

文章编号:1006-2343(2025)05-248-06

引力波探测望远镜方位轴 卸荷电磁铁力学性能

郑波^{1,2,3}, 王国民^{1,2,3}, 武亚博^{1,2,3}, 王海^{1,2}, 乐中宇^{1,2}, 谢明轩^{1,2,3}

- (1. 中国科学院 南京天文光学技术研究所, 南京 210042, E-mail:1430417138@qq.com;
2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室, 南京 210042;
3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 为了提高观测质量,通常将天文望远镜安装在高原、南极等大气稀薄、视宁度高的地点,这类地点普遍处于低温环境。同时随着观测要求的提高,天文望远镜的口径越来越大,望远镜的整体质量大幅增加。在极端低温与望远镜自身重量的双重作用下,滚动轴承、液体静压轴承等常用的望远镜方位轴支撑轴承易出现诸如爬行、润滑失效、液压系统故障等问题,影响了望远镜的探测精度。针对上述情况,提出了基于引力波探测望远镜的方位轴电磁悬浮卸荷方案,开展卸荷电磁铁的力学性能测试。首先,根据所使用电磁铁的结构特征,建立了卸荷电磁铁的电磁力理论计算模型,通过Maxwell3D软件对电磁力进行仿真实验,仿真结果显示计算值与仿真值最大偏差仅为3.02%;其次,设计了卸荷电磁铁测试系统,获得了电磁力实测值,分别将电磁力实测值与计算值和仿真值对比,得到最大偏差分别为7.9%和5%,表明该测试装置运行良好,得出的数据准确。研究表明,建立的电磁力理论计算模型准确,可以用于电磁悬浮控制系统的设计。

关键词: 引力波探测望远镜;卸荷;电磁悬浮

中图分类号: TH122;P111 **文献标识码:** A

DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2025.0315

Mechanical Properties of the Unloading Electromagnet for the Azimuth Shaft on the Gravitational Wave Detection Telescope

ZHENG Bo^{1,2,3}, WANG Guomin^{1,2,3}, WU Yabo^{1,2,3}, WANG Hai^{1,2}, YUE Zhongyu^{1,2}, XIE Mingxuan^{1,2,3}

- (1. Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
2. Key Laboratory of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To enhance the observation quality, astronomical telescopes are typically installed at sites such as plateaus and Antarctica, where the atmosphere is thin, and the seeing is favorable. Sites like those are mostly in low-temperature environments. Furthermore, as observation requirements increase, the apertures of the astronomical telescopes are becoming larger, significantly boosting the overall mass of the telescopes. Under the combined influence of extreme low temperature and the huge weight, rolling bearings and hydrostatic bearings commonly used for the telescope azimuth shaft support will encounter problems such as creeping, lubrication failure and hydraulic system failure, which could lower the detection accuracy of the telescopes. In response to these issues, this paper proposes an electromagnetic suspension unloading scheme for the azimuth shaft in the gravitational wave detection telescopes, and mechanical performance tests were conducted. Firstly, based on the structural characteristics of the electromagnet, the theoretical model of the electromagnetic force is established, which is verified by the simulated value obtained through Maxwell3D. The maximum deviation between the calculated value and the simulated value is only 3.02%. Secondly, an unloading electromagnet test system is designed, and the electromagnetic force is measured through it. The maximum deviation of the measured electromagnetic force value compared with the calculated value and the simulated

收稿日期: 2024-10-25

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2203302)

value is 7.9% and 5%, respectively, which indicates that this test device works well and the data obtained is accurate. It is demonstrated that the theoretical calculation model for electromagnetic force is accurate, and can be used for the design of the electromagnetic suspension control systems.

Key words: gravitational wave detection telescope; unloading; electromagnetic suspension

高原、南极等地区海拔高,视宁度好,并且远离城市光污染,是进行天文观测的理想台址^[1]。但这类台址偏远,能源供应困难,并且环境恶劣,处于极端低温条件,望远镜设备维护困难。随着观测需求日益提高,望远镜口径不断增大,对望远镜轴系的支撑性能提出了更为严苛的要求。

在望远镜方位轴支撑轴承的选择上,中小型望远镜多采用滚动轴承支撑,大型望远镜多采用液体静压轴承支撑。滚动轴承需要工作在良好的润滑条件下,润滑脂使用的最低温度一般在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而南极最低温度可达 $-89\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。大口径望远镜重量大,滚动轴承的内、外圈和滚动体间的接触状态、摩擦性能,以及润滑脂性能等在低温和重载的双重作用下会退化,从而降低望远镜的运行质量。因此,大型望远镜不适合用滚动轴承作方位轴的支撑^[2]。液体静压轴承几乎消除了机械摩擦,但须对油泵、油路等装置进行维护,费用较高,而且液压油性能受温度影响很大,必须严格控制工作环境和轴承本身的温度变化^[3],因此在极端低温条件下不宜采用液体静压轴承作为方位轴支撑。克服以上问题是提高望远镜在高原、极地等低温环境下观测质量的重点。

