

基于 Ansys Maxwell 的电磁式磁滞张力器仿真分析

王庆东,夏港东,秦浩杰,周文聪,张昊
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:介绍一种磁滞张力器的结构和工作原理,借助 Ansys Maxwell 软件的静态、瞬态场求解器对张力器的磁场分布进行了数值计算,得到了张力器内部的磁力线走向以及转子表面的磁感应强度分布云图,研究了电流、磁极相对角度、气隙等参数对磁滞转矩大小的影响。遵循单一变量原则,得出各影响因素在各自变化范围内的最优解,为后续对该类型张力器的设计制造与升级优化提供了依据。

关键词:电磁式;张力;磁滞转矩;仿真

中图分类号:TS103.8 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0124-04

Simulation and Analysis of Electromagnetic Hysteresis Tensioner Based on Ansys Maxwell

WANG Qingdong, XIA Gangdong, QIN Haojie, ZHOU Wencong, ZHANG Hao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The structure and working principle of a hysteresis tensioner is introduced. The magnetic field distribution of the tensioner, with the help of the static and transient field solver of Ansys Maxwell software, is numerically calculated, and the distribution cloud map of magnetic trend in tensioner and magnetic induction on rotor surface is obtained. The influence of current, magnetic pole relative angle, air gap and other parameters over the hysteresis torque is studied. By following the single variable principle, the optimal solution of each influencing factor within the range of variation is obtained, which provides the basis for the subsequent designing, manufacturing and optimization of the tensioners of the same type.

Keywords: electromagnetic; tension; hysteresis torque; simulation

0 引言

在纺织加工过程中,纱线张力是一个十分重要的参数,从纺纱到织造的各个工序,张力的稳定性和大小直接关系到产品质量、生产效率以及后续加工的顺利进行^[1]。因此,纱线张力器成为控制纱线张力必不可少的装置。

目前市售的纱线张力器以机械式为主,常见的有空气阻尼式以及油阻尼式,如图 1 所示^[2]。相比较而言,传统的机械式纱线张力器往往具有结构简单、维修和操作方便等诸多优点,然而其缺点也尤为明显,如:1) 张力控制精度低,一致性差;2) 张力器工作过程中始终与纱线产生摩擦,容易损伤纱线;3) 自动化程度低,无法由计算机进行控制。

为满足纺织行业不断提高的标准要求,纱线张力器逐渐朝着自动化、智能化方向发展。近年来国外出现了一种高档纺织机械——电磁式磁滞纱线张力器^[3-5]。相较于传统机械式张力器而言,该张力器的最大特点是可以由计算机对纱线张力进行实时的、连续的调节。由于采用计算机进行控制,既可以灵活地对单根纱线的张力进行控制,也可以实现大范围的群控^[6]。此外,该张力器还可以连接到非接触式张力监测系统,从而实现对纱线张力的闭

环控制,因而具有广阔的应用前景^[7]。本文立足于国内外相关理论研究成果,借助有限元分析方法对该类型张力器的特性进行研究,为其日后在国内市场的广泛应用奠定了基础。

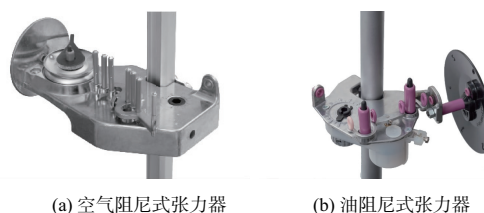


图 1 常见纱线张力器

1 电磁式磁滞张力器的结构及原理

电磁式磁滞张力器是基于电磁阻尼原理实现对纱线张力控制的^[8],其结构如图 2 所示。外部静壳体 8 将整个结构包裹在内,形成封闭的磁回路并同时隔绝外部磁场的干扰。磁芯 5 由具有高磁导率的软磁材料制成,聚集内部的磁场能量。转轴 7 在滚珠轴承 3 的支撑下,一端与抱线轮 1 固连,另一端通过法兰与转子 6 连接。励磁线圈 4 均

匀缠绕在线圈架上并将磁芯 5 包含在内侧。张力器工作时,线圈 4 通电,抱线轮在纱线的主动牵引下转动。另一端,由磁滞材料制成的转子 6 作为耗能元件被动旋转,消耗磁场能量,产生阻碍纱线运动的磁滞转矩,使纱线受到张力作用^[9]。调整线圈 4 两端电压的大小即可改变磁滞转矩,实现对纱线张力大小的调节。线圈未通电时,转子在磁芯 5 间自由旋转,其阻力仅来源于轴承 3 处的摩擦力。

