

激光焦点控制磁力驱动的控制特性实验对比分析*

佟玲¹, 吴利平¹, 金嘉琦¹, 孙凤¹, 张晓友^{1,2}

(1. 沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 日本工业大学, 日本埼玉 345-0826)

摘要:为了满足激光焦点控制系统的位置和速度响应要求,设计了一种轴向放置、轴向磁化的环形永磁体自复位的3自由度激光焦点磁力驱动微动平台。根据该微动平台的结构进行力学分析并建立动力学方程,在此基础上进行微动平台的比例、积分、微分控制实验和鲁棒控制实验。通过两种不同控制策略的对比分析,结果表明,两种控制策略都能实现微动平台的稳定驱动,但是在比例、积分、微分控制策略下,响应速度更好,在鲁棒控制策略下,抗干扰能力更好。

关键词:电磁驱动;鲁棒控制;比例、积分、微分控制;对比实验;差动控制

中图分类号:TH-39 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)03-120-07

Experimental comparative analysis of control characteristics of laser focus control magnetic force drive

TONG Ling¹, WU Liping¹, JIN Jiaqi¹, SUN Feng¹, ZHANG Xiaoyou^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Nippon Institute of Technology, Saitama 345-0826, Japan)

Abstract: In order to satisfy the requirements of position and velocity response of the laser focus control system, a three-degree-of-freedom laser focus magnetically driven micro-motion platform was designed. According to the structure of the freestyle platform, the mechanical analysis and the establishment of the kinetic equation were carried out. On this basis, the PID (proportion integration differentiation) control experiment and the robust control experiment of the fretting platform were carried out. Results show that the two control strategies can achieve a stable driving of the micro-motion platform. However, under the PID control strategy, the response speed is better; while under the robust control strategy, the anti-jamming ability is better.

Key words: electromagnetic drive; robust control; proportion integration differentiation control; comparative experiment; differential control

激光加工技术中,激光切割技术由于其具有光点小、能量集中、热影响区小、在加工过程中不接触加工工件、对工件污染小、不受电磁干扰、激光束易于聚焦、导向、便于自动化控制等特点,已成为当前激光加工技术领域研究与应用的热点之一^[1-3]。

随着加工制造行业往高精尖方向发展,提高激光切割质量和切割效率的研究受到了国内外众多学者的关注^[3-8]。影响切割效率和切口质量的因素有许多,特别是在喷嘴辅助气体流场分析与结构改进上,研究较为集中^[9-11],其中气体流动的空气动力学特性是研究提高切割效率的重要影响因素。西班牙维戈大学的研究者通过实验验证了改变激光轴线与辅助气体喷射轴线之间的角度,对提高切口质量和切割效率有较好的效

果^[12]。但是这种不同轴激光切割,会导致激光切割机在各个加工进给方向上的加工效率和质量不同,进而严重影响加工精度。

为解决这种不一致带来的影响,必须有一种高速、高精度、结构紧凑的驱动器可以控制喷嘴,以实现在不同进给方向上,实时保证激光束与辅助气流之间的位置关系。由于传统机械接触式驱动器的各部件之间存在运动摩擦副,其存在响应速度慢、定位精度低的缺点。磁力驱动技术是利用通电的电磁线圈产生电磁力,并将其作为驱动力的无接触驱动技术。其结构简单、紧凑,无机械接触摩擦,无须润滑,易于实现多自由度驱动,在一定程度上弥补了传统机械驱动技术的不足^[13-16]。

为了同时解决非同轴切割带来的不一致和传

* 收稿日期:2017-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51105257,51310105025)

作者简介:佟玲(1980—),女,辽宁沈阳人,博士研究生,E-mail:tonglingsy@163.com;

孙凤(通信作者),男,副教授,博士,博士生导师,E-mail:sunfeng@sut.edu.cn

统接触驱动器定位精度低、响应速度慢的问题。本文提出电磁驱动、永磁复位式的3自由度磁力微动平台,该驱动平台的结构采用3对差动电磁铁实现了X、Y方向平动以及C轴的转动,利用1对大小相等、轴向磁化轴向平行安装并且异性相对放置的环形永磁体构成永磁弹簧实现自复位。随后利用dSPACE1104系统为核心控制器进行试验分析,对该驱动器在鲁棒控制策略和比例、积分、微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制策略下的响应特性进行了对比试验研究。本文研究的驱动器设计定位精度应满足实验室现有的K-800-13M激光切割机的±0.01 mm定位精度要求。

