



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105784237 B

(45)授权公告日 2018.10.12

(21)申请号 201610318356.9

(22)申请日 2016.05.13

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 105784237 A

(43)申请公布日 2016.07.20

(73)专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72)发明人 李飞 余西龙 郭大华

(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.  
G01L 5/00(2006.01)  
G01L 25/00(2006.01)

(56)对比文件

JP 特开201137169 A,2011.02.24,  
CN 102169035 A,2011.08.31,  
CN 104165769 A,2014.11.26,  
宁中喜.三丝扭摆微推力在线测量方法及不  
确定度分析.《测控技术》.2012,第31卷(第5期),  
第45-48页.

审查员 刘妍

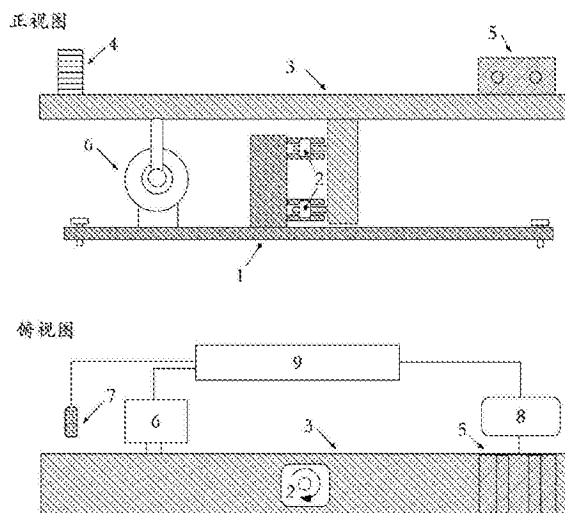
权利要求书2页 说明书9页 附图5页

(54)发明名称

一种微推力测试系统及方法

(57)摘要

本发明公开一种微推力测试系统,其适用于1~1000mN,推重比为 $10^{-5}$ ~ $10^{-2}$ 范围内的推力的测试,在测量带宽足够的情况下,大大提高了测量精度。其包括台架、位移传感器、在线标定组件、阻尼系统、计算机测控设备;所述计算机测控设备包括相连的高频数据采集卡、工控机、显示装置;反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现;工控机控制升降台的高度,测量标准砝码加载下的摆推力响应,实现稳态推力标定;工控机控制阻尼系统来使台架静止。还提供了采用这种装置的测试方法。



1. 一种微推力测试系统,其包括台架、位移传感器、在线标定组件、阻尼系统、计算机测控设备;其特征在于:

所述台架为扭摆结构,包括台架本体、挠性轴、悬臂、配重以及推力器固定装置,悬臂水平放置,中部安装挠性轴与台架本体连接,悬臂的一端放置配重且另一端连接推力器固定装置,微推力器放在推力器固定装置上;

所述位移传感器为反射式激光位移传感器,其发出的光束信号经过悬臂的侧表面反射,返回后被其内部的CCD记录并处理,从而获得其与悬臂侧面的绝对距离;

所述在线标定组件利用悬丝悬挂标准砝码,通过升降台来控制悬丝松紧,从而产生稳态推力,对微推力测试系统进行标定;

所述阻尼系统包括线圈和铁芯,线圈固定于台架的固定底座上,当铁芯相对于线圈运动时候产生电磁吸斥力,从而逐渐静止扭摆;

所述计算机测控设备包括相连的高频数据采集卡、工控机、显示装置;反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现;工控机控制升降台的高度,测量标准砝码加载下的摆推力响应,实现稳态推力标定;工控机控制阻尼系统来使扭摆静止。

2. 根据权利要求1所述的微推力测试系统,其特征在于:所述台架为水平扭摆结构,包括固定支座、旋转支座、挠性轴、悬臂、配重、限位转置、推力器固定装置。

3. 根据权利要求2所述的微推力测试系统,其特征在于:所述挠性轴是型号为6016-400的挠性轴。

4. 根据权利要求3所述的微推力测试系统,其特征在于:所述反射式激光位移传感器是型号为松下HL-C203BE的位移传感器,其测量中心距离为30mm,测量范围为 $\pm 5$ mm,位移分辨率为0.25 $\mu$ m。

5. 根据权利要求4所述的微推力测试系统,其特征在于:所述阻尼系统还包括可编程电源,其与线圈连接。

6. 根据权利要求5所述的微推力测试系统,其特征在于:所述线圈长度175mm,直径80mm,线圈400扎,工作电压12~20V,实测阻抗5 $\Omega$ ;所述铁芯长度170mm,直径25mm;所述可编程电源型号为RIGOL DP811A,最大工作电压40V,电流5A。

7. 根据权利要求6所述的微推力测试系统,其特征在于:所述在线标定组件的拟定点标定196mN。

8. 根据权利要求7所述的微推力测试系统,其特征在于:所述升降台为竖直安装的电控平移台,行程100mm,并借助两个直角固定块来分别固定平移台和托举砝码。

9. 根据权利要求8所述的微推力测试系统,其特征在于:所述工控机为研华工控机IPC-610MB,所述采集卡为泛华多功能采集卡PCI-3363。

10. 一种采用根据权利要求1所述的微推力测试系统的测试方法,其特征在于:包括以下步骤:

- (1) 悬臂通过两个垂直方向的挠性轴,安装在台架本体上;
- (2) 安装推力器后,通过控制配重的重量来保持悬臂的水平;
- (3) 测试前,工控机控制阻尼系统来使扭摆静止;
- (4) 反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现;

(5) 工控机控制升降台的高度,测量标准砝码加载下的摆推力响应,实现推力在线标定。

## 一种微推力测试系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于物理学的技术领域,具体地涉及一种微推力测试系统,以及采用该系统的测试方法,其主要用于推力 $1\sim 1000\text{mN}$ 、推重比为 $10^{-5}\sim 10^{-2}$ 范围内的推力的测试。

### 背景技术

[0002] 微型推力器的特点是推力比较小,一般推力在数百毫牛量级,精确测量如此小的推力比较困难。对于微型推力器,它还可以以脉冲形式工作,因此,不仅存在如何测量小推力的问题,还需要测量脉冲冲量。为缩短测试准备时间、减弱环境噪声的影响,必须考虑台架阻尼;为避免长期测试的零漂,必须考虑在线标定推力的问题。因此,高精度、高环境可靠性的推力测量技术,是微型推力器研究中必须发展的技术之一。

