

离心-向心运动实验仪及实验分析

黄绍书

(六盘水市第23中学 贵州 六盘水 553000)

万大林

(六盘水市广播电视大学 贵州 六盘水 553000)

(收稿日期:2018-09-15)

摘要:介绍自主设计和研制加工的离心-向心运动实验仪的构造和特点,并对其实验现象涉及的动力学原理进行分析.该自制离心-向心运动实验仪以及由此开展的实验,能将离心运动与向心运动同时有效展示.

关键词:离心-向心运动实验仪 离心运动 向心运动 平衡方程 动力学原理

离心运动和向心运动是大中学物理课程中的重要概念,也是学生学习和理解的难点.然而,日常生活以及工程实践中的许多重要力学现象也都与此有关.

为了在教学中使学生更好地理解和掌握离心运动和向心运动的概念和更深层的含义,我们自主设计并加工制作了离心-向心运动实验仪.教学实践表明,该离心-向心运动实验仪的研制贴近教学实际,实验现象精彩有趣,收到良好的教学效果.

1 仪器构造及实验现象

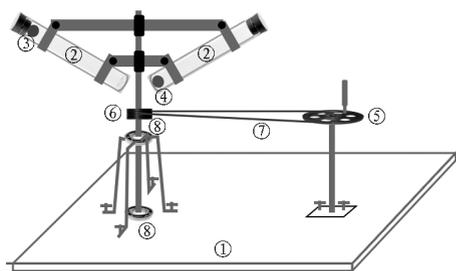
1.1 构造简介

图1为自制离心-向心运动实验仪结构示意图,整体结构主要包括主动(手控)部分和从动部分,均安装在一个共同的底座上,两部分之间通过皮带传动,各零部件方便拆换更替.其加工制作过程比较简单,在一般的小型铁制品加工厂(我国西南地区比较多,主要加工一种冬天取暖用的铁炉子,称为回风炉)即可完成.其中,除了透明玻璃试管(带紧密胶塞,内盛满水)和木质底座外,其余配件均为铁质材料(多为钢材)加工而成.

该自制离心-向心运动实验仪在教学中比较实用,操作简便,实验效果明显,能直观展示出奇特的离心运动和向心运动的真实过程.

为了增加实验的可见度,提高实验的实效性和观赏性,在实验前的准备过程中,通常将其中的小钢

球和小泡沫球用油漆漆成不同的颜色(比如:将一个漆成红色,另一个漆成蓝色).



①底座; ②试管; ③小泡沫球; ④小钢球; ⑤主动轮; ⑥从动轮; ⑦传送皮带; ⑧滚动轴承

图1 自制离心-向心运动实验仪结构示意图

1.2 实验现象

将自制离心-向心运动实验仪放在水平实验桌或讲桌上,转动手柄,使试管随竖直转动轴(长立柱)由慢到快转动.当转速较小或静止时,密度大的小钢球(以下简称钢球)处于试管底部,而密度小的泡沫球(以下简称泡沫球)处于试管顶部(试管口),如图2所示.

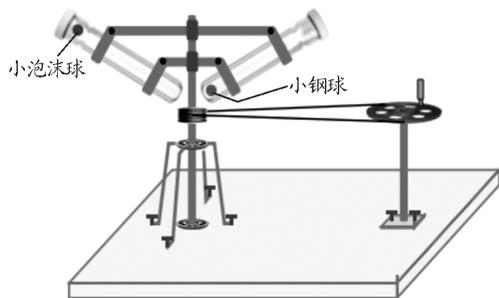


图2 转速较小时的实验现象示意图

当转速增大到一定程度时,钢球沿试管由下向上倾斜运动,逐步到达试管顶部,而泡沫球沿试管由上向下倾斜运动,逐步到达试管底部,即钢球做离心运动而泡沫球做向心运动,如图3所示.转速越大,离心运动和向心运动也越快.

