

径向斜槽转子潜水电机电磁噪声优化^{*}

孙 东¹, 刘志远¹, 鲍晓华^{1,2}, 朱庆龙³

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230009;

3. 大型潜水电泵及装备安徽省重点实验室, 安徽 合肥 231131)

摘 要: 相比于一般电机, 大型潜水感应电机目前存在电磁噪声过大的问题。采用径向斜槽结构可以削弱大型潜水电机的电磁噪声, 但仍存在部分不足。基于径向斜槽结构, 通过调整径向斜槽扭斜距离进一步削弱电磁噪声, 并提高电机其他性能。利用多物理场耦合有限元仿真分析对比各方案的电磁噪声, 验证了上述方法的正确性。

关键词: 潜水电机; 感应电机; 电磁噪声; 径向斜槽

中图分类号: TM346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)04-0039-04

doi: 10.12177/emca.2023.017

Optimization of Electromagnetic Noise of Submersible Motors with Radial Skewed Slot Rotor^{*}

SUN Dong¹, LIU Zhiyuan¹, BAO Xiaohua^{1,2}, ZHU Qinglong³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Intelligent Manufacturing Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Anhui Province Key Laboratory of Large-Scale Submersible Electric Pump and Accoutrements, Hefei 231131, China)

Abstract: Compared with general motors, the large-scale submersible induction motor currently has the problem of excessive electromagnetic noise. The electromagnetic noise of large-scale submersible motors can be reduced by using a radial skewed slot structure, but there are still some deficiencies. Based on the radial skewed slot structure, the electromagnetic noise is further weakened and other performances of the motor are improved by adjusting the twisting distance of the radial skewed slot. The electromagnetic noise of each scheme is analyzed and compared by using the multi-physical field coupling finite element simulation, and the correctness of the above method is verified.

Key words: submersible motor; induction motor; electromagnetic noise; radial skewed slot

0 引 言

目前, 部分城市排水泵站建设、运行在居民区附近, 因此潜水电机的噪声问题受到广泛关注。

电机的噪声主要分为机械噪声、空气动力噪声和电磁噪声^[1]。其中, 电磁噪声主要由电磁激振力作用于定子而产生。电磁激振力中的径向电磁力波幅值较大是造成电磁噪声的主要原因。因此,

收稿日期: 2022-11-11; 收到修改稿日期: 2023-01-14

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51977055); 安徽省科技重大专项项目(201903a05020042)

作者简介: 孙 东(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为异步电机的电磁噪声优化。

鲍晓华(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计理论及技术、电机电磁场理论分析和计算、大型电机及高速电机的可靠性技术。(通信作者)

要削弱电磁噪声就要优化气隙磁场和降低径向电磁力波幅值。此外,低阶电磁力波比高阶电磁力波产生的电磁噪声更大,采用不同的槽配合避免产生低阶径向电磁力波也能削弱电磁噪声^[2-5]。但由于感应电机的槽配合选择有限,不合适的槽配合会导致电机效率下降。

一般电机常采用转子斜槽、开辅助槽等方式优化气隙磁场,从而削弱电磁噪声^[6-11]。此外,为了进一步削弱电磁噪声,也会采用双斜槽转子结构^[12-14]。但对于大型潜水电机而言,由于其功率大、体积大,传统转子斜槽以及双斜槽难以应用。

针对大型潜水电机,可采用径向斜槽结构削弱电磁噪声^[15]。传统斜槽沿轴向扭转,而径向斜槽结构沿径向扭转,轴向保持不变。该结构采用普通斜槽常用的扭斜一个转子齿距作为径向斜槽的扭斜距离。仿真和试验证明采用径向斜槽后,电磁噪声得到了削弱,但也存在转矩脉动大、效率下降等问题。在此基础上,本文通过调整径向斜槽扭斜距离进一步削弱电磁噪声。通过多物理场耦合有限元分析方法对比不同扭斜距离下的电机电磁噪声,验证本文方法的正确性。

1 电机模型

本文以 500 kW 潜水感应电机为分析对象,电机模型参数如表 1 所示。2D 有限元电机模型如图 1 所示,电机结构中除转子槽型外其他参数均相同。

表 1 电机参数

参数名称	参数值
极数	6
额定功率/kW	500
额定电压/kV	10
频率/Hz	50
定子槽数	72
转子槽数	86
定子外径/mm	850
定子内径/mm	590
铁心长度/mm	370
气隙长度/mm	1.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	991