[0003] 国内外的微推力/冲量测量技术,测量方法可概括为两种类型:

[0004] (1) 直接法:当推力较大,且推重比较大时,将推力器直接放置于测力传感器上,进行推力的直接测量。当推力较大,但推重比较小,常利用设计精密的天平台架来平衡推力器的重力,再利用压电陶瓷等力传感器,将推力信号直接转换为电信号,后接放大器,再采集记录。压电传感器的“零变形”特征使其成为动态响应最佳的测量元件,其频率能够达到数十kHz。因此,测量系统的固有频率主要取决于天平台架机械件。为提高固有频率,必须硬化机械部件,这必然减小了推力测量的灵敏度。此外,受制于小量程力传感器的测力下限,这种测力方法仅能够实现较大推重比情况下的数百mN以上的推力测量。若用于更小的推力测试,无法保证足够的测量精度。

[0005] (2) 间接法:设计不同结构的推力台架,将推力测量转化为台架位移或加速度测量。常用的台架结构类型包括单摆、双摆或扭摆等,它可以通过标定静态推力与台架位移/加速度之间的关系,实现平均推力测量。这种方法也是应用最为广泛的微小推力测量方法,其中单摆结构一般进行mN量级的推力测量,扭摆多用于mN、 $\mu\text{N}$ 甚至nN量级的推力测量。

[0006] 逐一分析上述可借鉴方案的优劣,不难发现,虽然直接法的测量带宽足够,但利用测力传感器直接进行mN级推力测试,测量精度很难满足要求。商用测力传感器中,量程最小的约为10N(PCB, 209C01),其最大响应频率100kHz,非线性度 $<1\%$ ,估计其测量精度在数十mN量级,测量精度不满足要求。并且,大部分推力器的推重比很小,如 $10^{-5}\sim 10^{-2}$ ,难以利用直接测力法。

[0007] 间接测力法中,常将测力转为测量位移或者加速度。在加速度方案中,需要测量推进器点火前后台架速度变化,也就是台架动量的改变,来测试平均推力。该方法不但需要测试台架的速度,而且需要进行台架有效质量的标定,同时,推力作用时间也需要精确测量。相较于位移方法,该方法应用较少。在位移测量方案中,需要设计不同结构的推力台架,将推力测量转化为台架位移测量。它可以通过标定静态推力与台架位移之间的关系,实现平均推力测量。这是应用最为广泛的微小推力测量方法,可实现低至亚微牛顿的微力测量。但现有的微小推力测量技术的测量带宽不足,难以同时测量微小推力和微冲量,同时需要实现在线标定和提供操作简便性和环境适用性。

## 发明内容

[0008] 本发明的技术解决问题是：克服现有技术的不足，提供一种微推力测试系统，其适用于推重比为 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 范围内 $1 \sim 1000\text{mN}$ 的推力的测试。实现很高的测量带宽，大大提高了测量精度。

[0009] 本发明的技术解决方案是：利用高测量带宽的位移传感器提高整个测力系统的测量带宽，从而能够实现位移的时间导数测量，提取微冲量信息；同时设计在线阻尼和标定系统，减弱环境影响，大幅减少试验等待时间，提高测量次数。该微推力测试系统包括台架、位移传感器、在线标定组件、阻尼系统、计算机测控设备；

[0010] 所述台架为水平扭摆结构，包括固定支座、旋转支座、挠性轴、悬臂、配重、限位装置、推力器固定装置；

[0011] 所述位移传感器为反射式激光位移传感器，其发出的光束信号经过悬臂的侧表面反射，返回后被其内部的CCD记录并处理，从而获得其与悬臂侧面的绝对距离；

[0012] 所述在线标定组件利用悬丝悬挂标准砝码，通过升降台来控制悬丝松紧，从而产生稳态推力，对微推力器进行标定；

[0013] 所述阻尼系统包括线圈和铁芯，线圈固定于台架的固定底座上，当铁芯相对于线圈运动时候产生电磁吸斥力，从而逐渐静止扭摆；

[0014] 所述计算机测控设备包括相连的高频数据采集卡、工控机、显示装置；反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现；工控机控制升降台的高度，测量标准砝码加载下的摆推力响应，实现稳态推力标定；工控机控制阻尼系统来使扭摆静止。

[0015] 本发明的水平放置扭摆台架可以不受到重力的影响，反射式激光位移传感器获得其与悬臂的绝对距离，在线标定组件对微推力器进行标定，阻尼系统来使扭摆静止，反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现，因此适用于推重比为 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 范围， $1 \sim 1000\text{mN}$ 内的推力的测试，在测量带宽足够的情况下，大大提高了测量精度。

[0016] 还提供了一种采用这种微推力测试系统的测试方法，包括以下步骤：

[0017] (1) 悬臂通过两个垂直方向的挠性轴，安装在台架本体上；

[0018] (2) 安装推力器后，通过控制配重的重量来保持悬臂的水平；

[0019] (3) 测试前，工控机控制阻尼系统来使扭摆静止；

[0020] (4) 反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现；

[0021] (5) 工控机控制升降台的高度，测量标准砝码加载下的摆推力响应，实现推力在线标定。

## 附图说明

[0022] 图1是根据本发明的微推力测试系统结构示意图。

[0023] 图2是根据本发明的微推力测试系统的技术设计框图。

[0024] 图3是根据本发明的阻尼系统的结构示意图。

- [0025] 图4是根据本发明的阻尼系统的运算方法和安装位置图。
- [0026] 图5是根据本发明的在线标定组件的结构图。
- [0027] 图6是根据本发明的测控系统的基本功能示意图。

### 具体实施方式

[0028] 微小推力器在轨需执行动量轮卸载与姿态控制操作,为满足卫星姿态稳定度与精度,需要精确控制推力器脉冲工况下的冲量。为保证推力器的脉冲控制精度,需研制精确具有高带宽和高精度的测力设备,以满足冲量精确测量。由于推力器工作时间短、推力/冲量小,现有推力器测量设备无法满足要求,需要研制能够测试微小推力、微小冲量测试系统。

