

文章编号 1004-924X(2019)11-2343-11

基于高速视觉的静电悬浮控制系统

陈东阳^{1,2}, 郭清远¹, 董文博^{1*}, 贺欢³, 余建定^{3*}, 张东伟⁴, 梁学锋⁴

- (1. 中国科学院空间应用工程与技术中心 中国科学院空间应用重点实验室, 北京 100094;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院上海硅酸盐研究所高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室, 上海 200050;
4. 北京国科环宇科技股份有限公司, 北京 100080)

摘要:静电悬浮是一种无接触式研究材料深过冷等特性的重要方法之一,为此设计了一套地面静电悬浮控制系统。基于双 GPU 建立图像采集和位置解算系统,使用实时检测算法完成对目标的实时检测。对样品带电以及动力学建模,通过开环-赋初值 PID 的控制策略,实现材料的融化悬浮等实验,省去了深紫外灯进行电荷补充的装置。实验证明,图像处理速度在 304×304 像素达到了 700 frame/s,同时规则球体控制精度约在 ± 0.02 mm 以内。模型仿真控制结果和实际实验控制结果的相关参数基本一致。加入 900 V(该电压引起材料的加速度约为 1.274 m/s^2)的人工扰动下,静电悬浮约 340 ms 即可稳定,证明了基于高速视觉的静电悬浮控制系统的可行性与可靠性和静电悬浮动力学建模的准确性。

关键词:静电悬浮;高速视觉;实时控制

中图分类号: TP273; TP391.41 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20192711.2343

Control system of electrostatic levitation based on high-speed vision

CHEN Dong-yang^{1,2}, GUO Qing-yuan¹, DONG Wen-bo^{1*}, HE Huan³,
YU Jian-ding^{3*}, ZHANG Dong-wei⁴, LIANG Xue-feng⁴

- (1. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. State Key Laboratory of High Performance Ceramics and Superfine Microstructure, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
4. Beijing UCAS Technology Company Limited, Beijing 100080, China)

* Corresponding author, E-mail: wbdong@csu.ac.cn; yujianding@mail.sic.ac.cn

Abstract: Electrostatic levitation is one of the most important methods used to study the properties of materials without having to collide them against the wall of a chamber. A dynamic, ground electrostatic levitation control system model is designed and built using two Graphics Processing Units (GPUs) to process the image sequence and calculate the position of the material. In addition, a real-time detection algorithm is proposed for quick real-time visual detection of the targets. The melting experiment of the material is realized with an open-loop and Proportional-Integral-Derivative (PID)

收稿日期: 2019-06-20; 修订日期: 2019-08-21.

基金项目: 载人航天工程-空间应用系统项目

controller. This eliminates the charge supplement device of the deep ultraviolet lamp, and an image processing speed of 700 frames per second at the resolution of $304 \text{ pixels} \times 304 \text{ pixels}$ and control precision of approximately $\pm 0.02 \text{ mm}$ are achieved. Furthermore, the relevant parameters concerning the control effects between the simulation model and experiments are consistent. For a disturbance of 900 V, which causes the acceleration of the material to reach approximately 1.274 m/s^2 , the system can stabilize in 340 ms. Therefore, the feasibility and reliability of an electrostatic levitation control system based on high-speed vision and the accuracy of its dynamic model were proved.

Key words: electrostatic levitation; high-speed vision; real-time control

1 引 言

静电悬浮是一种利用带电材料在电场中受到的静电力来克服重力达到悬浮状态的技术。该方法使物体处于一个与周围无任何接触的状态,从而避免了坍塌等加热容器对材料的接触与污染,有效地抑制了异质形核,是开展深过冷、亚稳态材料研究和制备新型功能材料的有效手段^[1]。相比电磁悬浮^[2]、气悬浮^[3]等非接触式材料实验方法,静电悬浮具有可在真空环境下悬浮,加热悬浮可分离,可悬浮非金属,对材料的干扰小和控制更加稳定等优点。

地面的静电悬浮实验需要克服重力,主要难点在于其控制系统。第一,由于要克服重力,必须有足够大静电力,因此必须采用高电压、短极板,使样品带足够的电荷;在这样的强约束条件下,样品从静止带电到加速起浮、再到稳定的过程非常短暂,要求非常高的控制响应速度。第二,在样品稳定之后,需要较高的测量精度,才能保障样品的位置控制有较高的精度。第三,材料样品的初始带电情况复杂,且在熔融状态下电量会减少,控制系统必须有较强的抗扰性能。控制性能和传感器直接相关,因此对传感器也提出了非常高的要求。

针对静电悬浮,美国、日本、德国、韩国相继进行了静电悬浮无容器加工技术的研究,国内西北工业大学和中科院空间科学中心也开展了相应的研究。其中,日本 JAXA 使用 CCD 相机芯片连接到 FPGA 上图像处理,直接输出坐标^[4]。NASA Marshall Space Flight Center(马歇尔太空飞行中心)^[5]、DLR(德国宇航局)^[6]、KRISS(韩国标准科学研究院)^[7]、西北工业大学^[8]和空间科学中心^[9]对于位置检测都采用了 PSD 传感器。PSD 具有响应速度快、价格低、外围电路简单等

优点,但是 PSD 的环境适应性差,无法进行场景检测和边缘检测,无法完成系统状态监测,比如机械结构是否变化,光源强度是否正常等。相比而言,视觉传感器虽然需要进行复杂的图像处理和计算,但具有信息量更大、算法灵活修改的优点。图像处理可以采用 FPGA,也可以采用处理器,其中 FPGA 处理速度更快,而处理器开发更加灵活。

中国空间站将在 2020 年左右建成,上面会安装静电悬浮装置进行材料科学实验,拟采用视觉传感器。视觉传感器具有抗干扰能力强、智能灵活、图像可见等特点,随着计算能力的增强,也可以实现较高的处理速度,应用在目标检测中可以实现 500 frame/s 的处理速度^[10],应用于高精度靶标姿态控制可以取得更高的精度和稳定性^[11],因此视觉伺服是未来的趋势。本文提出了一种基于高速视觉的静电悬浮实时控制地面实验系统,一方面实现地面的视觉伺服静电悬浮,另一方面验证微重力下静电悬浮技术。

