

永磁制动器制动力矩仿真优化设计

李文正, 张稳桥, 曾晓松, 赵 飞

(贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要 本文以某款微型永磁失电制动器为基础, 对永磁制动器工作原理进行分析并通过 AnsysMaxwell 电磁仿真软件进行二维有限元仿真分析, 结合电流的磁效应原理, 通过控制器改变永磁制动器在制动时的电流方向, 结合仿真分析和实际试验可以证明当制动器定型后通过电流的增磁作用可以大大提高制动器制动力矩, 提高设备运行的可靠性。

关键词 制动器; 电流磁效应; Maxwell 仿真

中图分类号: TM27

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)03-0007-03

制动器作为零位锁制设备, 利用弹力、磁力或电磁力等相互作用, 在锁制状态下通过相互作用面之间的摩擦力矩起到制动效果。目前应用比较广泛的主要有机械式制动器、电磁式制动器两大类, 而电磁制动器还可以按照锁制状态下受到的正压力的方式分为弹簧式电磁制动器、电涡流式电磁制动器以及永磁式电磁制动器等^[1-2]。与机械式制动器相比, 电磁制动器具有结构紧凑、质量轻、控制方便等特点, 广泛应用于航空航天、重型工业、精密器械等领域^[3]。

文章根据某型号微型制动器工作原理进行分析并进行仿真建模, 在此基础上结合电流的磁效应, 通过控制器改变电流方向, 对该制动器的制动性能进行优化分析, 提高制动器的可靠性。

1 永磁式制动器性能分析

1.1 制动器工作原理

永磁制动器由磁轭、线圈、端环、摩擦盘等组成, 磁轭、端环与摩擦盘共同组成制动器磁路结构。通过永磁体对导磁金属摩擦盘的吸附作用产生制动力矩。制动器工作原理分为制动原理及解锁原理两部分^[4]。

1. 制动原理: 断电时制动器中只存在磁钢产生的磁场, 摩擦盘在磁钢的磁力作用下克服片式弹簧的弹力, 与端环接触, 接触端面产生正压力, 从而在接触面产生摩擦转矩, 锁住转轴, 实现锁制功能。

2. 解锁原理: 制动器通电时线圈中通过电流, 产生磁场, 线圈磁场与磁钢磁场在摩擦盘处耦合叠加, 当磁钢产生的磁场被线圈产生的磁场叠加抵消时, 摩擦盘受到的磁力减弱, 当磁力小于片式弹簧的弹力时, 摩擦盘沿轴线运动, 脱离磁轭、端环端面, 实现解锁。

1.2 制动力矩分析

根据制动器工作原理图可以看出, 当摩擦盘内外

半径分别为 R_1 、 R_2 ($R_1 > R_2$) 的两个圆环物体受到沿轴向的正压力 F , 摩擦系数为 μ 时, 锁制状态下两个接触面之间所受到的摩擦力矩如式 (1) 所示。

$$M_f = \int_{R_2}^{R_1} \frac{2\mu Fr^2}{(R_1^2 - R_2^2)} dr = \frac{2uF(R_1^3 - R_2^3)}{3(R_1^2 - R_2^2)} \quad (1)$$

摩擦盘在锁制状态下受到的正压力 F 如式 (2) 所示:

$$F = F_1 - F_2 \quad (2)$$

将式 (2) 带入式 (1) 中可以得到永磁式失电制动器在锁制状态下的制动力矩为:

$$M_f = \frac{2u(F_1 - kx)(R_1^3 - R_2^3)}{3(R_1^2 - R_2^2)} \quad (3)$$

根据式 (3) 可以看出, 当摩擦盘形状确定后制动力矩的大小跟永磁体的磁感应强度、和解锁状态下两配合面之间的间隙有关, 且磁感应强度越大、间隙越小, 制动器的制动力矩越大。解锁状态下, 弹簧片的弹力大于制动器的磁力, 静、动铁芯相互脱离, 制动器解锁, 电机等产品可以自由运转, 因此不进行制动力矩分析。

2 仿真实验

根据某型号微型永磁失电制动器为依据。对该制动器建立 Maxwell 仿真模型, 在制动状态下通过控制器通反向电流对静铁芯增磁, 增大锁制状态下的电磁力从而提高制动器的制动力矩, 对整个模型进行仿真实验^[5]。

2.1 样品仿真实验

当进行制动状态仿真时, 摩擦盘在永磁体自身磁力的作用下与静铁芯贴合, 通过两者接触面的摩擦力矩阻碍动铁芯的旋转, 从而达到制动效果; 当进行解锁状态仿真时, 线圈通电在永磁体周围产生相反的磁场, 此时摩擦盘所受到的拉力大于静铁芯对其的磁力, 摩擦盘远离静铁芯, 制动器处于解锁状态。对两种状态进行二维仿真分析, 其仿真结果如图 1 所示。