1 激光焦点磁力驱动微动平台

根据激光焦点控制的要求,建立了激光焦点磁力驱动微动平台,其结构如图1所示。

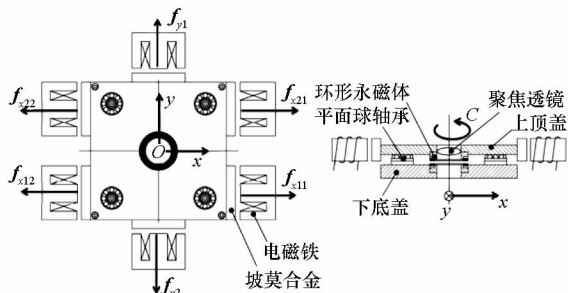


图1 微动平台系统结构图

Fig.1 Micro motion platform system diagram

该微动平台由驱动机构、自复位机构和支撑机构组成,驱动力由电磁铁与坡莫合金之间的吸引力提供,其吸引力分别为 f_{x11} f_{x12} f_{x21} f_{x22} f_{y1} 、 f_{y2} ;6个电磁铁和下底座与上顶盖构成微动平台的驱动机构;自复位机构由两个大小相同、轴向磁化、轴向平行安装、异性相对的环形永磁体组成,支撑机构由下底盖、平面球轴承、上顶盖等组成,聚焦透镜固定在上顶盖中心位置。

该微动平台在平动平面内,可以沿着X方向、Y方向移动和C方向转动。实现该平台的稳定响应由6个电磁铁组成3对差动式电磁铁组实现,其中电涡流传感器实时监测反馈X、Y方向的位置,X、Y方向的联动实现C向转动。

2 激光焦点控制系统受力分析

为了更加准确地了解微动平台的力学特性,便于后面的控制特性的研究,对微动平台进行受力分析,如图2所示。

根据系统的结构,设微动平台处于平衡位置

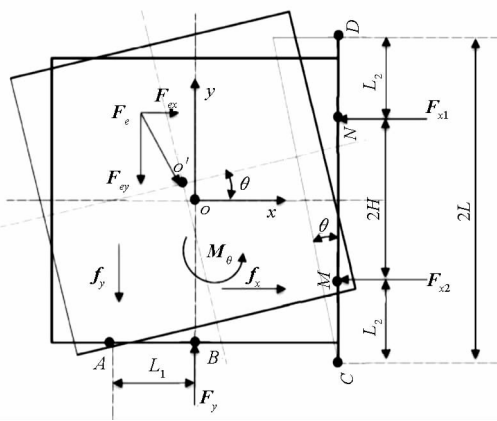


图2 系统受力分析图

Fig.2 System force analysis chart

时的质心 o 为笛卡尔坐标原点,其坐标为 (x, y) 。在微动平台上顶板运动过程中,电磁驱动力 $F_{x1} = f_{x11} - f_{x12}$, $F_{x2} = f_{x21} - f_{x22}$, $F_y = f_{y1} - f_{y2}$;永磁回复力 F_e ,可分解为 F_{ex} 和 F_{ey} ;摩擦阻力 f_x f_y ,摩擦力矩 M_θ 等合力使得微动平台的质心偏离平衡位置,移动到 o' 。其中微动平台沿X方向的位移为 x ,沿Y方向的位移为 y ,绕C轴转动的角度为 θ 。

3 电磁铁磁力和永磁回复力测量

根据激光焦点磁力驱动平台的结构,驱动用电磁力和永磁回复力是该驱动平台运动较为重要的影响因素。为了能更好地控制微动平台,对电磁铁磁力和永磁回复力进行了分析。

电磁铁的电磁力大小与气隙大小以及通电电流有关,可表示为:

$$F = k_m \frac{i_j^2}{d_j^2} \quad (j=0,1,2,\dots) \quad (1)$$

式中, k_m 为电磁铁系数, $k_m = \mu_0 N^2 S / (2\delta)^2$ 。其中: N 为电磁铁线圈匝数, δ 为磁路磁阻系数, S 为E型铁芯中磁路的横截面积, i_j 为电磁铁线圈电流, d_j 为电磁铁与坡莫合金气隙, μ_0 为磁导率。