2 系统结构和原理

静电悬浮系统分为高压电极、测量系统和控制系统三个部分,其结构示意图如图 1 所示。

2.1 高压电极系统

为了控制材料的三维坐标,需要三对电极。水平方向两对电极正交放置且在同一平面,竖直方向一对电极垂直于水平平面。在地面实验中,为了克服重力的影响,需要足够强度的均匀电场,因此竖直方向这对电极的尺寸通常比较大且间距较近,间距约为 8 mm。而水平方向通常只是稳定到固定位置,需要的控制力不大,通常电极较小,而且间距较大。水平方向电极间距约为 30 mm,使相机能够进行较大视场范围的图像采集。

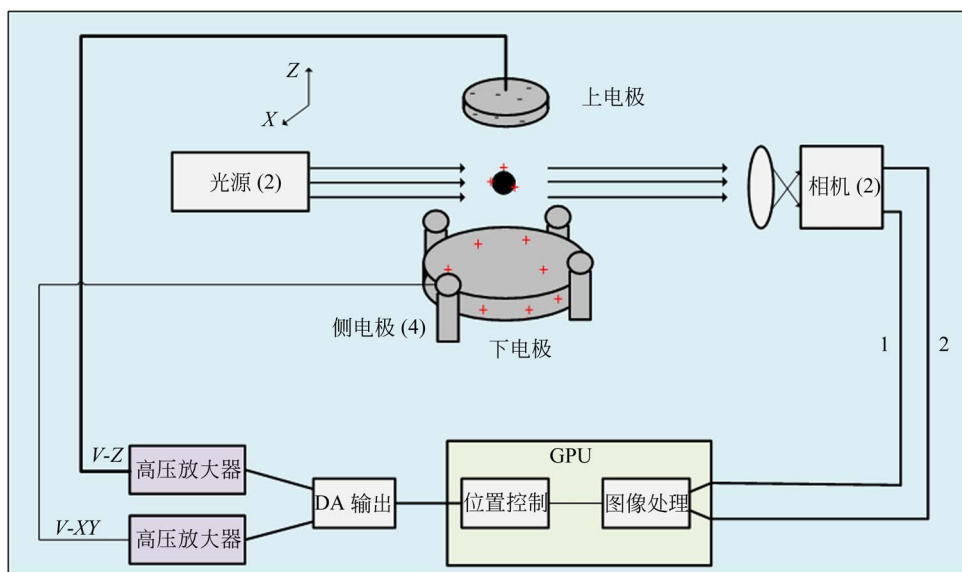


图 1 静电悬浮系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrostatic levitation control system

2.2 测量系统原理

本文使用高速视觉测量系统,该系统的主要优势在于:在空间应用中可以通过图像来确定系统的几何关系是否在发射运输过程中发生偏转,若发生,可以进行标定;同时还可以通过图像验证光源光强是否正常等其他意外情况。由于目标材料的初始形状是不规则的,而且在加热融化过程中材料的密度也会发生变化,所以无法使用单目视觉进行位置解算,需要采用多目相机的方案。机械结构和算法复杂度随着相机数量的增加而更复杂,考虑到实际视场因素,采用双目视觉即可覆盖实际视场区域,所以最终选择双目视觉的方案。双目视觉的两路相机正交放置,且相机和水平电极平面在同一高度。这样,每一个相机就可以看到一个水平坐标和一个竖直方向的坐标,然后通过一定的坐标变换就可以得到实际坐标。材料在加热过程中,会以光的形式向外散发能量,所以采用主动照明形式。主动照明即光源与相机正对放置,样品置于两者之间的区域内,则样品会在相机上产生一个投影。

2.3 控制器设计

本文使用的图像处理和控制中心为具有低功耗高性能的多核 GPU。两路相机采集的图像分别发送到两个 GPU 上,然后每个 GPU 进行图像处理。其中, GPU2 处理得到的坐标,通过串口发

送给 GPU1,由 GPU1 进行实际坐标解算。解算得到实际坐标后,进行相应的控制量运算。最后,通过 SPI 协议将相应的控制信号发送到 DA 芯片,DA 的输出信号经过高压放大器放大后输送到电极上,从而对带电样品进行位置的控制。

3 实时高速视觉位置测量

位置解算主要包括图像采集、图像处理和坐标解算三个部分。对于高速视觉伺服,如何保障视觉处理的实时性是系统的难点。

本文采用并行的实时图像采集缓存、高速的图像处理和坐标解算算法两个方面共同实现了高速视觉测量。

3.1 实时图像采集策略

本文使用工业相机,该相机采用 GigE Vision 协议,传输上限为千兆以太网的带宽。权衡场景需求、传输带宽以及实际控制带宽需求,确定图像大小为 $304 \text{ pixel} \times 304 \text{ pixel}$,图像采集速度为 700 frame/s 。

3.1.1 发送端处理

为了获得更快的采集速度,一般图像采集为异步采集。异步采集时,图像缓存过多会导致接收端接收的图像乱序,如图 2 所示,frame2 的数据包可能会比 frame1 的数据包先发送完成。为

为了避免这种情况,设置缓存图像帧数为 3~4。

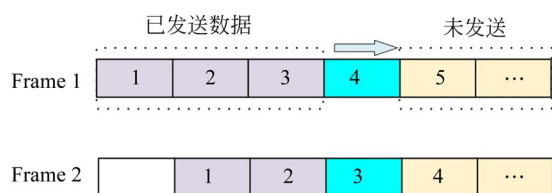


图 2 图像数据发送示意图

Fig. 2 Image data transmission

3.1.2 接收端处理

接收端主机的数据处理能力也将影响图像采集的速度。如果接收端不能及时接收并解析数据,将会导致以下三个问题:第一、数据重发;第二、接收图像乱序;第三、接收图像时间间隔不等,甚至超时(1.4 ms)。为了解决这些问题,这里利用线程 CPU 的亲中性,即将采集图像线程强制运行在一个特定的 CPU 上,从而使得此 CPU 只负责接收数据和数据包的解码任务。该方式可以消除操作系统调度过程中线程迁移所造成的影响。

