

# 基于 Ansoft Maxwell 的电磁选针器瞬态特性分析

李红,袁嫣红,项宏年

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

**摘要:** 针对电磁选针器的机械结构,建立其瞬态场仿真模型,通过 Ansoft Maxwell 3D 瞬态仿真,分析线圈瞬态电流特性和选针刀头摆动规律之间的关系,并与实验结果进行对比验证。在验证仿真模型的基础上,探究了驱动电压、线圈匝数、永磁体材料和铁芯尺寸等主要参数对其选针性能的影响,结果表明:通过增大驱动电压或采用磁性较强的永磁体可提高响应速度与转动力矩;通过增大线圈匝数或面积一定时采用较窄的铁芯也可增大转动力矩,但会降低响应速度。

**关键词:** 电磁选针器;Ansoft Maxwell 仿真;瞬态电流;转动力矩;响应速度

**中图分类号:** TM553

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2017)01-0092-07

## 0 引言

圆形纬编机(简称圆纬机)是针织装备中应用最普遍的设备之一,具有性能可靠、用途广泛、产量高等优点。选针器是圆纬机控制系统中用来实施选针控制的执行元件,因此其选针性能直接影响圆纬机的编织速度、提花质量和选针可靠性。选针器正常工作时接收控制器发送来的电压信号,通过铁芯与永磁体间的相互作用推动选针刀头上下摆动。选针器的响应速度直接影响圆纬机能否快速可靠地选针,同时每个选针器的能耗影响到整台圆纬机的能耗<sup>[1]</sup>。因此,为了提高选针器的响应速度和降低功耗,需要研究其瞬态特性。

目前国内常用驱动选针器的方式主要有电磁式和压电陶瓷式两种。前者是通过给励磁线圈通入某一方向的电流,将铁芯工作端磁化为相应的极性,该工作端与永磁体间产生吸力和斥力,推动选针刀头绕旋转轴上下摆动实现选针,性能可靠稳定。后者是通过控制器发送电压信号,作用于压电陶瓷片,使压电材料产生逆压电效应,最后根据压电陶瓷片弯曲到预先记忆的形状进行选针<sup>[2]</sup>。近年来,众多科

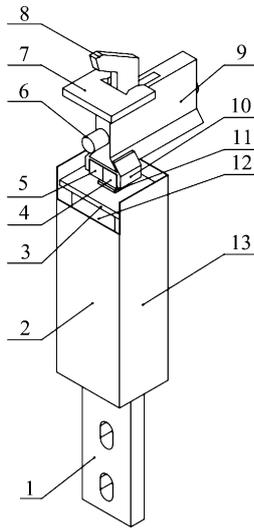
研人员分析了电磁选针器的工作原理,计算出其关键技术数据<sup>[3]</sup>;居伟骏等<sup>[4]</sup>采用有限元法研究了选针器的静态电磁力,并分析了选针刀头处于不同位置时电磁力的变化规律;文献<sup>[5-7]</sup>通过分析电磁铁的吸合过程,探究了电磁铁的动态特性并计算出它的吸合时间。以上研究主要对电磁选针器的静态特性进行了分析,有关瞬态分析主要对电磁铁进行仿真研究,但电磁铁结构与本文不同。

本文以用于圆纬机的电磁选针器为研究对象,从理论上分析了铁芯和永磁体间的相互作用关系,以 Ansoft Maxwell 为平台,结合选针器的实际工作情况,在三维瞬态磁场中对其瞬态特性进行仿真分析,并搭建实验平台对仿真结果进行实验验证,在此基础上重点探究了选针器关键参数对其选针性能的影响。

## 1 选针器结构及工作原理

圆纬机电磁选针器主要由选针刀头、选针刀头固定块、永磁体夹块、旋转轴、两个永磁体、铁芯、线圈、塑料架和外壳组成,其结构示意图如图 1 所示,电磁选针器剖面如图 2 所示。左右两个永磁体