[0029] 如图1所示,这种微推力测试系统,其包括台架、位移传感器、在线标定组件、阻尼系统、计算机测控设备;

[0030] 所述台架为扭摆结构,包括台架本体1、挠性轴2、悬臂3、配重4以及推力器固定装置5,悬臂水平放置,中部安装挠性轴与台架本体连接,悬臂的一端放置配重且另一端连接推力器固定装置,微推力器放在推力器固定装置上;

[0031] 所述位移传感器7为反射式激光位移传感器,其发出的光束信号经过悬臂的侧表面反射,返回后被其内部的CCD记录并处理,从而获得其与悬臂侧面的绝对距离;

[0032] 所述在线标定组件8利用悬丝悬挂标准砝码,通过升降台来控制悬丝松紧,从而产生稳态推力,对微推力测试系统进行标定;

[0033] 所述阻尼系统6包括线圈和铁芯,线圈固定于台架的固定底座上,当铁芯相对于线圈运动时候产生电磁吸斥力,从而逐渐静止扭摆;

[0034] 所述计算机测控设备9包括相连的高频数据采集卡、工控机、显示装置;反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现;工控机控制升降台的高度,测量标准砝码加载下的摆推力响应,实现稳态推力标定;工控机控制阻尼系统来使扭摆静止。

[0035] 本发明的水平放置的扭摆可以不受到重力的影响,反射式激光位移传感器获得其与摆臂的绝对距离,在线标定组件对微推力器进行标定,阻尼系统来使扭摆静止,反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现,因此适用于推重比为 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 范围内的推力的测试,在测量带宽足够的情况下,大大提高了测量精度。

[0036] 另外,所述台架为水平扭摆结构,包括固定支座、旋转支座、挠性轴、悬臂、配重、限位转置、推力器固定装置。

[0037] 另外,所述挠性轴是型号为6016-400的挠性轴。

[0038] 另外,所述反射式激光位移传感器是型号为松下HL-C203BE的位移传感器,其测量中心距离为30mm,测量范围为 $\pm 5$ mm,位移分辨率为0.25 $\mu$ m。

[0039] 另外,所述阻尼系统还包括可编程电源,其与线圈连接。

[0040] 另外,所述线圈长度175mm,直径80mm,线圈400扎,工作电压12~20V,实测阻抗5 $\Omega$ ;所述铁芯长度170mm,直径25mm;所述可编程电源型号为RIGOL DP811A,最大工作电压40V,电流5A。

[0041] 另外,所述在线标定组件的拟定点标定196mN。

[0042] 另外,所述升降台为竖直安装的电控平移台,行程100mm,并借助两个直角固定块

来分别固定平移台和托举砝码。

[0043] 另外,所述工控机为研华工控机IPC-610MB,所述采集卡为泛华多功能采集卡PCI-3363。

[0044] 还提供了一种采用这种微推力测试系统的测试方法,包括以下步骤:

[0045] (1) 悬臂通过两个垂直方向的挠性轴,安装在台架本体上;

[0046] (2) 安装推力器后,通过控制配重的重量来保持悬臂的水平;

[0047] (3) 测试前,工控机控制阻尼系统来使扭摆静止;

[0048] (4) 反射式激光位移传感器采集的位移数据通过工控机处理后经过显示装置来展现;

[0049] (5) 工控机控制升降台的高度,测量标准砝码加载下的摆推力响应,实现推力在线标定。

[0050] 下面结合附图对本发明的实施例进行详细说明:

[0051] 针对1~1000mN的推力范围,以及冲量测量要求,根据小推力测量方面公开发表的文献。提出的基本台架推力测量结构为扭摆+反射式激光位移系统的整体推力测量方案。具体的台架结构见图1。

[0052] 图1所示的结构中,推力器固定在一个水平放置的悬臂上,其优点是可以不受到重力的影响。扭摆的旋转轴处在垂直方向。扭摆的旋转由两个垂直安装的挠性轴承来完成,该轴属于无润滑部件,既可以在空气中使用,也可以满足真空环境的要求。推力测量的灵敏度与扭摆旋转角度有关。因此,在选择挠性轴承时,必须考虑轴承的扭矩常数。该常数越小,加载单位扭矩所带来的扭摆的角度越大,推力台架的灵敏度越高。但并非轴承的扭矩常数越小越好,而应根据测量的动态范围合理选择具有适当扭矩常数的挠性轴承。

[0053] 推力器固定在扭摆的悬臂上,相当于一个悬臂梁。为了充分保证扭摆水平放置,以消除重力影响,除了在合理方位增强摆的刚度以外,还通过在摆的对侧端增加配重,消除重力对台架系统的影响。

[0054] 微小位移测量,通过激光位移传感器实现,该传感器的原理是激光的反射改变光点在探测器面上的位置。传感器最大测量频率约为100kHz,位移的分辨率小于0.1 $\mu$ m。由于该传感器是成熟的工业传感器,其可靠性、重复性以及易操作性都能够满足要求。

[0055] 推力测试设备除了上述两个关键元件(扭摆式台架结构、激光位移传感器)外,还有在线标定组件;阻尼系统;和计算机测控三大部分。其中,在线标定使用标准砝码进行标定,阻尼系统采用电磁阻尼系统,计算机测控部分采用工控机+数据采集卡+Labview的结构,实现对微小位移的测量、阻尼和标定系统的控制。

[0056] 图2为该测试系统研制的技术设计框图。提出了基于扭摆台架和激光位移计的整体方案,并进行了初步评估,证明方案的可行性。在具体实施中,对设备的各个组成部分进行拆解,分别实施。整个系统可分成(1)扭摆台架,(2)位移传感器,(3)阻尼系统,(4)标定系统,(5)计算机测控和(6)真空匹配六部分,如图2所示。在具体的实施过程中,每部分分别进行,并且在中后期交叉组合、调试和验证,最终实现整个设备的预设目的。

[0057] 整个研究过程可简述如下:

[0058] 第一步,针对台架结构的核心元件-线性无油挠性轴、位移传感器、测控用的工控机和真空匹配所需材料进行选型、购置;对阻尼系统和标定系统进行设计并确定相关参数;

[0059] 第二步,设计扭摆结构、调试测控系统硬件和激光位移传感器,购置阻尼系统的可编程电源、加工线圈,采购标定系统的砝码、升降台,根据真空匹配条件,安排台架上的气、电路布置;

