

基于Maxwell仿真分析的永磁同步直驱滚筒电磁特性研究

黄良沛^{1,2}, 侯黎超², 张 铭²

¹湖南科技大学机械设备监控维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

²湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年11月19日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月23日

摘 要

针对当前矿井提升机中传统电动机工作效率较低, 整体结构复杂, 难以适应国内外矿井中复杂多变的工作环境的缺点, 以一台额定功率为425 kW的外转子式永磁同步直驱滚筒提升机为目标, 对其进行磁路分析及不同参数对齿槽转矩的影响分析。通过CAD建模结合Maxwell软件对直驱滚筒建立电磁仿真模型, 模拟得到直驱滚筒的空载与额定负载运行特性, 并着重分析齿槽转矩的影响因素。结果表明: 定子开口槽的槽宽对齿槽转矩幅值影响较小, 且槽宽与开口槽整体结构对齿槽转矩的影响呈现一致性; 增大极弧系数, 会导致电机齿槽转矩的幅值先减小后增大再减小。通过对不同结构参数对电机电磁特性的分析, 为后续对大功率直驱滚筒的优化设计奠定基础。

关键词

永磁同步直驱滚筒, Maxwell, 有限元分析法, 齿槽转矩, 优化设计

Research on Electromagnetic Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Direct Drive Drum Based on Maxwell Simulation Analysis

Liangpei Huang^{1,2}, Lichao Hou², Ming Zhang²

¹Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan Hunan

²College of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: November 19, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 23, 2025

文章引用: 黄良沛, 侯黎超, 张铭. 基于 Maxwell 仿真分析的永磁同步直驱滚筒电磁特性研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(6): 738-748. DOI: 10.12677/met.2025.146077

Abstract

In view of the disadvantages of the traditional motor in the current mine hoist, such as low working efficiency and complex overall structure, which is difficult to adapt to the complex and changeable working environment at home and abroad, an external rotor permanent magnet synchronous direct drive drum hoist with rated power of 425 kW is taken as the target, the magnetic circuit analysis and the influence of different parameters on the tooth groove torque analysis are carried out. The electromagnetic simulation model of the direct drive drum was established through CAD modeling combined with Maxwell software. The no-load and rated load operating characteristics of the direct drive drum were simulated, and the influencing factors of the cogging torque were analyzed emphatically. The results show that the slot width of the stator open slot has a relatively small influence on the amplitude of the cogging torque, and the influence of the slot width and the overall structure of the open slot on the cogging torque is consistent. Increasing the pole arc coefficient will cause the amplitude of the motor cogging torque to first decrease, then increase, and then decrease again. Through the analysis of the electromagnetic characteristics of the motor caused by different structural parameters, a foundation is laid for the subsequent optimization design of high-power direct drive rollers.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Direct Drive Drum, Maxwell, Finite Element Analysis Method, Cogging Torque, Optimization Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前国内能源结构中煤炭资源仍处于核心地位, 在经济建设中有着举足轻重的作用。而提升机作为物资与人员运输的辅助设备, 也是“智慧矿山”体系不可替代的一环。永磁同步直驱滚筒以其可靠性高, 损耗小, 高功率密度, 运行效率高, 结构紧凑等优点逐渐成为矿产资源开发中动力设备的研究热点[1][2]。永磁同步直驱滚筒采用永磁同步电机直接驱动滚筒, 电机通常采用新型高性能钕铁硼材料作为永磁体, 并直接集成在提升机内部, 省去减速器等中间装置, 大幅减小结构尺寸的同时还能进一步提高系统传动效率[3][4]。

永磁同步直驱滚筒在运行时, 由于高频谐波的存在, 会产生较大的齿槽转矩进而引发振动与噪声。针对上述问题, 当前国内外学者为抑制齿槽转矩并增大输出转矩主要做过以下方面的研究。如赵宏宇等[5]为增大电机输出转矩对齿槽采用了连续不等齿结构, 但提升幅度并不明显。马孔融等[6]针对车用小型电机研究了不同齿形, 极弧系数等对电机齿槽转矩的影响, 结果表明, 极弧系数对降低车用小型电机齿槽转矩效果显著。黄正军等[7]研究了磁钢厚度与转子外径对小型风力永磁发电机齿槽转矩的影响, 由于受电机整体尺寸影响, 二者对齿槽转矩的影响都非常有限。蔡治华等[8]对电机转子设计辅助槽, 其研究表明辅助槽宽为 2 mm, 个数为 8 时, 转矩脉动优化效果较好。宋守许等[9]使用非金属合金作为转子铁心材料, 并采用定子斜槽的方式重新设计了电机, 通过有限元分析得到电机转矩提高了 2.6%, 但斜槽的引入会受到电机整体尺寸的影响。房辉等[10]提出了一种新型复合槽楔结构。该结构能够有效减小了槽口效应和齿槽转矩, 但增加了工艺成本与加工难度。Tayfu 等[11]提出了一种新型绕组拓扑结构。采用该绕组

