

双曲面线圈与永磁混合驱动 悬浮织针样机研究

吴晓光, 张弛, 徐秀升, 刘洋

(武汉纺织大学 机械工程与自动化学院, 湖北 武汉 430073)

摘要:基于单电流圆环的磁场计算模型, 考虑线圈磁场的可叠加特性, 同时忽略密绕线圈中相邻圆环间的磁场耦合效应, 建立单级曲面密绕线圈沿轴线磁场的计算公式, 进一步推导得到双级曲面线圈组合下的磁场计算模型。基于麦克斯韦电磁力理论, 分析并计算双级曲面线圈磁场中永磁体受到的悬浮磁力, 并通过实际测量进行验证。根据理论分析得到优化模型实际制作线圈, 并搭建127 mm(5")的磁悬浮驱动织针试验样机, 通过上位机界面控制织针运动, 传感器系统对织针的悬浮高度进行实时采集。结果表明: 在优化的双曲线形线圈驱动下, 织针能较准确地达到3工位高度, 并在相应高度实现一定行程范围的稳定悬浮以及编织工艺。

关键词:磁悬浮驱动; 双级曲面电磁线圈; 永磁体; 力学模型; 仿真分析

中图分类号: TS 183.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-4033(2017)11-0006-05

Study of Maglev Knitting Prototype Driven by the Combination of Hyperboloid Electromagnetic Coil and Permanent Magnet

Wu Xiaoguang, Zhang Chi, Xu Xiusheng, Liu Yang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract: Based on the magnetic field calculation model of a single-turn coil with solitary current, taking the superposition property of coil magnetic field into consideration, and ignoring the magnetic coupling effect between adjacent rings in the tightly wound coil, this paper analyzed and established a formula for calculating the magnetic field of single stage curved surface coil along the axial line. Furthermore, the magnetic field calculation model under the combination of two stage curved coils was deduced. Based on Maxwell's electromagnetism theory, the suspension magnetic force of permanent magnet in the magnetic field of double curved surface coil was analyzed and calculated, and verified by actual measurement. In addition, according to the optimized model based on theoretical analysis, the coil was made and a 127mm (5") maglev knitting prototype was built up. Through computer control needle movement and the real-time acquisition of needle suspension height by the sensor system, the results show that driven by the optimized hyperboloid coil, the needle can accurately reach 3-step level, and realize stable suspension on a certain level, and meet the requirements of knitting process.

Key words: Magnetic Suspension Driving; Hyperboloid Coil; Permanent Magnet; Mechanical Model; Simulation Analysis

磁悬浮技术被广泛应用于工业领域, 如交通运输、航空航天、医疗卫生、先进加工中心等。作为一

种磁悬浮方式, 线圈与永磁体组合使用不仅具备一般磁悬浮系统无摩擦磨损、低噪声、高效率的优点,

同时, 由于线圈磁场与线圈外轮廓、通电电流直接有关, 通过优化线圈外轮廓、改变电流(大小和方

基金项目:国家自然科学基金(51175384); 湖北省数字化纺织装备重点实验室基金(武汉纺织大学)项目(DTL2017003/002)。

作者简介:吴晓光(1954—), 男, 教授。主要从事数字化针织装备及其关键技术的研究工作。

向)、采用线圈组合方式等,能够改变线圈内部磁场,为永磁体提供所需的电磁力,从而使永磁体实现准确悬浮。因此,在高精度要求场合,这种磁悬浮方式更具现实意义。

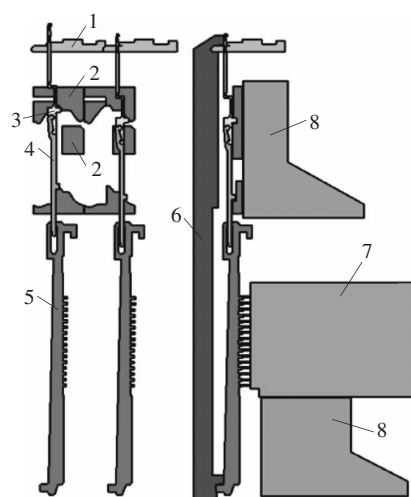
国内外学者对线圈与永磁体混合驱动构成的磁悬浮系统进行了大量研究。Donoso et al^[1]理论研究了该系统的非线性运动方程和永磁体在两个同轴通电线圈中的非线性摆动,从模型角度给出减小摆动的建议和措施;Rovers et al^[2]为了保证单边悬浮平台的纳米级位置精度,建立了关于 Halbach 永磁环和矩形线圈间的磁力分析模型;池小平等^[3]理论研究了电磁炮发射器中不同外形的驱动电枢与磁力间的关系曲线。此外,针对线圈磁场的计算,相关文献^[4-6]给出计算普通螺线管线圈磁场的解析形式,并提出计算任意放置的单匝线圈磁场的简化思想和方法。

