

基于磁流变柔性辅助支撑装置设计及磁路仿真

赵学峰^{1*}, 徐裕超¹, 缪崇锦²

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²江苏科技大学张家港校区, 江苏 苏州

收稿日期: 2023年3月13日; 录用日期: 2023年5月11日; 发布日期: 2023年5月18日

摘要

在制造业中提高复杂零件的加工精度和工件表面质量一直是技术难题。设计了一种磁流变弹性体辅助支撑装置, 该装置能够支撑直径在一定范围内的薄壁套筒零件。使用有限元方法模拟仿真装置中各零件的材料属性、工件厚度、间隙大小以及电流大小等因素对装置工作间隙处磁场的影响, 并进行实验验证。基于研究结果, 设计合适的参数, 磁路仿真表明该装置满足设计要求。最后结合仿真结果用MATLAB对电流与磁感应强度之间的数据关系进行拟合, 得到磁感应强度关于电流的三次函数, 为进一步研究磁流变弹性体(Magnetorheological elastomers, MRE)辅助支撑动力学建模奠定了基础。

关键词

磁流变弹性体, 弱刚度零件, 磁场仿真, 柔性辅助支撑, 磁感应强度

Design and Magnetic Circuit Simulation of a Flexible Support Device Based on Magnetorheology

Xuefeng Zhao^{1*}, Yuchao Xu¹, Chongjin Miao²

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Zhangjiagang Campus of Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu

Received: Mar. 13th, 2023; accepted: May 11th, 2023; published: May 18th, 2023

Abstract

It is always a difficult technical problem to improve the machining accuracy and surface quality of

*第一作者。

complex parts in manufacturing industry. In this paper, a magnetorheological elastomer auxiliary support device is designed to support thin-wall sleeve parts. In order to study the performance of the device, the finite element method is used to simulate the influence of material properties, workpiece thickness, gap size and current size of each part of the simulation device on the magnetic field at the working gap of the device, and the experimental verification is carried out. Based on the research results, the appropriate parameters are designed, and the magnetic circuit simulation shows that the device meets the design requirements. Finally, combining with the simulation results, MATLAB is used to fit the data relationship between current and magnetic induction, and the cubic function of magnetic induction about current is obtained, which lays a foundation for further study of magnetorheological elastomers (MRE) auxiliary support dynamics modeling.

Keywords

Magnetorheological Elastomer, Weak Stiffness Parts, Magnetic Field Simulation, Flexible Auxiliary Support, Magnetic Induction Intensity

Copyright © 2023 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

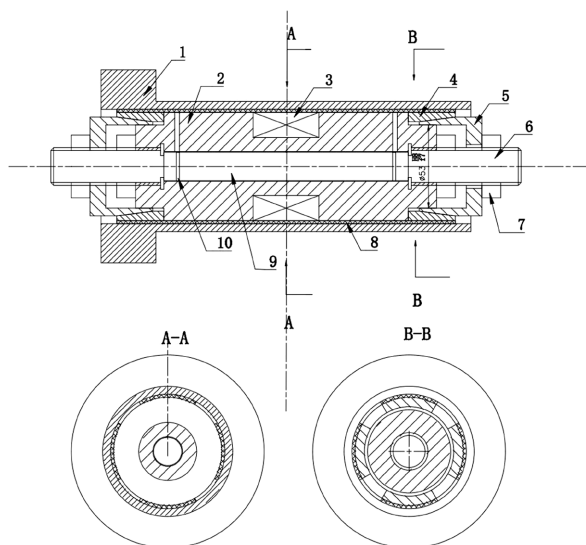
弱刚度工件广泛应用于航天、造船、汽车和模具等领域中，但由于其刚度低、形状不规则、难以加工等一直是研究难点。为此，许多学者对弱刚度工件的加工过程进行精细优化，使工件的刚度增大、振动减小，提高加工精度，其中大多是对机床控制系统进行的改造。汪征宇[1]改造了机械臂加工控制系统，完成了对薄壁工件的加工，但其加工效率低、灵活性差，成本也较高。张宝荣等[2]研究变壁厚弱刚度零件加工变形，通过对切削刀具的设计及其参数优化得到最佳加工参数，最终解决了变壁厚弱刚度工件加工中的问题。此外在提高弱刚度工件刚度的问题上，张智森和戴延丰[3]利用有限元仿真软件对工件变形机制进行分析，设计了相应的夹具装置，该夹具安装方便、操作简单，明显提高了弱刚度零件的加工精度。杨中宝等[4]设计的薄壁件内撑自平衡柔性夹具，在一定范围内可适用于不同内径、不同长度的产品，并具有可自动平衡两端内撑力的功能。毋健雄[5]利用磁流变励磁固化特性对薄壁件加工进行振动抑制，设计了基于磁流变液的柔性夹具，该夹具对铣削过程中产生的振动明显具有抑制作用。张永亮等[6]设计了一种用于加工复杂薄壁零件的辅助支撑装置，并进行了力学性能测试。马佳伟等人[7]设计了半自动磁流变弹性体减振器，经实验表明，该减振器利用合适的控制方法，在不同的激励形式下起到很好的减振作用。李清云[8]利用 MRE 设计了舰船推进轴系纵振吸振器，经实验表明 MRE 不仅具有良好的剪切特性，而且具备橡胶的特性优点，克服了磁流变液(MRF)易沉降、易活跃等缺点；FU Jie 等[9]对基于磁流变的柔性夹具进行了结构仿真及各性能测试，研究了线圈匝数、电流对磁场强度的影响，并对固化后的 MRF 在挤压前后所产生的剪切应力进行了分析。