的永磁电机具有效率更高、轴向总长度大幅减小、涡流损耗低、不可逆磁退磁风险低等显著优势。Song 等[12]提出了一种相交磁体式交替磁极结构,改善了电机反电势不对称缺点的同时又降低了齿槽转矩。

从上述文献可知,当前对直驱滚筒的驱动电机进行磁路优化大多是通过改变电磁结构,而电机基础结构参数的影响研究则是应用在小型高速电机中,所得到的研究结果对于大型高功率低转速直驱滚筒却不完全适用。针对这一现状,研究设计一款外转子式永磁同步直驱滚筒,分析电机结构参数对大功率永磁同步直驱滚筒电磁性能的影响,进而优化其电磁特性,对促进矿产开发同类型提升设备的升级具有重要意义。因此本研究以一台额定功率为 425 kW 搭配 40 极 168 槽的永磁同步直驱滚筒为例,搭建直驱滚筒数学模型,通过 Maxwell 软件模拟直驱滚筒电机内部的磁路模型,对其空载和负载运行特性进行分析并深入比对不同参数对电机齿槽转矩的影响,以便后续进一步优化该永磁同步直驱滚筒。

2. 永磁同步直驱滚筒提升机数学模型搭建

永磁同步直驱滚筒提升机利用永磁同步电机作为动力源。电机部分主要由基座、主轴、定子和转子等构成,而定子是由定子绕组和硅钢片叠压在定子铁芯上,转子则包含转子轭和永磁体。当定子通电后产生的磁场与永磁体产生的磁场发生相互作用,带动转子旋转,从而向外输出转矩。永磁同步直驱滚筒在 Maxwell 软件中的分析主要基于多坐标系转换和电磁场理论,因此为了分析电机的磁路特性,还需要建立直驱滚筒多坐标系转换模型和电磁场理论模型。

在忽略永磁同步直驱滚筒中的涡流与磁滞损耗以及磁场中高频谐波的影响的前提下,其在三相坐标系下的电压方程可表示成:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 u_a , u_b , u_c 分别为三相定子电压, i_a , i_b , i_c 为三相电流, R_s 为定子相电阻, ψ_a , ψ_b , ψ_c 为三相磁链。

其磁链由永磁体磁链和电流激发的自感/互感磁链共同组成:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} 为自感, M_{ab} , M_{ac} , M_{bc} 为互感及对称矩阵, ψ_f 为永磁体磁链幅值, θ 为转子电角度。

电磁转矩表达式为:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[\psi_f (i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ)) + (L_d - L_q) (i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)) (i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ)) \right] \quad (3)$$

其中 p 是极对数, L_d , L_q 分别是直轴和交轴电感,表贴式电机则有 $L_d = L_q$ 。

从上述可知,三相坐标系下的数学模型包含多种参数,变量耦合严重,可通过采用 Clark 和 Park 变换进行简化。Clark 变换公式为:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Park 变换公式为

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

经两次变换后可得电机电压方程为:

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \\ u_q &= R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d \end{aligned} \quad (6)$$

其中 u_d , u_q 为 d - q 轴电压分量, i_d , i_q 为 d - q 轴电流分量, ψ_d , ψ_q 为 d - q 轴磁链, ω_r 为转子电角速度。磁链方程为:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (7)$$

电磁转矩表达式则可简化为:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (8)$$

Maxwell 的仿真分析的核心基础是电磁场基本定律, 其包含四大定律。四大定律组合形成麦克斯韦方程组, 则有:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times B = 0 \\ \nabla \times D = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: ∇ 为拉普拉斯算子, H 为磁场强度, J 为电流密度, D 为电通量密度, E 为电场强度, B 为磁通量密度, t 为时间。

其本构关系为

$$\begin{cases} J = \sigma E \\ B = \mu H \\ D = \varepsilon E \end{cases} \quad (10)$$

其中 σ 为电导率, μ 为磁导率, ε 为介电常数。上述物理量直接与材料参数相对应。当在 Maxwell 中设定好电机各部件材料时, 这些材料参数即可通过本构关系与麦克斯韦方程组相关联。而电流源、电压源参数则直接对应麦克斯韦方程组以及电机电压, 磁链和转矩方程的源项。

3. 永磁同步直驱滚筒有限元模型建立与参数设置

3.1. 永磁同步直驱滚筒的结构参数

本文选用的是用于深井矿产开采的永磁同步直驱滚筒提升机。其额定功率为 425 kW, 额定电压为 690 V, 额定转速为 29 rpm, 相数为 3。由于该永磁同步直驱滚筒转速不高, 永磁体采用表贴式安装, 磁钢材料选定钕铁硼新型永磁体, 牌号为 N38SH。该永磁同步直驱滚筒的气隙选用 3 mm。

