

## 基于 Maxwell 盘式永磁阻尼托辊装置的数值模拟及试验验证

毛君 王镝 谢苗 李思遥 刘亚峰

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 阜新 123000)

**摘要:** 为解决大功率下运带式输送机在大倾角、高带速条件下极易出现的飞车及断带等问题,提出一种通过调节永磁体与线圈啮合面积大小来实现制动调节的盘式可调永磁阻尼托辊装置。利用 Maxwell 软件研究了稳定条件下盘式永磁阻尼装置的瞬态磁密分布规律及不同气隙厚度下阻尼力矩的变化规律,并搭建试验台进行试验验证。结果表明,随气隙厚度增大,磁密逐渐增大,最大可达 2.1 T;气隙厚度由 1 mm 增至 2 mm 时阻尼力矩增大,由 2 mm 增至 3.5 mm 时阻尼力矩减小。上述结果可为大功率下运带式输送机的改进与优化提供数据支撑。

**关键词:** 带式输送机; 阻尼托辊; Maxwell 软件; 阻尼力矩; 有限元分析

**中图分类号:** TH222 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.03.007

## 0 引言

目前,皮带下山带式输送机主要采取两种制动措施,一种是在带式输送机运行过程中对速度的限制;另一种就是用来停车的制动<sup>[1]</sup>。但是这样的制动方式易导致制动装置结构过于庞大、制动时输送带张力不均、温度过高和系统响应速度迟缓等情况<sup>[2]</sup>。近年来,为解决下运带式输送机的制动难题,许多学者都致力于探索新的解决方法,希望在这一关键技术研究中取得突破。王继东等<sup>[3]</sup>通过分析下运输送机制动阻尼托辊,并在研究托辊表面的运动及形变规律的基础上,完成了带式输送机制动阻尼托辊的布置方案及制动托辊单体结构设计,延长了托辊的使用寿命,改善了作业环境。孙中圣等<sup>[4]</sup>设计了一种新型筒式永磁调速器,通过调节永磁转子和导体转子的相对位置来实现调速,同时建立了有限元模型,并对其磁场进行瞬态分析,通过分析结果与试验结果对比验证了新型筒式永磁调速器的准确性。

为了提升带式输送机运行时的工作稳定性,改善带式输送机的运行工况,本文提出将盘式永磁涡流阻尼托辊替代普通托辊应用在带式输送机上。采用盘式永磁阻尼托辊代替机械托辊能有效地提高带式输送机的旋转阻力,抵抗物料下滑所产生的摩擦力,并使输送带制动时张力均匀分布,降低事故发生的概率,从而有效地保证了大倾角下运带式输送机的运行稳定性。

## 1 盘式永磁阻尼托辊结构和工作原理

可调盘式永磁阻尼托辊结构如图 1 所示,其主要由铜线圈、永磁体和伸缩杆组成。其中,永磁体采用 NdFe35 永磁材料,具有低温、高矫顽力以及良好的稳定性,而且 N 极、S 极交替排列,固定在永磁体支撑架上<sup>[5]</sup>,铜线圈则嵌入在托辊皮上,伸缩杆与阻尼托辊轴相连,从而实现了可调阻尼效果。

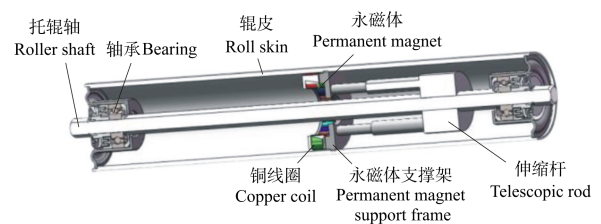


图 1 盘式永磁阻尼托辊结构简图

Fig. 1 Structure sketch of the disk-type permanent magnetic damping roller

盘式永磁阻尼托辊实物如图 2 所示。当托辊旋转时铜线圈与辊皮同步运动并相对永磁体做旋转运动;此时铜线圈会做切割磁感线运动,并在线圈内部产生感应电涡流,带有感应电流的铜线圈会在转动过程中产生较大的洛伦兹力<sup>[6]</sup>。由电磁感应定律可知,洛伦兹力阻碍托辊的旋转运动。因此,本系统利用蜗轮蜗杆传动,可将电动机的旋转转化为伸缩杆的直线行走,并且可以根据需要,对电动机的正负转动做出相应的操作。这样就可以根据不同的情况来调整永磁

收稿日期: 2023-08-11 修回日期: 2023-10-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51774162, 51874158)

作者简介: 毛君,男,1960年生,辽宁岫岩人,博士,教授,博士研究生导师;主要研究方向为系统动态特性; E-mail: 13704181080@139.com。

王镝(通信作者),男,1996年生,辽宁朝阳人,在读硕士研究生;主要研究方向为机械设计及理论; E-mail: 3504686448@qq.com。

引用格式: 毛君,王镝,谢苗,等. 基于 Maxwell 盘式永磁阻尼托辊装置的数值模拟及试验验证[J]. 机械强度, 2025, 47(3): 60-66.

