

磁粉离合器转矩特性分析与优化^{*}

王程^{1,2} 常思勤¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 淮阴工学院交通工程学院, 淮安 223003)

【摘要】 以提高磁粉离合器转矩容量为目的,在深入研究其工作机理的基础上,利用虚位移电磁力计算理论推导得出了转矩传递公式;以麦克斯韦方程为磁场分析的理论基础,建立了磁粉离合器二维有限元分析模型并进行了计算,仿真结果与试验结果吻合;根据仿真分析结果,对其进行了改进设计,改进后的磁粉离合器转矩性能提高了45%。

关键词: 磁粉离合器 转矩特性 仿真

中图分类号: U463.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0035-04

Analysis and Design on Torque Characteristic of Magnetic Particle Clutch

Wang Cheng^{1,2} Chang Siqin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2. Faculty of Transportation Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract

To increase the torque capacity, the torque-transferring formula was deduced from electromagnetic force theory of virtual displacement according to working mechanism of magnetic particle clutch. The FEM model was established based on theory of Maxwell equation for analysis magnetic field and its simulation results conformed to the test results. According to the simulation results, improved design was made on magnetic particle clutch. The results showed that the improved magnetic particle clutch had a remarkable effect on the torque performance, and its torque performance increased by 45%.

Key words Magnetic particle clutch, Torque characteristic, Simulation

引言

磁粉离合器是利用电磁能作用,将力矩从主动侧传递到从动侧,完成机械传动系统的连接和功能传递的一种典型磁力机械机构,在工业自动化控制领域应用广泛,还应用于车辆、航空航天等行业。国外已有磁粉离合器在车辆传动领域应用的文献报道^[1],但是,高性能磁粉离合器关键核心技术被发达国家数家公司垄断,可查相关研究文献甚少。文献^[2]在磁路分析的基础上给出了磁粉离合器主要设计参数与传递转矩之间的估算关系,设计效率和精度不高。近年国内对车用磁粉离合器进行了设计、控制、试验研究^[3-4],但仍存在单位体积转矩容

量低的问题,难以满足车辆传动的高性能要求。

本文以提高磁粉离合器转矩容量为研究目的,在深入研究其工作机理的基础上,选取从动件为杯形、线圈内置、静止型磁粉离合器为研究对象,应用有限元数值计算方法建立其磁场场域分析模型,确定磁粉离合器磁路磁性参数与其性能间的关系,并对磁粉离合器进行改进设计。

1 磁粉离合器工作原理

1.1 磁粉离合器结构及工作机理分析

磁粉离合器结构简图如图1所示,主要由主动转子、从动转子、磁轭、激磁线圈、磁粉、隔磁环、端盖等组成。当主动转子在输入轴、端盖带动下旋转,而

收稿日期: 2010-12-06 修回日期: 2011-01-11

^{*} 江苏省自然科学基金资助项目(BK2008414)和淮安市科技支撑计划(工业)资助项目(HAG2010041)

作者简介: 王程, 博士生, 淮阴工学院讲师, 主要从事车辆动力装置设计、仿真及优化技术研究, E-mail: wangcheng6657@126.com

通讯作者: 常思勤, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆动力装置设计、仿真及优化技术研究, E-mail: changsq@mail.njust.edu.cn

激磁线圈不通电时,存储在工作间隙中的磁粉在离心力的作用下被压附在主动转子内壁上,主、从动转子处于分离状态,不传递转矩;当激磁线圈两端加以激励电流时,在磁粉离合器激磁线圈周围形成闭合磁路,在磁场作用下,工作间隙中的磁粉磁化,形成磁粉链,连接主、从动转子传递转矩^[5]。磁粉链中两相邻磁粉粒子受磁场磁化形成两个磁极而相互吸引形成电磁力 F ,如图2所示,当主动转子在外力作用下发生运动时,磁粉间发生相对运动趋势而产生切向摩擦力 F_f ,起到传递转矩的作用。由此可见,磁粉离合器工作表面对磁粉的电磁力是磁粉离合器转矩传递的基础。

