此来减小电机屏蔽套的涡流损耗。

(3) 由式子(2.13)中还可以得出,屏蔽套损耗与电机设计参数之间存在一定关系。把设计变量设定为屏蔽套直径和气隙磁密峰值,使用有限元优化设计,保持其余的参数恒定,目标函数是屏蔽套涡流损耗,可以得出屏蔽套损耗和特定电机设计参数之间的关系;屏蔽套损耗同气隙磁密的平方成正比,同屏蔽套直径的立方成正比。因此,电机气隙磁密应适当选择较低值,屏蔽套直径选的小一点,同等功率下电机定子长度可以做的长一点,也就是把电机做成细长型,以减小屏蔽套涡流损耗。

因此,对于屏蔽套,一方面要能够承受机械压力,受压变形要满足机械要求;另一方面要尽可能减少金属屏蔽套的涡流损耗,以提高电能的利用率。为提高电能的利用率,降低屏蔽套涡流损耗,屏蔽套在选材上应该选用电导率较小的材料,在满足机械强度的同时,应使得屏蔽套越薄越好,这样就越有利于降低屏蔽套损耗。

2.4 本章小结

本章介绍了屏蔽电机的结构特点,屏蔽电机因屏蔽套的存在而使得电机效率低于普通电机,本章从理论上分析了屏蔽套涡流损耗产生的原因,并推导了屏蔽套涡流损耗的理论公式,根据理论公式提出了相应的措施来降低屏蔽套涡流损耗。

第 3 章 潜水电机设计

潜水电机一般分为四类：充水式潜水电机，充油式潜水电机，充气式潜水电机和屏蔽式潜水电机。本文中潜水电机是屏蔽式潜水电机，该潜水电机以异步电机为基础，在异步电机基础上加以屏蔽保护，使得电机可以在恶劣环境下安全运行。电机的定子和转子结构与常规的三相鼠笼型感应电机的定转子结构基本相同，因此电磁设计与三相鼠笼型感应电机差别不大，可以参考一般三相鼠笼型感应电机的电磁设计过程，该电机的基本设计参数如表 3.1 所示。

表 3.1 电机基本设计参数
Tab. 3.1 Basic design parameters of the motor

输出功率 P_N/kW	7.5
输入电压 U_N/V	380
频率 f_N/Hz	50
效率 η	0.83
功率因数 $\cos\varphi$	0.87

3.1 电机主要尺寸的确定

我国针对系列电机的中心高做出规定，电机定子的内径和外径作为电机的主要尺寸，电机的内外径设计的合理，可以减少电机的温升，减少电机的损耗^[50]。电机主要参数之间的关系：

$$A \times B_\delta = \frac{6.1}{\alpha_p \times K_{Nm} \times K_{dp}} \times \frac{P'}{n \times D^2 \times l_{\text{eff}}} \quad (3.1)$$

$$P' = \frac{K_E \times P_N}{\eta \times \cos\varphi} \quad (3.2)$$

其中， A 和 B_δ 分别是电机的线负荷与电机的气隙磁密值， P' 是电机的计算功率，可以通过技术参数 K_E ， P_N ， η ， $\cos\varphi$ 求得； K_E ， P_N ， η ，和 $\cos\varphi$ 分别是电势系数，电机的额定功率，电机的效率和功率因数； α_p ， K_{Nm} ， K_{dp} 分别是计算极弧系数，气隙磁场波形系数和电枢绕组系数； n ， D 和 l_{eff} 分别是电机的转速，定子内径和电机铁心有效长度。

在电机设计中，由于 K_E ， α_p ， K_{Nm} 和 K_{dp} 的变化范围非常小，因此 $D^2 \times l_{\text{eff}}$ 近似反映了转子有效部分的体积，提高它们的乘积以提高材料的利用率，达到设计要求。由于此类电机将用于泵类负载，此类负载属于轻型负载，因此可以将电机的极数定为 2，使得电机有较高的转速。根据技术要求，以型号 MBA7.5-2 的电机为参考标准，初步得到电机的有效铁心长度 l_{eff} 为 141mm，定子内径 D_{i1} 为 106mm，定子外径 D_1 为 185mm。

3.2 电机气隙和绕组导线的选择

三相异步电机中气隙长度对电机性能影响很大，气隙 δ 的数值基本取决于定子内径和转子外径，合理的气隙有利于提高电机的功率因数，降低杂散损耗，降低温升，提高效率，减小振动和噪音。气隙的选择要考虑多方面因素，小的气隙可以降低励磁电流从而提高功率因数，但是气隙长度不可随意减小，当气隙减小到一定程度时，定转子的机械可靠性对其影响尤甚，主要表现在转子外表面与定子内表面相互摩擦干扰的情况，尤其是运行在高频时候，转子电流密度大，温升高，如果转子材料受热膨胀，更容易形成二者的摩擦，严重影响电机的可靠性。如果选取的气隙长度太小，定转子齿内部被气隙谐波磁通透过，然后通过轭部形成闭合回路，当谐波磁场与定转子齿存在相对运动时，将致使整个齿中脉振损耗增加，谐波漏抗增大，最终使得电机不利于散热，过载能力下降。电机的空载电流决定了感应电机的功率因数 $\cos\varphi$ ，是以，气隙 δ 的值应尽可能的小，以减少空载电流。如果气隙太小，不光电机的机械可靠性受到影响，还会使得谐波磁场和谐波漏抗增大，从而减小了起动转矩和最大转矩，增大了谐波转矩和附加损耗，最终引起较高的温升和噪声。因此对于一般中小型异步电机，气隙长度一般由下面的公式决定：

$$\delta = \frac{D_{i1} - D_2}{2} \quad (3.3)$$

式中， D_{i1} ——电机定子内径；

D_2 ——电机转子外径。

3.2.1 气隙系数的选择

如果定转子两边都开槽，则二者的相对位置决定了气隙系数 K_δ [51]。当定子槽口与转子齿的中心线对准时，有 $K_\delta < K_{\delta 1} K_{\delta 2}$ ($K_{\delta 1}$ 为定子有槽，转子假设为光滑时的气隙系数； $K_{\delta 2}$ 是转子有槽，定子假设为光滑时的气隙系数)；当转子槽口与定子齿的中心线对准时， $K_\delta > K_{\delta 1} K_{\delta 2}$ 。实际上，转子是运动的，定转子槽的相对位置一直在变化，因此 K_δ 应取两种特殊情况下的平均值，即：

$$K_\delta \approx K_{\delta 1} K_{\delta 2} \quad (3.4)$$

当电机定子和转子为半开半闭口槽时，则有：

$$\begin{cases} K_{\delta 1} = \frac{t_1(4.4\delta + 0.75 \times b_{s0}^2)}{t_1(4.4\delta + 0.75 \times b_{s0}) - b_{s0}^2} \\ K_{\delta 2} = \frac{t_2(4.4\delta + 0.75 \times b_{r0}^2)}{t_2(4.4\delta + 0.75 \times b_{r0}) - b_{r0}^2} \end{cases} \quad (3.5)$$

当电机定子和转子为开口槽时，则有：

$$\begin{cases} K_{\delta 1} = \frac{t_1(5\delta + b_{s0})}{t_1(5\delta + b_{s0}) - b_{s0}^2} \\ K_{\delta 2} = \frac{t_2(5\delta + b_{r0})}{t_2(5\delta + b_{r0}) - b_{r0}^2} \end{cases} \quad (3.6)$$

式中， $K_{\delta 1}$ ， $K_{\delta 2}$ ——定子、转子卡式系数；

t_1 ， t_2 ——定子、转子齿距；

b_{s0} ， b_{r0} ——定子、转子槽口宽。

3.2.2 电机绕组导线的选择

在电机设计中，绕组选择的合适，某些高次谐波可以有效的被削弱。定子和转子每极每相槽数越多，或使用分数槽绕组接线，也可以降低空间气隙谐波磁势。定子和转子每极每相槽数越多，表明绕组分布趋势增大，使得磁势波形中谐波分量减少，磁势波形越接近于标准正弦波。

三相交流绕组要求各相相轴在空间上互差 120° 电角度，并且有着相同的匝数，这样可以保证各相磁动势和电动势互相对称，也就是大小相等，相位上互差 120° 电角度，各相并联的支路上同时有着相同的电动势，电流和电抗。同时，绕组感应的电动势和产生的磁动势的基波分量应尽可能的大，而谐波分量则尽可能的小。在本电机设计中，绕组线圈采用单层同心式，相带绕组采用 60° ，节距为 10。

定子绕组线径的选择，主要取决于运行时定子的电流大小和导线的线负荷，根据公式：

$$I_1 = \frac{P_N \times 10^3}{m_1 U_N \eta \cos \varphi} \quad (3.7)$$

式中， I_1 是电机绕组电流，参考表 3.1 中电机设计基本技术要求，可以得出 P_N ， η ， $\cos \varphi$ 的值， m_1 为相数，这里取 3。

定子绕组电流密度

$$J_1 = \frac{I_1}{a_1 N_1 S_0} \quad (3.8)$$

$$N_1 \times S_0 = \frac{I_N}{\eta \times \cos \varphi \times a_1 \times I_1} \quad (3.9)$$

式中， a_1 ——并联支路数；

N_1 ——绕组线规，通过计算，这里近似取 2；

S_0 ——导线截面积。

从上式中可以看出, 所取导线截面积的大小, 直接影响定子绕组电流密度的大小, 并且较大的绕组电流会导致电机定子铜耗增加、效率下降、温升过高。中、小型异步电动机的定子绕组电流密度一般为 $4.5 \sim 6.5 \text{ A/mm}^2$ 。这里 J_1 取 5.83 A/mm^2 。因此, 导线截面积为

$$S_0 = \frac{I_1}{a_1 N_1 J_1} \quad (3.10)$$

联立式子 (3.7) 至 (3.10), 可得 S_0 为 0.737 mm^2 , 即, 导线截面积为 0.737 mm^2 , 即, 导线直径约为 0.96 mm , 根据相关技术手册和要求, 选择导线直径为 0.97 mm 的裸线, 加上绝缘漆以后漆包线的直径约为 1.07 mm 。同时考虑到为了使得嵌线方便, 单根导线的直径一般不要超过 1.68 mm , 通过上述两个公式计算得出的导线直径约为 1.07 mm , 也在合理的范围之内。

由于是单层同心式绕组, 每槽导体数等于每圈匝数, 这里取 42 匝, 槽满率以 0.75 计算, 可以反推得出定子槽的有效槽面积大约为 125.1 mm^2 。

3.3 电机槽型的选择

3.3.1 定子槽数、槽型及尺寸的选择

电动机常用的定子槽型一般有如下几种, 如图 3.1 所示:

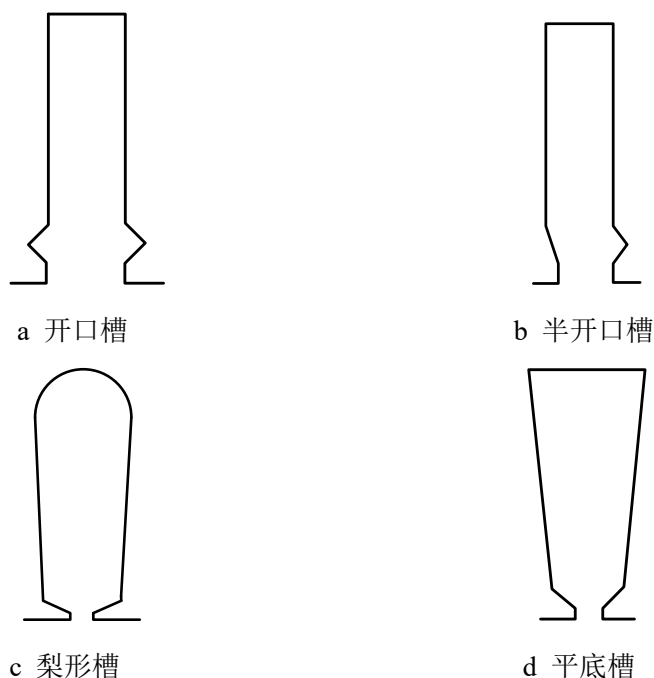


图 3.1 常用定子槽型
Fig. 3.1 Common stator slot

在图 3.1 常用的定子槽型中, a 为开口槽, 一般用于大型容量和中型容量的高压异

步电动机；b 为半开口槽，500V 以下的中型异步电动机多用这种槽型；c 和 d 为半闭口槽，使用这类槽型的电动机效率功率因数一般较高，但是这类槽型的使用使得电机的绕组嵌线和绝缘相较于其他槽型困难，低压小型异步电动机中多用这类槽型。

在异步电机设计中，定子槽数 Q_1 越多，槽和齿的利用率会降低，还会造成电阻和齿磁密的增大。但是，定子槽数 Q_1 越多，磁动势波形越好，谐波损耗和谐波磁场越小。为了满足上述要求，一般把定子每极每相槽数控制在 2~6 之间。这里，每极每相槽数选择为 4，也就是定子槽数 Q_1 为 24。由此，可以算得每相绕组串联导体数：

$$N_{\Phi 1} = \frac{Q_1 N_{s1}}{m_1 a_1} \quad (3.11)$$

式中， Q_1 ——定子槽数；

N_{s1} ——定子每槽导体数，这里取 42。

定子槽的有效面积约为 125.1mm^2 ，因此结合 Y132S-2 电机和 Y132M-4 电机的槽型及尺寸，初步设定了两种可供选择的定子槽型，分别是平底槽和梨形槽，参数示意图如图 3.2 所示，其参数如表 3.2 和表 3.3 所示：