式(1)中电磁力是基于磁场分布均匀、铁芯不饱和以及无漏磁等假设的情况下得出的,但是在实际实验中,会存在一些因素造成磁力计算有一定的误差,比如参数 k_m ,因此为了能更加准确地反映电磁铁的磁力与气隙和电流之间的关系,本文对电磁铁磁力进行了实际测量,然后通过曲线拟合,得出在试验中更加准确的电磁力。

实验测量装置如图3所示,该装置由X向和Z向2自由度手动微调平台、坡莫合金块、电磁铁、力矩传感器组成,其中力矩传感器的型号为Load Cell CXZ-114,量程为0~300 N,精度为0.01 N。

分别测量1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm、

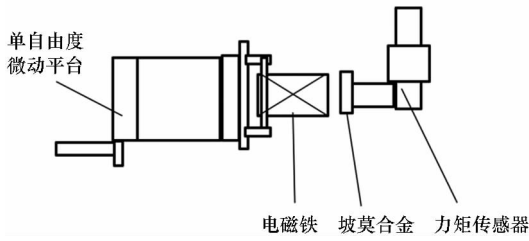


图 3 微动平台电磁力测量实验装置

Fig. 3 Experiment system of electromagnetic force measurement

3.5 mm、4.0 mm、4.5 mm、5.0 mm 时,不同电流情况下,电磁铁对坡莫合金吸引力。图 4 所示为不同电流情况下,电磁铁磁力与气隙大小的关系。

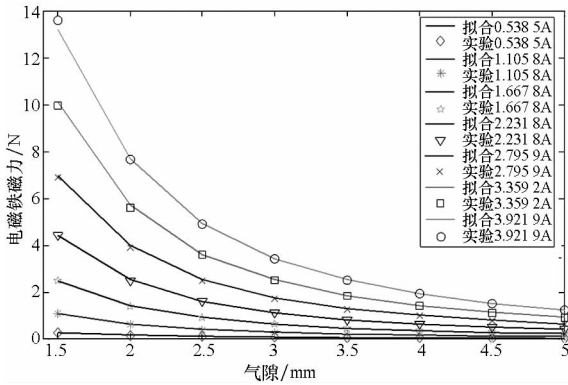


图 4 不同线圈电流下电磁铁磁力与气隙的关系

Fig. 4 Relationship between magnetic force and the air-gap under different current

根据电磁力的公式形式,由式(1)得

$$k_{mq} = F_{jq} \frac{d_j^2}{l^2} \quad (q=0,1,2,\dots; j=0,1,2,\dots) \quad (2)$$

式中: k_{mq} 是电流为 i 时,第 q 点的电磁铁系数; F_{jq} 是电流为 i 时,气隙为 d_j 、第 q 点为电磁力。

对式(2)进行求和并取平均值得 k_m ,则

$$\begin{aligned} k_m &= \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n k_{mq} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n F_{jq} \frac{d_j^2}{l^2} \quad (q=0,1,2,\dots; j=0,1,2,\dots) \end{aligned} \quad (3)$$

从而得出电磁铁电磁力的表达式为:

$$F = 1.9257 \frac{l_j^2}{d_j^2} \quad (j=0,1,2,\dots) \quad (4)$$

通过式(1)可以看出,电磁铁是一种非线性驱动力,为使其在工作点附近具有良好的线性,本文采用差动式控制方式,差动式电磁铁的电磁力大小经线性化后可表示为:

$$F_{\Delta} = 7.7028 \left(\frac{i_0^2}{d_0^3} \Delta + \frac{i_0}{d_0^2} i_{\Delta} \right) \quad (\Delta = x_1, x_2, y) \quad (5)$$

式中, i_0 为电磁铁线圈的偏置电流, i_{Δ} 为线圈的控制电流, d_0 为电磁铁与坡莫合金初始气隙, Δ 为位移变化量。

环形永磁体的磁力大小与永磁体材料、轴向气隙、径向位移有关,永磁体的结构参数如图 5 所示。

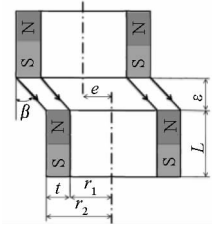


图 5 永磁体的结构参数

Fig. 5 Structural parameters of the permanent magnet

由基尔霍夫定律和虚位移法可以得到环形永磁体的径向磁力表达式为:

$$F_e = k_e \frac{\varepsilon e}{[\pi t \varepsilon + 1.632(\varepsilon^2 + e^2)]^2} \quad (6)$$