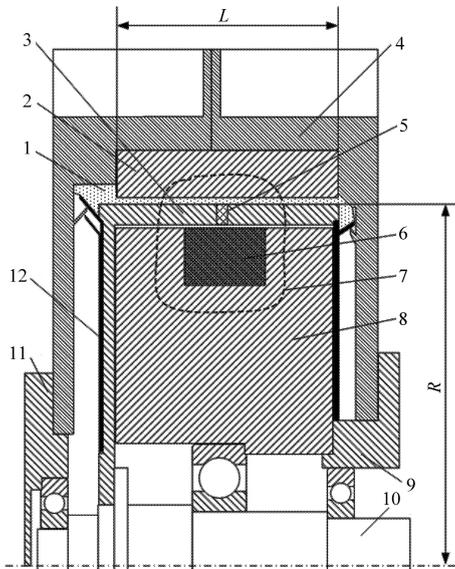


图1 磁粉离合器结构简图

Fig.1 Structure of magnetic particle clutch

1. 磁粉 2. 主动转子 3. 从动转子 4. 端盖 5. 隔磁环 6. 激磁线圈 7. 磁路 8. 磁轭 9. 法兰盘 10. 输出轴 11. 输入轴 12. 磁粉密封环

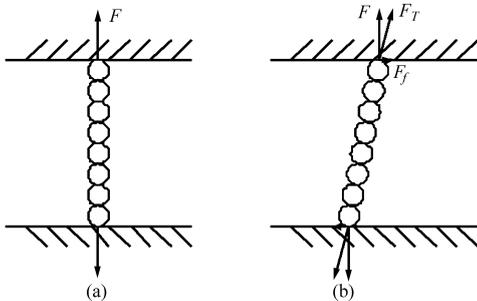


图2 磁粉工作状态示意图

Fig.2 Structure of magnetic particle working state

- (a) 静止状态 (b) 运动状态

1.2 磁粉离合器电磁力、磁力矩计算

虚位移法计算电磁力是电磁计算过程中普遍采用的方法^[6],即根据能量守恒定理,假设磁场中的磁导体在电磁力作用下发生机械运动,系统对外作机械功应等于系统电能、磁能的改变量。理论推导

得出,磁粉离合器磁极对磁粉形成的电磁力为

$$F = \frac{SBH}{2} = \pi RLBH \quad (1)$$

式中 S ——垂直于磁通的工作间隙总截面面积, m^2

R ——工作面半径, m

L ——工作面宽度, m

B ——工作间隙磁感应强度, T

H ——工作间隙磁场强度, A/m

摩擦力为

$$F_f = \rho \lambda f F = \rho \lambda f \pi RLBH \quad (2)$$

式中 f ——磁粉间摩擦因数

ρ ——磁粉填充率

λ ——有效工作面积系数

对于工作间隙数目为 m 的磁粉离合器,其传递转矩为

$$T = m F_f R = m \rho \lambda f \pi R^2 LBH \quad (3)$$

在磁粉离合器基本结构不变的情况下,参数 ρ 、 λ 、 f 、 S 、 R 基本保持不变,取 $K = \rho \lambda f \pi R^2 L$,式(3)可进一步简化为

$$T = mKBH \quad (4)$$

1.3 磁粉离合器结构型式确定

目前,工业自动控制领域普遍应用的磁粉离合器,按其有无馈电装置分为线圈旋转型(ZKA)和线圈静止型(ZKB)两类。ZKB型较ZKA型磁粉离合器运行安全可靠度高,且减小了运动件转动惯量,有助于提高磁粉离合器控制响应速度。

磁粉离合器按从动件形状又可分为柱形、杯形、盘形等几种类型。其中杯形从动件的磁粉离合器传递功率大、体积小、转动惯量小,成为目前车用磁粉离合器首选的结构型式。

考虑到工作面截面面积及半径对转矩传递性能的影响,选取激磁线圈内置的结构型式。

2 有限元分析

2.1 有限元分析理论基础

磁粉离合器磁场场域有限元分析的理论基础是麦克斯韦方程^[7],静磁场问题表述如下:

磁场强度满足安培环路定律,即

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

式中 J ——产生静磁场的激磁电流密度

磁感应强度 B 满足高斯磁通定律,即

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (6)$$

根据 $H = \frac{B}{\mu}$, $B = \nabla \times A$,得

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (7)$$

有限元数值计算中,可以根据式(7)先求得矢量磁位 A ,再通过 $B = \nabla \times A$ 和 $H = \frac{B}{\mu}$ 求得静磁场的磁感应强度和磁场强度。