对于弱刚度工件的加工，本文通过在弱刚度区域增加磁流变弹性体辅助支撑的方式增加系统的刚度并抑制工件的加工变形，要增加系统的刚度，装置的磁场强度是研究关键[10]。为了得到足够的磁感应强度，需要合理的结构设计及选择合适的材料，来使工件与辅助支撑部件之间产生足够的支撑力。本文将利用 Comsol 软件对 MRE 柔性辅助支撑装置内的磁场分布进行仿真分析及试验测试，为确定该装置的最佳结构参数奠定基础。

2. MRE 辅助支撑装置设计及工作原理

本文设计的弱刚度工件加工辅助支撑装置利用了特殊的智能材料—磁流变弹性体，将磁流变弹性体均匀分为四块放置于工件内壁并与楔形块相接触，用以固定支撑套筒。另外，楔形块、楔形柱、螺母、螺柱用于胀紧弹性体，使其贴于工件表面。磁场的大小可通过更换不同类型的电池进行调节。线圈中有电流时，产生的磁场使外部的 MRE 刚度增大从而为弱刚度工件提供支撑力，抑制工件振动幅值，提高工件加工质量。

图 1 为磁流变弹性体辅助支撑装配结构图。



1-工件；2-芯轴；3-线圈；4-楔形块；5-楔形柱；6-螺柱；7-螺母；8-磁流变弹性体；9-电池；10-绝缘垫片。

Figure 1. Structure diagram of MR elastomer auxiliary support assembly

图 1. 磁流变弹性体辅助支撑装配结构图

3. 不同参数下磁流变辅助支撑装置的磁场分析

3.1. 建立仿真模型

本文通过 Pro/Engineer 软件对磁流变弹性体辅助支撑进行三维建模，将其导入 Comsol 中进行磁场仿真。下面是网格划分情况：网格类型采用自由四面体，其中网格大小最大单元尺寸为 31.8 mm，最小单元尺寸为 5.72 mm，最大单元增长率为 1.5，曲率因子 0.6，狭窄区域分辨率为 0.5，求解自由度数 17,108，如图 2 所示。

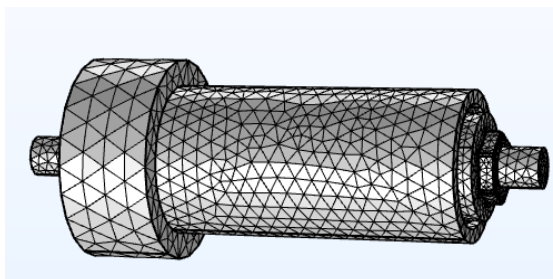


Figure 2. Meshing model of magnetorheological elastomer auxiliary support device

图 2. 磁流变弹性体辅助支撑装置的网格划分模型

为了得到足够的磁感应强度，需要设计合理的结构并选择合适的材料使工件与辅助支撑部件之间产生足够的支撑力。为此，本文对不同参数下装置内的磁感应强度进行了三维仿真分析，并分析了各参数对磁感应强度的影响规律。