MAO Jun, WANG Di, XIE Miao, et al. Numerical simulation and test verification of Maxwell disk type permanent magnet damping roller device[J].

Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(3): 60-66.

体和铜线圈的接触面积,最终实现对托辊力矩的有效控制。



图 2 盘式永磁阻尼托辊实物图

Fig. 2 Physical diagram of the disk-type permanent magnetic damping roller

## 2 托辊磁场分析与阻尼力矩计算

### 2.1 磁场分析

如图 3 所示,将永磁托辊磁场整个结构域划分为 5 个相同的楔形圆柱区域:背铁(区域 1)、永磁体(区域 2)、气隙(区域 3)、铜线圈(区域 4)、背铁(区域 5)<sup>[7]</sup>。除了角相位移外,永磁体和涡流分布是相同的,因此磁场在  $\theta$  方向上呈现出奇周期性。图 3 中所示的整个结构域受平面  $\theta = -\pi/2p$  和  $\theta = \pi/2p$  的限制,其中  $p$  是极对数。为了简化该边值问题的解,重要的是注意到区域 1 的背铁半径已经扩展到  $R_3$ ,因此假设图 3 中的所有材料介质均为线性表现<sup>[8]</sup>。

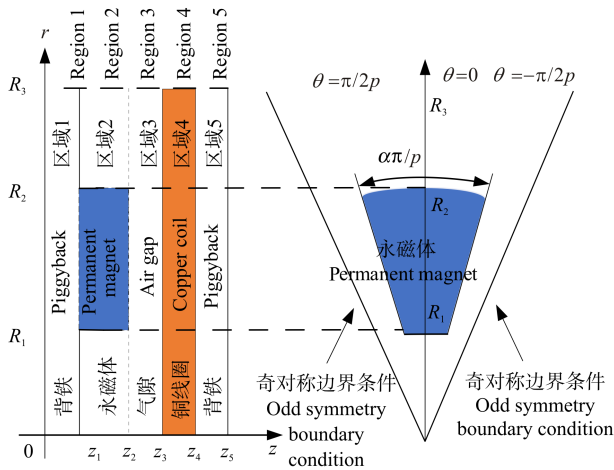


图 3 轴向磁通永磁涡流解析模型

Fig. 3 Analytical modeling of the axial flux permanent magnet eddy current

盘式永磁阻尼装置磁路如图 4 所示。盘式永磁阻尼装置的磁路由主磁路、气隙漏磁回路和槽漏磁回路 3 个部分构成,其中漏磁量的大小将直接影响装置的传输功率及其性能。因此,按照磁路分析并进行假设<sup>[9]</sup>:①永磁体产生的磁通只通过与磁极相对的圆形区域,忽略漏磁<sup>[10]</sup>;②永磁体磁场在气隙中均匀分布;③铜线圈的磁导率为常数;④不考虑磁饱和现象对结果的影响。

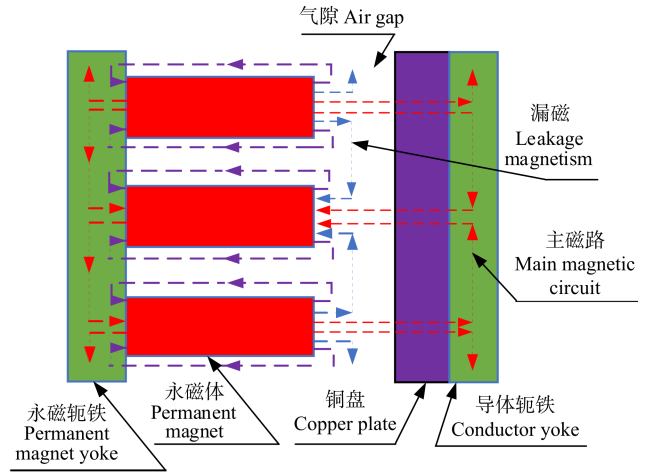


图 4 盘式永磁阻尼装置磁路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of magnetic circuit of the disk-type permanent magnet damping device

### 2.2 磁感应强度的计算

等效磁路如图 5 所示。图 5(a)所示为 1 对磁极的等效磁路,图 5(b)所示为 1 个磁极的等效磁路,所以整个磁路的总磁阻为

$$R_f = R_{f0} + R_{f1} + R_{f\delta} + R_{f2} + R_{f3} \quad (1)$$

式中,  $R_f$  为总磁阻;  $R_{f0}$  为磁钢磁阻;  $R_{f1}$  为铜线圈磁阻;  $R_{f\delta}$  为气隙磁阻;  $R_{f2}$  为永磁体磁阻;  $R_{f3}$  为背铁磁阻。

