



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107631817 A

(43)申请公布日 2018.01.26

(21)申请号 201710692879.4

(22)申请日 2017.08.14

(71)申请人 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 郭大华 余西龙

(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 1/14(2006.01)

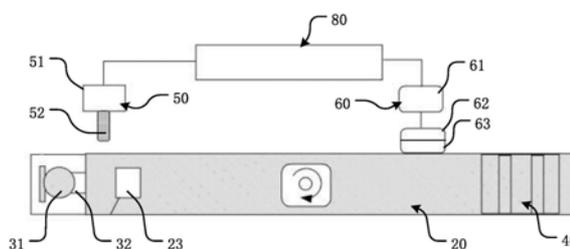
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种微牛级微推力测试系统及测试方法

(57)摘要

本发明提供了一种微牛级微推力测试系统及测试方法,包括:台架;悬臂,通过挠性轴与所述台架连接;利用电磁阻力防止所述悬臂水平摆动的阻尼装置;安装在所述悬臂的一端的推力装置;安装在所述悬臂的另一端的位移测量装置,用于通过磁性间的斥力对所述悬臂的水平摆动进行标定的标定装置;用于为前述设备提供真空环境的真空仓;用于接收和控制测量过程的控制单元。本发明可以实现推重比为 10^{-7} ~ 10^{-4} 范围内的推力的测试,并在测量带宽足够的情况下,大大提高测量精度。同时减弱环境影响,大幅减少试验等待时间,提高测量次数。



1. 一种微牛级微推力测试系统,其特征在于,包括:
 - 台架,提供安装基座;
 - 悬臂,通过挠性轴与所述台架连接,使所述悬臂的两端以挠性轴为支点相对所述台架实现水平摆动;
 - 阻尼装置,安装在所述悬臂一端,利用电磁阻力快速制止所述悬臂水平摆动;
 - 推力装置,安装在所述悬臂的一端,包括对所述悬臂施加水平推力的微型推力器;
 - 位移测量装置,安装在所述悬臂的另一端侧,用于通过电容变化获取所述悬臂的摆动位移;
 - 标定装置,安装在所述悬臂安装所述推力装置的一侧,用于通过磁性间的斥力对所述悬臂的水平摆动进行标定;
 - 真空仓,用于为前述设备提供真空环境;
 - 控制单元,放置在所述真空仓外,用于接收和控制所述位移测量装置和所述标定装置的工作,包括具备数据处理能力的工控机和显示设备。
2. 根据权利要求1所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,
 - 所述台架的上表面固定有第一支架,在所述悬臂的下表面固定有与所述第一支架相对的第二支架,所述第一支架和所述第二支架分别与所述挠性轴的一端固定,所述挠性轴被所述第一支架和所述第二支架夹持固定。
3. 根据权利要求1所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,
 - 所述挠性轴为线性轴,所述第一支架的一侧设置有两个水平延伸的夹持座,每个夹持座内分别垂直安装一个挠性轴,所述第二支架相对所述第一支架的侧面分别安装有两个水平固定板,水平固定板分别与夹持座内的挠性轴连接。
4. 根据权利要求1所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,
 - 所述阻尼装置包括设置在所述悬臂一侧的电磁铁,和设置在所述悬臂上且与所述电磁铁相对的铜板,所述电磁铁上设置有水平凹槽,所述铜板水平设置且水平摆动时的轨道与所述水平凹槽重合。
5. 根据权利要求1所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,
 - 所述位移测量装置包括贴近所述悬臂设置的电容式位移计,和控制所述电容式位移计当前位置的微型电控平移台。
6. 根据权利要求1所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,
 - 所述电容位移计的量程为200 μm ,位移分辨率小于0.1nm;所述微型电控平移台的行程为12mm,其具体移动距离由外部输入电压控制。
7. 根据权利要求1所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,
 - 所述标定装置包括固定在所述悬臂侧面的永磁铁,位于所述永磁铁一侧的线圈,和调节所述线圈电流大小的可编程电源;其中,标定力与电流为线性关系,拟定点可变,标定10 \sim 3000 μN 。
8. 根据权利要求7所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,
 - 所述永磁铁的磁场强度为4000高斯,线圈为10扎,直径为20mm,工作电压0 \sim 20V,实测阻抗0.5 Ω ;所述可编程电源型号的最大工作电压为40V,电流5A。
9. 根据权利要求1所述的微牛级微推力测试系统,其特征在于,

