

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.02.017

电磁平衡头齿盘齿形参数对自锁力矩的影响研究*

梁警威^{1,2}, 刘保国^{1,2*}, 申会鹏^{1,2}

(1. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南工业大学
河南省超硬磨料磨削装备重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:针对电磁主动平衡头自锁力矩问题,通过大量仿真分析的方法,得出了磁盘参数对自锁力矩的影响规律。首先,根据磁路自锁原理,针对特定结构,将自锁磁路简化为由磁盘、永磁体和支撑环 3 个零件构成的结构并建立了三维模型;其次,借助有限元分析的方法,通过改变单一变量,分别计算了齿盘上不同齿数、齿长、齿边距、齿张角对自锁力矩峰值的影响;最后,对仿真结果进行了分析,得出了 4 种参数的设计优化方法。研究表明:自锁力矩峰值随齿数的增加呈抛物线式大幅增大;自锁力矩峰值随齿长的增大而增大;齿边距和永磁体直径的比值在 0.01~0.03 之间时,自锁力矩峰值能取得较大且相对稳定的值;齿张角为 15°时,自锁力矩峰值较大且设计计算、加工方便。

关键词:电磁平衡头;永磁自锁力矩;齿形参数

中图分类号:TH113.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)02-0245-05

Research on influence of tooth profile parameters of electromagnetic balance head on self-locking torque

LIANG Jing-wei^{1,2}, LIU Bao-guo^{1,2*}, SHEN Hui-peng^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory for Superabrasive Grinding Equipment, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problem of self-locking torque of the electromagnetic active balancing head, a large number of simulation analysis methods were adopted, the influence law of the disk parameters on the self-locking torque was obtained. Firstly, based on the principle of magnetic circuit self-locking, aiming at the specific structure, the self-locking magnetic circuit was simplified into a structure composed of three parts of magnetic disk, permanent magnet and support ring and a three-dimensional model was established. Secondly, by means of finite element analysis and with the change of single variables, the influence of different teeth number, tooth length, tooth margin, tooth angle on the peak value of self-locking torque was calculated respectively. Finally, the simulation results were analyzed to obtain four parameters of the design optimization method. The research results show that the peak value of self-locking torque increases parabolically with the increase of the number of teeth. The peak value of self-locking torque increases with the increase of the tooth length. When the ratio of tooth margin to permanent magnet diameter is between 0.01~0.03, the peak value of the self-locking torque can obtain a large and relatively stable value. When the tooth opening angle is 15°, the peak value of the self-locking torque is large and the design calculation and processing are convenient.

Key words: electromagnetic balance head; permanent magnet self-locking torque; tooth shape parameter

收稿日期:2020-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1604254);河南工业大学校基金资助项目(2018QNJH18)

作者简介:梁警威(1992-),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事转子动平衡方面的研究。E-mail:1003441301@qq.com

通信联系人:刘保国,男,教授,硕士生导师。E-mail:bgliu1978@sina.com

0 引 言

随着高档磨床向高速化、精密化及智能化方向的发展,磨削精度和磨削效率都有了大幅度的提高,为了适应磨削精度和磨削效率,磨床对主轴转速、动态性能提出了更高的要求。而电主轴具有转速高、结构紧凑及动态性能好的优点^[1],高档磨床的主轴一般选用电主轴。在磨床使用过程中,砂轮的磨损不均匀和切削液的分布不均匀都会导致砂轮的质量分布不均匀。尤其在高速磨削时,砂轮上微小的不平衡量都会引起极大的离心力和系统振动,进而导致磨削精度下降、加工质量不稳定等现象产生。为解决此类问题,需对砂轮-电主轴系统进行动平衡^[2-4]。传统的现场动平衡和机上动平衡技术由于平衡需要停机,严重影响了加工效率,已不能满足现代化生产需求^[5],而主动平衡方法具有不停机、平衡精度高、平衡时间短等优点,已经成为了最具发展潜力的平衡技术^[6,7]。