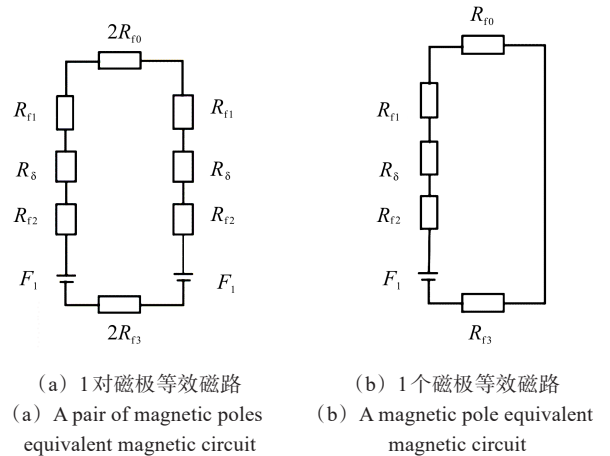


图 5 等效磁路示意图

Fig. 5 Diagram of equivalent magnetic circuit

因为永磁体、磁钢、气隙的相对磁导率  $\mu \approx 1$ , 它们的磁阻相对来说比较大;而磁钢用磁铁所制,其相对磁导率较大,所以它的磁阻  $R_{f0}$  相对较小,能够近似不计。则进一步简化的磁阻<sup>[11]</sup>为

$$R_f = \frac{\delta + l_{f1}}{\mu_0 A_f} + \frac{l_{f2}}{\mu_0 A_f} + \frac{l_{f3}}{\mu_0 A_f} \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为气隙的间隔值;  $l_{f1}$  为磁钢厚度;  $l_{f2}$  为永磁体厚度;  $l_{f3}$  为磁路距离;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $A_f$  为涡流的区域面积。

当永磁阻尼装置正常工作时,因为磁钢产生的反

向磁场与存在的原磁场进行矢量叠加<sup>[12]</sup>,所以磁路中的总磁动电势为

$$F = F_1 - F_2 \quad (3)$$

式中, $F$ 为总磁电动势; $F_1$ 为原磁场等效磁势, $F_1 = H_e h$ ; $F_2$ 为涡流产生的反向电动势, $F_2 = k_e i_e$ 。其中, $H_e$ 为原磁场强度; $k_e$ 为等效折算系数,取值范围为0.8~2.5; $i_e$ 为涡流有效值。

由于涡流具有集肤效应,涡流环产生的电阻 $dR$ 为

$$dR = \frac{2\pi r \rho}{\Delta h dr} \quad (4)$$

区域1内的瞬时涡流为

$$i_r = \int_0^r \frac{E}{dR} = \int_0^r \frac{B\omega\Delta h \sin \omega t}{2\rho} r dr = \frac{B\omega r^2 \Delta h \sin \omega t}{4\rho} \quad (5)$$

式中, $r$ 为涡流区域半径; $E$ 为感应电动势。

则涡流有效值为

$$i_e = \frac{i_r}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} B\omega r^2 \Delta h}{8\rho} \quad (6)$$

又因为磁通量为

$$\phi = A_r B = \frac{F}{R_f} = \frac{F_1 - F_2}{R_f} \quad (7)$$

随意两个相反方向的磁场叠加后的磁感应强度为

$$B = \frac{\phi}{A_r} = \frac{8\pi H_e h \rho}{\sqrt{2} A_r K_e \Delta h \omega + 8\pi \rho R_f A_r} \quad (8)$$

式中, $\omega$ 为磁场变化角速度; $t$ 为时间。

### 2.3 阻尼制动力矩的计算

当托辊运动时,永磁体扇形区域的磁场强度会发生显著的波动,永磁体扇形区域磁通量变化过程为 $\phi_f \rightarrow 0 \rightarrow \phi_f \rightarrow 0 \rightarrow \phi_f$ ,一直重复此规律,经过分析,这种规律遵循余弦定律,因而永磁体的磁场强度<sup>[13]</sup>可以表示为

$$\phi_f = BA_f \cos \omega t \quad (9)$$

$$\omega = N_p \omega_\sigma = \frac{2\pi N_p \Delta n}{60} = \frac{\pi N_p \Delta n}{30} \quad (10)$$

式中, $N_p$ 为磁极对数; $\omega_\sigma$ 为托辊转动的角速度; $\Delta n$ 为转速差。

则磁通变化所产生的感应电动势 $E$ 为

$$E = -\frac{d\phi_f}{dt} = \pi r^2 B \omega \sin \omega t \quad (11)$$

永磁阻尼装置每个定子盘上有 $n$ 个最大直径为 $D$ 的线圈,则单个永磁体在周期 $T$ 内的有效功率 $P_e$ 为

$$P_e = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{A_f^2 h B^2 \omega^2}{16\pi \rho} \quad (12)$$