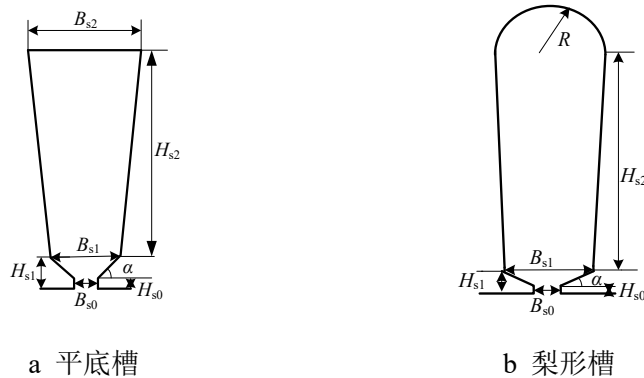


图 3.2 定子槽型参数示意图

Fig. 3.2 Schematic diagram of stator slot parameters

表 3.2 平底槽参数

Tab. 3.2 Parameters of flat slot

参数	数值
B_{s0}/mm	2
H_{s0}/mm	0.6
α/deg	30
B_{s1}/mm	7.9
H_{s1}/mm	1.24
B_{s2}/mm	11.4
H_{s2}/mm	14.5

表 3.3 梨形槽参数

Tab. 3.3 Parameters of pear shaped slot

参数	数值
B_{s0}/mm	3.5
H_{s0}/mm	0.6

续表 3.3

α/deg	30
B_{s1}/mm	6.7
H_{s1}/mm	0.9
R/mm	4.4
H_{s2}/mm	13.6

$$S_f = \frac{N_1 N_{s1} d_{i1}^2}{S_e} \quad (3.12)$$

式中, S_f ——槽满率;

d_{i1} ——加绝缘漆以后导线的直径;

S_e ——槽有效面积。

考虑到槽绝缘占用的槽面积, 通过计算得到平底槽槽满率为 73%, 梨形槽槽满率为 76%。由于平底槽底部为平底, 轭部较厚, 因此槽利用率较梨形槽差, 但是较厚的轭部使得电机运行的时候更加平稳, 噪声也会较小。

3.3.2 电机转子槽型的确定

转子槽设计, 在整个电机设计有着非常重要的地位。因为转子是电机中电能和机械能转换的重要载体, 在电磁能量的传递过程中起着枢纽作用, 其设计对电机的效率、功率因数以及转矩的影响很大。

如果供电是正弦供电, 异步电机设计中确定转子槽形需要考虑以下几点: 选择合适的槽型, 保证有足够的转子槽面积, 以便减少转子铜损耗从而保证电机效率; 保证转子齿部和轭部导磁截面积足够大; 可以有较大的起动转矩, 但起动电流不宜过高。

由于转子槽对于异步电机的性能有一定的影响^[52], 因此在异步电机设计过程中一般应遵循以下几个原则:

(1) 转子槽面积应尽可能大些。这样在一定程度上可以抑制起动电流而增大了起动转矩。因此, 限制起动电流和增大起动转矩, 不需要通过增加转子电阻来实现, 反而应尽量减小转子电阻, 这样可以减少转子基波铜损, 以此补偿高次谐波引起的铜损, 进而提高电动机的效率, 也就是转子槽面积不宜太小;

(2) 转子槽形宜浅不宜深, 这样可以抑制高次谐波电流, 使得电动机总漏抗相应减小;

(3) 转子槽形总体上是上宽下窄, 这利于得到工作性能良好的平行齿, 并且可以降低高次谐波集肤效应, 以此减少对电动机性能的影响。在设计槽形尺寸时, 应把转子槽形各部分尺寸对电动机性能的影响考虑在内;

(4) 转子应采用斜槽, 对于普通异步电机来说, 把转子做成斜槽, 这样可以降低

高次谐波，削弱有害的附加转矩，降低电磁噪音，一般为一个定子齿距。

一般小容量电机采用图 3.3 所示，a 和 b 中所示的梯形槽和梨形槽。这两种槽均为半闭口槽，其齿部均为平行齿，齿部磁密分布均匀；在齿部所需励磁磁动势一定的条件下，槽面积可充分利用；电机效率较高；集肤效应较小，起动转矩不大。对于较大容量中的小型或中型电动机笼型铸铝转子一般可以采用图 c 和 d 中所示的凸形槽或刀型槽。凸形槽为一个倒梯形，由于其上部较为狭窄使得槽面积受限，转子槽底所对应的转子齿导磁面积有一个最小值，容易发生转子磁密过饱和问题。其优点在于挤流效应显著，调整槽上部尺寸能有效抑制起动电流，起动时利用导条集肤效应，使得交流起动电阻大大高于运行时的转子电阻，这样易于获得较高的起动转矩，从而改善电机的起动性能。槽型 e 和 f 为闭口槽，槽漏抗较大，桥拱高度，工艺上不易保证，但是杂散损耗较小，也可以用于小型电动机笼型铸铝转子。

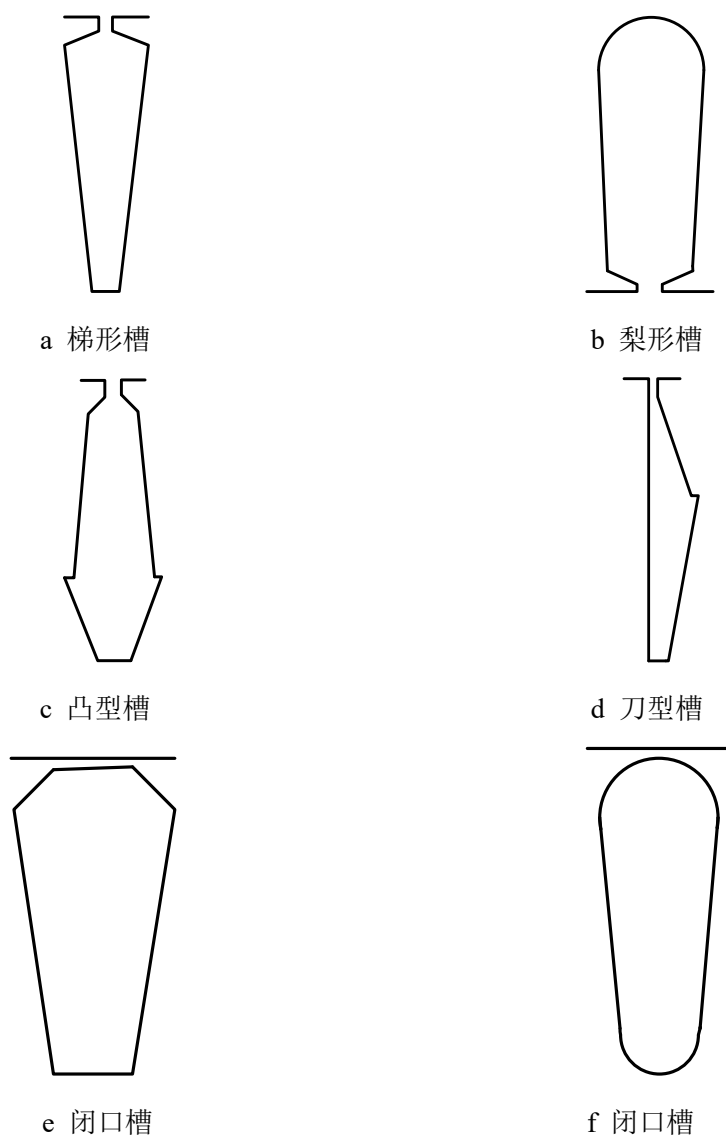


图 3.3 常用转子槽型
Fig. 3.3 Common rotor slot type

此电机设计中，由于近槽-少槽配合容易产生电磁振动和噪声，还可能会产生同步附加转矩，因此采用了高桥本人，罗马尼亚电工手册，CepreeB 等推荐的槽数配合^[53]，也就是定子 24 槽，转子采用 28 槽。转子槽为梯形槽，转子斜槽宽为一个定子齿距为

$$b_{sk} = t_1 \quad (3.13)$$

式中， b_{sk} ——转子槽宽；

t_1 ——定子齿距。

联立式子 (3.13) 和 (3.14) 可得，转子斜槽宽为 13.88mm。

电机的满载励磁电流为

$$I_m = \frac{4.44 F_p}{m_1 N_{\Phi 1} K_{dp1}} \quad (3.15)$$

式中， F_p 为电机总磁压降值的两倍。

满载励磁电流标么值为励磁电流 I_m 与功电流 I_{kw} 的比值，而励磁电抗标么值是满载励磁电流标么值的倒数。转子槽漏抗标么值为

$$x_{s2}^* = \frac{2l_2 m_1 p \lambda_{s2}}{l_{eff} Q_2} C_x \quad (3.16)$$

$$C_x = \frac{2.63 f P_2 (N_{\Phi 1} K_{dp1})^2}{2p U_1^2 \times 10^5} \quad (3.17)$$

式中， x_{s2}^* ——转子槽漏抗标么值；

λ_{s2} ——转子槽单位漏磁导，这里为 1.797；

l_2 ——在无径向通风时， l_2 等于铁心长度 l 。

C_x ——漏抗系数。

转子谐波漏抗标么值为

$$x_{d2}^* = \left(\frac{m_1 \tau_p}{\pi^2 \delta_e} \right) \frac{\sum R}{K_t} C_x \quad (3.18)$$

式中， $\sum R$ 为 0.00421。

转子端部漏抗标么值为

$$x_{e2}^* = \frac{0.757}{l_{eff}} \left(\frac{l_B - l}{1.13} + \frac{D_R}{2p} \right) C_x \quad (3.19)$$

式中， D_R ——转子端环平均直径；

l_B ——在铸铝转子中， l_B 等于 l 。

转子斜槽漏抗标么值为

$$x_{sk}^* = 0.5 \left(\frac{b_{sk}}{t_2} \right)^2 x_{d2}^* \quad (3.20)$$

式中, b_{sk} ——转子斜槽宽度;

t_2 ——转子齿距。

转子漏抗标么值为

$$x^* = x_{s2}^* + x_{d2}^* + x_{e2}^* + x_{sk}^* \quad (3.21)$$

电机定子电流和转子导条电流之间有如下关系:

$$I_2 = K_1 I_1 \frac{m_1 N_{\Phi 1} K_{dp1}}{m_2 N_{\Phi 2} K_{dp2}} \quad (3.22)$$

式中, I_2 是电机的转子导条电流, I_1 是电机的定子绕组电流; K_1 是引入系数, 其值与功率因数呈正相关性, 当功率因数 $\cos\varphi$ 低于 0.8 时, 其值约为功率因数的 1.1 倍, 当功率因数 $\cos\varphi$ 高于 0.8 时, 其值约为功率因数 $\cos\varphi$ 的 1.05 倍; $N_{\Phi 2}$ 是转子每槽每相串联导体数; K_{dp2} ——转子绕组基波系数, 鼠笼型感应电机一般为 1。

由此, 可以求得转子每相串联导体数约为 9 个。

因此, 可求得转子导条的面积为

$$S_B = \frac{I_2}{J_B} \quad (3.23)$$

式中, S_B ——转子导条面积;

J_B ——转子导条电密。

其中, 导条电密一般为 2~4.5A/mm², 这里导条电密取值约为 3.697A/mm²。

转子槽参数示意图如图 3.4 所示, 具体参数如表 3.4 所示,

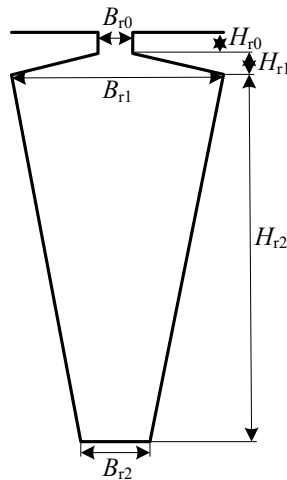


图 3.4 转子槽参数示意图

Fig. 3.4 Schematic diagram of rotor slot parameters

表 3.4 转子槽参数
Tab. 3.4 Rotor slot parameters

参数	数值
B_{r0}/mm	1
H_{r0}/mm	0.6
B_{r1}/mm	5.9
H_{r1}/mm	1
B_{r2}/mm	2
H_{r2}/mm	17.4

两种定子槽型下, 电机性能对比如表 3.5 所示

表 3.5 两种槽型下电机性能
Tab. 3.5 Performances of motors at two kinds of slots

名称	平底槽	梨形槽
定子电流/A	8.816	9.523
电机转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	25.709	25.784
电机转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	2893	2890
定子铜耗/W	403.4	458.7
转子铜耗/W	212.2	237.8
定子铁耗/W	142.88	140.12
电机效率	0.873	0.865
功率因数	0.855	0.799

通过以上两种槽型下电机性能的对比分析, 可以看出, 在本电机设计中, 电机设计定子采用平底槽的性能要优于电机定子采用梨形槽, 因此电机定子采用平底槽。

3.4 屏蔽式潜水电机结构及屏蔽套选材

3.4.1 屏蔽电机机构

屏蔽电机虽然结构特殊, 但是其定转子结构与常规鼠笼型感应电机完全相同。屏蔽电动机与泵配套使用组成屏蔽电泵, 主要用于输送有害气体或腐蚀性液体。电机浸于液体或气体介质中长期运行, 为防止铁心腐蚀, 在定子内表面和转子外表面各用一层非磁性不锈钢薄套焊封在两端端板上, 从而将定转子铁心和绕组保护起来, 免受运输介质的伤害。在气隙中把定子和转子分别加上屏蔽套, 这种是双屏蔽电机; 而在单屏蔽电机中, 则只加定子屏蔽套或者转子屏蔽套。其中, 定子屏蔽套用来防止运输物质泄入定子绕组及定子铁心, 转子屏蔽套用来保护转子不受运输物质的侵蚀。屏蔽电机的屏蔽套由机械强度高、可塑性强、电导率低、不导磁、耐腐蚀的不锈钢薄板焊接而成, 电机绕组完全密封, 运输的物质可以进入电机内部, 由于屏蔽套的存在, 不会进入定、转子及铁心。