为提高直驱滚筒在井下的效率，滚筒设计为 40 极 168 槽的极槽配合，并能明显降低温升损耗，节约能源的同时还能增加经济效益。定子冲片采用 50W470 硅钢片。永磁同步直驱滚筒详细参数特征见表 1。

Table 1. Parameters table of permanent magnet synchronous direct drive drum

表 1. 永磁同步直驱滚筒参数表

直驱滚筒设计参数	数值	直驱滚筒设计参数	数值
额定功率(kW)	425	额定转速(rpm)	29
额定转矩(kN·m)	140	额定电压(V)	690
永磁体材料	N38SH	定子槽数	168
永磁体宽(mm)	98	极对数	40
永磁体厚(mm)	12	气隙长度(mm)	3
转子外径(mm)	1790	定子外径(mm)	1650
转子内径(mm)	1680	定子内径(mm)	1390

3.2. 有限元模型搭建

基于上述主要参数特征，永磁同步直驱滚筒有限元模型建立过程如下：

1) 模型绘制。根据滚筒的尺寸结构参数，利用 CAD 软件绘制滚筒的二维模型，然后在 Maxwell 软件中选择 Maxwell 2D 模块，将模型以.dwg 格式文件导入软件，即可自动识别并分类，也可以通过 Maxwell 参数化建模，但需要对滚筒各个部分进行重新定义。完成后得到如图 1 所示的永磁同步直驱滚筒整体仿真模型。

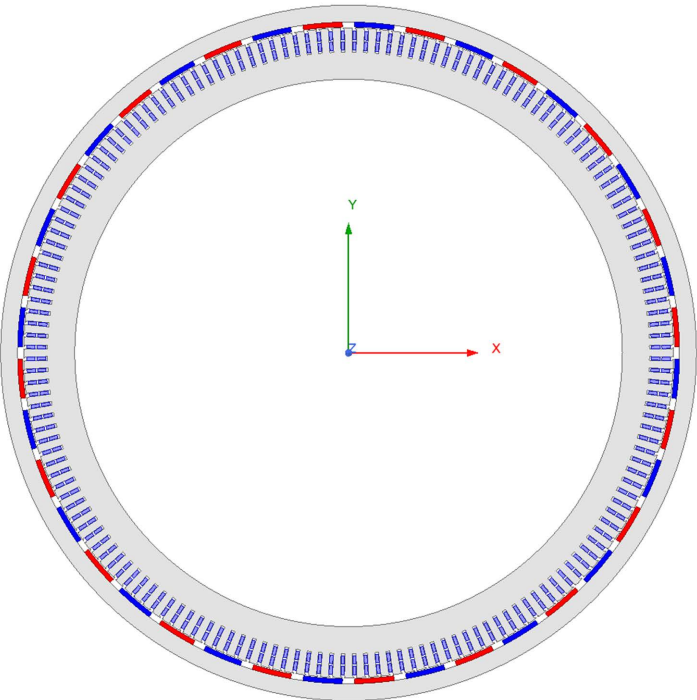


Figure 1. Overall model diagram of permanent magnet synchronous direct drive drum
图 1. 永磁同步直驱滚筒整体模型图

2) 定义材料。直接导入模型各部件材料会被默认为真空，因此还需要分别定义各项材料属性。本文定子铁心和转子铁心均采用 50W470 硅钢片，永磁体选择 N38SH，线圈选择铜(copper)，定子求解区域和转子求解区域选择空气(Vacuum)。由于滚筒电机在轴向上的对称性，根据几何对称原则进行求解，能够有效减少工作量和仿真时间，因此裁剪出 1/8 滚筒电机模型进行仿真分析。

3.3. 参数设置

永磁同步直驱滚筒在仿真前还应划分网格、定义边界条件以及设置绕组电流方向的匝数。

1) 网格设置。为了提高仿真结果的精确度同时考虑仿真速度，需要对滚筒不同区域设置不同网格。而滚筒电机气隙对电机电磁特性的影响是最重要的，其直接影响到电机齿槽转矩及运转时的震动与噪声。因此将电机转子与定子部分网格设置为 20 mm，band 域网格设置为 10 mm，永磁体与绕组网格设置为 2 mm，并对滚筒电机气隙进行 3 层加密剖分处理，每一层网格厚度选择 0.25 mm，根据上述参数得到划分后结果见图 2。由图 2 可知，永磁同步直驱滚筒划分了多层不同大小的网格，尤其是滚筒气隙部分，因此能够达到仿真要求。