其中:

$$k_e = 4 \left[\frac{B_r n L}{\mu_r \mu_0} + \frac{n L}{\pi t (r_2 + r_1)} \right]^2 \times \frac{\pi t}{\mu_0 (r_2 + r_1)}$$

B_r 为永磁材料剩磁, n 为永磁体个数, L 为永磁体厚度, μ_0 为空气磁导率, μ_r 为磁环的相对磁导率, t 为环形永磁体的宽度, r_1 为环形永磁体内径, r_2 为环形永磁体外径, Λ_t 为磁导, ε 为轴向气隙, e 为径向位移。

在永磁体的磁力计算中,有许多参数是经验值,因此不一定能准确地反映永磁回复力,为了能更加准确地反映永磁回复力,本文对永磁体磁力进行了实际测量。

实验测量装置如图 6 所示,该装置由龙门机架、单自由度微调平台、力矩传感器、环形永磁体、2 自由度微调平台等组成,其中力矩传感器的型号为 Load Cell CXZ-114,精度为 0.01 N,量程为 0~300 N。

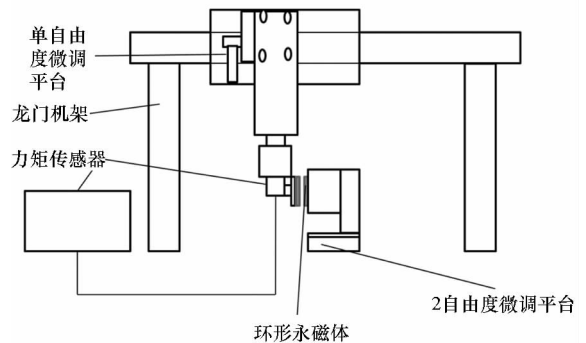


图 6 环形永磁体径向力测量实验装置

Fig. 6 Experimental system of the radial force measurement of annular permanent magnet

如图7所示,轴向气隙为4.0 mm,测量径向位移为0~2.4 mm、步长为0.1 mm时,环形永磁体的回复力与径向位移的关系。

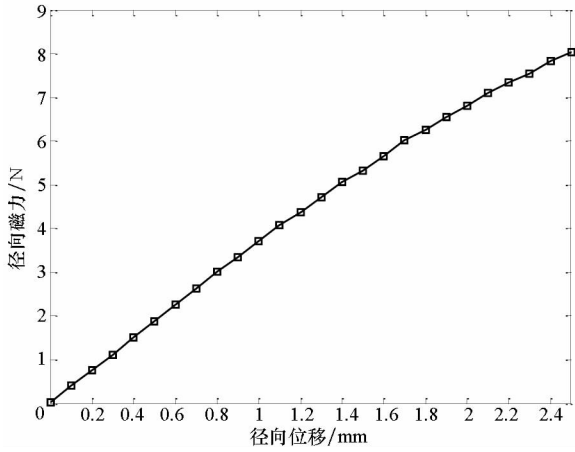


图7 环形永磁体径向位移与径向磁力的关系

Fig.7 Relationship between radial displacement and radial magnetic force of annular permanent magnets

由式(6)可以看出,永磁体径向磁力的大小和径向位移是非线性的,而由图7可以看出,在静态工作点附近,永磁回复力与径向位移基本呈线性关系,利用实际测量数据进行拟合,得出永磁体径向磁力的表达式为:

$$F_e = 3032.7e \quad (7)$$

4 系统动力学模型

本文主要研究差动式磁力驱动微动平台系统及其控制响应实验,因此需要对其进行动力学建模和分析。

根据图2的受力分析可知,当改变电磁铁与坡莫合金气隙时,电磁力、永磁回复力等都随之变化,最后使微动平台趋于稳定。根据以上参数和力学特性,设微动平台质心沿逆时针方向回转为正,相对于位移传感器气隙变小的方向为正。

设质心 o 的广义坐标为:

$$o = [x_o \quad y_o \quad \theta_o]^T \quad (8)$$

微动平台相对3个传感器与6个电磁磁极的广义坐标为:

$$o' = [x_1 \quad x_2 \quad y]^T \quad (9)$$

式中: x_1, x_2, y 分别为电涡流位移传感器检测到的位移变化。如图2所示, C 点和 D 点为 X 方向的检测点, L 为 X 方向检测点到中心的距离, A 点为 Y 方向的检测点,距中心位置为 L_1 。此平台属于微动平台,位置变化较小,因此忽略转角对传感器检测结果的影响,则两广义坐标的变换关系为:

$$\begin{cases} x = \frac{x_1 + x_2}{2} \\ y_o = y \\ \theta \approx \tan\theta = \frac{x_2 - x_1}{2L} \end{cases} \quad (10)$$