3.2 图像处理和位置解算算法

图像处理算法的复杂程度和处理速度成反比。为了简化算法,实际场景选为固定场景,而且

目标物体在同一时刻只有一个,因此算法可精简为采用背景相减的方式直接提取目标,效果如图 3 所示。提取到目标物体之后,对图像进行二值化操作,然后直接求质心,如式(1)所示,就可以获得目标物体质心在图像上的坐标了。

$$x = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=COL, j=ROW} i * I(i, j)}{\sum_{i=1, j=1}^{i=COL, j=ROW} I(i, j)}, \quad (1)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=COL, j=ROW} j * I(i, j)}{\sum_{i=1, j=1}^{i=COL, j=ROW} I(i, j)}$$

其中: $I(i, j)$ 为图像点 (i, j) 的灰度值, COL 为最大列数, ROW 为最大行数。

本文采用多线程的方式进行图像处理,因为多线程可以提高资源使用效率,从而提高整个处理系统的效率。单线程会因为系统线程调度的影响,在计算过程中丢失 CPU 时间片,长时间累积会导致图像阻塞缓冲区从而使整个处理系统达不到要求的处理速度。多线程处理的具体方式为:程序开始就开启一个包含多个线程的线程池,线程池的每个线程都分配对应的内存,用来储存采集的图像。每个线程的任务是相同的,循环查找是否有图像未处理,如果有,就按照上面提到的算法进行解算。

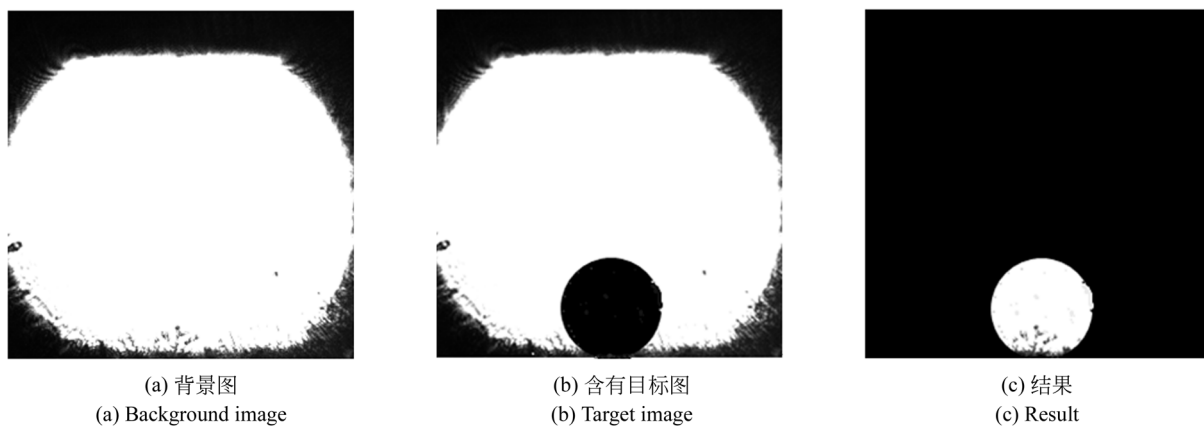


图 3 目标提取的图像处理算法

Fig. 3 Image processing algorithm for target extraction

通过上面的图像处理算法, cam1 可以得到一组坐标 (x', z_1) , x' 为 cam1 相机坐标系的水平方向坐标, z_1 为 cam1 相机坐标系的竖直方向的坐标;同理, cam2 可以得到一组坐标 (y', z_2) 。在水平方向的坐标转换如图 4 所示,旋转公式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

从像素坐标转换到实际物理坐标系,如式(3)所示,其中 dp_{ij} ($i=1, 2, j=1, 2$) 代表的是第 i 相机的 j (1 代表 x 方向, 2 代表 y 方向) 归一化焦

距,可以将像素坐标转化成实际物理坐标,该参数可以通过相机标定获得^[12]。本文简化了相应的标定过程,使用一个已知直径的标准样品放进测量系统中,获得对应的直径所对应像素长度,然后两者之比作为归一化焦距的取值。经过简化标定可以得到样品的实际坐标公式,竖直方向取两个相机坐标的均值,即有:

$$\begin{aligned} x &= dp_{11} \times x' \times \cos \theta + dp_{21} \times y' \times \sin \theta \\ y &= dp_{21} \times y' \times \cos \theta - dp_{11} \times x' \times \sin \theta \\ z &= \frac{dp_{12} \times z_1 + dp_{22} \times z_2}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

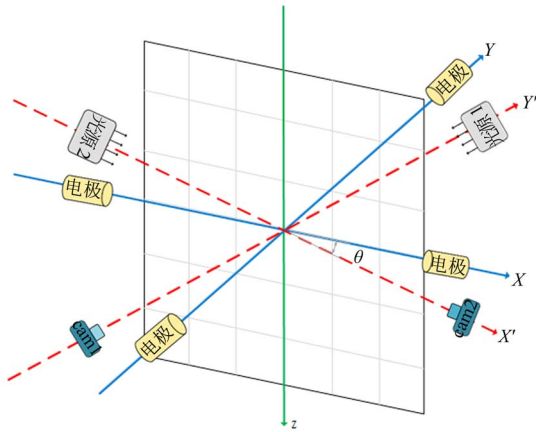


图 4 相机坐标系与电极坐标系的关系示意图
Fig. 4 Relation between camera coordinate system and electrode coordinate system

4 静电悬浮控制策略

4.1 动力学基本模型

带电材料在静电场中受到电场力、重力以及镜像力三个力的作用。如果受到的电场力大于自身重力和镜像力,那么带电材料就可以悬浮起来。假设带电材料为一个均匀的球体,且电荷等效成一个点电荷,则带电材料在静电场中竖直方向的受力如图 5 所示。

