



一种简易加速度测试装置的设计及应用

张泓筠, 朱 丹

(凯里学院 大数据工程学院, 凯里 556011)

摘要: 加速度的测量作为量化运动状态变化的一种方式具有实际意义。量化方式多样, 可以跨学科、跨领域。该研究提出一种组合简单器材实现加速度测量的简易办法, 利用水银柱在 U 形管中的受力状态的变化跟踪、量化被测物体运动状态的变化, 并从理论上讨论了装置的多种应用。为便于显示, 采用了力电传感的电气化测试方法。装置具有传统仪表所没有的优势: 简单廉价、可任意拆卸组装。为实验室充分组合现有资源设计新的测试方法使教学、研究及工程测试过程直观易懂提供了范例。

关键词: 加速度; U 形管; 水银; 运动状态; 虚拟流线

中图分类号: G482

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20200343

Design and Application of an Accelerated Velocity Testing Device

ZHANG Hongyun, ZHU Dan

(School of Big Data Engineering, Kaili University, Kaili 556011, China)

Abstract: The measurement of accelerated velocity has a practical meaning in quantifying changes of moving state, having various quantitative types in cross-disciplinary approach. This study proposed a simple method to measure the accelerated velocity by using a set of simple equipment, tracking the changes of strained conditions of mercury column in U-tube, and quantifying the change of moving state of the measured object, and theoretically discussed multiple applications of the device in engineering. Meanwhile, an electrified measuring method was proposed based on the electro-mechanical sensor. The device has such advantages as simple design, low cost, convenient to be assembled and disassembled, providing examples for experimental teaching, research and engineering test in an intuitively understandable manner by designing new test methods with the help of existing resources.

Key words: accelerated velocity; U-tube; mercury; moving state; virtual streamline

描述运动状态通常可用位置或位移、速度、加速度等, 加速度直接用于量化物体运动状态的变化^[1-7], 其检测可用直接方法, 更多采用间接方式测试或估计^[8], 特别是传感器的应用使其检测方式多样, 如应力传感器、电感传感器、电容传感器、压电传感器、光电式传感器等^[3, 9-11]。以传感器为中心设计完整的智能化的加速度检测装置涉及多学科、多领域^[9-15], 通常要将力学、电学、电磁学及光学结合起来^[12-15], 需要将加速状态转化为电学或光学状态来测试, 结构复杂^[16-19]。该设计组合简单配件, 通过 U 形管装水及水银, 直接用水中的水银来跟踪被测对象运动状态及其变

化, 可实现加速度的简易测量或平衡状态的显示, 对于水陆交通工具或游乐运动设施实时观测运动状态及变化是一个有效的补充。同时利用 U 形管两侧的封闭气体可感知流体的状态(速度、压强等), 拓展测试功能。

1 器材及装置

1.1 力学部分

有机玻璃管(5 mm×7 mm, L=500 mm), 乳胶管(5 mm×7 mm, L=100.0 mm), 三通管, 酒精喷灯, 水银, 红墨水, 止水夹, 塑料板(160 mm×180 mm×5 mm), 10 mL 注射器, 水盘或圆形塑料

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2021-09-06

基金项目: 贵州省教育厅重点领域项目(黔教合 KY 字〔2019〕079); 凯里学院博士基金(BS201328); 贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字〔2018〕035)。

作者简介: 张泓筠(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事材料表面与界面及传感器等物理器件的实验应用研究。