3.2. 不同参数下对磁感应强度的仿真与分析

3.2.1. 芯轴磁导率的影响

芯轴是磁流变弹性体辅助支撑装置的关键零件之一，它对线圈产生磁场起着重要的作用。本文就不同芯轴材料对磁流变弹性体辅助支撑工作间隙处的磁感应强度的影响进行磁场仿真，不同芯轴材料的磁导率如表 1 所示。

Table 1. The permeability of different mandrel materials

表 1. 不同芯轴材料的磁导率

材料	铝	铁镍铝合金	45#钢	电工纯铁
磁导率	1	40	400	4000

不同磁导率的芯轴，工作间隙处的磁感应强度曲线如图 3 所示。

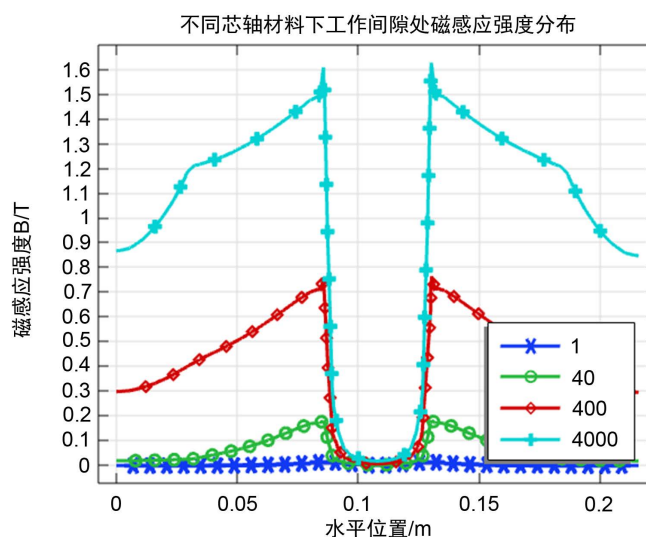


Figure 3. Magnetic induction intensity distribution curve at working gap of different mandrel materials

图 3. 不同芯轴材料工作间隙处磁感应强度分布曲线

由图 3 可知，磁导率为 4000 时芯轴与工件之间工作间隙处的磁感应强度约是磁导率为 400 时的 2.19 倍，是磁导率为 40 时的 7.94 倍，是磁导率为 1 时的 97.33 倍。从总体来看，磁流变弹性体辅助支撑装置工作间隙处的磁感应强度随芯轴磁导率的增大而增大，所以芯轴材料的选择对工作间隙处的磁感应强度的影响具有关键作用。因此，本文选择磁导率最大的电工纯铁作为芯轴材料。

3.2.2. 工件磁导率的影响

本文对磁流变弹性体辅助支撑装置在不同磁导率工件情况下进行磁场仿真，并对磁流变弹性体工作间隙处的磁感应强度进行分析，不同工件材料的磁导率如表 2 所示。

不同磁导率工件，工作间隙处的磁感应强度分布情况如图 4 所示。

Table 2. Permeability of different workpiece materials
表 2. 不同工件材料磁导率

材料	铝	铁镍钼合金	45#钢	电工纯铁
磁导率	1	40	400	4000

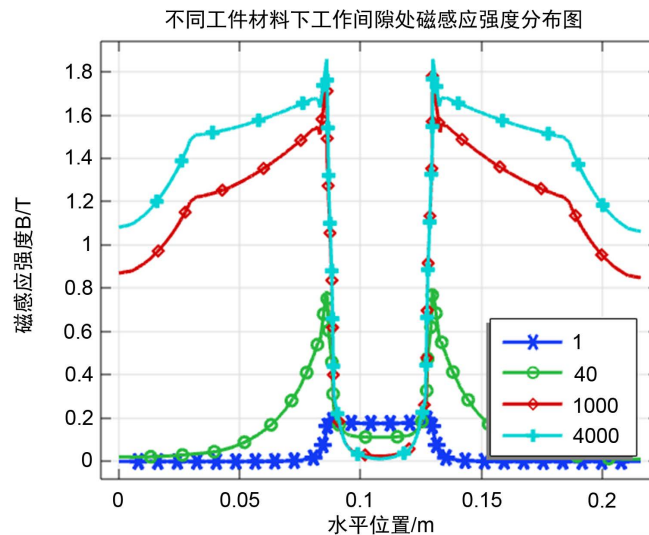


Figure 4. Magnetic induction intensity distribution at different workpieces' working gaps
图 4. 不同工件工作间隙处磁感应强度分布情况

