

磁悬浮式驱动织针电磁力研究 及线圈轮廓优化

万道玉¹, 吴晓光¹, 张弛¹, 刘洋¹, 孔令学²

(1. 武汉纺织大学 机械工程与自动化学院, 湖北 武汉 430073;

2. 迪肯大学 国家创新重点实验室, 澳大利亚 吉朗 3217)

摘要: 基于磁悬浮式驱动织针编织原理, 建立永磁体外磁场模型及永磁织针磁力模型。针对织针轴向运动时磁场分布及磁力对织针的影响, 基于磁力驱动原理、磁源性质及线圈轮廓变化下永磁织针驱动的特点, 建立永磁织针轴向受力与轴向位移的关系曲线和线圈轮廓与永磁织针受力的内在联系, 运用Ansys Maxwell仿真软件, 分析电磁线圈截面轮廓变化对织针电磁力与轴向位移曲线的影响, 优化线圈轮廓。结果表明, 改变线圈轮廓外形可构建出平缓的电磁力-轴向位移曲线。

关键词: 磁悬浮式; 驱动织针; 电磁力模型; 电磁线圈轮廓; 仿真分析

中图分类号: TS 183.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-4033(2017)08-0009-04

Electromagnetic Force Study of Magnetic Suspension Driving Knitting Needle and Coil Profile Optimization

Wan Daoyu¹, Wu Xiaoguang¹, Zhang Chi¹, Liu Yang¹, Kong Lingxue²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430073, China;

2. National Innovation Key Laboratory, Deakin University, Geelong 3217, Australia)

Abstract: Based on the knitting principle of magnetic suspension driving needle, the external magnetic field of permanent magnet and magnetic force model of knitting needle were developed. Considering the influence of magnetic field distribution and magnetic force on the knitting needle when moving axially, the relation curve between axial force and displacement, and internal relation between coil profile and permanent magnet knitting needle were established, which based on the driving characteristics of knitting needle under magnetic driving principle, magnetic source properties and coil profile. Using Ansys Maxwell software, the effect of electromagnetic coil profile on the electromagnetic force and axial displacement curve was analyzed, and coil profile was optimized. The results show that smooth electromagnetic force and axial displacement curve can be built by changing the coil profile.

Key words: Magnetic Suspension; Driving Knitting Needle; Electromagnetic Force Model; Electromagnetic Coil Profile; Simulation Analysis

本文基于磁悬浮式驱动织针原理^[1], 改变现有针织提花圆纬机利用三角(凸轮)及选针装置实现3功位编织原理^[2], 重点研究磁悬浮

式驱动织针运行时磁源间的电磁场分布、磁源对磁力的影响, 以及磁力耦合与干扰问题。通过建立的线圈轮廓截面模型可知, 改变线圈

轮廓后永磁织针所受磁力沿轴线分布且磁力大小有明显变化, 因此, 研究不同线圈轮廓外形下永磁织针受力与轴向位移之间的关系,

基金项目: 国家自然科学基金(51175384、51305309); 湖北省自然科学基金(2014CFA099)。

作者简介: 万道玉(1990—), 男, 硕士研究生。主要从事新型针织装备方面的研究。

通讯作者: 吴晓光(1954—), 男, 教授。E-mail: 2006wist@163.com。

将对线圈轮廓优化及磁悬浮式驱动织针原理提供理论与试验支持。

1 磁悬浮式驱动织针原理与机理

1.1 传统织针驱动及选针原理

针织圆纬机核心部件有针筒、织针、三角、选针器和沉降片,如图1所示,织针嵌入针槽内,被三角推动做上下运动,织针运动时由沉降片配合前后运动,完成编织运动。电子选针采用压电选针,即通过晶片的变形位移间接控制并选择织针沿三角不同的轨道运动,达到相应的编织高度,分别实现3功位编织动作即成圈、集圈和浮线^[2]。