则激光焦点控制系统的动力学方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{x1} + F_{x2} - F_{ex} - f_x \\ m\ddot{y} = F_y - F_{ey} - f_y \\ J\ddot{\theta} = F_{x1} \cdot H - F_{x2} \cdot H - M_\theta \end{cases} \quad (11)$$

式中: m 为微动平台动子部分质量; F_{x1}, F_{x2} 为 X 方向两对差动电磁铁的电磁合力; F_y 为 Y 方向差动电磁铁的电磁合力; F_{ex}, F_{ey} 分别为 X 方向和 Y 方向永磁回复分力; H 为 C 轴转动时,微动平台中心轴线与作用力之间的距离; f_x, f_y, M_θ 分别为 X, Y 轴方向以及 C 轴转动方向的摩擦阻力和摩擦力矩。

根据上节求解的电磁驱动力以及永磁回复力表达式,对式(11)进行求解:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = 3540.3x + 4.1082(i_{x1} + i_{x2}) - c_1\dot{x} \\ m\ddot{y} = 253.8y + 4.1082i_y - c_2\dot{y} \\ J\ddot{\theta} = 6.573H \cdot \theta + 4.1082(i_{x2} - i_{x1}) - c_3\dot{\theta} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12),选取合适的输入量和输出量,建立系统状态空间方程。激光焦点控制系统结构如图8所示。

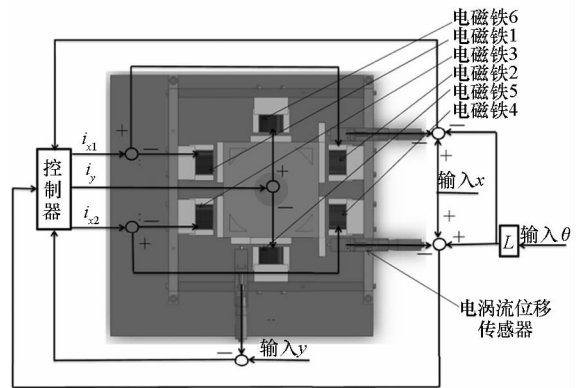


图8 激光焦点控制系统结构图

Fig.8 Laser focus control system

设状态量 X , 控制量 U , 输出量 Y 分别为:

$$\begin{cases} X = [x \quad y \quad \theta \quad \dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}]^T \\ U = [i_{x1} \quad i_{x2} \quad i_y]^T \\ Y = [x \quad y \quad \theta]^T \end{cases} \quad (13)$$

则系统的动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (14)$$

对式子进行求解,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = [I \quad 0] \end{cases} \quad (15)$$

其中:

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} 3540.3/m & 0 & 0 \\ 0 & 253.8/m & 0 \\ 0 & 0 & 6573H/J \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} -c_1/m & 0 & 0 \\ 0 & -c_2/m & 0 \\ 0 & 0 & -c_3/J \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 4.1082/m & 4.1082/m & 0 \\ 0 & 0 & 4.1082/m \\ -4.1082/J & -4.1082/J & 0 \end{bmatrix}$$

5 对比试验分析

本文研究的激光焦点控制磁力驱动平台的移动板等部分的总质量为 1.399 5 kg;初始电流为 1.2 A;初始气隙为 1.5 mm;H 为 44.5 mm;阻尼 c_1, c_2, c_3 取 10;计算得到实验台转动惯量为 0.004 972 kg · mm²。为了对比 PID 控制策略和鲁棒控制策略下微动平台的响应特性,进行试验分析。本文设计了激光焦点磁力驱动平台,实验装置如图 9 所示,并根据此实验平台,构建控制系统单元。控制器采用 dSPACE1104;位移传感器采用非接触电涡流位移传感器,用于系统位移输出的检测;放大器采用 E120/06 电磁轴承功率放大器,对输入的信号进行放大。实验装置经反复调试后,分别对 X、Y 平动方向和 C 轴转动方向进行位置控制实验研究。