在所述悬臂与所述推力装置相对一端的上表面,安装有与所述推力装置等重的配重块。

10.一种如权利要求1-9所述的微牛级微推力测试系统的测试方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100,对阻尼装置通电使悬臂处于静止状态,同时调整位移测量装置相对悬臂处于量程内,通过标定装置利用电磁斥力对推力装置实现推力在线标定;

步骤200,利用推力装置对悬臂施加持续推重比在 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 范围、 $1 \sim 3000 \mu\text{N}$ 内的推力;

步骤300,利用控制单元收集位移测量装置相对悬臂间的电容持续变化数值,从而得到当前推力装置的推力-时间变化曲线图。

一种微牛级微推力测试系统及测试方法

技术领域

[0001] 本发明涉及物理力学领域,特别是涉及一种能够测量 $1\sim 3000\mu\text{N}$,推重比为 $10^{-7}\sim 10^{-4}$ 范围内微型推力器推力的测试系统。

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以下,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] 目前采用微推力/冲量测量技术可概括为两种类型:

[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、 μN 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,虽然直接法的最小测力极限约为数十mN,不能用来测量 μN 级别的推力器推力。并且, μN 级的大部分推力器的推重比很小,如 $10^{-7}\sim 10^{-4}$,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,实现稳态推力测量。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精度和带宽不足,难以同时测量微小推力和微冲量。同时,在卫星推进的地面测试试验中,需要实现自动化控制、采集、在线标定、此外还需要真空适用性和操作简便性。

发明内容

[0008] 本发明的目的是要提供一种能够测量 $1\sim 3000\mu\text{N}$,推重比为 $10^{-7}\sim 10^{-4}$ 范围内微型推力器推力的测试系统,及使用该测试系统的测试方法。

[0009] 特别地,本发明提供一种微牛级微推力测试系统,包括:

[0010] 台架,提供安装基座;

[0011] 悬臂,通过挠性轴与所述台架连接,使所述悬臂的两端以挠性轴为支点相对所述台架实现水平摆动;

[0012] 阻尼装置,安装在所述悬臂一端,利用电磁阻力快速制止所述悬臂水平摆动;

[0013] 推力装置,安装在所述悬臂的一端,包括对所述悬臂施加水平推力的微型推力器;

[0014] 位移测量装置,安装在所述悬臂的另一端侧,用于通过电容变化获取所述悬臂的摆动位移;

[0015] 标定装置,安装在所述悬臂安装所述推力装置的一侧,用于通过磁性间的斥力对所述悬臂的水平摆动进行标定;

[0016] 真空仓,用于为前述设备提供真空环境;

[0017] 控制单元,放置在所述真空仓外,用于接收和控制所述位移测量装置和所述标定装置的工作,包括具备数据处理能力的工控机和显示设备。

[0018] 在本发明的一个实施方式中,所述台架的上表面固定有第一支架,在所述悬臂的下表面固定有与所述第一支架相对的第二支架,所述第一支架和所述第二支架分别与所述挠性轴的一端固定,所述挠性轴被所述第一支架和所述第二支架夹持固定。

[0019] 在本发明的一个实施方式中,所述挠性轴为线性轴,所述第一支架的一侧设置有两个水平延伸的夹持座,每个夹持座内分别垂直安装一个挠性轴,所述第二支架相对所述第一支架的侧面分别安装有两个水平固定板,水平固定板分别与夹持座内的挠性轴连接。