则总的制动功率 $P$ 为

$$P = n P_e = \frac{A_f^2 h B^2 \omega^2}{2\pi \rho} \quad (13)$$

故 $n$ 个永磁体产生的阻尼力矩 $M_r$ 为

$$M_r = \frac{P}{\omega_\sigma} = \frac{A_f^2 h B^2 \omega^2}{2\pi \rho \omega_\sigma} \quad (14)$$

### 3 盘式永磁阻尼托辊的数值模拟

在伸缩装置的作用下永磁体沿轴向方向移动来改变其与铜线圈啮合面积的大小,从而达到改变阻尼力矩的目的。当啮合面积较小或者不啮合时所产生的阻尼力矩也较小,故本文中在某矿中使用的永磁托辊均为完全啮合状态,永磁体选用NdFe35永磁材料。永磁体N极、S极相间分布在永磁体支撑架上。使用SolidWorks软件,可以将永磁阻尼装置的三维模型转换为.X\_T格式,并将其导入Maxwell 3D瞬态求解器中,以便对永磁体N极、S极相间分布的装置进行仿真分析<sup>[14]</sup>。根据图6和表1,可以看到可调盘式永磁阻尼装置的模型简图和相关参数。

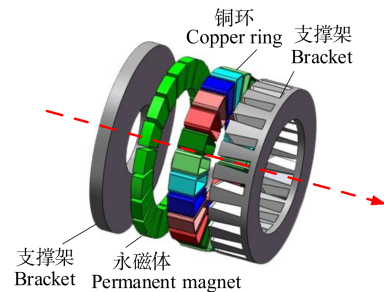


图6 可调盘式永磁阻尼装置模型简图

Fig. 6 Model sketch of the adjustable disk-type permanent magnet damping device

设置铜线圈材质为铜,设置求解域及运动区域材质均为空气。通过多次反复的手动划分,最终获得了1个含392 158个四面体单元的网格,这样可以大幅提高仿真的准确性。

表1 阻尼装置基本参数

Tab. 1 Basic parameters of damping device

参数 Parameter	值 Value
永磁体材料 Permanent magnet material	NdFe35
铜线圈材料 Copper coil material	—
永磁体外径 Outer diameter of permanent magnet/mm	70
永磁体内径 Inner diameter of permanent magnet/mm	50
永磁体厚度 Thickness of permanent magnet/mm	10
气隙厚度 Thickness of air gap/mm	2
托辊外径 Outer diameter of roller/mm	95

可调盘式永磁阻尼装置磁感应强度矢量图如图7所示,可知整体的磁感应强度可达2.23 T;从永磁体出发,沿轴向方向穿过铜线圈与气隙,最终返回到相邻的永磁体,形成一个闭合回路。

图8为永磁阻尼装置磁钢处磁感应强度矢量图。由图8可知,磁钢处磁感应强度最大可达1.38 T。

永磁阻尼装置线圈中点处磁感应强度矢量图如

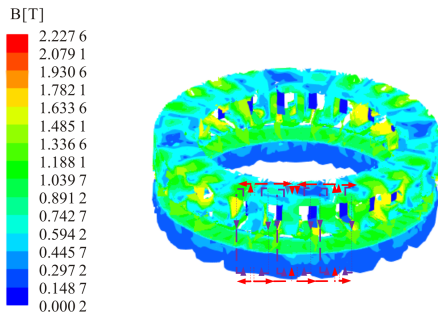


图 7 可调盘式永磁阻尼装置磁感应强度矢量图

Fig. 7 Vector diagram of the magnetic induction intensity of the adjustable disk-type permanent magnet damping device

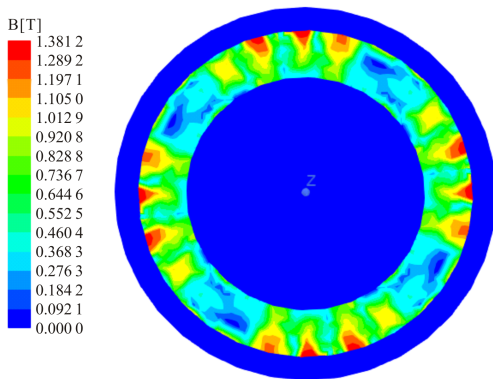


图 8 永磁阻尼装置磁钢处磁感应强度矢量图

Fig. 8 Vector diagram of the magnetic induction intensity at the magnet of the permanent magnet damping device