由图 4 可知，工件为电工纯铁时，磁流变弹性体辅助支撑装置工作间隙处的最大磁感应强度是工件为铝时的 2.01 倍，是工件为铁镍钼合金的 2.13 倍，是工件为 45#钢的 1.18 倍。以上分析表明，磁流变弹性体工作间隙处的磁感应强度主要随工件磁导率的增大而增大，当达到一定的磁导率时，磁感应强度将处于饱和状态。由于 45#钢容易获得、成本较低，并根据磁感应强度分布值可得，选用磁导率为 1000 的 45#钢作为工件材料比较合适。

3.2.3. 工件厚度的影响

在加工不同厚度的工件时，其工作间隙处的磁感应强度也会不同。本文对不同工件厚度的情况下磁流变弹性体辅助支撑装置进行磁场仿真，并绘制其工作间隙处的磁感应强度曲线图。不同的工件厚度如表 3 所示。

Table 3. Different workpiece thickness values
表 3. 不同工件厚度值

组号	1	2	3	4
厚度	0.5 mm	2 mm	4 mm	8 mm

不同工件厚度，工作间隙处的磁感应强度分布情况如图 5 所示。

由图 5 可知，在其它条件不变的情况下，工件厚度为 8 毫米时在芯轴及胀紧零件处工作间隙的磁感应强度是工件厚度为 4 毫米时的 1.33 倍，是工件厚度为 2 毫米时的 2.30 倍，是工件厚度为 0.5 时的 18.40 倍。总体上来说，工件厚度越大磁感应强度越大，工件厚度太小将会影响工作间隙处的磁感应强度。因此本文选择的工件厚度应大于 2 毫米。

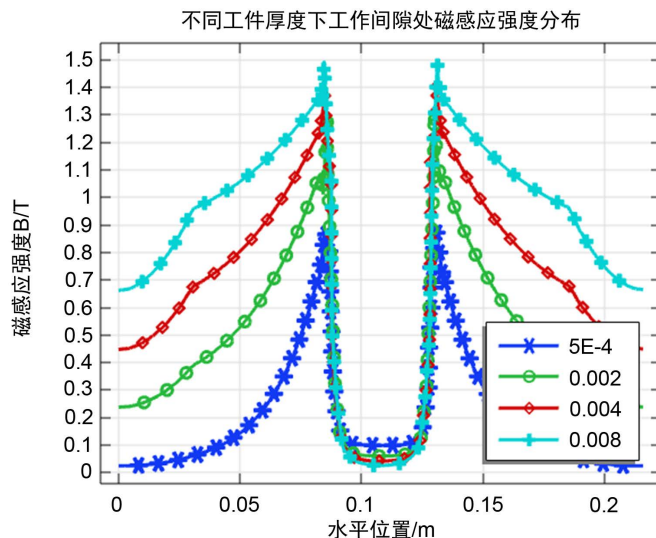


Figure 5. Magnetic induction intensity distribution at working gaps with different workpiece thicknesses
图 5. 不同工件厚度下工作间隙处磁感应强度分布情况

3.2.4. 工作间隙大小的影响

工作间隙的大小对工作间隙处磁感应强度的大小也有着一定影响，本文在不同大小的工作间隙下对磁流变弹性体辅助支撑装置进行磁场仿真。不同工作间隙大小值如表 4 所示。

Table 4. Working gap size value

表 4. 工作间隙大小值

组号	1	2	3	4
工作间隙	0.5 mm	2 mm	4 mm	8 mm

不同工作间隙大小，工作间隙处的磁感应强度分布情况如图 6 所示。

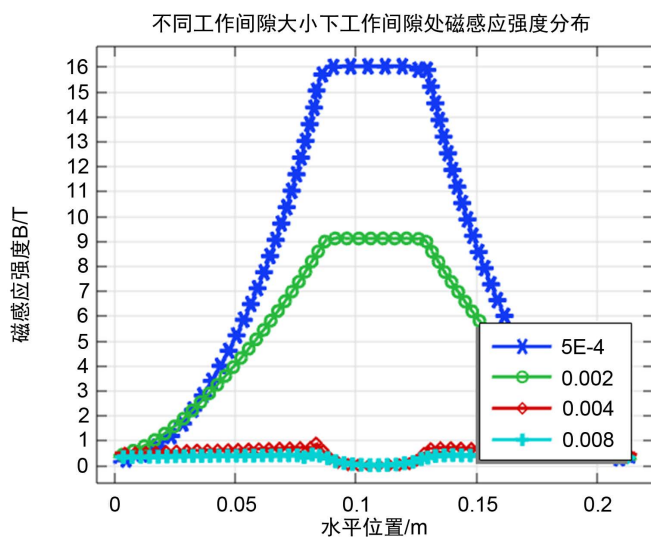


Figure 6. Magnetic induction intensity distribution at working gap under different working gap sizes
图 6. 不同工作间隙大小下工作间隙处磁感应强度分布情况