[0020] 在本发明的一个实施方式中,所述阻尼装置包括设置在所述悬臂一侧的电磁铁,和设置在所述悬臂上且与所述电磁铁相对的铜板,所述电磁铁上设置有水平凹槽,所述铜板水平设置且水平摆动时的轨道与所述水平凹槽重合。

[0021] 在本发明的一个实施方式中,所述位移测量装置包括贴近所述悬臂设置的电容式位移计,和控制所述电容式位移计当前位置的微型电控平移台。

[0022] 在本发明的一个实施方式中,所述电容位移计的量程为 $200\mu\text{m}$,位移分辨率小于 0.1nm ;所述微型电控平移台的行程为 12mm ,其具体移动距离由外部输入电压控制。

[0023] 在本发明的一个实施方式中,所述标定装置包括固定在所述悬臂侧面的永磁铁,位于所述永磁铁一侧的线圈,和调节所述线圈电流大小的可编程电源;其中,标定力与电流为线性关系,拟定点可变,标定 $10\sim 3000\mu\text{N}$ 。

[0024] 在本发明的一个实施方式中,所述永磁铁的磁场强度为 4000 高斯,线圈为 10 扎,直径为 20mm ,工作电压 $0\sim 20\text{V}$,实测阻抗 0.5Ω ;所述可编程电源型号的最大工作电压为 40V ,电流 5A 。

[0025] 在本发明的一个实施方式中,在所述悬臂与所述推力装置相对一端的上表面,安装有与所述推力装置等重的配重块。

[0026] 在本发明的一个实施方式中,提供一种前述微牛级微推力测试系统的测试方法,

包括如下步骤：

[0027] 步骤100,对阻尼装置通电使悬臂处于静止状态,同时调整位移测量装置相对悬臂处于量程内,通过标定装置利用电磁斥力对推力装置实现推力在线标定;

[0028] 步骤200,利用推力装置对悬臂施加持续推重比在 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 范围、 $1 \sim 3000 \mu\text{N}$ 内的推力;

[0029] 步骤300,利用控制单元收集位移测量装置相对悬臂间的电容持续变化数值,从而得到当前推力装置的推力-时间变化曲线图。

[0030] 本发明中水平放置的悬臂可以不受重力影响,通过阻尼装置可以保持悬臂的稳定性,通过位移测量装置可以精确控制电容式位移传感器与悬臂间的间距,从而获取精确的测量数据。通过标定装置可以实现稳态推力标定。本发明可以实现推重比为 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 范围内的推力的测试,并在测量带宽足够的情况下,大大提高测量精度。同时减弱环境影响,大幅减少试验等待时间,提高测量次数。

附图说明

[0031] 图1是本发明一个实施方式的微牛级微推力测试系统的结构示意图;

[0032] 图2是图1的俯视图;

[0033] 图3是本发明一个实施方式的位移测量装置的工作状态示意图;

[0034] 图4是本发明一个实施方式的标定装置工作状态示意图;

[0035] 图5是本发明一个实施方式的实测某微型推力器的推力变化示意图;

[0036] 图6是本发明一个实施方式的测试方式的流程示意图。

具体实施方式

[0037] 如图1、2所示,本发明一个实施方式的微牛级微推力测试系统一般性地包括作为安装基座的台架10,安装在台架10上的悬臂20,安装在悬臂20上的阻尼装置30、推力装置40、位移测量装置50和标定装置60,以及提供真空环境的真空仓70和控制测试过程的控制单元80。

[0038] 该悬臂20为板条状结构,通过中心对称处的挠性轴22与台架10连接,使悬臂20的两端能够以挠性轴22为支点相对台架10实现水平摆动。悬臂20和台架10的连接结构可以是:在台架10上表面固定第一支架11,在悬臂20下表面固定与第一支架11相对的第二支架21,第一支架11和第二支架21可以分别与挠性轴22的一端固定,而挠性轴22则被第一支架11和第二支架21夹持限定。具体的限定结构可以是:在第一支架11的一侧设置两个水平延伸的具备夹持空间的夹持座111,在每个夹持座111内分别垂直安装一个挠性轴22,挠性轴22为线性轴;在第二支架21相对第一支架11的侧面分别固定两个水平固定板211,两个水平固定板211分别与对应夹持座111内的挠性轴22连接。