由永磁体夹块固定且二者充磁方向相反,如图 2(b)所示。右侧永磁体 N 极在下、S 极在上,而左侧永磁体极性与之相反,即 S 极在下、N 极在上。



1. 铁芯固定部分;2. 外壳一;3. 骨架;4. 右侧永磁体;5. 左侧永磁体;  
6. 旋转轴;7. 极限挡板;8. 选针刀头;9. 选针刀头固定块;  
10. 永磁体夹块;11. 铁芯有效部分(缠绕线圈部分,文中统称铁芯);  
12. 线圈;13. 外壳二

图 1 电磁选针器结构示意图

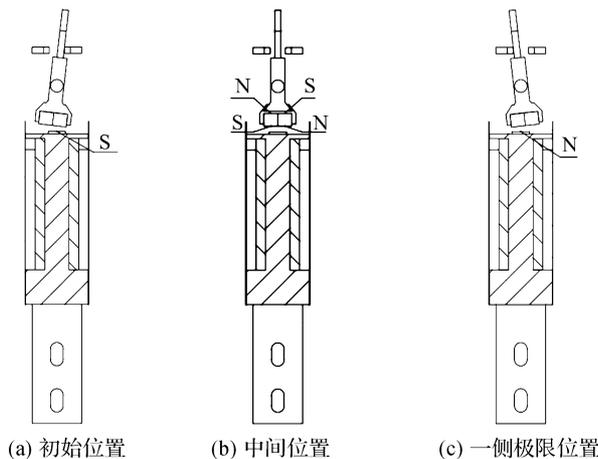


图 2 电磁选针器剖面图

选针器正常工作时始终处于通电状态,通过切换电压方向,使选针刀头从一侧极限位置摆动到另一侧极限位置来进行选针。在进行瞬态仿真时,所加激励源为正向电压,将其初始状态设置为相反方向,这样就实现了在一侧极限位置时电压方向的切换,初始状态如图 2(a)所示。永磁体和铁芯间气隙是选针器主要的工作气隙,该处磁场主要由永磁体和线圈磁场共同组成,在气隙磁场力作用下选针刀头绕旋转轴摆动,控制其外部相应的提花片是否压入针槽,从而控制织针是否进入三角,实现提花。给线圈通入某一方向的电流,将铁芯工作端磁化为 S

极,使该铁芯端与右侧永磁体相互吸引,而与左侧永磁体相互排斥,在二者合力作用下使永磁体推动选针刀头绕旋转轴顺时针摆动,摆动一定角度后在极限挡板阻力作用下停止。选针刀头在极限位置保持一段时间后,当线圈中电流方向发生变化时,会使选针刀头所受电磁力的方向发生改变,实现反向摆动。当电流方向完全改变并增大到一定值时,选针刀头将逆时针摆动,如图 2(c)所示,最终停止在该侧极限挡板处。

## 2 建模仿真与实验

### 2.1 理论基础

#### 2.1.1 选针器瞬态模型的建立

将绕在铁芯上的线圈理想化为一个电感线圈,由电磁感应定律知电磁铁的电路方程<sup>[8]</sup>为:

$$\mu = ri + \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

其中: $\mu$  为线圈的输入电压; $r$  为线圈电阻; $i$  为线圈电流; $\varphi$  为磁链,包括永磁体磁通和线圈磁通。根据该电路方程,在瞬态仿真中可以对线圈的输入电压和初始电流进行合理设置。

#### 2.1.2 磁场理论基础

瞬态磁场中可以求解激励源为非正弦情况的电压源或电流源,还可以求解模型中存在运动部件的情况。矢量磁位  $\mathbf{A}$  在瞬态磁场求解器中的磁场方程如下:

$$\nabla \times v \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla v - \nabla \times H_c + \sigma v \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

其中: $\nabla$  表示梯度算子; $v$  是物体的运动速度; $\mathbf{A}$  是矢量磁位; $\mathbf{J}_s$  是源电流密度; $\sigma$  是电导率; $H_c$  是永磁体的矫顽力。采用 Ansoft Maxwell 进行瞬态仿真时让模型某一部分速度为零,可通过使用参考框架将其固定来实现。根据该参考框架运动物体固定在自己的坐标系,其运动方程为:

$$\nabla \times v \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla v - \nabla \times H_c \quad (3)$$

