

自然对流气体的摆特性及其在传感器中应用

张福学

(北京信息工程学院, 北京 100101)

[摘要] 根据自然对流气体具有摆的特性, 从而提出气体摆新概念。分析了密闭腔中自然对流气体的浮升力, 给出浮升力与温度变化的关系式。试验结果表明, 与固体摆、液体摆一样, 利用气体摆原理亦能检测加速度和倾角。

[关键词] 气体的摆特性; 倾角传感器; 加速度计

[中图分类号] TP212.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)08-0050-04

1 引言

利用固体或液体摆的特性检测加速度和倾斜角, 这是大家熟悉的惯性技术^[1]。笔者1989年发现, 自然对流气体亦有摆的特性, 同固体摆、液体摆一样, 利用气体摆特性亦能检测加速度和倾斜角。由于气体摆式加速度计和倾角传感器的检测质量 (proof mass) 是气体, 质量极小, 故它们能承受强振动、高冲击, 并有响应时间短、成本低等优点, 这是固体摆式加速度计、液体摆式加速度计和倾角传感器不可相媲美的。笔者对气体摆式加速度计和倾角传感器进行了多年研究^[2,3], 下面作简要介绍。

2 密闭腔中自然对流气体的摆现象

在图1a的密闭腔中设置一热源, 密闭腔中接近热源的气体由于温度高、密度 ρ 小而形成向上流动的气流。远离热源的气体由于温度低、密度 ρ_∞ 大, 形成向下流动的气流。这样, 在密闭腔中形成垂直向上的自然对流气体。笔者发现, 密闭腔倾斜一个角度 θ 时, 自然对流气体仍保持在原来垂直向上的方向, 如图1b所示。图1所示密闭腔

中自然对流气体的这种现象, 与图2、图3所示的固体摆和液体摆的特性类似。由图1、图2和图3的类比说明, 自然对流气体有摆的特性。

3 密闭腔中自然对流气体的浮升力

3.1 在地球表面附近的浮升力

根据热传递理论^[4], 自然对流气体受重力物体力 ρg 和气体静压力梯度产生的力 $-\rho_\infty g$ 作用, 它们的合力是浮升力, 可用如下公式表达:

$$F_{\text{buoifit}} = (\rho_\infty - \rho)g, \quad (1)$$

式中 ρ 是热源加热的气体密度, ρ_∞ 是周围未加热气体的密度, g 是重力加速度。 F_{buoifit} 是自然对流气体的驱动力, 因为加热气体的密度小于未加热气体的密度, 故浮升力的方向是重力的反方向。由于浮升力的驱动, 被加热的气体垂直向上流动。

3.2 绝对坐标系中的浮升力

式(1)是相对坐标系中 F_{buoifit} 的表达式, 它忽略了引力加速度的作用。在绝对坐标系中, 考虑密闭腔的引力加速度时, 重力物体力 ρg 和气体静压力梯度产生的力 $-\rho_\infty g$ 分别由 $-\rho(a - G)$ 和 $\rho_\infty(a - G)$ 代替。浮升力可表示为

$$F_{\text{buoifit}} = (\rho_\infty - \rho)(a - G), \quad (2)$$

[收稿日期] 2002-04-08; 修回日期 2002-06-05

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(60072023)