由图 6 可知, 在其它条件不变的情况下, 工作间隙为 0.5 毫米时工作间隙处的磁感应强度是工作间隙为 2 毫米时的 1.77 倍, 是工作间隙为 4 毫米和 8 毫米时的 32 倍。

经上述仿真结果及分析表明: 工作间隙越大时工作间隙处的磁感应强度越小, 当大于 3 毫米时工作间隙处的磁感应强度基本一致, 都很小; 当小于 3 毫米时, 工作间隙越小工作间隙处的磁感应强度变大越明显; 当小于 3 毫米时, 工作间隙处的磁感应强度值最大部分位于线圈外围处, 向两端处的磁感应强度逐渐降低。虽然工作间隙越小工作间隙处的磁感应强度越大, 但由于磁流变弹性体位于工作间隙处, 太薄的磁流变弹性体制备比较困难, 因此本文选择制备 2 毫米左右的磁流变弹性体, 工作间隙大小选择 2 毫米。

3.2.5. 电流大小的影响

本文设计的磁源方式是在磁导率较大的芯轴上缠绕线圈, 使其产生较大的磁场来满足实验要求, 线圈中的电流大小是影响磁场强度大小的重要因素之一。因此需要对不同电流大小下的磁流变弹性体辅助支撑装置进行磁场仿真, 研究工作间隙处的磁场分布情况。不同的电流值如表 5 所示。

Table 5. Current value

表 5. 电流值

组号	1	2	3	4
电流	1 A	2 A	3 A	4 A

不同大小的电流, 工作间隙处的磁感应强度分布情况如图 7 所示。

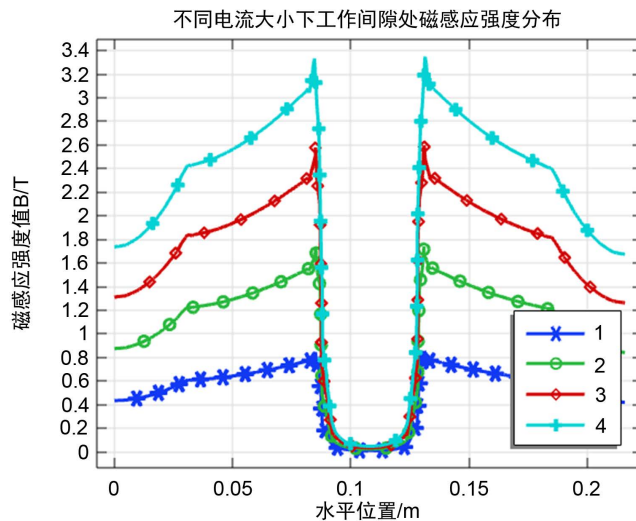


Figure 7. Magnetic induction intensity distribution at working gap under different current sizes

图 7. 不同电流大小下工作间隙处磁感应强度分布情况

由图 7 可知, 线圈中电流大小为 4 A 时的磁感应强度是电流为 3 A 时的 1.33 倍, 是电流为 2 A 时的 1.98 倍, 是电流为 1 A 时的 4.00 倍。上述仿真结果及分析表明, 工作间隙处的磁感应强度随电流增大而增大, 此外电流的选择还应综合考虑能耗等客观条件, 以达到最佳技术效果。

4. 参数优化后装置的磁场仿真

根据各参数仿真结果, 通过对比后选出最合适的参数作为最终确定参数, 如表 6 所示。通过仿真软

件设置相应的参数进行磁场仿真,得到磁流变弹性体辅助支撑装置工作间隙处截面磁感应强度分布云图,如图8所示,并绘制该轴向截面工作间隙处的磁感应强度分布曲线图,如图9所示。由图9可知,芯轴及胀紧零件外围的工作间隙处的磁感应强度最小可达0.83 T,最大可达1.62 T,满足车削弱刚度套筒工件提供辅助支撑要求。

