

硅钢片中的磁饱和状态对磁扭矩的影响

付香梅¹, 肖 勇², 邹政耀^{1*}, 陈 杰¹, 黄奕森¹

(1. 金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 南京工程学院机械工程学院, 江苏 南京 211167)

摘 要: 为了在驱动磁盘和输出磁盘相对转动时获得平稳的磁扭矩, 提出了一种月牙形永磁体代替输出磁盘中的扇形永磁体的方法。通过使用磁场仿真分析软件 Magnet 仿真计算了磁扭矩值, 发现选择 7 mm 厚硅钢片能获得较平稳的磁扭矩值。同时也研究了硅钢片局部存在磁饱和的状况, 并通过选择合适的月牙形永磁体偏心圆弧的圆心位置和半径, 获得了平稳的磁扭矩值。

关键词: 永磁滑差传动; 磁饱和; 磁扭矩; 波动值优化

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2019)02-0011-05

Effect of Magnetic Saturation State on Magnetic Torque in Silicon Steel Sheet

FU Xiang-mei¹, XIAO Yong², ZOU Zheng-yao^{1*}, CHEN Jie¹, HUANG Yi-miao¹

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: To obtain a smooth magnetic torque when the drive disk and the output disk were relatively rotated, a method of replacing the sector-shaped permanent magnets in the output disk with a crescent-shaped permanent magnet was proposed. The magnetic torque value was calculated by using the simulation software Magnet, and it was found that the selection of 7 mm thick silicon steel sheet could obtain a relatively stable magnetic torque value. The magnetic saturation of the silicon steel sheet was studied, and the smooth magnetic torque value was obtained by selecting the center position and radius of the eccentric arc of the appropriate crescent-shaped permanent magnet.

Key words: permanent magnet slip drive; magnetic saturation; magnetic torque; fluctuation value optimization

永磁传动技术的研究始于 20 世纪初^[1], 永磁齿轮能实现非接触传动和隔振, 其扭矩特性也被详细研究^[2]。为提高永磁传动机构的扭矩密度, 有一些新型的结构被提出且被详细讨论^[3], 但其传动比无法连续变化, 而能无级变化的传动比对汽车传动非常重要。为解决车用电控机械式变速器的起步和换挡问题, 重庆大学研究团队使用具有无级变速功能的行星齿轮和离合器组合机构(图 1)解决该难题, 例如把起步时间调整到 1.55 s, 在发动机与离合器从动盘同步转速接近 $700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 进行多次起步后离合器温升不明显, 滑磨功较小, 解决了传统 AMT 汽车起步离合器易烧蚀的问题, 提高了起步可靠性^[4]。本课题组提

收稿日期: 2019-03-21

基金项目: 金陵科技学院高层次人才科研项目(jit-rcyj-201701)

作者简介: 付香梅(1973—), 女, 河南浙川人, 讲师, 硕士, 主要从事机电一体化研究。

通信作者: 邹政耀(1973—), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士研究生, 主要从事车辆传动及节能研究。

出了一种永磁滑差传动机构,作为图 1 所示的行星齿轮机构中离合器的并行方案之一,该机构是兼有永磁联轴器优点和永磁齿轮优点的传动机构。前者的优点是传动效率高,后者的优点是传递扭矩值波动小、速比可变。具有两种工况的永磁传动机构,能拓宽永磁传动的范围,达到提高传动效率的目的。本机构提出了偏心圆弧切割扇形永磁体的方案,获得了主动件和从动件在相对转动角(以下简称相对转角) 90° 内的平稳磁扭矩,最大磁扭矩偏离值相对平均值的变化小于 3%。在研究过程中发现该机构中存在磁饱和现象,查阅文献后发现磁饱和现象在永磁电动机定子槽根部是常见的,且磁饱和和变压器就是利用磁饱和现象解决变压器输出高压保护的问题。开关磁阻电机在重载运行时,其低电感区相邻两相电感交点受磁路饱和影响小,在高电感区相邻两相电感交点受磁路饱和影响大,因此磁路饱和在开关磁阻电机中存在且被区分利用,从而能够高精度估算转子的速度和位置^[5]。