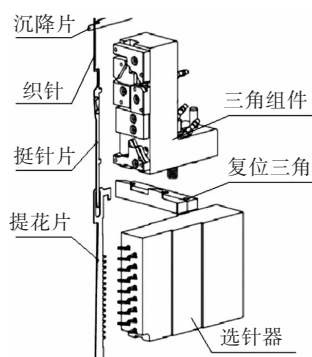


图1 针织圆纬机选针及驱动结构

1.2 磁悬浮式驱动织针原理

磁悬浮驱动结构如图2所示。上、下层通电线圈产生磁场,永磁织针受到磁力作用而运动,通过控制通电线圈的电压或电流控制永磁织针的空间位置,取代针织圆纬机中三角的功能,然后由沉降片配合实现织针运动,同时,通过控制电线圈的电流或电压完成选针。

利用磁场力直驱方式编织(编程可控)^[3],不仅改变了现有针织圆纬机复杂的机械驱动模式,且能在高频下实现选针动作,大幅度提高了编织效率,同时省略了电子选针器。

1.3 电磁力计算基本思路

标准圆柱形线圈的结构如图2所示。通过磁力建模、计算、仿真及试验,得出永磁体在两个电磁线圈间的受力,如图3所示。

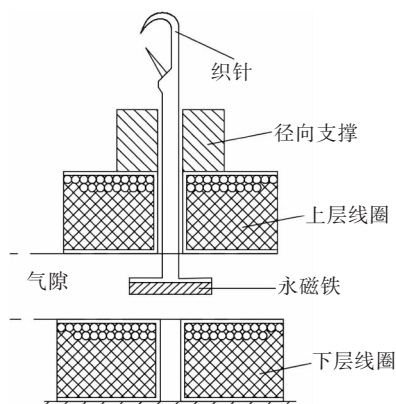


图2 磁悬浮驱动结构

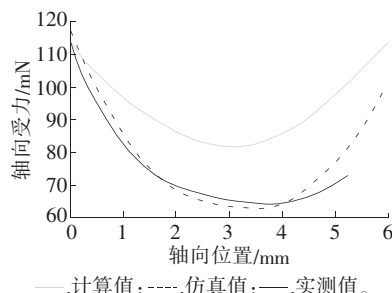


图3 圆柱形线圈受力

由图3可知,通过分析永磁体轴向受力-轴向位置曲线(记为 $F-z$ 曲线),发现曲线波动较大,永磁织针运动过程中受力变化剧烈,运动稳定性差,不利于织针功位的控制,因此,需要使 $F-z$ 曲线尽可能地平缓,有利于控制织针轴向悬浮运动。如图2所示,由于采用了圆柱形线圈电磁驱动,永磁织针在电磁线圈外部空间运动,此时磁场分布较为分散,导致线圈磁场对永磁织针作用力不集中,无法形成合力,利用率低,而且外部空间磁场分布形式固定,不利于对电磁力的精确控制。因此,进一步探索磁源的性质和电磁线圈结构,如图4所示,以使磁源驱动力更符合驱动永磁织针的需求。

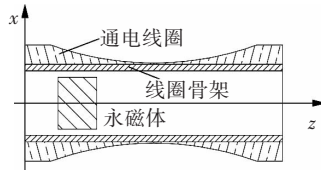


图4 变截面线圈轮廓

永磁织针在变截面线圈中心运动,此处电磁场最集中,电磁场

的分布可由线圈截面形状控制,理论上变截面线圈轮廓将会大大提高永磁织针对电磁场的利用率(对比图2),同时 $F-z$ 曲线也会变得平缓。对于变截面线圈轮廓中永磁织针受力的计算,首先建立永磁铁磁场空间分布模型,计算线圈安培力,最终求解出永磁体与电磁场的相互作用力。本文研究织针轴向悬浮装置,建模时仅考虑轴向受力。

2 空间永磁场解析式求解及分析

2.1 磁学基本原理

根据安培分子环流假说^[4],永磁铁外圆柱表面等效环形电流引起的感应磁场即永磁铁的本质。电流的磁效应可通过毕奥-萨伐尔定律求解,见式(1)。

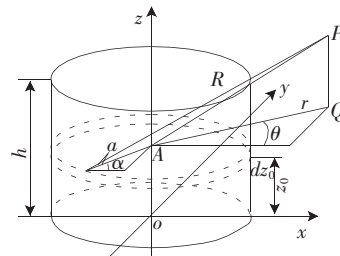
$$B = \int_L \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \times R}{R^3} \quad (1)$$

式中: $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空磁导率; I 为源电流,A; L 为积分路径; R 为电流元指向待求点的矢径; dl 为电流元。