水槽(Φ=30 cm~50 cm), 硫磺, 细铁丝, 透明胶。

设计装置如图 1 所示, 测量仪处于水平状态平衡时, 水银柱位于 U 形玻璃管底边中央, 左右两侧的水柱高度一致, 同处于侧边中心位置。

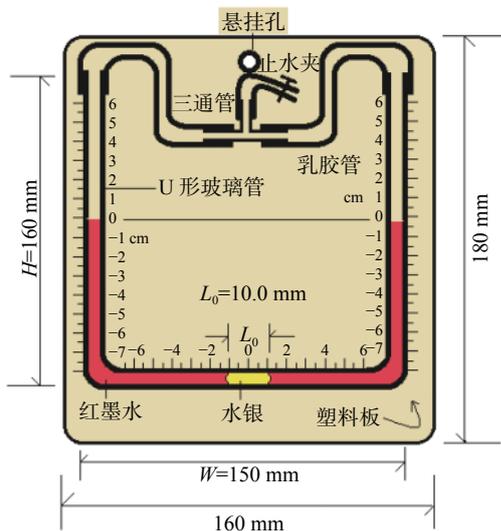


图 1 处于水平平衡状态下的加速度测量仪结构示意图

1.2 电学部分

电路设计用 Proteus 软件(用于分立电路设计)及相应分立电子元件; 单片机控制模块可选用 AT89C52 或 STC89C52 等, 单片机编程可应用软件 KeilμVision 4 和 STC-ISP(V6.85) 软件实现; 音频信号发生器(可自制); 绝缘导线等器件。考虑电路部分各环节技术成熟, 具体设计不予详述。文章只侧重于力学设计描述。

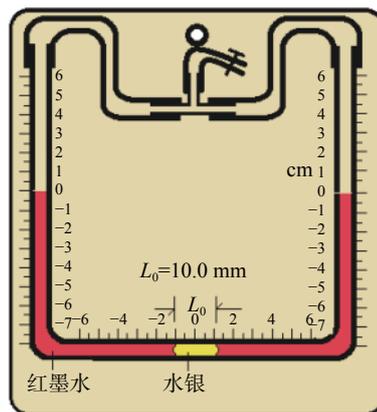
2 理论依据

1) 液体与固体间粘滞阻力很少, 固体与液体间相对静止时液体与固体表面间无摩擦力。设计检测体能随时跟踪被测物体运动状态, 当被测物体运动状态或其变化稳定时, 检测体的状态亦随之稳定。用 U 形管装水银, 水银两端装等量水, 水银与水互不相溶, 且水银表面张力远大于水的表面张力。水银作为检测体, 当 U 型管与物体固定时, 管中水银能跟踪被测物体运动状态的变化。水银柱两端的水柱差能显示水银的受力从而判断物体处于平衡状态, 如图 2(a) 所示; 或加速状态, 如图 2(b) 和图 2(c) 所示。以图 2(b) 加速为例, 竖直状态下 U 形管两侧水平面高度差 Δh_1 , 水银柱两侧受压不等, 必然产生合力, 由该合力可推知被测物体的加速度; 并根据高度差是否为零可判定物体是否处于匀速或加速状态。

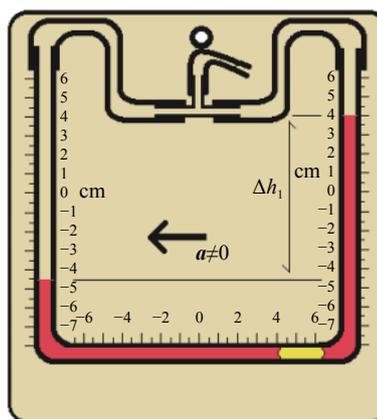
假定 U 形管空腔横截面积为 S , 水的密度 $\rho_{水}=1 \text{ g/cm}^3$, 水银的密度 $\rho_{水银}=13.6 \text{ g/cm}^3$, 水银柱的长度为 L_0 , 则水银柱的加速度可表示为:

$$a = \frac{F_{合}}{m_{水银}} = \frac{\rho_{水}g\Delta h_1s}{sL_0\rho_{水银}} = \frac{\rho_{水}g\Delta h_1}{L_0\rho_{水银}} = \frac{g\Delta h_1}{13.6L_0} = \frac{\Delta h_1}{136.0}g \quad (1)$$