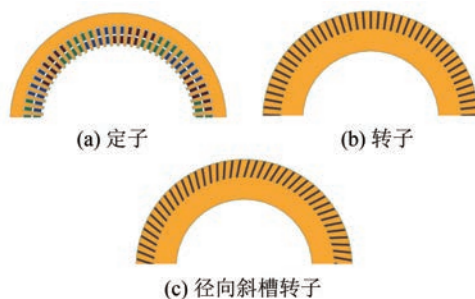


图 1 电机 2D 模型

2 理论分析

大型潜水电机一般为感应电机。感应电机的电磁噪声主要由定、转子谐波相互作用产生的径向力作用于定子内表面导致定子发生轴向的振动而产生^[1]。

因此,分析潜水电机的电磁噪声要从定、转子谐波磁场产生的径向力开始。忽略径向力中产生电磁噪声的非主要分量,可得:

$$p_{vu} = \frac{2b_v b_u}{2u_0} \quad (1)$$

式中: b_v 为定子磁密; b_u 为转子磁密;下标 v 和 u 分别表示定、转子磁密空间阶次; u_0 为真空磁导率。

径向斜槽结构如图 2 所示。图 2 中 h 为转子槽高, b 为转子槽宽, l_{sk} 为径向斜槽扭斜距离。由于改变了转子结构且转子采用闭口槽,谐波磁导基本不发生变化。从磁通密度的公式可知采用径向斜槽结构后,气隙磁导并未发生改变,因此从转子谐波磁动势变化可以得出转子谐波磁密的变化。转子磁密如下:

$$b_u = F_u (\Lambda_0 + \Lambda_{k1} \cos v\theta) \cos(u\theta - w_u t - \varphi_u) \quad (2)$$

式中: F_u 为转子磁动势幅值; Λ_0 为气隙磁导的不变部分; Λ_{k1} 为定子一阶齿谐波磁导的幅值; θ 为机械角位移; w_u 为转子谐波的角频率; φ_u 为转子谐波磁动势的初始相位角。

采用径向斜槽后转子磁动势如下:

$$f_{u-s} = F_u \left(4 \frac{D^2 \pi^2 h}{u^2 l_{sk}} \sin \frac{ub}{2D\pi} \sin \frac{ul_{sk}}{2D\pi} \right) \cos \left[u\theta + \frac{u(l_{sk} + b)}{2D\pi} - w_u t - \varphi_u \right] \quad (3)$$

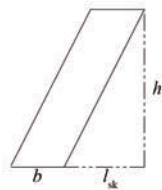


图2 径向斜槽示意图

式中: D 为转子外径。

直槽转子磁动势如下:

$$f_{u-d} = F_u \left(2 \frac{D\pi h}{u} \sin \frac{ub}{2D\pi} \right) \cos \left(u\theta + \frac{ub}{2D\pi} - w_u t - \varphi_u \right) \quad (4)$$

忽略部分余弦分量,可得到直槽与径向斜槽转子磁动势的对比关系:

$$f_{u-d} \approx \frac{ul_{sk}}{2D\pi} \sin \frac{ul_{sk}}{2D\pi} f_{u-s} \quad (5)$$

依据式(5)所得直槽与径向斜槽转子谐波动势之比,可得图3。图3中 t_2 为一个转子齿距。

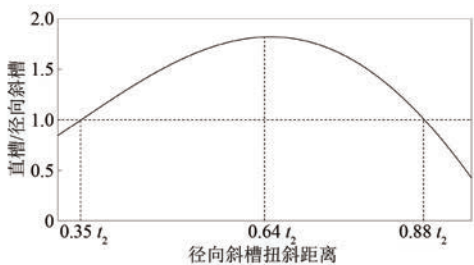


图3 转子谐波磁动势对比图

由图3可知,径向斜槽扭斜距离在0.35~0.88 t_2 之间时转子谐波磁动势得到削弱。在先前的研究中,采取了一般轴向斜槽常采用的扭斜一个转子齿距的方式。因此,在排除扭斜一个转子齿距的情况下,当扭斜距离为0.64 t_2 时径向斜槽转子谐波磁动势达到最小。

3 模态分析

电机电磁噪声过大的主要问题是发生共振,因此对图4所示的电机3D模型进行模态分析,该电机模型包含定子及电机机壳。表2为电机的固有模态频率。

4 噪声分析

噪声仿真所用模型如图5所示,其由距离电

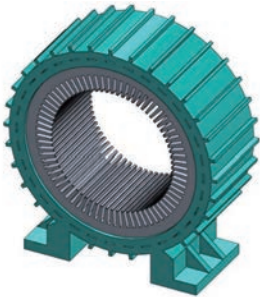


图4 电机3D模型

表2 电机的固有模态频率

振动模态	频率/Hz
2	285
3	574
3	877
4	1 068
5	1 317
6	1 764
6	2 260
0	1 544
1	110
1	1 891