Table 6. Parameter value table

表 6. 各参数取值表

芯轴	工件	工件厚度	工作间隙	电流
电工纯铁	45#钢	8 mm	2 mm	2 A

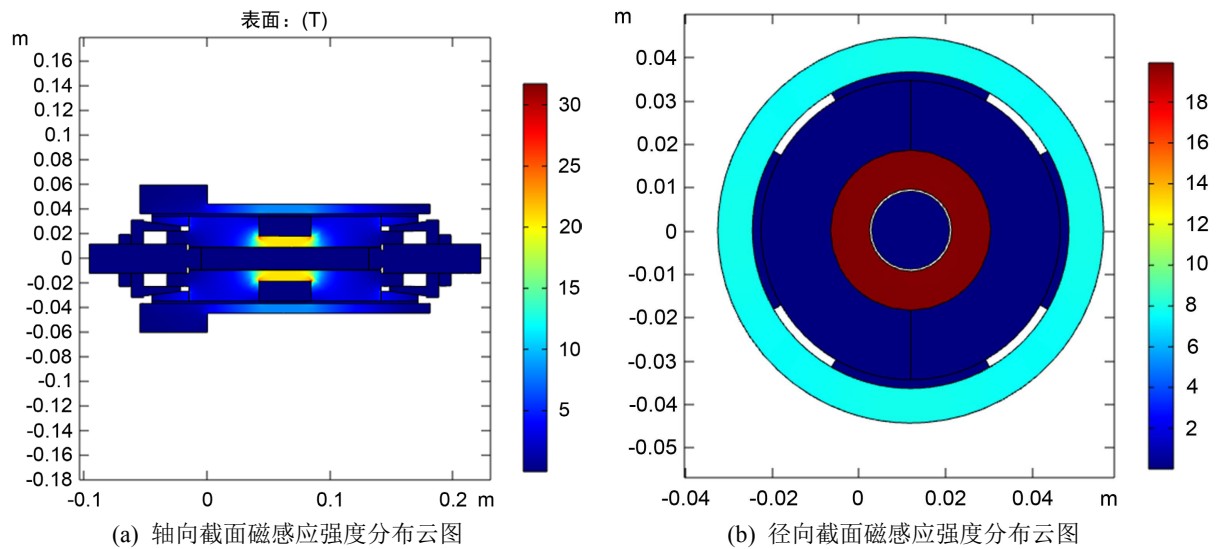


Figure 8. Cloud map of magnetic induction distribution

图 8. 磁感应强度分布云图

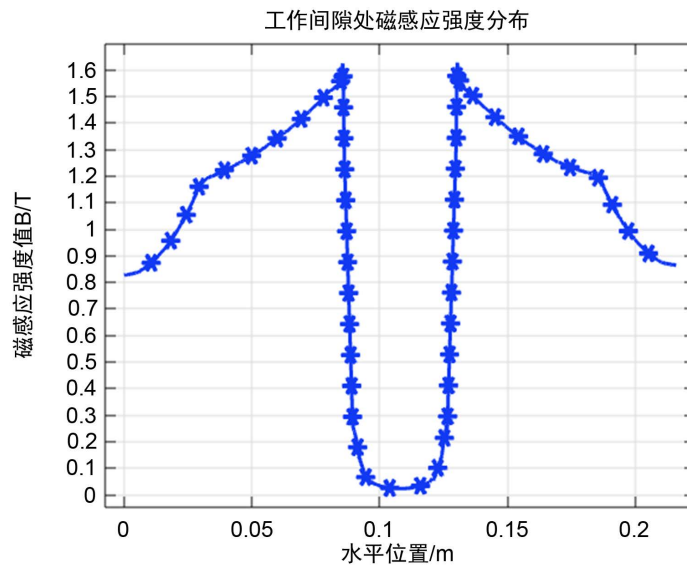


Figure 9. Distribution curve of magnetic induction intensity at working gap

图 9. 工作间隙处磁感应强度分布曲线图

5. 磁感应强度试验验证

对通电后的磁流变弹性体辅助支撑装置中的磁感应强度进行测量。采用型号为 HT201 的数字特斯拉计，磁流变弹性体是由 704RTV 硅橡胶、羰基铁粉和二甲基硅油制备得到的。测试现场如图 10 所示。给励磁线圈加电流 2 A 后，沿工件内表面从上至下等距测得间隙处磁感应强度的实验数据，记录并绘出磁场强度分布图。