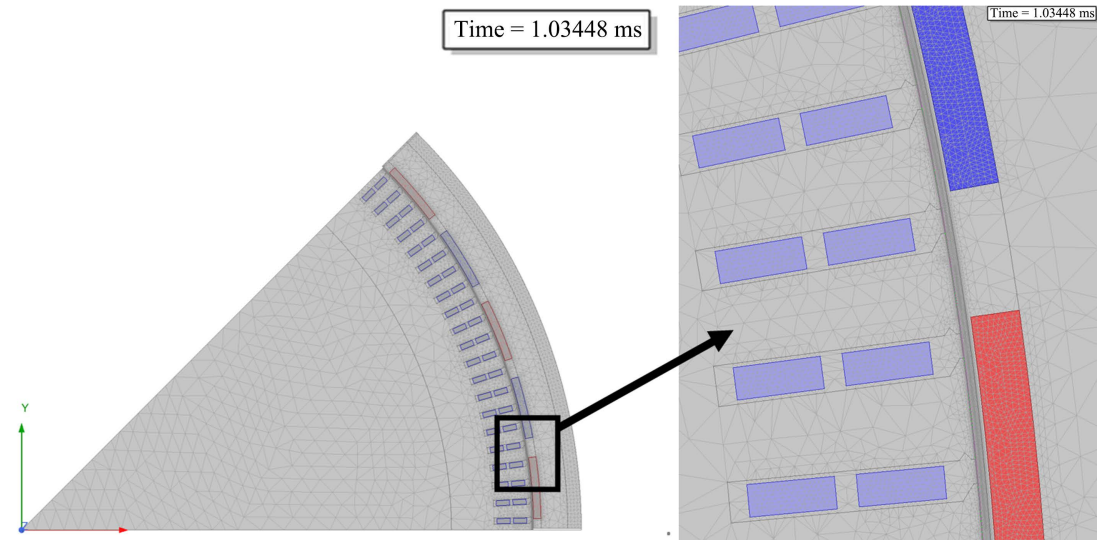


Figure 2. Meshing of the 1/8 permanent magnet synchronous direct drive roller model
图 2. 1/8 永磁同步直驱滚筒模型网格划分

2) 边界条件及绕组设置。由于对滚筒进行了裁剪分割，因此需要对该直驱滚筒模型设置主从边界条件。定义主从边界可以使磁力线相互垂直，结合周期设置可以保证场量连续性；而 0 边界条件的设置是使磁力线沿该边界分布，明确边界值以减少迭代次数，加快收敛性。为便于后续施加激励，因此还需要对滚筒电机绕组进行设置。可通过 Maxwell 的 Rmxprt 模块得到 40 极 168 槽电机绕组接线方式，并分别定义电机三相绕组的匝数与电流方向。

4. 永磁同步直驱滚筒电磁特性仿真分析

4.1. 直驱滚筒空载运行特性仿真

在 Maxwell 中将直驱滚筒的激励设置成 0，仿真时间设置为 60/29/20 * 20 s，仿真步长为 60/29/20/100，即总共仿真 20 个电周期，每个电周期步数为 100 步。此时直驱滚筒内部磁场都由永磁体自身形成，则可模拟该永磁同步直驱滚筒的空载运行特性。直驱滚筒空载运行磁力线及磁通密度特性见图 3。

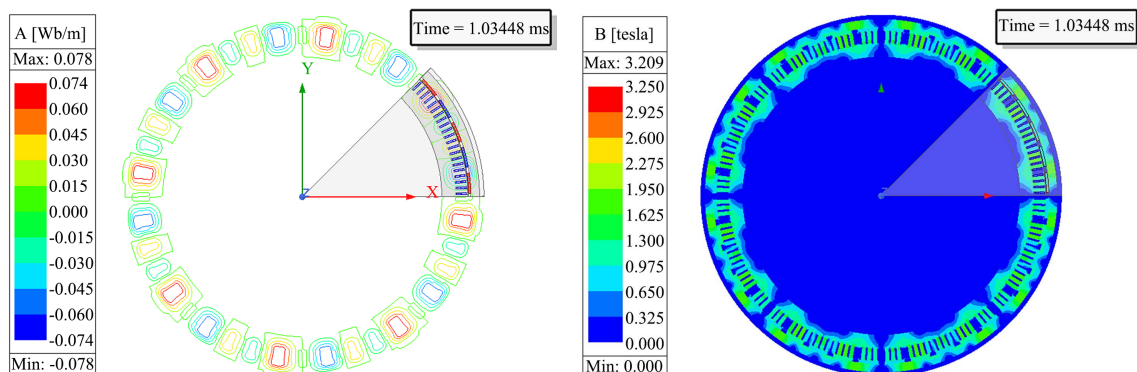


Figure 3. No-load state characteristics of direct drive drum. (a) Magnetic field lines, (b) magnetic flux density

图 3. 直驱滚筒空载状态特性。(a) 磁力线, (b) 磁通密度

由图 4, 电机绕组 3 个相的反电势依次间隔 120° , 波峰与波谷处出现削尖现象。这是由于滚筒空载运行时出现了高频谐波, 使得反电势不完全呈现正弦型, 所以该永磁同步直驱滚筒在后期还需要对结构参数设计进行优化, 调整磁路结构, 保证直驱滚筒在空载运行时更加平稳可靠。