近年来,科研人员把望远镜支撑方案与磁悬浮技术相结合,这种方法在很多项目中得到运用。Angel等^[4]和Klimas等^[5]提出了一种月球液体主镜望远镜(Lunar liquid Mirror Telescope, LLMT),其主镜是由盛放在旋转镜上的反射液旋转形成的抛物面构成,旋转镜采用超导磁悬浮轴承支撑,不需要润滑剂,降低了机械摩擦,提高了旋转镜反射质量。顾伯忠等^[6]等提出采用超导磁悬浮结构作为南极望远镜(South Pole Telescope, SPT)方位轴系支撑的方案,并对该磁悬浮结构进行了三维磁场静态分析,为南极望远镜轴系结构设计提供了新的思路。周彤等^[7]等提出了磁环拼接的不均匀磁化永磁轴承模型,对永磁推力轴承承载能力、波动性等进行了分析计算。该轴承模型具有低功耗、无机械摩擦等优点,适合在南极超低温的环境下使用。在以上研究中,采用磁悬浮技术的突出优势是能降低甚至消除机械摩擦,这与提高望远镜在低温环境下观测质量的要求不谋而合。

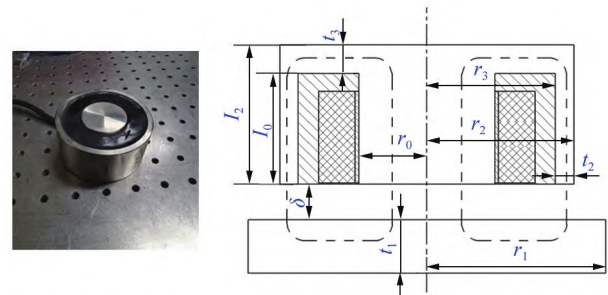
目前多数研究都集中于被动永磁悬浮,这种方案在设计安装之后产生的磁力固定,难以根据望远镜的实际负载和工作环境进行动态调整^[8]。本文提出一种望远镜方位轴电磁悬浮卸荷方案,通过精确控制电磁力大小,能够实时适应望远镜的运动状态,消除因机械摩擦和润滑问题导致的损耗与故障,克服低温影响,可以提高望远镜的跟踪精度和稳定性,实现更为精准的悬浮卸荷。并且结合相应的控制策略,电磁悬浮可以进行精确的闭环控制。相比于被动永磁悬浮,主动电磁悬浮能够表现出更为出色的稳定性和适应性。

1 电磁力计算与仿真

1.1 电磁力理论计算模型的建立

根据电流的磁效应原理,通电线圈会使铁芯磁化,产生

大小随电流强度变化的电磁力。电磁悬浮卸荷实验通过线圈电磁铁产生可控电磁力,实现电磁悬浮卸荷。图1所示是实验使用的线圈电磁铁及其内部结构。



(a) 电磁铁实物图

(b) 电磁铁截面示意图

▲图1 实验电磁铁

电磁力的计算是磁悬浮系统分析与控制的重要环节。在电磁悬浮控制系统的设计中,需要根据电磁力的特性和变化规律来制定相应的控制策略,通过精确控制电磁力,确保系统稳定悬浮。根据麦克斯韦公式^[9]:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: F 为电磁力; B 为磁感应强度; S 为磁极作用面积; μ_0 为空气磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$ 。将磁感应强度用磁通势和磁阻表示,得

$$F = \frac{(NI)^2 S}{2\mu_0 (S_0 R_m)^2} \quad (2)$$

式中: S_0 为电磁铁铁芯截面积; N 为电磁铁线圈匝数; I 为通电电流; R_m 为电磁铁磁路总磁阻; NI 为电流产生的磁通势。

磁路总磁阻由铁芯磁阻 R_0 、气隙磁阻 R_1 和测试件磁阻 R_2 三部分串联组成,铁芯磁阻和衔铁磁阻远远小于气隙磁阻,为了提高电磁力理论计算模型的普遍适用性,忽略铁芯磁阻和衔铁磁阻,则电磁铁磁路总磁阻表示为

$$R_m = R_1 = \frac{\delta}{\mu_0 \pi r_0^2} + \frac{\delta}{\mu_0 2\pi r_2 t_2} \quad (3)$$

