

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.07.010

光纤熔融拉锥中拉力控制方法与电磁力仿真

张 伟, 荣伟彬, 王乐锋, 路 遥, 孙立宁

(机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150080 哈尔滨)

摘 要: 针对保偏光纤耦合器熔融拉锥制造过程中拉力控制问题,提出一种新的计算机在线拉力控制方法. 拉力控制系统由计算机、拉伸机构、圆光栅及控制电路组成,通过检测光纤支架的旋转角度、改变线圈中的电流,控制永磁铁与线圈间的电磁力,实现对拉伸力的实时控制. 分析电磁力和拉力的关系,建立永磁铁和线圈的三维有限元模型,确定永磁铁的运动轨迹,并对通电线圈的磁场分布和电磁力进行仿真,得到线圈中的电流、支架旋转角度和拉力的关系式. 仿真结果表明拉力控制良好,控制误差约为 1.03%.

关键词: 保偏光纤; 熔融拉锥; 电磁力; 力控制; 有限元仿真

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)07-0062-06

Method of controlling drawing force in the fused biconical tapering process and simulation of electro-magnetic force

ZHANG Wei, RONG Weibin, WANG Lefeng, LU Yao, SUN Lining

(State Key Laboratory of Robotics and System(Harbin Institute of Technology), 150080 Harbin, China)

Abstract: According to the problem of drawing force control in the fused biconical tapering process of polarization maintaining fiber (PMF) coupler, an online computer control method of drawing force is presented, which includes the computer, drawing mechanism, rotary position encoders and a control circuit. By detecting the rotation angle of fiber clamp, the electro-magnetic force can be controlled through changing the coil current, and the real-time control of drawing force is realized. Firstly, the relationship between the electromagnetic force and drawing force is analyzed, a 3D finite element model of the permanent magnet and the coil is established, and a trajectory equation describing the permanent magnet is obtained. Then, by simulation of the magnetic field and the electro-magnetic force around the coil, the relationship among the coil current, the rotation angle of fiber clamp and the drawing force is determined. At last, by simulation, the drawing force is controlled within an error of 1.03%.

Keywords: polarization maintaining fiber; fused biconical tapering; electro-magnetic force; force control; finite element simulation

保偏光纤耦合器是应用保偏光纤制作的光耦合器,是实现线偏振光耦合、分光以及复用的关键器件,广泛应用于光纤传感和相干通信中^[1-2]. 熔融拉锥^[3-4]是将光纤两端固定并使其具有一定的张

力,加热光纤,使其受热部分处于熔融状态,同时在两端拉伸光纤,使受热部分即光纤熔锥区形成锥型或者哑铃型,此方法是保偏光纤耦合器制造中最重要的方法.与磨抛法和腐蚀法相比,熔融拉锥具有热稳定性好、器件附加损耗小的特点. 熔融拉伸过程由拉伸速度、熔融温度和拉力 3 个工艺参数共同控制,其中光纤两端的拉力直接影响保偏光纤耦合器的性能.目前,光纤拉锥系统通常是由拉锥运动部分、加热部分和光纤装夹部分组成.拉锥运动部分采用精密步进电机(直流电机)运动平台,由计算机实现对拉伸速度的控制.拉伸力由运动平台

收稿日期: 2015-05-23.

基金项目: 机器人技术与系统国家重点实验室自主研究课题 (SKLRS201301A01);长江学者和创新团队发展计划 (IRT0915).

作者简介: 张 伟(1982—),男,博士研究生;
荣伟彬(1972—),男,教授,博士生导师;
孙立宁(1964—),男,长江学者特聘教授.

通信作者: 荣伟彬, rwb@hit.edu.cn.

的运动产生,当运动平台的速度不同时,其产生的拉伸力也不同.光纤的主要成分是石英玻璃,是一种热黏弹性材料,黏弹性变形和加热温度有关,因而当运动平台的运动速度不变时,光纤的加热温度不同,其黏弹性变形不同,由运动平台产生的拉力也不同,因此很难对拉伸力进行实时控制^[5-8].PAL等^[9]在熔融拉锥运动平台上安装弹簧,解决了光纤在拉伸过程中光纤的两端拉力突然变化的问题;但是当弹簧的伸长不相同,光纤受到的拉力也不同,不容易实现拉伸过程中的拉力控制.吕迅等^[10]在拉锥机构内侧安装高敏感度的张力传感器,通过调节拉锥电机的速度控制张力的控制,因而张力在一定范围内波动.