3.4.2 屏蔽套的要求、结构、选材

(1) 对屏蔽套的要求

对于屏蔽套, 一方面要能够承受机械压力, 受压变形要满足机械要求; 另一方面

要尽可能减少金属屏蔽套的涡流损耗，以提高电能的利用率。

（2）屏蔽套的结构

一般分为两种结构，即带有支撑轴座结构和无支撑轴座结构。结合实际又有不同形式：屏蔽套开口处带止口，使用法兰连接，外部加设多种加强筋等。

（3）屏蔽套的选材

屏蔽套可以为金属和非金属两类。

金属材料：一般要把材料的机械性考虑在内，用的比较多的多是金属合金，如哈氏合金 316 不锈钢，C276 合金，钛合金等。

非金属材料：如陶瓷，几乎对于任何的腐蚀性介质都可以使用，并且没有任何涡流损耗；由于受机械强度限制，陶瓷型屏蔽套壁厚较大，一般最小壁厚为 3mm，但是工艺性能一般。其他材料诸如塑料，碳纤维，虽然工艺性能好，易于加工，并且也没有涡流损耗，但是其耐不住高温，机械强度不高。

3.5 本章小结

本章从潜水电机设计分析入手，根据技术要求，确定了电机的主要尺寸，分析了电机的定子绕组和气隙，定子和转子的选槽，并由此反推了槽型，最终确定了电机的槽数配合，在此基础上阐述了屏蔽套的要求、结构和材料的选择，初步完成了电机的雏形，为下一步软件方面的分析打下了基础。

第 4 章 有限元软件仿真分析

4.1 有限元理论方法和有限元软件简介

4.1.1 有限元理论方法简介

在工程实践中多涉及到对各种场问题的分析^[54]，一般的分析方法大多采用有限元法、有限差分法和边界元法，其中以有限元法的应用范围为最广，其在固体中的力场、流体中的流场、传热学中的温度场、电磁学中的电磁场等场量的计算中有着较为广泛的应用。有限元问题可以规定为给定边界条件下的求解控制方程的问题，有限元的基本思想可归纳为几点。

(1) 对求解的连续区域进行离散化，离散为若干小的子域单元，对于二维计算域结构可将其分割成单纯的三角形或矩形有限单元，对于三维计算域结构可将其分割为单纯的四面体或六面体有限单元。

(2) 对每个单元进行泛函表示，将单元位置和单元场量表示为能量泛函的形式。用每个单元的近似函数，表示全区域内的待求解各点的未知场变量，在每个单元内的近似函数中，未知场变量函数在各个结点处的数值进行插值表示，形成该点的能量函数，将求解区域中的每个点的能量函数组合在一起形成求解区域的能量泛函。

(3) 对所列的泛函方程组通过基本方程、边界条件等效的变分原理或加权余量法建立以场变量函数为未知量的代数方程组或常微分方程组，对所建立的变分方程求其泛函的极值，认为能量总是按照最小的路径流动，从而得到求解区域内各点的场量。

4.1.2 有限元软件简介

Maxwell 2D/3D 是专门服务于工程设计人员，尤其针对开发电机以及各种新型装置的研发人员，它不仅功能强大，可以求解电场、静态场、瞬态场的电磁装置的电磁场等问题，而且计算结果准确，使用便捷，有利于使用者提高研发效率，开发出性能优异的产品。

Ansoft 软件中有自带的 Rmxprt 模块，使用等效磁路法设计电机可使用该模块，用户可以使用 Rmxprt 中固有的电机模型包括三相感应电机、永磁同步电机、无刷直流电机等多种常规电机模型来选择其中需要的模型进行设计。用户在选用模型之后，创建相应的工程，通过输入电机的额定参数、定子相关参数及转子相关参数之后，就可以进行对电机的运行计算，并查看电机全部参数结果。通过对参数及相关输出图表进行分析电机设计的合理性，也可以根据需要对参数进行参数化分析，得到需求的电磁设

计方案。用户也可以根据自身实际需要修改输入参数，不断地修正参数反复进行运算，直到得到最佳的设计方案为止。此外，在保存最终结果之后，Rmxprt 模块还具有一键生成 Maxwell 2D/3D 模型的功能，很好的体现了 Rmxprt 软件设计电机的便捷性。

4.2 有限元软件建模

4.2.1 模型的建立

本文中的屏蔽电机以异步电机为基础，在结构上和异步电机基本一致，因此，先建立异步电机模型。传统的绘制方法都是在 Ansoft 软件中进行的，根据具体尺寸在坐标中进行绘制，既复杂又费时。由于本文中设计的屏蔽电机和普通的异步电机在结构上基本一致，因此本文采用在 Rmxprt 模块中生成异步电机，然后再导入 Ansoft 软件中，建立电机的二维模型，然后在电机转子上添加上屏蔽套，并给屏蔽套附加上相应的材料。用此方法可以大大节约建模时间^[55]。

图 4.1 和图 4.2 分别是电机模型和电机局部模型，

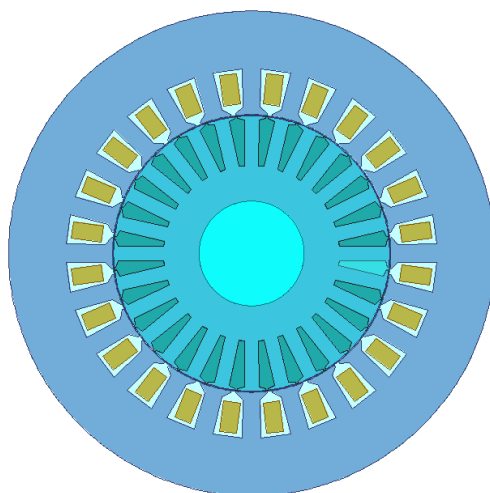


图 4.1 屏蔽电机模型
Fig. 4.1 Model of shielded motor

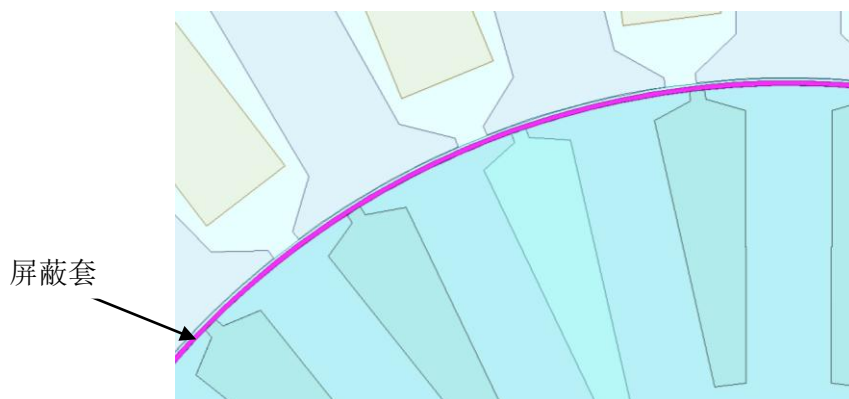


图 4.2 屏蔽电机局部示意图
Fig. 4.2 Partial schematic diagram of shielded motor

4.2.2 各部分材料设置

- (1) 定子铁心和转子铁心使用 DW-456 硅钢片，可在材料库中添加；
- (2) 定子绕组采用铜线，其磁导率为 0.99991，非常接近 1，电导率为 58000000simense/m；
- (3) 气隙定义为空气，其相对磁导率为 1；
- (4) 转子为鼠笼型转子，导条材料选择材料库中自带的 cast_aluminum_75C；
- (5) 屏蔽套材料一般不导磁，磁导率可以设置为 1；
- (6) 2 极电机，可以把转轴设置为导磁。

4.2.3 激励源的添加和网格剖分

本文中的激励源是电压源，实际电网中的高次谐波分量一般不被考虑，这里电压 380V，角接，频率为 50Hz，各相相位角相差 120° 。

网格划分是有限元求解的重要部分，一定要在定义材料属性、实常数和单元类型结束之后，才可以进行网格剖分。Ansoft 剖分一般采用自适应网格剖分原理，常见的剖分单元是三角形形状，但根据实际需要，需要手工进行局部调整以提高计算精度，其中在屏蔽套区域和气隙的网格数最多，网格越多则意味着剖分越精细，计算精度越高，但是占用的计算机内存也越大，计算时间也越长。

图 4.3 中 a 和 b 分别是电机的剖分示意图和局部剖分示意图，

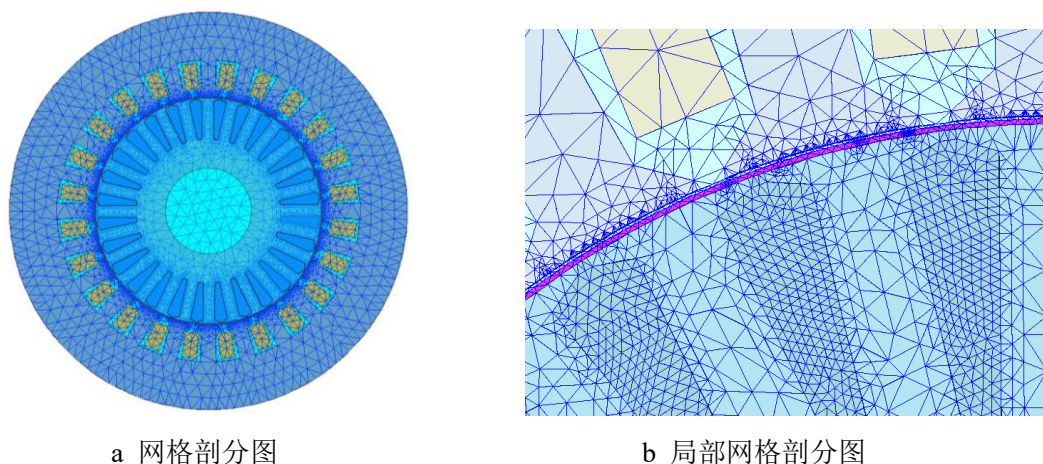


图 4.3 网格剖分示意图

Fig. 4.3 Schematic diagram of mesh generation

4.3 电机性能分析

4.3.1 电机的空载运行状态

电机的空载运行是指电机运行中转轴上没有任何负载，在理想状态下，不考虑电机的机械摩擦损耗及附加损耗，按照电机定子绕组上给定的额定电压进行运行。这时

的电机转子旋转速度与定子磁场的旋转速度非常接近，转差率接近零，在理想状态下可以认为电机的转差率为零（实际运行中是有转差率的，即，转差率不为零）。不考虑空载损耗对转速的影响，只进行电压电流的循环迭代过程。

从图 4.4 和图 4.5 可知，空载状态下定子槽附近磁力线分布较均匀，磁密分布没有过大的地方，均在合理的范围之内。

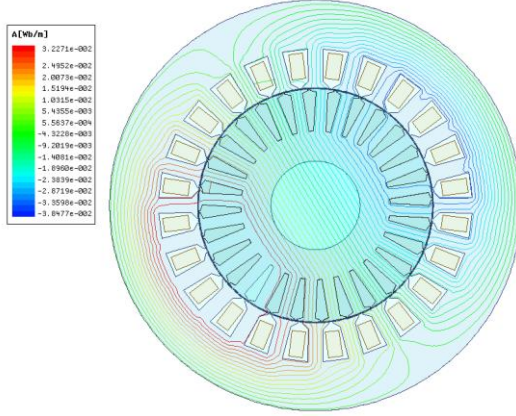


图 4.4 空载磁力线分布图
Fig. 4.4 Magnetic field distribution diagram at no load

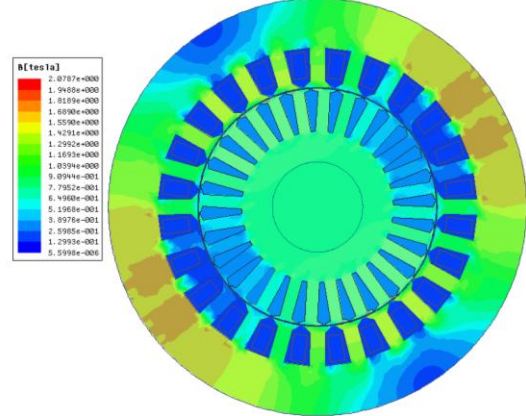


图 4.5 空载磁密云分布图
Fig. 4.5 Magnetic flux density distribution at no load

然而，在实际的空载运行中，由于电机在旋转过程中气隙里面存在有机械损耗和杂散损耗，与理想状态下的空载损耗有着很大的不同。由于机械损耗和杂散损耗的存在，使得空载状态下电机的转矩不完全为零。