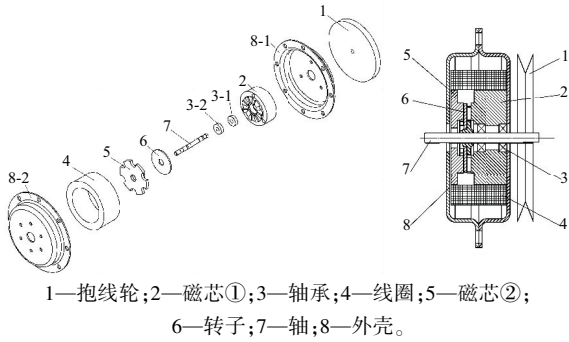


图2 电磁式磁滞张力器结构图

该张力器的具体性能要求如表 1 所示。

表 1 张力器的性能要求

名称	具体参数
输出力矩/($\text{mN} \cdot \text{m}$)	10~30 范围内线性可调
力矩性质	力矩恒定
工作转速/(r/min)	1 000

2 仿真模型的建立

分析电磁场问题时传统的方法是从模型中抽象出一个等效的磁路,再采用解析的方法分析其磁场。由于电磁式磁滞张力器的磁路较为复杂,这使得利用解析法研究其磁场较为困难^[10],而有限元法的广泛应用为解决该类问题提供了极大的便利。本文以课题组研制的一款电磁式磁滞张力器为例,利用 Maxwell 软件对该张力器进行仿真分析^[11]。

由于张力器的结构不具有空间对称性,无法将三维磁场计算问题转化为二维来处理,因而需要建立完整的三维有限元模型^[12]。此外,为降低问题分析的复杂性,作出以下假设^[13-14]。

- 1) 忽略转子的涡流效应和软磁材料(定子磁芯及外壳)的磁滞损耗;
- 2) 转子的转速保持不变;
- 3) 励磁绕组由空心圆柱体等效替代,绕组内部电流密度分布均匀。

张力器的主要参数如表 2 所示,相关参数定义如图 3 所示。定子磁芯及外壳均选择具有高磁导率的电工纯铁 DT4,励磁线圈定义为铜材料 copper,选择 FeCrCo 材料作为转子材料并在软件内部将其定义为磁滞型材料。软件内部自带的材料库中并不包含 DT4 和 FeCrCo 材料,需要

从外界导入两种材料的 $B-H$ 曲线。由于忽略了涡流效应的影响,两种材料的电导率均设为 0。线圈绕组安匝数设为 342 A,指定求解域属性为空气。在瞬态场分析模块中,还需要额外定义运动区域 band,将转子包含在内,并设置其绕 z 轴转速为 1 000 r/min 。此外,设置仿真时长为 20 ms,计算步长为 0.2 ms。

表 2 张力器的主要参数

转子外径 R_2/mm	转子内径 R_1/mm	转子厚度 Δ/mm	气隙大小 L_g/mm	磁极高度 H/mm	磁极角度 $\alpha/(\text{°})$	磁极个数 p
15.75	4	1.4	0.4	1.7	7	8

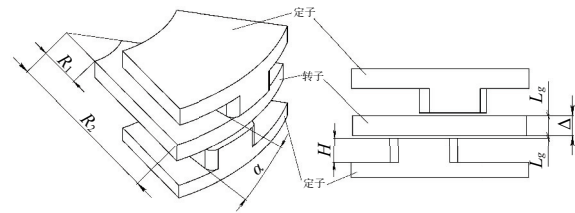


图3 相关参数定义

3 仿真结果

借助 Maxwell 软件的静态磁场求解器,通过数值计算,得到了张力器内部磁感应强度分布,如图 4 所示。从图中可以看出,磁力线主要集中在张力器内部的磁性材料上,并依次穿过定子磁极、气隙、转子最终汇聚于张力器外壳,形成一个封闭的内部磁回路。图 5 为转子表面磁感应强度分布云图。