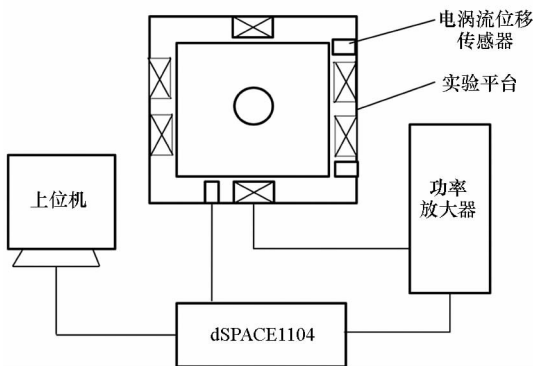


图 9 实验装置

Fig. 9 Experimental system

对 X 和 Y 方向进行阶跃位置控制试验。试

验条件如下:试验初始,给 X、Y 方向三对差动电磁铁同时接输入偏置电流 1.2 A,使实验平台在 X、Y 方向上都具有一定的电磁刚度,调整系统中的位置补偿,使得电涡流位移传感器检测的位置信号与系统的设定值相等。

鲁棒控制试验中,通过混合灵敏度鲁棒控制策略,对加权函数进行选择,计算出鲁棒控制器的参数,基于计算的结果,通过试验进行微调,最终得出鲁棒反馈控制器 $K(s)$ 为:

$$K(s) = \frac{4.17s^2 + 28.77s + 16\,500}{s^3 + 2.64s^2 + 8.58s + 6.94} \quad (16)$$

当系统稳定后,第 4 s 输入一个 0.1 mm 的 X 向阶跃信号,第 10 s 输入一个 1.2 mrad 的转角阶跃信号,第 15.3 s 输入一个 0.1 mm 的 Y 向阶跃信号。观察系统处于平衡位置时对信号的响应。如图 10 所示,左侧依次是 X 输入信号,X 输出信号,控制电流 1,线圈 1 电流,线圈 2 电流;中间依次是转角输入信号,转角输出信号,控制电流 2,线圈 3 电流,线圈 4 电流;右侧依次是 Y 输入信号,Y 输出信号,控制电流 3,线圈 5 电流,线圈 6 电流。

在 PID 控制试验中,控制参数为 X 方向的 $K_p = 15, K_d = 0.1, K_i = 25\,000$;Y 方向的 $K_p = 10, K_d = 0.01, K_i = 10\,000$ 。其中参数的选择依据线性二次调节器 (Linear Quadratic Regulator, LQR) 进行仿真计算后,通过试凑法进行调节,最终得出相对最优的控制参数。

当系统稳定后,依次于第 3.7 s 输入一个 0.1 mm 的 X 向阶跃信号,第 20.6 s 输入一个 1.2 mrad 的转角阶跃信号,第 29.5 s 输入一个 -1.2 mrad 的转角阶跃信号,第 37.4 s 输入一个 -0.1 mm 的 X 方向阶跃信号,第 45 s 输入一个 0.1 mm Y 方向阶跃信号,第 56 s 输入一个 -0.1 mm Y 方向的阶跃信号。观察系统处于平衡位置时对信号的响应。如图 11 所示,左侧依次是 X 输入信号,X 输出信号,控制电流 1,线圈 1 电流,线圈 2 电流;中间依次是转角输入信号,转角输出信号,控制电流 2,线圈 3 电流,线圈 4 电流;右侧依次是 Y 输入信号,Y 输出信号,控制电流 3,线圈 5 电流,线圈 6 电流。

对比鲁棒控制和 PID 控制策略下,在该系统的 X、Y 方向阶跃响应试验中,可以观察到,PID 控制策略下,系统在 0.5 s 左右稳定,但有 0.01 mm 的定位误差;鲁棒控制策略下,系统在 0.8 s 左右稳定,但定位精度更高,抗干扰能力更强,稳定性更好。