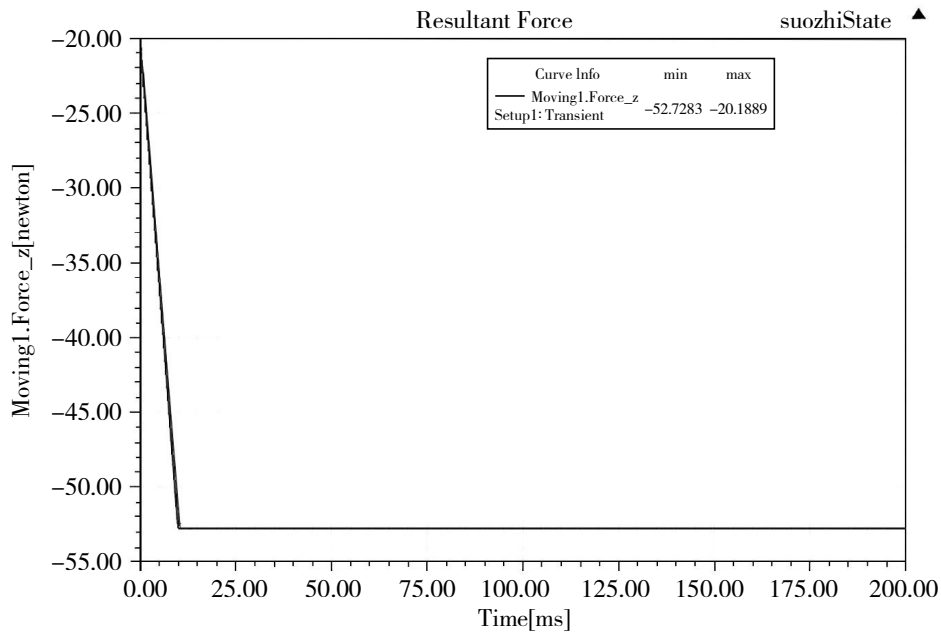


图1 初始制动器锁制部件运动曲线

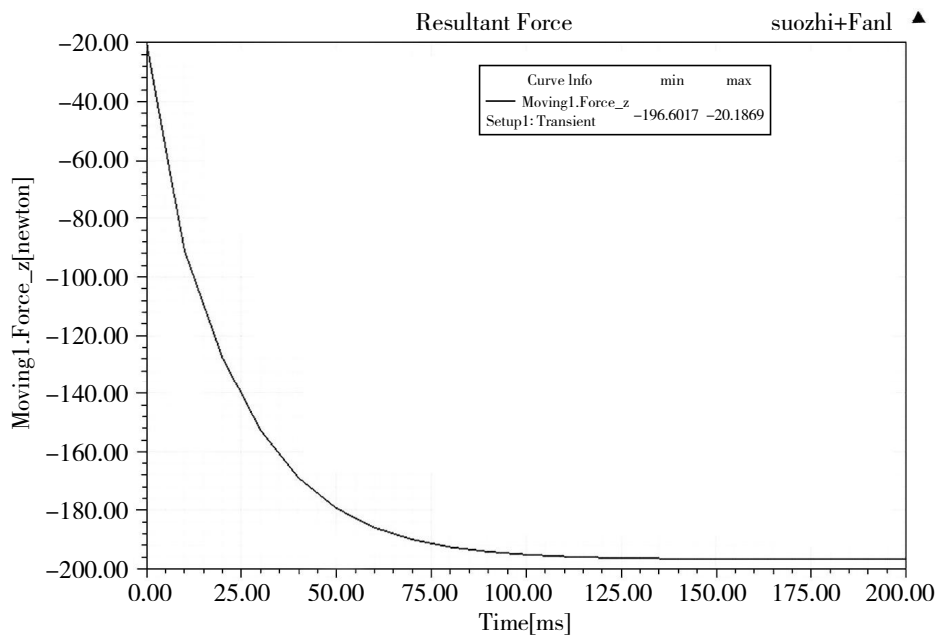


图2 完善后制动器锁制部件运动曲线

根据制动器运动部件的磁力曲线可以看出,制动器的仿真曲线符合制动器的工作原理。根据图1可知当制动器处于锁制状态开始进行解锁时,制动器开始进行通电,动摩擦盘并没有立即受到拉力的作用而产生位移,随着电流的增大,静铁芯受到电流的去磁作用,摩擦盘所受到的磁力逐渐降低,从80ms后运动部件所受到弹簧片拉力的作用下逐渐大于摩擦盘所受到的磁