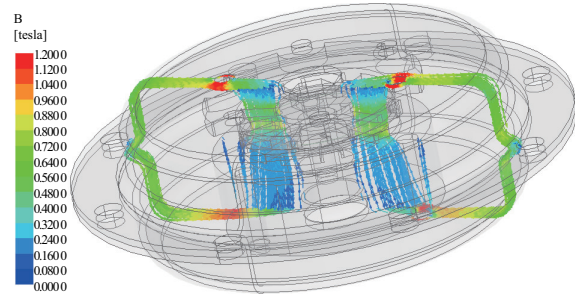


图4 张力器磁感应强度分布及磁力线走向

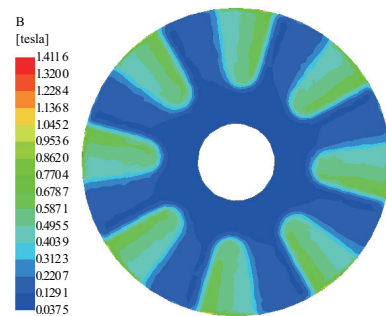


图5 转子表面的磁感应强度分布云图

图 6 所示为磁滞张力器的转矩输出曲线。从图中可

以看出,输出转矩在初始时刻有轻微震动,随着时间的推移,磁滞转矩的数值波动减小,趋于稳定,并最终稳定在 32 mN·m 左右,符合预期要求。

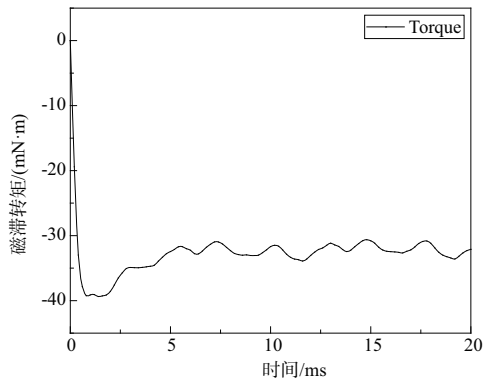


图 6 磁滞转矩随时间变化曲线

3.1 气隙对磁滞转矩的影响

保持表 1 中其他参数不变,仅改变气隙大小,得到图 7 所示磁滞转矩与气隙的关系曲线。从图中可以看出,随着气隙的增加,磁滞转矩急剧减小。由图 2 可知,张力器的磁传导回路主要包含定子磁芯、气隙、转子以及外壳。而定、转子以及外壳都是由磁性材料制成的,其相对磁导率要远高于空气磁导率,故而磁场能量主要损失于气隙中。因此,在磁动势大小一定的情况下,磁回路中的气隙越大,其中的磁场能量损失也就越大,转子的磁通密度也必然减小,从而导致磁滞转矩减小。因此,理论上减小气隙可以提高磁滞转矩,但过小的气隙会对机械加工和装配提出更高的精度要求,使得零件的加工难度加大,特别是对转子的加工精度要求更高^[15]。故而需要综合考虑各方面因素,选择合适的气隙大小。

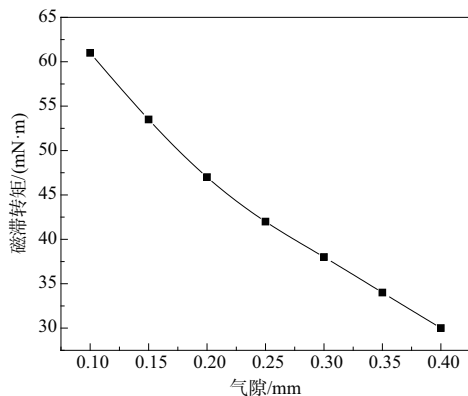


图 7 气隙对磁滞转矩的影响

3.2 电流对磁滞转矩的影响

电流的大小是影响电磁式张力器磁滞转矩大小的重要因素。张力器工作时,需要根据实际需要将电流设定在特定的数值。基于表 1 中的结构参数在不同气隙大小下进行计算,得到了如图 8 所示的关系曲线图。从图中可以得出,在不同气隙大小下磁滞转矩随电流变化规律基本保

持一致。当电流较小时磁滞转矩增加缓慢,而随着电流的不断增大,磁滞转矩显著增大并与电流近似维持着线性关系。当电流超过一定范围后,磁滞转矩的增加幅度趋于平缓,其原因在于随着电流的增加,磁性材料的磁感应强度也趋于饱和,不再随着电流的增大而增大,增加的电流对转矩的影响很小。从图中可以看出,电流在 30~70 mA 范围内,磁滞转矩与电流之间有着良好的线性关系,磁滞转矩可以达到 40 mN·m,符合设计要求。