因此,在每一时间段有限元模型中每一点的矢量磁位都可获得<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.3 动力学方程

永磁体的运动形式为摆动运动,其运动方程为:

$$M - M_f = J\alpha \quad (4)$$

其中: $M$  为永磁体的转动力矩; $M_f$  为选针刀头与旋转轴间的摩擦力矩; $J$  为永磁体的转动惯量; $\alpha$  为永

磁体的角加速度。该运动方程为瞬态仿真中负载力矩的设置提供了理论基础。

通过联立式(1)–(4),可以建立选针器的瞬态场仿真模型。该模型在考虑材料非线性特性的基础上,利用三维有限元仿真的方法进行分析求解,从而获得其瞬态特性。

## 2.2 几何建模

为了能够准确分析电磁选针器的实际工作性能,本文考虑到其磁路的特殊性,结合 Ansoft Maxwell 软件特点,模型建立时省略了选针刀头、选针刀头固定块、永磁体夹块和旋转轴。这样一方面可以简化分析过程,另一方面这部分结构不会对选针器整体磁场产生太大影响。另外,选针器正常工作时,选针刀头在永磁体组件(永磁体和永磁体夹块)作用下绕旋转轴摆动,选针刀头所受的力与永磁体组件所受力成正比关系,而永磁体组件是在永磁体的带动下运动的<sup>[4]</sup>,因此模型中可通过直接分析永磁体的运动特性来近似分析选针刀头的瞬态特性。

瞬态磁场仿真时运动物体机械属性的设置基本上都是在 Band 区域进行的,Band 区域为瞬态场特有,用于将运动物体和静止物体分开,并且二者均不能穿过 Band,即几何模型不能与 Band 交叉。本文中 Band 区域内只能是运动部件永磁体,二者不接触。永磁体的运动方式设置为旋转运动,取所建模型中两个永磁体的位置为初始位置  $0^\circ$ ,绕旋转轴逆时针摆动方向为正,摆动范围为  $0^\circ \sim 13^\circ$ ,该处终止值大于初始值;质量惯性矩是反映刚体绕轴转动时惯性的量度,仿真中采用永磁体质量与永磁体中心到旋转轴距离平方的乘积,这也表明在模型建立时尽管省略了旋转轴,但参数设置时仍考虑了旋转轴的影响;在仿真分析中选针器实际上没有外界负载,选针刀头固定块与旋转轴间的摩擦力矩相当于负载力矩,又因为选针刀头在没摆动前主要受静摩擦力影响,摆动后主要受动摩擦力影响,所以负载力矩采用分段函数  $\text{sgn}(sPosition)$  的形式来设置,以表示静摩擦力和动摩擦力对其的影响。网格剖分的好坏直接影响仿真时间和计算结果的准确性,由于该模型尺寸规整,所以采用手工剖分,手工剖分根据两个原则:首先运动域的永磁体要稍微加密,其次是整体网格和计算速度须要在所使用计算机能力范围内<sup>[9]</sup>。

## 2.3 瞬态仿真

本文以实验室中的电磁选针器为研究对象。永磁体材料选用钕铁硼,牌号为 N48H;铁芯、铁芯固

定部分和外壳材料均选用电工纯铁,牌号为 DT4;线圈材料为铜。在 Ansoft Maxwell 瞬态磁场中对选针器进行仿真分析,仿真电流与位移瞬态特性曲线如图 3 所示,与之对应的实验测试曲线如图 4 所示。