针对保偏光纤耦合器制作过程拉力控制问题,本文提出了一种计算机在线拉力控制方法,通过检测光纤支架的旋转角度、控制线圈中的电流,进而实现拉力的控制.介绍拉力控制系统的组成及其工作原理,对运动中的永磁铁和线圈之间的电磁力进行三维有限元仿真,通过仿真结果建立线圈电流、支架旋转角度与电磁力的数学关系,并且验证了该方法的可行性.

1 拉力控制系统组成及工作原理

保偏光纤熔融拉锥拉力控制系统原理如图 1 所示,主要由拉伸机构、电磁线圈、圆光栅、DA 输出卡、运动控制卡和计算机等组成.拉伸机构有鼓轮连接片、联动鼓轮、光纤支架以及底座等构成如图 2 所示.

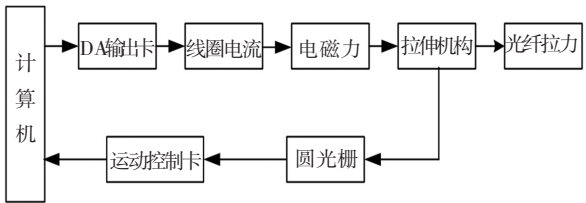


图 1 保偏光纤熔融拉锥拉力控制系统原理

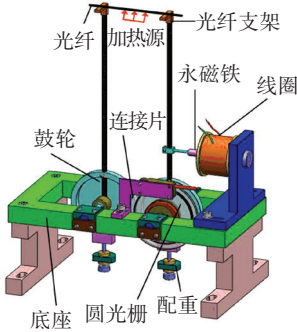


图 2 保偏光纤熔融拉锥机构结构

控制系统工作原理如下:计算机经 DA 输出卡控制输出电压,控制线圈中电流的大小,电流经

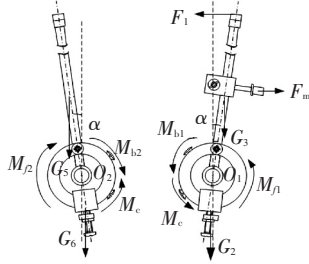
通电线圈产生磁场,并与光纤支架上的永磁铁作用产生相互吸引的电磁力,由此光纤支架产生拉力.同时,由于两个鼓轮之间有两片连接片连接,因而两鼓轮在垂直面内的旋转运动过程中是联动的.圆光栅的玻璃盘和鼓轮连接在一起,圆光栅可以检测出鼓轮旋转角度的变化,进而得到当前光纤支架的旋转角度,由此根据光纤支架的长度计算得到光纤的拉伸长度.采用云杉素将光纤固定在光纤支架上,光纤在加热源和光纤支架拉力的作用下,完成熔融拉锥运动.

拉伸机构采用超薄弹片连接,薄片的弯曲弹力相对于拉伸力可以忽略,两侧光纤支架产生的拉力相等,并且两侧光纤支架旋转的角度相同.当光纤支架旋转角度在 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 时,能够满足光纤熔融拉锥的要求.单个光纤支架的受力分析如图 3 所示,光纤支架的力矩平衡关系为

$$M_{G_6} + M_{b_2} + M_{J_2} = M_{G_5} + M_c, \tag{1}$$

$$M_{G_2} + M_b + M_{J_1} + F_1 \cdot L_F \cdot \cos \alpha + M_c = M_{G_3} + F_m \cdot L_m \cdot \cos \alpha. \tag{2}$$

式中: $M_{b_2}(M_{b_1})$ 为左(右)支架上的连接片与其紧固螺栓产生的力矩; $M_{J_2}(M_{J_1})$ 为左(右)支架旋转过程摩擦力产生的力矩; $M_{G_6}(M_{G_2})$ 为左(右)支架下端配重产生的力矩; M_{G_5} 为左支架产生的力矩; α 为支架中心线与垂直方向的夹角; M_{G_3} 为右支架、永磁铁及固定架产生的力矩; F_1 为右支架产生的拉力; L_F 为当 $\alpha = 0^{\circ}$ 时, F_1 到支架旋转中心 O_1 的距离; L_m 为当 $\alpha = 0^{\circ}$ 时,电磁力 F_m 到支架旋转中心 O_1 的距离; M_c 为连接片产生的力矩.