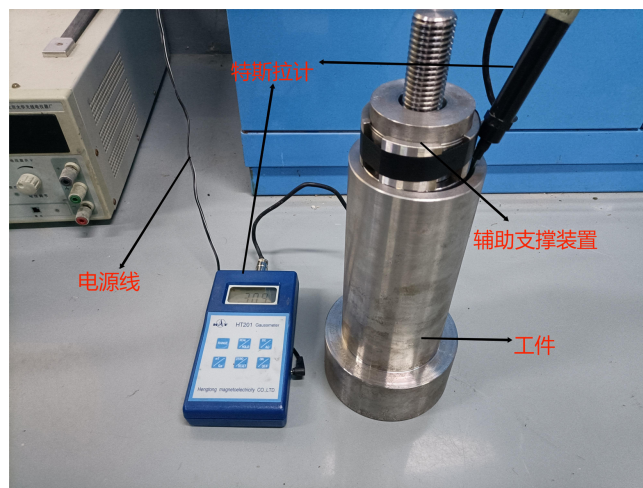


Figure 10. Magnetic induction test experiment

图 10. 磁感应强度测量实验

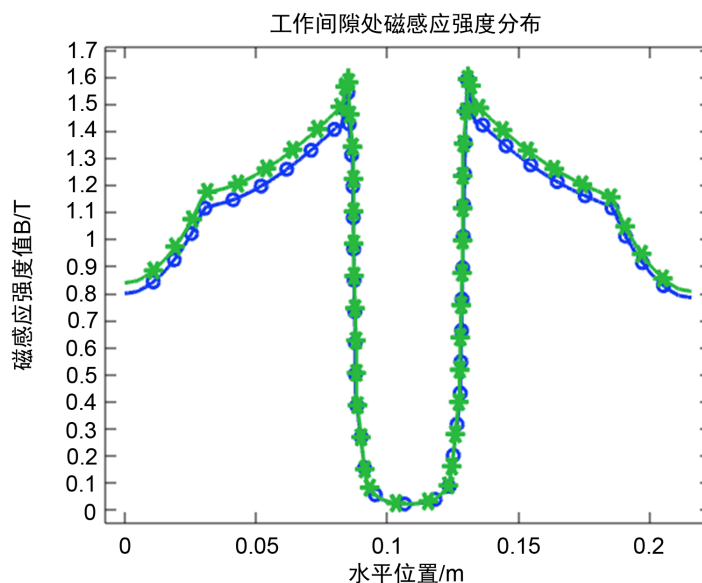


Figure 11. Experimental and simulation magnetic induction intensity distribution curve

图 11. 实验与仿真磁感应强度分布曲线图

用之前优化后的参数进行磁感应强度测试实验，将实验测试的磁感应强度与参数优化后的仿真结果对比，绘制磁感应强度分布曲线图，如图 11 所示。其中绿色星号曲线为参数优化后的仿真曲线，蓝色圆号曲线为实验测得的磁感应强度曲线。通过磁感应强度测量实验可知，实验与理论数值误差范围在 1%~10%，误差合理，实验验证了有限元仿真结果的正确性。

6. 电流与磁感应强度的拟合关系

由上面的磁场仿真及磁感应强度实验可得, 在不同电流大小下的磁感应强度不同, 根据磁场仿真来计算在不同电流作用下的平均磁感应强度, 并用 matlab 绘制出拟合出曲线图。

其中得到:

$$a = -0.00639730639730641,$$

$$b = 0.0390331890331892,$$

$$c = 0.591173641173641,$$

$$d = -0.00505050505050497$$

因此取 $a = -0.006$, $b = 0.039$, $c = 0.591$, $d = -0.005$ 最终可得拟合函数为 $y = -0.006x^3 + 0.039x^2 + 0.591x - 0.005$ 。其 x 与 y 的关系图如图 12 所示。为了评估拟合程度, 本文运用了计算拟合的均方根误差(RMSE)来评估。当函数为一次时, 其均方根误差(RMSE)等于 0.033263816399828, 当函数为二次时, 其方根误差(RMSE)等于 0.033250257225766, 当函数为三次时, 其方根误差(RMSE)等于 0.031690517839814, 因此选择三次函数匹配电流与磁感应强度之间的关系较为合适。