然而,由于线圈形状各异,部分文献中^[4-6]的数学模型和思想并不适用于计算任意外形线圈的磁场,为此,本文推导了能够计算任意外形线圈磁场的方法,根据理论计算结果,观察不同外形线圈的磁场分布规律,分析在双曲面线圈磁场驱动下永磁体所受电磁力的变化趋势,并通过试验对理论模型进行验证,为双级曲面线圈在磁悬浮驱动织针针织圆机中的应用提供可靠的技术支撑。

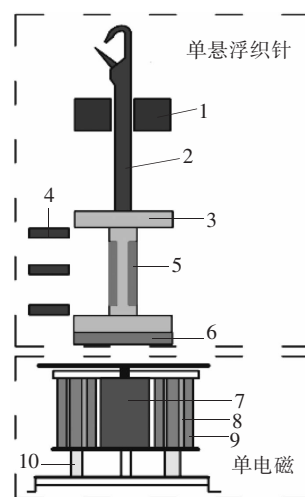
1 磁悬浮驱动织针基本原理

磁悬浮驱动织针^[7-8]借助线圈与永磁体之间的磁力驱动织针,使织针沿轴向上下悬浮完成编织动作。传统针织提花圆纬机和磁悬浮驱动织针原理对比如图1所示。

图1a中,传统针织提花圆纬机主要通过电子选针器选针以及织针片踵与三角轨道等机械方式



1.沉降片;2.三角(凸轮);3.织针;4.挺针片;5.提花片;6.针筒;7.选针器;8.支座。



1.径向支撑;2.织针;3.针体;4.传感器定极片;5.传感器动极片;6.永磁体;7.铁芯;8.风道;9.绕组;10.分风箱。

(a)传统针织提花圆纬机

(b)磁悬浮驱动织针

图1 传统针织提花圆纬机和磁悬浮驱动织针原理对比

来驱动织针,这种方式下的冲击和摩擦严重影响织针的寿命和编织效率。图1b中,磁悬浮驱动织针机构由于省掉了传统提花圆纬机中的三角(凸轮)等中间传动环节,能有效改善织针的摩擦和磨损情况,延长织针寿命,同时,由于是电磁力直接驱动,节省了中间传动环节的时间,因此效率更高。

实际上,由于线圈电流波动、线圈发热、织针悬浮位移改变等因素,单个电磁线圈通常难以为织针提供足够且恒定的驱动电磁力,而电磁力与磁场直接有关,因此,要实现所需的电磁力,必须首先保证磁场满足要求。为此,本文基于单电流圆环的磁场计算模型,推导双级曲面线圈的磁场计算方法。

2 双级曲面线圈的磁场与电磁力

2.1 双级曲面轴对称线圈的磁场

对于单匝带电圆环,已知矢量磁位 $\vec{A}$,其磁场为对矢量磁位取旋度,即 $\vec{B}=\nabla\times\vec{A}$ 。线圈模型如图2所示,图2a中单匝带电圆环在任意点 $Q(x,y,z)$ 的矢量磁位见式(1)。

$$\vec{A}(\rho, \varphi, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{\rho}} f(k) \vec{e}_\varphi \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; I 为圆环通电电流; a 为圆环半径; ρ 为电流元到 Q 点的极径; $\vec{e}_\varphi$ 为 Q 点处的周向单位矢量; $k=\sqrt{\frac{4\rho a}{(\rho+a)^2+(z-h)^2}}$;

$$\text{函数 } f(k) = \left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k),$$

其中 $K(k)=\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-k^2\sin^2\alpha}}$ 为第一类完全椭圆积分,第二类完全椭圆

$$\text{积分 } E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2\sin^2\alpha} d\alpha。$$