[0039] 挠性轴22作为悬架20相对台架10的水平旋转轴,挠性轴22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。挠性轴22两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。根据推力和冲量测试范围,以及微型推力器的重量不难评估所需的弹簧系数。

[0040] 该阻尼装置30设置在悬臂20的一端,其利用电磁阻力快速制止悬臂20水平摆动;

具体的结构包括设置在悬臂20一侧且不与悬臂20接触的电磁铁31,和设置在悬臂20端部且与电磁铁31相对的铜板32,其中,电磁铁31上设置朝向悬臂20方向的水平凹槽311,铜板32水平固定在悬臂20的端部且其随悬臂20水平摆动时的轨道与水平凹槽311重合。

[0041] 由于挠性轴22的无阻特性,试验中环境振动或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(如推力小于50 μ N)和极小冲量(如5 μ Ns)测量的影响是致命的。因此,必须通过阻尼系统30用于地面、真空条件下悬臂20的稳定控制。本实施方式中电磁铁31可以固定在台架10上或单独固定在地面上,当悬臂20带动铜板32运动时,运动的铜板32在通电的电磁铁31产生的磁场中,会在水平凹槽311内部产生涡电流,然后与电磁铁31的磁场产生吸力,从而阻碍铜板32相对电磁铁31的运动,进而在两者的阻尼作用下实现悬臂20的静止。试验表明,电磁铁31采用4000高斯,铜板31厚度3mm,长宽分别为30mm的情况下,阻尼效果良好,能在数秒内停摆。

[0042] 该推力装置40安装在悬臂20的一端,包括对悬臂20施加水平推力的微型推力器(图中未示出),和固定微型推力器的固定座41。微型推力器通过固定座41固定在悬臂20的上表面,可以不受重力的影响。为充分保证悬臂20水平放置,以消除重力影响,除了在合理方位增强悬臂20的刚度以外,还可以通过在悬臂20的对侧端增加配重23,来消除重力对台架10的影响。

[0043] 推力测量40的灵敏度与挠性轴22的旋转角度有关,因此,在选择挠性轴22时,必须考虑挠性轴22的扭矩常数。该常数越小,加载单位扭矩后所带来的悬臂20扭摆的角度越大,推力作用于台架10的灵敏度就越高。但并非挠性轴22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22。如本实施方式中采用的挠性轴型号为6004-800,其扭矩常数约为4.075 $\times 10^{-4}$ Nm/rad,可承轴向负载约为2公斤。

[0044] 如图3所示,该位移测量装置50安装在悬臂20与推力装置40相对一端,可以与推力装置40同侧,也可以位于和推力装置40相对的一侧,以通过电容变化获取悬臂20的摆动位移;包括贴近悬臂20设置的电容式位移计52,和控制电容式位移计52相对悬臂20位置的微型电控平移台51。该电容式位移计52通过测量金属端部与悬臂20间的微小距离(< 0.5 mm)形成的等效电容,精确测量两者间的距离,电容式位移计52有效测量频率约为5kHz,位移的最佳分辨率小于0.1nm,因此能够获得位移(摆角)的绝对值,以及其时间变化曲线,这样可以得到悬臂20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微型推力器的稳态推力、单脉冲冲量以及加速度变化曲线。

[0045] 由于电容式位移计52的有效量程很小(≤ 0.2 mm),因此需要精确控制其与摆臂20的间距,使其可以有效测量。在实际操作中,电容式位移计52的输出位移信号传回控制单元80,由控制单元80判断其量程阈值,当电容式位移计52处于有效量程内部时,微型电控平移台51停止运动,当位置超出量程阈值外,控制单元80估算位置偏差形成偏置电压,然后与原电压相加输出,来控制微型电控平移台51的移动距离,直至电容式位移计52位置处于阈值以内。利用高测量带宽的电容式位移计52提高位移的采集频率,从而能够实现位移的时间导数测量,提取微冲量信息。