[0060] 第三步,对扭摆台架进行机械设计,组合调试挠性轴和阻尼系统以验证阻尼功效,组合标定系统和测控系统,编写、调试升降台控制软件,真空匹配方面为扭摆台架设计局部温度监控;

[0061] 第四步,加工扭摆台架,组合阻尼器和测控系统,编写阻尼器的控制软件。对加工和购置设备进行除油处理,以满足真空使用需求;

[0062] 第五步,组合扭摆台架和位移传感器,进行无阻尼调试;

[0063] 第六步,组合台架、传感器和阻尼系统进行有阻尼调试;

[0064] 第七步,组合台架、传感器、阻尼、标定系统和初步测控软件,开展大气条件下的有阻尼标定试验;

[0065] 第八步,在有阻尼标定试验的配合下,联调测控系统的所有子程序,并编写、调试整套设备的主程序;

[0066] 第九步,在真空条件下进行设备调试;

[0067] 第十步,整理各种材料,编写使用说明书等文档,完成设备建设。

[0068] 激光位移传感器发出的光束信号经过悬臂的侧面返回后被传感器内部的CCD记录并处理获得传感器与该金属片的绝对距离。由于该传感器具有100kHz的测量频率,因此能够获得位移(摆角)的绝对值,以及其时间变化曲线,这样可以得到摆的最大位移、最大速度以及加速度历程,结合静态标定可获得推力器的稳态推力、单脉冲冲量以及加速度变化曲线。

[0069] 扭摆台架的最核心元件为挠性轴,它安装于图1的中部,上下各有一个。该轴两端固定,中间部分可旋转,其内部类似翘板,在一定角度下具有固定的弹簧系数,因此被称为线性轴。根据推力和冲量测试范围,以及推力器的重量不难评估所需的弹簧系数。设备所用的挠性轴型号为6016-400,其扭矩常数约为1.85Nm/rad,可承轴向负载约为100公斤。

[0070] 位移测量采用反射式激光位移传感器,激光器照射到物体表面后,其反射光返回传感器的接收窗口,并由透镜收集后被线阵CCD(电荷耦合元件)探测并将光强信号转换为电信号,高速信号处理微芯片将CCD的数据处理后可得到被测物体距离该传感器的绝对距离,这一距离信号可由电压或电流信号输出,由计算机采集并显示、再加工。

[0071] 随着光电技术的进步,近年来,基于激光反射原理的激光位移传感器已经成为成熟的工业产品。可根据需要,选择合适的传感器参数,包括目标距离、测量精度、采样频率等。

[0072] 采用频率:该激光位移传感器的最大测量频率约100kHz,在实际使用中常常进行多次平均以进一步提高测量精度。平均后的频率取决于最大摆位速度,而最大摆速取决于最大冲量和摆重。以摆重15kg,单脉冲最大冲量300mNs为例:最大摆速应为

$$V = \frac{I}{M} = \frac{300mNs}{15kg} = 20mm/s。为获得实时加速度信息,应在传感器的可分辨位移内尽可能的提高测量点数。该激光位移传感器的最佳分辨率为0.25um,因此传感器的测量频率应大于80kHz,建议使用100kHz。$$



[0073] 目标距离和测量精度:从最大化稳态推力的测量动态范围(如1~1000mN)角度出发,传感器与被测悬臂的距离应越大越好。然而测量精度与目标距离是成反比的,较小的测量精度需较小的目标距离。高精度激光位移传感器的位移测量范围主要有三档:±1mm,对应目标距离10mm;±5mm,对应目标距离30mm;±15mm,对应目标距离110mm。

[0074] 由于挠性轴的最佳摆角小于 $3^{\circ}$ ,设摆臂长度250mm,按照挠性轴参数,对应最大摆动位移3.25mm,因此应该选择测量范围±5mm的传感器,对应目标距离30mm,该型传感器的位移分辨率为0.25 $\mu$ m,选择型号为松下HL-C203BE。选择完传感器探头后,应配备合适的传感器控制器,可选择HL-C2CE。该控制器兼顾传感器的电源供电、激光驱动以及返回数据的放大和整形功能。控制器为24V供电,可实现10 $\mu$ s的取样周期以及模拟电压输出功能,方便二次开发。

[0075] 由于挠性轴的无阻特性,试验中环境振动噪声引起的小幅摆动难以自行静止。这种干扰对于极小稳态推力(如最小推力1mN)和极小冲量(如3mNs)测量的影响是致命的。因此,必须给台架设计、安装阻尼系统,用于地面、真空条件下摆的稳定控制。

[0076] 设计的阻尼系统如图3所示,包含线圈601、铁芯602和塑料固定棒603。在本设计中,阻尼系统的铁芯与塑料固定棒安装于悬臂下方,线圈固定于台架本体上。阻尼系统的算法如图4所示,根据位移传感器的位移信息,进行差分运算并且去噪和放大信号后,调节偏置并利用电流电压转换,给线圈改变通电电流,从而改变内部磁场环境,当铁芯相对于线圈运动时候产生电磁吸斥力,线圈阻尼铁芯的运动,即逐渐静止扭摆。阻尼系统的硬件安装于真空仓内,而算法部分由测控计算机实现,在仓外。

[0077] 本阻尼设备设计并加工完成的线圈长度175mm,直径80mm,线圈400扎,工作电压12~20V,实测阻抗5 $\Omega$ ;铁芯长度170mm,直径25mm;可编程电源型号为RIGOL DP811A,最大工作电压40V,电流5A。为调试电磁阻尼器的效果,进行了组合调试实验。设计、加工了单摆结构。试验表明,在12V、0~3A的条件下,阻尼效果良好,能在数秒内停摆。

[0078] 在线标定系统的精度是衡量一个微推力测试设备稳定性、重复性的关键。利用悬丝悬挂标准砝码的方式产生稳态推力,对推力器进行标定。而为实现在线标定,提高可操作性,计划采用电控真空升降台801,通过升降控制砝码802的悬丝804松紧,从而实现稳态推力标定。标定系统的示意图如图5所示。电控升降台801的台面高度由测控计算机输出的数字信号控制,其运动的距离以及位移信号的同步采集、处理,均已内置于测控软件中。试验中,仅需在软件中点击在线标定按钮,即可实现电控升降台的自动运行、砝码悬挂、位移采集和稳态推力换算。