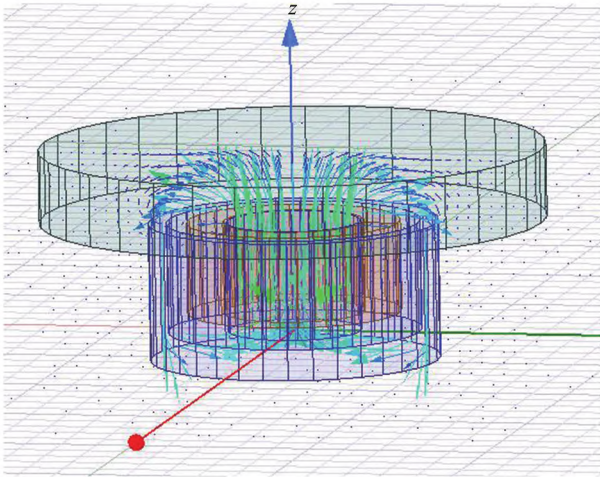
实际应用中,真实的磁场分布往往受到磁极形状、尺寸、材料特性以及周围环境的影响,呈现出复杂的空间分布特性,气隙也会受到加工精度、安装误差、热变形等各种因素的影响而发生微小变化。在电磁悬浮系统的设计与分析时,为了清晰地理解和计算系统中涉及的电磁力,通常会做出一些合理的假设,一般假设气隙均匀一致,磁场分布均匀,不考虑漏磁与边缘效应^[10-11]。由此建立电磁铁的电磁力理论计算模型^[12]:

$$F = \frac{2\mu_0 \pi r_2^2 t_2^2 [r_0^2 + (r_2 - t_2)^2] N^2 I^2}{(r_0^2 + 2r_2 t_2)^2 \cdot \delta^2} \quad (4)$$

1.2 电磁力仿真

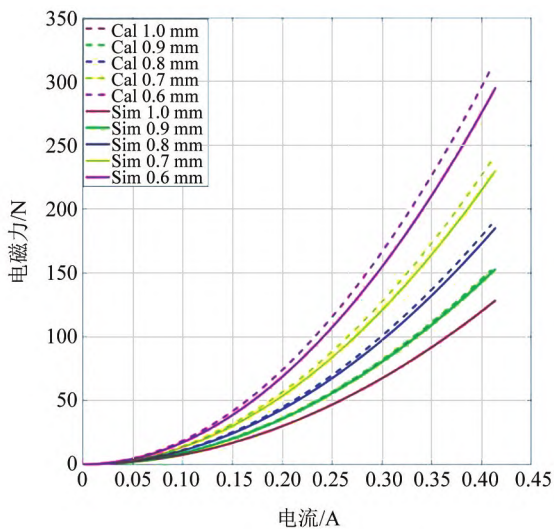
为了验证所建立的电磁力理论计算模型的准确性,对电磁铁的磁力特性进行有限元仿真分析。针对单个电磁铁,运

用电磁场仿真软件 Maxwell3D 来构建精确的电磁模型。通过设定不同的间隙宽度以及输入电流强度,可以模拟出电磁铁在这些变量作用下的电磁力,为后续的实验提供数据基础^[13-14]。图 2 所示为在 Maxwell3D 中建立的电磁铁三维模型及其磁场分布。



▲图 2 电磁铁在 Maxwell3D 中的磁场分布

在 Maxwell3D 仿真测试中,考虑到电磁铁设计的最大允许电流为 0.6 A,为了确保电磁力输出的稳定性和避免因电流过大导致的电磁铁损坏,将仿真最大电流设定为 0.41 A,电流变化设置为 0 A ~ 0.41 A;同时为了考察电磁铁在不同间隙条件下的磁力特性,设置间隙变化范围为 0.6 mm ~ 1.0 mm。通过仿真,获得了电磁铁在不同电流和间隙组合下的电磁力数据。仿真数据与基于理论计算得出的结果进行对比,对比情况如图 3 所示。



▲图 3 Maxwell3D 电磁力仿真结果对比

从图中可以看出,计算值和仿真值在整体趋势上保持了良好的一致性,但在某些特定条件下,如电流接近上限或间隙较小时,仿真结果与理论计算之间存在一定的偏差。间隙较大时计算值和仿真值拟合较好,随着间隙的减小,计算值与仿真值偏差开始增大,这是由于理论计算模型是在理想情况下建立的,不考虑磁饱和与间隙误差等因素对磁场分布产

生的影响,而仿真值是更接近实际情况的值;并且气隙减小会使磁路磁阻减小,电磁铁的磁芯不是理想材料,会导致电流较大时出现饱和现象,使仿真值小于计算值。计算值与仿真值在各间隙下的最大偏差如表 1 所示,两者之间最大偏差为 3.02%,表明了所建立电磁铁的电磁力理论计算模型的正确性,可以采用所建立的电磁力计算模型推得不同的间隙、电流值对应的电磁力值。