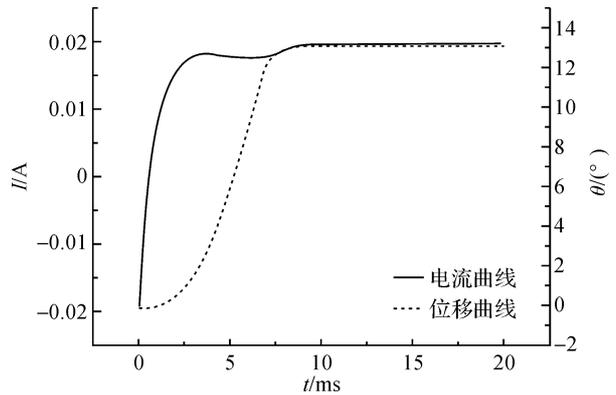


图3 15 V电压下电流与位移瞬态特性曲线

由图3可知,给线圈加载 15 V 驱动电压时,电流曲线呈现先增大后减小再增大,最后保持稳定的变化过程,且稳定值大于上升过程中的最大值,电流曲线下降至最低点时的时间为 7.2 ms,而后上升到稳定值 0.019 A 的时间约为 8.8 ms;位移曲线在初始时有 0.5 ms 的延时,之后选针刀头快速摆动 6.7 ms 至极限位置,此时的时间(响应时间)与电流曲线下降过程中最低点位置时间基本相似。这是由于初始时段内选针刀头静止或慢速摆动时,线圈电感基本不变,线圈电流呈现一阶惯性环节的变化规律<sup>[7]</sup>;而后选针刀头摆动速度增大,线圈感应电动势也随之增大,导致电流曲线呈现下降趋势;选针刀头摆动到极限位置时,速度减为 0,线圈电感基本不变,电流值的变化规律又和开始段的一样,近似以一阶惯性环节增大至稳定值后保持不变。

## 2.4 实验研究及仿真对比

选针器瞬态特性测试系统主要包括被测电磁选针器、微位移调整平台、驱动电路、稳压电源、激光位移传感器和功率分析仪等。被测选针器和激光位移传感器固定在微位移调整平台上,并调整选针刀头位置,使之处在激光位移传感器的有效测量范围内;稳压电源的输出连接被测选针器和控制电路。通过控制电路加载直流电压时,选针器的瞬态电流曲线输出到功率分析仪的电流接口,而选针刀头的位移曲线传输到功率分析仪的位移接口,电压波形通过驱动电路传输到功率分析仪的电压接口,以此方法还可以获得加载不同驱动电压下的瞬态电流及选针刀头摆动特性曲线。

15 V 驱动电压下,选针器瞬态电流及选针刀头摆动特性实验结果如图 4 所示,其中,曲线 1 为电流变化曲线,曲线 2 为位移变化曲线,曲线 3 为信号曲线。对比图 3 和图 4 可知,位移和电流瞬态特性实验结果与仿真结果基本一致,可证仿真模型和过程合理,电流特性呈现先增大后减小再增大最后保持稳定的变化过程,电流曲线下降过程中最低点位置的时间和选针刀头的响应时间基本相近(加载 15 V 电压时约为 7.7 ms)。选针刀头摆动到极限位置时位移实验结果与仿真结果存在些许差异,实验位移曲线在极限位置处有弹性回跳现象。选针器实际工作时,当选针刀头摆动到极限位置,受极限挡板的阻碍作用而产生弹性回跳现象。而在仿真中选针刀头的摆动范围经人为设置后,当摆动到该处就会停止,所以无反弹现象。因此在极限位置处实验位移曲线与仿真位移曲线相比存在差别,是由于选针刀头摆动到极限位置时的边界条件设置所引起的。