[0046] 如图4所示,该标定装置60安装在悬臂20安装推力装置40一端的侧面,用于通过磁性间的斥力对悬臂20的水平摆动进行标定;电流与斥力的关系可事先由精密天平测量。具体的标定装置60可以包括固定在悬臂20侧面的永磁铁63,间隔设置在永磁铁63一侧的线圈

62,和调节线圈62电流大小的可编程电源61。该线圈62与永磁铁63的间距基本固定。当线圈62的电流改变时,线圈62电流产生的磁场变化,它与永磁铁63间的吸斥力大小发生改变,该吸斥力会无接触地施加到悬臂20上,从而形成所需的标准力。

[0047] 通过改变线圈62的电流大小可改变其与固定在悬臂20上永磁铁63间的吸斥力,从而实现无接触在线标定。标定方面,控制单元80通过模拟电压控制可编程电源61,可改变可编程电源61的输出电压/电流,进而改变线圈62中电流大小,并产生指定大小的电磁吸斥力,该力在10~3000 μ N范围内可变,且精度、线性度均极佳。当电容式位移计52位置控制好且标定完成之后,控制单元80测量该已知吸斥力加载下的摆推力响应,即可实现稳态推力标定。

[0048] 该控制单元80放置在真空仓70外,用于控制位移测量装置50和标定装置60的工作过程,包括具备数据处理能力的工控机、采集卡和显示设备。在硬件方面,工控机选用研华工控机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。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。

[0049] 在测量时,将台架10及悬臂20置于真空仓70内,阻尼装置30可以通过磁力的相互作用使悬臂20保持静止,然后由微型推力器对悬臂20施加相应的持续推力,而电容式位移计52则可以在其量程内对悬臂20的位移变化进行测量,并将相应的测量的结果发送至工控机进行分析、记录,通过工控机给出的稳定推力和冲量说明,即可得到当前微型推力器的推力测试结果。

[0050] 图5为在真空仓70内实测某微型推力器的推力变化示意图。其中,横坐标为微型推力器的供给电压,纵坐标为推力绝对值。可见,该微型推力器在1.9~2.7V的电压变化中,推力变化范围为1.9~803 μ N。在该试验中,电容式位移计52的噪声水平折合推力约为0.3 μ N。经过隔震、调平、精细标定、多次重复试验,可保证测力误差约为1 μ N。

[0051] 本实施方式中水平放置的悬臂可以不受重力的影响,通过阻尼装置可以保持悬臂的稳定性,通过位移测量装置可以精确控制电容式位移传感器与悬臂间的间距,从而获取精确的测量数据。通过标定装置可以实现稳态推力标定。本实施方式可以实现推重比为 10^{-7} ~ 10^{-4} 范围内的推力的测试,并在测量带宽足够的情况下,大大提高测量精度。同时减弱环境影响,大幅减少试验等待时间,提高测量次数。

[0052] 如图6所示,在发明的一个实施方式中,提供一种前述微牛级微推力测试系统的测试方法,包括如下步骤:

[0053] 步骤100,对阻尼装置通电使悬臂处于静止状态,同时调整位移测量装置相对悬臂处于量程内,通过标定装置利用电磁斥力对推力装置实现推力在线标定;

[0054] 步骤200,利用推力装置对悬臂施加持续推重比在 10^{-7} ~ 10^{-4} 范围、1~3000 μ N内的推力;

[0055] 步骤300,利用控制单元收集位移测量装置相对悬臂间的电容持续变化数值,从而

得到当前推力装置的推力-时间变化曲线图。

[0056] 在本测试方法中,其具体采用的部件和相互间的关系,请参见前面的说明,这里不太重复。

[0057] 本实施方式可以实现推重比为 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 范围内 $1 \sim 3000 \mu\text{N}$ 的推力测试。实现位移测量的高测量带宽,大大提高测量精度,同时测试系统的自动化运行,可用于真空试验。