将单个通电圆环拓展到空间,即可构建出永磁体外场数学模型。

2.2 永磁体外磁场模型建立

设圆柱形永磁铁底表面圆心为坐标原点,底表面为 xoy 平面, z 轴正向为充磁方向,建立几何模型,如图5所示。



注: a 为永磁铁半径,mm; h 为永磁铁高度,mm; P 为空间任意点; Q 为点 P 在 xoy 平面的投影; R 为电流元 dl 对点 P 的矢径; dz_0 和 z_0 分别为永磁铁任意薄层环流的厚度和 z 轴高度; a 和 α 为电流元 dl 在 dz_0 薄层环流平面内的极坐标; A 为薄层环流平面圆心; r 和 θ 为 Q 点的极坐标。

图5 圆柱形永磁场模型

若磁铁材料及充磁方向不变,且饱和充磁,则磁化密度 J_s 可视为常数。计算空间任一点 P ($r\cos\theta$, $r\sin\theta$, $z-z_0$) 的磁感应强度,选取永磁铁厚度为 dz_0 的薄层环流,并将几何模型代入式(1)求解,计算永磁铁外磁场。其中,电流薄层 dz_0 的环流强度 $I=J_s dz_0$,单层环流在 P 点的磁感应强度为 dB ,总环流在 P 点总的磁感应强度见式(2)。

式(2)中: $R=AP-a=(r\cos\theta-acos\alpha$, $r\cos\theta-acos\alpha$, $z-z_0$)。

外磁场解析式较复杂,通过试验及仿真验证模型正确性。

2.3 磁场计算及仿真

为了便于试验,取点 P 为永磁铁端面中心点,则 $z=h$, $r=0$ 。 B_x 、 B_y 和 B_z 分别为沿 x 、 y 和 z 轴向的磁感应强度分量,见式(3)一式(5)。

基于式(3)一式(5),在永磁铁中心点, B_x 和 B_y 的理论值为 0, B_z 值由永磁铁外形及磁化密度决定。使用高斯仪测量 P 点的磁感应强度,推导出解析式中 J_s 值。试验采用的永磁铁材料为钕铁硼,假定材料均匀且处于磁饱和状态,并沿轴线充磁,因此样本 J_s 值理应相同。

试验样本分 5 组,每组各由 5 颗永磁铁组成并按直径值-高度值分别编号为 8-2、5-2、4-2、4-3 和 4-4,永磁铁端面中心点的磁感应强度 B 测量结果见表 1。由表 1 可知,每组试验中 x 、 y 方向磁感应强度均远小于 z 轴方向,考虑测量误差、永磁铁加工及充磁误差, x 、 y 方向测量值与计算值相符。化简式(5)并积分得磁化密度 J_s ,见式(6)。

由测量数据计算 J_s 值,见表 2。

由表 2 可知,考虑测量精度、永磁铁磁化等问题, J_s 值波动在误差范围内,试验证明了理论建模的正确性。利用 Matlab 编程绘制永磁铁外磁场图像,由于永磁铁轴对

$$B = \int_0^h dB = \frac{\mu_0 J_s a}{4\pi} \int_0^h \oint \frac{dl \times R}{R^{\frac{3}{2}}} dz_0 = \frac{\mu_0 J_s a}{4\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ -a\sin\alpha & -a\sin\alpha & 0 \\ r\cos\theta-acos\alpha & r\cos\theta-acos\alpha & z-z_0 \end{vmatrix}}{R^{\frac{3}{2}}} d\alpha dz_0 \quad (2)$$

$$B_x = \frac{\mu_0 J_s a}{4\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\cos\alpha(h-z_0)}{[a^2-(h-z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha dz_0 \quad (3)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 J_s a}{4\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{\cos\alpha(h-z_0)}{[a^2-(h-z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha dz_0 \quad (4)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 J_s a}{4\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{a}{[a^2-(h-z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha dz_0 \quad (5)$$