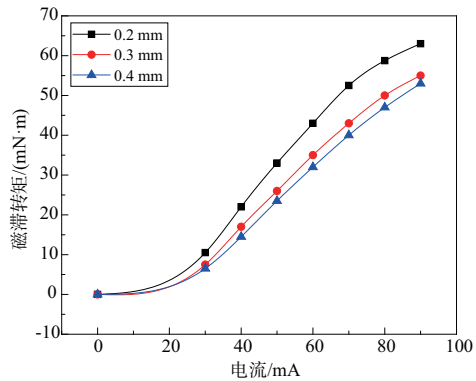


图 8 磁滞转矩与电流关系图

3.3 磁极相对角度对磁滞转矩的影响

张力器的定子磁芯由两部分组成,且分别置于转子两侧,如图 2 所示。两定子磁芯的端面均有若干齿形磁极,张力器装配时,两齿形磁极之间一般错开一定角度,磁极间相对错开角度 α 定义如图 3 所示。保持表 1 其他参数不变,在多组气隙下对张力器在不同磁极相对角度下进行仿真计算,可以得到磁极相对角度与磁滞转矩的关系,如图 9 所示。

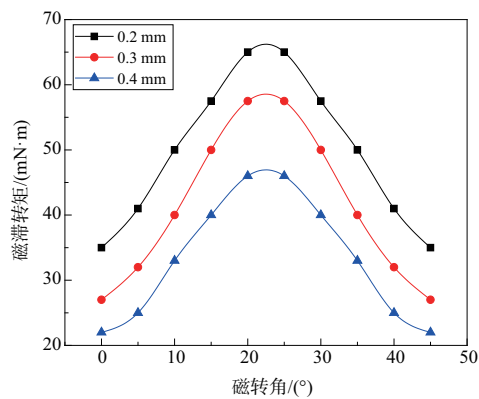


图 9 磁极相对角度对磁滞转矩的影响

定子磁极端面的齿形磁极沿周向等距排列,磁极个数为 8 时,相邻两磁极间的相对角度 $\theta = 45^\circ$ 。图 9 中,在角度 $\alpha < \theta/2$ 时,磁滞转矩随着相对角度的增加而不断增大,而当 $\alpha > \theta/2$ 时,磁滞转矩逐渐减小。在 $\alpha = 45^\circ$ 时,两磁极重合,其磁滞转矩大小与起始位置相等。转子表面的磁密 B 可以分解成径向 B_r 和切向 B_t 两部分,而 B_t 是影响磁滞转矩大小的主要因素。在一定范围内, α 增大,切向磁密 B_t 也随之增大,而超过一定范围后 B_t 反而减小。因此出现了图 9 所示的关系曲线。

3.4 转子厚度对磁滞转矩的影响

在保证其他参数不变的情况下,随着转子厚度的增加,气隙逐渐减小,这就使得转子磁感应强度增大,磁滞转矩也随之增大,如图 10 所示。然而,随着转子厚度的不断增大,磁阻和漏磁也在增加,在厚度超过一定范围以后,转子中增加的磁势反而消耗在转子内部的损耗上,对磁滞转矩的影响降低。

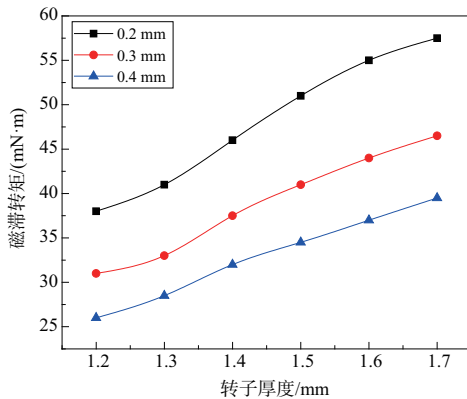


图 10 转子厚度对磁滞转矩的影响

3.5 磁极个数对磁滞转矩的影响

改变磁极个数并在多组气隙大小进行数值计算,得到了图 11 所示的关系曲线。磁极个数较少时,转子的磁通密度低,从而产生的磁滞转矩也较小。随着磁极个数的增加,磁滞转矩迅速增大。然而,磁极个数增加时,各个磁极的漏磁也随之增加,超过一定范围后,磁滞转矩反而随着磁极数目的增加而减小。计算结果表明,在磁极个数为 10 时磁滞转矩达到最大。