(a) 左支架受力 (b) 右支架受力

图 3 单个光纤支架受力图

由式(1)可知,调节左支架下端配重的位置,改变力矩 M_{G_6} 的大小,使 $M_c = 0$.由式(2)可知,当 $F_1 = 0, F_m = 0$,调节右支架下端配重的位置,改变力矩的 M_{G_2} 大小,使其满足

$$M_{G_2} + M_{b_1} + M_{J_1} = M_{G_3}.$$

光纤支架整体的受力如图 4,满足力矩平衡

$$M_{J_1} + F_1 \cdot L_F \cdot \cos \alpha = F_m \cdot L_m \cdot \cos \alpha. \tag{3}$$

光纤支架的支撑轴承采用精密深沟球轴承支撑,精密深沟球轴承的摩擦系数约为 $0.001\ 0 \sim$

0.001 5,在光纤支架旋转中摩擦力很小,相对拉力可以忽略,将式(3)简化为

$$F_1 = F_m \cdot L_m / L_F. \quad (4)$$

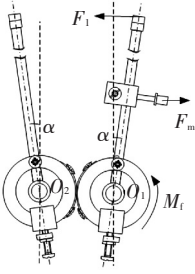


图 4 光纤支架整体受力示意

在拉伸过程中,永磁铁的运动轨迹是空间弧线,永磁铁和线圈之间的距离变化,当线圈中的电流恒定时,线圈和永磁铁的电磁力变化,因此光纤支架产生的拉力发生改变.

2 电磁力的分析与仿真

2.1 理论分析

圆柱型永磁铁是最常用的永磁铁之一,广泛地应用在编码器、制动器、马达等器件中. 对于一个高度为 Z_0 ,半径为 a 的圆柱型永磁铁,磁化方向是沿着 Z 向磁化,外部磁场分布在 (r, θ, z) 的磁感应分布 B 为^[11-12]

$$B_z = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_{-z_0/2}^{z_0/2} \frac{1}{[(a+r)^2 + (z-z')^2]^{1/2}} \times$$

$$\left[\frac{a^2 + r^2 - (z-z')^2}{(a-r) + (z-z')^2} E(k) + K(k) \right] dz',$$

$$B_r = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_{-z_0/2}^{z_0/2} \frac{z-z'}{r[(a+r)^2 + (z-z')^2]^{1/2}} \times$$

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

式中: $K(k)$ 和 $E(k)$ 分别是第一类和第二类完全椭圆积分,且

$$k = \sqrt{\frac{4ar}{(a+r)^2 + (z-z')^2}},$$

$$K[k] = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1-k\sin^2(\theta)}} d\theta,$$

$$E[k] = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k\sin^2(\theta)} d\theta.$$

在电磁场中,常用计算电磁力的方法有 3 种:洛伦兹力 (Lorenz Force) 法、麦克斯韦应力张量 (Maxwell Stress Tensor) 法和虚位移 (Virtual Work) 方法^[13]. 其中,洛伦兹力方法适合于计算载流体在磁场中的受力.永磁铁受到的电磁力 F_m 与通电线圈受到的电磁力 F_c 为一对作用力与反作

用力,根据牛顿第三定律和洛伦兹力定律,永磁铁受到的电磁力为

$$F_m = -F_c = - \int_V f dv = - \int_V J \times B dv.$$

式中: f 为线圈单位体积受到的电磁力, J 为线圈的电流密度, B 为线圈受到的磁感应强度.