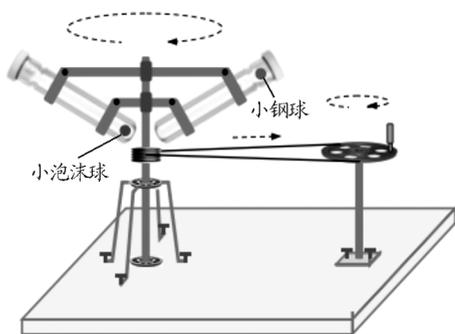


图3 转速较大时的实验现象示意图

2 动力学原理

在转动过程中,由于处在同一位置的钢球和泡沫球与同体积的水相比,钢球需要的向心力大于水需要的向心力,而泡沫球需要的向心力小于水需要的向心力.因此,当转速满足一定条件时,钢球将逐渐远离转轴倾斜向上运动,而泡沫球将逐渐靠近转轴倾斜向下运动.

为了便于广泛的中学教学工作者和普遍高中学生阅读,这里避开比较深奥繁琐的动力学微分方程^[1],仅从转动平衡的情况予以分析说明.设定试管中钢球、泡沫球的密度分别为 $\rho_{\text{钢}}$ 和 $\rho_{\text{泡}}$,体积为 V ,水的密度为 $\rho_{\text{水}}$,试管倾斜角为 θ ,忽略运动过程中试管壁的摩擦和水的粘滞阻力.转动过程中某时刻的角速度为 ω ,此时钢球或泡沫球与转动轴之间的距离为 r .为了便于表述,选取转动着的试管为参考系.显然,这是一个非惯性参考系,分析过程中必须要考虑惯性力^[2].

2.1 等体积水球受力分析

先考察处于同一位置的相同体积的水球.显然,水球处于转动平衡状态,其受力情况如图4所示.水球受到重力 $G_{\text{水}}$,浮力 $F_{\text{浮}}$,惯性离心力 $F_{\text{惯水}}$ 以及试管侧壁的弹力 $F_{\text{侧水}}$ 和由于试管顶部对水的挤压而

造成的水对水球沿试管向下倾斜的附加压力 $F_{\text{顶水}}$,其中

$$G_{\text{水}} = \rho_{\text{水}} gV \quad (1)$$

$$F_{\text{浮}} = \rho_{\text{水}} gV \quad (2)$$

$$F_{\text{惯水}} = \rho_{\text{水}} r\omega^2 V \quad (3)$$

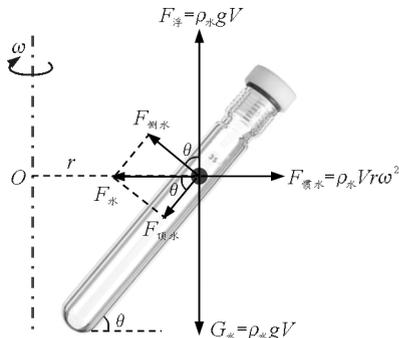


图4 水球处于转动平衡状态时的受力分析图

不难理解,水球的重力与浮力大小相等,而方向相反.因此,试管侧壁和顶部的弹力的合力(方向水平,大小等于惯性离心力)提供水球转动的向心力,满足

$$\begin{cases} F_{\text{侧水}} \sin \theta + F_{\text{顶水}} \cos \theta = \rho_{\text{水}} r\omega^2 V \\ F_{\text{侧水}} \cos \theta - F_{\text{顶水}} \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

容易算出

$$\begin{cases} F_{\text{侧水}} = \rho_{\text{水}} r\omega^2 V \sin \theta \\ F_{\text{顶水}} = \rho_{\text{水}} r\omega^2 V \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,试管中不同位置的水,受到试管侧壁和顶部的弹力大小都不同,且均随转动半径的增大而线性增大.

2.2 钢球受力分析

钢球的受力分析如图5所示.