图 9 所示。根据电磁感应定律,图 9 中的铜线圈具有高达 1.6 T 的磁感应强度,这种磁场能够有效地抑制托辊的运动,从而保证其正常的工作状态。

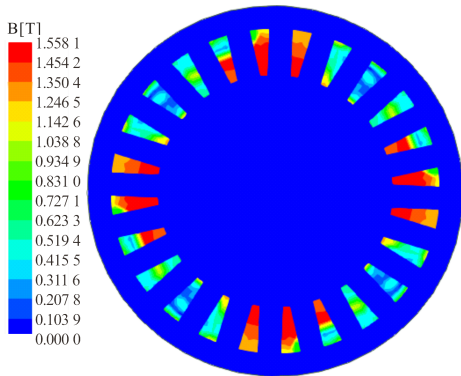


图 9 永磁阻尼装置线圈中点处磁感应强度矢量图

Fig. 9 Vector diagram of the magnetic induction intensity at the midpoint of the coil of the permanent magnet damping device

永磁阻尼装置线圈气隙处磁感应强度矢量图如图 10 所示。其中,气隙磁感应强度可达 1.6 T,说明距离永磁体越近,磁感应强度越大。

永磁阻尼装置的轴向磁通三维气隙磁密分布如图 11 所示。图 11 呈现出扇形的分布方式,并且磁通密度在气隙厚度和周向上的强度逐渐增加,其中气隙磁感应强度最大可达 2.1 T。从中心的永磁体开始,在

气隙内部磁通密度开始较小,随着距离的增加磁通密度逐渐增大。同时,在气隙的周向上,磁通密度也随着角度的增加而逐渐增强。这种扇形的磁密分布方式可以归因于气隙的结构和磁场的分布特性<sup>[15]</sup>。由于气隙的存在,磁通在周向上会受到一定的限制,导致磁场在该方向上逐渐增强。同时,气隙的厚度不断增加,磁通也会逐渐增大,但当厚度达到一定程度时磁通会随之变小。

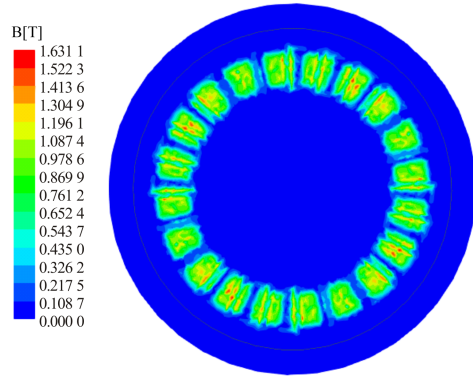


图 10 永磁阻尼装置气隙磁感应强度矢量图

Fig. 10 Vector diagram of the air gap magnetic induction intensity of the permanent magnet damping device

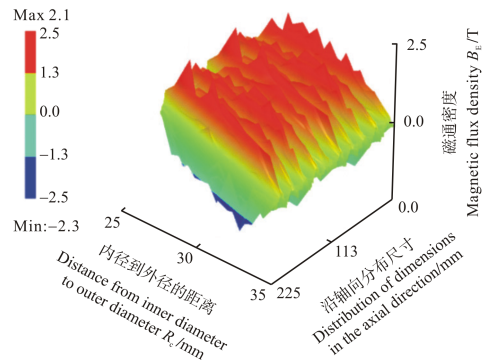


图 11 轴向磁通三维气隙磁密分布

Fig. 11 Magnetic density distribution of the axial flux 3D air gap

基于某矿现场实际工况参数,根据仿真结果可得,盘式永磁托辊阻尼装置在转速为 347 r/min 时的阻尼力矩如图 12 所示,在一个周期内,其响应时间为 60 ms,初始阻尼力矩为 0,随着转速提高阻尼力矩先急速增长,然后趋于稳定并在 60 ms 时达到最大值。阻尼力矩随时间变化值如表 2 所示。

图 13 所示为一个周期内不同气隙厚度下阻尼力矩曲线,永磁阻尼装置不改变其他结构尺寸参数,仅改变气隙的厚度。气隙厚度分别设置为 1、1.5、2、2.5、3、3.5 mm。由图 13 可知,在不同气隙厚度条件下,阻尼力矩的变化趋势是一致的。其中,阻尼力矩在气隙厚度为 2 mm 时达到最大值。这是因为当永磁体与铜线圈接触过近时,永磁体的强大吸力会限制托辊的转动。而当气隙厚度从 1 mm 增加至 2 mm 的过程中,这

种限制就会逐渐减弱。随着气隙厚度的增加,阻尼力矩也会呈现出正相关的变化。气隙厚度从 2 mm 增加到 3.5 mm,磁感应强度逐渐降低,最终达到一个稳定的状态。因此,阻尼力矩的变化是一个复杂的过程,需要结合气隙的特性来进行调节。在进行阻尼托辊的选择时可以根据实际工况利用伸缩装置对气隙厚度进行调节。