在计算实际空载情况时必须要有功率循环和电流循环两部分，其中功率恒等式为

$$P_m = P_{fw} + P_s + P_{Can} + P_{Cu2} \quad (4.1)$$

式中， P_m ——电磁功率；

P_{fw} ——机械损耗，这里也包括了电机的水磨损耗；

P_s ——杂散损耗；

P_{Can} ——屏蔽套损耗；

P_{Cu2} ——转子铜耗。

其中，满足以下关系：

$$s = \frac{P_{Cu2}}{P_m} \quad (4.2)$$

$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (4.3)$$

上述两个式子中， n 是转子速度， s 是转差率。

经过计算，空载状态下，电机转差率 s 约为 0.022，转子铜耗 P_{Cu2} 约为 10.261W。

图 4.6 和图 4.7 分别为空载状态下电机的定子电流图和转矩图。电机稳定后，定子绕组电流以 A 相为例，经过取电流均方根值运算后，其值约为 4.0216A。理想空载状态下转矩非常小，接近于零。然而实际空载状态下，由于机械损耗和杂散损耗的存在，使得转矩大小不为零，电机稳定后，求取均方根值，可得空载转矩为 1.1819N·m。求解过程中，为了使得计算结果更加精确，在求解过程中将步长设置的很小，但是求解设置的步长越小，求解速度越慢，计算机运行时占用 CPU 内存越大，运算时间也越长。

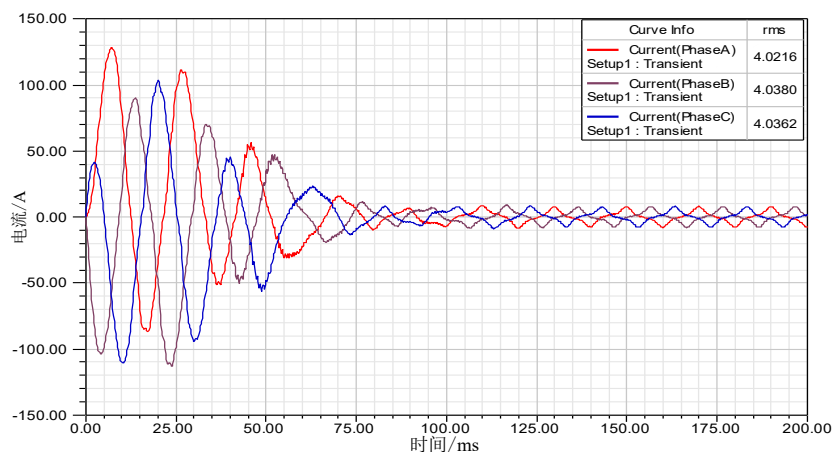


图 4.6 定子绕组电流
Fig. 4.6 Winding current of Stator

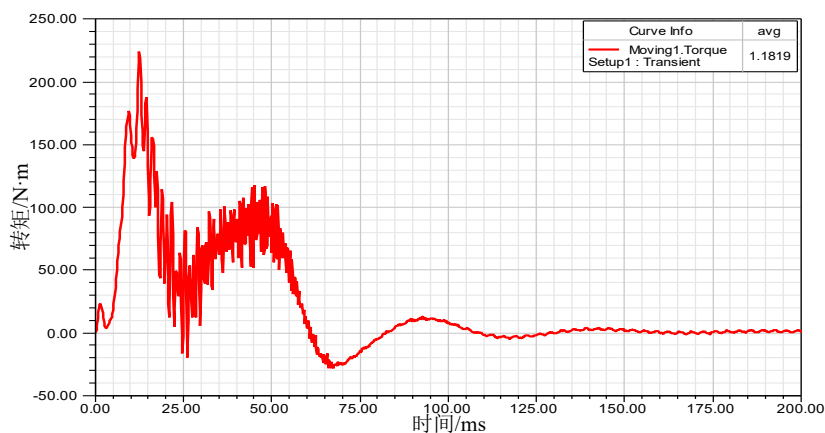


图 4.7 电机空载状态转矩
Fig. 4.7 Torque of motor at no load

综上，空载状态下，电机稳定后的性能值如表 4.1 所示：

表 4.1 空载状态下电机性能

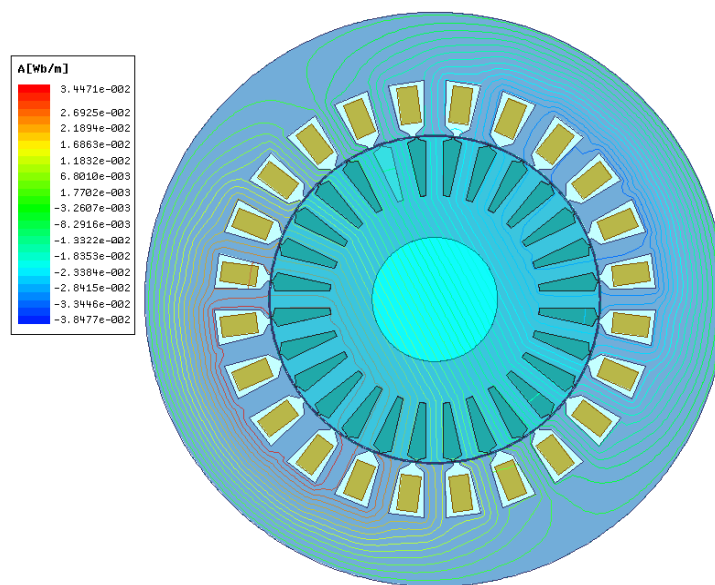
Tab. 4.1 Performance of the motor at no load

名称	数值
转差率	0.022
定子绕组电流/A	4.0216
屏蔽套损耗/W	66.7
鼠笼转子导条铜耗/W	10.261
转矩/N·m	1.1819

4.3.2 额定负载下电机运行状态

电机的额定运行状态是指电机运行时，各个物理量都与它的额定值一样。在额定运行状态下，电机运行过程中可靠性能高，同时电机的综合性能最佳。在额定状态下运行时，电机的效率和功率因数都比较高，不论是对电机本身还是经济节能上，都是比较好的。电机长期运行在过负荷状态下，会使得电流超过额定值，从而使得发热加剧，进而导线温度升高。电机绝缘层在超出额定温度的情况下容易老化，进而使漏电流增加，而漏电流过大会对绝缘层造成进一步的破坏，长期下去将形成恶性循环，从而会使得电机的寿命大大缩短。同时，电机过高的温度还会使电机轴承润滑失效，然后电机轴承也会因磨擦系数增加而温度过高，这里也就会形成另一个恶性循环，从而大大缩短轴承寿命，而电机轴承的失效将又会使电机负荷加重，这样再次形成一个恶性循环。因此，电机不能长时间过负荷运行。一般情况下，三相鼠笼型感应电机的励磁电流约占额定电流的 20%~40%，而与电机的负荷关系不大。功率因数与电机的负荷有关，当电机出于轻载运行状态时，随着负荷的增加，有功电流也随着增加，进而功率因数也跟着增加。因此，电动机长期运行在轻载状态下，功率因数较低，容易产生谐波，对电网造成污染，降低了电网的利用率，同时电动机的效率也不高，运行不经济。因此我们应避免大马拉小车的浪费现象。因此，轻载运行状态下，虽然对电机没有伤害，但是并不经济。电机只有在额定运行状态附近运行，才能够长期安全可靠运行，并且电机的综合性能指标较高。

额定负载状态下电机的磁力线和磁密云分布图如图 4.8 和图 4.9 所示，



4.8 额定负载状态下磁力线分布图
Fig. 4.8 Magnetic field distribution at rated load

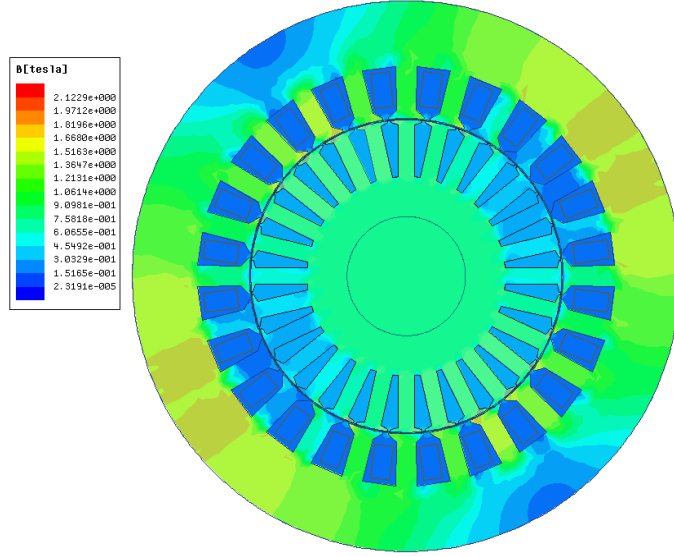


图 4.9 额定负载状态下磁密分布云图
Fig. 4.9 Magnetic flux density distribution at rated load

由图 4.8 和图 4.9 可知，额定负载状态下与空载状态下相比较，磁力线和磁密在数值上都有所增加，磁力线和磁密分布都比较均匀，其数值大小也都在正常的范围之内。

在额定工况下，除了电流循环之外还有功率循环。这时电机的损耗有机械摩擦损耗，杂散损耗，铁耗，屏蔽套损耗，定子铜耗和转子铜耗。这些损耗满足如下关系：

$$P_{\text{损}} = P_{\text{fw}} + P_s + P_{\text{Can}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} \quad (4.4)$$

而功率循环满足下面的关系式：

$$P_m = P_2 + P_{\text{损}} \quad (4.5)$$

$$s = \frac{P_{\text{Cu2}}}{P_m} \quad (4.6)$$

其中， $P_{\text{损}}$ 为电机的总损耗， P_{Cu1} ， P_{Cu2} ， P_s 分别为电机的定子铜耗，转子铜耗和杂散损耗； P_{fw} ， P_{Can} ， P_{Fe} 分别为电机的机械摩擦损耗，屏蔽套损耗和铁耗； P_m ， P_2 和 s 分别为电机的电磁功率，输出功率和转差率。

式子中的铁耗，定子铜耗和转子铜耗可以通过 Ansoft 仿真软件求得，也可以通过计算获得。而机械摩擦损耗一般可以通过计算得到，杂散损耗一般根据经验来得到。通过计算，定子铜耗约为 417.86W，铁耗约为 142.875W，屏蔽套损耗 369.1W，转子铜耗约为 288.8W，杂散损耗约为 150W，机械摩擦损耗约为 187.75W，电机在运行过程中，也存在水磨损耗，在这里将水磨损耗计为机械摩擦损耗。通过上面的式子可以算出额定负载状态下电机的转差率 s 约为 0.03191。

图 4.10 和图 4.11 分别是用 Ansoft 软件仿真分析得到的额定负载状态下电机转子铜耗曲线和电机的速度曲线，在电机稳定后，可求得转子铜耗平均值为 288.3W，在电

