

# 一种验证科氏加速度存在的实验装置及其动力学分析

张松松 王伟华 岳林

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

**摘要:**科氏加速度是理论力学中公认的教学重点和难点,如何将科氏加速度形象地展示出来一直是学者与高校老师追求的目标。针对这一知识点,结合地球仪的外形,巧妙地实现了小球在科氏地球仪上旋转运动和直线运动的完美结合。根据科氏加速度理论,设计转速可调的旋转平台,在平台上设置能实现不同速度的直线运动装置,小球在旋转平台上作直线运动,从而受到科氏力的作用。初始状态时,安装在运动装置内的钢球处于平衡状态;工作时,由于科氏力的作用,钢球压迫弹簧,弹簧发生变形,利用滑轮、引线和位移补偿丝杆组成的传递机构,将弹簧变形量传递到显示装置,从而显示科氏加速度的存在。与现有科氏加速度验证实验装置所不同的是,此装置结构新颖,能吸引学生深入理解和掌握科氏加速度的概念。

**关键词:**科氏加速度;验证存在;力学分析

**中图分类号:**TH111

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2615(2017)06-0833-06

## Experimental Device for Verification of Coriolis Acceleration and Its Dynamics Analysis

ZHANG Songsong, WANG Weihua, YUE Lin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Coriolis acceleration is generally recognized as the key and difficult teaching point in theoretical mechanics. How to figuratively display Coriolis acceleration is always the goal that scholars and college teachers are pursuing. For this problem, a perfect combination of rotation and linear motion for the ball can be achieved skillfully at the globe in line with the shape of the globe. Accordance to the theory of Coriolis acceleration, a linear motion device with different speed settings can be set up on a platform, which is rotary with adjustable speeds. The ball moves in straight line on the rotary platform, which is affected by Coriolis force. At the initial state, the steel ball installed within the movement device is in equilibrium. Then at the working stage, the spring becomes deformed under the compression by the steel ball because of Coriolis force. The transmission mechanism composed of a pulley, a wire and a displacement compensation wire rod transmits the amount of spring deformation to a display device, which reveals the presence and the magnitude of Coriolis acceleration. Different from the existing Coriolis acceleration test devices, the proposed device has a novel structure, which can attract students to understand deeply and grasp the concept of Coriolis acceleration.

**Key words:** Coriolis acceleration; verification existence; mechanical analysis

**收稿日期:**2017-01-07;**修订日期:**2017-06-12

**通信作者:**岳林,女,教授,博士生导师,E-mail:yuelinme@nuaa.edu.cn.

**引用格式:**张松松,王伟华,岳林.一种验证科氏加速度存在的实验装置及其动力学分析[J].南京航空航天大学学报,2017,49(6):833-838. ZHANG Songsong, WANG Weihua, YUE Lin. Experimental device for verification of coriolis acceleration and its dynamics analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(6): 833-838.

科氏加速度是由科里奥利于1832年发现的,为了纪念科里奥利,后人把此加速度命名为科氏加速度<sup>[1-5]</sup>。科氏加速度是由于动系为转动时,牵连运动和相对运动相互影响而产生的<sup>[3-5]</sup>。

理论力学是机械类专业一门重要的、理论性极强的专业基础课程,也是后续课程的基础。在理论力学中,运动学所占的教学比重很大,而且运动学中的难点众多,其中科氏加速度理论就是运动学部分的教学重点和难点,如何让学生理解科氏加速度概念一直是理论力学教学过程中的重点工作<sup>[6-9]</sup>。

目前科氏加速度的验证装置由各高校自行开发,尚无成熟仪器,且现有的实验台不够生动形象。为此在深入理解科氏加速度产生机理与表现形式的情况下,本文设计了一种定性显示科氏加速度的实验装置,可以直观地验证科氏加速度的存在。这里不采用已有的流体或机械带式结构,另辟蹊径,旨在用简单巧妙的机械结构,帮助教师讲解科氏加速度这一知识点,并给学生自己动手实验、思考的机会,利于理解和加深印象。