国外以德国 Hofmann 公司^[8]和美国 Schmitt Industries 公司^[9]为代表的电磁平衡系统产品已在高端机床上应用,但因价格过于高昂,尚未大量推广。国内从 20 世纪 90 年代末开始,浙江大学、国防科技大学、北京化工大学、中北大学、北京工业大学和西安交通大学等单位的多位学者相继开展过这方面的研究,并试制出了多种自动平衡装置,包括机械式^[10]、喷液式^[11-12]和电磁式^[13-15]等。其中电磁式主动平衡系统由于具有执行系统和控制系统不接触、轴向长度短、响应快等优点,受到了广泛关注。该系统主要包括检测系统、控制系统和电磁主动平衡头,其中电磁主动平衡头作为产生平衡质量对电主轴进行在线动平衡的关键部件,其内部质量块在高速旋转状态下的自锁稳定性决定了平衡系统的可靠性。而质量块的自锁主要靠转子上 N、S 交替排列的永磁体和定子齿盘构成的磁路实现。由此可见,磁路的自锁力矩对平衡的效果起到了至关重要的作用。

目前关于电磁平衡头自锁力矩的研究,主要集中在永磁体和齿盘的气隙^[16]、齿盘的厚度和材料^[17]、永磁体的尺寸和型号^[18]等参数上。由于齿盘磁化曲线具有很强的非线性以及该结构下存在的几何非线性,理论方法难以求解,当需要计算多组参数时,实验周期长且成本高,因此现有的研究方法主要是有限元分析法。

本文在已有研究的基础上,采用有限元分析方法,主要开展电磁平衡头齿盘齿形参数对自锁力矩的影响研究工作,研究齿盘齿数、齿长、齿边距和齿张角等参

数对自锁力矩的影响规律,为该平衡头中齿盘的研发设计提供有力的科学依据,为实现高可靠性的电磁式主动平衡系统提供数据支撑。

1 有限元分析模型建立

电磁主动平衡头的机械结构主要包括动环和静环,齿盘和永磁体安装在动环上,永磁体 N、S 极交替排布安装在配重盘上,并夹在两个齿盘中间,每相邻的两个永磁体和对应齿构成自锁磁路。

根据平衡头结构,为便于计算简化细节特征,建立自锁磁路的几何模型如图 1 所示^[19,20]。

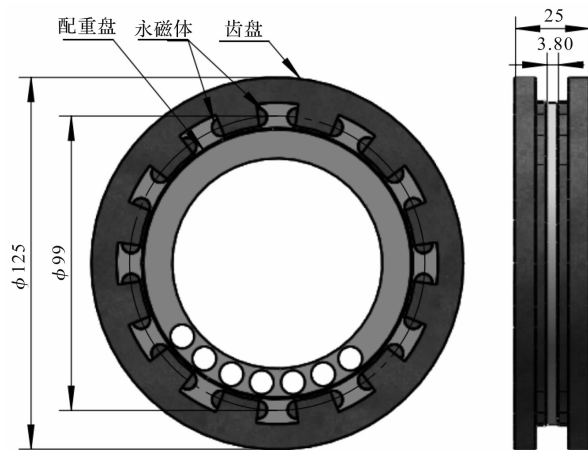


图 1 自锁磁路的几何模型(12 齿)

在图 1 中几何模型基础之上,笔者利用 ANSOFT MAXWELL-3D 平台进行自适应网格划分,施加磁场自然边界条件,形成自锁磁路的物理模型;调用其瞬态求解器分析计算,研究永磁体和齿盘在相对旋转时不同转角下的力矩值。其中,相对转速为 12.5 r/min²,求解步长为 1 ms。