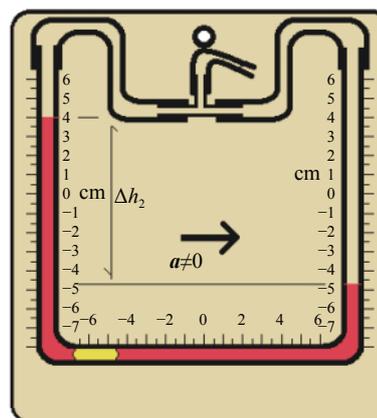
式中, $L_0=10.0 \text{ mm}$, Δh_1 为高度差(单位: mm), $g=9.8 \text{ m/s}^2$, a 为水银柱加速度(单位: m/s^2)。实际测量中, 据高度差确定 a 时, g 可近似为 10 m/s^2 。



(a) 平衡状态



(b) 向后加速或向前减速



(c) 向前加速或向后减速

图 2 加速度测量仪测量不同加速度时呈现的状态

据式(1)可判定物体运动状态, $\Delta h_1=0$ 时物体处于静止或匀速直线运动状态, $\Delta h_1 \neq 0$ 时物体处于加速直线运动或曲线运动状态, 并根据其大于或小于零可判定加速运动的方向, 或据水银柱在底边上的左右位置可判定加速度方向。

2) 气压与气流速度有关, 因而气压可间接用于测量气体速度状态。

3) 曲线运动的离心加速度与速度及曲线半径有关, 据离心加速度可求曲线运动速度及半径。

3 设计及使用方法

3.1 设计

1) 参照图1尺寸用酒精喷灯把玻璃管加工成U形管(两侧及底边均设有位置刻度, 精确到mm), 端口用酒精喷灯加工成平滑收缩状。

2) 切割加工塑料板, 并在板上部中间位置打孔便于悬挂固定。

3) 将U形管固定安装到塑料板上。

4) 将塑料板放到水盘上或水槽中, 用注射器沿U形管管壁注入 $L_0=10.0\text{ mm}$ 的水银柱, 作为常温液态金属, 因其表面张力大, 且与玻璃不浸润, 水银柱表面趋向于球面收缩, 停留在U形管最低位置, 并将左右两侧隔离。然后用同样方法在U形管两端分别注入等体积(平衡时, 水银柱位于U形管底边中部刻度0处, 因而其两侧红墨水必然等高度)的红墨水, 水银柱两侧红墨水因水银柱的隔离而互不相通。接着在U形管两侧各套上适当长度的乳胶管与三通管连接, 三通管另一管口用乳胶管连接以使用止水夹控制U形管中空气是否与外界相通。最后用透明胶将三通管粘贴到塑料板上悬挂孔正下方。

3.2 使用方法

1) 测试时将测试仪悬挂于被测物体(如飞机, 汽车、火车等大型机动车车厢)的竖直壁上, 用透明胶将其竖直固定, 并松开止水夹。

2) 被测物体在水平或接近水平方向加速或减速运动时, U形管两端管腔红墨水呈现高度差 Δh (单位: mm)。如图2(a)所示平衡状态, 被测物体处于静止或匀速直线运动状态, U形管两侧水平面高度差为零, 水银柱(或被测物)加速度为零。如图2(b)所示向后加速或向前减速, U形管两侧水平面高度差 Δh_1 不为零, 水银柱(或被测物)加速度不为零。如图2(c)所示向前加速或向后

减速, U形管两侧水柱高度差 Δh_2 不为零, 水银柱(或被测物)加速度不为零。

3) 据式(1)可求得水平方向加速度值。

4) 测离心加速度如图3所示, 对于水平旋转体系(如旋转木马、超重离心机以及汽车的高速弧线转弯等), 可将装置水平径向安装, 物体作离心运动时, 水银向外侧移动, U形管外侧水柱必然高于内测, 稳定时两侧水压差与离心力平衡, 据两侧水压差可算出离心加速度大小:

$$F_{\text{合}} = m_{\text{水银}} a_{\text{离}} = m_{\text{水银}} \omega^2 R \Rightarrow$$

$$a_{\text{离}} = \omega^2 R = \frac{F_{\text{合}}}{m_{\text{水银}}} = \frac{\rho_{\text{水}} g \Delta h_4}{L_0 \rho_{\text{水银}}} = \frac{\Delta h_4}{136.0} g \quad (2)$$