## 1 方案设计

科氏加速度的计算公式如下

$$\boldsymbol{a}_c = 2\boldsymbol{\omega}_e \times \boldsymbol{v}_r \quad (1)$$

加速度大小为  $a_c = 2\omega_e v_r \sin\theta$ ,  $\theta$  为  $\boldsymbol{\omega}_e$  和  $\boldsymbol{v}_r$  的夹角;方向遵守右手定则,如图1所示。

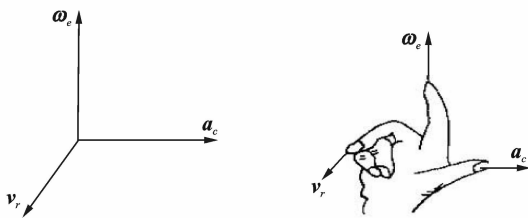


图1 科氏加速度的方向

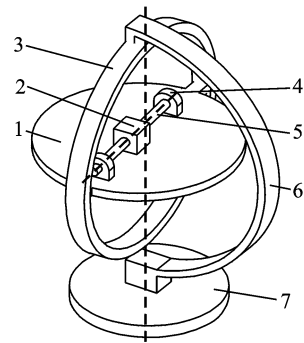
Fig. 1 Direction of Coriolis acceleration

### 1.1 模型框架概念设计

从以上的分析可知,当动点在动参考系中运动时,动点将受到了科氏力的作用。所以设计时要有一个旋转的参考系,质点在旋转参考系中运动。同时为了增加趣味性和实验台的立体感,须结合生活中的某些物体。最终确定了如图2所示的概念模型。在概念模型中,质点的牵连速度,相对速度以及科氏加速度如图3所示。

### 1.2 测量及显示设计

前文已经提供了质点的运动,下面对力的测量及显示模块进行设计,如图4所示。图中:1为三向分力显示盒,2为丝杆螺母,3为钢珠,4为主动丝



1.旋转板;2.滑动螺母(运动质点位置);3.旋转框;4.轴承座;5.螺杆;6.支撑架;7.底座。

图2 模型概念设计

Fig. 2 Conceptual design of model

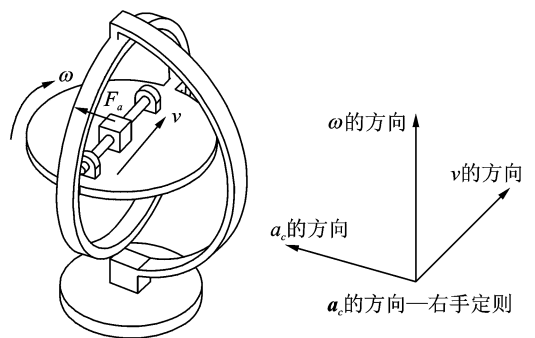


图3 概念模型原理图

Fig. 3 Schematic diagram of conceptual model

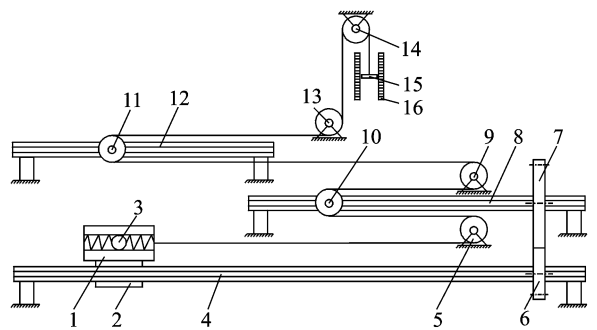


图4 测量及显示设计简图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement and display

杆,5为定滑轮1,6为主动齿轮,7为从动齿轮,8为从动丝杆,9为定滑轮2,10为随动滑轮1,11为随动滑轮2,12为手动调节丝杆,13为定滑轮3,14为定滑轮3,15为指针,16为显示管。

说明:主动齿轮6与从动齿轮7的传动比为为2。主动丝杆4和从动丝杆8规格相同。

工作原理:

步进电机通过同步带带动主动丝杆4转动,处于三向分力显示盒1内的钢珠3产生相对基底的

直线运动,主动丝杆 4 通过主动齿轮 6 和从动齿轮 7 带动从动丝杆 8 反向以半速转动,随动滑轮 10 在从动丝杆 8 的带动下作与三向分力显示盒 1 反向的直线运动。

当钢球 3 对弹簧不存在压缩时,由于齿轮对与随动滑轮 10 的作用,使得搭载钢球的装置在丝杆 4 上运动时指针 15 保持位置不变;当钢球 3 对弹簧存在压缩时,指针 15 相对于示数管 16 的位置发生改变,证明科氏加速度的存在。

当指针 15 的初始位置不在零位时,通过调节手动调节丝杆 12 带动随动滑轮 2 移动,来使指针 15 重新回到零位。

### 1.3 工作过程设计

实验装置的工作过程如图 5 所示。

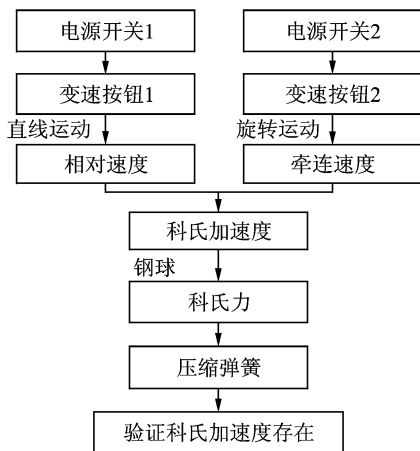


图 5 实验装置工作过程设计

Fig. 5 Working process design of experimental device

## 2 功能实现

### 2.1 牵连运动模块

牵连运动模块中,步进电机通过齿轮带动旋转平台做定轴旋转,作为质点(钢球)的牵连运动,通过控制步进电机定量调节牵连速度的大小(图 6)。

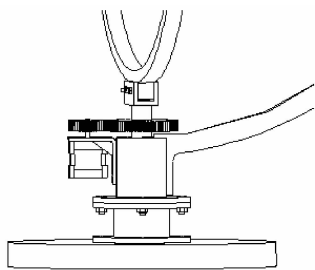


图 6 牵连运动模块原理图

Fig. 6 Schematic diagram of connected motion module

设步进电机的转速为  $n_1$ , 步进电机所连主动齿轮齿数为  $z_1 = 46$ , 从动齿轮齿数为  $z_2 = 92$ , 传动

比  $i_1 = z_1/z_2 = 0.5$ 。

牵连角速度大小

$$\omega_e = 2\pi i_1 n_1 / 60 = \pi n_1 / 60 \quad (2)$$

### 2.2 相对运动模块

在相对运动模块中,步进电机通过同步带传动,带动丝杆旋转,使滑块带动三向分力测量盒在旋转平台上作往复直线运动,通过控制步进电机调节质点相对速度的大小和方向(图 7)。

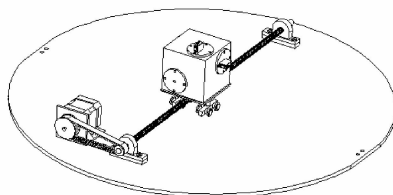


图 7 相对运动模块原理图

Fig. 7 Schematic diagram of relative motion module

设步进电机的转速为  $n_2$ , 步进电机所连主动带轮齿数  $z_3 = 18$ , 从动带轮齿数为  $z_4 = 9$ , 传动比  $i_2 = z_3/z_4 = 2$ , 丝杆导程为  $S = 8 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

相对速度大小

$$v_r = i_2 n_2 S / 60 = 2.67 \times 10^{-4} n_2 \quad (3)$$

### 2.3 三向分力显示盒

科氏地球仪要显示钢球的科氏加速度,就必须将钢球 3 个方向的分力分开显示。为了达到此目的,创新地设计了一种三向分力显示盒。这里采用 3 个相距很近的钢珠的单方向受力来表示一个钢球 3 个方向的受力。