2.2 有限元分析模型

2.2.1 几何模型

磁粉离合器为典型的轴对称结构,为减少分析计算过程中的工作量,将三维问题简化为二维问题,根据实际研究对象建立的有限元二维几何分析模型如图 3 所示。

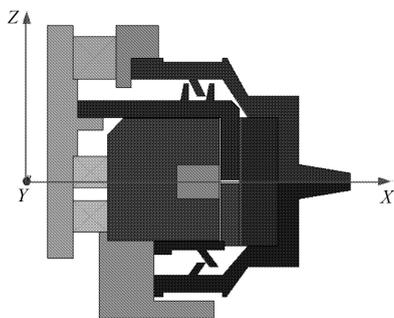


图 3 二维几何模型

Fig. 3 2-D geometry model

2.2.2 材料属性

主动件、从动件、磁轭构成磁粉离合器主磁路,材料为 10 号钢;磁粉定义为铁-钴-镍磁粉;为减小漏磁,离合器端盖、密封环、轴、轴承及法兰盘定义为非磁性材料或磁性小的材料,其中端盖、密封环为硬铝,轴、轴承为不锈钢,法兰盘为铸铁。10 号钢磁化曲线如图 4,其饱和磁感应强度为 1.2 T;铁-钴-镍磁粉磁化曲线如图 5 所示。

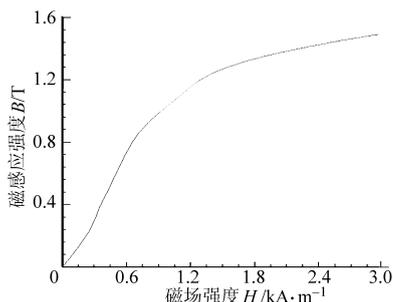


图 4 10 号钢 $B-H$ 曲线

Fig. 4 $B-H$ curve of No. 10 steel

2.2.3 边界条件和激励源

边界条件应用自然边界和诺依曼边界;激励源线圈直径选用 0.5 mm,绝缘铜导线绕制,绕组端口面积为 100 mm²,磁势范围为 0 ~ 500 A。

2.2.4 网格剖分

网格剖分采用金字塔型剖分设置,在对求解参数和求解域网格能量误差进行设置后,利用系统自适应剖分技术自动求解剖分网格。

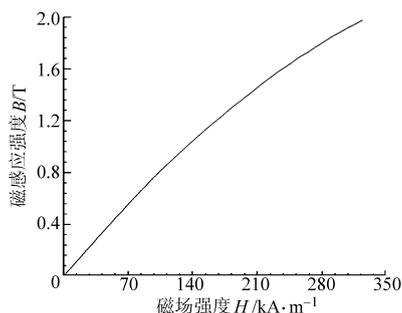


图 5 铁-钴-镍磁粉 $B-H$ 曲线

Fig. 5 $B-H$ curve of Fe-Co-Ni magnetic particle

2.3 求解结果处理与分析

图 6 为工作间隙平均磁感应强度 \bar{B} 与激磁线圈磁势 U 的拟合关系曲线,从图 6 可以看出,在曲线 M_1M_2 区间, \bar{B} 随 U 几乎呈线性增加, M_2M_3 区间 \bar{B} 随 U 变化的趋势减缓。

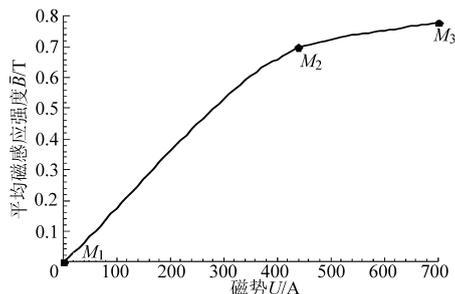


图 6 $\bar{B}-U$ 曲线

Fig. 6 Relationship between \bar{B} and U

磁粉离合器在 M_2 工作点,即 U 为 440 A 时的磁感应强度分布云图如图 7 所示,此时,图中磁粉离合器激磁线圈左下方处磁轭的 B 达到了 1.5 T,已处于饱和状态,工作间隙中磁粉磁感应强度为 0.7 T,未饱和。若继续增大 U ,磁轭饱和区域将扩大,磁路磁阻也将继续增大,从而导致工作间隙中 B 随 U 增大而增大的趋势减缓,即图 6 中 M_2M_3 区间所描绘。