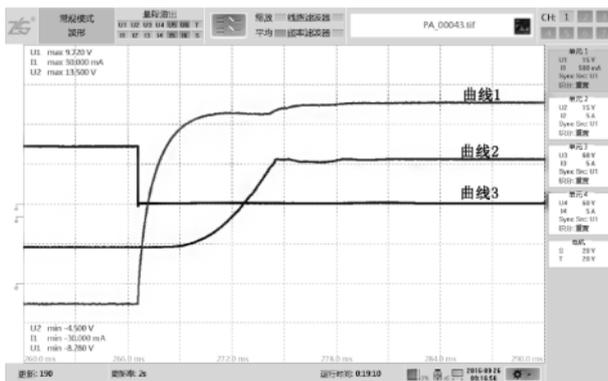


图 4 15 V 电压下瞬态电流与位移特性实验结果

仿真与实验结果基本一致,证明瞬态仿真正确,根据仿真计算获得的选针器瞬态特性,可以分析驱动电压、线圈匝数、永磁体材料与铁芯形状等关键参数对其选针性能的影响。

### 3 选针器关键参数仿真分析

选针器的工作性能主要从选针刀头的响应时间和绕轴转动的力矩这两方面来衡量,下面就选针器关键参数对其选针性能的影响进行仿真分析。

#### 3.1 驱动电压对选针性能的影响

不同驱动电压时,电流瞬态特性曲线如图 5 所示,位移瞬态特性曲线如图 6 所示,力矩瞬态特性曲线如图 7 所示,电磁力与位移的关系曲线如图 8 所示。

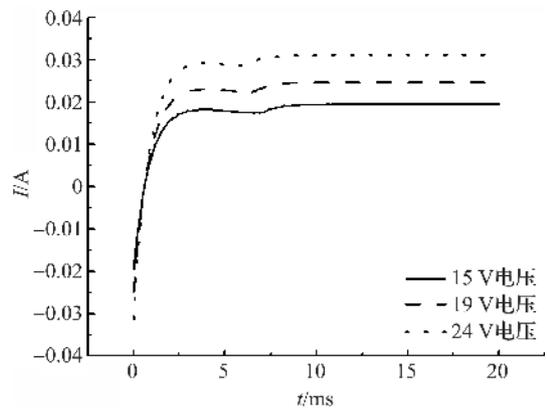


图 5 不同电压时电流瞬态特性曲线

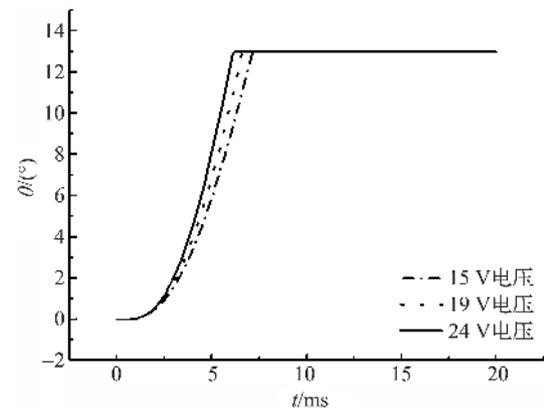


图 6 不同电压时位移瞬态特性曲线

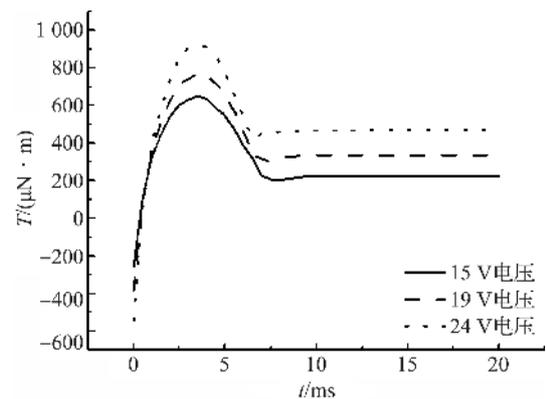


图 7 不同电压时力矩瞬态特性曲线

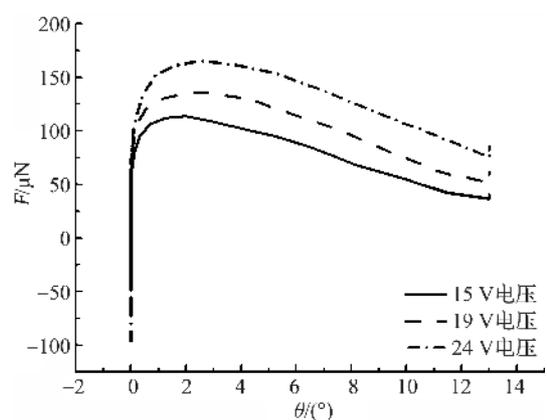


图 8 不同电压时电磁力与位移的关系曲线

由图 5 可知,电流初始值为负,然后从负值逐渐增加至 0 最后变为正向电流。驱动电压越高,正向电流上升速度越快,凹点出现的越早,表明响应时间越短且瞬时电流较大。由图 6 可知,驱动电压越高,位移曲线上升的速度越快,到达设定极限位置(13°)的时间越早,即响应时间越短,这也和图 5 的结论一致。