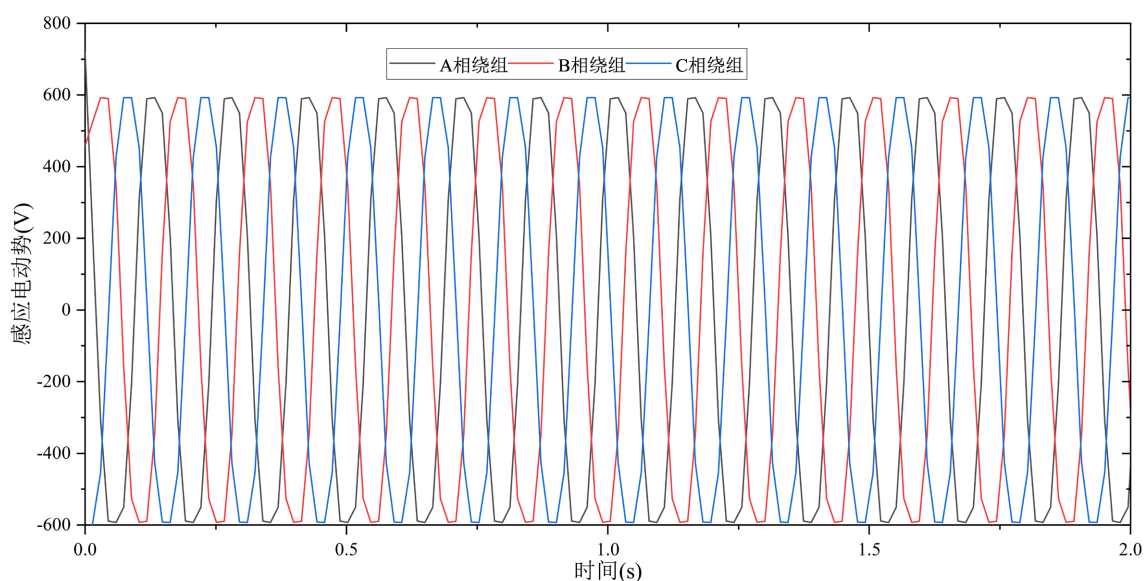


Figure 4. No-load counter electromotive force

图 4. 空载反电势

仿真计算得到滚筒齿槽转矩幅值见图 5。由图 5 该直驱滚筒齿槽转矩的幅值约为 $4.03 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 整体呈现锯齿形。齿槽转矩的周期性脉动会导致电机振动, 进而引发噪音。同时还会增加轴承摩擦损耗, 加速机械部件磨损并导致局部能量累计, 引发温升问题。因此需要通过结构优化抑制其负面影响。

4.2. 直驱滚筒负载运行特性仿真

永磁同步直驱滚筒负载运行即滚筒始终处于额定功率下运转, 因此将空载模型复制重新导入到 Maxwell 2D 模块中, 激励设置为电压源, 并将 A 相绕组电压设置为 $690\sin(29 \times 20 \times 2\pi/60t)$, 其他绕组与 A 相绕组相位差为 120° , 仿真时间与仿真步长与空载状态一致, 加载仿真后得到永磁同步直驱滚筒负载运行特性见图 6。