机机壳1 m左右的空气包组成。取空气包外圆环表面的平均A计权声压级作为噪声频谱。

仿真取4组数据,分别为直槽电机、扭斜0.35 t_2 的径向斜槽转子电机、扭斜0.64 t_2 的径向斜槽转子电机及扭斜 t_2 的径向斜槽转子电机,将各方案依次标记为IM-1、IM-2、IM-3、IM-4,对比直槽电机和不同扭斜距离的径向斜槽电机的电磁噪声频谱,如图6和图7所示。其中IM-1、IM-2、IM-3、IM-4的噪声最大值均处于2 340 Hz处,且依次为109.1、106.1、99.4、104.7 dB(A)。采用扭斜0.64 t_2 距离的径向斜槽结构优于其他方案。此外,由2 340 Hz的噪声峰值和2 260 Hz的六阶模态可以推断出电机产生六阶模态共振,这是电机在2 340 Hz时噪声过大的原因。

根据第2节推导的公式可知,当扭斜距离在0.35~0.88 t_2 之间时,转子谐波磁动势变小,从而导致噪声变小,仿真结果也验证了这一结论。当扭斜距离为0.35 t_2 时,电磁噪声削弱效果不如扭斜 t_2 距离时的。



图5 声学计算模型

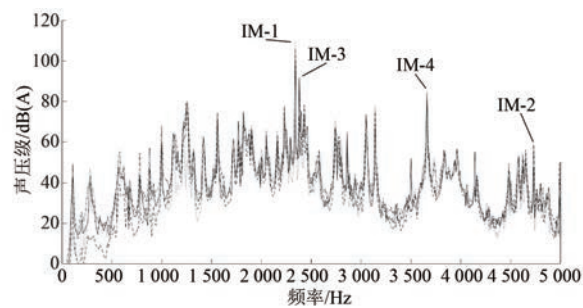


图6 不同结构电机的A计权噪声频谱对比图

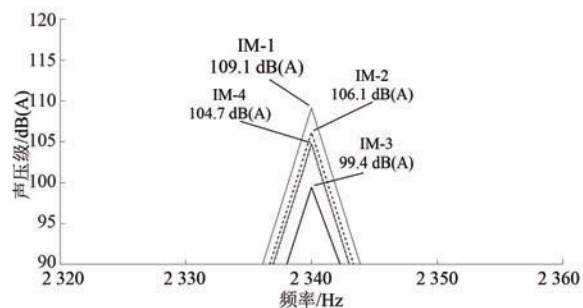


图7 2 340 Hz处不同结构电机的A计权噪声频谱对比局部放大图

5 转矩与损耗分析

各仿真模型均处于额定转速运行,调整径向斜槽扭斜距离后的转矩结果如表3所示,相比于其他径向斜槽结构的转矩脉动,采用扭斜 $0.64\ t_2$ 距离的径向斜槽结构的转矩脉动最小,也符合扭斜 $0.64\ t_2$ 距离时噪声最小的结果。但是采用径向斜槽结构后不可避免地损失部分平均输出转矩。

调整径向斜槽扭斜长度后的损耗结果如表4所示,相比于直槽,随着径向斜槽结构扭斜距离的增大铁损有所上升,定子铜损相比直槽有所下降。其中随着扭斜距离的增大,输出功率基本不变,但

表3 电机的转矩脉动及输出转矩

参数名称	IM-1	IM-2	IM-3	IM-4
工作电流有效值/A	38.03	38.17	38.16	38.15
转矩脉动/%	2.21	4.77	2.98	3.19
输出转矩/(kN·m)	4.88	4.81	4.80	4.81

表4 电机的损耗、输出功率及效率

参数名称	IM-1	IM-2	IM-3	IM-4
铁损/kW	11.51	11.53	11.79	12.31
定子铜损/kW	6.33	6.24	6.23	6.22
转子铜损/kW	13.86	15.70	16.62	17.30
输出功率/kW	506.44	499.18	198.14	499.18
效率/%	94.1	93.7	93.5	93.3

铁损和转子铜损也在不断变大,因此扭斜距离越大,电机的效率越低。

6 结 语

本文针对大型潜水电机,通过理论分析,确定了合理的径向斜槽扭斜距离。多物理场耦合有限元仿真结果表明,选择合适的扭斜距离可以有效降低潜水电机的电磁噪声。相比于采用扭斜 t_2 距离的结构,扭斜 $0.64\ t_2$ 距离的结构降低电磁噪声的效果更好。

此外,采用径向斜槽结构后,选择合理的扭斜距离,可以在降低电磁噪声的前提下,优化电机的转矩脉动和效率等性能。

【参考文献】

[1] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[2] 陈永校, 诸自强. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.

[3] 王伟, 韩怀. 基于电磁噪声优化的异步电机槽配合选择[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(5): 11.

[4] 郑江, 代颖, 石坚. 车用异步电机的电磁噪声分析与抑制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 74.

[5] 贺玉民, 史建萍, 崔伟, 等. 槽配合对异步电机电磁噪声的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 34.

[6] 范庆锋, 王光晨. 转子不同方式分段斜极对永磁同步电机噪声的影响[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 79.

(下转第48页)