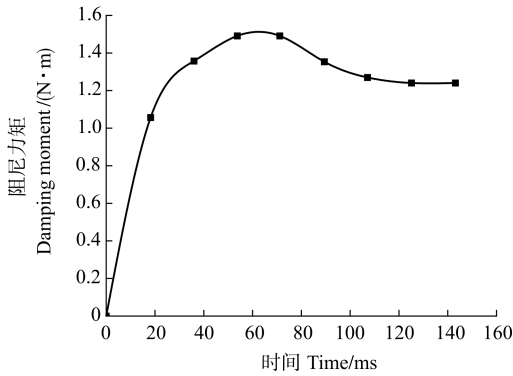


图 12 2 mm 气隙阻尼力矩-时间变化曲线

Fig. 12 Damping moment-time variation curve of 2 mm air gap

表 2 阻尼力矩数值

Tab. 2 Damping torque values

时间 Time/ms	阻尼力矩 Damping moment/(N·m)	时间 Time/ms	阻尼力矩 Damping moment/(N·m)
10	0.669 25	80	1.433 01
20	1.132 72	90	1.345 14
30	1.327 76	100	1.294 93
40	1.415 63	110	1.264 03
50	1.511 22	120	1.246 65
60	1.518 94	130	1.238 93
70	1.484 18	140	1.238 95
稳定值 Stabilization value/(N·m)		1.238 94	

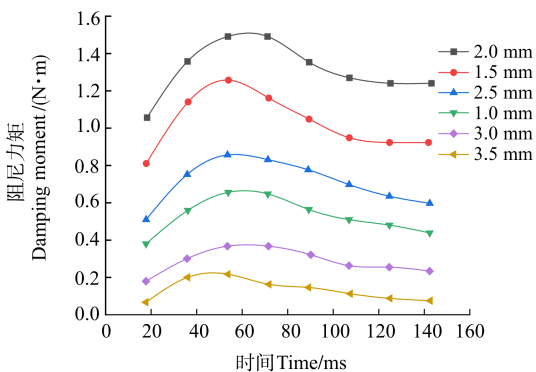


图 13 不同气隙厚度阻尼力矩曲线

Fig. 13 Damping moment curves for different air gap thicknesses

### 4 试验验证

为了验证仿真结果的准确性,需要对某矿带式输送机的永磁阻尼托辊进行试验,以收集大量的数据,

并将试验结果与仿真结果进行比较,以便更好地理解带式输送机运行时,皮带和煤的压陷阻力和旋转阻力的变化情况。如图 14 所示,采用普通托辊和盘式永磁阻尼托辊进行测试。通过对普通托辊的测量,可以基本估算出永磁阻尼托辊的压陷阻力<sup>[16]</sup>。因此,可以将其与普通托辊的测量结果相比较,从而推算出永磁阻尼托辊的阻尼力和阻尼力矩的大小,这样就可以更准确地估算出永磁阻尼托辊的性能。

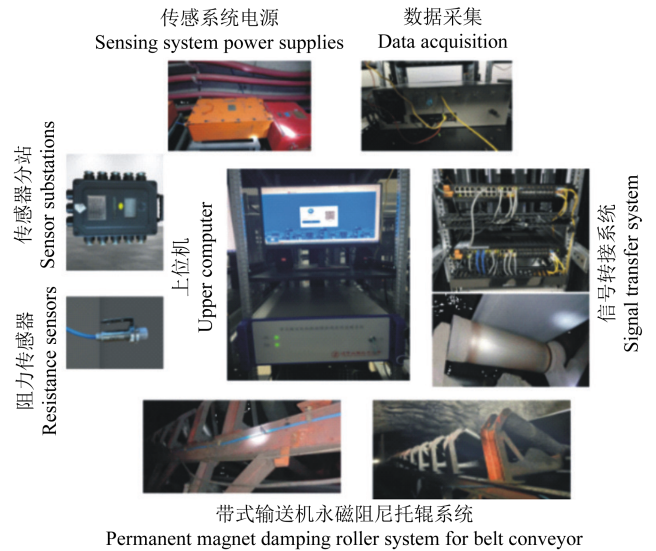


图 14 盘式永磁阻尼托辊装置现场试验图

Fig. 14 Field test diagram of disk-type permanent magnet damping roller device

在现场试验中,使用了一种盘式永磁阻尼托辊,它的主要部分包括带式输送机皮带下山运输系统(长约 596 m),如图 15 所示。还使用了阻力传感器、阻力传感器分站、传感系统电源、数据采集系统、信号转接系统和上位机<sup>[17]</sup>。在试验过程中,采用 15 °C 恒温的洞室环境,运输均载约为 300 N,输送带张力保证不打滑,带速为 1.6 m/s。在皮带机运转平稳后,采集了 300 个连续数据点的压陷阻力和压陷滚动阻力系数。经过一系列的测试发现,不同的托辊阻尼力矩有着显著的差异,其中气隙厚度分别为 1、1.5、2、2.5、3、3.5 mm,仿真结果如表 3 所示。