2.2 有限元分析

在支架的运动过程中,圆柱型永磁铁进入线圈的通孔中,采用二维仿真计算无法准确计算出电磁力.为了计算的准确性,本文建立三维的仿真模型,以光纤支架的旋转中心为原点建立 $OXYZ$ 三维坐标系,如图 5 所示. 线圈支架的材料为尼龙,是绝缘材料,在仿真中可将线圈简化.钕铁硼有极高的磁能积和矫顽力,同时具有高密度能量的优点,因此选取钕铁硼作为永磁铁^[14].永磁铁的外形尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,由高斯计 GV-300 测得表磁为 389 mT.线圈高度为 40 mm,内径为 20 mm,外径为 30 mm,匝数为 1 756 匝.在光纤支架运动过程中,永磁铁与 YOZ 面的夹角随着运动角度变化.永磁铁在 XOY 平面运动示意图如图 6 所示:假设永磁铁中心 B 点的坐标为 (p_x, p_y) ,则光纤支架旋转 θ 后,永磁铁的中心轴与水平面夹角为 θ , B 点的坐标为

$$p_x = L_1 \sin \theta + L_2 \cos \theta,$$

$$p_y = L_1 \cos \theta + L_2 \sin \theta.$$

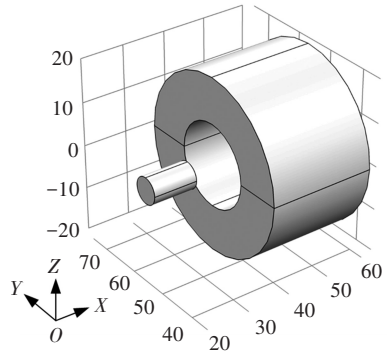


图 5 电磁力仿真模型

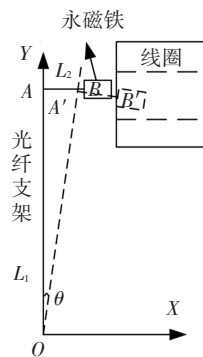


图 6 永磁铁运动示意

建立立方体空气场来模拟空间的磁场分布情况,取立方体的边长 130 mm,边界采用磁绝缘边界条件,即磁矢位 $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$,选择初始值磁矢能为 $0 \text{ Wb/m}^{[15-16]}$. 网格划分采用自由四面体划分,为了提高计算的精度和速度,对线圈和永磁铁采用细化的网格划分,对立方体空气场采用标准的网格划分.划分后的有限元网格数为 44 743,划分后的网格如图 7 所示.

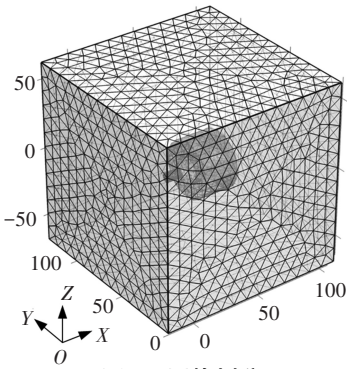


图 7 网格划分

线圈中通入 0.15 A 电流时,在 $X = 35 \text{ mm}$ 通电线圈的磁场分布如图 8,图 9 是 AB 上磁感应强度的分布图,其中 AB 穿过线圈的中心轴.