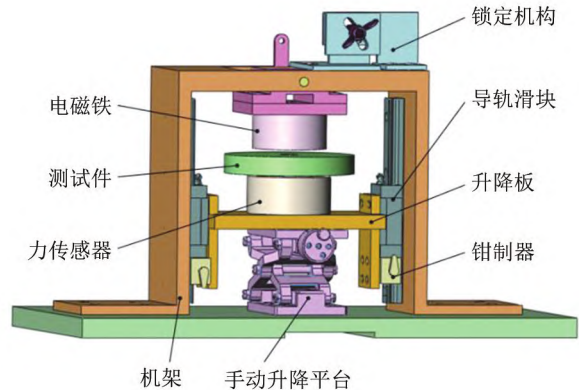
表 1 计算值与仿真值对比
不同间隙偏差最大值

间隙 δ /mm	最大偏差/%
1.0	0.16
0.9	0.26
0.8	0.43
0.7	1.66
0.6	3.02

2 电磁力测试机构建模

2.1 设计要求

根据麦克斯韦公式,电磁铁的力学性能主要与间隙和电流相关,为了便于测试电磁铁的力学性能,需要设计一种间隙可调,结构稳定的电磁力测试机构,该机构应该满足以下要求:结构简单、易操作,可以精密调节间隙,调节精度能达到 0.01 mm;刚度高,在磁力作用下不易变形;力传感器布置合理,以减少外部因素造成的测量误差。针对以上要求,设计了一种电磁力测试机构,如图 4 所示。



▲图 4 电磁力测试机构

2.2 模块组成及功能

该机构主要包括机架、力传感器、电磁铁、锁定机构,以及由两组导轨滑块、升降板、钳制器和手动升降台组成的升降机构。锁定机构用于固定电磁铁,使电磁铁端面 and 测试件端面保持平行;手动升降机构调节气隙厚度,可以实现极小位移的调整,适应电磁力测试的小间隙、高精度的要求;钳制器用于固定移动台,使调整好的实验间隙保持固定,防止电磁铁产生的磁力将测试件向上吸引,导致测试件与磁铁碰撞。

电磁力测试机构的整体布局在一条纵向分布的轴线上,这种布局带来机构受力均匀的优点,即力传感器只受到沿轴线的拉力,不产生附加力矩,提高了力传感器的测量准确性。

3 实验测试

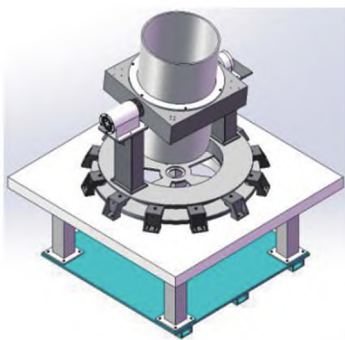
3.1 实验目的

电磁悬浮控制系统设计的关键在于精确控制电磁力,上文根据所使用电磁铁的结构特征,建立了电磁铁的电磁力理论计算模型,并通过有限元仿真对该模型的准确性进行了初

步验证。然而电磁铁的实际磁力性能还会受到如设备加工精度、人为误差等客观因素的影响。进行电磁力实测实验,可以进一步验证所建立的电磁力理论计算模型的准确性。

3.2 实验内容

电磁悬浮卸荷实验采用12组电磁铁,均布安装在基于引力波探测望远镜设计的电磁悬浮卸荷实验平台的方位轴转台上,通过电磁力吸引方位轴,实现卸荷并达到减少摩擦的作用,示意图如图5所示。



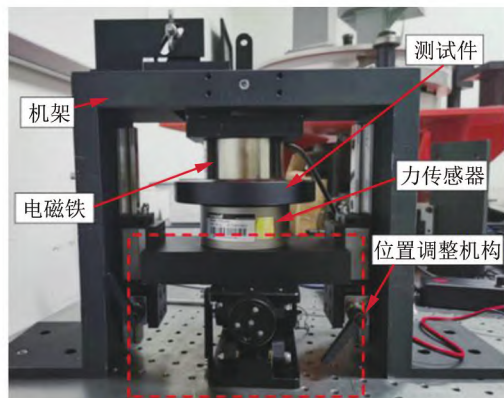
▲图5 电磁悬浮卸荷安装示意图

实验根据建立的三维模型加工出电磁铁测

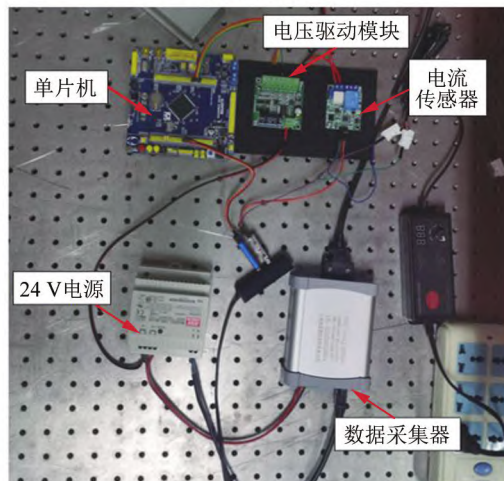
试系统,并设计相应硬件控制电路,对电磁铁在不同间隙,不同电流下的电磁力值进行测试。实验测试的间隙包括1.0 mm、0.9 mm、0.8 mm、0.7 mm和0.6 mm五个间隙值。在不同间隙下,控制电压输出值,使电磁铁电流变化范围设定为0 A~0.41 A,从而得到电磁铁的实际磁力特性曲线。

