

# 基于磁力传动的永磁离合器设计与试验<sup>\*</sup>

刘雪洪 刘 梁 常思勤

**【摘要】** 提出了一种基于磁力传动原理的永磁离合器设计方案,通过改变主从动件间相对位置使径向磁场强度发生改变从而实现接合或分离。应用有限元方法计算了永磁离合器接合状态下的磁场分布及性能,以及分离或接合过程中主从动件间传递转矩和轴向力的变化关系。分析了主要设计参数对性能的影响,并研制了永磁离合器样件进行了试验验证。

**关键词:** 离合器 永磁 磁力传动 有限元分析

**中图分类号:** TH133.4 **文献标识码:** A

## Design and Test of Permanent Magnet Clutch Using Magnetic Force Transmission

Liu Xuehong Liu Liang Chang Siqin

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

### Abstract

Based on magnetic force transmission principle, a type of the permanent magnet clutch was proposed. The coupling or separating of the clutch was realized by changing the relative position of the parts for the variation of the radical magnetic field strength. The magnetic field and performances of the permanent magnet clutch in coupling state, and the variation of the transmitted torque and axial force in coupling or separating process, were calculated with finite element method, respectively. Finally, the feasibility of the design and influences of the main design parameters on the performance were analyzed, and a prototype of the permanent magnet clutch was manufactured for testing.

**Key words** Clutch, Permanent magnet, Magnetic force transmission, Finite element analysis

### 引言

磁力传动是利用主动件与从动件共同建立起来的磁场所产生的作用力来传递动力的,而高性能永磁材料在磁力传动中起到了关键的作用,使得相关部件性能得到了极大提高。目前利用磁力传动技术的永磁联轴器已经得到了较多的研究与应用<sup>[1]</sup>,但对永磁离合器的研究尚少。文献[2]提出了一种主从动件间产生轴向间磁场并通过相对位移改变磁场强度的永磁离合器方案,但由于主从动件间轴向作用力大且需较长行程来实现分离而难以得到实际应用。本文提出一种永磁离合器设计方案,应用磁力

传动原理,通过改变主从动件间相对位置使其径向磁场强度发生改变,从而实现接合或分离。

### 1 设计方案及分析

提出的基于磁力传动原理的永磁离合器<sup>[3]</sup>基本结构如图1所示。主从动件同轴心线布置,主动件在外、从动件在内(有利于降低从动件的转动惯量),主从动件间由所布置的永磁体产生径向磁场。

永磁离合器在接合状态下,外磁极及主动件与内磁极及从动件间形成磁场产生作用力并传递转矩。离合器的分离状态则通过主动件与从动件产生相对轴向位移来实现,通过内磁极及从动件轴向移

收稿日期: 2007-10-15

<sup>\*</sup> 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2006AA05Z236)

刘雪洪 南京理工大学机械工程学院 讲师, 210094 南京市

刘 梁 南京理工大学机械工程学院 博士生

常思勤 南京理工大学机械工程学院 教授 博士生导师

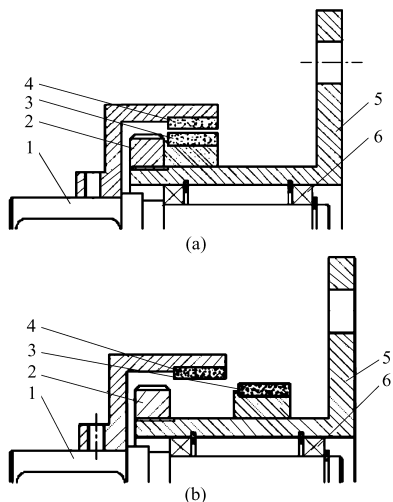


图1 永磁离合器结构简图

Fig. 1 Structure of the permanent magnet clutch

(a) 接合状态 (b) 分离状态

1. 主动轴 2. 螺母 3. 内磁极及从动件 4. 外磁极及主动件  
5. 从动轴连接盘 6. 轴承及定位卡环

动一定距离使主从动件之间的磁场被削弱直至基本消除,主动件和从动件之间的动力传递被隔断。设计时,既要满足空载转矩在一定范围之内,又要使离合器分离距离尽量小,减小离合器总体尺寸。