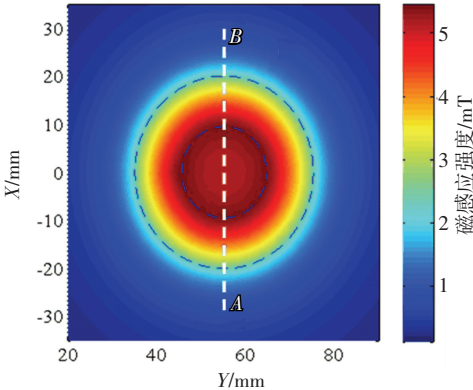


图 8 $X = 35 \text{ mm}$ 的磁感应分布

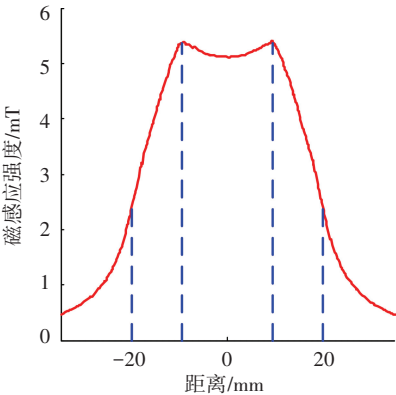


图 9 AB 上磁感应强度分布

由图 8 和 9 可知,通电线圈上方的磁感应强度与到线圈中心轴的距离有关,当距离小于线圈的内径(20 mm)时,随着距离的减小,磁感应强度

逐渐减少,在线圈中心轴上的磁感应强度最小为 5.147 mT,与通过解析式^[17]得到的 5.196 mT 基本相同. AB 上的磁感应强度最大值与最小值相差 0.3 mT,磁感应强度的变化率较小.当距离为线圈的内径时,磁感应强度最大,随着距离的增大,磁感应强度急剧减小.图 10 为 $Z = 0$ 时的磁感应强度分布图,图 11 为 CD 线上的磁感应强度分布图,其中 C 、 D 为线圈中心轴的两点,其两点关于线圈垂直轴对称,可以看出,通电线圈磁感应强度分布关于线圈垂直轴对称,沿着线圈中心轴上磁感应分布是先减少后增大,在线圈中心达到最大值,在线圈的右轮廓附近,磁感应强度的变化接近线性变化.

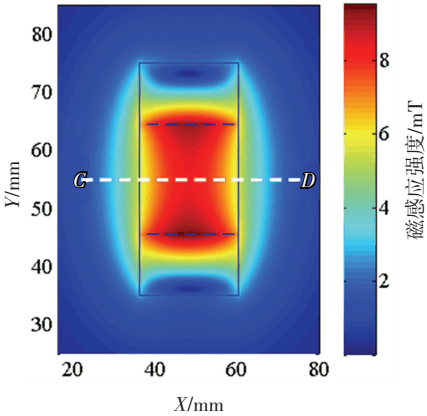


图 10 $Z = 0$ 的磁感应分布

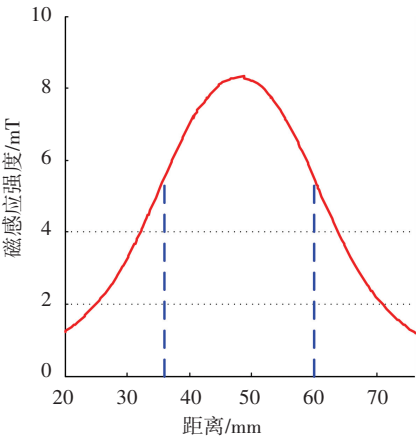


图 11 CD 上磁感应强度分布

2.3 结果与讨论

线圈周围的磁感应强度与其通入的电流有关,因而永磁铁上的电磁力与电流有关,图 12 为旋转角度 $\theta = 0^\circ$ 时,电磁力与线圈中电流的关系图,通过最小二乘拟合得到线圈中的电流与电磁力是线性关系,关系表达式如下:

$$F_m = 0.376 \, 9I. \tag{5}$$

式中: F_m 为永磁铁产生的电磁力(N), I 为线圈中的电流(A).

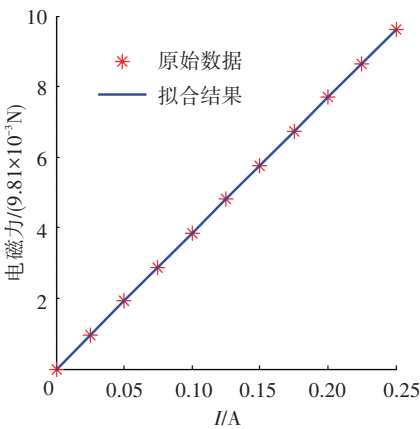


图 12 $\theta=0^\circ$ 时,电磁力与电流的关系

当支架旋转角度 θ 发生变化时,永磁铁的位置发生变化,线圈周围的磁场会发生变化,永磁铁产生的电磁力也发生变化.图 13 为线圈中的电流恒定时,支架的旋转角度与电磁力的变化关系图.当电流恒定时,旋转角度 θ 与电磁力 F_m 呈线性关系,但当电流变化时,电磁力 F_m 和旋转角度 θ 的线性关系也发生变化.定义电磁力变化率 $K_{F\theta}$ 为当线圈中的电流恒定时,电磁力变化与旋转角度变化的比值,即

$$K_{F\theta} = \frac{\Delta F_m}{\Delta \theta}.$$

式中: ΔF_m 为永磁铁上电磁力的变化(N), $\Delta \theta$ 为支架旋转角度 θ 的变化($^\circ$).