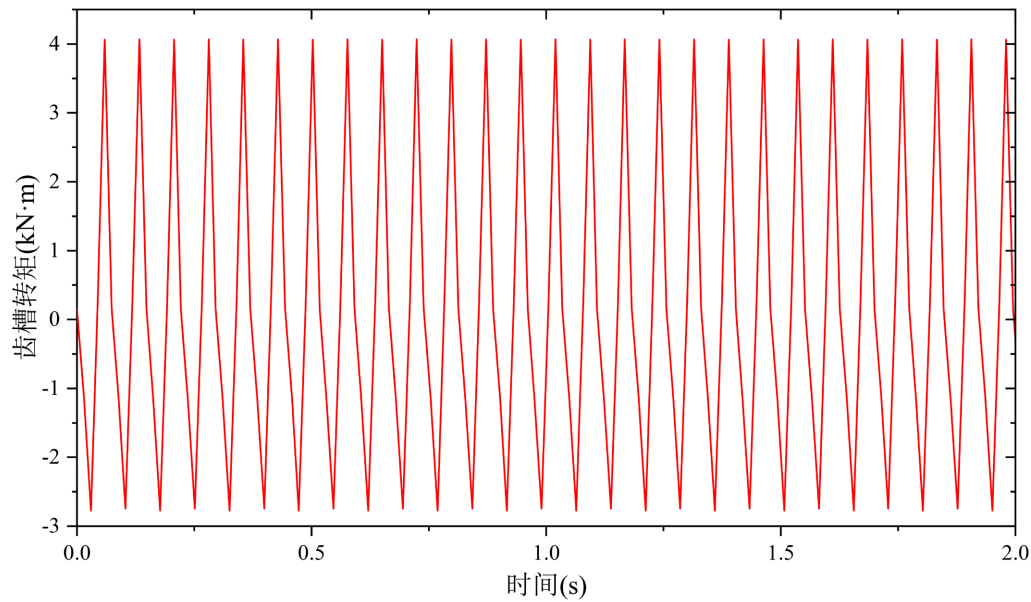


Figure 5. Cogging torque of direct drive drum
图 5. 直驱滚筒齿槽转矩

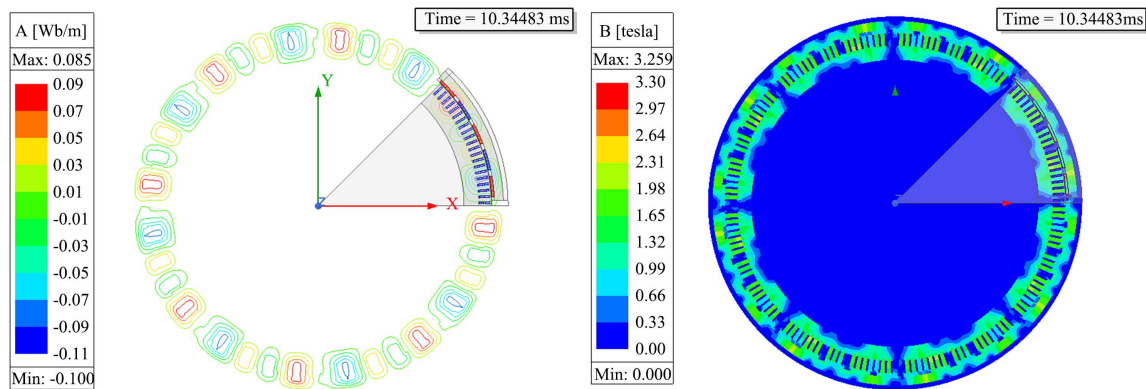


Figure 6. Load state characteristics of direct drive rollers. (a) Magnetic field lines, (b) magnetic flux density
图 6. 直驱滚筒负载状态特性。(a) 磁力线，(b) 磁通密度

从图 6(a)可以看出，永磁同步直驱滚筒在受到外部激励状态下运行时，由于滚筒电机绕组电流与永磁体磁场的叠加，使得此时的磁力线分布产生了一定的畸变，此时的磁场分布和空载运行时存在较大的不同。由图 6(b)，直驱滚筒负载状态下，磁通密度最大值仍处于定子开口槽与永磁体接近的位置，最大磁密约为 3.26 T，相较于空载时稍有增加。

额定电压时滚筒的实际输出转矩见图 7。从图 7 可知，滚筒在 0.2 s 左右逐渐趋于稳定状态，此时滚筒的输出转矩保持在 130 kN·m 波动，与额定转矩 140 kN·m 仅有 7% 的误差，同时由前文可知空载齿槽转矩约为输出转矩的 3.1%，达到永磁同步直驱滚筒的预期设计目标，能够满足工程应用需要。

5. 不同参数对齿槽转矩的影响

齿槽转矩是绕组不通电时永磁体和定子铁芯之间相互作用而产生的，是由永磁体与电枢齿之间相互作用力的切向分量引起。齿槽转矩大多是不利的，需要进行抑制。本文设置永磁体厚度 $T = 12 \text{ mm}$ 不变，主要分析此阶段下齿槽宽度 B_{s0} 和极弧系数 α_p 对齿槽转矩的影响。

