

一、引言

陀螺仪作为一种惯性测量器件，是惯性导航、惯性制导和惯性测量系统的核心部件，广泛应用于军事和民用领域。传统的陀螺仪体积大、功耗高、易受干扰，稳定性较差，最近美国模拟器件公司推出了一种新型速率陀螺芯片 ADXRS，它只有 $7\text{mm}\times 7\text{mm}\times 3\text{mm}$ 大小，采用 BGA-32 封装技术，这种封装至少要比任何其他具有同类性能的陀螺仪小 100 倍，而且功耗为 30mW ，重量仅 0.5g ，能够很好的克服传统陀螺仪的缺点。由 ADXRS 芯片组成的角速度检测陀螺仪能够准确的测量角速度，此外还可以利用该陀螺仪对角度进行测量，实验取得了良好的结果。

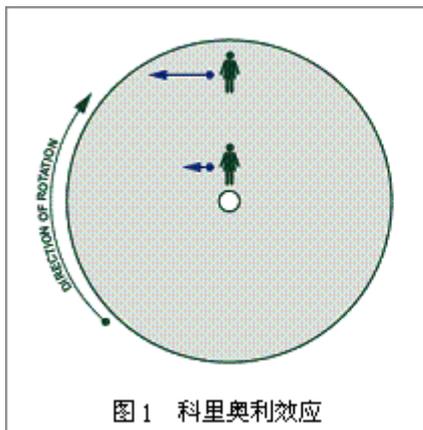


图 1 科里奥利效应

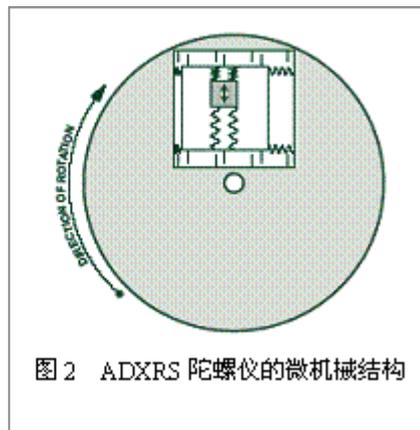


图 2 ADXRS 陀螺仪的微机械结构

二、陀螺仪的原理和构造

ADXRS 系列陀螺仪是由美国模拟器件公司制造，采用集成微电子机械系统(iMEMS)专利工艺和 BIMOS 工艺的角速度传感器，内部同时集成有角速率传感器和信号处理电路。与任何同类功能的陀螺仪相比，ADXRS 系列陀螺仪具有尺寸小、功耗低、抗冲击和振动性好的优点。

1、科里奥利加速度

ADXRS 系列陀螺仪利用科里奥利(Coriolis)加速度来测量角速度,科里奥利效应原理如图 1 所示。假设某人站在一个旋转平台的中心附近,他相对地面的速度用图 1 箭头的长度所示。如果移动到平台外缘的某一点,他相对地面的速度会增加,如图 1 较长的箭头所示。由径向速度引起的切向速度的速率增加,这就是科里奥利加速度。设角速度为 ω 科里奥利加速度的一半,另一般来自径向速度的改变,二者总和为 $2\omega v$ 旋转平台必须施加一个大小为 $2M\omega v$ 科里奥利加速度,并且该人将受到大小相等的反作用力。的力来产生。如果人的质量为 M , 该, 平台半径为 r , 则切向速度为 ωr , 如果以速度 v 沿径向 r 移动, 将产生一个切向加速度 ωv , 这仅是