材料样品能够悬浮的条件为:

$$F = Q_s \frac{U_z}{d} + F_i - mg = 0, \quad (4)$$

其中镜像力 F_i 是一种电荷感应力,带电材料会在上下电极感应出相同电量的异种电荷。因此,若上下极板间的距离为 d ,材料中心距离下极板的

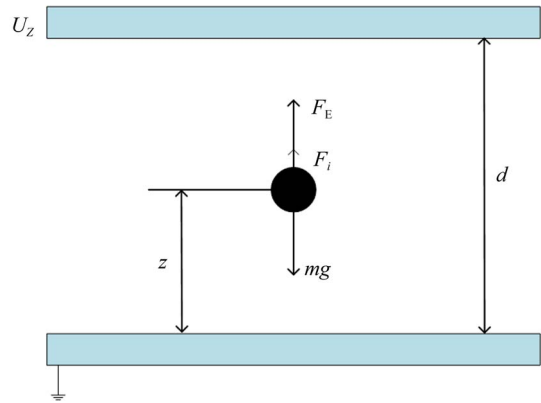


图 5 带电样品在静电场的受力示意图
Fig. 5 Forces of charged sample in uniform electric field

距离为 z ,材料的带电量为 Q_s ,则带电材料受到的镜像力合力为: $F_i = \frac{Q_s^2}{16\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(d-z)^2} - \frac{1}{z^2} \right]$ 。图 6 为 $1.0 \times 10^{-10} \text{C}$ 带电荷在上下电极距离为 8 mm 的静电场中受到的镜像力的变化趋势。可以看出,随着材料样品靠近上下电极,镜像力会急剧增大。如果不施加外力,材料样品会由于重力和镜像力直接落回下电极。水平方向,由于电极间距较大,且样品基本在中心位置起浮,故镜像力可以忽略。

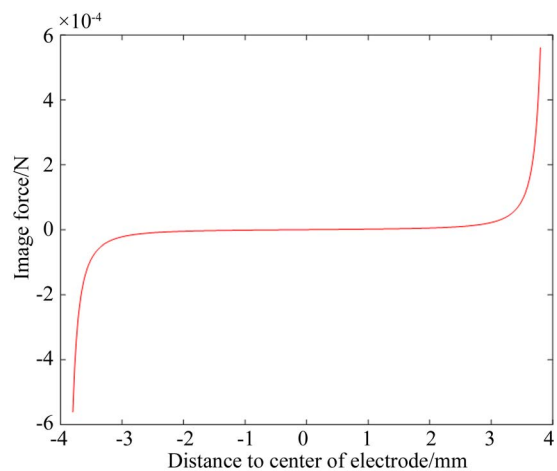


图 6 $1.0 \times 10^{-10} \text{C}$ 点电荷在间距为 8 mm 电极间所受的镜像力示意图
Fig. 6 Image force of point charge of $1.0 \times 10^{-10} \text{C}$ between electrodes with 8 mm interval

则带电材料的运动学模型为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = Q_s \frac{U_x}{x} \\ m\ddot{y} = Q_s \frac{U_y}{y} \\ m\ddot{z} = Q_s \frac{U_z}{d} + \frac{Q_c^2}{16\pi\epsilon} \left[\frac{1}{(d-2)^2} - \frac{1}{z^2} \right] - mg \end{cases} \quad (5)$$

4.2 初始带电控制策略(开环+切换)

在建立运动学模型之后,其中一个关键问题是电荷是如何分布的。文献[13]通过实验和理论分析指出,半径为 a 的小球在电场强度为 E_0 的电场中带电量为:

$$Q_0 = 4\pi\epsilon a^2 E_0 k, \quad (6)$$

其中: ϵ 为真空介电常数, k 表示电极形状对带电量的影响。

对于起浮瞬间电场强度为 E ,考虑到镜像力的因素,则起浮时受到的与重力相等的电场力为:

$$Fe = \beta Q_0 E = mg, \quad (7)$$

其中: β 表示电极形状对带电材料表面电荷分布的影响。

联合公式(6)可以求得起浮时材料带电量为:

$$Q_0 = 4\pi \sqrt{\frac{a^2 \rho g k \epsilon}{3\beta}}. \quad (8)$$

由此可以得到一个已知样品在固定电场中起浮时的带电量为一个定值,当然,电场强度得满足上述公式,样品才能带上这些电荷。

忽略上电极的影响,把样品带电荷等效成一个点电荷,则起浮瞬间样品所受到的镜像力满足:

$$(1 - \beta) Q_0 E = \frac{Q_0^2}{16\pi\epsilon d'^2}, \quad (9)$$

$$d' = \sqrt{\frac{ka^2}{4(1 - \beta)}}, \quad (10)$$

其中 d' 为等效电荷距离样品底面最低点的距离, k 通常约为 1.64, β 为 0.8。

通过上面分析可以看出,静电悬浮没有自稳定点存在,而且当材料离开下电极之后,镜像力会突变减少,所以要考虑力的变化。同时,材料在悬浮之后直接加热,电荷有突然减少的趋势,速度很快而且电量变化很大,同时重力的影响很大,很难稳定控制。针对此问题,本文提出了一种新的控制策略,先采用开环控制,悬浮之后切换到 PID 闭环控制。其中 PID 是本方案的基本算法,其示

意图如图 7 所示。PID 控制就是在过程控制中,按设定值与测量值之间偏差的比例(P)、积分(I)和微分(D)进行控制。比例环节的作用是对偏差瞬间做出快速反应,积分控制减小系统的稳态误差,微分控制能对偏差变化进行提前预报,从而改善系统的动态性能。

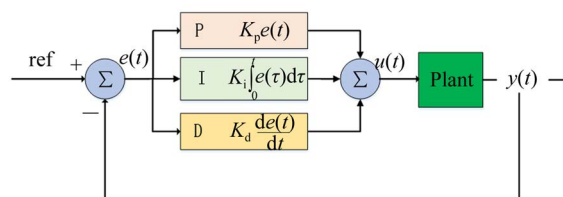


图 7 PID 控制算法

Fig. 7 PID control algorithm

整个控制策略的具体实现为:当材料样品位于下电极时,按照固定步长增加输出电压,电压增加到起浮阈值时,材料样品达到悬浮条件开始起浮;当上升到一定高度时,切换到 PID 控制,切换时 Z 轴积分项的初值为: $\text{integral error} = \alpha * u(t) * KI^{-1}$, KI 为积分项系数;这样切换后输出电压接近平衡态时电压,从而能够更快地保持稳定,通常 α 约为 0.6~0.8。对于 XY 控制,因为 XY 的控制干扰较小,直接使用 PID 控制即可。