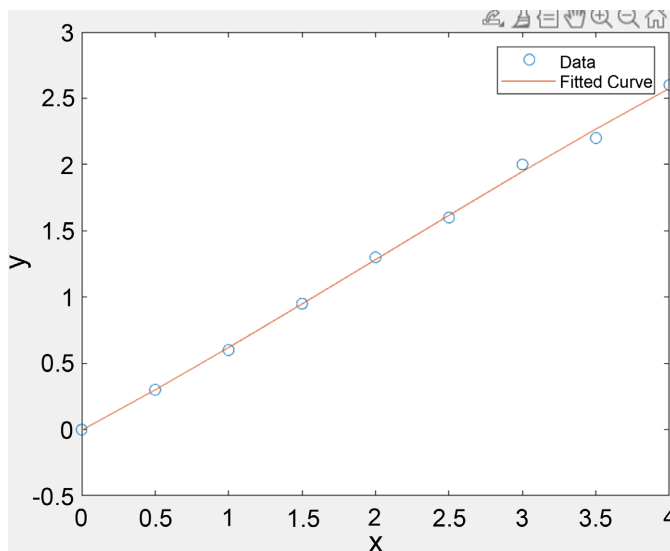


Figure 12. Curve fitting

图 12. 曲线拟合

若把 x 换成电流 I , y 换成磁感应强度 B 则可得到电流与磁感应强度的关系式为:

$$B = -0.006I^3 + 0.039I^2 + 0.591I - 0.005 \quad (1)$$

把公式(1)带到磁流变弹性体的特性公式中可得到电流与弹性模量的关系及电流与磁流变弹性体的损耗因子之间的关系式, 再带入到公式磁流变弹性体的等效刚度和等效阻尼公式[11]中可得到刚度和阻尼分别与电流之间的关系式。

7. 结论

本文设计了基于磁流变弹性体的辅助支撑装置, 并研究装置磁路中部分零件材料、间隙、厚度等不同参数对磁流变弹性体柔性辅助支撑的工作间隙处磁感应强度的影响规律, 得到了在芯轴材料为电工纯铁、工件材料为 45#钢、工件厚度为 8 mm、工作间隙为 2 mm 的情况下通 2 A 电流时工作间隙处的磁感

应强度最小可达 0.83 T, 最大可达 1.62 T, 满足车削弱刚度套筒工件提供辅助支撑要求。通过实验得到, 误差范围为 1%~10%, 误差合理, 实验验证了有限元仿真结果的正确性。最后利用 MATLAB 对电流与磁感应强度之间的数据关系进行拟合, 得到关系式: $B = -0.006I^3 + 0.039I^2 + 0.591I - 0.005$, 为进一步研究磁流变弹性体辅助支撑车削建模奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 汪征宇. 6R 机械臂加工弱刚度工件的变形控制方法[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [2] 张宝荣, 赵志勇, 李爱平, 等. 变壁厚弱刚度零件加工变形与表面质量控制分析[J]. 中国机械, 2020(20): 4-5.
- [3] 张智森, 戴延丰. 弱刚度壳体零件加工夹具设计[J]. 机床与液压, 2016, 44(16): 45-47.
- [4] 杨中宝, 张杰刚, 刘海燕, 等. 薄壁件内撑自平衡柔性夹具设计[J]. 制造技术与机床, 2021(4): 54-56.
- [5] 毋健雄. 磁流变励磁固化特性对薄壁件切削抑振的影响分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [6] 张永亮, 张帅帅, 张展, 等. 基于 MRF 柔性辅助支撑的弱刚性零件铣削加工[J]. 机械强度, 2021, 43(4): 868-873.
- [7] 马伟佳, 黄学功, 汪辉兴, 等. 磁流变弹性体隔振器隔振控制与实验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(8): 118-122.
- [8] 李清云. 磁流变弹性体舰船推进轴系纵振吸振器的设计与实验[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [9] Fu, J., Bai, J.F., Lai, J.J., *et al.* (2019) Adaptive Fuzzy Control of a Magnetorheological Elastomer Vibration Isolation System with Time-Varying Sinusoidal Excitations. *Journal of Sound and Vibration*, **456**, 386-406. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.05.046>
- [10] Li, W.H. and Du, H. (2003) Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **21**, 508-515. <https://doi.org/10.1007/s001700300060>
- [11] 毕凤荣, 曹荣康, Xu Wang, 等. 基于 MRE 的变刚度变阻尼减振器设计研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 192-198.