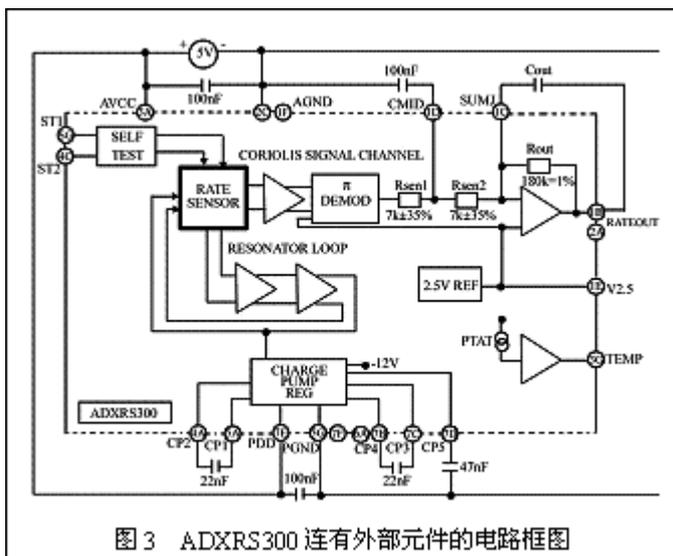


图 3 ADXR300 连有外部元件的电路框图

陀螺仪通过使用一种类似于人在一个旋转平台移出或移入的谐振质量元件,利用科里奥利效应来测量角速度。图 2 示出了 ADXRS 系列陀螺仪完整的微机械结构,陀螺仪通过附着在谐振体上的电容检测元件测量谐振质量元件及其框架由于科里奥利效应产生的位移。这些电容检测元件都是由硅材料制成的横梁,它们与两组附着在基片上的

静止硅横梁互相交叉，因而形成两个标称值相等的电容器。由角速度引起的位移在该系统内产生一个差分电容。如果弹簧的弹性系数为 K ，硅横梁的间距为 g ，则差分电容为 $\frac{2\epsilon_0 M}{gK}$ ，那么反作用力造成的位移为 $\frac{2\epsilon_0 M}{gK}$ 。如果总电容为 C_{2wv} ，它直接与该角速度成比例。这种关系的逼真度在实际应用中非常好，其线性误差小于 0.1%。

2、陀螺仪的构造以及电路的实现

ADXRS 系列陀螺仪的外围尺寸为 $7\text{mm} \times 7\text{mm} \times 3\text{mm}$ ，采用 BGA-32 封装技术，有 ADXRS150 和 ADXRS300 两种型号，它们的功能电路完全相同，唯一不同在于前者的量程为 $\pm 150^\circ/\text{s}$ ，后者的量程为 $\pm 300^\circ/\text{s}$ 。图 3 显示了 ADXRS300 的内部电路结构和外围电路，其中外围电路主要是电容和电阻组成。

引脚 AVCC 接 5V 电源电压，22nF 的泵浦电容用于产生 12V 的泵浦电压以供部分电路使用。测得的角速度以电压形式在引脚 RATEOUT 输出， $0^\circ/\text{s}$ 时输出电压为 2.5V，RATEOUT 与引脚 SUMJ 之间并联一个电阻 R_{out} ，ADXRS300 的角速度响应带宽， -3dB 频率由下式决定：和电容 C_{out} ，从而组成低通滤波器用于限制

$$f_{out} = 1 / (2 \pi \cdot R_{out} \cdot C_{out}) \quad (1)$$

内部电路的 $R_{out} 180\text{k}\Omega$ ，可以从外部给 $R_{out} \Omega / R_{ext}$ ADXRS300 的量程为 $\pm 300^\circ/\text{s}$ ，可以在 RATEOUT 和 SUMJ 引脚之间给 $R_{out} 300\text{k}\Omega$ 的电阻可以使量程增大 50%，但是这需要对电路重新调零，调零时在 SUMJ 引脚处外接一个电阻 R_{null} ，RATEOUT 的零点是 2.5V，但角运动范围不对称时，按下式计算：到地或电源正极，对称角运动情况

下并联一个电阻来增大量程，例如并联一个，从而调整角速率响应带宽。并联一个电阻 R_{ext} ，使得 $R_{out}=180k$ 为

$$R_{null} = \frac{2.5 \times 180000}{V_{null0} - V_{null}} \quad (2)$$

式中， V_{null0} ——未校正时零角速度的输出电压，

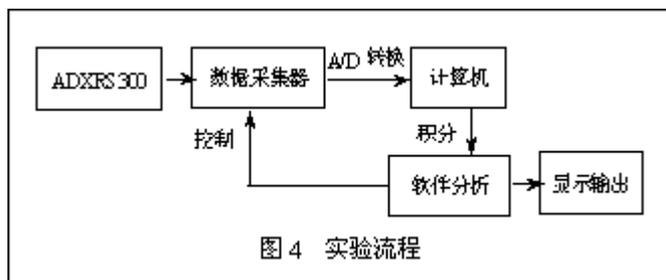
V_{null} ——校正后所需的零点电压。

如果求得的 R_{null} 5V 电源上。为负值，则把电阻 R_{null} 接地；为正值，接在

三、实验过程和测量结果

ADXRS300 陀螺仪直接的用途就是做角速度测量仪，此外也可以用于测量物体旋转角度——对陀螺仪的输出结果积分，所得的数值即为角度。

本实验即用 ADXRS300 陀螺仪测量角度，通过 ADXRS300 角速度测量仪测量旋转物体的转动角速度（注意：陀螺仪可以以任何角度安装在旋转物体的任何地方，只要测量使陀螺仪旋转轴和所要测量的轴平行即可），再对角速度积分就是我们所要的角度了。根据此原理，先把陀螺仪的输出通过数据采集器送入 PC 机中，再用软件进行积分并最终显示结果。具体流程如图 4。