3.3 实验设备与流程

根据所设计模型加工的电磁力测试系统如图6所示,该



(a) 电磁力测试机构



(b) 采集控制电路

▲图6 电磁力测试系统

测试系统包括电磁力测试机构和采集控制电路,用于测试电磁铁在不同间隙,以及不同电流作用下的实际电磁力。整个望远镜方位轴需要用12组电磁铁进行卸荷,所以实验对12组电磁铁的力学性能均进行测试。电磁力测试机构如图6(a)所示,其主要包括机架、位置调整机构、力传感器等。采集控制电路如图6(b)所示,其组成包括单片机、电压驱动模块、电流传感器、数据采集器以及上位机。

该测试系统可通过位置调整机构调节电磁铁与测试件之间的间隙,调节范围为0.6 mm~1.0 mm,间隙值采用50分度立式游标卡尺测量;通过单片机编程控制I/O口输出PWM信号,PWM信号的占空比为0%~100%,控制电源驱动模块输出0 V~24 V电压;最后上位机通过力传感器与电流传感器实时读取电磁力值与电流值。

3.4 实验数据采集

实验测试了12组电磁铁的磁力特性曲线,各电磁铁磁力特性曲线基本一致,产生的电磁力近似和电流的平方成正比,和间隙的平方成反比,符合麦克斯韦公式。各电磁铁在不同间隙下的磁力特性曲线如图7所示。

测试结果表明,在间隙较大时,实测数据与计算值和仿真值有较好的拟合度。随着间隙的减小,实测数据与前两者的偏差开始增大。虽然仿真值和实测值都是考虑磁饱和效应、边缘效应、磁场分布等现实因素得到的结果,但实测数据还会受到实验环境、设备条件、人为误差等的影响,会与仿真值存在一定偏差。