如图2b所示的轴对称线圈,内径为 a ,外径沿 z 轴变化,长度为 $2b$,其磁场可近似为多层、半径不同的单匝电流圆环磁场的叠加^[9],因此,任意单级轴对称线圈沿中心线的轴向磁场分布见式(2)。

$$B_z(\rho, \varphi, z) = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_{-b}^b dh \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} T_z da \quad (2)$$

式中: $\mu_0=4\pi\times10^{-7} \text{ N/A}^2$,为真空磁导率; J 为通过二分之一线圈剖面的电流密度, A/mm^2 ; a 为线圈内径; b 为

线圈长度; y_1, y_2 分别为单圆环半径变化的最小值和最大值,是关于圆环圆心坐标 h 的函数; $T_z = \frac{1}{\sqrt{a^2 + (z-h)^2}}$

$$\left[K(k) - \frac{(z-h)^2 - a^2}{a^2 + (z-h)^2} E(k) \right].$$

同理,根据轴对称线圈磁场的可叠加特性,双级线圈组合下的轴向磁场应为各单级线圈沿轴线磁场的矢量和,计算公式见式(3)。

$$\int_V dB = \int_{V_1} dB + \int_{V_2} dB \quad (3)$$

即得式(4)。

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{-b_1}^{-b_2} \int_{y_1}^{y_2} T_z da dh + \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{b_2}^{b_1} \int_{y_1}^{y_2} T_z da dh \quad (4)$$

其中,式(4)中各参数含义同式(2)。

2.2 双级曲面线圈与永磁体间的混合电磁力

根据麦克斯韦经典电磁力理论,假设磁场在导磁材料所在区域均匀分布,则在已知外部磁场中,永磁体所受电磁力可解释为永磁体表面分子电流在已知外部磁场中所受力的矢量和^[10-13]。因此,永磁体所受电磁力的计算公式见式(5)。

$$\vec{F} = \vec{F}_u + \vec{F}_d = \frac{B_u^2 - B_d^2}{2\mu_0} S \quad (5)$$

式中: $\vec{F}_u, \vec{F}_d$ 分别为永磁体上下表面中心点处的磁力; B_u, B_d 分别为永磁体上下表面中心点处的磁感应强度; S 为永磁体上(下)表面面积。

由式(5)可知,永磁体受到的总磁力与永磁体上下表面磁感应强度的平方差呈线性正比例关系,该关系表明:要使悬浮永磁体受力平稳,应使其上下表面的磁感应强度差值维持恒定,即沿轴线每一点处的磁感应强度增量相等。

3 数值计算与试验测试

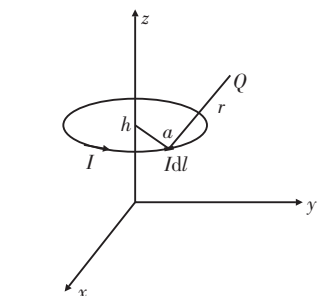
3.1 不同曲面外形线圈组合下的磁场分布

在输入端的电流信号不变的

前提下,不同外形的线圈,其磁场分布也不相同。为实现沿轴线等梯度变化的磁场分布,本文分别计算了3种双级曲面线圈的磁场,分别为柱面线圈、梯形线圈、双曲线圈,如图3所示,线圈参数见表1。计算结果如图4所示,其中,图4a为双级曲面线圈通同向电流下的磁场

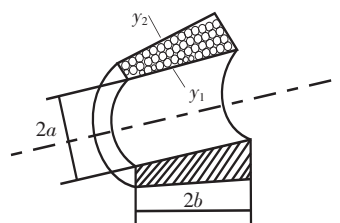
分布,图4b为通反向电流下的磁场分布。

由图4可知,不同曲面外形线圈的磁场分布区别较大。图4a中,当双级曲面线圈通入同向电流时,双级曲面线圈内部磁场最强,其磁感应强度幅值远大于双级柱面线圈和双级梯形线圈幅值,约高30 mT。