[作者简介] 张福学(1939-), 男, 云南宣威市人, 北京信息工程学院教授, 博士生导师

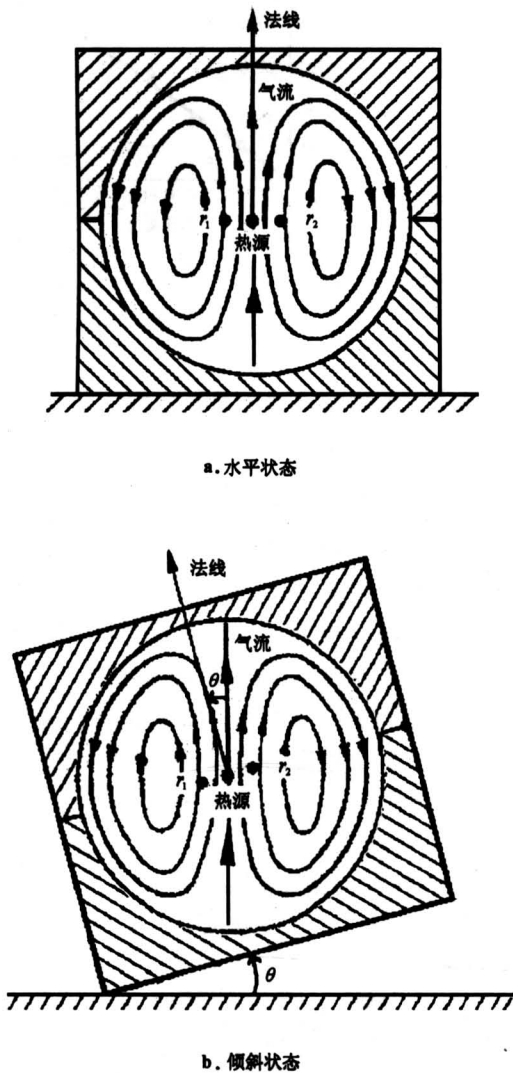


图 1 气体摆现象

Fig.1 Phenomena of gas pendulum

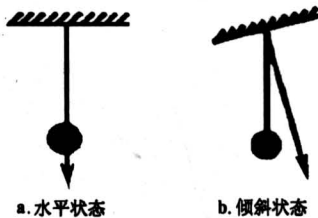


图 2 固体摆现象

Fig.2 Phenomena of solid pendulum

式中 a 是腔体的绝对加速度， G 是引力加速度。因为非引力加速度（比力） $f = a - G$ ，故

$$F_{\text{buolift}} = (\rho_{\infty} - \rho)f. \quad (3)$$

由式 (3) 可知，浮升力的方向就是比力 f 的方向，量值和 f 成比例。

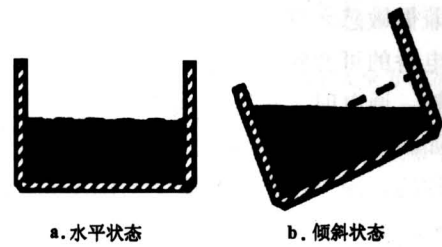


图 3 液体摆现象

Fig.3 Phenomena of liquid pendulum

3.3 浮升力与温度变化的关系

自然对流气体中，流体的密度差由温度差引起，因此浮升力是温度差的函数。流体压力一定时，单位温度升高或降低引起的体积变化率称为体积膨胀系数 β 。令 j 为流体比容 ($j = 1/\rho$)，则 β 的表达式为

$$\beta = \frac{dj}{dT} = \frac{1}{j} \left(\frac{\partial j}{\partial T} \right)_p,$$

式中，下标 p 表示压力恒定。对于气体，由 $j = 1/\rho$ 可得

$$dj = - \left(\frac{1}{\rho^2} \right) d\rho,$$

$$\left(\frac{\partial j}{\partial T} \right)_p = - \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p,$$

所以，气体的热膨胀系数

$$\beta = \frac{- \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p}{\frac{1}{\rho}} = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p.$$

当温度变化不大时，气体的密度差可近似表示为^[4]

$$\Delta\rho = \rho\beta\Delta T.$$

所以，单位体积上的浮升力为

$$F_{\text{buolift}} = (\rho_{\infty} - \rho)f = \rho\beta\Delta Tf. \quad (4)$$

4 气体摆式加速度计和倾角传感器

固体摆式和液体摆式加速度计和倾角传感器是分别利用固体和液体在重力作用下的摆特性，通过电容式、电阻式等敏感元件检测加速度和倾角，这是较成熟的技术^[1]。气体摆式加速度计和倾角传感器是利用自然对流气体在浮升力作用下的摆特性（如图 1 所示），通过密闭腔中设置的热敏电阻（热电阻丝） r_1 和 r_2 来检测加速度和倾角^[5,6]。图 4 示出气体摆式加速度传感器的敏感元件结构示意图。在该结构中，有两个热电阻丝，它们既做加热