图 15 皮带下山带式输送机倾角现场

Fig. 15 Belt downhill belt conveyor incline site

表 3 普通托辊与阻尼托辊试验仿真数值结果

Tab. 3 Numerical results of test simulation of ordinary rollers and damping rollers

气隙厚度 Air gap thickness/mm	永磁阻尼托辊 Permanent magnetic damping roller	
	试验阻尼力矩 Test damping moment/ (N·m)	仿真阻尼力矩 Simulated damping moment/ (N·m)
	1.00	0.474 08
1.50	0.897 35	0.923 24
2.00	1.213 09	1.238 94
2.50	0.592 69	0.634 99
3.00	0.238 91	0.254 93
3.50	0.081 42	0.087 73

根据表 3 的分析,由于实际操作的复杂性,加上设备振荡、输送带碰撞、煤炭掉落等因素,使得模拟结果与实际测量的结果有较大的出入。

由于在制动过程中铜线圈切割磁感线会在铜线圈内部产生涡流效应并伴随大量的热,导致试验结果与仿真结果相比较低(表 3)。如图 16 所示,对比仿真结果与试验结果可知,盘式永磁阻尼托辊力矩的试验值与仿真值的最大误差为 0.042 30 N·m,最大相对误差为 7.75%,不超过 10%,在可接受范围内,说明试验与仿真结果比较吻合,为本项目大倾角皮带下山带式输送机更好地制动提供了有力数据支撑。

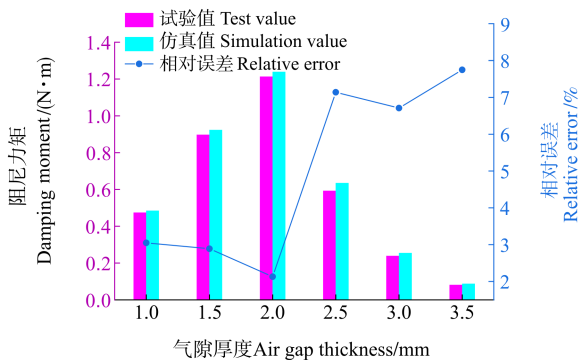


图 16 试验与仿真误差对比分析

Fig. 16 Comparative analysis of test and simulation errors

## 5 结论

基于盘式永磁阻尼托辊模型,分析气隙厚度对阻尼力矩的影响规律,主要得出以下结论:

1) 通过有限元技术,详细探讨了盘式永磁阻尼托辊的特性,利用 SolidWorks 软件创造出了一个完整的三维模拟,从而更好地了解了它的结构和工作机制。

2) 借助 Maxwell 软件对盘式永磁阻尼装置在 3D 瞬态求解器中进行有限元分析,探究永磁阻尼装置的气

隙厚度对阻尼力矩的影响。结果表明,当气隙厚度从 1 mm 增加至 2 mm 时,阻尼力矩的值与气隙大小成正比;当气隙厚度继续增加,从 2 mm 增加至 3.5 mm,气隙值增大时,阻尼力矩与气隙大小成负相关。

3) 通过对盘式永磁阻尼托辊的试验研究发现,永磁阻尼托辊具有良好的阻尼特性,可以有效地抑制冲击力,从而满足制动需求。此外,在保持恒定的带速和永磁体厚度不变的情况下,试验结果表明,随着气隙厚度的增加,阻尼力矩会先上升,然后逐渐降低,最后趋于稳定。经过试验和仿真的比较,发现结果非常接近,这证明了仿真的准确性,为大功率下运带式输送机的改进与优化提供了数据支撑。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱文军. -32°超大倾角下运带式输送机研制与应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017:9-16.  
ZHU Wenjun. Research and application of -32° high angle downward belt conveyor[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017:9-16. (In Chinese)
- [2] 王宇飞,何琳,单树军. 基于 Maxwell 的磁流变阻尼器的磁路有限元分析[J]. 噪声与振动控制, 2007(2):28-32.  
WANG Yufei, HE Lin, SHAN Shujun. The finite element analysis based on Maxwell for magnetic circuit of MR damper[J]. Noise and Vibration Control, 2007(2):28-32. (In Chinese)
- [3] 王继东,孙建廷,胡美玲. 带式输送机智能控制系统的设计与研究[J]. 机械强度, 2019, 41(3):748-752.  
WANG Jidong, SUN Jianyan, HU Meiling. Design and research of intelligent control system for belt conveyor[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(3):748-752. (In Chinese)
- [4] 孙中圣,周丽萍,王向东,等. 筒式永磁调速器的磁场分析与特性研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13):1742-1747.  
SUN Zhongsheng, ZHOU Liping, WANG Xiangdong, et al. Magnetic field analysis and characteristic research of cylindrical permanent magnet adjustable speed drive [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(13):1742-1747. (In Chinese)
- [5] 石松宁,王大志. 永磁驱动器斜极参数对齿槽转矩的影响及优化[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(9):67-72.  
SHI Songning, WANG Dazhi. Influence of magnet skewing parameters on cogging torque and optimization of permanent magnet drive [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(9):67-72. (In Chinese)
- [6] 霍国涛. 下运带式输送机液压软制动系统的应用研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015:57-65.  
HUO Guotao. Application research on hydraulic soft braking system of downward belt conveyor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015:57-65. (In Chinese)
- [7] 李琪,石永军,孙瑞,等. 可辅助制动永磁变速器的设计与研究[J]. 机械设计, 2018, 35(12):36-40.  
LI Qi, SHI Yongjun, SUN Rui, et al. Design and research of perma-