力,运动部件逐渐远离静铁芯;随着时间的增加,摩擦盘逐渐远离静铁芯直到最大位移不再发生改变,此时制动器可以正常解锁。同理可以看出,当制动器处于解锁状态开始制动时,运动部件所受合力和位移逐渐变大,与制动器在进行解锁时曲线运动趋势恰好相反,此时制动器并没有通电,制动器依靠永磁体的磁力作用对实现动铁芯的锁制。通过对制动器仿真模型

表 1 试验数据统计分析

制动器型号	初始制动力矩	完善制动力矩	提高百分比 %
1	19.4	40.7	209
2	21.7	52.3	241
3	17.5	43.2	247
4	19.8	45.4	229
5	13.5	40.1	297
平均百分比	/	/	247

分析,并结合与以往学者^[6-7]对制动器的仿真分析可以得出,对该型号失电制动器进行二维有限元仿真分析,其仿真结果符合建模需求。

2.2 样品仿真优化

制动器在使用时需要满足制动需求,对于已经成型的产品,在无法改变材料、结构的基础上,提高产品的可靠性,可以改变制动器的工作方式。针对制动器的工作原理,从原先的失电制动改为在控制器的作用下通反向电流增大永磁体的磁感应强度不仅可以给永磁体进行充磁,还可以进一步提高制动器的制动力矩,增大制动器工作时的可靠性。

为了验证该理论所能够提高的实际工作效果,对该型号制动器进行制动状态二维有限元电磁仿真分析,其制动器增磁状态下锁制的仿真结果如图 2 所示。

通过对图 2 中制动器锁制的仿真结果分析可以看出,在制动状态时通反向电流进行励磁,运动部件的位移和弹力曲线与原制动器锁制曲线基本一致,仿真曲线在经过 100ms 以后达到最大值 196.6N,相比没有通电增磁情况下制动器的最大磁力增加了约 3.7 倍,极大地增加了锁制状态下摩擦盘所受到的合力,由式(3)制动力矩数学模型可以得出,当其他变量不发生改变时,制动力矩与运动部件的合力成正比;整个模型锁制状态下所受到的制动力矩提高了约 370%,极大地提高了制动器工作时的制动范围和可靠性。

2.3 试验验证

为进一步验证仿真分析是否准确可靠,文章利用直流电源控制器、扭矩扳手等装置对该型号制动器进行试验验证。本文从一批产品中选取 5 台制动器分别对其进行制动力矩测试试验,每台制动器测顺逆两个方向,其试验数据如表 1 所示。

通过表 1 中试验数据的统计分析可以看出,制动器通电锁制相比原先失电锁制时制动力矩增幅 250% 左右,考虑到实际测量时在每台制动器的制动力矩不仅和磁力合力有关,还受到静、动铁芯磨合面、绕线电机、温度、测量等方面存在的影响和误差,相比二维有限

元电磁仿真时电磁合力提高 370%,实际测量增幅相比仿真数据偏小,结果数据合理,进一步验证制动器在制动时通过反向通电励磁不仅能够提高制动器的制动力矩,增加制动力矩的工作范围,还进一步提高了数据的可靠性。

3 结论

本文对永磁制动器的工作原理进行了分析,在建模仿真的基础上结合电流的磁效应对制动器的工作状态进行了优化,提出在制动器锁制状态时通过控制器进行反向充磁增大制动器的制动力矩,并通过仿真分析和试验验证可以得出该方法是合理有效的,不仅可以提高制动器的制动力矩增加产品的可靠性,还可以扩大现有产品的使用范围,增加产品使用效率,降低成本。

参考文献:

- [1] 胡小飞,王毅,朱炎,等.电磁制动器的发展现状及应用前景[J].微特电机,2019,47(04):71-75.
- [2] CHOI J-Y, SEOK MYEONG J. Analytical magnetic torque calculations and experimental testing of radial flux permanent magnet-type eddy current brakes[J]. Journal of Applied Physics, 2012(7pt3):07E712.1-07E712.3.
- [3] 汪达鹏,贾宇琪,周利华.航空永磁制动器关键技术研究[C]//2019年(第四届)中国航空科学技术大会论文集.中国辽宁沈阳:中国航空学会,2019.
- [4] 宋振民,苏伟,李雨,等.基于 ANSYS 的永磁失电制动器的设计技术[J].微特电机,2021,49(09):28-32.
- [5] YEVTUSHENKO A A, GRZES P. Mutual influence of the sliding velocity and temperature in frictional heating of the thermally nonlinear disc brake[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016(102):254-262.
- [6] 许宝玉,李孝坤,贾言言,等.一种新型电永磁制动器结构设计及有限元分析[J].河南科学,2017,35(05):712-716.
- [7] 苏文胜,王欣仁,百坚毅.制动电机动态制动力矩的试验研究[J].电机与控制应用,2016,43(09):74-78.