对于材料样品融化实验,在开环阶段对样品进行预加热,使它渡过电量突然减少的阶段(目前没有模型很好地解释这一现象)。对于熔融实验,有时会因为样品材料的不规则,与底面电极的接触面变大,导致预热后静摩擦力过大,此时可以将输出电压限制到一大于起浮电压的固定值,然后保持,再对样品材料施加一定的扰动帮助其克服静摩擦力,以顺利起浮。

5 实验结果

5.1 仿真实验结果

本文使用直径为 2.37 mm 的 SiC 模型,密度为 3.2 g/cm³,从而推出 $Q_0 = 2.64 \times 10^{-10}$ C, $d' = 1.69$ mm。建立控制坐标系,坐标竖直向下为正,原点为上下电极中心处。起浮后,上升一定距离后镜像力可以忽略,因此,假设之后悬浮起来的电荷仍然等效在小球距离最低面的 1.69 mm 处。

对于物理电极模型,竖直方向电极距离为 8 mm,输出放大倍数为 3 000;水平方向电极距离为 30 mm,输出放大倍数为 1 000。

最后仿真取得的归一化参数为:

XY轴: $k_p=1, k_i=0.3, k_d=0.16$;

Z轴: $k_p=0.6, k_i=0.04, k_d=0.032$ 。

图 8 为 Z 轴仿真得到的控制位置坐标变化示意图,图 9 为 Z 轴输出变化示意图。可以看到控制量在切换到 PID 后,输出值产生大的波动,起浮到平稳时间约为 510 ms,时间有限,能否快速完成控制是静电悬浮的一大难点。起浮的超调量约为 0.86 mm。

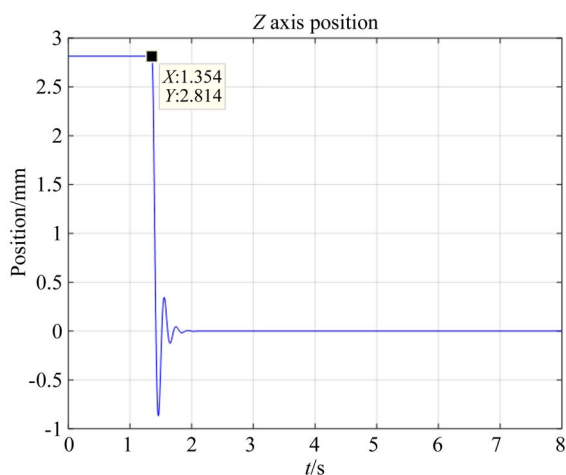


图 8 SiC 模型 Z 轴位置分段控制仿真结果

Fig. 8 Simulation result of subsectional control in Z direction of SiC model

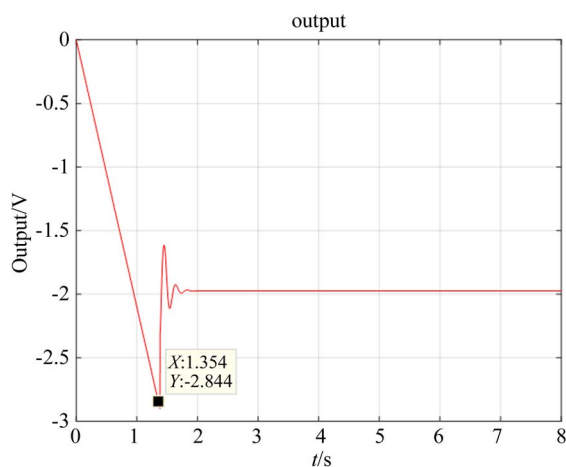


图 9 SiC 模型 Z 轴位置分段控制仿真输出信号

Fig. 9 Simulation output of subsectional control in Z direction of SiC model

图 10 是 X 轴在偏离零点 1.5 mm 的控制结果。XY 轴电极间距相等,且 XY 轴正交,因此 XY 坐标不耦合。同时电场具有叠加性,故 XY 轴的控制是独立且参数一致的。

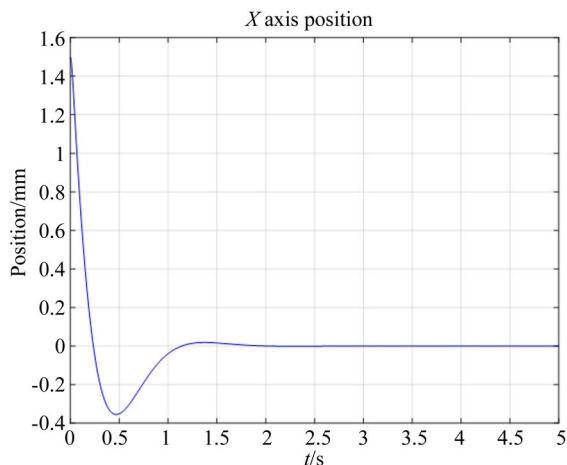


图 10 SiC 模型 X 轴仿真控制结果

Fig. 10 Simulation control result of SiC model in X direction

5.2 实验验证

将模型仿真得到的参数应用于实际的控制系统中,得到了很好的效果。可以解决真空和非真空的 C 球(约 7 mg)的悬浮、SiC(20~23 mg)和不规则 Zr(22~30 mg)的控制以及 Zr 的融化。图 11 为地面实验静电悬浮炉示意图。GPU 产生的控制信号为 $[-7, 0]$ V, 经由一个信