[0079] 标定砝码的精度直接决定了整个标定系统的精度。砝码的质量精度有标准等级可查,高精度砝码的质量误差可 $<0.1\%$ ,可满足标定精度需求。同时,悬挂砝码的定滑轮803的摩擦力也影响着标定精度。为此,标定砝码的重力不应过小,一般介于满量程的20~80%,本设备拟定点标定196mN。标定点能获得挠性轴的刚度系数,直接用于位移-力的换算。

[0080] 由于升降台的运动范围很小、速度慢,且其运动组件过多不利于真空匹配使用(除油、摩擦散热),故在实际系统中竖直安装电控平移台,并借助两个定制直角固定块,形成升降系统,代替升降台。如此一来,该升降系统的运动范围大(100mm),速度高( $>200$ mm/s),且结构简单、运动部件少,适于真空使用。平移台和直角块安装于真空仓内,控制箱安装于仓外的控制机柜中。

[0081] 在升降台系统的硬件完成后,应与测控系统进行联调。这一部分工作的主要目的是,编写升降台的控制软件并进行调试。实际运作中,该部分软件包括平移台的开关通断,速度、行程和加速度设置,回零控制,位置反馈,以及与扭摆位置测量的比较分析。这部分程序将在设备研制的最后耦合进主程序,因此时序控制,特别是开始触发特别关键,需要在子程序调试时即予以考虑。

[0082] 为简化设备的操作和排除人为干扰,设备所有功能均由计算机测控系统采集和控制。其基本硬件构成是:多通道、多功能高频数据采集、输出卡;工控机;虚拟仪器程序(计划利用Labview实现)及外部辅助电路。

[0083] 测控系统的基本结构如图6所示,其采集部分的核心是激光位移传感器的数据采集,由于传感器的测量频率为100kHz,该模拟数据采集的采样频率应设为500kHz以上。采集的位移的时间历程用于数据处理程序计算稳态推力、冲量和动态推力。这些最终结果,直接显示在软件界面上,操作简单。

[0084] 标定方面,测控程序启动标定程序,通过采集真空升降台的数字信号判断升降台高度,利用预设的程序输出控制信号,该信号转换为±24V直流电,利用控制信号的输出时长控制升降台(801)的高度定位,再启动摆位移采集程序,测量该砝码加载下的摆推力响应,实现稳态推力标定。

[0085] 阻尼系统方面,测控系统控制阻尼的开和关。当需要阻尼时,打开软件开关,内置的阻尼控制软件开始接受激光位移传感器的位移信号,并做差分、放大处理,输出控制信号给可编程电源,转换为0~20V的电压信号控制线圈(601)的磁场变化,经数个周期最终完成摆位控制。

[0086] 在硬件方面,选用研华工控机IPC-610MB和泛华多功能采集卡PCI-3363。工控机IPC-610MB的配置为:CPU:E5300;内存:4G;硬盘:500G;光驱:DVD。采集卡3363具有16路差分输入,最高625ks/s采样率,AD分辨率18位,输入模拟信号量程-10V~10V;输出4路模拟信号,最大更新率2MHz,DAC分辨率16位,输出电流最大50mA。

[0087] 在软件界面方面,基于Labview编写测控程序,并生成测控安装文件。最终的软件界面友好,功能完善,它包括参数设置(存储文件的名称、类型),数据显示,数据回放,标定校准等部分。其中参数设置中,可以设置存储文件的名称、类型,设置模拟、数字通道的采样频率等。

[0088] (1) 微冲量特征获取

[0089] 推力台架系统可以看作一个黑匣子,输入到系统的是推力以及系统的响应可以通过系统内部不同处的位置变动观察到。每一个观察点对于输入到系统的给定推力的精确动态响应是非常复杂的。考虑到一个线形系统,则有:

$$[0090] \quad x(t) = \int_0^t f(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

[0091] 在上式中,x(t)是观察点的数据。h(t)是单位冲量响应,f(t)是输入的推力。在上式中,只有知道h(t),否则没有任何办法解决上式。一般,在许多情况下,推力台架可以看作有阻尼的弹簧质量系统。如果推力器的点火频率远远大于台架的固有频率,在单脉冲作用下,台架上某一点的运动方程为:

$$[0092] \quad x(t) = e^{-\omega_n \xi} \frac{I_{bit} / m_{eff}}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \sin(\sqrt{1-\xi^2} \omega_n t) \quad (2)$$

[0093] 在上式中,  $\omega_n$ 、 $\xi$ 和 $m_{eff}$ 分别为有效自然频率、阻尼因子以及有效质量。

[0094] 上式,如果不考虑弹簧和阻尼,则简化为简单的动量方程:

$$[0095] \quad I_{bit} = m_{eff} \Delta x \quad (3)$$

[0096] 对于(2),如果知道系统的有效质量,且获得位移随时间的变化,就可以测量单脉冲冲量的数值。

[0097] 测试设备的系统自校可以获得有效质量,这可以通过加载已知质量的砝码,测量无阻尼状态下,该摆的加速度响应(位移的二阶导数)获得,测得等效质量以后,利用(3)式可获得冲量大小。

[0098] (2)微推力特征获取

[0099] 如图1所示的扭摆系统。在任意时刻 $t$ ,作用力 $f(t)$ 所产生的力矩 $M=f(t)L$  ( $0 \leq t \leq t_1$ ),扭摆的有阻尼受力运动方程为:

$$[0100] \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + 2\xi \omega_n \frac{\partial \theta}{\partial t} + \omega_n^2 \theta = \frac{M}{J} \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (4)$$

[0101] 初始条件为 $\theta(0)=0, \frac{\partial \theta}{\partial t}(0)=0$

[0102] 上式中, $t_1$ 为作用力 $f(t)$ 的持续作用时间; $\xi$ 为扭摆阻尼比, $J$ 为扭摆转动惯量, $\omega_n$ 为扭摆无阻尼振动频率。 $L$ 为作用点与垂直旋转轴之间的距离。上述扭摆参数,可以通过实验标定。