由图 7 可知,驱动电压越大,初始时的正向力矩和最终稳定后的力矩越大。但驱动电压不易太大,这样会导致稳定后的力矩增大,从而增大选针刀头反向摆动的时间,另外,还会造成不必要的电能浪费。因此,在满足生产要求的前提下,驱动电压的选取要综合考虑对摆动到位和反向摆动这两个阶段时间的影响。

由图 8 可知,电磁力先快速增大到最大值然后逐渐减小,在极限位置有稍微增大趋势,最后保持不变。电磁力的最大值出现在初始位置与中间位置之间,但靠近初始位置,这是因为线圈电流不能立即达到最大值,所以选针刀头先摆动片刻待电流增大到一定值时电磁力达到最大。选针刀头摆动到极限位置时,电流还未达到最大值仍在继续增加,所以电磁力也有稍稍增加的趋势。

### 3.2 线圈匝数对选针性能的影响

不同线圈匝数时,电流瞬态特性曲线如图 9 所示,力矩瞬态特性曲线如图 10 所示。

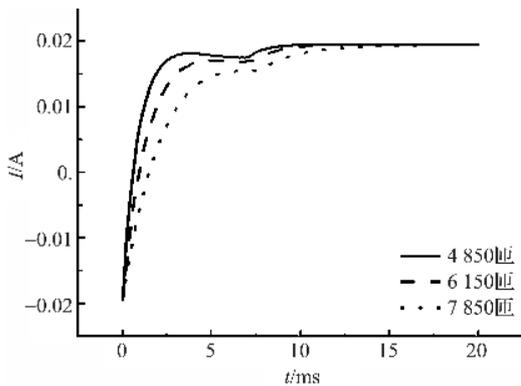


图 9 不同线圈匝数时电流瞬态特性曲线

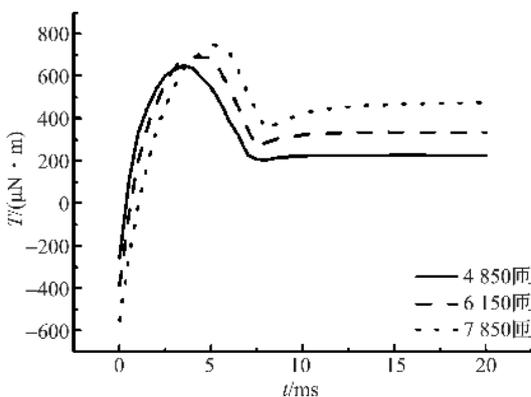


图 10 不同线圈匝数时力矩瞬态特性曲线

由图 9 可知,线圈匝数越多,初始电流上升速度越慢,凹点出现的稍晚且瞬时电流较小,说明选针刀头的响应时间较长。这是因为线圈电感与线圈匝数的平方成正比<sup>[7]</sup>,匝数越多,电感越大,电路时间常数随着电感的增大而增大,故初始电流上升慢。

由图 10 可知,初始时的正向力矩随着线圈匝数的增大而减小,但稳定后的力矩随着线圈匝数的增大而增大。因为初始时电流增加速度较慢导致力矩较小;每匝线圈都有磁通量的变化,都会产生感应电流,所以匝数越多电流越强,因此,随着线圈匝数的增大稳定后的力矩也变大。因此,从提高电磁力角度考虑,应尽可能的增大线圈绕组有限空间的缠绕密度,以增大线圈匝数。