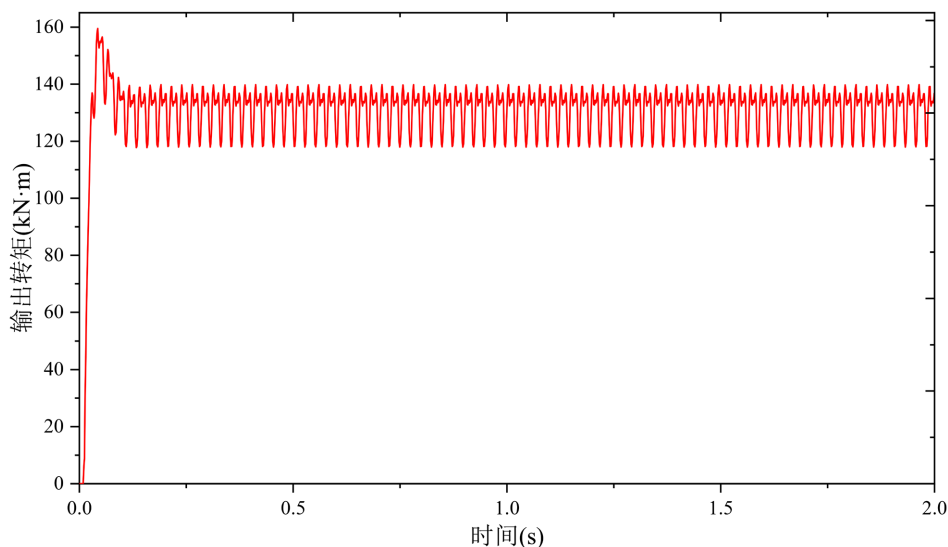


Figure 7. Outputting torque of direct drive drum

图 7. 直驱滚筒输出转矩

5.1. 齿槽宽度对齿槽转矩的影响

本文采用统一变量法, 维持直驱滚筒其他参数不变, 仅改变齿槽宽度, 分析其对齿槽转矩的影响, 得到结果见图 8。

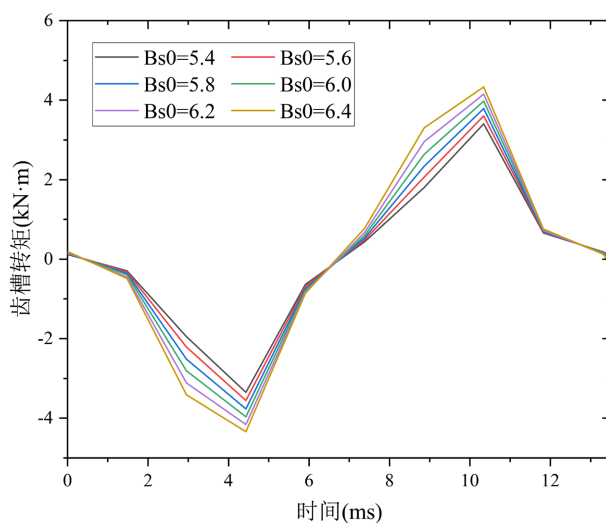


Figure 8. Influence of different notch widths on cogging torque

图 8. 不同槽口宽度对齿槽转矩的影响

由图 8 可知, 当槽口宽度增加时, 齿槽转矩幅值会随之同步增大, 但增加的幅度并没有出现特别大, 说明其对齿槽转矩影响较小, 槽口宽度的大小只影响定子齿和开口槽的数量与位置。

当槽口宽度 $Bs0 = 5.4 \text{ mm}$ 时, 齿槽转矩为 $3.40 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 比原始值 $4.03 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 降低了 $0.63 \text{ kN}\cdot\text{m}$; 当 $Bs0 = 6.4 \text{ mm}$ 时, 齿槽转矩为 $4.33 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。由于槽口宽度太小会导致开口槽难以加工, 同时绕线布置困难, 而槽口宽度过大又会导致齿槽转矩增加, 造成振动和噪声。因此槽口宽度可取 $5.80 \text{ mm} \sim 6.20 \text{ mm}$, 采取折中方式兼顾制造难度与使用性。

5.2. 极弧系数对齿槽转矩的影响

极弧系数是电机设计中描述磁场分布的关键参数，其合理选择能直接影响电机效率、噪声、和转矩性能。

保持其他参数不变，仅改变极弧系数，仿真分析后得到图 9 所示永磁同步直驱滚筒齿槽转矩曲线。由图 9，当该直驱滚筒 $\alpha_p = 0.80$ ，齿槽转矩达到最大，约为 $4.06 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ；当 $\alpha_p = 0.85$ ，其幅值约为 $0.82 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。极弧系数低于 0.75 时，齿槽转矩先减小后增大；极弧系数大于 0.75 时，齿槽转矩同样先减小后增大，故极弧系数的拐点位于 0.70 和 0.85 ，但 0.85 处幅值更小。极弧系数较大能优化气隙磁密波形，减少铁耗和铜损，提高电机效率，减少高次谐波，从而抑制电机振动噪声。因此，该永磁同步直驱滚筒极弧系数可取 $0.80\sim 0.85$ 。

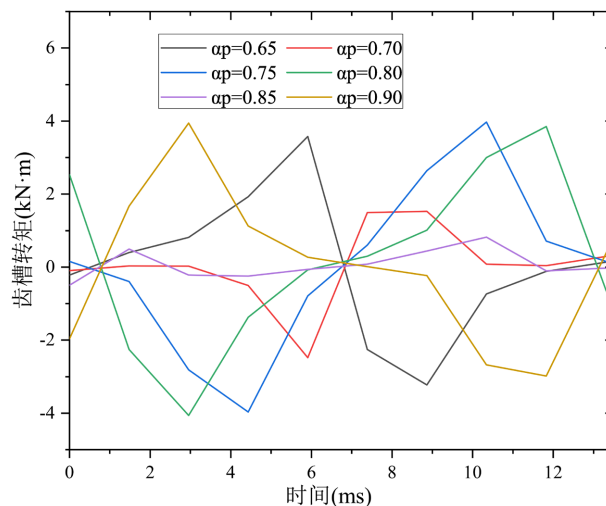


Figure 9. Influence of different pole arc coefficients on cogging torque
图 9. 不同极弧系数对齿槽转矩的影响