机达到稳定状态后，可以求得电机速度的平均值为 2888r/min，转差率 s 为 0.0373，与计算得到的转差率 0.03191 有着很小的误差。

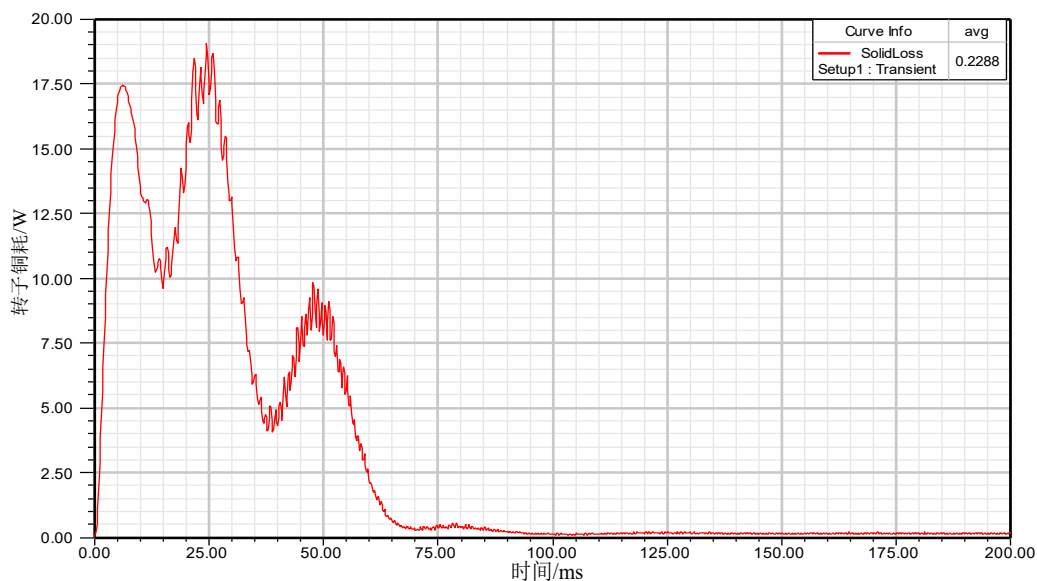


图 4.10 转子铜耗
Fig. 4.10 Copper loss of rotor

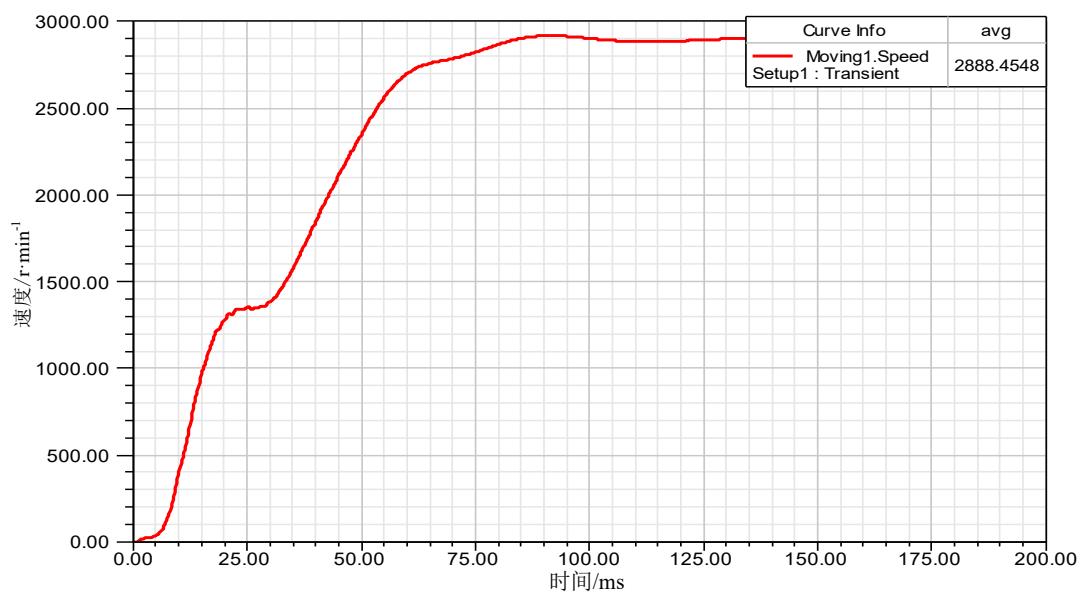


图 4.11 额定负载下电机速度
Fig. 4.11 Speed of the motor rated load

在图 4.12 中，额定状态下电机稳定后，可以求得转矩的平均值为 25.08N·m，转矩的计算公式如下：

$$T = \frac{9500P}{n} \quad (4.7)$$

式中， P ——输出功率，单位 W；

n ——输出转速。

由上述公式计算得到的转矩为 $24.671\text{N}\cdot\text{m}$ ，与仿真得到的数据也非常接近。

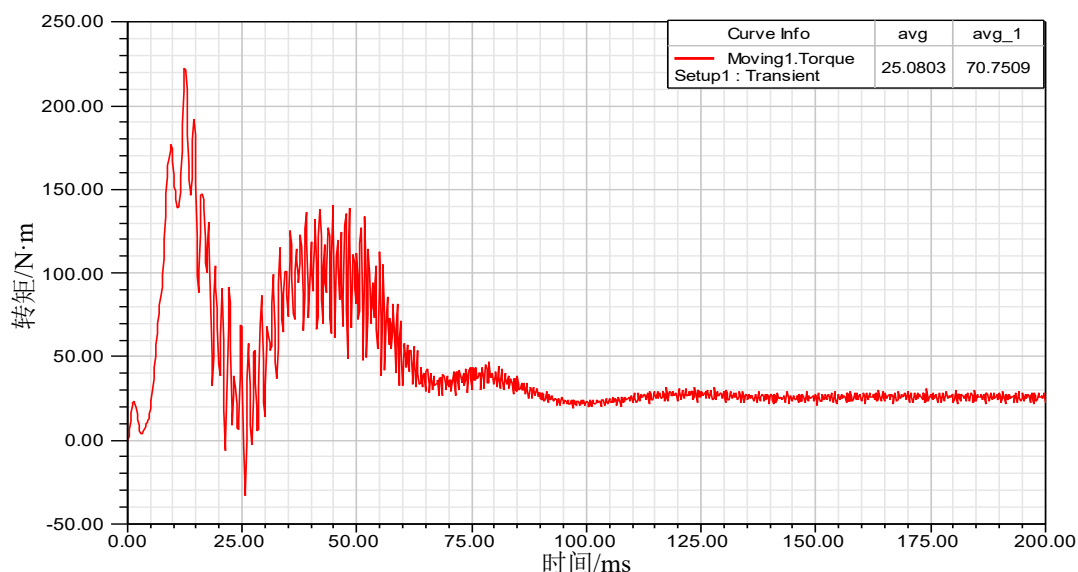


图 4.12 额定负载下电机转矩
Fig. 4.12 Torque of the motor at rated load

由图 4.13 可以看出，电机稳定后，定子电流均方根值为 8.6757A 。电机的起动过程，是指电机转速从静止加速到额定转速的过程。在起动过程中，若是采取直接起动，则瞬时电流较大；如果采用变频启动，频率由低往高的同时，电压也由低往高调整，电流可以比较平缓。

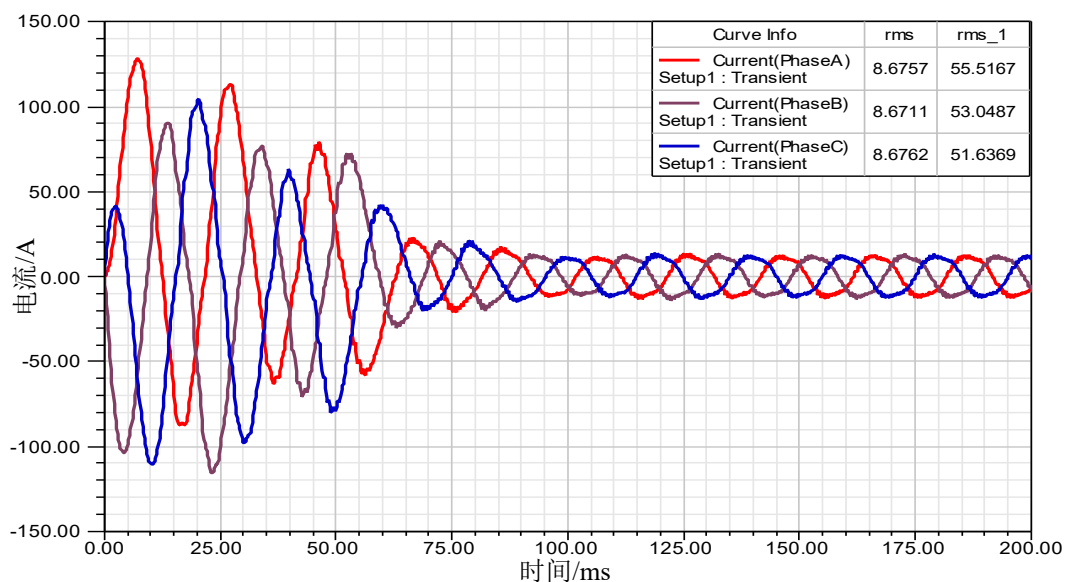


图 4.13 额定负载下电机定子电流
Fig. 4.13 Stator current of the motor at rated load

由图 4.12 和图 4.13 可以观察到，电机起动采用的是直接起动，在 $0\sim 80\text{ms}$ ，这个时间段为电机的起动过程，这个时间以后电机就趋于稳定了，在这个过程中电机的转

矩和定子电流波动比较大，三相电流有轻微的失相。如果直接额定负载起动，起动电流是额定电流的 3~7 倍，如果降压启动（Y- Δ ），起动电流是额定电流的 2~3 倍。对于转矩，如果直接额定负载起动，起动转矩一般是额定转矩的 2~3 倍。在这两个图中，在 0~80ms 这个时间段内可以求得电流的均方根值为 55.5167A，约为额定电流的 6.34 倍。对于转矩，在 0~80ms 时间段内，则其平均值为 70.7509N·m，约为额定转矩的 2.844 倍。因此，在这个起动过程中，电机的起动电流和起动转矩都是正常的，均在合理的范围之内。

额定负载状态下，电机的性能如表 4.2 所示：

表 4.2 额定负载状态下电机性能
Tab. 4.2 Motor performance at rated load

名称	数值
转速/r·min ⁻¹	2888
转差率	0.0373
绕组电流/A	8.6757
屏蔽套损耗/W	369
转矩/N·m	25.08
起动电流倍数	6.34
起动转矩倍数	2.844
效率	0.83
功率因数	0.914

4.4 本章小结

通过本章的分析，电机的空载状态和负载状态都是正常的，在电机稳定后，波形也趋于稳定，各项性能指标都接近公式计算的结果，这表明模型的搭载是正确的，模型中各项设置都是合理的，从而印证了上一章电机设计的合理性和正确性。同时，也为下一步进行的屏蔽套损耗分析提供了依据和基础。

第 5 章 屏蔽套损耗分析

5.1 传统公式法与有限元法计算屏蔽套损耗

屏蔽电机和泵一起配套使用，组成了屏蔽泵，正是因为屏蔽套的存在，才使得屏蔽泵可以运输易燃、有毒、贵重、易腐蚀及带放射性不含固体颗粒的气体或液体物质，可以在输送液体时绝对无泄漏。屏蔽套因电磁感应而产生涡流损耗，从而对电机产生了较大的影响，如何准确计算屏蔽套涡流损耗一直是屏蔽电机设计的难点。屏蔽电机在传统设计过程中，大多都是通过经验公式来计算屏蔽套损耗，使用经验公式通常采用如下假设：

- (1) 磁通为正弦波形；
- (2) 屏蔽套厚度远小于它的直径；
- (3) 屏蔽套的电抗忽略不计；
- (4) 定子铁心以外，屏蔽套的端部电阻忽略不计。

传统经验公式如下：

$$P_{\text{Can}} = \frac{0.5 \cdot K_s \cdot B_\delta^2 \cdot n^2 \cdot l \cdot D^3 \cdot t}{\rho} \times 10^{-14} \quad (5.1)$$

式中， P_{Can} ——屏蔽套损耗，W；

K_s ——屏蔽套损耗系数，一般取 0.8~0.9；

B_δ ——气隙磁密平均值，T；

n ——屏蔽套相对气隙旋转磁场的旋转速度，r/min；

l ——铁心长度，cm；

D ——加屏蔽套以后的定子内径或者转子外径，cm；

t ——屏蔽套的厚度，cm；

ρ ——屏蔽套材料的电阻率， $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

如果要准确确定铁心饱和与涡流的影响，就不能采用经验公式法了。这是因为经验公式中一些修正系数是变量，这个变量是根据实验测定数据以后而编纂绘制成的曲线，修正系数受实验精度影响非常大，从而较大的影响了屏蔽电机的设计产生，并且不同规格的屏蔽电机修正系数也不尽然相同。于是，个人经验成了设计者的首要选择，计算结果与实测值相比因而有较大的误差。是以，为了保证屏蔽电机设计的安全性，通常采取加大设计余量。然而诸多实践表明，磁场实际的分布情况和损耗分布情况，往往与计算结果不一致，不能全部满足设计要求，造成人力和物力资源的浪费；

与此同时，不安全因素也存在于人员测量方面。

使用有限元软件分析时，为了把铁心饱和效应与导体集肤效应的影响充分考虑在内，屏蔽电机的设计中电磁场数值计算方法被引入其中，电机内部磁场和涡流的实际分布情况可以通过分析得出，进而解决了磁路法设计中所出现的问题。

使用下面的公式进一步求出屏蔽套损耗，为了准确计算电机中的磁场分布和涡流分布，屏蔽套损耗计算过程中引入了磁场分析法。

$$P_{\text{Can}} = \sum_{i=1}^{N_c} J_i^2 \frac{\Delta_i L_i}{\sigma} \quad (5.2)$$

式中， J_i ——屏蔽套电流密度；

Δ_i ——单元面积；

L_i ——单元面积内屏蔽套长度。

图 5.1 是屏蔽套局部电流密度，因为屏蔽套厚度相对于定子和转子可以忽略不计，为了更加直观，这里隐去了电机的其他部分，只显示了电机的屏蔽套部分。

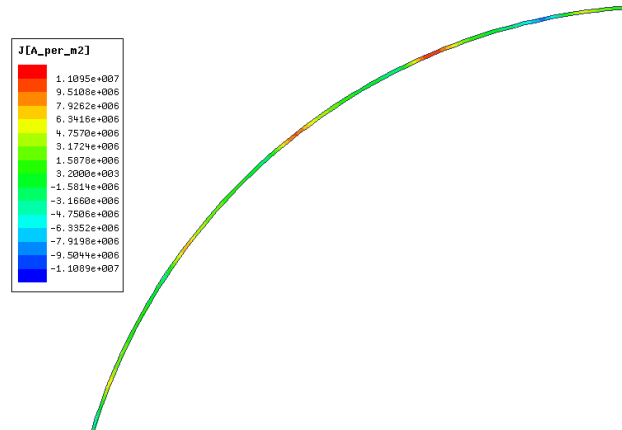


图 5.1 额定负载状态下屏蔽套局部电密

Fig. 5.1 Partial electrical density of shielded cabinet at rated load

5.2 屏蔽套材料电阻率对电机的影响

在屏蔽电机设计中，常规屏蔽套材料一般使用不导磁材料，因而其电阻率大小反映了材料的电气热性能。为进一步研究材料电导率对屏蔽套损耗和电机性能的影响，本节中对屏蔽套涡流损耗进行分析时，屏蔽套尺寸相同但电阻率不同，并对相应的电机性能进行了研究分析。因为电机的有效气隙长度为 0.5mm，屏蔽套厚度一般在 0.3mm 以上，故由此屏蔽电机为单屏蔽电机。在前一章中，将屏蔽套放在了电机的转子上，为了更加详细的研究屏蔽套的存在对电机的影响，因此本节内容除了分析屏蔽套在电机转子上对电机的影响，也分析了屏蔽套在电机定子上的情况。本节中，屏蔽套的厚度选择为 0.3mm，由于材料不导磁，因此屏蔽套材料磁导率可以定义为 1，屏蔽套材料

的电阻率（这里屏蔽套材料的电阻率取 $10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$ 为基准值）分别在 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.2, 1.5, 1.8 和 2.0 进行计算分析，在此条件下分别分析定子屏蔽套和转子屏蔽套损耗以及其对电机性能的影响。图 5.2 和图 5.3 分别是电阻率在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 定子屏蔽套损耗和转子屏蔽套损耗：