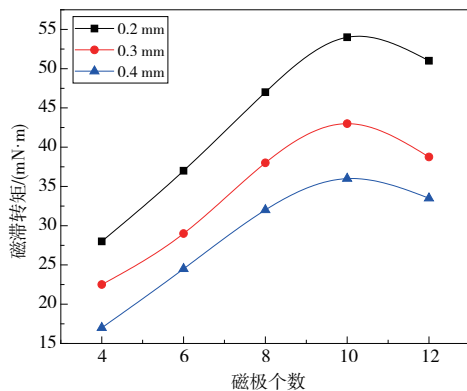


图 11 磁极个数对磁滞转矩的影响

4 结语

由以上仿真结果表明:

1) 电流是影响磁滞转矩大小的关键因素。磁滞转矩与电流的关系曲线中有一段近似线性的区间,也是张力器的最佳工作区间,且满足在 10~30 mN·m 范围内线性可调的设计要求。

2) 气隙大小的选择关系到张力器的最终性能。同时,过小的间隙也会对零部件加工精度和装配提出更高的要求。因此,需要综合考量这两方面的要求,选择大小合适的空气间隙。

3) 磁极的相对角度和磁极个数是影响磁滞转矩另一重要因素。计算结果表明,在相对角度 $\alpha = 22.5^\circ$ 、磁极个数 $p = 10$ 时输出转矩接近 60 mN·m,极大地拓宽了张力器的线性可调范围。

4) 转子厚度的增加对磁滞转矩有着明显的影响,但厚度的增加也使得转子的转动惯量增加,因而在设计时需要额外考虑动力学方面的影响。

电磁式张力器是一种精密纱线张力控制器。本文借助 Ansys Maxwell 软件研究了不同结构参数对张力器性能的影响,证明了通过有限元方法研究该类型张力器的可行性,也为日后的设计制造和升级优化奠定了基础。

参考文献:

- [1] 熊秋元,高晓平. 纱线张力检测与控制技术的研究现状与展望[J]. 棉纺织技术,2011,39(6):65-68.
- [2] 尹铭泽,张昊,缪宇轩,等. 电磁式张力器的结构设计和张力测试[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):178-181,187.
- [3] 石钢,吕明. 磁滞卷绕张力器阻力矩产生机理[J]. 轻纺工业与技术,2015,44(4):28-32.
- [4] 王红军. 卡尔·迈耶:适用于细纺纤长丝的新型纱线张力器[J]. 国际纺织导报,2014,42(8):34.
- [5] 贺娟. 卡尔·迈耶:AccuTense 纱线张力器[J]. 国际纺织导报,2008,36(6):40-42.
- [6] 石钢,吕明. 论纺织工程张力控制技术发展路线图[J]. 纺织导报,2011(5):105-108.
- [7] 谢正权,王新厚. 非接触式纱线卷绕张力动态检测方法的研究[J]. 中国测试,2009,35(4):111-114.
- [8] 曹霞. 电磁式纱线张力器原理及动态性能测试分析[J]. 纺织机械,1997(6):24-26.
- [9] SHI G, LV M, HUANG Y L, et al. Analysis of the electromagnetic characteristics and study on measuring the hysteresis torque experiment for the yarn tensioner[J]. Advanced Materials Research, 2012, 347/348/349/350/351/352/353: 22-26.
- [10] 林其壬,赵佑民. 磁路设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- [11] 赵博. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [12] 陈东,范帅. 基于 Maxwell 的盘式制动器辅助电磁制动装置的有限元分析[J]. 新技术新工艺,2013(9):32-35.
- [13] GARGANEEV A G, KYUI D K, SIPAYLOVA N Y, et al. Simulation of hysteresis clutches in Ansys Maxwell[C]//2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Erlagol (Altai Republic), Russia: IEEE,2019:731-734.
- [14] 孔繁余,王志强,张洪利,等. 磁力泵磁性联轴器的磁场分析及性能计算[J]. 磁性材料及器件,2009,40(3):24-27,31.
- [15] 郑劭,李言,尚军,等. 一种微型精密磁滞张力器的设计开发[J]. 机械科学与技术,2011,30(9):1431-1434.

收稿日期:2020-11-27