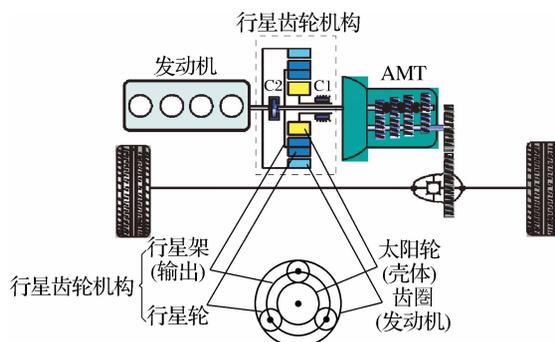


图 1 机械自动变速系统结构方案

北京理工大学 8AT 团队 2010 年成功开发了 8 挡自动变速器,2014 年开发了 13 挡自动变速器^[6],目前市场中配备 8 挡以上自动变速器的轿车发动机最高运行转速约 $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,这使得换挡时相邻两挡齿轮之间的转速差小于 $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,如再加上发动机调速,可以使得该转速差低于 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,大大减小了控制机构实现永磁滑动传动的控制难度。本文重点研究硅钢片厚度对局部磁场分布及磁扭矩值的影响。

1 磁路欧姆定律和毕奥-萨伐定律

计算和分析磁场常用的两个定律,分别为安培环路定律和磁通连续性定律,与磁路分析相关的是磁路的欧姆定律,即作用在磁路上的磁动势等于磁路内的磁通量乘以磁阻,类似于电路中的欧姆定律,磁阻的表达式如下:

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (1)$$

单位为 $\text{A}\cdot\text{Wb}^{-1}$ 。其中 l 为磁路的长度,单位为 m ; A 为磁路的截面积,单位为 m^2 ; μ 为相对磁导率,和材料有关。而本机构中的磁路难以划分为几个并联的磁路,也难以得到每个并联磁路的参数,且在驱动磁盘和输出磁盘相对位置改变时,磁路也发生了变化^[7]。相互作用的两个永磁体,根据安培环路定律,两个永磁体可以简化为永磁体外围形状的等效电流,根据一个永磁体的等效电流计算在另一个永磁体的等效电流位置的磁场,然后根据电流在磁场中的受力情况计算磁场力。用毕奥-萨伐定律计算一段微元电流在空间产生的磁场^[8]。但在本机构的磁扭矩计算中,使用该公式较难得到合适的结果,因此使用 Magnet 软件进行仿真计算。

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l}\sin\theta}{r^3} \times \vec{r} \quad (2)$$

其中,真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7}\text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$ 。

2 机构结构和性能

永磁滑差传动机构的主要构件为驱动磁盘和输出磁盘,其中驱动磁盘由驱动控制机构实现间隙驱动,

驱动磁盘通过磁场力驱动输出磁盘,两者是非接触传动。控制传动机构在驱动磁盘未传递动力给输出磁盘时,控制传动机构本身能存储一部分动能,在输出动力给输出磁盘时,同时也释放存储的动能,并且增加驱动磁盘自身的动能。图 2 所示机构在输出磁盘相对于驱动磁盘转动 90°时,其磁扭矩规律如图 3 所示。可以看出磁扭矩变化较大,则机构在滑差传动工况下将会产生较大振动。