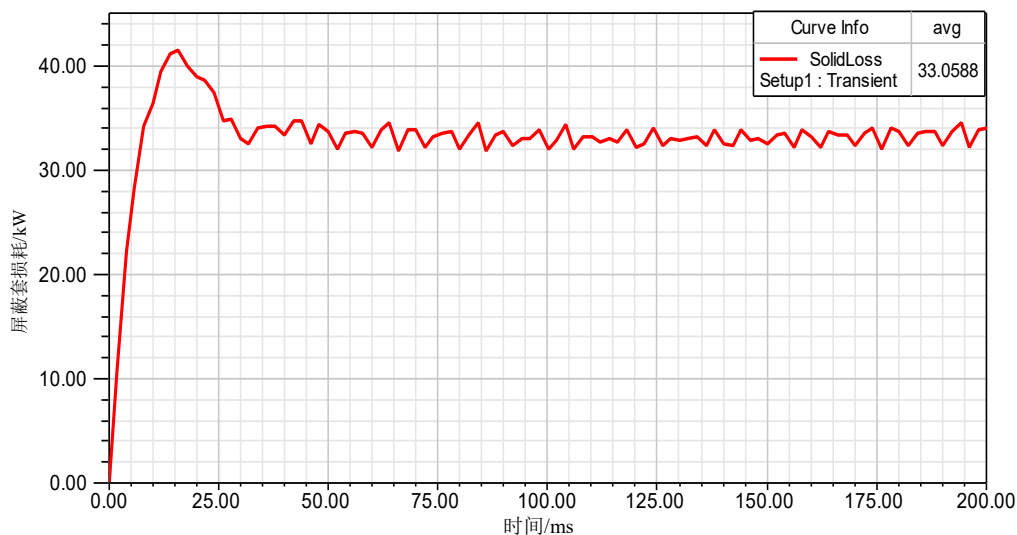


图 5.2 电阻率在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 时定子屏蔽套损耗
Fig. 5.2 Stator shielding sleeve loss at resistivity of $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$

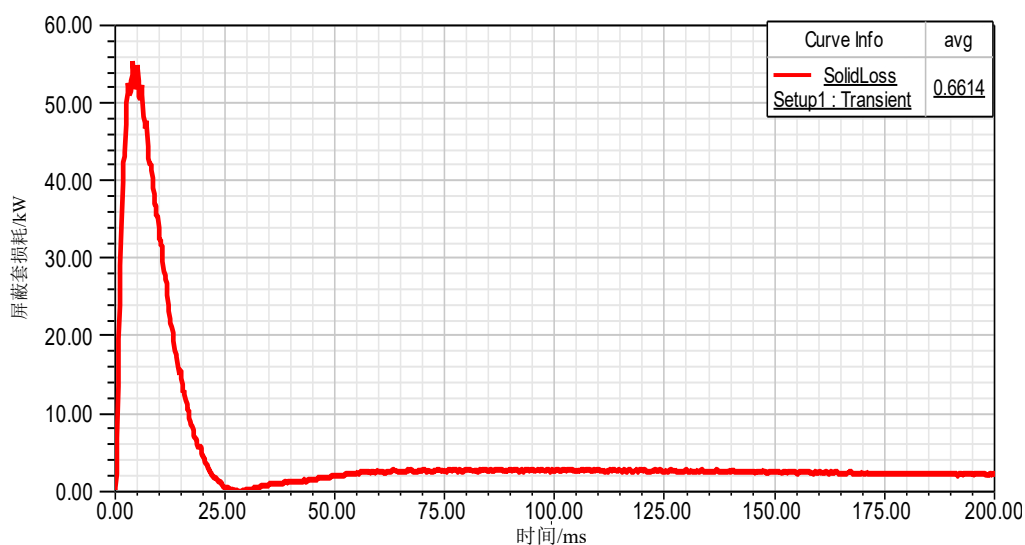


图 5.3 电阻率在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 时转子屏蔽套损耗
Fig. 5.3 Rotor shielding sleeve loss at resistivity of $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$

随着电阻率的改变，定子屏蔽套损耗和转子屏蔽套损耗分别如图 5.4 和图 5.5 所示。

因为定子屏蔽套相对于气隙磁场静止不动，其相对气隙磁场的运动速度也就是气隙磁场的旋转速度，因此采用了与经验公式作比较。从图 5.4 中可以看出，随着电阻率的增大，屏蔽套损耗也在随着减小，但是其减小的速度越来越慢。并且，随着电阻率的增加，有限元法计算的结果与经验公式计算的结果相差越小。

对于转子，因其相对于气隙旋转磁场的运动方向相同，与其速度相差不大，因此，对于转子，经验公式（5.1）中 n 的值不太大，其屏蔽套损耗随着电阻率的变化如图 5.5 所示。随着电阻率的增加，转子屏蔽套也减小，其减小速度也越来越慢，最后趋向于不变。与定子不同的是，在电阻率较小的时候，转子屏蔽套损耗与经验公式计算的结果比较接近，随着电阻率的增加，有限元法计算的结果和经验公式计算的结果偏差较大。

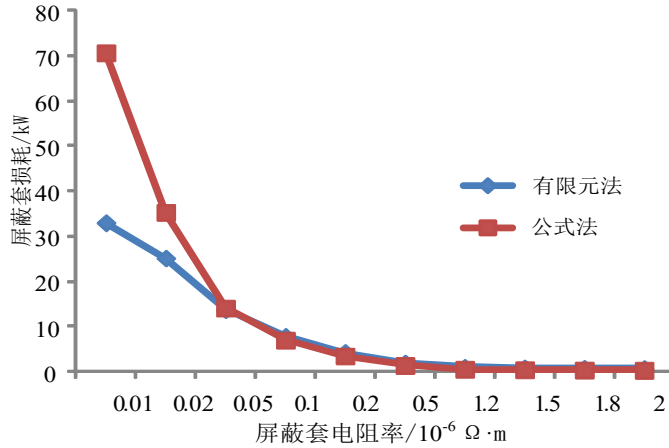


图 5.4 不同电阻率时定子屏蔽套损耗

Fig. 5.4 Loss of stator sleeve at different resistivity

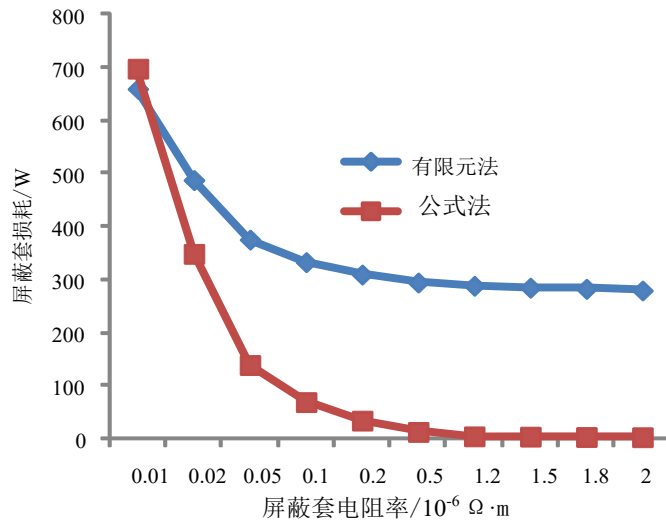


图 5.5 不同电阻率时转子屏蔽套损耗

Fig. 5.5 Loss of Rotor sleeve at different resistivity

对比图 5.4 和图 5.5，屏蔽套材料和厚度相同情况下，屏蔽电机中定子屏蔽套损耗远大于转子屏蔽套损耗。随着电阻率的增加，涡流趋向分散分布，损耗也跟着减小，并且损耗减小的幅度越来越小；电阻率增大到一定程度时，涡流分散作用减弱，损耗趋于稳定，变化不再明显。这与图 5.4 和图 5.5 中定子屏蔽套损耗和转子屏蔽套损耗随着材料电阻率的增加，其减小的速度越来越慢，最后几乎不再减小，这是一致的。此外，电阻率较大时，对于定子屏蔽套，经验公式法计算结果与有限元法计算结果相差

不大，而转子屏蔽套损耗结果则相差过大；屏蔽套材料电阻率较小时，对于定子屏蔽套，经验公式法计算结果与有限元法计算结果二者出入较大，而对于转子屏蔽套损耗，两者结果相差不大。

由以上分析可知，定子屏蔽套损耗和转子屏蔽套涡流损耗与材料的电阻率近似反比，随着电阻率的增加，屏蔽套涡流损耗减小，电机总的电流也在下降，与此同时，电机对应的铜耗和铁耗也会减少，定子电流下降逐渐缓慢，定子屏蔽套和转子屏蔽套电阻率在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 时，定子相电流变化趋势如图 5.6 和图 5.7 所示：

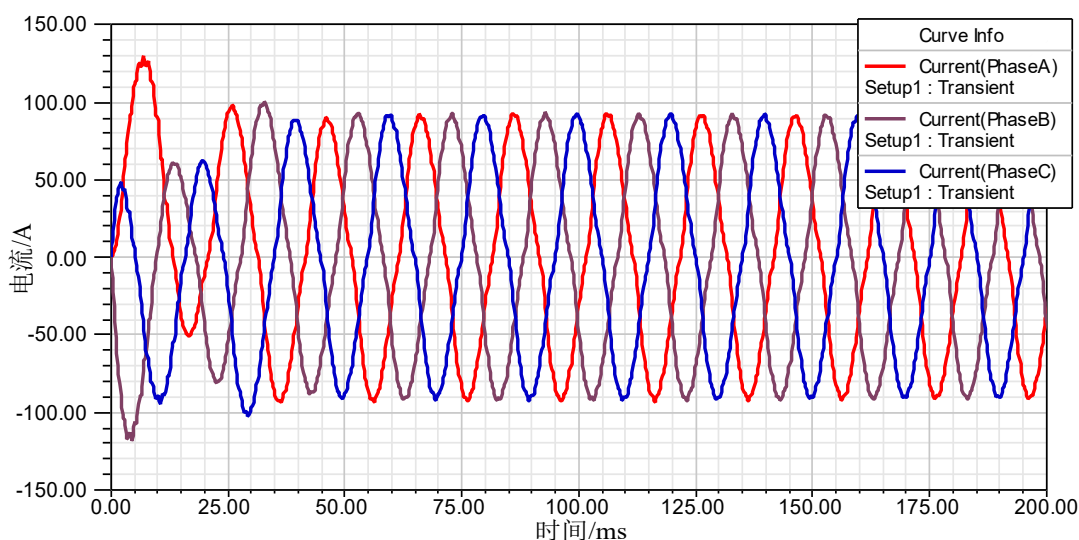


图 5.6 定子屏蔽套电阻率在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 时定子电流

Fig. 5.6 Stator current at resistivity of $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ of shielding sleeve on stator

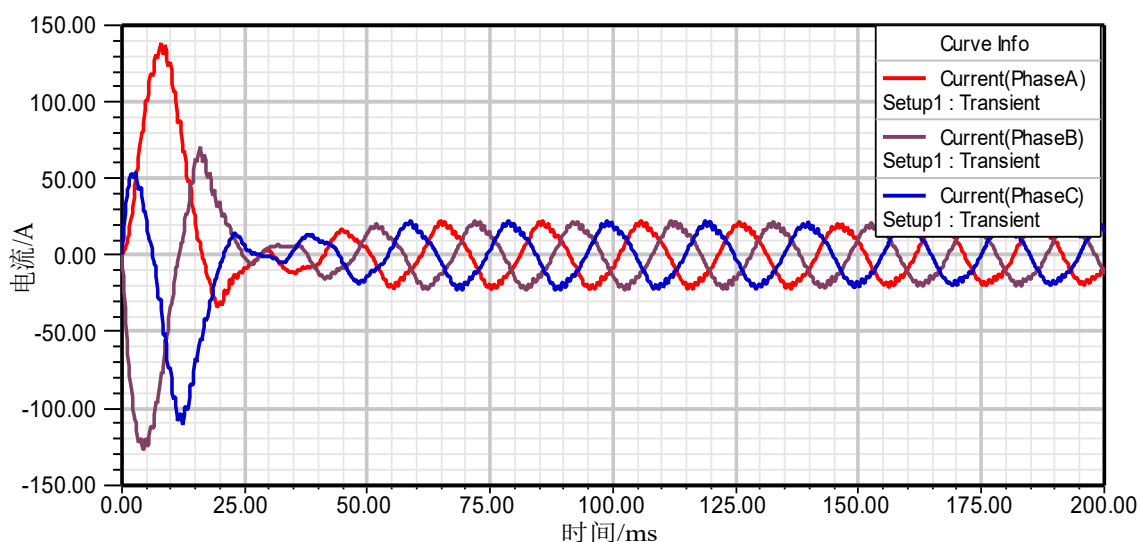


图 5.7 转子屏蔽套电阻率在 $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ 时定子电流

Fig. 5.7 Rotor current at resistivity of $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ of shielding sleeve on rotor

对比图 5.8 和图 5.9 可知，电阻率较小时，屏蔽套涡流损耗较大，定子相电流较大，随着电阻率的增加，定子电流趋于稳定，最后几乎不再变化。两种情况下，定子电流

变化趋势大同小异，但是定子屏蔽套电阻率对定子相电流变化影响更明显，这是因为定子屏蔽套相对于气隙磁场的运动速度远大于转子屏蔽套相对于气隙磁场的运动速度，定子屏蔽套涡流损耗也比转子屏蔽套涡流损耗大得多。因此，相同情况下定子屏蔽套不同电阻率对定子电流的影响也就越大，在电阻率较小时这种影响尤为明显。