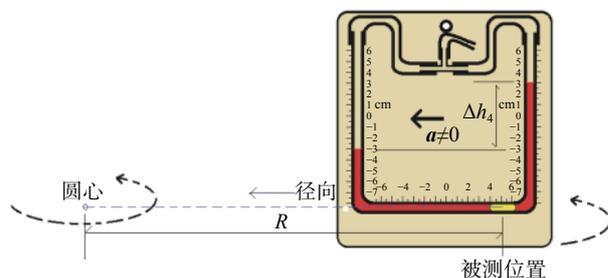


图3 水平面内(或近似)离心加速度测量

5) 使用完毕为防止U形管两侧水柱互窜, 可用止水夹将两侧乳胶管夹住密封保存, 长时间不用需拆掉装置保存。

3.3 功能拓展

3.3.1 测定流体流量及流速(伯努利方程)

如图4所示, 将U形管两侧管用乳胶管(为防止乳胶管被压扁且保持足够弯折柔性, 管内可嵌入弹簧)连接到被测管(液流)。根据伯努利方程在同一流线不同截面位置(高度 h 相同, 截面面积分别为 S_1 、 S_2), 液流速度 (v) 越大, 气压 (p) 越小。若两处流速差越大, U形管两侧水平面高度差 (Δh_5) 越大, 因此根据此压差可测定液体流速和流量大小(考虑测试点间距小, 可忽略能量损耗), 此时装置等效为一普通文特利管^[4], 即,

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{液}} v_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho_{\text{液}} v_2^2 + P_2 = \text{常数} \quad (3)$$

通过U形管测定液面高度差 Δh_4 , 可计算产生的水压 (P):

$$P_2 - P_1 = \rho_{\text{水}} g \Delta h_5 \quad (4)$$

若流体不可压缩(或小到可忽略), 满足连续性方程:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (5)$$

若已知液体密度 ($\rho_{液}$)，根据式(3)~式(5)可大体估测出液体流量及流速分别为：

$$Q = v_1 S_1 = v_2 S_2 = \sqrt{\frac{2\rho_{水}g\Delta h_5 S_1^2 S_2^2}{\rho_{液}(S_2^2 - S_1^2)}} \quad (6)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\rho_{水}g\Delta h_5 S_2^2}{\rho_{液}(S_2^2 - S_1^2)}} \quad (7)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\rho_{水}g\Delta h_5 S_1^2}{\rho_{液}(S_2^2 - S_1^2)}} \quad (8)$$

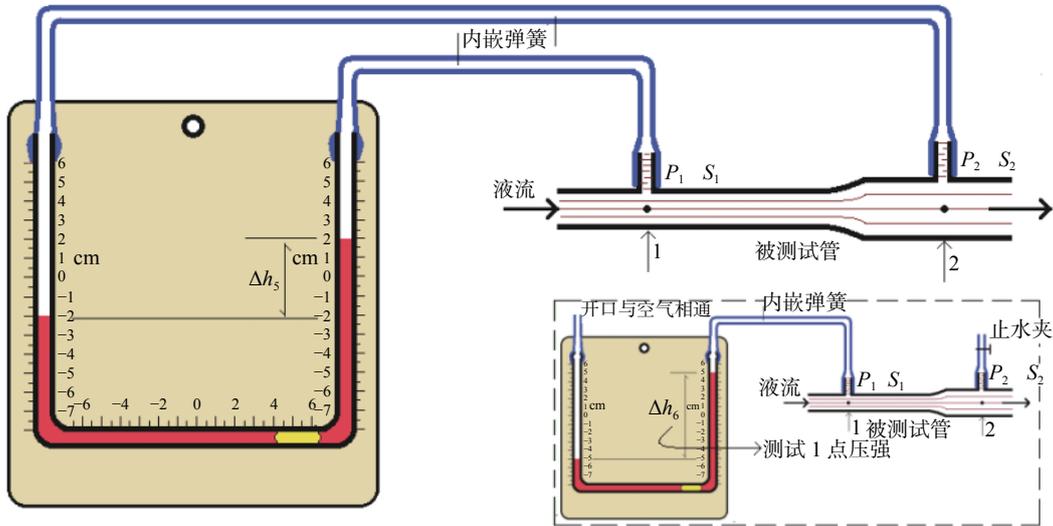


图 4 加速度测量仪用于测量管中液体流量及流速或气压(U形管垂直于水平面方向放置)