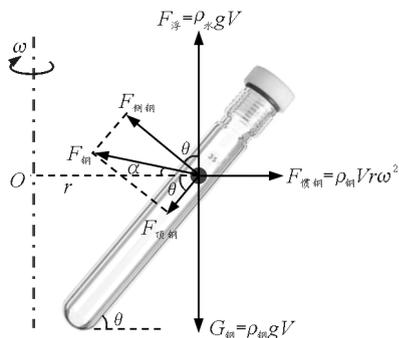


图5 钢球处于转动平衡状态时的受力分析

钢球受到与水球类似的重力 $G_{\text{钢}}$, 浮力 $F_{\text{浮}}$, 惯性离心力 $F_{\text{惯钢}}$ 以及试管侧壁弹力 $F_{\text{侧钢}}$ 和由于试管顶部对水的挤压而造成的水对钢球沿试管向下倾斜的附加压力 $F_{\text{顶钢}}$, 如图 5 所示. 其中

$$G_{\text{钢}} = \rho_{\text{钢}} gV \quad (6)$$

$$F_{\text{浮}} = \rho_{\text{水}} gV \quad (7)$$

$$F_{\text{惯钢}} = \rho_{\text{钢}} r\omega^2 V \quad (8)$$

假设钢球仍然处于转动平衡状态. 很显然, 钢球的重力大于浮力. 因此, 试管侧壁和顶部弹力的水平分力的合力提供钢球转动的向心力, 竖直分力与重力和浮力达到平衡, 满足

$$\begin{cases} F_{\text{侧钢}} \sin \theta + F_{\text{顶钢}} \cos \theta = \rho_{\text{钢}} r\omega^2 V \\ F_{\text{侧钢}} \cos \theta + \rho_{\text{水}} gV - F_{\text{顶钢}} \sin \theta - \rho_{\text{钢}} gV = 0 \end{cases} \quad (9)$$

解之得

$$\begin{cases} F_{\text{侧钢}} = \rho_{\text{钢}} r\omega^2 V \sin \theta - (\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{水}}) gV \cos \theta \\ F_{\text{顶钢}} = \rho_{\text{钢}} r\omega^2 V \cos \theta - (\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{水}}) gV \sin \theta \end{cases} \quad (10)$$

从式(10) 同样可以看出, 钢球在试管中不同位置, 受到试管侧壁和顶部的弹力大小都不同, 且同样均随转动半径的增大而线性增大. 结合式(8) 容易理解, 当转速达到能使钢球做离心运动的条件且转速恒定或加速转动时, 钢球都将加速远离转轴. 式(10) 中的两个力的合力大小为

$$F_{\text{钢}} = \omega V \sqrt{r} \cdot \sqrt{\rho_{\text{钢}}^2 r\omega^2 + (\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{水}})^2 g^2 - 4\rho_{\text{钢}} g \sin \theta \cos \theta} \quad (11)$$

设该合力与水平方向的夹角为图 5 中的 α , 那么, 结合式(6)、(7)、(8), 容易得出

$$\tan \alpha = \frac{(\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{水}})g}{\rho_{\text{钢}} r\omega^2} \quad (12)$$

因此, 试管对钢球的作用力方向与转速和钢球所处的位置有关.

2.3 泡沫球受力分析

泡沫球受力情况与钢球和水球类似, 不再赘述. 最大的差别是泡沫球受到试管侧壁的弹力方向与钢

球和水球的相反(当转速增大到某一特定值时, 试管侧壁对泡沫球的弹力恰为零. 此时, 继续增大转速, 试管侧壁对泡沫球的弹力将垂直试管侧壁向上), 如图 6 所示. 其中

$$G_{\text{泡}} = \rho_{\text{泡}} gV \quad (13)$$

$$F_{\text{浮}} = \rho_{\text{水}} gV \quad (14)$$

$$F_{\text{惯泡}} = \rho_{\text{泡}} r\omega^2 V \quad (15)$$

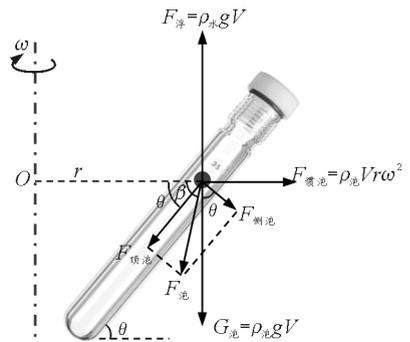


图 6 泡沫球的受力分析图

仍假设泡沫球处于转动平衡状态. 很显然, 泡沫球的重力小于浮力. 因此, 试管侧壁和顶部弹力的水平分力的合力提供泡沫球转动的向心力, 竖直分力与重力和浮力达到平衡, 满足

$$\begin{cases} F_{\text{顶泡}} \cos \theta - F_{\text{侧泡}} \sin \theta = \rho_{\text{泡}} r\omega^2 V \\ F_{\text{顶泡}} \sin \theta + \rho_{\text{泡}} gV + F_{\text{侧泡}} \cos \theta - \rho_{\text{水}} gV = 0 \end{cases} \quad (16)$$