### 3.3 永磁体材料对选针性能的影响

不同永磁体材料时,电流瞬态特性曲线如图 11 所示,力矩瞬态特性曲线如图 12 所示。

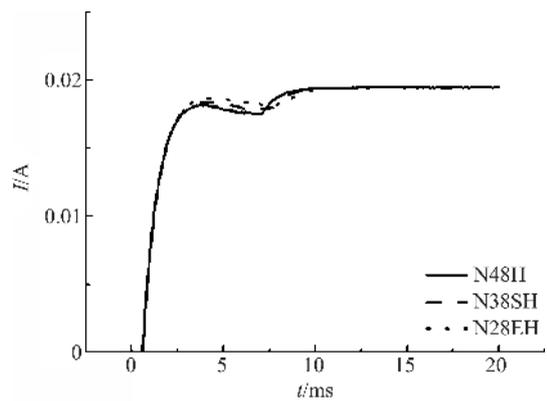


图 11 不同永磁体材料时电流瞬态特性曲线

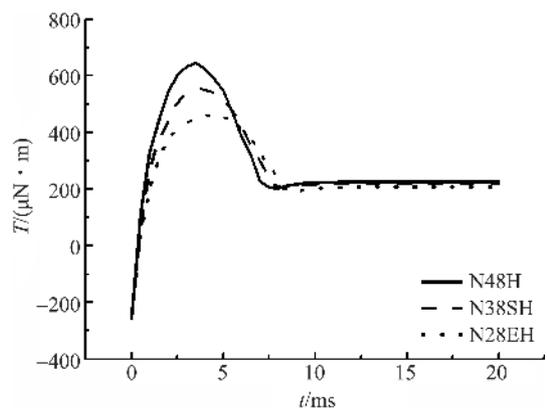


图 12 不同永磁体材料时力矩瞬态特性曲线

选用 N28EH、N38SH、N48H 这三种等级的永磁体材料进行仿真对比,三种材料的剩磁和矫顽力分别为:1.05 T、780 kA/m;1.23 T、923 kA/m;1.37 T、1069 kA/m。由图 11 可知,剩磁和矫顽力较大的永磁体,电流曲线下落部分最低点位置出现

的越早,表明选针刀头的响应时间越短且瞬时电流越小;由图 12 可知,初始力矩和稳定后的力矩均随着永磁体剩磁和矫顽力的增大而增大,因为会使气隙处的磁通密度变大,这增大了推动选针刀头绕轴转动的力矩,从而提高了响应速度。因此,不管是提高响应速度还是增大力矩,都应尽量选用剩磁和矫顽力均较大的永磁体。

### 3.4 铁芯截面尺寸对选针性能的影响

保证铁芯截面积不变,改变铁芯沿选针刀头摆动方向的长度,电流瞬态特性曲线如图 13 所示,力矩瞬态特性曲线如图 14 所示,其中图例中的数字分别表示铁芯沿选针刀头摆动方向的尺寸(下文统称铁芯的横向长度)与垂直于该方向的尺寸。

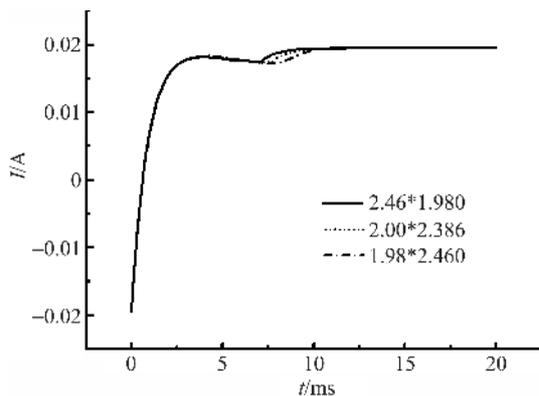


图 13 不同铁芯形状时的电流瞬态特性曲线

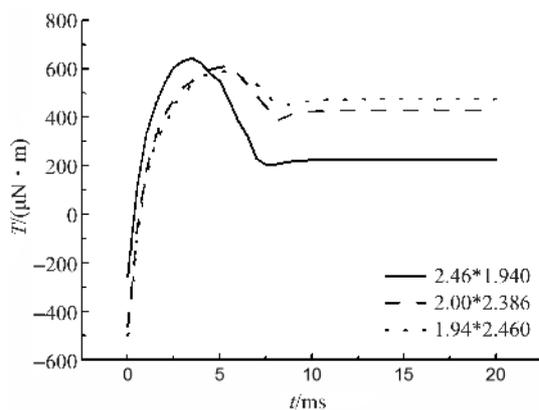


图 14 不同铁芯形状时的力矩瞬态特性曲线

由图 13 可知,铁芯横向长度不同时,线圈初始电流上升速度基本一样,但铁芯的横向长度越窄,电流曲线下落部分最低点位置出现的越晚,表明选针刀头的响应时间较长且瞬时电流越小。