[0058] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

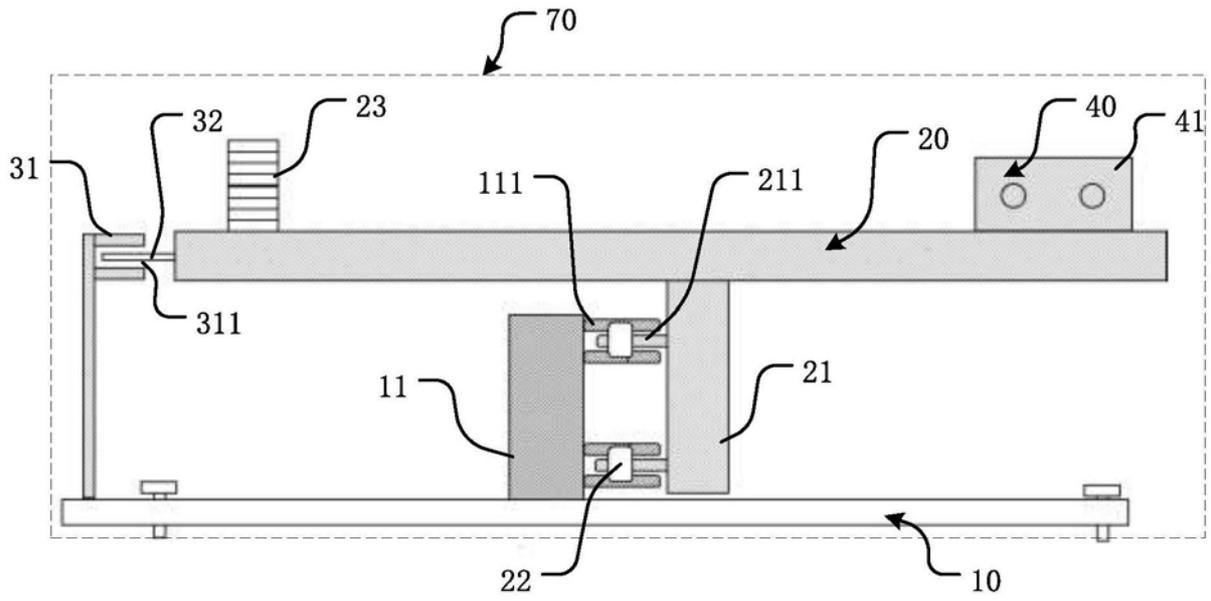


图1