表 1 永磁铁外磁场磁感应强度测量结果

(直径-高度)/mm	B/mT	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	平均值
8-2	B_x	1.3	0.5	3.2	1.5	1.3	1.6
	B_y	5.5	4.2	0.3	0.5	1.7	2.4
	B_z	152.0	161.0	172.0	170.0	168.0	165.0
5-2	B_x	1.5	1.6	12.1	8.0	5.7	5.8
	B_y	2.3	2.4	4.3	4.4	0.8	2.8
	B_z	195.0	199.0	204.0	202.0	198.0	200.0
4-2	B_x	9.2	7.7	10.2	6.1	11.2	8.9
	B_y	8.6	4.4	7.8	1.7	4.2	5.3
	B_z	237.0	244.0	248.0	244.0	240.0	243.0
4-3	B_x	12.8	13.3	13.7	4.1	5.6	9.9
	B_y	1.6	16.0	6.9	7.7	0.6	6.6
	B_z	279.0	269.0	280.0	281.0	281.0	278.0
4-4	B_x	13.6	11.7	11.1	18.4	8.9	12.7
	B_y	6.8	9.2	1.8	7.3	9.8	7.0
	B_z	305.0	309.0	305.0	302.0	306.0	305.0

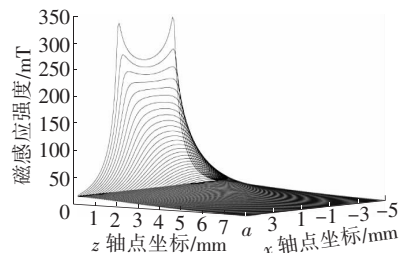
$$J_s = \frac{2B_z \sqrt{a^2+h^2}}{\mu_0 h} \quad (6)$$

表 2 J_s 试验值

(直径-高度)/mm	$(J_s \times 10^5)/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$
8-2	5.9
5-2	5.1
4-2	5.5
4-3	5.3
4-4	5.4

称,仅绘制 xoz 平面内的磁场分布

图像,如图 6 所示。

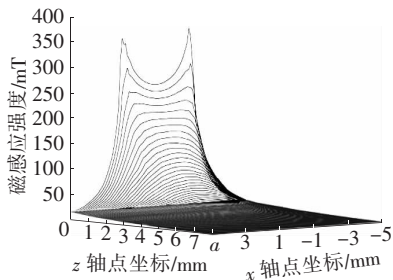


注: a 点为 z 轴上的 8 mm, x 轴上的 5 mm。

图 6 计算场强分布

利用 Ansys Maxwell 仿真软件

对永磁铁外磁场进行仿真,并在 Matlab 中绘制图像,如图 7 所示。



注: a 点为 z 轴上的 8 mm, x 轴上的 5 mm。

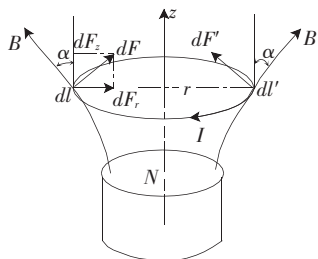
图 7 仿真场强分布

由于仿真精度和永磁铁初始参数设置等因素,仿真曲线的波动较正常。结合图 6 和图 7,计算结果与仿真结果基本一致,可以判断永磁铁外磁场数学模型的正确性。

3 永磁铁针磁力模型及线圈轮廓优化

3.1 磁力模型

基于永磁体外磁场模型分析单个线圈的磁场受力,如图 8 所示。



注: B 为磁感应强度; N 为永磁体 N 极; dl 为线圈微元; r 为线圈半径; I 为线圈电流; dF 为线圈受力; dF_z 为 dF 沿 z 轴的分量; α 为 B 与 dF_z 的夹角。

图 8 单线圈受力示意图

线圈驱动安培力见式(7)。

$$dF = Idl \times B \quad (7)$$

永磁铁参数及电流一定,则系数 $\frac{\mu_0 I a}{4\pi}$ 为常数并设为 A , 设 $k_s = \cos \alpha \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta$, 将式(2)带入式(7)简化计算,得异形线圈 z 轴的轴向受力 $F_{单z}$, 见式(8)。

$$F_{单z} = A \int_0^{2\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{rk_s(z-z_0)}{R^3} d\alpha dz d\theta \quad (8)$$