1、硬件设计

测量角度的具体方法是把 ADXRS300 陀螺仪固定在由步进电机驱动的圆盘上，由圆盘带动陀螺仪转动，陀螺仪的输出电压由 F-5101 数据采集控制器进行 A/D 转换。F-5101 的输入电压范围为 -5V~5V，A/D 转换位数为 12 位，转换速度为 25ms，适用于本实验的数据采集。

F-5101 通过打印口与计算机相连，占用主机 378H 和 379H 两个 I/O 端口。主机通过写 378H 向 F-5101 送入操作状态，读 379H 得到 A/D 转换的数据。

系统的供电电压为 220V，需要通过 AC220B05-1W5 型电源模块把 220V 交流电转换为 5V 直流电供 ADXRS300 陀螺仪使用。

2、软件设计

读取陀螺仪的输出电压值，换算成角速度并进行积分，最终显示结果这一步骤通过 Visual Basic 程序来实现。从计算机 379H 端口读取的数值为 12 位 2 进制数，利用公式

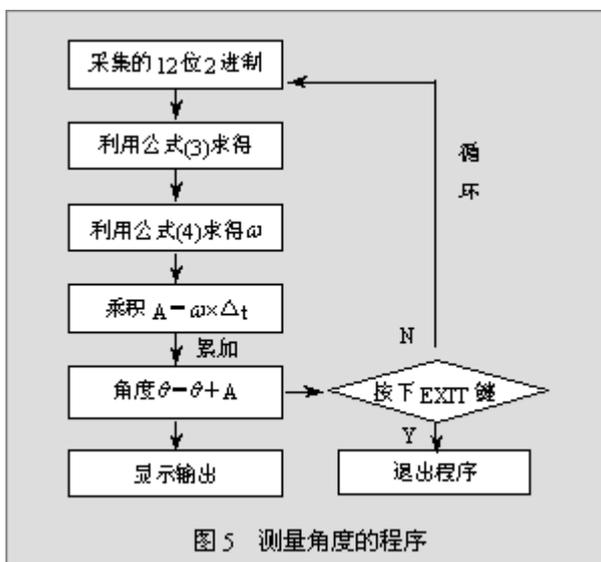
$$V_{out} = 10 \times (A \times 16 + B + C / 16) \times 4096 - 5 \quad (3)$$

可以把 12 位二进制数转换为十进制数，从而求得陀螺仪的实际输出电压。其中 V_{out} 12 位二进制数的高 4 位、中 4 位和低 4 位。电压值换算成角速度由下式决定：设角速度为 w ，则：为输出电压， A ， B ， C 分别为

$$w = (V_{out} - V_0) / 5mV \text{ } ^\circ/s \quad (4)$$

其中 $5mV/^\circ/s$ 为 ADXRS300 陀螺仪的灵敏度， V_0 为陀螺仪静止时的输出电压，一般为

积分的主要步骤是用角速度 ω 乘以程序运行一次所用的时间 Δt ，循环运行程序，对每次的乘积进行累加，并实时送出累加结果，该结果即为测得的物体转过的角度，程序流程如图



3、实验结果

表 1 列出了陀螺仪转动 $\pm 90^\circ$ 和 $\pm 180^\circ$ 这四种情况的输出结果。

表 1 角度测量结果

实际转过角度 ($^\circ$)	测量所得数值 ($^\circ$)					平均值 ($^\circ$)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	
60	59.06	61.06	58.98	60.08	61.51	60.14
90	90.75	89.97	91.88	88.09	90.78	90.29
180	180.50	182.72	180.77	179.21	179.43	180.53

实验结果表明：角度相对误差小于 0.5%，有较高的精度。其中误差来源主要包括：

程序运行一次所用的时间 Δt 过长，造成对角速度的积分不精确，这是产生误差的主要来源。解决的方法是尽量避免冗长的程序语句，使用运行速度较快的计算机或者采用更精确的算法。

数据采集 A/D 转换时可能产生的误差，造成所积分的角速度不准确。

四、结论

随着微机械加工工艺和陀螺仪的设计技术水平不断提高，角速度传感器正朝着微型化、集成化的方向发展，外形更小巧，测量更精确，功能更强大，价格更低廉的陀螺仪已经成为可能。本文介绍的 ADXRS 角速度检测陀螺仪体现了这方面的特点，它尺寸小，功耗低，抗冲击和振动性好，电路结构简单，能精确测量转动物体的偏航角速度，适用于各种惯性测量系统，是陀螺仪技术的一个飞跃。