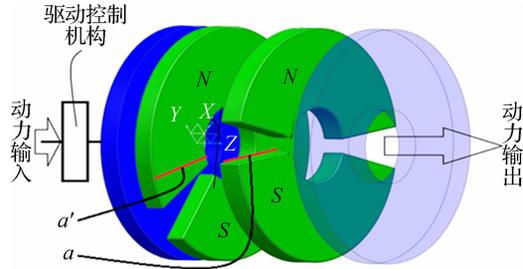


图 2 永磁滑差传动机构结构图

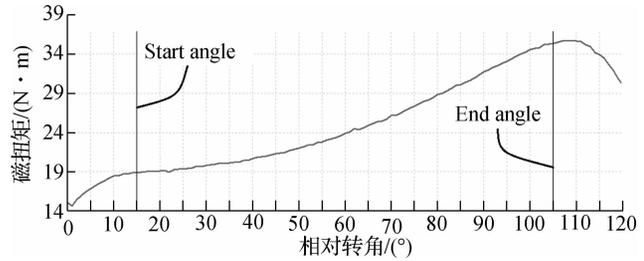


图 3 扇形永磁体对应的磁扭矩规律

为获得平稳的磁扭矩,把输出磁盘中的永磁体修改成如图 4 所示的月牙形结构,设定初步参数后,修改安装在永磁体侧面的硅钢片的厚度,观察磁扭矩随相对转角变化状况,其内径为 46 mm,外径为 130 mm, $\theta_1 = \theta_2 = 150^\circ, \theta_3 = \theta_4 = 30^\circ, \theta_5 = 10^\circ, \theta_6 = 25^\circ$ 。磁扭矩如图 5 所示。可以看出硅钢片厚度为 7 mm 时,在相对转角为 $0^\circ \sim 35^\circ$ 时磁扭矩变化不大,在 $35^\circ \sim 90^\circ$ 时,磁扭矩基本按线性规律随相对转角而变化,由仿真试验结果可知该参数情况下较容易通过改变月牙形状获得波动小的磁扭矩值。而当硅钢片为 8 mm 时,在改变月牙形状时,该角度范围的磁扭矩在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 为波动小的磁扭矩值,在相对转角为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 时对应的磁扭矩却会降低,后续研究发现很难通过改变月牙形永磁体的形状在相对转角为 $85^\circ \sim 90^\circ$ 时获得平稳的磁扭矩。而当硅钢片为 10 mm、相对转角为 $70^\circ \sim 90^\circ$ 时对应的磁扭矩已经有较大的下降,在改变月牙形状时,该角度范围的磁扭矩在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 为波动小的磁扭矩值,在相对转角为 $70^\circ \sim 90^\circ$ 时对应的磁扭矩却下降很大,较难在相对转角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时获得波动小的扭矩值。可以看出,当硅钢片厚度增加时,硅钢片处的磁阻减小,在气隙处磁场强度增加,能获得较大的平均磁扭矩,但很难获得平稳的磁扭矩。适当减薄硅钢片的厚度使得磁扭矩减小量较小,同时也能通过优化月牙形永磁体的形状获得平稳的磁扭矩。