注: a 为圆环半径; h 为圆环圆心坐标; I 为圆环通电电流; r 为 Q 点到电流元的距离; Idl 为电流元。

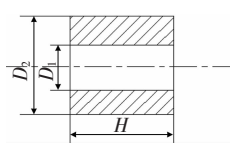
(a)单匝圆环线圈在任意点 Q 的矢量磁位



注: a 为线圈内径; b 为线圈长度; y_1 为单圆环半径变化的最小值; y_2 为单圆环半径变化的最大值。

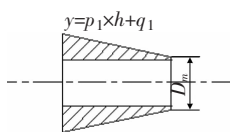
(b)轴对称线圈

图2 线圈模型



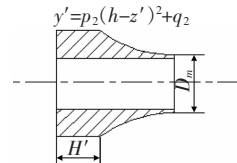
注: D_1 为线圈内径; D_2 为线圈外径; H 为线圈长度。

(a)柱面线圈



注: D_m 为线圈小面外径; y 为线圈外径函数。

(b)梯形线圈



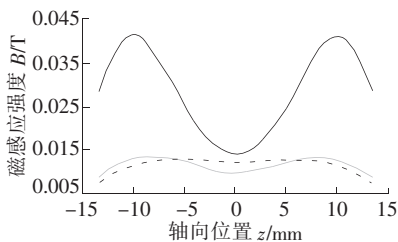
注: D_m 为线圈小面外径; H' 为线圈柱面长度; y' 为线圈外径函数。

(c)曲面线圈

图3 线圈类型

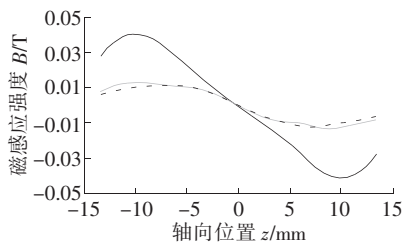
表1 线圈尺寸参数

线圈类型	尺寸参数/mm
柱面线圈	$D_1=9.00, D_2=6.20, H=13.00$
梯形线圈($y=p_1 \times h + q_1$)	$p_1=0.10, q_1=4.00, D_m=6.80$
双曲线圈($y'=p_2 \times (h-z)^2 + q_2$)	$p_2=0.02, q_2=3.40, D_m=6.80, H'=5.80, z=13.00$



—,双曲线圈窄边相对;.....,双级柱面线圈;
—,梯形线圈窄边相对。

(a)通同向电流



—,双曲线圈;.....,柱面线圈;—,梯形线圈。

(b)通反向电流

图4 不同曲面线圈磁场分布

图4b中,当双级曲面线圈通反向电流时,3种曲面线圈均可实现沿轴线梯度均匀变化的磁场。但由于柱面线圈和梯形线圈磁场的变化梯度较小,磁场变化趋势不明显,难以保证提供足够的电磁驱动力,而双曲线圈由于本身磁场较强,在通入反向电流后形成了沿轴线近似线性梯度均匀变化的磁场,不仅能保证足够磁场来提供驱动电磁力,而且由于磁场是等梯度线性变化,理论上满足使永磁体实现稳定悬浮的条件。

3.2 电磁力计算与测试

为验证该双级曲面线圈能否满足磁力要求,实际加工制作双级曲面线圈,并在电子测力天平上进行磁力测量。线圈设计参数见表1,双曲面线圈驱动的简化模型如图5所示。由于线圈外形特殊,且要保证曲线段的精度要求,一般的绕线技术无法完成该线圈的绕制,因此,本试验所用线圈由本课题组独立开发的双级曲线电磁线圈三轴联动自动绕线机加工制作。永磁体参数见表2。

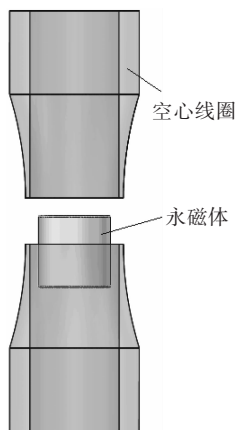


图5 双级双曲面线圈模型

表2 永磁体主要参数

参数	规格
材料及型号	圆柱钕铁硼永磁体 N38
尺寸	4 mm×4 mm(直径 d×高 h)
剩磁	$B_r=1.136 \text{ T}$

采用 UTP-313 型电子测力天平测量磁力,如图6所示。磁力测量时,将双级曲面线圈固定在空心铝棒上,铝棒由底盘中心孔三角定位,永磁体探针安装在三坐标滑台的 z 轴,由计算机端控制程序控制永磁体的上下位移,永磁体每次位移 1 mm 时读取一次磁力数据。其中,仪器外接 6 V 直流电源。