- nent magnetic transmission with auxiliary braking [J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(12): 36-40. (In Chinese)
- [8] 周丽萍. 新型永磁涡流调速器的特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016:58-64.  
ZHOU Liping. Characterization of new permanent magnet eddy current governor [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 58-64. (In Chinese)
- [9] 王爽, 郭永存, 王鹏或, 等. 复合式磁力耦合器的设计与试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(7): 115-123.  
WANG Shuang, GUO Yongcun, WANG Pengyu, et al. Design and experimental research on hybrid magnetic coupler [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(7): 115-123. (In Chinese)
- [10] 李毕胜. 带式输送机用盘式制动装置的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012:35-43.  
LI Bisheng. Study on disk brakes of the belt conveyor [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 35-43. (In Chinese)
- [11] 罗松林. 基于 Maxwell 3D 的电涡流缓速器理论研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013:28-52.  
LUO Songlin. Theoretical study of the eddy current brake based on Maxwell 3D [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013: 28-52. (In Chinese)
- [12] 应之丁, 陈家敏. 基于电磁场形态调整的涡流制动效能分析 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 436-440.  
YING Zhiding, CHEN Jiamin. Efficiency analysis of eddy current braking based on electromagnetic field shape adjustment [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(3): 436-440. (In Chinese)
- [13] MARCSA D, KUCZMANN M. Nonlinear two-dimensional motional finite element modeling of a rotational eddy current field problem [J]. *Przeład Elektrotechniczny*, 2009, 85(12): 110-113.
- [14] HÖGBERG S, MIJATOVIĆ N, HOLBOLL J, et al. Parametric design optimization of a novel permanent magnet coupling using finite element analysis [C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). New York: IEEE, 2014: 1465-1471.
- [15] LUBIN T, REZZOUG A. Improved 3-D analytical model for axial-flux eddy-current couplings with curvature effects [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(9): 1-9.
- [16] 王洪群, 黄志坚, 谢明辉, 等. 永磁传动技术概述及发展前景 [J]. *中国工程机械学报*, 2016, 14(6): 552-556.  
WANG Hongqun, HUANG Zhijian, XIE Minghui, et al. Summary on advance of permanent magnetic transmission technologies [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2016, 14(6): 552-556. (In Chinese)
- [17] 牛晓博. 基于 ANSYS 的永磁调速器磁场研究[D]. 西安:长安大学, 2013:59-70.  
NIU Xiaobo. Research on the magnetic field of permanent magnet governor based on ANSYS [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013: 59-70. (In Chinese)

## Numerical simulation and test verification of Maxwell disk type permanent magnet damping roller device

MAO Jun WANG Di XIE Miao LI Siyao LIU Yafeng

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** To solve the problems of high-power downstream belt conveyors in large inclination angles, high belt speed conditions which are very prone to flying cars and belt breakage, a kind of disk-type adjustable permanent magnet damping roller device was put forward by adjusting the size of the area of engagement between the permanent magnet and the coil to realize the braking adjustment. The Maxwell software was used to study the transient magnetic density distribution law of the disk-type permanent magnet damping device under stable conditions and the changing law of damping torque by different air gap thicknesses, and the test bench was built for test verification. The results show that with the increase of the air gap thickness, the magnetic density gradually increases, up to 2.1 T. The damping moment increase when air gap thickness is from 1 mm to 2 mm, the damping moment decrease when from 2 mm to 3.5 mm. The research can provide data support for improving and optimizing high-power downstream belt conveyors.

**Key words:** Belt conveyor; Damping roller; Maxwell software; Damping moment; Finite element analysis

Corresponding author: WANG Di, E-mail: 3504686448@qq.com

Fund: General Program of National Natural Science Foundation of China (51774162, 51874158)

Received: 2023-08-11 Revised: 2023-10-15