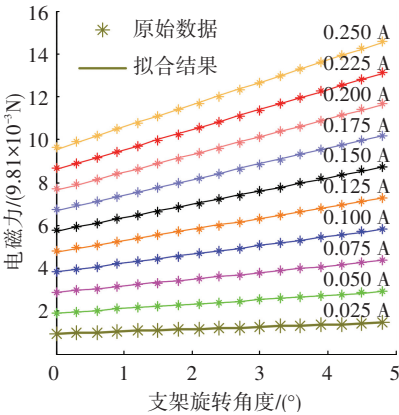


图 13 支架旋转角度与电磁力的关系

图 14 为电磁力变化率和线圈中电流的关系图,可以看出电磁力变化率与线圈中的电流呈线性变化,通过最小二乘拟合得

$$K_{F\theta} = 0.0407I. \quad (6)$$

当支架旋转角度不同时,线圈电流与电磁力的线性关系不同.定义电磁力标定值 K_{FI} 为光纤支架旋转角度不变时,电磁力变化与电流变化的比值,即

$$K_{FI} = \frac{\Delta F_g}{\Delta I}.$$

式中: ΔF_g 为永磁铁上电磁力的变化(N); ΔI 为线圈中电流的变化(A).

图 15 为电磁力标定值和旋转角度的关系图,由图可知,电磁力标定值与支架的旋转角度呈线性变化,关系表达式为

$$K_{FI} = 0.0407\theta + 0.3745. \quad (7)$$

由式(5)~(7)得到 F_m 、 I 、 θ 的关系式为

$$I = 2.548 \times 10^{-4} F_m - 1.0584 F_m \theta / (40.7\theta + 374.5). \quad (8)$$

由式(4)和式(8)可得到 F_l 、 I 和 θ 的关系式为

$$I = 8.693 \times 10^{-4} F_l - 3.608 F_l \theta / (40.7\theta + 374.5). \quad (9)$$

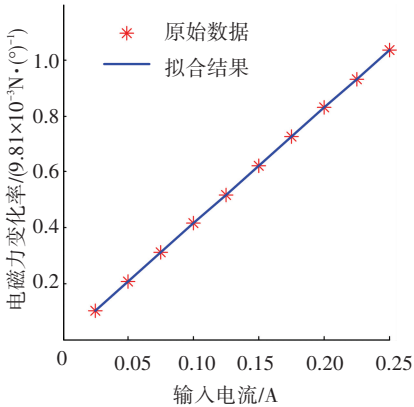


图 14 电流与电磁力变化率的关系

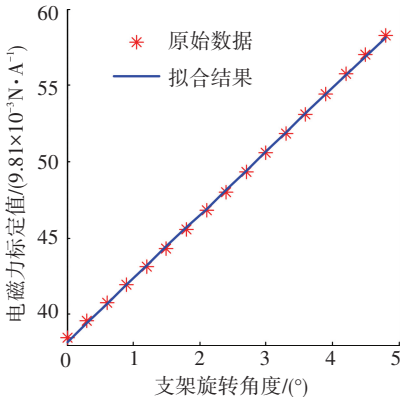


图 15 支架旋转角度与电磁力标定值的关系

当拉力 F_l 为定值时,由式(9)可以得 I 和 θ 的关系,如图 16 所示,当拉力保持恒定时,输入的电流随着光纤支架旋转角度的增大而减少.当光纤支架旋转角度改变时,通过改变线圈的电流,改变电磁力,实现拉力的控制,图 17 中为通过控制线圈中的电流得到拉力和光纤支架旋转角度的关系图,由图中看出拉力基本保持恒定,控制误差为 1.03%. 因此当光纤支架的旋转角度改变时,改变线圈中的电流,改变电磁力,实现光纤支架拉力的控制.