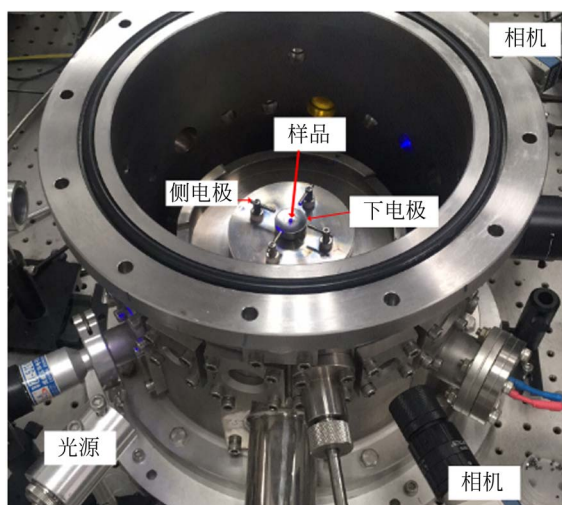


图 11 地面静电悬浮装置结构

Fig. 11 Photo of ground electrostatic levitation furnace

号叠加器接到高压放大器上,经过放大后传递到相应电极上。其中,信号叠加器可以叠加外界添加的信号,如下文要用到的干扰信号或者一定频率的振荡信号等;如不需要叠加其他信号,信号叠加器只输出控制信号。高压放大器 Z 轴的放大倍数为 3 000,其监测端信号为输出信号的 1/3000,可通过检测端检测输出信号是否正常;XY 轴的放大倍数为 1 000,检测端信号为输出信号的 1/1000。

5.2.1 参数辨识

图 12 为直径为 2.37 mm 的 SiC 控制输出示意图。其中,起浮控制信号为 -2.82 V,经高压放大器后实际电压为 $-8 460$ V,平衡时控制信号为 -2.13 V,经高压放大器后实际电压为 $-6 390$ V。根据平衡时的电压反推出带电量为 2.87×10^{-10} C,根据起浮电压反推出 $\beta=0.755$, $k=1.31$ 。

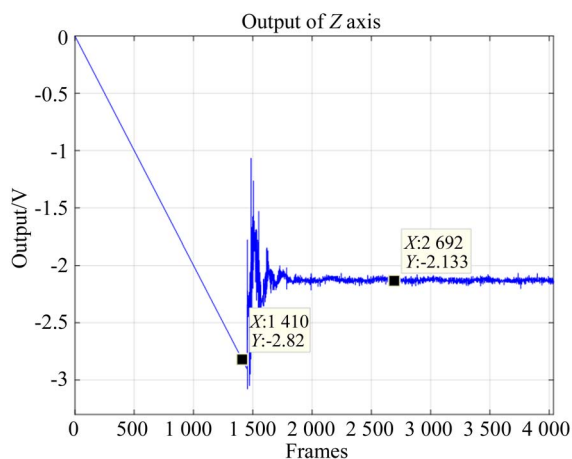


图 12 直径为 2.37 mm 的 SiC 样品 Z 轴位置控制实验的输出信号

Fig. 12 Experimental control output in Z direction of SiC sample with diameter of 2.37 mm

5.2.2 控制速度测试

图 13 为 SiC 控制结果图,采样频率为 700 frame/s,起浮到控制稳定约 385 帧,反推出 SiC 的起浮过渡时间约为 550 ms,同时可得起浮超调约为 0.86 mm。

5.2.3 控制稳定性测试

图 14 是不规则材料样品锆的控制示意图,图 15 是融化后稳态放大图。可以看到,未融化之前控制精度为 ± 0.2 mm,这个主要是因为材料起浮

时由于其他方向有初速度,材料发生旋转,再加上材料的不规则,求解得到的质心会有很大的误差。后半段是材料样品融化后的控制效果图,可以看出稳态误差很小,幅度小于 0.1 mm,大约为 ± 0.02 mm。

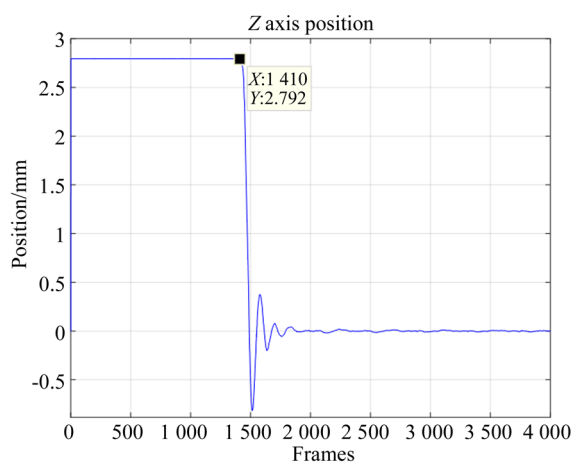


图 13 直径为 2.37 mm 的 SiC 样品 Z 轴位置控制实验结果

Fig. 13 Experimental control result in Z direction of SiC sample with diameter of 2.37 mm

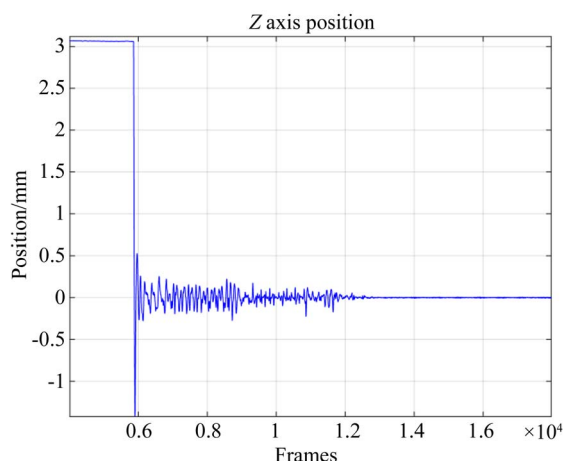


图 14 不规则锆材料 Z 轴位置控制实验结果

Fig. 14 Experimental control result in Z direction of irregular Zr sample

图 16 是 XY 轴的控制结果。X 轴初始坐标为 0.15 mm, Y 轴初始坐标在零点附近。可以看到材料起浮之后,坐标刚开始会有 ± 0.4 mm 的波动,这主要是因为形状不规则加起浮时旋转造成的。如图 17 所示,当材料样品融化成球体之