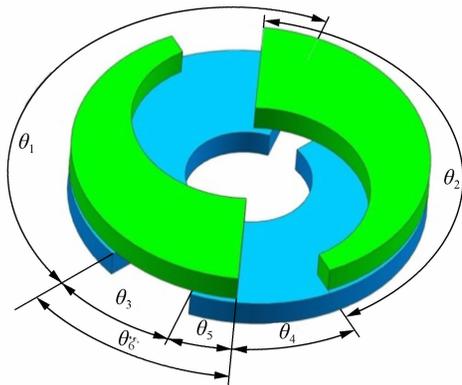


图 4 永磁体参数表示

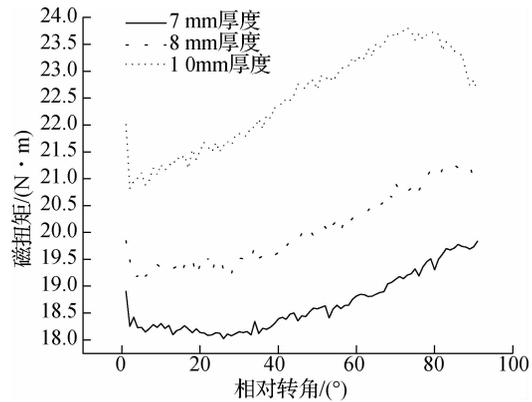


图 5 主动磁盘和从动磁盘的永磁体的磁扭矩

3 磁饱和状况的研究

改变硅钢片的厚度使得磁扭矩随相对转角变化的规律发生了变化,永磁体没有改变可以认为磁动势没有发生变化,变化的应该是磁路的磁阻,而在硅钢片中的磁通量分布情况随相对转角的变化是主要原因,因对硅钢片在相对转角为 45° 和 90° 时进行了静磁场分析。设计了硅钢片厚度在 7 mm 和 10 mm 时的磁场分布情况。磁饱和是导磁材料中出现的一个现象,当磁通密度过大时,导磁材料将不能再增加导磁量,因此随着磁通密度的增加,磁性材料增加导磁的性能将降低,趋向于空气的导磁性能。由图 6 可以看

出当硅钢片厚度为 7 mm 时,相对磁通密度较大的原因,主要是软件在有限元网格划分时存在一定的局限性,但在比较时具有参考价值。转角为 45° 时有一部分区域的磁通密度达 2.5 T,而硅钢片的饱和磁通密度为 2 T,这将会引起较大的铁损。但这个区域占硅钢片的面积较小,且滑差传动时间占总时间的比例较小,因此这些磁饱和是可以接受的。由图 7 知硅钢片厚度为 10 mm 时,其磁通密度就大幅降低,但其磁扭矩值随相对转角变化的规律就不太合适。