所要研究的结构参数齿数、齿长、齿边距和齿张角代表的含义如图 2 所示。

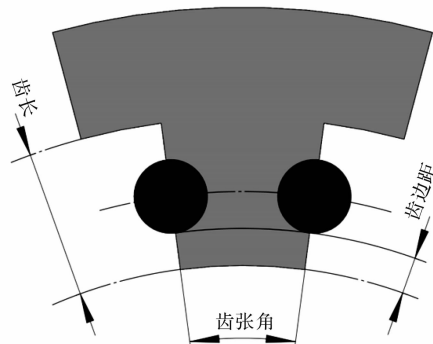


图 2 齿形结构参数示意图

在分析各种齿形参数对自锁力矩影响时,为了增加计算数据间的可对比性,始终保持不变的结构尺寸、

材料等参数如表1所示。

表1 结构尺寸与材料

结构名称	结构参数
永磁体材料	NdFeB35M
配重盘材料	06Cr19Ni10
齿盘材料	10号钢
齿节圆直径/mm	$\phi 99$
齿盘外径/mm	$\phi 125$
齿盘厚度/mm	10.45
永磁体直径/mm	$\phi 6$
永磁体长度/mm	3.8
气隙长度/mm	0.15

2 齿数对自锁力矩的影响规律

齿数决定着平衡头的最小步距角,进而决定着平衡头的调节精度,是进行动环设计时首先要确定的参数之一,因此研究齿数和自锁力矩的关系对研发设计工作有重要参考和指导意义。在研究齿数时,根据图1中结构取齿长为永磁体直径的1.3倍(7.8 mm),每个齿和齿槽角度相等,逐步增加节圆直径(永磁体所在中心圆直径)上的齿数。

考虑到任意相邻齿需构成磁路和步距角范围,齿数取偶数个且齿数不能太少,笔者在此前提下依次分析了齿数分别为8、10、12、14、16、18、20时磁路自锁力矩随角度的变化,瞬态值曲线如图3所示。

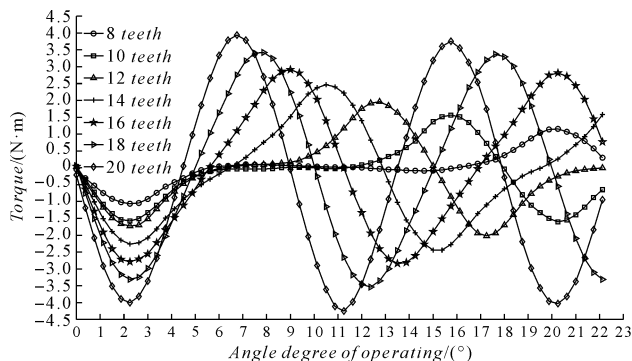


图3 不同齿数下力矩值随角度的变化曲线

图3结果表明:随着齿数由8增大到20自锁力矩峰值从1.16 N·m增大到4.24 N·m,步距角由45°减小到18°,即随齿数的增大自锁能力和自锁稳定性大幅提高。

进一步从曲线中计算出自锁力矩峰值和齿数的关系,考虑到齿数为0时自锁力矩峰值一定为0,因此须在自锁力矩峰值和齿数关系中增加坐标点(0,0)作为自然边界条件。利用最小二乘法对离散点进行二次拟合,拟合曲线的多项式为:

$$T = 0.0054n^2 + 0.1n + 0.01 \quad (1)$$

式中: T —自锁力矩峰值; n —齿盘齿数。

拟合曲线如图4所示。

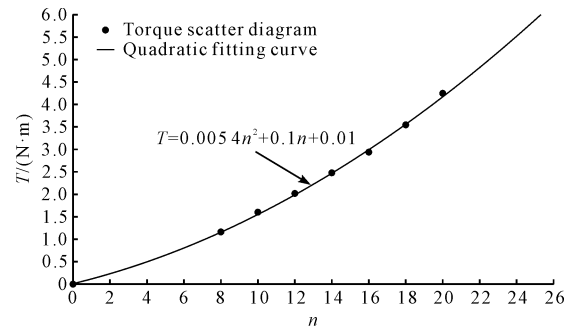


图4 不同齿数下的自锁力矩峰值

图4结果表明:拟合曲线较好地反映了散点分布规律,拟合曲线和拟合点之间残差范数仅为0.107,即自锁磁路提供的扭矩峰值是齿数的二次函数。

由于齿数增大的同时,永磁体数也在以齿数二倍的数量增大,还需进一步考察齿数增加的同时每对永磁体提供的力矩变化情况,即单对永磁体的利用率。

根据齿数和自锁力矩峰值关系计算出不同齿数下每对永磁体提供的自锁力矩峰值如表2所示。

表2 不同齿数下每对永磁体所提供的扭矩

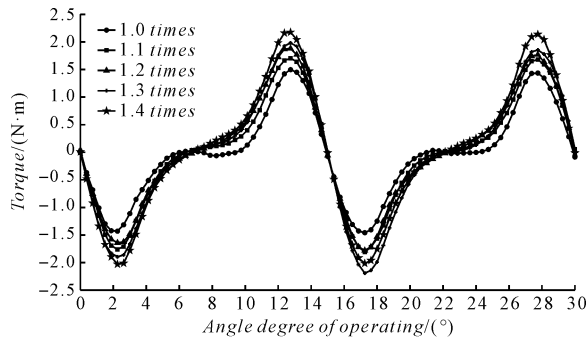
齿数	每对永磁体扭矩/(N·m)
8	0.145
10	0.160
12	0.168
14	0.177
16	0.183
18	0.197
20	0.212

从表2中可以看出:齿数由8增大到20时,每对永磁体提供的自锁力矩峰值由0.145 N·m增大到0.212 N·m,永磁体利用率增幅达68%。因此,建议在空间结构允许的情况下尽量增加齿数,以减小平衡头的最小步距角和增大自锁力矩峰值及永磁体的利用率。

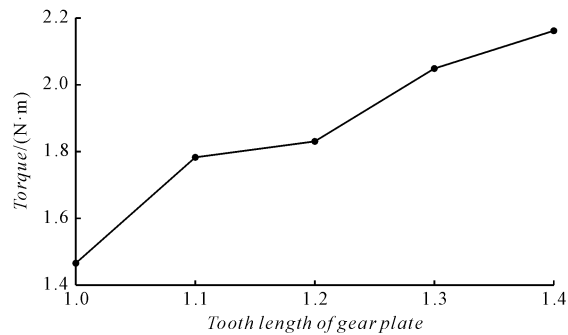
3 齿长对自锁力矩的影响规律

齿长为齿顶圆和齿根圆的间距,其对自锁力矩也有重要影响。本文分析齿长使用的结构如图1所示,以齿数为12齿、齿张角和齿槽角均分相等、永磁体边缘和齿顶弧线相重合的结构为前提,通过计算得出了齿长分别为永磁体直径的1、1.1、1.2、1.3、1.4倍(由于配重盘需要足够的尺寸,以保证平衡头的平衡范围,齿长不宜过长)时在两个完整步距角下的自锁力矩瞬态曲线。

不同齿长下力矩值随角度的变化曲线如图 5 所示。



(a) 不同齿长下自锁力矩瞬态曲线



(b) 不同齿长下自锁力矩峰值曲线

图 5 不同齿长下力矩值随角度的变化曲线

图 5 结果表明,自锁力矩和自锁力矩峰值在不同齿长下变化明显,自锁力矩峰值随齿长尺寸的增大而增大,合理的齿长,可使自锁力矩峰值提高约 50%,因此设计齿盘时,在结构允许的条件下,应尽量增大齿长尺寸。

4 齿边距对自锁力矩峰值的影响规律

研究齿边距对自锁力矩峰值的影响规律时保持永磁体内边缘到齿根圆弧处长度为永磁体直径的 1.3 倍。

为了便于研究同永磁体的关系,本文把齿边距和永磁体直径的比值作为自变量,计算了自变量从 0 ~ 0.35 之间,步长为 0.01 的自锁力矩峰值随齿边距的变化关系,结果如图 6 所示。

图 6 结果表明,齿边距的相对值在 0 ~ 0.35 之间变化时,自锁力矩峰值变化范围为 1.89 N·m ~ 2.17 N·m。齿边距的功能主要是辅助导磁,长度不宜过大,综合考虑导磁性能和加工能力,齿边距值尽量选择力矩值较大且变化平缓的区域,如图中的 0.01 ~ 0.03 之间,即取齿边距为 0.06 mm ~ 0.18 mm 较为合理。