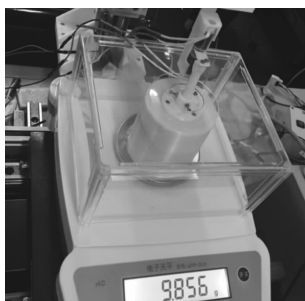


图6 UTP-313 型电子测力天平

电磁力计算结果与实测结果如图7所示。

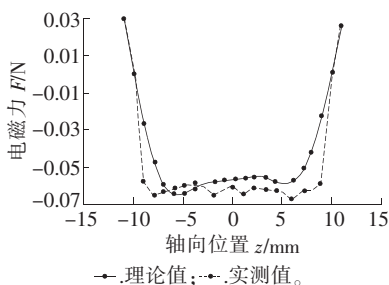


图7 电磁力计算结果与实测结果

由图7可知,电磁力理论与实测值基本吻合,表明双级双曲面线圈能够满足永磁体(织针)对驱动电磁力的要求,其中,使织针实现稳定悬浮的行程约为 12 mm。此外,理论值与实测值存在较小误差,误差范围在 7% 以内,误差可能是由计算模型中的条件简化假设与实际不完全相符,以及测量时外部空气中的磁介质干扰所导致。

4 模型与试验验证

4.1 织针运动规律

假设织针为正弦加速度运动规律,且假定织针上下运动过程中受到大小相同、方向相反的电磁驱

动力 F , 则有式(6)和式(7)。

$$a_{\pm} = \frac{F - G - F_f - F_T}{m} = A \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$F = A m \sin(\omega t) + G + F_f + F_T \quad (7)$$

式中: $a_{\pm}$ 为上升过程织针的运动加速度; G 为织针和永磁体重力, 且 $G = mg$; F_f 为织针与针槽间摩擦力; F_T 为纱线拉力; m 为织针和永磁体的质量。

下降过程织针的运动加速度表达式见式(8)。

$$a_{\mp} = \frac{F + G - F_f - F_T}{m} = -A \sin(\omega t) -$$

$$2g \quad (8)$$

电磁力和加速度随时间的变化规律如图8所示。实际上,由于电磁力不便于精确控制,波形难以达到如图8所示的要求。为便于分析和简化控制过程,假定织针运动中电磁力为定值,加速度为常量,此外,织针在达到两极限位置时应有一定时长的悬停以便于织针钩取纱线和复位。假设织针的运动周期为 T , 因此得到织针的理论位移-时间运动规律,如图9所示。

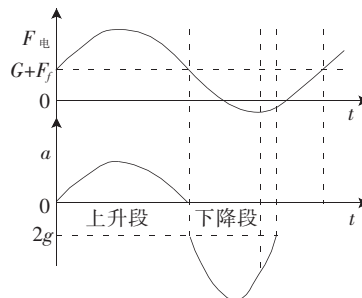


图8 电磁力和加速度随时间变化规律

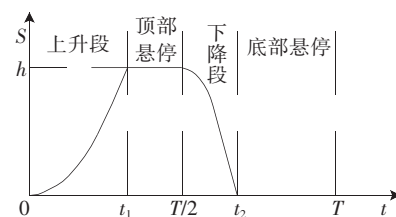


图9 织针运动的理论位移-时间曲线

4.2 试验验证

为了验证双级双曲面形线圈实际应用时的可行性,实际制作了

32 针/25.4 mm、127 mm(5")的磁悬浮试验样机。已搭建的试验平台如图 10 所示,主要有:磁悬浮试验样机、高精度伺服电动机(控制脉冲达 30 万/r)、驱动控制器、计算机端上位机。通过上位机界面程序控制织针的运行状态,并对单织针的运动轨迹进行实时检测。试验中,通过采集基本织针阵列中高精度霍尔位移传感器件(49E-A3D1 线性霍尔开关和 KY-024-C5B6 线性磁力霍尔传感器)的信号,得到被测织针所受到的电磁力状态反馈。

织针在悬浮位移处的电磁力测量值在 Matlab 中拟合得到的结果如图 11 所示。结果表明:在双级双曲面形线圈的磁力驱动下,织针在悬浮过程中受力较平稳,电磁力波动在可控范围内,织针能较准确地达到指定 3 功位位移高度,并在 3 功位高度维持一定行程范围的稳定悬浮来完成编织动作。