6. 结论

本文针对矿井开采过程中大型提升设备的性能参数优化问题，以一台额定功率为 425 kW ，转速为 29 rpm 的高功率，低转速的永磁同步直驱滚筒提升机为例。根据其结构参数搭建模型，利用 Maxwell 分析其不同工况下的特性，并进一步分析不同结构参数对直驱滚筒的齿槽转矩的影响，得出了以下结论：

1) 采用永磁同步直驱滚筒相比于传统提升机可以显著提升工作效率，降低整机结构复杂度，减小能耗并能适应不同复杂环境。

2) 该直驱滚筒在空载和额定负载状态下磁密最大值均出现在定子开口槽靠近永磁体处，同时空载状态下，由于高频谐波的存在会导致感应电动势的波峰波谷呈现锯齿状，需进一步优化电机结构以削弱或消除高频谐波。

3) 增加定子开口槽的槽口宽度，直驱滚筒的齿槽转矩将会随之增大，但增加幅度不会很大，同时开口槽的整体结构对直驱滚筒的齿槽转矩影响相一致。

4) 增大极弧系数，会导致直驱滚筒的齿槽转矩出现先减小后增大再减小的变化，整体幅值变化较大，可根据磁密的充分利用性和经济性选取合适极弧系数。

本文利用有限元法对永磁同步直驱滚筒进行了研究并得到了一些结论，但仍有诸多不足之处需要进一步完善，研究的局限性可以归纳为以下方面：

1) 本文仅针对直驱滚筒的电机本体结构参数进行仿真分析, 未考虑电机多种控制算法与参数之间的关联性, 以便进一步优化电机设计。

2) 直驱滚筒在实际应用过程中是一个综合电 - 磁 - 热的多物理场耦合模型, 温升与电磁损耗对直驱滚筒的电磁特性与效率也有较大影响, 在仿真与优化过程中需综合分析其相互之间的影响。

3) 由于样机体型庞大及其他条件限制, 本文未进行具体验证实验, 难以评估优化参数的有效性。

参考文献

- [1] 李帅耀. 提升机内置外转子式永磁同步电动机设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [2] 刘坤良, 徐永福, 杜波, 等. 低速大转矩永磁直驱传动系统在矿井提升机上的应用[J]. 矿山机械, 2024, 52(2): 15-19.
- [3] 王定龙, 吴顺海, 陈玮, 等. 425kW 内装式永磁提升机电机设计研究[J]. 防爆电机, 2024, 59(4): 9-12+72.
- [4] 卫振华. 永磁内装式提升机在正令煤业主斜井辅助提升机中的应用效果[J]. 矿业装备, 2023(3): 167-169.
- [5] 赵泓宇, 彭兵. 基于连续不等齿宽的外转子永磁同步电机设计[J]. 微特电机, 2025, 53(10): 13-16.
- [6] 马孔融, 周拓, 季杰, 等. 永磁同步电机齿槽转矩的优化分析[J]. 防爆电机, 2022, 57(2): 8-11.
- [7] 黄正军, 刘泉. 基于 ANSYS 的小型永磁同步发电机齿槽转矩研究[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 82-86.
- [8] 蔡治华, 郑祝平, 蒋卫良. 转子辅助槽对永磁滚筒齿槽转矩影响研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(7): 213-216.
- [9] 宋守许, 胡孟成, 杜毅, 等. 非晶合金转子铁心对再制造电机性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(11): 66-71.
- [10] 房辉, 程祥, 张炳义. 新型槽楔在低速大转矩永磁电机的性能分析[J/OL]. 机电工程技术, 1-6.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloJ3PiG1Wxh8wWcSTS--0EK7J4y2w-EHsK2aBXAfWA6muZVCOzW7SfRg8ysgRK-pxr7nDSIJ2M6DD5zTGKtI_gc3pcp1MScTHBso6n5akzJoG15h86vYotBsIXvqKq-x0bTfu0i8x556Kz1vqg_1t2Geb99zP29BhA=&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2025-11-22.
- [11] Gundogdu, T. and Komurgoz, G. (2020) Design and Analysis of Interior Permanent Magnet Machines Equipped with Novel Semi-Overlapping Windings. *IET Electric Power Applications*, **14**, 1446-1457.
<https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0841>
- [12] Song, S., Hong, M., Lee, J. and Kim, W. (2022) A Study on Reduction of Cogging Torque and Magnet Usage through Intersect Magnet Consequent Pole Structure. *Energies*, **15**, Article 9255. <https://doi.org/10.3390/en15239255>