三向分力显示盒的工作原理如图 8 所示,实物如图 9 所示。

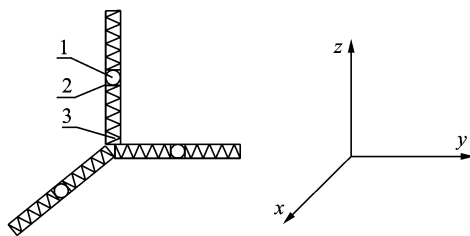


图 8 三向分力显示盒的工作原理图

Fig. 8 Working principle diagram of three-component display box

由图中可知,三向分力显示盒由 3 个两两垂直的独立单元组成,构成了如图 8 所示的笛卡尔坐标系。每个独立的单元由钢球 1,透明有机玻璃管 2,和两个弹簧 3 组成。当在初始位置时,左右两个弹簧处于自由伸长状态;当钢球受到外力如科氏力的作用时,钢球就会往一边运动,挤压弹簧直到小球再一次达到新的平衡状态。通过观察弹簧形变量

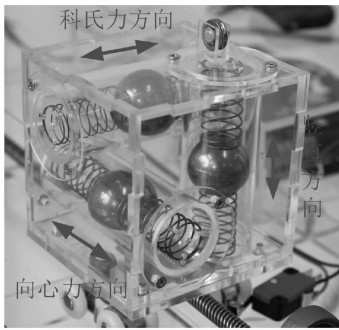


图9 三向分力显示盒实物图

Fig. 9 Physical diagram of the three-component display box

的大小,就可以求出钢球受到的科氏力的大小和科氏加速度的大小。

钢珠的直径  $d=28\text{ mm}$ ,材料为不锈钢,密度  $\rho=7\ 850\text{ kg/m}^3$ ,质量为

$$m = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = 0.09\text{ kg} \quad (4)$$

弹簧的线径为  $0.6\text{ mm}$ ,外径为  $25\text{ mm}$ ,长度为  $25\text{ mm}$ ,劲度系数  $k=40\text{ N/m}$ , $i$  方向的受力为

$$F_i = kx_i \quad (5)$$

式中: $i$  方向的加速度为  $x_i$  为弹簧在  $i$  方向的形变量。

$$a_i = \frac{kx_i}{m} = 55.55x_i \quad (6)$$

三向分力测量盒分别显示了3个方向的力,易于接受与理解;其底部采用滚轮小车,既解决了运动的平稳性,又能以小巧的造型吸引学生。

## 2.4 显示模块

根据图4所示的显示原理设计了图10所示的显示结构。将3个方向依次排列并显示于中间位置的示数管,这样当实验装置工作旋转起来的时候,从外部依然可以观察示数管指针的上下浮动;为了更清晰地观察,在实验装置的旋转架上固定有无线摄像头,通过应用软件可将示数图像清晰地显示在电脑上供观察分析。

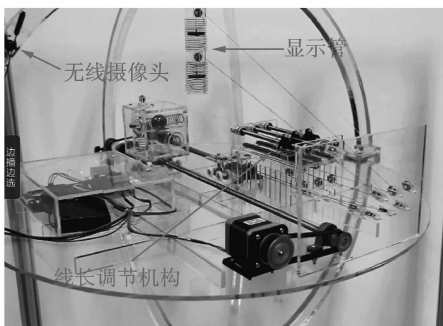


图10 显示结构实物图

Fig. 10 Physical object of display structure

## 2.5 整体实物模型

科氏加速度实验装置实物如图11所示。实验装置整体采用地球仪的外形,与研究课题匹配显得贴切自然,同时材料选择有机玻璃,外围辅助以铝型材外支架,使得装置的稳定性大大提升,并使装置本身处于一种较佳的观察位置。