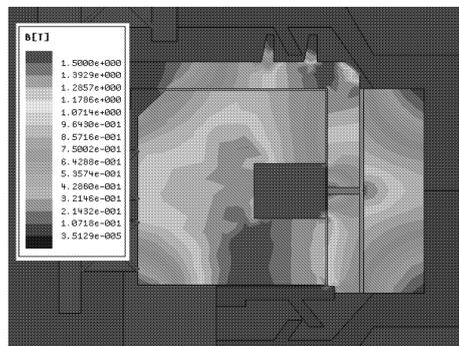


图 7 磁感应强度分布云图

Fig. 7 Painting pictures of original design magnetic induction

图 7 显示,图中激磁线圈处于磁轭上下中心线上对称位置时,磁感应强度在磁轭上的分布并不对称,这是由磁轭上方所对应的从动件部分的导磁分流作用引起的,磁通分流降低了激磁线圈上方磁轭

部分的磁感应强度,进而降低磁路磁阻,对提高工作间隙磁感应强度起到积极作用。

2.4 试验验证

为验证仿真分析模型及计算分析结果的可靠性,根据文献[8]中的试验及数据处理方法对研究对象转矩特性进行了试验,求得 $K = 1.163 \times 10^{-3}$,结果如表1所示。由表可以看出仿真计算结果与试验结果基本吻合,说明仿真分析模型合理。

表1 转矩仿真结果与试验结果对比

Tab.1 Contrast between simulation and test results

磁势 U/A	仿真结果	试验结果
0	0	1.046
100	4.556	5.630
200	19.36	19.50
250	30.04	30.00
300	42.24	41.92
400	66.25	67.13
500	79.95	80.77

3 参数化改进设计

依据2.3节中的仿真结果及分析,在不改变磁粉离合器主要结构的前提下对其进行改进:①提高主动件、从动件、磁轭的磁性能,选用软磁特性更为优良的8号钢。②改变磁粉密封环的材料属性,选用与主磁路一致的导磁材料。③激磁线圈在磁轭中的布置位置做适当偏移,偏移量 L_x 计算区间为 $0 \sim 2$ mm,步长 0.2 mm。

激磁线圈偏移量 L_x 与工作间隙中平均磁感应强度 \bar{B} 的关系曲线如图8所示,当偏移量 L_x 为 0.8 mm时,工作间隙中平均磁感应强度 \bar{B} 最大,此时,磁感应强度分布云图在磁轭中基本呈上下对称分布,如图9所示。

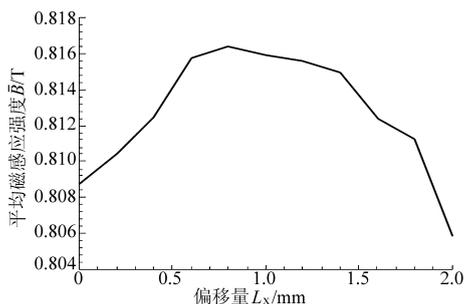


图8 $L_x - \bar{B}$ 曲线

Fig.8 Relationship between L_x and \bar{B}

图10给出了磁粉离合器改进前、后转矩特性曲线,可以看出改进后的磁粉离合器转矩传递特性得

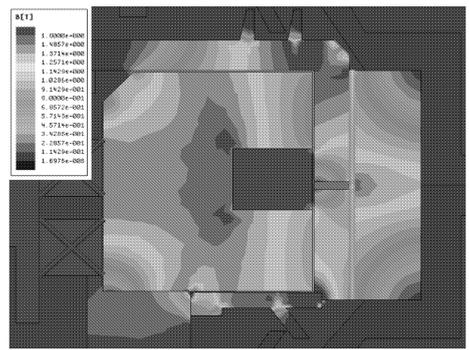


图9 改进后磁感应强度分布云图

Fig.9 Painting pictures of improved design magnetic induction

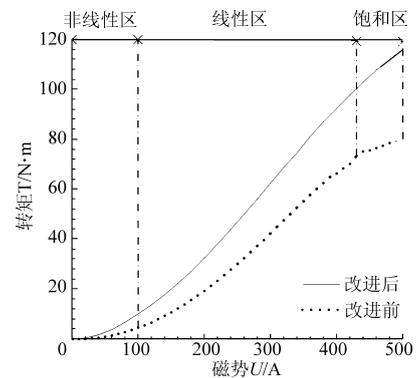


图10 磁粉离合器转矩特性仿真曲线

Fig.10 Simulation curves of torque characteristic of particle clutch

到了显著提升;额定工作电流下其转矩传递性能提升了45%,如表2所示。

表2 改进前、后转矩传递性能仿真结果

Tab.2 Simulation results of torque transfer performance before and after improved