由于线圈空间分布不连续,引入线圈轴向密度 M 及径向密度 N , 单线圈受力在径向及轴向积分,对 $F_{单z}$ 积分,则线圈受力见式(9)。

$$F_z = MN \int_{r_{内}}^{f(z)} \int_{z_1}^{z_2} F_{单z} dz dr \quad (9)$$

式中: z_1, z_2 为线圈上下端面 z 轴坐标; $r_{内}$ 为线圈内径, mm; $f(z)$ 为线圈外径关于 z 的函数。

3.2 异型线圈磁力计算及分析

式(9)计算复杂,通常没有解析式,使用数值分析方法求解此方程,借助 Matlab 编程求解方程。计算所用异型线圈截面曲线 1 的函数表达式见式(10),单位为 mm。

$$\begin{cases} x=4.5 & z \in (0, 2) \cup (18, 20) \\ x=\frac{7(z-10)^2}{320}+3.1 & z \in [2, 18] \end{cases} \quad (10)$$

计算永磁铁针在异型截面线圈驱动下的受力,结果如图 9 所示。

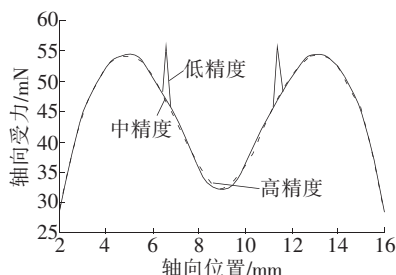


图 9 永磁铁针受力

图 9 中,曲线在 9 mm 处出现明显极小值点, $F-z$ 曲线不够平缓,不能满足实际控制需求,因此需要进一步优化线圈轮廓外形。另取一线圈外形结构,绘制 $F-z$ 曲线,观察此时图像是否能达到预期结果。计算采用的曲线 2 方程见式(11)。

$$\begin{cases} x=4.5 & z \in (0, 2) \cup (14, 16) \\ x=\frac{7(z-8)^2}{160}+3.1 & z \in [2, 14] \end{cases} \quad (11)$$

曲线 2 计算结果如图 10 所示。更改线圈外形后的 $F-z$ 曲线不仅更加平直,而且受力较之前增大 15%。前期试验表明,驱动力 100 mN 足以驱动织针高速运动,

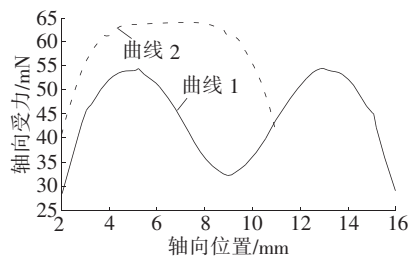


图 10 优化后永磁铁针 $F-z$ 曲线

现阶段驱动力能维持在 63 mN, 此驱动力虽未达到实际工作要求,通过增大线圈尺寸及增加线圈电流,会提高驱动力至实际需求,因此进一步优化线圈轮廓外形,将会满足织针在 3 工位中的位移需求。

4 结论

4.1 通过分析圆柱形线圈结构下的 $F-z$ 曲线,提出变截面电磁线圈轮廓,进而优化 $F-z$ 曲线。建立的永磁铁外磁场模型和试验及仿真验证结果一致,表明通过改变电磁线圈截面轮廓可使电磁力与位移曲线($F-z$ 曲线)更平缓,磁力集中,经分析永磁铁针受力模型(由高斯仪测试),其织针在 3 工位编织位移中完全满足要求。

4.2 通过求解受力模型并在仅改变曲线外形下对比计算结果,发现改变曲线外形优化 $F-z$ 关系可行。

4.3 通过理论分析建立线圈轴向受力模型,理论上可用于轴对称结构的轴向电磁力求解,为电磁-永磁驱动研究提供一定参考。

参考文献

- [1] 朱里, 吴晓光. 织针磁悬浮控制系统中的加速反馈算法研究[J]. 针织工业, 2015(3): 13-16.
- [2] 朱文斌, 吴晓光, 张弛, 等. 悬浮式提花织针驱动模型的建立及结构研究[J]. 针织工业, 2011(6): 1-4.
- [3] 吴晓光, 张弛, 朱里, 等. 磁悬浮式驱动织针的关键技术与试验模型[J]. 纺织学报, 2014(10): 129-135.
- [4] 赵凯华. 电磁学(上册)[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2005.

收稿日期 2016 年 12 月 14 日