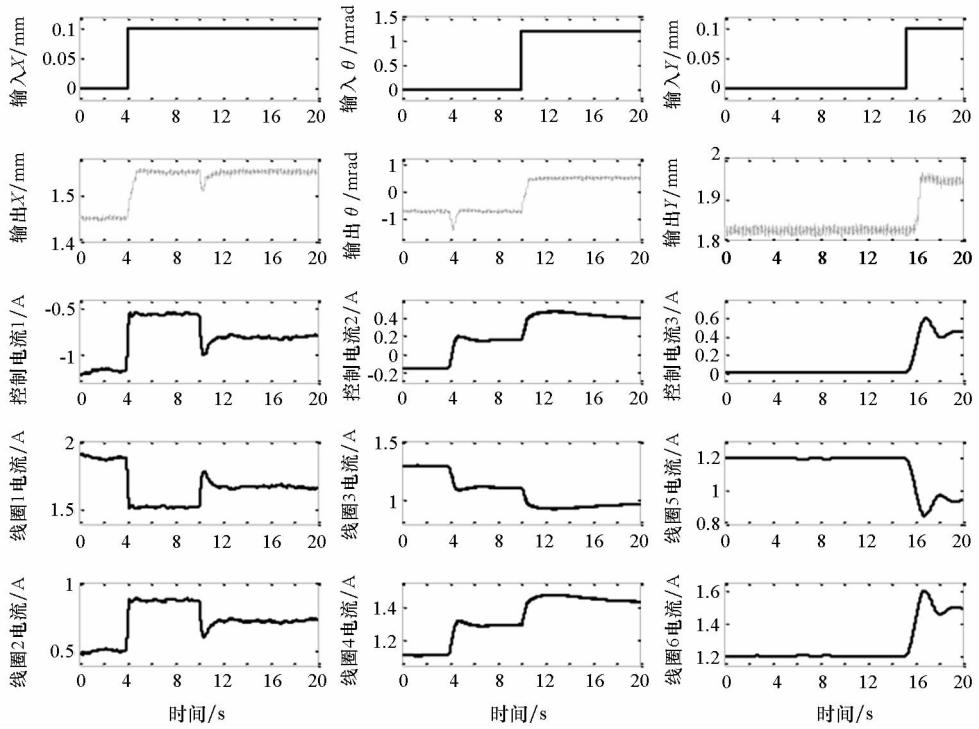


图 10 鲁棒控制策略

Fig. 10 Robust control strategy

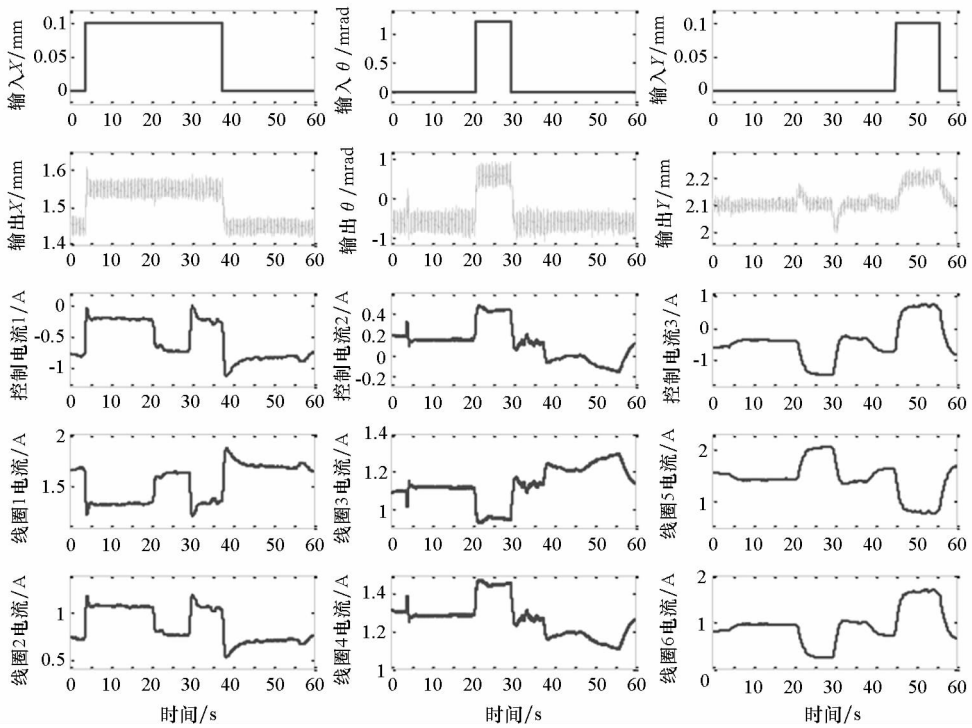


图 11 PID 控制策略

Fig. 11 PID control strategy

6 结论

本文提出将磁力驱动器应用在激光切割焦点控制上,以实现离轴切割。在对驱动器上的电磁

铁磁力-位移-电流和永磁铁的磁力-径向位移关系进行试验拟合的基础上,进行了驱动器动力学建模,并通过试验得到了PID控制策略和鲁棒控制策略下的驱动器位置响应和速度响应。结果