初步确定了永磁离合器的基本设计参数。外径定为 60 mm,轴向长度(含连接端)不大于 60 mm。永磁体为瓦型磁体,选用钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁材料,沿径向磁化,以不同极性沿圆周方向交替排列,并固定在相应部件上。通过有限元分析对主要设计参数进行优化,以实现在有限的总体尺寸下最大地传递转矩以及彻底分离。本文未涉及离合器的接合或分离执行机构的设计,在实际应用中可以根据具体情况采用不同的方案,例如手动拨叉形式(类似于汽车手动变速器中换挡机构)或电磁铁驱动形式(在一些自动控制系统中常见)等。

## 2 有限元分析

应用有限元方法计算了永磁离合器接合状态下的磁场分布及性能,以及分离或接合过程中主从动件间传递转矩和轴向力的变化关系。

作为稳态磁场有限元分析理论基础的基本方程主要包括:

磁场强度  $H$  满足安培环路定理,即

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

式中  $J$ ——产生稳态磁场的电流密度

当稳态磁场为外加磁场(例如永磁体)时, $J$  可视为等效电流密度。

磁通密度  $B$  满足高斯磁通定律,即

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

磁场强度  $H$  与磁通密度  $B$  间存在本构关系

$$B = \mu H \quad (3)$$

式中  $\mu$ ——介质的磁导率

应用虚位移原理计算由磁作用力产生的转矩

$$T = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \int_V \left( \int_0^H B dH \right) dV \right] \quad (4)$$

对于永磁联轴器,若忽略端部效应,可简化为二维有限元问题<sup>[4]</sup>,而对于永磁离合器则必须按三维有限元问题来处理。但考虑到其结构沿圆周方向具有周期性,可利用磁场的周期性条件来压缩求解区域,取其中一个周期来进行建模分析并加载周期性边界条件。图2为永磁离合器(一个周期)的三维实体模型和有限元模型。

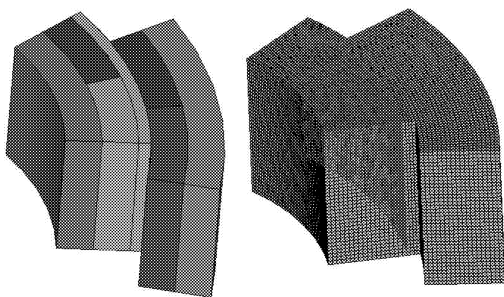


图2 永磁离合器的三维实体模型和有限元模型

Fig. 2 3D model of the permanent magnet clutch

通过计算,可以得到计算区域的磁场分布,并进一步求得传递转矩。

应用有限元方法进行了大量变参数计算,主要设计参数对性能的影响如下:

(1) 磁极数具有最优值,过大或过小均会减小所传递的最大转矩。样件中,磁极数取 18。

(2) 磁极轴向厚度与所能传递的最大转矩基本成正比,但考虑到离合器的行程一般会略大于磁极轴向厚度,因而从降低离合器的行程以及总体积的角度考虑,应适当减小磁极轴向厚度。样件中磁极轴向厚度取 12 mm。