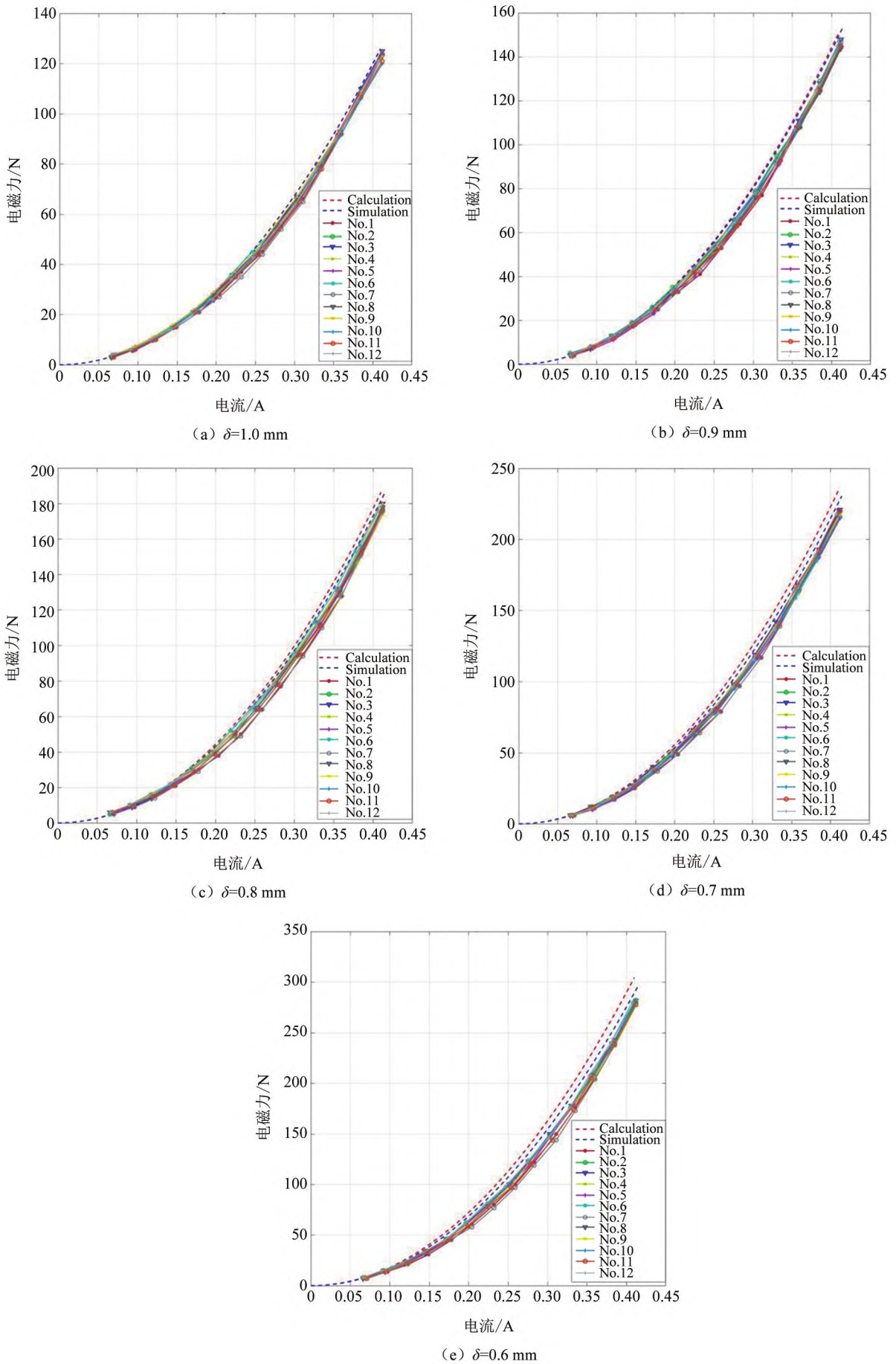
4 测试数据误差分析

对实测数据偏差进行定量分析,偏差主要来源于电流传感器偏差、间隙偏差、测试件与电磁铁对中偏差、力传感器偏差:(1)电流传感器检测误差为 ± 0.001 A;(2)间隙测量采用50分度游标卡尺实现,使用时通过估读获得测量值,实际测量精度为0.01 mm;(3)用对准块对中测试件与电磁铁,对准块同轴度公差为 $\phi 0.025$ mm;(4)力传感器检测误差为 ± 2 N。

实验共测试了1.0 mm、0.9 mm、0.8 mm、0.7 mm和0.6 mm五个间隙下的电磁力值。由上文测试结果可知,电磁铁的电磁力在电流较大,并且间隙较小的情况下误差较大,所以选取各电磁铁在不同间隙下,电流取最大值0.407 A时的电磁力进行误差分析。对实验数据进行统计分析,计算各间隙下电磁力值的均值和方差,统计数据如表2所示。

从表2得出,在电流最大时,间隙越小,实验数据均方根误差越大,数据波动越大,这一结果与理论情况相吻合。电流取最大值0.407 A,间隙取0.6 mm时,仿真电磁力 $F = 286.31$ N。表3为Maxwell3D仿真得到的不同偏差作用下的电磁力值,表中“+”符号表示电流正偏差、间隙正偏差或中对中偏差最大;“-”符号电流负偏差、间隙负偏差或无对中偏差。

在测量值上叠加力传感器检测误差,得到数值误差范围为275.5 N~294.68 N。由分析结果可以看出,间隙偏差是影响电磁力的主要因素,并且在最小实验间隙下测得的电磁力均在误差范围内,实验数据可靠。计算12组电磁铁在不同间隙下的实测电磁力平均值,在最大电流下计算电磁力平均值与计算值和仿真值的最大偏差,结果如表4所示。



▲图 7 电磁铁磁力特性曲线

表 2 实验统计数据

统计量	间隙 δ				
	1 mm	0.9 mm	0.8 mm	0.7 mm	0.6 mm
均值/N	122.5	145.17	176.92	218.08	280.58
方差/N ²	5.567 8	5.802 3	6.075 9	6.396 6	6.994 0

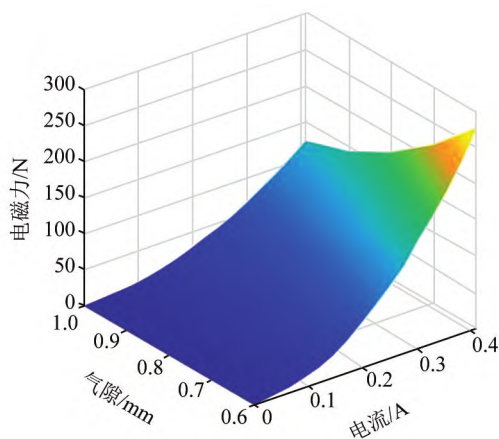
表 3 不同偏差作用下的电磁力仿真值

电流偏差	偏差变量		电磁力/N
	间隙偏差	对中偏差	
-	-	-	292.68
-	-	+	292.60
-	+	-	277.56
-	+	+	277.50
+	-	-	295.58
+	-	+	295.50
+	+	-	280.31
+	+	+	280.25