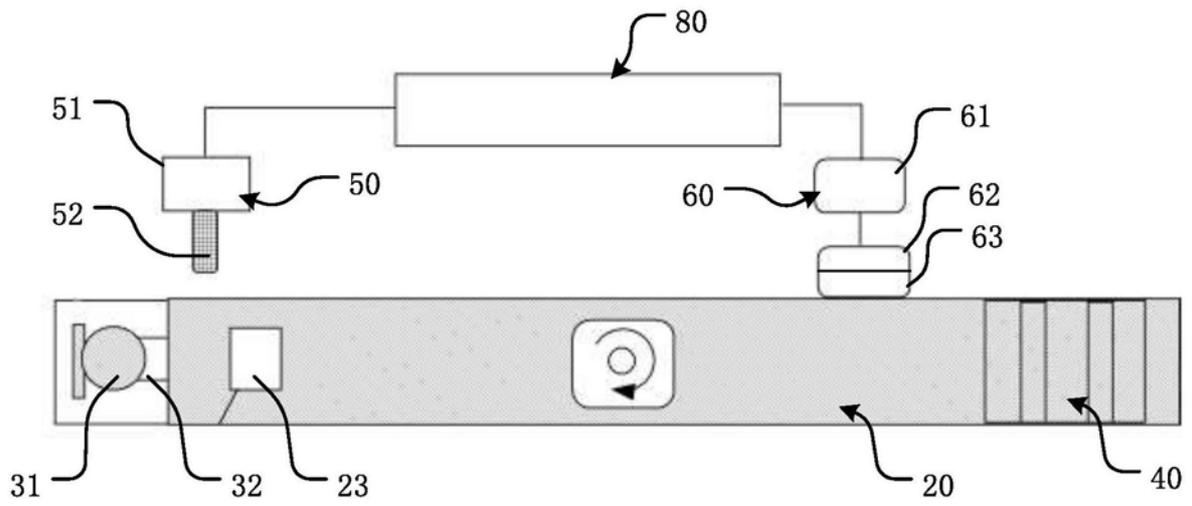


图2

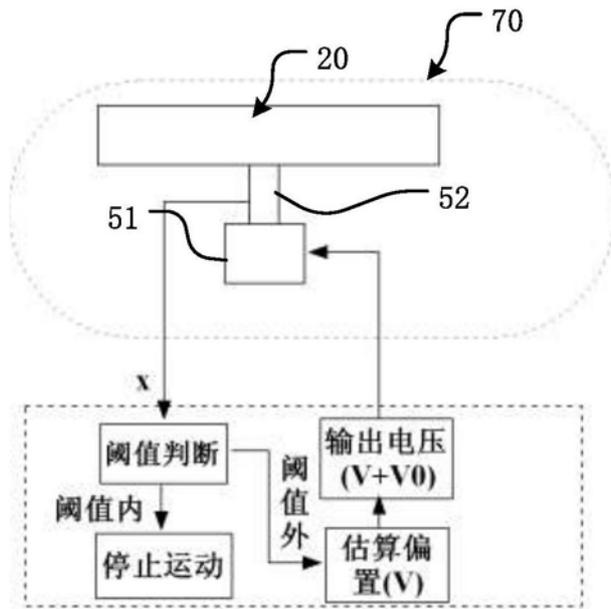


图3

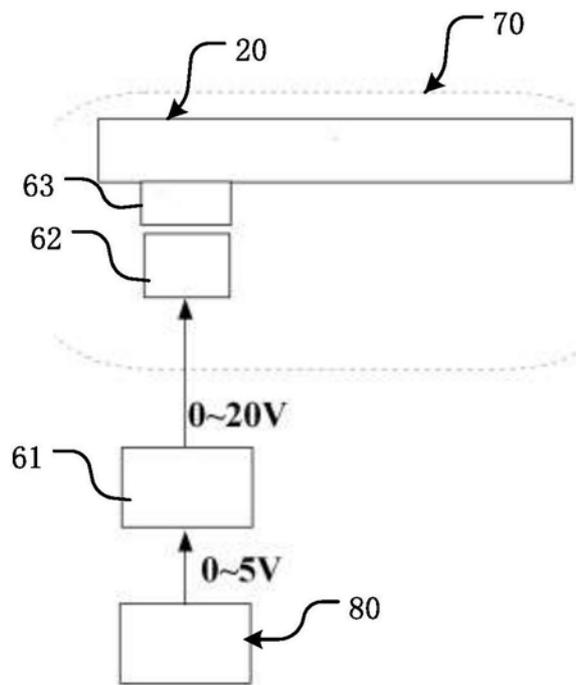