后,稳定精度在±0.02 mm 内。

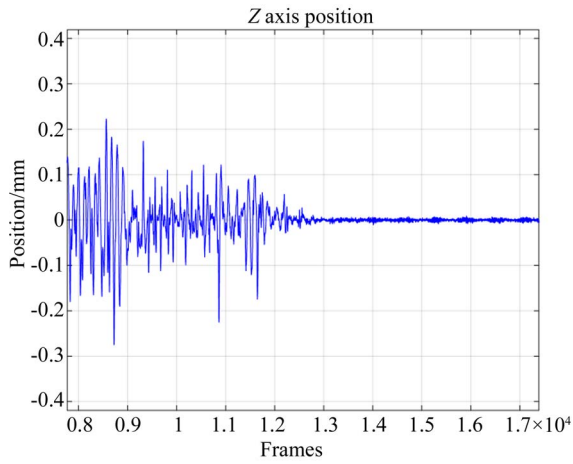


图 15 不规则锆材料 Z 轴位置控制实验融化态放大结果

Fig. 15 Steady-state of melted irregular Zr sample in Z direction

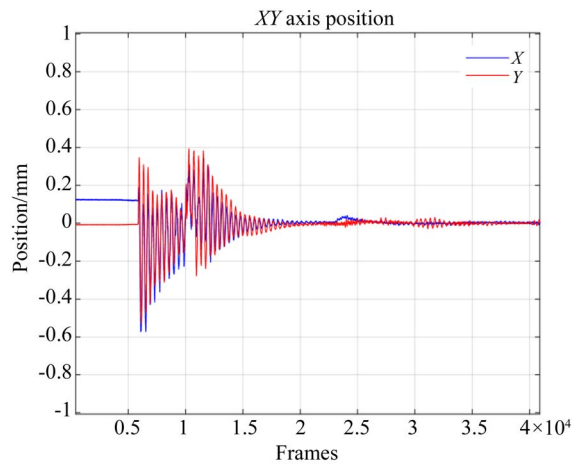


图 16 不规则锆材料 XY 轴位置控制实验结果

Fig. 16 Experimental control result in horizontal directions of irregular Zr sample

5.2.4 控制抗扰能力测试

为了测试系统的抗干扰能力,在控制信号进入高压放大器时,使用信号发生器生成一个幅值为 900 V(该电压引起的材料加速度约为 1.274 m/s^2),持续时间约为 340 ms,频率为 0.366 Hz 的矩形波信号,然后通过信号叠加器叠加到控制输出信号中。干扰信号示意图如图 18 所示。图 19 为添加干扰信号后的实际控制结果。可以看到 falling edge 对应的点,材料样品应该向负方向

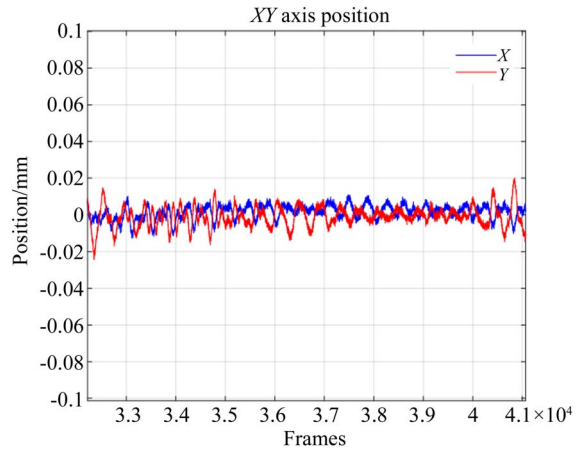


图 17 不规则锆材料 XY 轴位置控制实验融化态放大结果

Fig. 17 Steady-state of melted irregular Zr sample in horizontal directions

运动,但是突然向正运动了,主要原因是所添加的矩形信号有持续时间,该点为叠加信号突然消失时带来的影响。在添加 900 V 的干扰之后,系统在约 340 ms 处恢复稳定,而且最大波动也只有 0.44 mm。整个控制系统具有一定的抗扰能力。

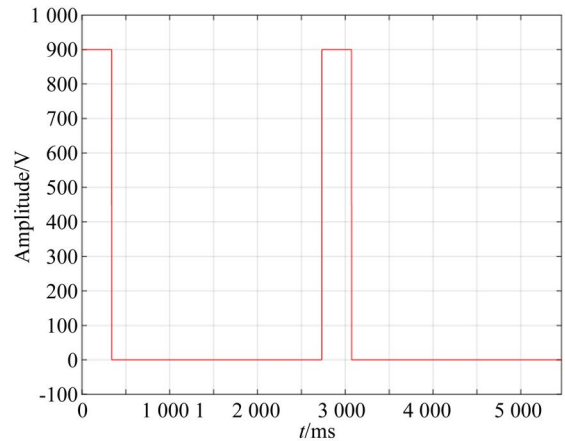


图 18 幅值为 900 V、频率为 0.366 Hz 的干扰信号示意图

Fig. 18 Interference signal with amplitude of 900 V and frequency of 0.366 Hz

5.3 讨论

5.3.1 控制方法有效性

使用该策略后,同一组参数可以完成多种材料在不同环境及不同质量下的控制。开环过程中逐步添加电压,起浮时比较平缓,不会因为电压太

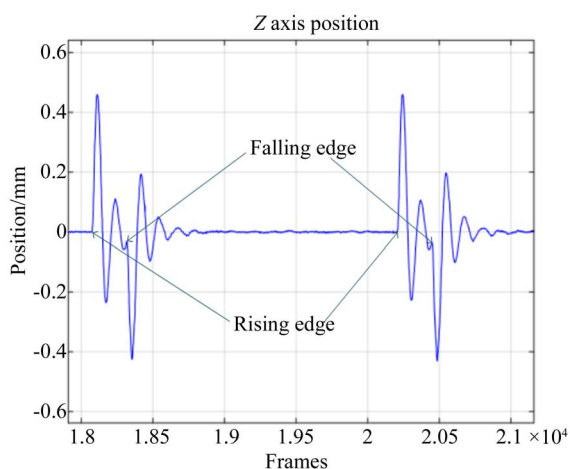


图 19 添加干扰信号 Z 轴位置控制实验结果

Fig. 19 Control result in Z direction after adding interference signal

高而引起较大的加速度。开环-切换到 PID 闭环控制策略为预热提供了足够的时间,使材料渡过加热电量突然减少的过程,大大提高了材料熔融实验的成功率。

PID 控制稳定时的输出主要依赖积分项。如果不赋初值,为了保持积分项能在短时间内接近稳定值,需要大量调整 PID 参数,致使参数的适应性差。赋初值方式则利用了整个悬浮过程中的模型特性,加快了稳定的过程。