(3) 气隙的减小有利于增强磁场强度及所传递的转矩。但气隙不能无限制地减小,需要考虑加工精度及成本。样件中气隙取 1 mm。

此外气隙的取值还与离合器的结构有关,若轴承部分取消而将主从动部分分别与原动机和负载连接,则气隙应适当加大,否则不但对中困难,且易产生由振动引起的碰擦。

(4) 内外磁极厚度的增加可增加所传递的最大转矩。但一般应与磁轭厚度一体考虑,存在最优值且与总体尺寸有关。

根据最终确定的设计参数,计算得到永磁离合器传递转矩为 9.47 N·m。图3为有限元计算得到的磁通密度云图。

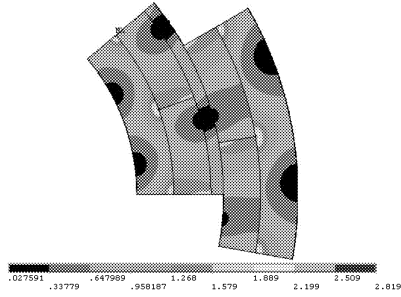


图 3 磁通密度云图

Fig. 3 Calculated magnetic flux density

根据离合器设计要求,离合器应彻底分离,即分离后的空载转矩应尽量小。分离后空载转矩的大小是永磁离合器方案是否可行的关键,为此进行了深入计算分析。

设完全接合状态下永磁离合器主从动件间的相对轴向位移为零,对于不同的相对轴向位移,分别建立了三维有限元模型,并计算了分离或接合过程中永磁离合器主从动件间的相对轴向位移与传递转矩及轴向力的关系,如表 1 所示。

表 1 相对轴向位移与传递转矩及轴向力的关系

Tab.1 Relation of the relative axle position and translated torque and the axle force

相对轴向位移/mm	传递转矩/ $N \cdot m$	主从动件间轴向力/ $N$
0	9.469	0.000 016 8
12	0.805	2.953
15	0.225	2.624
18	0.104	2.546
21	0.074	2.541
24	0.065	2.538

由表中可见,传递转矩随着主动件和从动件相对轴向位移的增大而减小。因为传递转矩主要由气隙中的磁通密度决定,相对轴向位移越大,气隙处的磁通密度就越小,传递的转矩就越小。当主动件和从动件相对轴向位移达到某个值以后,主动件和从动件间可以实现分离,此时的剩余转矩很小。

分离过程中所产生的轴向力也与主从动件间的相对轴向位移有关。当主从动件间未分离时,磁通密度沿轴向的分量很小,所以轴向力很小,几乎为零。当主从动件间逐渐分离时,沿轴向磁通密度分量逐渐增大,随后在达到一定值后,由于相对位移增大使气隙增大从而导致磁通密度减小,轴向力又趋向减小。分离或接合过程中所产生的轴向力相对较小,对接合或分离执行机构驱动力要求并不高,在分离或接合的稳定工作状态下,轴向力可忽略不计。

### 3 试验验证

为验证技术方案的可行性并分析模型的正确性,设计并制作了永磁离合器的样件,进行了实际测试。在内磁极及从动件与从动轴连接盘之间的轴上增加了调整垫圈,通过调节调整垫圈的厚度来实现不同的主动件与从动件间相对轴向位移。此外,为与现有部件连接,从动轴连接盘超过了前述 60 mm 的外径限制。

试验装置按动力传递路径依次连接电动机、永磁离合器、转速转矩测试仪以及磁粉制动器。调节直流稳压电源的输出电压,可控制磁粉制动器的制动力,即控制永磁离合器所传递的负载。在主动件和被动件完全接合状态下,对磁粉制动器逐渐加载,测得最大的传递转矩为  $10.16 N \cdot m$ 。当主动件与被动件间相对轴向位移为 12 mm 时,测得最大的传递转矩为  $0.815 N \cdot m$ 。而当主动件与被动件间相对轴向位移为 15 mm 时,在空载条件下主动件已经不能带动被动件转动,实现了主动件和被动件的分离,主动转子和被动转子间的动力传递已经被切断。此时离合器传递转矩小于系统的摩擦力矩。

永磁离合器样件的试验不仅验证了永磁离合器设计方案的可行性,而且也表明三维有限元方法的计算精度令人满意,传递转矩的计算值与实测值相差最大为 7.3%。误差可能来源于制造及永磁体材料特性参数的偏差。