表明,该驱动器可以实现 X 、 Y 方向的平动以及 C 轴转动 3 个自由度的微动,但从试验结果可以看出,系统存在 X 方向两组差动电磁铁耦合现象。PID 控制策略可以获得更快的响应速度,但是鲁棒性较弱;而鲁棒控制策略的抗干扰能力更强,但响应速度较慢。因此,可根据不同的应用场合选择不同的控制策略,在对响应速度要求不高的低速切割时,鲁棒控制策略更优;而在对响应速度要求高,精度要求不高的高速切割时,则 PID 控制策略更优。

参考文献 (References)

- [1] Dewil R, Vansteenwegen P, Cattrysse D. A review of cutting path algorithms for laser cutters[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5/6/7/8): 1865-1884.
- [2] Chen C, Gao M, Jiang M, et al. Surface morphological features of fiber laser cutting of AA2219 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5/6/7/8): 1219-1226.
- [3] Sim M S, Lee C M. Determination of optimal laser power according to the tool path inclination angle of a titanium alloy workpiece in laser-assisted machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(9/10/11/12): 1717-1724.
- [4] Zhang C, Wen P, Yuan Y M, et al. Evaluation and optimal design of supersonic nozzle for laser-assisted oxygen cutting of thick steel sections [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5/6/7/8): 1243-1251.
- [5] Leone C, Genna S, Caggiano A, et al. Influence of process parameters on kerf geometry and surface roughness in Nd: YAG laser cutting of Al 6061T6 alloy sheet [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9/10/11/12): 2745-2762.
- [6] Di Pietro P, Yao Y L. A new technique to characterize and predict laser cut striations [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(7): 993-1002.
- [7] Yilbas B S, Nickel J. Effect of oxygen in laser cutting process[J]. *Materials and Manufacturing Process*, 1997, 12(6): 1163-1175.
- [8] 彭玉海, 赵晋平, 侯红玲, 等. 工艺参数对 2A12 铝合金激光切割质量的影响及分析[J]. *应用激光*, 2016(1): 78-83.
PENG Yuhai, ZHAO Jinping, HOU Hongling, et al. The influence and analysis to process parameters on the laser cutting quality of 2A12 aluminum alloy [J]. *Applied Laser*, 2016(1): 78-83. (in Chinese)
- [9] 胡俊, 邱明勇, 姚振强. 两种激光切割超音速喷嘴结构设计与辅助气体流场分析[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 1005-1010.
HU Jun, QIU Mingyong, YAO Zhenqiang. Structural design and assist gas flow analysis of two-laser cutting supersonic nozzles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(4): 1005-1010. (in Chinese)
- [10] Mai C C, Lin J M. Supersonic flow characteristics in laser grooving[J]. *Optics and Laser Technology*, 2003, 35(8): 597-604.
- [11] 洪蕾, 米承龙, 陈武柱. 旋转气流控制激光切割硅钢新技术[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(7): 215-220.
HONG Lei, MI Chenglong, CHEN Wuzhu. New technology of laser cutting silicon steel controlled by rotating gas flow[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(7): 215-220. (in Chinese)
- [12] Quintero F, Pou J, Fernández J L, et al. Optimization of an off-axis nozzle for assist gas injection in laser fusion cutting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(11): 1158-1171.
- [13] 张刚, 刘品宽, 张波, 等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 371-379.
ZHANG Gang, LIU Pinkuan, ZHANG Bo, et al. Design of trajectory tracking controller for precision positioning table driven by linear motor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 371-379. (in Chinese)
- [14] 陈峻峰, 刘昆. 基于 LMI 的磁轴承-转子系统鲁棒增益调度控制器设计[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(6): 134-138, 144.
CHEN Junfeng, LIU Kun. Gain-scheduled robust controller design for AMB-rotor system based on LMI [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(6): 134-138, 144. (in Chinese)
- [15] 韩邦成, 王凯, 郑世强, 等. 磁悬浮高速离心式鼓风机的喘振检测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 378-386.
HAN Bangcheng, WANG Kai, ZHENG Shiqiang, et al. Surge detection of magnetically suspended high-speed centrifugal blower[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 378-386. (in Chinese)
- [16] 侯二永, 刘昆. 基于在线动平衡的磁轴承参数辨识[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(6): 65-70.
HOU Eryong, LIU Kun. Parameter identification for magnetic bearing based on online dynamic balancing [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(6): 65-70. (in Chinese)