源，又兼做敏感元件。两个热电阻丝 r_1 和 r_2 构成惠斯登电桥的可变臂，固定臂 $R_1 = R_2$ 。输入轴沿腔体的轴。通电时，热电阻丝加热周围的气体，从而产生如图 1a 所示的自然对流。 r_1 和 r_2 在对流场中是对称的，两个热电阻丝感受的温度相同，故两个热电阻丝的电阻值相等，电桥电路的输出为零。当腔体受加速度作用时，对流场变形，热气流加热 r_2 的强度高于 r_1 的强度，因此， r_1 和 r_2 的温度及相应的电阻值彼此不等。电桥输出对应于加速度的电压信号 V_0 。信号处理电路如图 5 所示。电压信号经信号处理电路处理后，给出反映输入加速度的输出信号。图 6 示出气体摆式加速度计的输出电压与输入加速度的关系。实验表明，测量范围达到 $\pm 8 g$ ，非线性度 $< 1\% FS$ 。

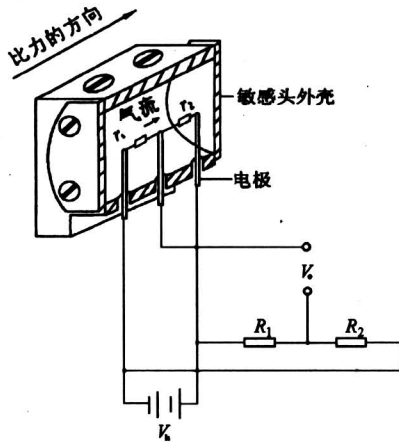


图 4 气体摆式加速度传感器的敏感元件示意图
Fig.4 Sense component sketch map of gas pendulum accelerometer

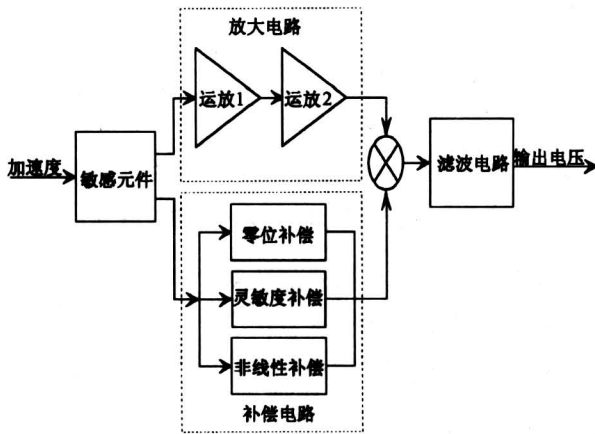


图 5 气体摆式加速度传感器的信号处理电路框图

Fig.5 Block diagram of gas pendulum accelerometer signal processing circuit

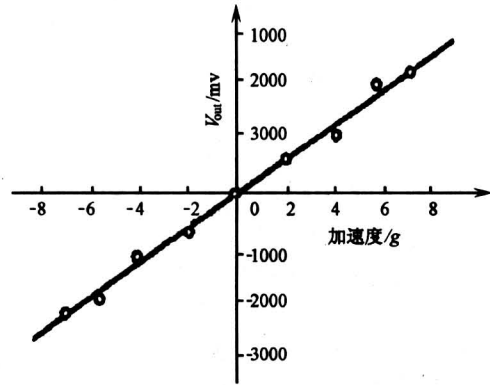


图 6 气体摆式加速度计的输出电压
Fig.6 The output voltage of the gas pendulum accelerometer

重力场中使用如图 7 所示的结构进行试验。两热电阻丝平行于腔体的轴放置，它们既作加热源，又作敏感元件。这种结构的自然对流腔体可用于检测倾斜角，试验表明，测量范围为 $\pm 45^\circ$ ，非线性度 $< 1\% FS$ ，分辨率 $< 0.01^\circ$ 。图 8 示出了气体摆式倾角传感器的输出电压与输入倾角的关系。