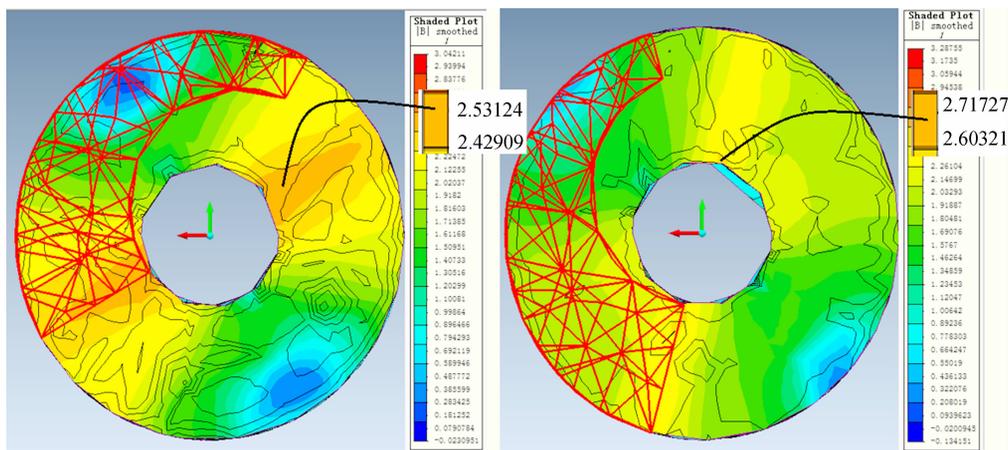


图 6 厚度为 7 mm 时,相对转角为 45° 和 90° 时最外层硅钢片中的磁场分布情况

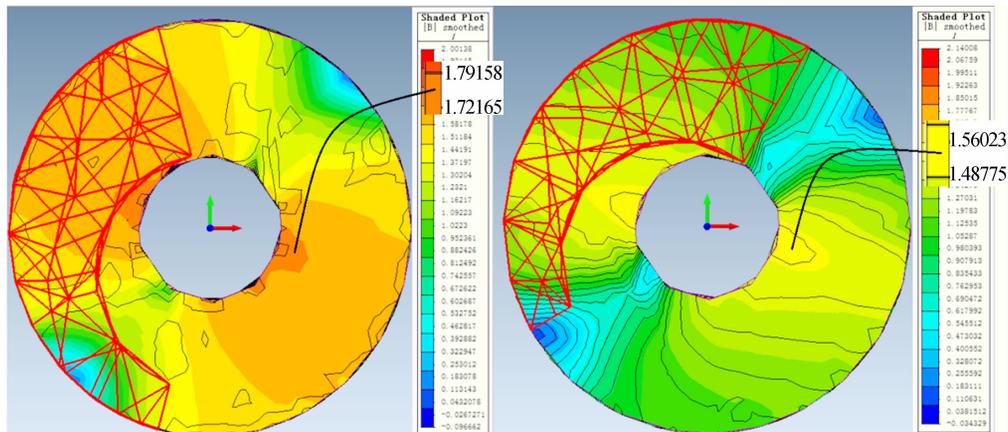


图 7 厚度为 10 mm 时,相对转角为 45° 和 90° 时最外层硅钢片中的磁场分布情况

选择硅钢片的厚度为 7 mm,试选多个月牙形永磁体,当偏心圆圆心为 15.8 mm,偏心圆弧的半径为 38.8 mm 时,仿真计算获得了图 8 所示的扭矩,此时磁扭矩值的波动较小。

4 结 语

当相对转角变化时要获得平稳的磁扭矩值规律,必须要选择合适的硅钢片厚度和月牙形永磁体参数,两者缺一不可,否则将缩小平稳磁扭矩值对应的相对转角范围,这不利用滑差传动的控制。

本文仅仅考虑了硅钢片厚度和偏心圆弧的圆心、半径对磁扭矩值平稳性的影响,后续还需要考虑永磁体的质量最小以达到降低成本的目的,考虑硅钢片的厚度以达到磁饱和出现的区域面积较小和质量较小,或者是面积与质量之间有一个最佳平衡值。

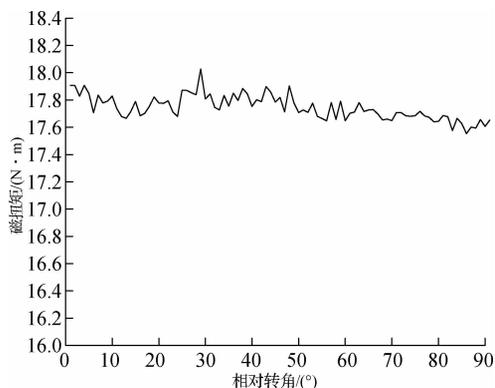


图 8 优选参数后的磁扭矩值

参考文献:

- [1] Arghya S, Suresh B. Evolution of transmission for EVs, HEVs: Potential for magnetic transmission[J]. Autotechreview, 2013, 21(5): 18 - 23
- [2] Yoshinori A, Masaru I, Iwanori M. Development of cylindrical magnetic gear prototype[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(4): 1397 - 1404
- [3] 孙建军, 张静. 一种漂浮式直驱波浪能发电装置的设计[J]. 金陵科技学院学报, 2018(1): 37 - 40
- [4] 胡建军, 冉洪亮, 陈佳, 等. 新型电控机械式自动变速器参数优化及性能研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 227 - 235
- [5] 蔡辉, 王辉, 李孟秋, 等. 考虑饱和电感特性的开关磁阻电机的无位置传感器控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2723 - 2734
- [6] Bhag S G, Huseyin R H. Electromagnetic field theory fundamentals[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 4
- [7] 汤蕴璆. 电机学[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2014
- [8] 徐向阳. 自动变速器行星变速机构方案优选理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 8

(责任编辑: 湛江)

本刊“工程技术”栏目稿约

《金陵科技学院学报》是国内外公开发行的自然科学学报, 曾获得“中国高校特色科技期刊”称号, 是江苏省一级刊物, 季刊, 每逢季末出版, 本刊的“工程技术”栏目是创刊以来的固定栏目。

本校正在建设高水平新兴应用型大学, 特长期向校内外征集以下学科的文章: 软件工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、信息与通信工程、控制科学与工程等。另外本栏目也包含建筑学、土木工程、机械工程、材料科学与工程等学科。本栏目学术性和专业性较强, 优先发表省部级以上基金项目的阶段性成果, 按质择稿, 优稿优酬。欢迎广大作者踊跃投稿, 我们将提供高效优质的服务, 快速审稿, 来稿必复。

《金陵科技学院学报》编辑部