由图 14 可知,铁芯的横向长度越窄,初始时力矩曲线上升速度越慢,力矩值较小,但稳定后的力矩值较大,这是因为横向长度较窄的铁芯能够使永磁体对其的吸引力更多的向正中间位置倾斜,实际上

增大了这个力的水平分量<sup>[7]</sup>,也提高了该力对永磁体组件的推动作用,所以稳定后的力矩较大。因此,从增大力矩方面考虑,铁芯截面积一定时可适当选用横向长度较窄的铁芯。

## 4 结 语

本文针对实验室现有的电磁选针器,建立其瞬态场仿真模型,通过仿真获得线圈瞬态电流及选针刀头的摆动特性,并搭建测试平台对其瞬态特性进行实验验证。实验结果与仿真结果基本一致,证明了仿真模型的合理性。

通过瞬态仿真探究了驱动电压、线圈匝数、永磁体材料和铁芯形状等主要参数对选针器工作性能的影响,研究结果表明:a)提高驱动电压或选用剩磁和矫顽力较大的永磁体均可提高响应速度和转动力矩;b)增大线圈匝数或截面积一定时选用横向长度较窄的铁芯均可增大转动力矩,但会降低响应速度。

通过研究选针器关键参数对其选针性能的影响,对于选针器的设计制造和实际应用都具有一定的参考价值,也为后续优化其工作性能提供技术参考。

### 参考文献:

- [1] 范建国,袁嫣红,张建议.一种基于电流控制的提花机选针器驱动电路的设计与分析[J].浙江理工大学学报,2014,31(3):281-286.
- [2] 吴晓光,张建钢,张成俊,等.压电陶瓷片受力分析及选针器设计[J].针织工业,2008(2):19-21.
- [3] 孙志宏,陈明,赵伯诚.HARTING 电磁选针器[J].针织工业,1997(3):23-24.
- [4] 居伟骏,徐刚,卢怡,等.基于有限元分析的圆纬机选针电磁阀参数设计[J].磁性材料及器件,2016,47(2):37-41.
- [5] DONGD, LI X N. Development of a novel parallel-spool pilot operated high-pressure solenoid valve with high flow rate and high speed [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2015,28(2):369 - 378.
- [6] 郭月洋,陈瑞琪.电子多臂机电磁铁吸合过程分析及加速措施探讨[J].棉纺织技术,2000,28(10):592-595.
- [7] 李勇,张跃飞,申允德.基于瞬态电流的螺管式电磁铁闭合动作特性分析[J].低压电器,2014(6):15-16.
- [8] ZIEBA J. Simulation of a solenoid actuator for a device for investigating dynamic air permeability through flat textile products [J]. Fibres & Textiles in Eastern Europe. 2003,11(2):85-87.
- [9] 赵博,张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版,2010:64.

## Analysis of Transient Characteristics of Electromagnetic Needle Selector Based on Ansoft Maxwell

*LI Hong, YUAN Yanhong, XIANG Hongnian*

(School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** According to the mechanical structure of the electromagnetic needle selector, the simulation model of the transient field is established. the relationship between the transient current characteristics of the coil and the swinging rule of the needle selecting blade is analyzed through transient simulation with Ansoft Maxwell 3D. Comparative validation is carried out with the experimental result. On the basis of the validation of the simulation model, the effects of main parameters (the drive voltage, coil turns, permanent magnet material and iron core size) on the performance of needle selection are explored. Results show that the response speed and the rotation torque can be improved by increasing the drive voltage or using the permanent magnet with strong magnetism; the rotation torque can be increased by increasing the number of turns of the coil or adopting narrow iron core when the area is certain, but the response speed will be reduced.

**Key words:** electromagnetic needle selector; Ansoft Maxwell simulation; transient current; rotational torque; response speed

(责任编辑: 康 锋)