[0103] 对于扭摆系统,当用来测量恒定的推力时,式(4)中的一阶偏导数和二阶偏导数均为0,因此,上述的方程就退化为一个简单的弹性方程。即稳态力加载后,单摆稳定于某一固定摆角 $\theta$ 位置,此时力 $F$ 与摆角 $\theta$ 的关系为:

$$[0104] \quad F \cdot L = K \cdot \theta \approx K \cdot x / L \quad (5)$$

[0105] 其中 $L$ 为有效摆臂长度(力作用点距离轴心距离), $x$ 为力作用点的位移绝对值, $K$ 为挠性轴的弹簧系数。因此,只要测量在稳态推力情况下的摆动位移,就可以获得推力的准确数值。

[0106] (3)动态推力测量

[0107] 静态砝码标定能够获得摆的等效质量 $m_{eff}$ ,利用位移的二阶导数能够获得摆的加速度,于是两者相乘获得摆所受到的合力。该合力是摆所受外力与摆回复力(挠性轴的回复力 $f_h = \frac{K \cdot \theta}{L}$ )的和,已知摆的弹簧系数和测得摆角,能够计算摆的回复力,这样就可以测得摆所受的动态外力。

[0108] 系统测量灵敏度和精度评估:定义挠性轴的扭矩常数为TSR,其单位为N.m/rad。对于稳态推力测量,假设推力器的推力为 $F$ ,作用点到挠性轴的旋转中心为 $L$ (摆臂长度)。则对旋转中心处的力矩 $T$ 为:

$$[0109] \quad T = FL \quad (6)$$

[0110] 同时,扭摆在此力矩的作用下,摆动的角度为 $\theta$ 。扭摆台架工作状态要求处于挠性

轴的弹性范围内,有:

$$[0111] \quad FL = 2TSR * \theta \quad (7)$$

[0112] (乘以2的原因是因为台架安装两个挠性轴,上下各1个)

[0113] 在扭摆摆动角度 $\theta \sim 0$ 的情况下,则有 $\theta \approx \sin\theta$ ,推力作用点沿推力方向的位移 $S$ 则等于:

$$[0114] \quad S = \theta L = \frac{FL^2}{2TSR} \quad (8)$$

[0115] (8)式用来评估扭摆系统能否测量小推力的关系。

[0116] 要求测量的最大推力为1000mN,挠性轴的线性区间要求摆的最大摆角小于 $3^\circ$ ,则计算所需要挠性轴的扭矩常数:

$$[0117] \quad TSR = \frac{FL^2}{2S} \quad (9)$$

[0118] 按照式(9)计算,我们选择了双端挠性轴产品,型号为6016-400,其扭矩常数为1.85Nm/rad。

[0119] (1) 测量分辨率分析

[0120] 在摆臂250mm,扭矩常数1.85N.m/rad的双轴扭摆台架结构下,若位移的分辨率为0.25 $\mu$ m,则对应的稳态推力分辨率可由(7)式计算得到:14.8 $\mu$ N。

[0121] (2) 推力测量误差分析

[0122] 在上述条件下,根据(7)式可得:若位移的测量误差小于10 $\mu$ m(保守估计),则推力的测量误差0.592mN。

[0123] (3) 冲量测量范围分析

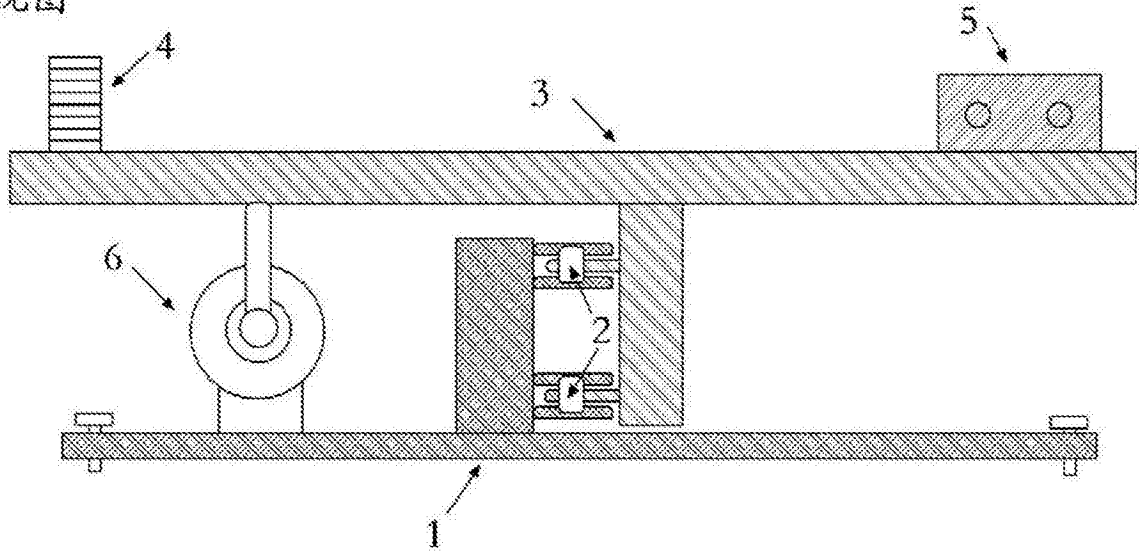
[0124] 指标要求的最大冲量为300mNs,承重15kg,对应最大摆速约为20mm/s。当位移分辨率0.25 $\mu$ m时,80kHz以上的位移测量频率可以实现对速度的准确捕捉,即实现300mNs冲量的准确测量。

[0125] (4) 冲量测量精度分析

[0126] 冲量测量的误差主要取决于摆速的测量误差,在实际操作中主要取决于位移采样点的平滑次数。小冲量测量时,100kHz的采样频率可提供1000数据点的平滑。该10ms的计算周期内,位移误差主要来源于摆静止时的振动噪声(阻尼效果)和位移测量误差。根据经验,振动噪声引起的摆位移不确定性优于0.1 $\mu$ m;位移测量误差优于0.25 $\mu$ m,因此平滑后的速度测量误差应为0.35 $\mu$ m/10ms=0.035mm/s,对应的冲量测量误差为0.53mNs。

[0127] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例,并非对本发明作任何形式上的限制,凡是依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属本发明技术方案的保护范围。