5.3.2 实测结果和仿真分析

表 1 为直径为 2.37 mm 的 SiC 材料位置控制的理论模型和实验测试得到的相应数据。实际控制效果接近理论模型,样品起浮电压和平衡电压和模型求解得到的电压十分接近,充分说明了本文对于样品带电模型和运动学建模的正确性。

由表 1 发现实验值和理论值有一定差距。其主要原因在于:电极间距不是远大于样品材料的

半径;本文的电极形状不是平行板,是有一定倾斜角度的电极结构;实际的电极间距为 8 mm,存在一定的误差;建模时没有考虑运动过程中电荷分布的变化。

表 1 直径为 2.37 mm 的 SiC 材料位置控制模型仿真与实验相关参数的对比

Tab. 1 Comparison between simulation model and experimental position control result of SiC sample with diameter of 2.37 mm

| | 模型 | 实验 |
|---------|--------|--------|
| 超调量/mm | 0.86 | 0.80 |
| 过渡时间/ms | 510 | 550 |
| 起浮电压/V | -8 532 | -8 460 |
| 平衡电压/V | -5 925 | -6 390 |

6 结 论

本文对静电悬浮的运动学和悬浮过程进行了建模,同时实验数据证明了建立模型的准确性;设计一种新的静电悬浮控制系统,使用双路 GPU 完成了高速图像的位置解算,在 304 pixel \times 304 pixel 大小达到了 700 frame/s;针对地面材料融化实验,提出了开环-切换赋初值的 PID 的控制策略,对规则球体(融化后或原是球体)的控制精度达到 ± 0.02 mm。实验结果表明,系统采用高速视觉实现 700 frame/s 的检测速度。其次,准确评估样品带电量参数,通过分段控制策略实现稳定、快速的悬浮控制,实现了超调量为 0.8 mm,稳定时间为 550 ms,稳定精度为 0.02 mm 的控制结果。该方法有效解决材料加热电量突变的问题,同时减少了深紫外灯补充电荷装置;通过实验验证方案的可行性与可靠性。

参考文献:

[1] 王伟,张明辉,汪超越,等.无容器凝固技术与新材料研究[J].中国材料进展,2017(12):902-911.
WANG W, ZHANG M H, WANG CH Y, *et al.*. Novel materials research using containerless processing[J]. *Material China*, 2017(12):902-911. (in Chinese)

[2] LIU R P, VOLKMAN T, HERLACH D M. Undercooling and solidification of Si by electromagnetic levitation[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(3): 439-444.
[3] XIE W J, CAO C D, LÜ Y J, *et al.*. Levitation of iridium and liquid mercury by ultrasound[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(10): 104304.
[4] NAKAMURA T, AWA Y J, SHIMOJI H, *et al.*

- Control system of electrostatic levitation furnace [J]. *Acta Astronautica*, 2002, 50(10): 609-614.
- [5] HYPERS R W, ROGERS J R. A review of electrostatic levitation for materials research[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2008, 27(6):461-474.
- [6] MEISTER T, WERNER H, LOHOEFER G, et al.. Gain-scheduled control of an electrostatic levitator[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(2): 117-128.
- [7] LEE G W, JEON S, PARK C, et al.. Crystal-liquid interfacial free energy and thermophysical properties of pure liquid Ti using electrostatic levitation; Hypercooling limit, specific heat, total hemispherical emissivity, density, and interfacial free energy [J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2013, 63: 1-6.
- [8] HU L, WANG H P, XIE W J, et al.. Electrostatic levitation under the single-axis feedback control condition[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2010, 53(8): 1438-1444.
- [9] WANG F L, DAI B, LIU X F, et al.. Containerless heating process of a deeply undercooled metal droplet by electrostatic levitation[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(11): 114101.
- [10] 王耀东, 朱力强, 余祖俊, 等. 用于机械系统瞬时目标的双视角高速视觉检测系统[J]. *光学精密工程*, 2017(10):190-200.
- WANG Y D, ZHU L Q, YU Z J, et al.. Two-view high speed vision system for instant object detection in mechanical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017(10):190-200. (in Chinese)
- [11] 宋薇, 宋志杰, 章亚男, 等. 基于 3-CCD 显微视觉的高精度靶位姿控制[J]. *光学精密工程*, 2018(7):1794-1801.
- SONG W, SONG ZH J, ZHANG Y N, et al.. High-precision target pose adjustment based on 3-CCD microscope vision system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018(7):1794-1801. (in Chinese)
- [12] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [13] COLVER G M. Dynamic and stationary charging of heavy metallic and dielectric particles against a conducting wall in the presence of a dc applied electric field [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(11): 4839-4849.

作者简介:



陈东阳(1995—),男,安徽宿州人,硕士研究生,2017年于北京科技大学获得学士学位,主要从事高速视觉及自动控制方面的研究。E-mail: 13051506610@163.com

通讯作者:



董文博(1980—),男,河北人,博士,副研究员,2003年、2006年于清华大学分别获得学士、硕士学位,2010年于中科院自动化所获得博士学位,研究方向为空间电子学和控制技术、空间实验载荷支持,计算机应用等。E-mail: wbdong@csu.ac.cn

通讯作者:



余建定(1955—),男,研究员,1978年毕业于上海交通大学,1996年于日本东京工业大学获得博士学位,主要从事无容器技术与新材料等的研究。E-mail: yujianding@mail.sic.ac.cn