此时，U形管底部水银柱偏离中心方向可用于直观判断两处流速的大小或流体流向，往哪边偏移则对应与该侧相连的测试点流速大，流体由该处流向与管另一侧相连处。用于量度压强差的液体用水比直接用水银能够提高测量精度(同样压差的水柱比水银柱要高 13 倍多)。对于具体某处压强的测定，本装置同样可以实现，照图 4 左上装置将其中一根管子从 U 形管上左侧拔掉(如测试点 2 对应管)，让 U 形管左侧与空气相通(如图 4 右下内嵌图)，则大气压强减去两管水柱压强差近似为测试点 1 的压强(此处对气流亦适用)。

3.3.2 测量水压

若 U 形管一侧乳胶管直接连感压膜，另一侧开口连通空气，通过感压膜测试液体内部压强时，两侧水柱高度差即为对应深度处液体的压强(此时水银柱作用与水同)，装置等同于普通压强计，如图 5(a)所示。感压膜能感知不同深度的液体压强，U 形管两端液体出现的高度差显示该压强(为 Δh_7 水柱)。若两侧同样接感压膜，可用于探测水流对压强的影响，如图 5(b)所示。假定等深度深水流速为 v ，基于伯努利方程构造虚拟的等深度流线(简称虚拟流线)，流线连通同一水体的静水(或

同深度等密度，不与流水构成连续水体，但可视为与流水成一体的静水等效)与流水(从静水指向流水)，可得方程：

$$P_3 = \frac{1}{2}\rho_{水}v^2 + P_4 \quad (9)$$

$$\text{且 } P_3 - P_4 = \rho_{水}g\Delta h_8 \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可得水流速度为：

$$v = \sqrt{2g\Delta h_8} \quad (11)$$

对于图 5(a)装置，如果在 U 形管右侧事先标定好不同深度静水中压强值，左侧管连接的软管(内嵌弹簧)足够长，该装置可用于探测深水暗流有无。

当金属盒感压膜被下沉铁块拉入一定深度深水中，如所测该深度处压强低于静水中压强，则说明该深度处存在暗流。

3.3.3 测量风速或汽车的运动速度

生活中人们感知风速通常凭直感，难于量化。参照皮托管^[4]，将该加速度测量仪改装可做成如图 6 所示的风速测量仪，可定量测定风速大小。图示静态盒置于车厢内(A 点处空气静止，为驻点，此处设置静态盒的目的在于获取静止空气

和驻点), 考虑到空气密度与风速没有必然联系, 盒内空气与外界空气连通, 可视为具有相同的量 $C = \frac{1}{2}\rho_a v^2 + \rho_a g h + p_0$ 。取 A 、 B 两点为研究对象, 列伯努利方程:

$$p_A = p_B + \frac{1}{2}\rho_a v^2 \quad (12)$$

据此可求得 B 点处空气的速度为:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_A - p_B)}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2\rho_w g \Delta h_9}{\rho_a}} \quad (13)$$