表 4 偏差统计

间隙 δ /mm	与计算值相比得到的最大偏差/%	与仿真值相比得到的最大偏差/%
1.0	2.4	2.25
0.9	4.68	4.24
0.8	5.08	5.3
0.7	7	5.43
0.6	7.9	5

分析实验数据得出,实测电磁力平均值与计算值之间的最大偏差为 7.9%,与仿真值之间的最大偏差为 5%,偏差在允许范围之内,验证了实验数据的准确性和可靠性。基于实测数据绘制了三维网格图如图 8 所示,从图中可以直观地得出电磁铁的电磁力与间隙和电流之间的关系。



▲图 8 磁力三维网格图

5 结论

引力波探测望远镜可能安装在高原和南极等地区,低温环境下会造成润滑失效,导致低速爬行等问题,对此文章提出了望远镜方位轴电磁悬浮卸荷方案。建立了所选用电磁

铁的电磁力理论计算模型,在有限元软件中对电磁铁电磁力进行仿真,并且设计了电磁力测试系统,进行电磁力实测,所得结论如下:

(1) 推导的电磁力理论计算式是基于所使用的电磁铁实物得到的,与有限元软件仿真结果对比,计算值的最大偏差仅为 3.02%,两者有较好的拟合度,表明了推导的电磁力理论计算式的准确性。

(2) 设计了一种电磁铁电磁力测试系统,用于测试电磁铁磁力特性。测试系统采用纵向分布结构安装传感器与电磁铁,避免了横向安装下由于重力产生的附加力矩对传感器测试精度的影响。实测电磁力平均值相对于计算值的最大偏差为 7.9%,相对于仿真值的最大偏差为 5%,结果在合理范围内。

(3) 分析了偏差产生原因,对计算值、仿真值和测量值三者进行了对比,验证了使用该测试系统测得的电磁力值的正确性,为后续实验提供了数据支持。

参考文献

- [1] 商朝晖, 胡义. 南极冰穹 A 的天文台址测量进展[J]. 极地研究, 2024, 36(1): 1-11.
- [2] 王槐, 代霜. 大型望远镜轴系支撑结构的发展现状与分析[J]. 光机电子信息, 2011, 28(3): 17-26.
- [3] 胡企千. 望远镜技术与天文测天[M]. 南京: 东南大学出版社, 2014.
- [4] ANGEL R, EISENSTEIN D, SIVANANDAM S, et al. A lunar liquid mirror telescope (LLMT) for deep-field infrared observations near the lunar pole[C] // Proceedings of SPIE: Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter, May 24-31, 2006. SPIE, 2006, 6265: 62651U.
- [5] KLIMAS P, ARNAUD M, MURRAY S S, et al. Lunar liquid mirror telescope: structural concepts[C] // Proceedings of SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray, June 27-July 2, 2010, San Diego, California, United States. SPIE, 2010, 7732: 77322U.
- [6] 顾伯忠, 张向国. 超导磁悬浮技术在南极望远镜中的应用[J]. 天文研究与技术, 2008, 5(3): 299-306.
- [7] 周彤, 王国民, 张志永, 等. 拼接永磁支承的优化设计[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(1): 55-58.
- [8] 赵川, 孙凤, 裴文哲, 等. 永磁悬浮技术的实现机理与发展现状[J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 189-207.
- [9] 赵韩, 杨志轶, 王忠臣. 磁力轴承电磁力计算的两种建模方法与比较[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4): 84-87.
- [10] 贺湘琰. 电器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [11] 张冠生. 电磁铁与自动电磁元件[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [12] ZHENG B, WANG G, WU Y, et al. Calculation and simulation of electromagnetic unloading force for gravitational wave detection telescope[C] // Proceedings of SPIE: Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation VI, June 16-22, 2024, Yokohama, Japan. SPIE, 2024, 13100: 13100F.

(下转第 261 页)

控制效果,其中红色实线为参考轨迹,蓝色实线为传统 MPC 控制器跟踪曲线,黑色实线为加入模糊神经网络的 MPC 控制器跟踪曲线。由图可知,随着道路曲率的变化,所设计的控制器跟踪效果良好。在经典双移线道路工况中,加入模糊神经网络的控制器能良好跟踪参考轨迹,且跟踪误差相比于传统 MPC 控制器更小。

由图 10(c)可知,车辆在行驶过程中,行驶轨迹较为平滑,前轮转角变化范围在 $-0.05 \text{ rad} \sim 0.05 \text{ rad}$,且加入 FNN 控制后的前轮转角波动更小;图 10(d)中质心侧偏角变化范围在 $-0.2 \text{ rad} \sim 0.2 \text{ rad}$,相较于传统 MPC 控制,引入 FNN 控制后,质心侧偏角更加稳定,并且在较长时间内保持较小的波动幅度,这证明了本文提出的方法在稳定性方面更加优越。为体现本文控制方法的适用性,对大曲率和小曲率道路进行仿真实验。