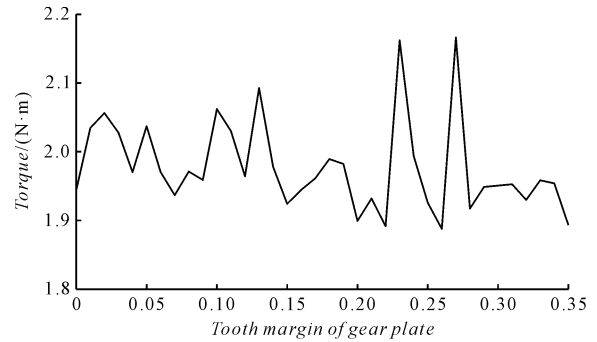


图 6 不同齿边距下的自锁力矩峰值

5 齿张角对自锁力矩峰值的影响

为增强可对比性,本文在改变齿张角时保证两边与节圆交点中间的弧长不变。为便于分析不同齿张角下的力矩值变化,笔者分别将三角齿、矩形齿和梯形齿的齿边夹角定义为负角度,0 角度和正角度,3 种齿的形状示意图分别如图 7 所示。

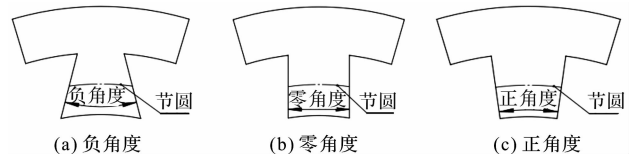


图 7 3 种齿形张角形式

在考虑齿根强度和尽可能减少齿间相互干扰的前提下,分析了齿张角范围从 -15° ~ 75° 之间的角度值对自锁力矩峰值的影响,结果如图 8 所示。

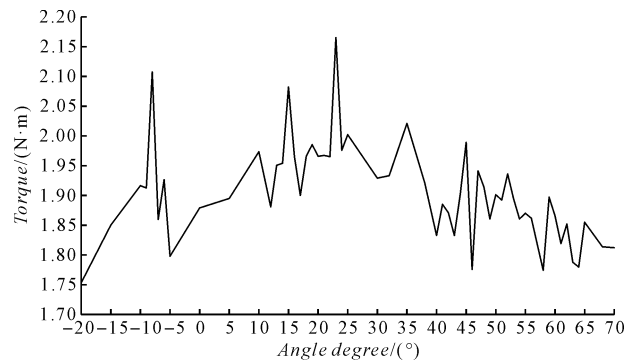


图 8 不同齿张角下的自锁力矩峰值

图 8 结果表明:同等结构条件下,齿张角对自锁力矩峰值影响较大,齿张角值在 -20° ~ 70° 之间变化时,自锁力矩峰值变化范围为 1.75 N·m ~ 2.16 N·m。根据自锁力矩峰值从图中得出较优角度值,分别为 -8°、15°、23°,由于在齿张角为 15° 时,齿张角和齿槽角均分相等,齿边线呈放射状,设计计算和加工较为方便,因此建议齿张角为 15°。

6 结束语

在特定结构下,本文根据电磁平衡头的结构和原理,建立了自锁磁路几何模型和有限元物理模型,分别研究了齿数、齿长、齿边距、齿张角对自锁力矩影响规律,得出结论如下:

(1) 自锁力矩峰值随齿数的增加呈抛物线式大幅增大,同时永磁体利用率呈增大趋势,建议设计齿盘时应尽量增加齿数;

(2) 自锁力矩峰值随齿长的增大而增大,合理选择齿长,可使自锁力矩峰值提高约 50%,建议设计时应尽量增加齿长;

(3) 自锁力矩峰值在齿边距为永磁体直径的 0.01~0.03 倍之间时较大且变化相对平稳,建议设计时齿边距尺寸可优选在该区间内参数;