5 结论

5.1 针对磁悬浮式驱动织针对驱动电磁力的要求,分析研究任意曲面线圈磁场的计算方法,并由此建立电磁力计算模型,进一步进行理论计算与试验验证。

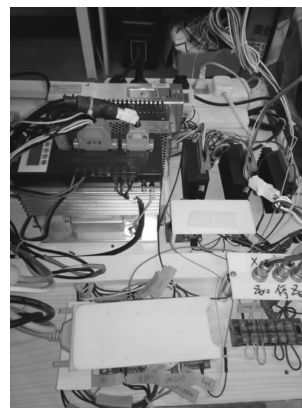
5.2 双级双曲面形线圈在通入反向电流后,能够实现沿轴线梯度线性变化的磁场,且其磁场强度远大于双级柱面线圈和双级梯形线圈。

5.3 对电磁力的理论分析表明,在双级双曲面形线圈的磁力驱动下,永磁体(织针)能够实现约 18 mm 行程的 3 功位平稳悬浮。

5.4 通过对比理论计算结果与实际测试结果,两者基本吻合,表明应用双曲面线圈能够满足磁悬浮式驱动织针对织针编织动作的可靠性和稳定性要求,验证了双曲面线圈作为磁悬浮驱动的可行性。



(a)整体效果



(b)控制部件

图 10 磁悬浮式驱动织针圆机试验平台

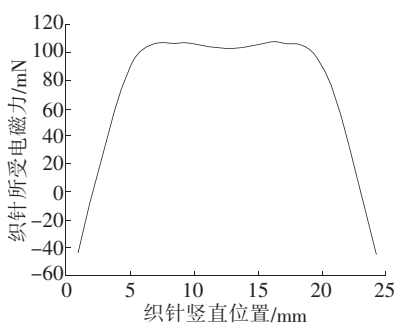


图 11 单织针电磁力试验结果

5.5 下一步将结合试验样机开展实用化和可靠性研究,进一步优化各机构,提升高速编织时的稳定性,同时在线测试织针瞬时高速悬浮运动轨迹的变化规律等,为该项新的驱动原理奠定实用化基础。

参考文献

- [1] DONOSO G, LADERA C L. Nonlinear dynamics of a magnetically driven duffing-type spring-magnet oscillator in the static magnetic field of a coil[J]. European Journal of Physics, 2012, 33(6): 1473-1486.
- [2] ROVERS J M M, JANSEN J W, LOMONOVA E A, et al. Analytical model of the interaction force between a rectangular coil and a cuboidal permanent magnet[C]//Proceedings of the 11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington D.C.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2010: 677.
- [3] 池小平, 吕庆敖. 3 种不同形状电枢对线圈炮发射性能影响的仿真分析

- [J]. 军械工程学院学报, 2008, 20(3): 32-35.
- [4] 惠小强, 陈文学. 有限长通电螺线管空间的磁场分布[J]. 物理与工程, 2004, 14(2): 22-23.
- [5] 苏安, 顾国锋. 对求解通电螺线管磁场两种方法的讨论[J]. 广西物理, 2008(1): 51-54.
- [6] 周耀忠, 唐申生. 任意形状通电线圈磁场的计算[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(3): 71-74.
- [7] 吴晓光, 孔令学, 朱里, 等. 磁悬浮式针织提花驱动方式理论与探讨[J]. 纺织学报, 2012, 33(10): 128-133.
- [8] 朱文斌, 吴晓光, 张驰, 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.
- [9] 雷银照. 轴对称线圈磁场计算[M]. 北京: 中国计量出版社, 1991.
- [10] 王瑞凯, 左洪福, 吕萌. 环形磁铁空间磁场的解析计算与仿真[J]. 航空计算技术, 2011, 41(5): 19-23.
- [11] 彭全岭, 赵起. 利用轴向磁化的永磁环制造轴向梯度磁场[J]. 高能物理与核物理, 2003, 27(4): 363-366.
- [12] 李群明, 万梁, 段吉安. 一种永磁轴承的设计和磁场分布的解析计算[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(5): 970-975.
- [13] 王瑜. 永磁装置中磁场力的计算[J]. 磁性材料及器件, 2007, 38(5): 49-52.

收稿日期 2017 年 6 月 5 日