由图 11(b)~图 11(d)可知,当道路曲率突然发生变化对前轮转角和质心侧偏角的变化影响较大,但加入 FNN 控制后的两者数值波动更小,当曲率连续变化时,两者的数值变化更加平滑,车辆的稳定性更优。

由图 12(a)可知,随着道路曲率连续变化,传统 MPC 控制跟踪误差逐渐增大,加入 FNN 控制后仍能保持良好跟踪效果。由图 12(c)~图 12(d)可知,加入 FNN 控制后的前轮转角和质心侧偏角的波动更小,跟踪控制效果更优。

4 结论

(1) 针对连续变化曲率的变道超车问题,基于模型预测控制提出一种加入模糊神经网络的控制方法。基于考虑道路曲率的三自由度动力学模型,模型预测控制器能够实现车辆转向换道控制。

(2) 在动力学模型的基础上,将 FNN 结合模型预测控制方法构建了路径跟踪统一模型,使车辆在不同道路曲率下实现稳定性控制。

(3) 论文提出的避障控制方法,经过典型双移线、大小曲率工况模拟验证,能够实现安全、稳定的控制,且稳定性更好。

参考文献

- [1] 张雷,赵宪华,王震坡. 四轮轮毂电机独立驱动电动汽车轨迹跟踪与横摆稳定性协调控制研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(11): 1513-1521.
- [2] 杜荣华,胡鸿飞,高凯,等. 基于变预测时域 MPC 的自动驾驶
- [13] INOUE S, FUJIMOTO Y. PM magnetic levitation train using hybrid electromagnetic-and electrodynamic-suspension system[C] // 2022 International Power Electronics Conference, May 15-19, 2022, Himeji, Japan. IEEE, 2022: 415-421.
- [14] MING-HUA Z, SHAO-KE L. Electromagnetic characteristic study

汽车轨迹跟踪控制研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 275-288.

- [3] 张涌,夏雨,成海飞,等. 智能车辆路径跟踪横向控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(7): 53-61.
- [4] 杨博,张缓缓,江忠顺. 智能车辆的避障路径规划与跟踪控制仿真分析[J]. 中国测试, 2021, 47(7): 71-78.
- [5] 刘鹏,贾寒冰,张雷,等. 结构化道路下智能汽车自主换道轨迹规划研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 271-281.
- [6] 刘平,刘自斌,杨明亮,等. 考虑道路曲率的多约束高速无人驾驶汽车横向跟踪控制方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 120-134.
- [7] KALEEMULLAH M, FARIS F W. Optimisation of robust and LQR control parameters for discrete car model using genetic algorithm[J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2022, 16(1): 40-63.
- [8] GUO R, SUN Z, LUO M. Energy-efficient battery thermal management strategy for range extended electric vehicles based on model predictive control and dynamic programming[J]. Energy, 2024, 307: 132769.
- [9] 赵树恩,王盛,冷姚. 智能汽车轨迹跟踪多目标显式模型预测控制[J]. 汽车工程, 2024, 46(5): 784-794.
- [10] 李胜琴,邢佳祁. 基于模型预测和转角补偿的智能汽车换道轨迹跟踪控制算法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 249-256.
- [11] 史培龙,王彩瑞,马强,等. 考虑轨迹预测的大曲率道路智能车辆动态避障控制[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(4): 161-174.
- [12] SHI J R, SUN D Y, QIN D T, et al. Planning the trajectory of an autonomous wheel loader and tracking its trajectory via adaptive model predictive control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 131(2): 103570.
- [13] 石振新,冯剑波,王衍学. 基于 ANFIS 及 MPC 的车辆转向换道控制系统设计[J]. 现代制造工程, 2022(2): 70-78.
- [14] 张志勇,龙凯,杜荣华,等. 自动驾驶汽车高速超车轨迹跟踪协调控制[J]. 汽车工程, 2021, 43(7): 995-1004.
- [15] 孔慧芳,朱文祥,张倩. 考虑道路曲率的智能车辆路径跟踪模型预测控制[J/OL]. 机械科学与技术[2025-07-08]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230303>.

作者简介:袁凌聪(1999—),男,硕士研究生;主要研究方向为新能源与智能车辆,已发表论文3篇。

of mixed suspension electromagnets based on Maxwell[J]. Small & Special Electrical Machines, 2009, 37(12): 13-15.

作者简介:郑波(1999—),男,硕士研究生;主要研究方向为电磁悬浮,已发表论文1篇。

(上接第 253 页)