解之得

$$\begin{cases} F_{\text{侧泡}} = (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{泡}}) gV \cos \theta - \rho_{\text{泡}} r\omega^2 V \sin \theta \\ F_{\text{顶泡}} = \rho_{\text{泡}} r\omega^2 V \cos \theta + (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{泡}}) gV \sin \theta \end{cases} \quad (17)$$

从式(17) 可知, 泡沫球在试管中不同位置, 受到试管侧壁和顶部的弹力大小也都不同, 侧壁弹力随转动半径的增大而线性减小, 而顶部弹力随转动半径的增大而线性增大.

结合式(15) 容易理解, 当转速达到能使泡沫球做向心运动的条件且转速恒定或加速转动时, 泡沫球都将加速靠近转轴. 同样式(17) 中的两个力的合力大小为

$$F_{\text{泡}} = V \sqrt{\rho_{\text{泡}}^2 r^2 \omega^4 + (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{泡}})^2 g^2} \quad (18)$$

设这一合力与水平方向的夹角为图 6 中的 β , 那

么,结合式(13)、(14)、(15),容易得出

$$\tan \beta = \frac{(\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{泡}})g}{\rho_{\text{泡}} r \omega^2} \quad (19)$$

因此,试管对泡沫球的作用力方向同样与转速和泡沫球所处的位置有关.

3 几点说明

(1) 不同球体(钢球、泡沫球)在相同位置的转动平衡状态,各自要求的角速度不相同.

(2) 钢球、泡沫球做离心运动或向心运动的约束条件(ω 与 θ 和 r 之间的关系)须结合动力学微分方程才能给出.

(3) 对于密度小于水的泡沫球,在转速满足一定条件时,试管侧壁对其没有弹力.这时,若转速增大,则试管侧壁对其将有斜向上的弹力.

(4) 若实验过程中试管呈水平状,则以任意转速转动,钢球总向远离转轴方向运动,最终处于远离转轴一端的管口;而泡沫球总向靠拢转轴方向运动,

最终处于靠近转轴一端的管底.

(5) 目前,关于离心运动的实验仪器与制作多有文献^[3,4]予以介绍,实验效果也都比较好.而对于向心运动方面的实验仪器还没有任何产品介绍,仅见一份文献^[5]资料介绍了一种用橡胶软管的简易制作,但实践的实验效果不很理想.

参考文献

- 1 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学. 北京:高等教育出版社,2009.234~244
- 2 漆安慎,杜婵英. 普通物理学教程 力学. 北京:高等教育出版社,2012.85~92
- 3 肖树声. 自制演示离心运动的实验装置. 物理教师. 1991(6):26
- 4 陈海深. 离心运动低成本趣味实验资源开发. 教学与管理,2016(11):98~100
- 5 陈兆华. 向心与离心运动现象实验器的制作. 教学仪器与实验,2008(10):32

Experimental Instrument of Centrifugal-centripetal Motion and Experimental Analysis

Huang Shaoshu

(Liupanshui No. 23 Middle School, Liupanshui, Guizhou 553000)

Wan DaLin

(Liupanshui Radio and TV University, Liupanshui, Guizhou 553000)

Abstract: This paper introduces the structure and characteristics of the centrifugal-centripetal motion experimental instrument designed and developed independently, and analyzes the dynamic principles involved in the experimental phenomena. The self-made centrifugation-centripetal motion experiment instrument and the experiments carried out thereby can effectively display the centrifugal motion and the centripetal motion simultaneously.

Key words: centrifugal-centripetal moving tester; centrifugal movement; centripetal motion; balanced equation; dynamical principle