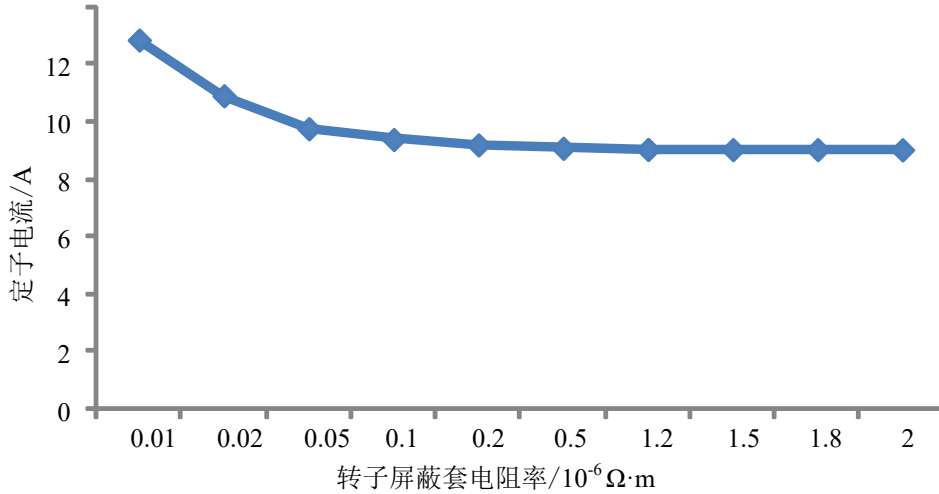


图 5.8 转子屏蔽套不同电阻率下定子电流

Fig. 5.8 Stator current at different resistivity of shielding sleeve on rotor

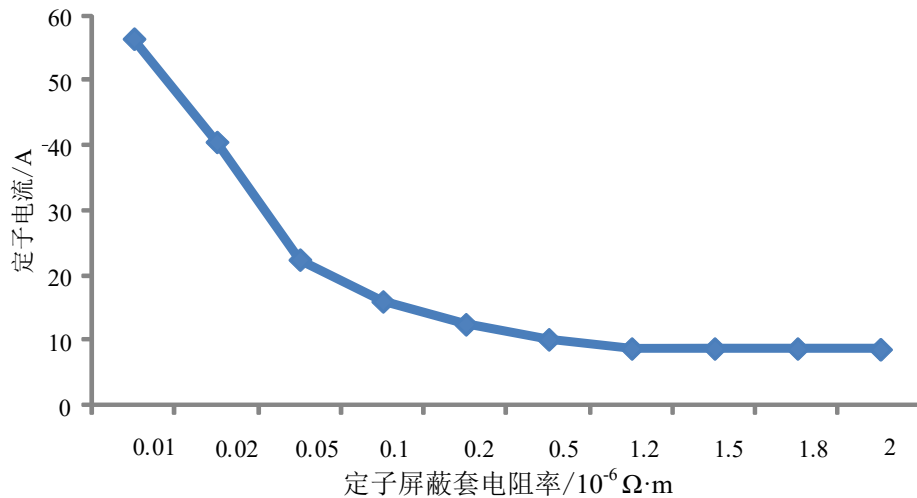


图 5.9 定子屏蔽套不同电阻率下定子电流

Fig. 5.9 Stator current at different resistivity of shielding sleeve on stator

由图 5.10 可知，对于同一个电机，屏蔽套材料完全相同时，屏蔽套在转子上时电机的效率要明显高于屏蔽套在定子上的电机，在电阻率较小时，电机效率的差别更加明显；随着电阻率的增加，涡流损耗在减小，电机的效率也随着增加，屏蔽套在定子上的电机效率增加的速度高于屏蔽套在转子上的电机，这是因为定子屏蔽套涡流损耗转子屏蔽套涡流损耗大得多，随着电阻率的增加，定子屏蔽套涡流损耗减大幅度远大于转子屏蔽套涡流损耗减大幅度。

屏蔽套涡流损耗的存在，使得电机定子相电流增加，进而造成定子铜损和铁损变大，这对电机的效率和功率因数也产生了影响，其变化趋势如图 5.10 所示：

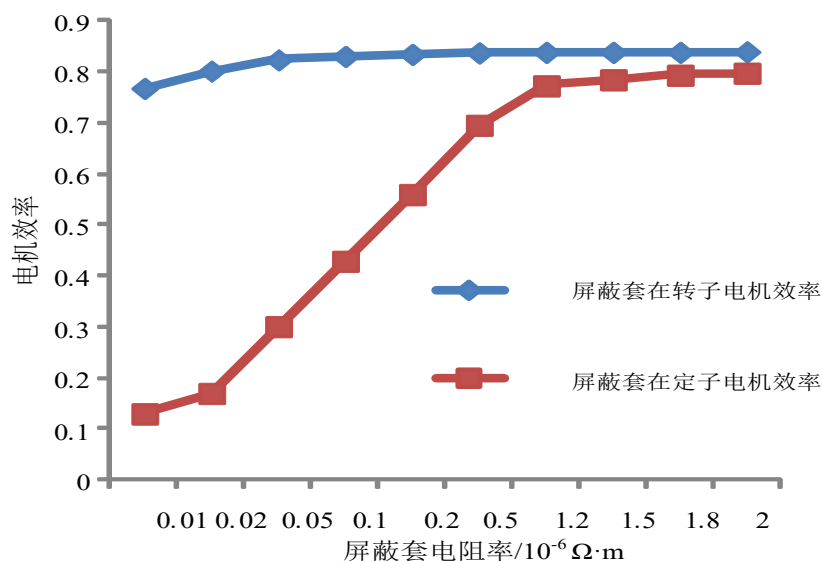


图 5.10 屏蔽套材料不同电阻率下电机效率

Fig. 5.10 Efficiency of the motor at different resistivity of shielding sleeve material

功率因数的变化恰恰相反，屏蔽套在转子上时电机的功率因数要低于屏蔽套在定子上的电机。这是因为，屏蔽套涡流损耗是有功损耗，而相同情况下，定子屏蔽套涡流损耗比转子屏蔽套涡流损耗大得多，因而其消耗了更多的有功功率，但是并没有实际有功出力，因此屏蔽套在定子上的电机有着较高的功率因数，效率却比屏蔽套在转子上时电机低。两种情况下电机功率因数变化如图 5.11 所示：

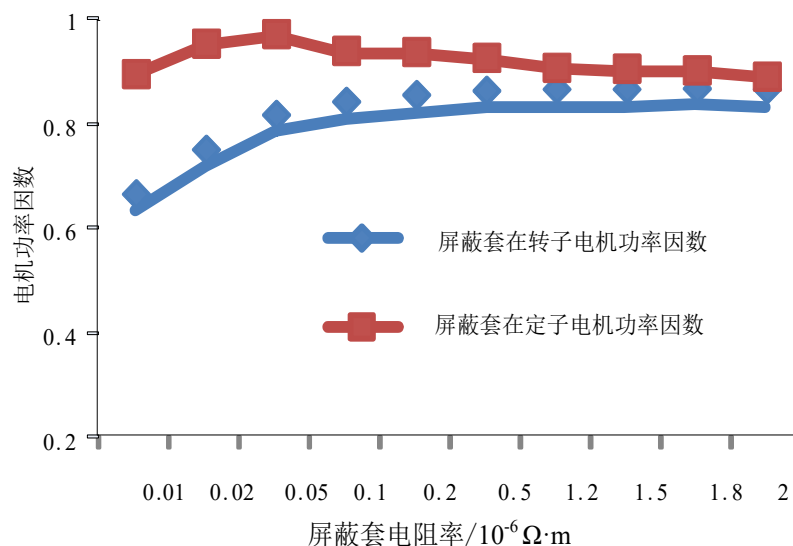


图 5.11 屏蔽套材料不同电阻率下电机功率因数

Fig. 5.11 Power factor of the motor at different resistivity of shielding sleeve material

相同厚度下，仅改变屏蔽套材料电阻率时，电机性能如表 5.1 和表 5.2 所示，

表 5.1 定子屏蔽套电阻率不同时的电机性能

Tab. 5.1 Motor performance of stator shielding sleeve at different resistivity

定子屏蔽套电阻率/ $10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$	屏蔽套损耗/kW	定子电流/A	电机效率	功率因数
0.01	33.058	56.476	0.130	0.896
0.02	25.22	40.5791	0.170	0.954
0.05	13.813	22.4676	0.301	0.972
0.1	7.883	16.0359	0.429	0.940
0.2	4.333	12.5230	0.560	0.938
0.5	1.971	10.1996	0.696	0.927
1.2	0.996	9.3669	0.773	0.908
1.5	0.858	9.2423	0.785	0.906
1.8	0.763	9.1699	0.794	0.903
2.0	0.716	9.2506	0.798	0.891

表 5.2 转子屏蔽套电阻率不同时的电机性能

Tab. 5.2 Motor performance of rotor shielding sleeve at different resistivity

转子屏蔽套电阻率/ $10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$	屏蔽套损耗/W	定子电流/A	电机效率	功率因数
0.01	660.04	12.8475	0.768	0.667
0.02	488.1	10.9091	0.802	0.752
0.05	375.9	9.7627	0.824	0.818
0.1	333.5	9.3866	0.831	0.843
0.2	310.01	9.1993	0.835	0.856
0.5	295.1	9.0841	0.838	0.864
1.2	289.0	9.0427	0.839	0.867
1.5	285.3	9.0379	0.839	0.867
1.8	283.2	9.0364	0.839	0.868
2.0	280.1	9.0302	0.84	0.867

5.3 屏蔽套厚度的影响

通过上一节的可知，相同情况下，定子屏蔽套涡流损耗远大于转子屏蔽套涡流损耗。由于本电机气隙长度为 0.5mm，屏蔽套厚度变化范围取值小，定子屏蔽套变化较转子屏蔽套涡流损耗明显。因此，本节中只分析定子屏蔽套厚度对涡流损耗的影响和电机性能的影响。

保持电机总体尺寸及各部件材料不变，这里取材料的电阻率为 0.5 个基准值，保持其他条件不变，以定子屏蔽套厚度为变量，分别取其厚度为 0.3mm, 0.33mm, 0.36mm, 0.39mm 和 0.42mm，重新建立电机的模型，进行运算分析。

为得到不同厚度下定子屏蔽套涡流损耗曲线，分别使用传统经验公式法和有限元法，曲线如图 5.12 所示。由图 5.12 可以看出，经验公式法和有限元法计算的结果有些误差，定子屏蔽套损耗随着屏蔽套厚度的线性增加也在线性增加。这是因为随着屏蔽套厚度的增加，屏蔽套等效电阻减小，感应电动势产生更多的涡流损耗，气隙磁场受屏蔽套影响越来越强，进一步导致屏蔽套损耗增加。

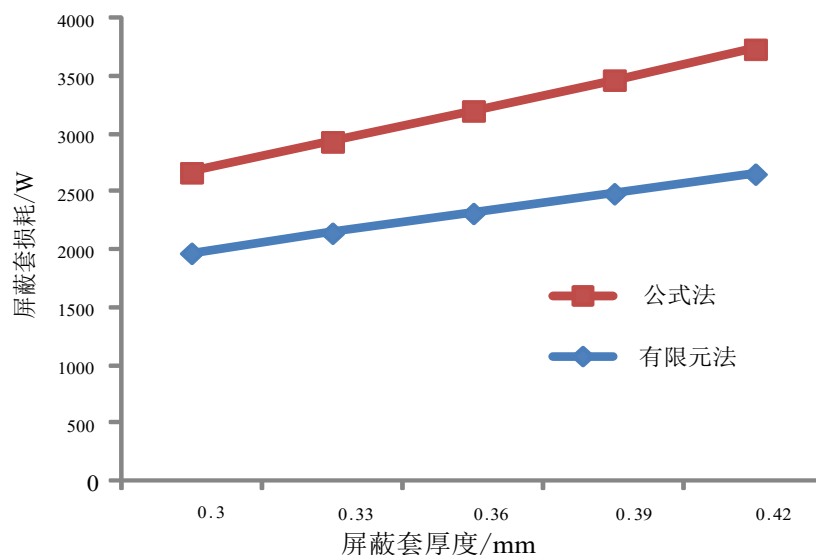


图 5.12 不同屏蔽套厚度时屏蔽套涡流损耗

Fig. 5.12 Eddy current loss of shielding sleeve at different thicknesses of shielding sleeve

如图 5.13 所示, 随着屏蔽套厚度的增加, 屏蔽套涡流损耗也随着增加, 保持电机的输出功率为恒定值, 将会增加电机的输入功率, 从而引起定子相电流增加, 进而造成电机的铜损和铁损增加, 定子侧损耗增加, 从而使得电机的效率降低。从图 5.13 中还可以看出, 屏蔽套厚度在小范围内增加, 功率因数基本维持恒定。