式中, ρ_a 、 ρ_w 分别为空气和水的密度。

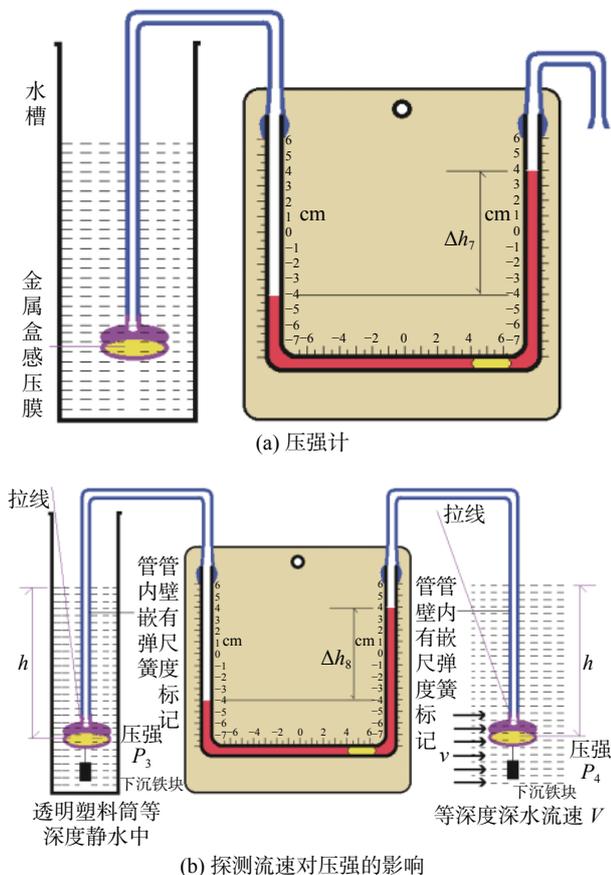


图 5 加速度测量仪用作普通压强计及探测水流对压强的影响

3.3.4 智能化设计——水银柱位置或水柱高度差等的电转化

考虑设计功能的全面性, 可以将水银柱位置(非电信号)的读数与电信号的显示方式结合起来, 实现传统传感功能^[15]。为此原装置可适当改进, 增设智能化的电子处理装置, 如在 U 形管底部可设计差动变压器式传感器(线圈可用 $\Phi=0.2\sim 0.3$ mm 绝缘导线绕制)感知水银柱位置的变化如图 7 所示^[9]。U 形管和差动传感器电路系统各自独

立工作, 互不影响; 差动传感器采用三段式结构, 中段为原线圈, 可用音频信号发生器输出 4 000 Hz、4 V 左右的音频信号(u_1)驱动, 左右两段次级线圈反相串联构成差动方式, 输出差动信号(u_2)。水银是抗磁性金属, 其位置不受原线圈交流信号产生的磁场的影响, 但其位置变化后, 磁阻变化会影响次级线圈感应强弱, 从而得到变化的差动信号, 实现前文所述非电信号(加速度、水压、气流或液流速度等)到电信号的转化。差动信号经放大、滤波、模数转换后再驱动显示器(此时差动信号要对应水银柱位置信号进行转换, 作为单片机的驱动和显示信号设计的依据)^[20-21]。具体各模块电路的设计有成熟的技术可参照, 本文不再赘述(其中放大器、检波器、低通滤波器和模数转换器可由单片机合并实现)^[22]。

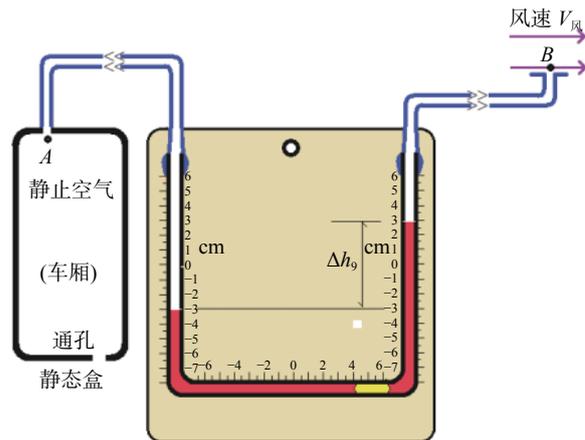


图 6 加速度测量仪改装成风速测量计

根据实际应用, 设计制作要注意下列细节。

1) 装置测量加速度量程有足够大的范围, 据图 1 和式(1)可知, 由于所测加速度通过高度差 Δh (单位: mm)比上 136, 再乘以 g , 间接得到, 高度差 Δh 有足够的变化范围(可接近 130 mm), 因此最大可测加速度接近 $g=9.8$ m/s², 可满足一般实际加速度测量需要。