正视图



俯视图

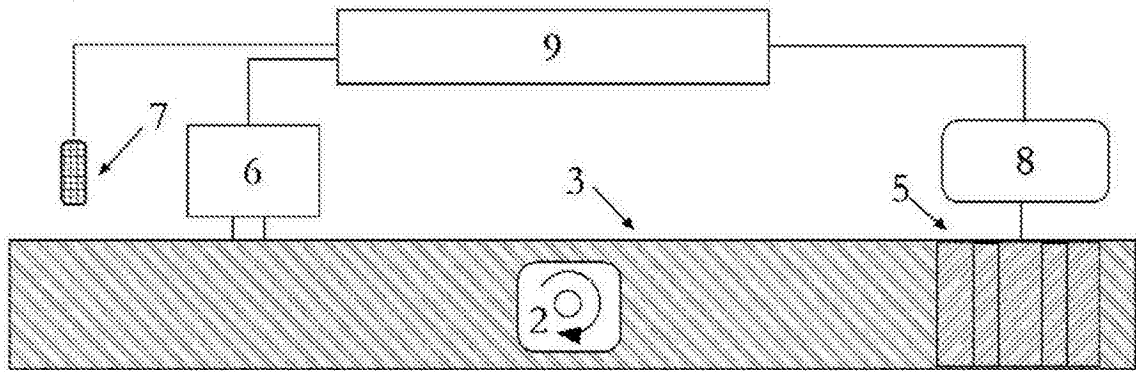


图1

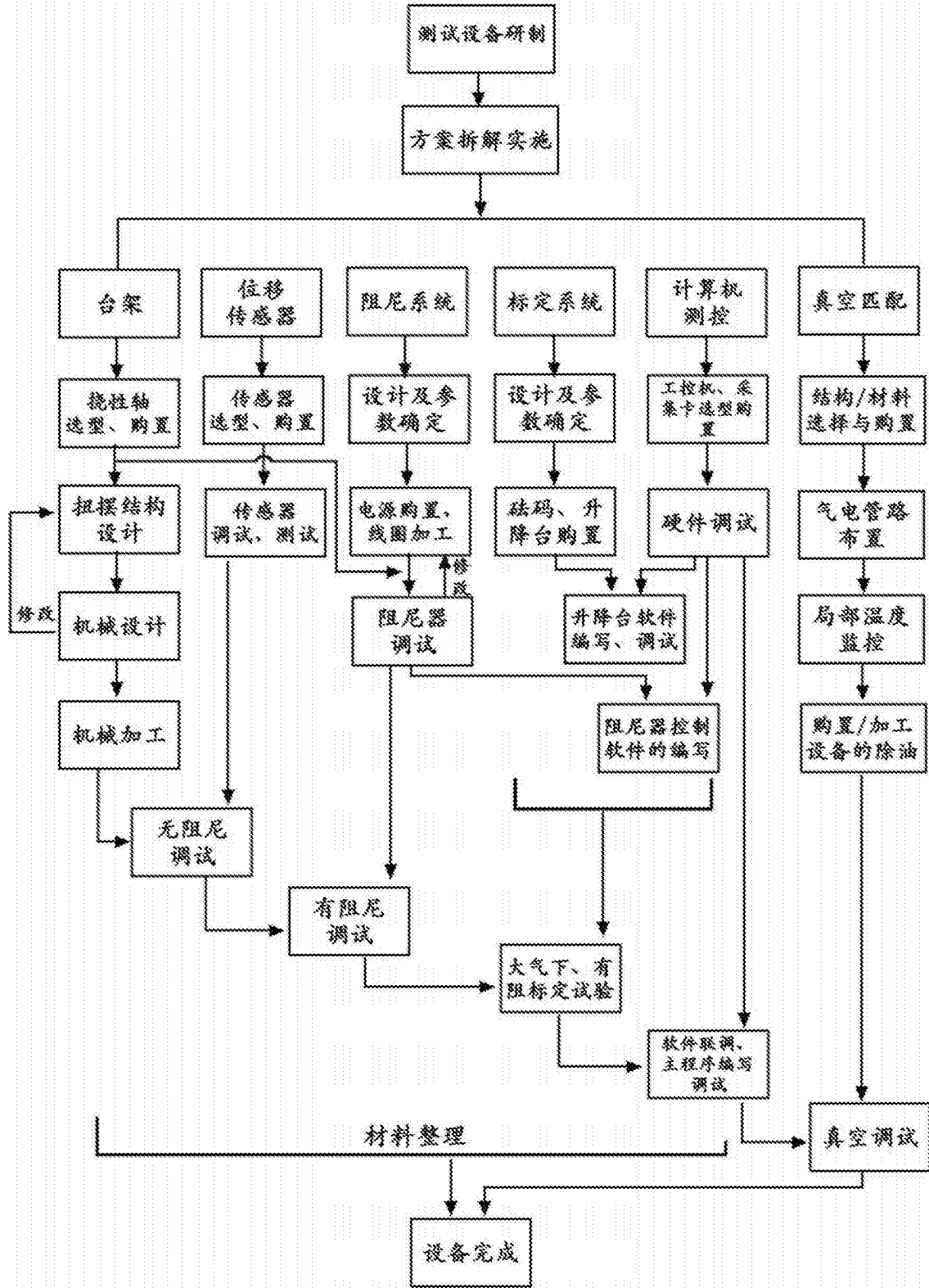


图2

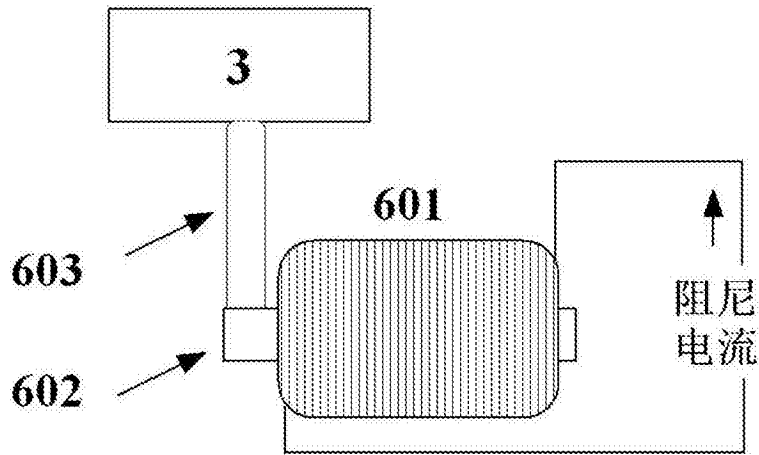


图3