(4) 自锁力矩峰值在齿张角为 15° 时自锁力矩值较大且设计计算和加工方便,建议设计齿盘时可将齿张角值选为 15°。

参考文献(References):

- [1] 马 帅,伞红军,吴智恒,等. 高速电主轴技术综述[J]. 机械制造,2014,52(597):16-19.
- [2] JACKSON M J, DAVIS C J, HITCHINER M P. et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels-applications and future technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 110(1):78-88.
- [3] XIONG Wan-li, YANG Xue-bing, LU Lang, et al. Review on key technology of hydrodynamic and hydrostatic high-frequency motors-pindles [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9):1-17.
- [4] DYER S W. Adaptive optimal control of active balancing systems for high-speed rotating machinery[D]. Ann Arbor, : University of Michigan Rackham School of Graduate, 1999.
- [5] 白彩波,孙 长. 高速主轴在线动平衡技术综述[J]. 现代制造工程,2011(12):112-117.
- [6] ZHANG Shi-hai, WU Liang-sheng, TENG Xiao-bin. Research on double-face online dynamic balance technology of machine tool spindle[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, (44-47):112-116.

- [7] 樊红卫,景敏卿,刘 恒. 主动混合式砂轮-电主轴系统自动平衡装置研究综述[J]. 振动与冲击,2012,31(5):26-30.
- [8] 德国霍夫曼公司. 电磁环形平衡器[EB/OL]. [2011-6-30]. <http://www.hofmann-balancing.co.uk/products/active-balancing-systems>
- [9] 美国斯密特工业公司. 电磁环形平衡器[EB/OL]. [2011-6-30]. <http://www.hb-tec.com/product/list.phpcatid=3>.
- [10] 顾超华,曾 胜,罗迪威,等. 一种机械式在线平衡头的设计与实验研究[J]. 振动与冲击,2014,33(12):151-155.
- [11] 李 燕,王维民,黄立权,等. 基于蠕动泵的注排液式转子自动平衡实验研究[J]. 振动与冲击,2011,30(4):38-41.
- [12] 章 云,梅雪松,胡振邦,等. 注液式高速切削主轴动平衡装置设计及其性能研究[J]. 西安交通大学学报,2013(3):13-17,23.
- [13] SUN Y R, HE L D. Study on online elimination of sudden unbalance-induced vibration using active balancing technology[J]. *High Technology Letters*, 2010, 16(2):210-214.
- [14] 黄立权,王维民,苏奕儒,等. 基于电磁自愈力的转子快速自动平衡实验[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(6):704-708.
- [15] 樊红卫,景敏卿,王仁超,等. 一种电磁式自动平衡头设计计算与响应试验[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(5):807-811.
- [16] 樊红卫,景敏卿,张旭辉,等. 电主轴用电磁式主动平衡装置启动磁场仿真分析[J]. 磁性材料及器件,2017,48(2):18-24.
- [17] 樊红卫,景敏卿,王仁超,等. 结构参数对磁力平衡头自锁和启动力矩的影响研究[J]. 振动与冲击,2014,33(3):135-139,156.
- [18] 樊红卫,张旭辉,景敏卿,等. 含永磁体电磁式在线主动平衡装置自锁磁场有限元分析[J]. 机床与液压,2017,45(4):1-5.
- [19] 王仁超,胡 勇,周 桐,等. 电磁式自动平衡头过盈配合设计方法[J]. 振动、测试与诊断,2017,37(1):163-168,206.
- [20] 郑国运,刘 杰,姚黎明,过盈配合公差对镶嵌式机械密封性能的影响研究[J]. 液压气动与密封,2019(3):57-61.

[编辑:杨骏泽]

本文引用格式:

梁警威,刘保国,申会鹏,等. 电磁平衡头齿盘齿形参数对自锁力矩的影响研究[J]. 机电工程,2021,38(2):245-249.

LIANG Jing-wei, LIU Bao-guo, SHEN Hui-peng. Research on influence of tooth profile parameters of electromagnetic balance head on self-locking torque[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(2):245-249.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>