2) 本设计中由于加速度测量必须通过 U 形管左、右两侧液位差的大小来度量, 测量的精度取决于液位差的精度(同玻璃管式液位计), 状态稳定时可精确到 mm(示意图仅标注 cm)。被测对象的运动状态是否稳定, (有机)玻璃管管径小时产生的毛细现象将直接影响精度。为避免毛细现象对读数的干扰, U 形管内径取 5 mm $< \Phi < 10$ mm 以免产生弯月面干扰读数^[23]。

3) 水银柱两侧水量相等, 使用时决不允许水银进入 U 形管两侧, 即限定水银柱在 U 形管底部两端之间活动, 因而 U 形管底边宽度(W)及两侧管的高度(H)决定了装置的测量范围(量程)。要求水银柱两侧的水柱长度每边必须大于 U 形管底边宽度, 即 U 形管侧边高度(H)必须大于底边宽度(W), 这样可限定水银柱始终在 U 形管底边上移动。

4) 装置适合于测量稳定或近似稳定的加速度, 对于瞬时加速度的测量可借用手机或摄像头获取动态视频实现。

5) 由于装置的设计原理是借助水银柱在水平方向的运动状态的变化跟踪被测物体运动状态的变化, 故不能用于测试竖直方向的加速度, 如超重或失重加速状态。

6) 由于水银密度比水的密度大得多, 该装置决不允许倒置, 防水银进入 U 形管侧壁。否则水银与水容易流出, 且水银流失后易挥发不易回收, 污染环境。灌注水银时水盘旁边准备硫磺以备不测。红墨水与水银在管中应连成一体, 中间不能留有气泡, 否则要用细铁丝疏通。

7) 水银柱两侧的红墨水不允许互窜, 所以选用的有机玻璃管管腔宜窄(取直径 $5\text{ mm} < \Phi < 10\text{ mm}$)。若因为物体从高速状态剧烈减速或从静止开始剧烈加速, 因惯性导致 U 形管某侧水柱冲向顶部乳胶管进入三通管部分, 可抬高三通管并向对应侧倾斜, 将水倒回原处。

8) 不用时, 为便于存放, U 形管中水及水银可倒出(水银要回收)。

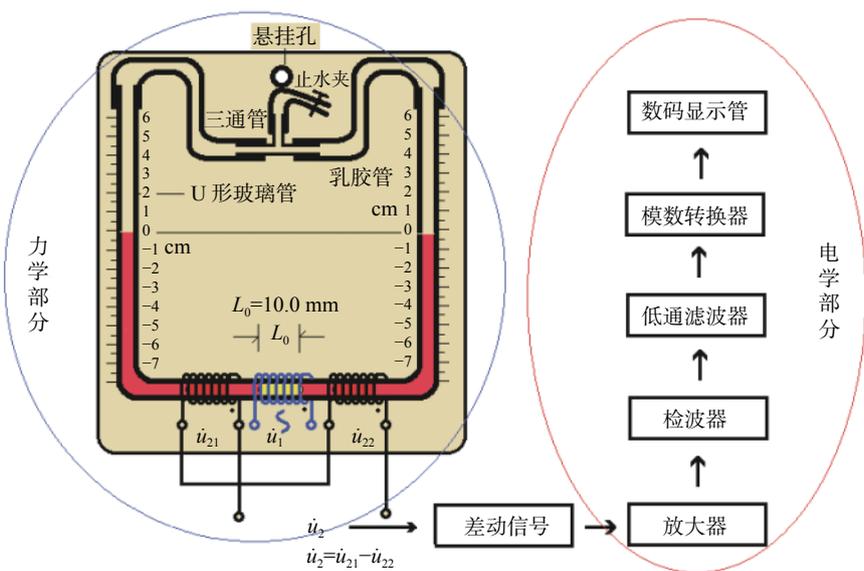


图 7 智能化加速度测量系统的设计框图

4 结束语

构造了信号转换的一种新的方式, 通过 U 形管、水及水银与被测对象形成一套简易连锁装置, 将物体的运动状态转化为水银柱的受力状态, 而水银柱的受力状态又通过 U 形管两侧水面高度差来显示。整个装置充当了传感器的作用, 将一种不便于直接观察的非电信号(加速度、液流速度)转化为另一种可直观量化便于读数的非电信号(高度差)或电信号(电压或电流), 为加速度的测试提供了一种新的跟踪方式。