在试验过程中,永磁离合器连续运转 10 min 以上,运行平稳并无发热现象。

### 4 结论

(1) 提出了一种永磁离合器的设计方案,应用磁力传动原理,通过改变主从动件间相对位置使其径向磁场强度发生改变,从而实现接合或分离。

(2) 计算与试验验证均表明,永磁离合器在分离或接合过程中所产生的轴向力相对较小,因而所需的操纵力也较小,而在分离或接合的稳定工作状态下,轴向力可忽略不计。

(3) 设计的外径 60 mm、轴向长度(含连接端) 60 mm 的永磁离合器样件,最大传递转矩约为  $10 N \cdot m$ ,可实现极小空载转矩的彻底分离。

(4) 建立了永磁离合器的三维有限元模型并进行了计算,经试验验证有限元分析达到了较高的计算精度,可以作为性能优化的有效工具。

(5) 永磁离合器主从动件间无接触,因而可实现静密封、减振;稳态工作下不耗能,效率高,接合或脱离所需操纵力小;可过载保护。 (下转第 14 页)

## 4 结论

(1) 不带附加气室的空气弹簧的力学模型可以简化为2个弹簧并联构成,是带附加气室的空气弹簧力学模型的简化形式。在车辆悬架中需要与阻尼器合理匹配,来衰减车辆振动。

(2) 带附加气室的空气弹簧具有较低的刚度,除了起弹性支撑作用外,还具有阻尼作用,相当于一个弹性支承的减振器系统。

(3) 空气弹簧的刚度和频率与其静平衡位置时的压力、容积和有效面积变化率有关。

(4) 空气弹簧的动态刚度大于静态刚度。

(5) 空气弹簧具有明显的非线性特性,其刚度随着外载荷而变化,而自振频率基本保持不变,具有良好的减振效果。

(6) 节流孔的直径对空气弹簧的刚度、频率和阻尼系数有较大的影响,通过调节节流孔可以获得良好的阻尼效果。

## 参 考 文 献

- Giuseppe Quaglia, Massimo Sorli. Air suspension dimensionless analysis and design procedure[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(6):443~475.
- 郭荣生. 空气弹簧悬挂的振动特性和参数计算(上)[J]. 铁道车辆, 1992(5):1~6.  
Guo Rongsheng. Vibration characteristics and parameter calculation of air-spring suspension (1)[J]. Railway Vehicles, 1992(5):1~6. (in Chinese)
- ContiTECH Holding GmbH. ContiTECH air springs for commercial vehicles[R]. Hannover: ContiTECH Holding GmbH, 2001.
- 赵轶才,陶家念. 汽车悬挂用空气弹簧的设计研究[J]. 中国公路学报, 1992, 5(3):86~92.  
Zhao Yicai, Tao Jianian. Design and research of air spring for automobile suspension[J]. China Journal of Highway and Transport, 1992, 5(3):86~92. (in Chinese)
- Malin Presthus. Derivation of air spring model parameters for train simulatio[D]. Lulea: Lulea University of Technology, 2002.
- Toyofuku, Katuya. Study on dynamic characteristic analysis of air spring with auxiliary chamber[J]. JSAE Review, 1999, 20(3):350~355.
- 原亮明,宫相太,刘爽堃,等. 铁道车辆空气弹簧垂向动态特性分析方法的研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4):37~41.  
Yuan Liangming, Gong Xiangtai, Liu Shuangkun, et al. Study on vertical dynamic characteristics analysis method for railway vehicle air spring[J]. China Railway Science, 2004, 25(4):37~41. (in Chinese)

(上接第 17 页)

## 参 考 文 献

- Coey J M D. Permanent magnet applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 248(3): 441~456.
- 赵克中. 磁力驱动技术与设备[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
- Wallace A, Jouanne A Von, Ramme A, et al. A permanent magnet coupling with rapid disconnect capability[C]//Power Electronics, Machines and Drives. IEE. Conference, 2002: 286~291.
- 刘雪洪,刘梁. 一种永磁离合器:中国, 200720129993.8[P]. 2007-01-10.
- Caio Ferreira, Jayant Vaidya. Torque analysis of permanent magnet coupling using 2D and 3D finite elements methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(4): 3 080~3 082.