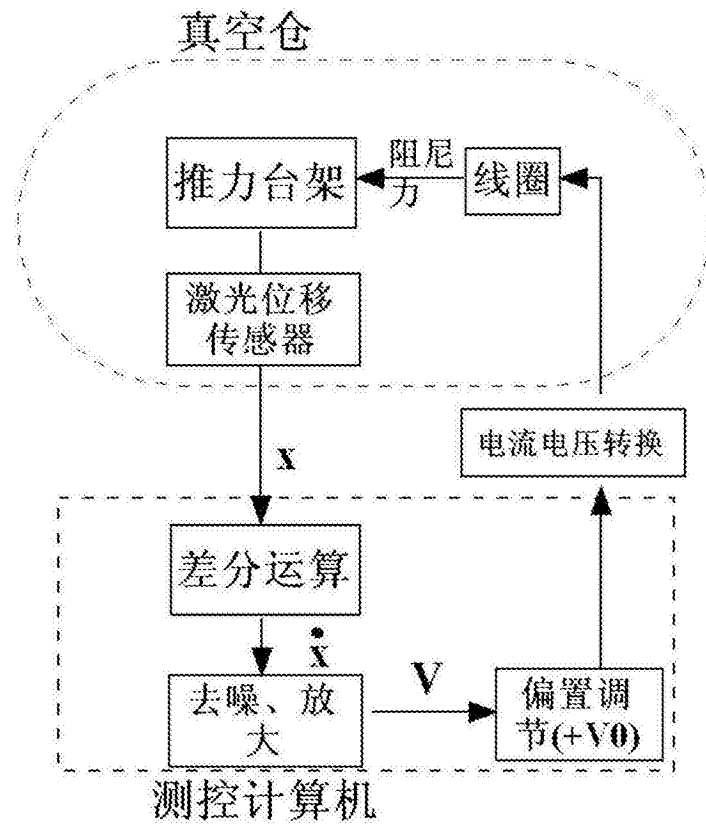
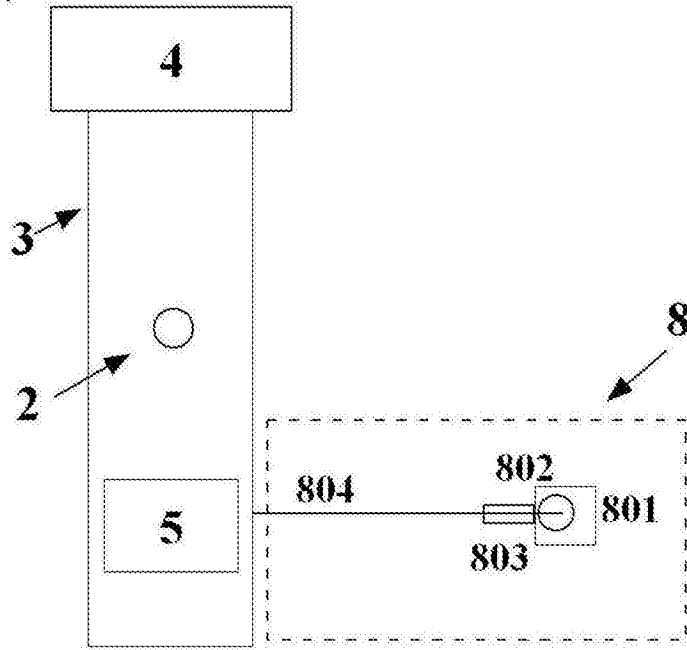


图4

俯视图



左视图

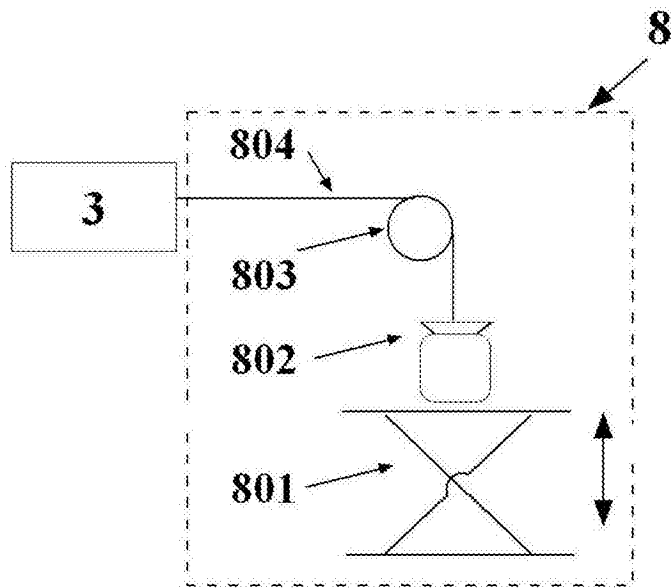


图5



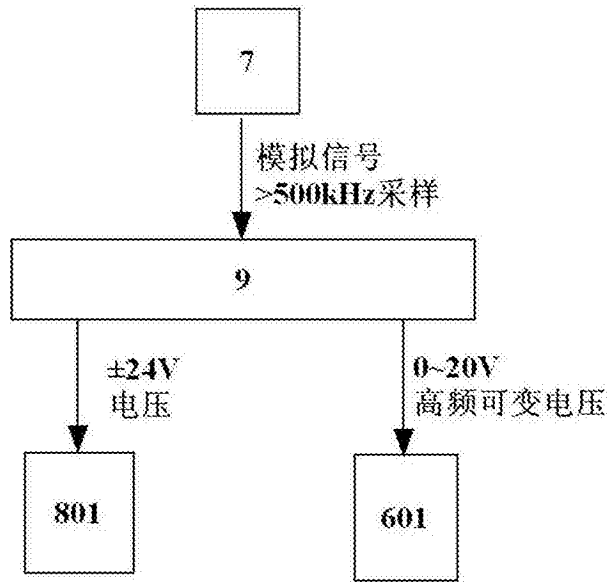


图6