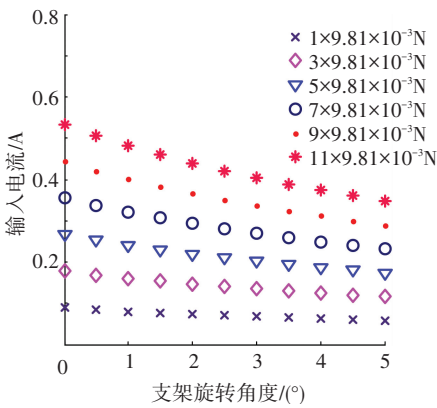


图 16 拉力恒定时电流和光纤支架旋转角度关系

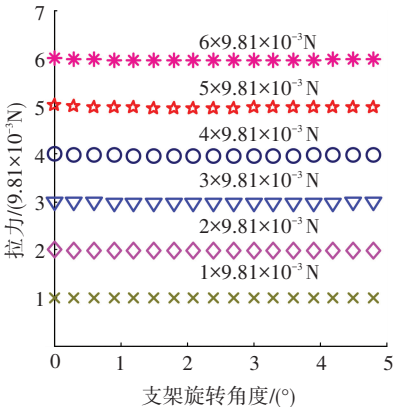


图 17 控制电流后光纤支架旋转角度与拉力的关系

3 结 论

1) 本文提出了一种实时拉力控制方法, 保偏光纤熔融拉锥拉力控制系统由计算机、拉伸机构、圆光栅和控制电路等组成, 通过检测光纤支架的旋转角度, 控制线圈中的电流, 实现对拉力的实时控制。

2) 对拉伸机构进行受力分析, 确定了拉力和电磁力之间的关系, 建立了拉伸机构的三维空间模型, 确定了永磁铁空间运动轨迹。

3) 对永磁铁和线圈之间的电磁力进行三维有限元仿真, 通过计算得到了线圈中的电流、支架旋转角度与拉力的关系, 并且通过仿真验证了该方法的控制误差为 1.03%。该方法对保偏光纤耦合器的制造具有重要的指导意义。

参考文献

[1] DAVÉ D P, AKKIN T, MILNER T E. Polarization-maintaining fiber-based optical low-coherence reflectometer for characterization and ranging of birefringence[J]. Optics letters, 2003, 28(19):1775-1777.

[2] 孟克, 鲁标, 李艳昌, 等. 水声信号的光纤 DSPI 检测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(8): 1118-1120.

[3] KAWASAKI B S, HILL K O, LAMONT R G. Biconical-taper single-mode fiber coupler[J]. Optics Letters,

1981, 6(7): 327-328.

[4] LAMONT R G, JOHNSON D C, HILL K O. Power transfer in fused biconical-taper single-mode fiber couplers: dependence on external refractive index[J]. Applied optics, 1985, 24(3): 327-332.

[5] HARUN S W, LIM K S, TIO C K, et al. Theoretical analysis and fabrication of tapered fiber[J]. Opti - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(6): 538-543.

[6] HSIEH C S, WU T L, CHENG W H. An optimum approach for fabrication of low loss fused fiber couplers[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 69(1): 199-203.

[7] WANG Y, LIU H. The comparison of two methods to manufacture fused biconical tapered optical fiber coupler[C]//Photonics and Optoelectronics Meetings 2009. [S.l.]: International Society for Optics and Photonics, 2009: 751418-1—751418-9.

[8] 帅希士. 电加热式熔融拉锥机的运动控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

[9] PAL B, CHAUDHURI P, SHENOY M. Fabrication and modeling of fused biconical tapered fiber couplers[J]. Fiber and integrated optics, 2003, 22(2): 97-117.

[10] 吕迅, 官洪运. 熔融拉锥控制系统的改进[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2003, 2(6): 597-600.

[11] EBRAHIMI B, KHAMESEE M B, GOLNARAGHI M F. Design and modeling of a magnetic shock absorber based on eddy current damping effect[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315(4): 875-889.

[12] AGASHE J S, ARNOLD D P. A study of scaling and geometry effects on the forces between cuboidal and cylindrical magnets using analytical force solutions[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(10): 1-9.

[13] 张存山. 永磁无刷牵引电机电磁性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.

[14] LEVENTIS N, GAO X. Nd-Fe-B permanent magnet electrodes: Theoretical evaluation and experimental demonstration of the paramagnetic body forces[J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 124(6): 1079-1088.

[15] ALFERENOK A, WERNER M, GRAMSS M, et al. Numerical optimization of the magnet system for the lorentz force velocimetry of electrolytes[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 38(2): 79-92.

[16] ZIOLKOWSKI M, BRAUER H. Fast computation technique of forces acting on moving permanent magnet[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8): 2927-2930.

[17] PAWASHE C, FLOYD S, SITTI M. Modeling and experimental characterization of an untethered magnetic micro-robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28(8): 1077-1094.