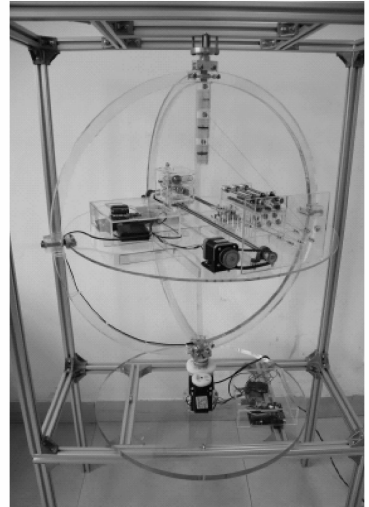


图11 科氏加速度实验装置整体实物图

Fig. 11 Whole physical object of Coriolis acceleration test device

## 3 实验效果与误差分析

### 3.1 实验效果

设定牵连运动和相对运动电机的转速,通过线长调节模块对示数管进行调零,开启无线摄像头,启动电机开始实验。通过电脑端的应用软件进行观察,图12为运动瞬间抓拍示数管图像。

由图像观察值,竖直方向指针位于零处,几乎没有变化;向心力方向(径向)位移为  $2 \times 2.5\text{ mm} = 5\text{ mm}$ ;科氏力方向位移为  $1 \times 2.5\text{ mm} = 2.5\text{ mm}$ (刻度间距为  $2.5\text{ mm}$ )。

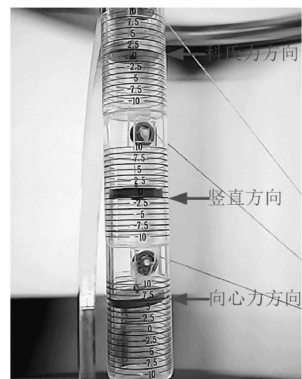


图12 运转瞬间截图

Fig. 12 Screenshot of running instant

对于径向方向指针的位移,是由于钢珠作圆周运动需要弹簧来提供向心力;而上文所述科氏力方向指针的位移则证明了科氏加速度的存在。

下面进行多次试验来对实验结果进行进一步的定量分析。

科氏加速度理论值

$$a_{c1} = 2\omega_e v_r \sin\theta = 8.89 \times 10^{-6} \pi n_1 n_2 \quad (7)$$

科氏加速度测量值

$$a_{c2} = \frac{F}{m} = \frac{kx}{m} = 444.4x \quad (8)$$

相对误差

$$\eta = \frac{|a_{c1} - a_{c2}|}{a_{c1}} \quad (9)$$

实验操作设置及结果列于表 1 中。

表 1 实验设置与结果

Tab. 1 Experimental setup and results

实验	$n_1 /$ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	$n_2 /$ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	$\omega_e /$ ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v_r /$ ( $10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	示数管值/ mm	测量值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	理论值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	相对 误差/%
实验 1	200	100	10.5	2.67	0.75	0.34	0.56	39.3
实验 2	200	200	10.5	5.34	2	0.89	1.12	20.5
实验 3	200	400	10.5	10.68	4.5	2.00	2.24	10.7
实验 4	200	600	10.5	16.02	7	3.12	3.36	7.1
实验 5	400	200	20.9	5.34	4.5	2.00	2.24	10.7
实验 6	600	200	31.4	5.34	7	3.12	3.36	7.1

将前 4 组实验相对误差绘制曲线图,如图 13 所示,当转速较小时,实验结果误差较大,随着转速的提升,误差逐渐减小,此时干扰因素对实验结果的影响减小。通过实验 3 与实验 5、实验 4 与实验 6 的对比,证明了实验装置理论上设计的正确性。

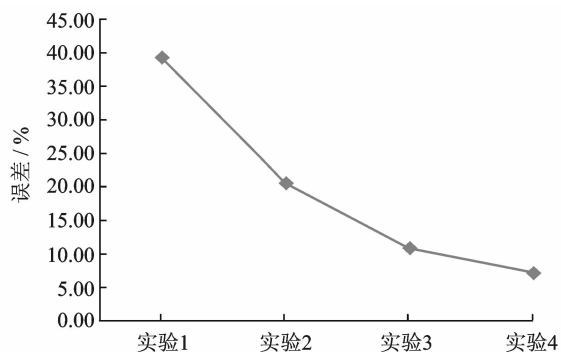


图 13 实验误差变化曲线

Fig. 13 Experimental error variation curve

### 3.2 误差分析

实验装置的设计目的在于借助钢珠在受到科氏力时压缩弹簧来实现定性显示科氏加速度的存在。

其误差主要存在于三向分力显示盒和传动过程中的误差:

- (1)用 3 个钢珠的单方向受力代表一个钢珠在 3 个方向上的受力(3 个钢珠互相错开);
- (2)钢珠与三向分力显示盒间的摩擦;
- (3)细线传递过程中与定滑轮间的摩擦。

针对误差(1),因为钢珠间距离很小,且相对显示盒运动距离来说更小,对定性验证科氏加速度存在的实验中影响也就小;但误差(2)和(3)对实验结果的影响在此实验装置中不可避免,其大小为一定值,不会因为实验设置的不同而改变,因此当牵连速度和相对速度增大时,其对实验结果的影响会逐渐减小,因此所带来的系统误差也会减小,其趋势如图 13 所示。

## 4 结束语

与现有科氏加速度实验装置所不同的是,此实验装置结构新颖,不仅实现了科氏加速度的定性显示,可帮助学生深入地理解科氏加速度的基本概念;鉴于此科氏加速度实验装置在实现科氏加速度定性显示方面的创新,其可替代现有市场上关于科氏加速度的教具,因此其拥有广阔的市场应用前景和社会效益。

### 参考文献:

[1] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.  
Department of Theoretical Mechanics of Harbin Institute of Technology. Theoretical mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press,2002.

[2] 张勇,张照海,马景全. 科氏加速度漫谈[J]. 科技探索,2010,7:95-96.  
ZHANG Yong, ZHANG Zhaohai, MA Jingquan.

- Discussion of Coriolis acceleration[J]. Science and Technology Exploration, 2010,7:95-96.
- [3] 王建龙,殷锦涛. 立体两功能流体科氏惯性力实验仪的制作[D]. 宁夏:宁夏大学,2012.  
WANG Jianlong, YIN Jintao. The production of the two dimensional function fluid Coriolis inertiaforce experiment instrument[D]. Ningxia: Ningxia University,2012.
- [4] 孙桓,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.  
SUN Huan, CHEN Zuomo, GE Wenjie. Mechanical principle [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [5] 张宏刚. 几何法证明科氏加速度[J]. 科技信息,2008(19):217.  
ZHANG Honggang. The justifications for geometric method of the Coriolis acceleration[J]. Science and Technology Information, 2008(19): 217.
- [6] 张玮,叶金铎,曾庆康,等. 科氏惯性力测量精度分析[J]. 现代科学仪器,2010(2):135-137.  
ZHANG Wei, YE Jinduo, CENG Qingkang, et al. Analysis of the accuracy of the measurement of the coriolis inertial force[J]. Modern Scientific Instruments, 2010(2):135-137.
- [7] 胡芮,韩素,王士涛,等. 机械式科氏加速度演示仪[J]. 电子测试,2015(13):97-99.  
HU Rui, HAN Su, WANG Shitao, et al. Mechanical coriolis acceleration demonstrator[J]. Electronic Test, 2015(13):97-99.
- [8] 柴国钟,梁利华,王效贵,等. 材料力学[M]. 北京:科学出版社,2012.  
CHAI Guozhong, LIANG Lihua, WANG Xiaogui, et al. Mechanics of materials[M]. Beijing: Science Press,2012.
- [9] 王晓炜,章璐,王泽华,等. 速度矢量夹角可变的科氏加速度演示仪[J]. 机械工程师,2014(9):52-53.  
WANG Xiaowei, ZHANG Lu, WANG Zehua, et al. Coriolis acceleration demonstration instrument with variable velocity vector angle[J]. Mechanical Engineer, 2014(9):52-53.