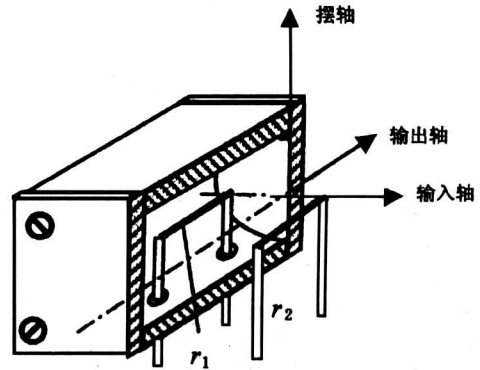


图 7 气体摆式倾角传感器的敏感元件结构
Fig.7 The structure of the gas pendulum tilt sensing element

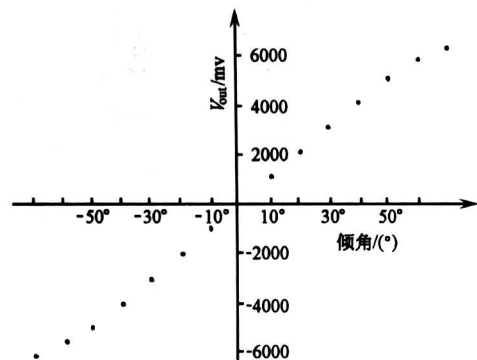


图 8 气体摆式倾角传感器的输出电压
Fig.8 The output voltage of the gas pendulum tilt sensor

5 结论

通过理论分析、结构设计和实验, 可以得出以下结论:

- 1) 浮升力是自然对流气体的驱动力;
- 2) 在浮升力的作用下, 自然对流气体有摆的特性;
- 3) 利用自然对流气体的摆特性能构成气体摆式加速度计和倾角传感器。

参考文献

- [1] 于波, 陈云相, 郭秀中. 惯性器件 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994
- [2] 张福学, 夏 颂, 缪 旻. 气体摆式全方位水平姿态传感器 [P]. 中国专利: 99 1 16757.0, 1999-05-13
- [3] 张福学, 田文杰, 朴林化, 等. 气体摆式水平姿态传感器 [P]. 中国专利: 99 1 18007.0, 1999-09-30
- [4] Rohsenow W M, et al. 传热学基础 下册 [M]. 齐欣. 北京: 科学出版社, 1992
- [5] 张福学. 密闭腔内气流的摆特性 [J]. 电子学报, 1999, 27(11): 141~142
- [6] Zhang Fuxue. Gas pendulum acceleration sensor (news) [J], Chinese Journal of Electronics, 2000, 9(1): 14, 16

The Pendulum Characteristic of Natural Convection Gas and the Application for Sensor

Zhang Fuxue

(Beijing Information Technology Institute, Beijing 100101, China)

[Abstract] It is discovered that the natural convection gas has the pendulum characteristic, so the new concept of gas pendulum is presented. In this paper, the buoyancy lift of natural convection gas is analyzed in a hermetic chamber, and given the formula between the buoyancy lift and the change of temperature. The results of experiment have shown that gas pendulum can be utilized to measure the acceleration and tilt angle as same as solid pendulum and liquid pendulum.

[Key words] gas pendulum characteristic; tilt sensor; accelerometer

敬告读者

《中国工程科学》(月刊)创刊于 1999 年第 4 季度, 由于创刊时间不长, 加之未做更多的必要宣传, 使一部分读者无从知晓并失去了订阅的机会。本刊编辑部现有少量 1999 年(共三期)、2000 年和 2001 年的合订本, 售价(含邮费)分别为 55 元和 220 元, 欲订购者请与编辑部联系, 并将订刊款汇至《中国工程科学》编辑部即可。

地 址: 北京西直门外文兴街 1 号

邮 编: 100044 电 话: 010-68336805

E-mail: bees@public3.bta.net.cn