磁势 U/A	改进前	改进后
0	0	0
100	4.556	10.06
200	19.36	32.38
300	42.24	62.31
400	66.25	92.37
500	79.95	116

4 结论

(1)深入研究了磁粉离合器工作机理,利用虚位移法电磁力计算理论,推导得出转矩计算公式。

(2)确定研究对象,以麦克斯韦方程为理论基础,建立了磁粉离合器二维有限元磁场分析模型并进行了计算,特性仿真结果与试验结果相吻合。

(3)依据仿真计算结果,在不改变磁粉离合器主体结构的基础上,提出了改进设计方案并进行了分析计算,分析结果表明改进后的磁粉离合器转矩传递特性得到了显著提升。(下转第34页)

参 考 文 献

- 1 Joonyoung Park, Jonghan Oh, Youngkug Park, et al. Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles[C]. IFOST,2006:37~42.
- 2 Sungtae Cho, Kukhyun Ahn, Jang Moo Lee. Efficiency of the planetary gear hybrid powertrain[J]. Proc. IMechE, Part D: Journal Automobile Engineering, 2006,220(10):1445~1454.
- 3 Chen Shanglou, Wang Lifang, Liao Chenglin, et al. Realization of an energy management strategy for a series-parallel hybrid electric vehicle[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference,2008:1~6.
- 4 左义和,项昌乐,闫清东. 基于功率跟随的混联混合动力汽车控制策略[J]. 农业机械学报,2009,40(12):23~29.
Zuo Yihe, Xiang Changle, Yan Qingdong. Control strategy of parallel-serial hybrid electrical vehicle based on the power track method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(12):23~29. (in Chinese)
- 5 Cheng Y, Chen K, Chan C C, et al. Global modeling and control strategy simulation [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine,2009,4(2):73~79.
- 6 舒红,刘文杰,袁景敏,等. 混联型混合动力汽车能量管理策略优化[J]. 农业机械学报,2009,40(3):31~35,55.
Shu Hong, Liu Wenjie, Yuan Jingmin, et al. Optimization of energy management strategy for a parallel-series HEV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):31~35,55. (in Chinese)
- 7 杜常清,颜伏伍,李劲松. 混合动力系统仿真中的发动机缩放建模方法[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(12):78~83.
Du Changqing, Yan Fuwu, Li Jingsong. Scalable engine modeling method for hybrid electric vehicle simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008,30(12):78~83. (in Chinese)
- 8 资新运,杜常清,张增建,等. 用于混合动力控制的汽油机动态转矩建模仿真[J]. 公路交通科技,2008,25(10):152~157.
Zi Xinyun, Du Changqing, Zhang Zengjian, et al. Modeling dynamic torque performance of gasoline engine for control of hybrid electric vehicle[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008,25(10):152~157. (in Chinese)
- 9 饶振纲. 行星齿轮传动设计[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- 10 孙恒,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

~~~~~

(上接第 38 页)

## 参 考 文 献

- 1 Watanabe Tomoyuki. Apparatus for controlling a magnetic particle clutch for use in a vehicle; United States, 4606446[P]. 1986-08-19.
- 2 Mikhaeil-Boules N. Design analysis of electromagnetic particle clutch[C]// Industry Application Society Annual Meeting, Conference Record of the 1994 IEEE, 1994, 1:357~360.
- 3 王蜀. 可控式轿车用磁粉离合器:中国, CN03222487.7[P]. 2003-06-03.
- 4 魏英俊,常思勤. 车辆起步过程中的磁粉离合器模糊控制技术[J]. 中国机械工程,2005,16(11):1029~1033.  
Wei Yingjun, Chang Siqin. Research on fuzzy control technology applied to magnetic powder clutch during vehicle starting [J]. China Mechanical Engineering, 2005,16(11):1029~1033. (in Chinese)
- 5 周云波,常思勤. 磁粉离合器仿真分析研究[J]. 中国机械工程,2010,21(10):1149~1152.  
Zhou Yunbo, Chang Siqin. Simulation and analysis of magnetic particle clutch[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(10):1149~1152. (in Chinese)
- 6 周顺荣. 电磁场与机电能量转换[M]. 上海:上海交通大学出版社,2006.
- 7 倪光正,杨仕友,钱秀英,等. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- 8 于康. 车用磁粉离合器分析、设计及控制的研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.