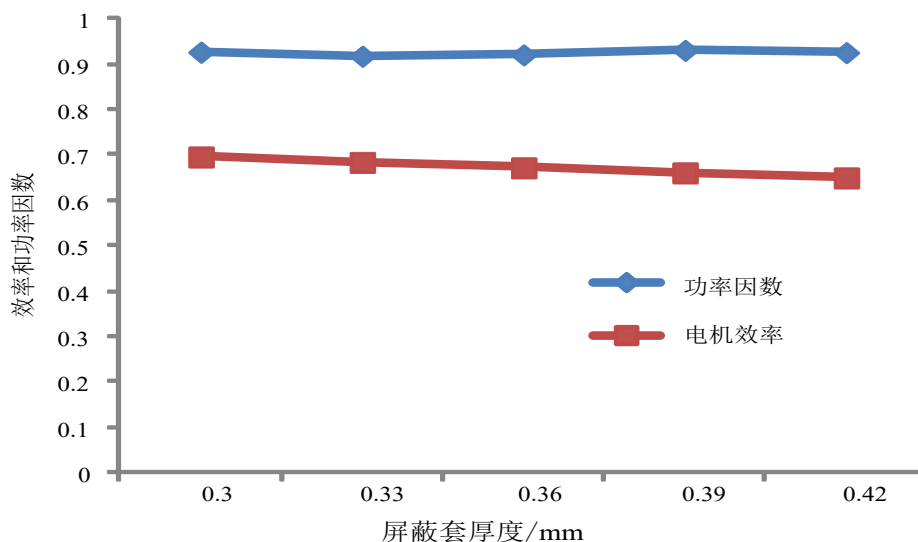


图 5.13 不同屏蔽套厚度下电机效率和功率因数

Fig. 5.13 Efficiency and power factor of the motor at different thicknesses of shielding sleeve

增加屏蔽套的厚度, 就相当于减小了屏蔽套的等效电阻, 从而引起更大的涡流损耗。经以上分析可知, 改变屏蔽套厚度, 随着屏蔽套厚度的增加, 电机的涡流损耗增加, 定子电流增加, 电机效率降低等, 保持电机的输出功率恒定时, 电机的工作性能变化如表 5.3 所示。

表 5.3 不同屏蔽套厚度下电机的性能

Tab. 5.3 Motor performance at different thicknesses of shielding sleeve

屏蔽套厚度/mm	屏蔽套损耗 /W	定子电流/A	电机效率	功率因数
0.3	1971.7	10.1996	0.696	0.927
0.33	2144.8	10.4764	0.684	0.918
0.36	2316.1	10.6249	0.672	0.921
0.39	2486.9	10.6837	0.661	0.931
0.42	2656.1	10.9288	0.65	0.926

5.4 本章小结

(1) 材料电阻率对屏蔽套损耗的影响,随着材料电阻率的增大,屏蔽套损耗减小的速度越来越慢,当电阻率增大到某个程度时,屏蔽套损耗几乎维持不变。相同条件下,屏蔽套在转子上的电机效率高于屏蔽套在定子上的电机,而功率因数则相反;随着电阻率的增加,屏蔽套在定子上的电机效率增加速度快于屏蔽套在转子上的电机。

(2) 在屏蔽套厚度对屏蔽套损耗和电机的性能影响分析中,随着屏蔽套厚度的增加,屏蔽套涡流损耗增加,电机效率下降,功率因数变化不大。

(3) 通过本章的分析,对于屏蔽套的选择,可知屏蔽套越薄越好,材料电阻率越大越好。然而在实际生产中,机械强度、耐腐蚀性以及价格等都是要考虑的因素。

第 6 章 结论

屏蔽电机和泵一起配套使用组成屏蔽电泵，可以用来输送易燃、有毒、贵重、含腐蚀性及带放射性不含固体颗粒的气体或液体物质，因为屏蔽套的存在，而使得电机不受伤害。本文在阅读大量的国内外优秀文献的基础上，根据屏蔽电动机的结构特点探讨了屏蔽套涡流损耗的理论公式，并用数值解析法进行了推导。设计了一台屏蔽电机，并采用有限元数值算法对屏蔽电机的二维场进行了数值仿真分析，得到如下结论：

（1）根据电机设计技术要求，设计了一款屏蔽电机，依据负载的类型，选择合适的槽极配合，分析了各种槽型适用的电机类型，得出了电机适用的槽型。

（2）运用有限元软件对电机进行了仿真分析，分别分析了电机空载运行状态和额定负载运行状态，使用有限元法得出的空载电流和空载转矩与实际计算得出的结果进行了对比分析，同样的方法对比分析了额定负载状态下的电流和转矩，并分别计算了两种状态下电机的转差率，分析了额定状态下电机的效率和功率因数，数据误差均在合理的范围之内，从而验证了电机设计的合理性。

（3）屏蔽套损耗分析中，相同的条件下，分别分析研究了电阻率对定子屏蔽套和转子屏蔽套对电机性能的影响，结果表明定子屏蔽套的损耗远大于转子屏蔽套损耗，屏蔽套在定子上时电机的效率要低于屏蔽套在转子上的电机，而功率因数则高于屏蔽套在转子上的电机；随着屏蔽套厚度的增加，电机的损耗也在随着增加，电机的功率因数较高，而电机的效率在降低。因此，屏蔽套在满足机械强度和耐腐蚀性的同时，应越薄越好，电阻率越大越好。

本文在得出上述研究结果的同时，仍有不足之处。本文的计算模型是二维的，没有考虑到局部问题，如在铁心以外的屏蔽套端部涡流大小与分布情况。此外，伴随着损耗的增加，没有考虑电机的温升和散热问题，这些问题还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 鲍晓华, 方勇, 程晓巍. 大型充水式潜水电机定子端部绕组电磁振动研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 138-146.
- [2] 李龙彪. 基于流固耦合方法的充油潜水电机性能分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [3] 宋艳文, 林艳江. 屏蔽电动机屏蔽套的设计特点及常见问题的预防措施[J]. 防爆电机, 2002(01): 16-18.
- [4] 谢世强. 屏蔽电机的屏蔽套涡流损耗计算与动态特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.
- [5] 鲍晓华, 梁娜, 方勇. 不同定子槽形潜水电机空载时表面损耗的研究[J]. 电气工程学报, 2015, 10(06): 7-18.
- [6] 程晓巍, 鲍晓华, 方勇. 大型干式潜水电机定子电场分布特性对绝缘的影响[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(02): 1-5+13.
- [7] 郑龙平, 李光耀, 高静. 闭口槽充水式高压潜水电机的设计[J]. 防爆电机, 2014, 49(01): 3-6.
- [8] 金雷, 胡薇. 潜水电机的新型定子槽形设计[J]. 电机技术, 2015, 10(03): 35-36+38.
- [9] 单丽, 李向前, 鲍晓华. 高压干式潜水电机定子温度场奇异性分析[J]. 电机技术, 2012(03): 5-9.
- [10] 倪有源, 陈俊华, 何强. 新型永磁屏蔽电机性能研究[J]. 微特电机, 2015, 43(05): 26-29.
- [11] 张晓晨, 李伟力, 曹君慈. 屏蔽电机屏蔽损耗与电机性能的计算与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(09): 1422-1426.
- [12] 王琿, 赵艺红, 彭彦平. 屏蔽电机振动特性的有限元分析[J]. 大连工业大学学报, 2015, 34(04): 309-312.
- [13] 周明荣. 永磁屏蔽电泵电磁场有限元分析及其屏蔽套涡流损耗计算[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
- [14] 张晓晨. 屏蔽电机综合物理场协同计算与相关因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2006.
- [15] 郭纯冶. 核电用屏蔽电动机的损耗分析与温升计算[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [16] Xue M C, Sun W. The blue brittleness of 1Cr17Ni2 steel submarine motor shaft[J]. Materials Letters, 2002, 57(2):369-373.
- [17] 张装生. 屏蔽式异步电动机电磁设计特点探讨[J]. 电工技术杂志, 2002(12): 64-65.
- [18] 冯颖慧. AP1000 屏蔽电机主泵屏蔽套力学分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [19] 胡月. 屏蔽电机主泵定子屏蔽套屈曲稳定性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [20] 朱跃. 屏蔽式电机主泵中动静干涉作用对叶轮应力分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [21] 李再宏. 制冷机用屏蔽电动机的设计特点[J]. 电机技术, 1998(03): 6-8.
- [22] 马德鑫, 上官继明. 浅论屏蔽式异步电动机的设计特点[J]. 电机技术, 2001(01): 27-30.
- [23] 马德鑫. DFP 132kW/4P 大型屏蔽电机设计及样机试制[J]. 电机技术, 2003(04): 25-26.

- [24] 马德鑫. 再论屏蔽式异步电动机的设计特点[J]. 电机技术, 2004(03): 17-20.
- [25] 孙树林, 李觉民. 屏蔽式感应电动机屏蔽套损耗的计算及减少途径[J]. 大电机技术, 1987(06): 30-33.
- [26] 于华宇, 萧建邦. 对屏蔽套磁涡流的探究[J]. 通用机械, 2004(11): 71-72.
- [27] 孙桂瑛, 邹继斌, 李连锋. 屏蔽电机的磁场与屏蔽层损耗的解析计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(04): 30-33.
- [28] 孔祥花. 屏蔽泵能耗的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
- [29] An Y J, Liu G M, Wen H L, et al. Analysis and experiment of the eddy current losses for canned motor[J]. Advanced Materials Research, 2011, 383-390:7521-7525.
- [30] 王雨诗, 姚振强, 沈洪. 核反应堆冷却泵屏蔽式感应电机屏蔽套涡流损耗分析与计算[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(01): 138-143.
- [31] Yamazaki K. Modification of 2D nonlinear time-stepping analysis by limited 3D analysis for induction machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(2):1694-1697.
- [32] Yahiaoui A, Bouillault F. 2D and 3D numerical computation of electrical parameters of an induction motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(5):3690-3692.
- [33] Garg V K, Raymond J. Magneto-thermal coupled analysis of canned induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, 5(1):110-114.
- [34] Yamazaki K. A quasi 3D formulation for analyzing characteristics of induction motors with skewed slots[J]. 1998, 34(5):3624-3627.
- [35] Yamazaki K. Efficiency analysis of induction motors for ammonia compressors considering stray load losses caused by stator and rotor slot ripple[J]. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting, Chicago 2001, 2:762-769.
- [36] Yamazaki K, Fukushima N. Torque and loss calculation of rotating machines considering laminated cores using post 1-D Analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 47(5):994-997.
- [37] Ergene L T, Salon S J, Akiyama Y, et al. Calculation of the rotor bar resistance and leakage inductance in a solid-rotor induction motors with a one slot model[C]. Compumag, 2003.
- [38] Peralta-Sanchez E, Smith A C. Line-start permanent-magnet machines using a canned rotor[J]. IEEE International Electric Machines & Drives Conference. IEEE, 2007, 45(3):1084-1089.
- [39] Mcclay C I, Williamson S, Mueller M. Calculation of high frequency losses in closed slot induction motor rotors[J]. Electric Machines, Belgium, 1996, 35(9):411-416.
- [40] Yamazaki K. Modeling and analysis of canned motors for hermetic compressors using combination of 2D and 3D finite element method[J]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC99. 1999, 47(3):377-379.
- [41] Ergene L T, Salon S J. One-slot AC steady-state model of a canned-solid rotor induction motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4):1892-1896.
- [42] Vansompel H, Sergeant P, Dupre L. A multilayer 2-D-2-D coupled model for eddy current calculation in the rotor of an axial-flux PM machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3):784-791.

-
- [43] Pham T H, Wendling P F, Salon S J, et al. Transient finite element analysis for an induction motor with external circuit connections and electromechanical coupling[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4):1407-1412.
 - [44] Yamazaki K, Haruishi Y. Stray load loss analysis of canned induction motor for hermetic compressor[J]. IEEE International Transactions on Electrical Machinery & Energy Conversion Systems, 2005, 5-b(2):527-530.
 - [45] Yamazaki K, Kanou Y. Rotor loss analysis of interior permanent magnet motors using combination of 2-D and 3-D finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1772-1775.
 - [46] Hiramatsu D, Tokumasu T, Fujita M, et al. A study on rotor surface losses in small-to-medium cylindrical synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4):813-821.
 - [47] Ergene L T, Salon S J. Determining the equivalent circuit parameters of canned solid-rotor induction motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(7):2281-2286.
 - [48] 杨通. 笼型实心转子屏蔽电机电磁场有限元分析与计算[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
 - [49] 张强. 新型移相式屏蔽电动机定子屏蔽套涡流与热应力研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
 - [50] 李鹏飞. 高效异步电机的设计及其特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
 - [51] 杨俊哲. 高速异步电机参数化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
 - [52] 辛本雨. 降低谐波铜耗的变频调速异步电机转子槽设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
 - [53] 胡岩, 武建文, 李德成. 小型电动机现代实用设计技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
 - [54] 王功臣. 航空用高速永磁发电机电磁设计与研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
 - [55] 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.

致谢

光阴似箭，日月如梭，转眼间即将结束研究生生涯，回想起老师帮自己确定课题的时候，往事历历在目，衷心的感谢我的导师胡岩教授对我的帮助，没有胡老师的帮助，我的课题方面将会是困难重重。

从选题到论文完成，胡老师给予了我无私的帮助和无限的关怀，胡老师的谆谆教导我将铭记在心。胡老师严谨的治学精神和精益求精的工作作风，也是我以后走向工作，走向社会所要学习的。我的导师不光教会了我如何做学问，也教会了我如何去做事。再次由衷的谢谢您，胡老师！同时，也向教研室里的白山老师，吴伟老师和刘爱民老师致以衷心的感谢！

感谢这三年以来，教研室里面一起默默奋斗过的同学们，他们是杨博，赵逸，韩怀，王仲，孙士昊和王玉龙，谢谢你们的陪伴，感谢大家共同营造团结的学术氛围，我们大家一起走过的日子，将会成为我人生中的美好的回忆，让我受益匪浅。

感谢父母这些年来一直默默的支持，没有你们的支持，我也不能走到今天。再次感谢你们！

今后的日子里，我衷心的祝老师们身体健康，万事如意！祝福一起奋斗过的同学们学业有成，走向社会，用我们所学的知识去为社会创造价值。