图4

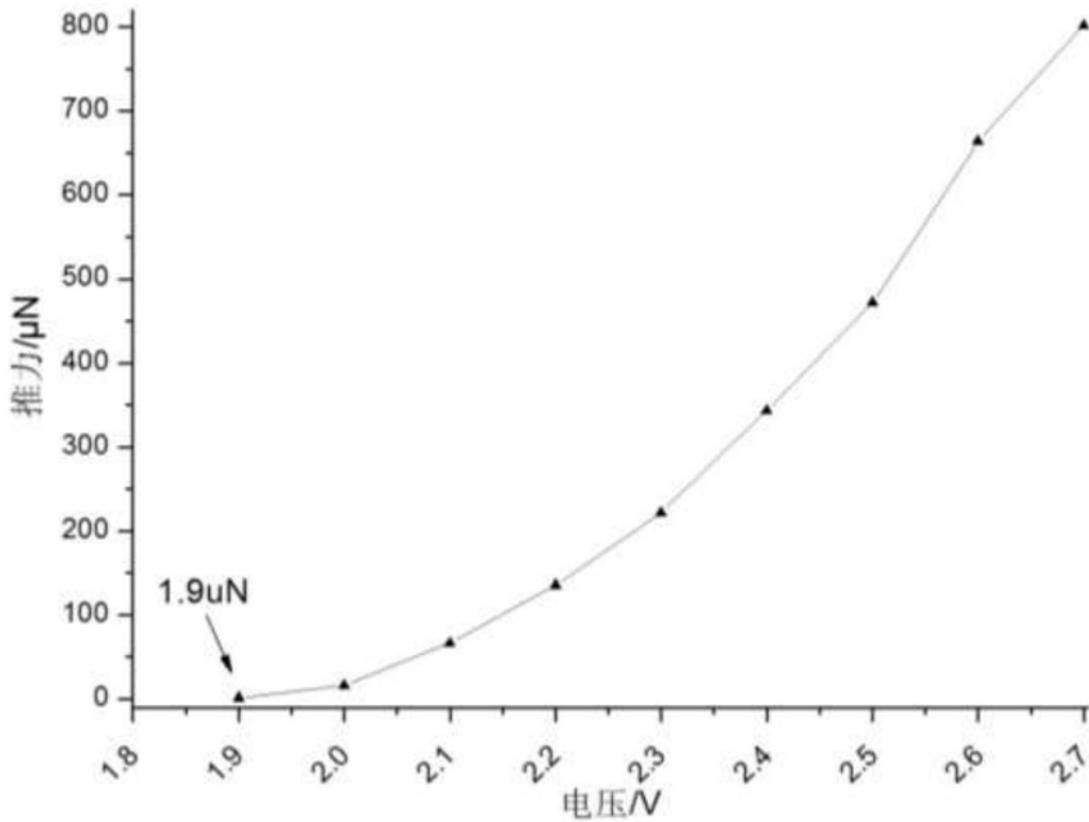


图5

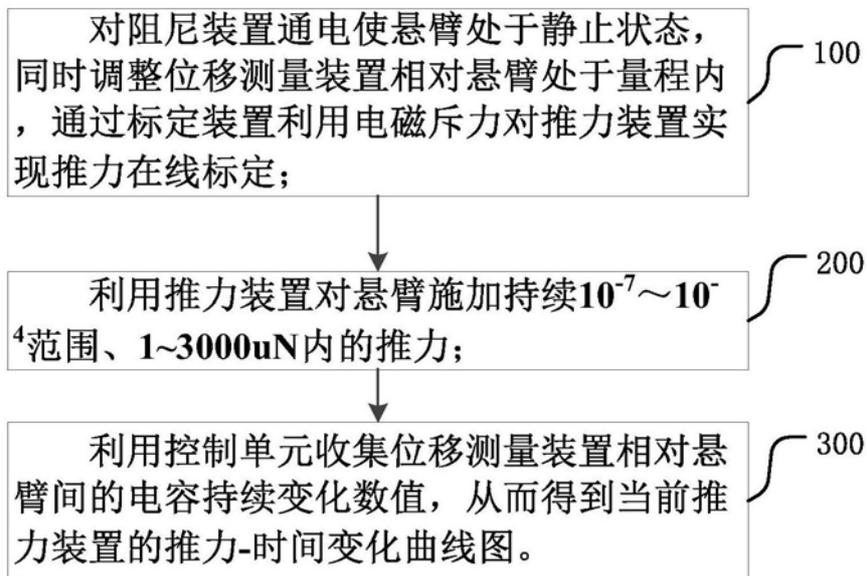


图6