同传统加速度测试装置相比, 该设计具有如下优势。

1) 取材方便、结构简单、组装/拆卸方便。
2) 工作稳定, 不易受干扰, 尽管差动变压器工作(电学部分)是基于 U 形管-水银柱-水柱系统(力学部分)状态的变化而设计, 但力学部分可独立工作, 两部分读数可互为验证。特别是传感器电学部分有故障时, U 形管力学部分不受影响, 系统仍可工作。

3) U 形管可封闭的气体可作为敏感物质感知流体压力的变化, 或者间接引起压力变化的其他因素的变化, 因而其功能拓展能力强, 可一物多用。这就为实验教学、科研及工程检测如何充分利用已有资源进行组装提供了思路。特别是创新实验教学、科技比赛, 时常会提出某些不便解决

的问题, 组装常规简单设备, 有时可得到意想不到的办法。这对于提高实验器材使用效率, 提升实验室“产、学、研、用”的一体化教育水平^[24], 培养学生的创新能力赋予了积极意义。

参考文献

- [1] 程守洙, 江之永. 普通物理学[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 东南大学等七所工科院校. 物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 何圣静. 物理实验手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [4] 漆安慎, 杜禅英. 力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [5] 张三慧. 大学物理学·力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [6] 朱柏树. 用光电门测量加速度实验的系统误差分析[J]. 物理教学探讨, 2015(6): 57-60.
- [7] HONG C K, PARK C H, HAN J H, et al. Medium to long range kinematic GPS positioning with position-velocity-acceleration model using multiple reference stations[J]. *Sensors*, 2015, 15: 16895-16909.
- [8] RODRIGUEZ-MALDONADO J. Estimation of angular velocity and acceleration with Kalman filter, based on position measurement only[J]. *Measurement*, 2019, 145: 130-136.
- [9] 郁有文, 常健, 程继红. 传感器原理及工程应用[M]. 4版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [10] 刘迎春, 叶湘滨. 传感器原理设计与应用[M]. 4版. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.
- [11] 常建生, 石要武, 常瑞. 检测与转换技术[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [12] 戚新波, 范峥, 田效伍. 检测技术与智能仪器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [13] RAMANATHAN M, MURALI N, SEN P, et al. A parametric analysis based design framework for MEMS g-switch accelerometers[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2021, 318: 112423.
- [14] FIORILLO A S, CRITELLO C D, PULLANO A S. Theory, technology and applications of piezoresistive sensors: A review(Review)[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2018, 281: 156-175.
- [15] KASSAL P, STEINBERG M D, STEINBERG I M. Wireless chemical sensors and biosensors: A review[J]. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2018, 266: 228-245.
- [16] 王巍. 高精度加速度计测量系统的分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [17] 戴泰初, 阙沛文. 基于虚拟仪器概念的航天用加速度表测试系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(1): 50-51.
- [18] 韩彤彬, 刘洁瑜, 汪立新, 等. 基于虚拟仪器的加速度计测试系统方案设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(10): 76-78.
- [19] 刘茂军, 杜金红, 朱玉成, 等. 利用传感器测量重力加速度大小的实验设计[J]. *物理教师*, 2013, 34(9): 54-55.
- [20] 宋雪松, 李冬明, 崔长胜. 手把手教你学51单片机[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [21] 解本巨, 马浩. 数字电路与逻辑设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [22] 张泓筠, 杨永亮, 潘金福. 简易超重和失重测量装置设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(4): 83-86.
- [23] 张也影. 流体力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [24] 张婷, 杨扬, 郭伟, 等. 高校设计实验室创新能力培养的探索[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(4): 157-160.

编辑 张莉