作者：黑牛(TNT-黑牛)

飞碟球要追求怎样的旋转？怎样评价其旋转质量？下面由飞碟球击瓶倒瓶的力学原理出发，逐一解释。

一、倒瓶的方式

倒瓶的力学原理：站立的瓶体倒下的必要条件是：瓶体受球体碰撞力的作用，瓶底一侧产生倾翻现象，当外力足够大时瓶体重垂线超过其倾翻临界点，则瓶体倒下。

飞碟式击瓶碰撞有下面几种方式：

1、正碰撞：球与瓶重心连线之投影线与球前进方向一致时发生的碰撞。

2、斜碰撞：球与瓶重心连线之投影线与球前进方向有个大于 0° 小于 90° 的夹角时发生的碰撞。

3、磨擦碰撞：球与瓶重心连线之投影线与球前进方向的夹角约为 90° 的碰撞。

这一碰撞方式是球体与瓶体边缘相互滚动磨擦，球体的高速旋转带动瓶体做与球体反向转动，由于瓶底面是圆面，其倒下是滚动式的，增加了瓶体的滚动能量。带有滚动能量的瓶体在置瓶区滚动碰撞其它瓶体，使非球碰瓶体倒下的概率增大。这是飞碟球比弦线球、钩球等占优之处。

4、磨撞混合碰撞：由于飞碟球旋转有个侧翻产生侧面正或斜碰撞，同时又具有磨擦碰撞，两种碰撞是混为一体同时产生的。当球触瓶厚时正或斜碰撞效果显著，当球触瓶薄时磨擦碰撞效果显著。

二、侧翻的力学原理

在飞碟球圈内常听到这番话：他的球很傻，尾端不扫瓶。要解释尾端不扫瓶的原因，实质是个侧翻问题。侧翻是飞碟球固有的特性，若没有侧翻球击瓶的效果会黯然失色。

在讨论侧翻之前先讲述孩时的玩具陀螺。

我们用鞭子抽打玩具陀螺时，它产生高速旋转，抽打力量越大它旋转的越快，观察它所发生的现象：

1、轨迹线：近似一个圆周形的弦线。

2、转径：轨迹线的弦径远大于陀螺的直径。

3、晃动：陀螺中轴线与地面有一个夹角，并且顶端有摆动现象，其轨迹线呈圆锥体。

4、延续性：当陀螺转动后，停止抽打陀螺它要转动一定的时间后才停止转动。

玩具陀螺与飞碟球的转姿极为相象，这些现象如何解释？可以采用理论力学中的陀螺近似理论加以解释。由于该理论涉及许多抽象概念及高等数学，我们舍去演算过程，取其结论应用于我们飞碟球的打法。

飞碟球的侧翻特性：

1、定轴性：当球体转动时，主转轴在惯性空间指向不变。它表明：飞碟球行进线路一致性好。

2、章动性：当球体受到扰动时（如磨擦）主转轴偏离原位置，并在原位置附近作高频微幅的圆锥运动，而主转轴的平均位置始终保持定轴性。它表明：飞碟球行进线路受球道干扰性小。

3、进动性：主转轴顶部转动呈圆锥体摆动。它表明：飞碟球产生侧翻旋转时无形中增大了球体直径。

三、飞碟球的进动性探论

飞碟球能使球径增大，怪事？实事就是如此。我们只要用几何三角及三角函数知识均可计算出来。由于受网络的限制几何图形无法显示，故将计算结果告知：

设进动角 β 为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 时，球体半径为 R ，球体直径增加量 D 则

为：

$$D3=2R\text{tg}3^\circ \approx 0.1R \quad D5=2R\text{tg}5^\circ \approx 0.17R$$

即 $\beta = 3^\circ$ 时, 球径增加约 10%, $\beta = 5^\circ$ 时, 球径增加约 17%。

打飞碟球时我们要充分利用其进动特性。如何利用呢？

1、球径增大:球撞击瓶横截面积增大, 相对缩小瓶间距离。

2、掌握进动角度的尺度:要使十个瓶全部倒下, 球要直接撞击最少 4 个瓶, 若进动角过大则有:

a、撞一个瓶的正或斜碰撞能力增强, 有利于一路的瓶体倒下, 这是利。

b、撞一个瓶后, 球的反弹力度减小, 球撞击其反向瓶(第二个瓶)的能力减小, 这是敝一。

c、正或斜撞碰能力增大, 磨擦碰撞的能力相对减少, 即减少了滚动倒瓶体在置瓶区的滚动碰撞能力, 这是敝二。

d、球体正好偏向被击瓶的反向, 则撞击不到应碰撞的瓶体时机不当, 适得其反, 这是敝三。

e、由于球体与球道接触面的磨擦, 球体的章动性增大, 表现为摆动性增大, 球体容易偏离预定击球线路, 这是敝四。

f、摆动性增大时, 由于球体直进力及球体与球道的磨擦力的作用, 球体易产生直线球式的滚动, 这是敝五。

对其敝有所认识, 才能够取长补短, 发挥进动性的优势。在此建议:

1、球体直进速度控制在 2.5 秒--3 秒。

- 2、球体转速控制在 11.5--13 圈。
- 3、进动角控制在 3° -- 5° 。
- 4、直进速度慢时，增大进动角；直进速度快时减小进动角。

四、进动角产生的指法

指法与《飞碟球立体翻转之探讨》一文的指法相同在此不赘述，

异点：

- 1、球体的锥点球迹线与中指无名指的转动轨迹应平行。
- 2、以大拇指为轴心，整个手掌面及中指无名指绕球孔面做逆时针的 $1/4$ 圆锥弦面运动。圆锥弦面动作越剧烈则进动角越大，反之越小。

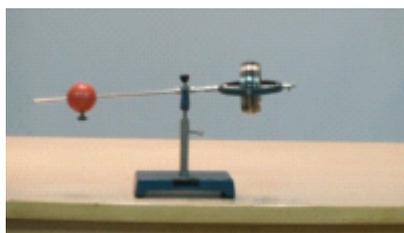
现在回答开篇的两个“？”。

飞碟球要追求：有进动的旋转。

旋转的质量：转速 11.5--13 圈，直进速度 2.5--3 秒，进动角 3° -- 5° 。

上述观点对错与否敬请球友批评指示。

2003 年 3 月 5 日于深圳



陀螺儀

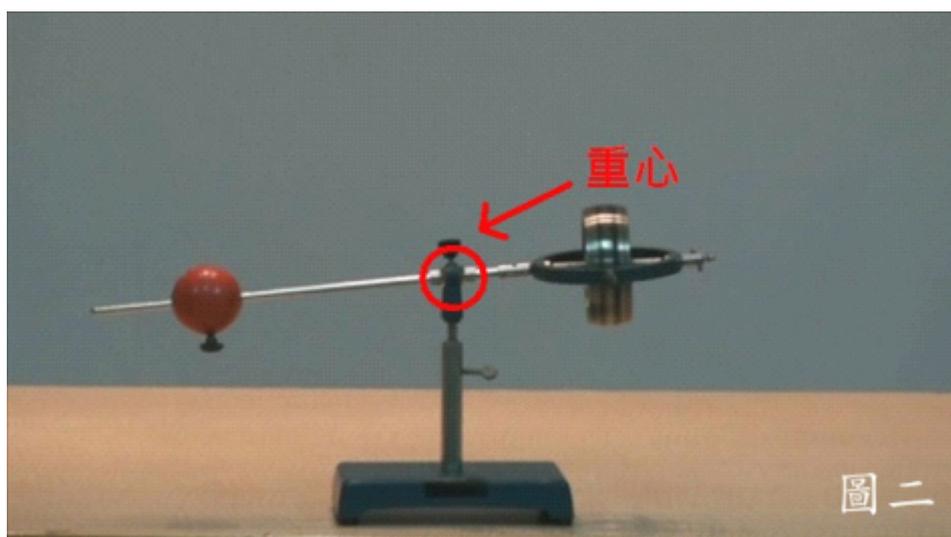
所謂陀螺儀是一個以非常高的速率繞其對稱軸轉動的轉子。它有兩個重要特性，一為定軸性（高速旋轉的轉子具有力圖保持其旋轉軸在慣性空間內的方向穩定不變的特性），另一是進動性（在外力矩作用下，旋轉的轉子力圖使其旋轉軸沿最短的路徑趨向外力矩的作用方向）。這些特性使得陀螺儀在科學、技術、軍事等各個領域有著廣泛的應用。比如：回轉羅盤、定向指示儀、炮彈的翻轉、陀螺的章動、地球在太陽（月球）引力矩作用下的旋進（歲差）等。

實驗演示

在這實驗理我們用模型來演示進動的原理。

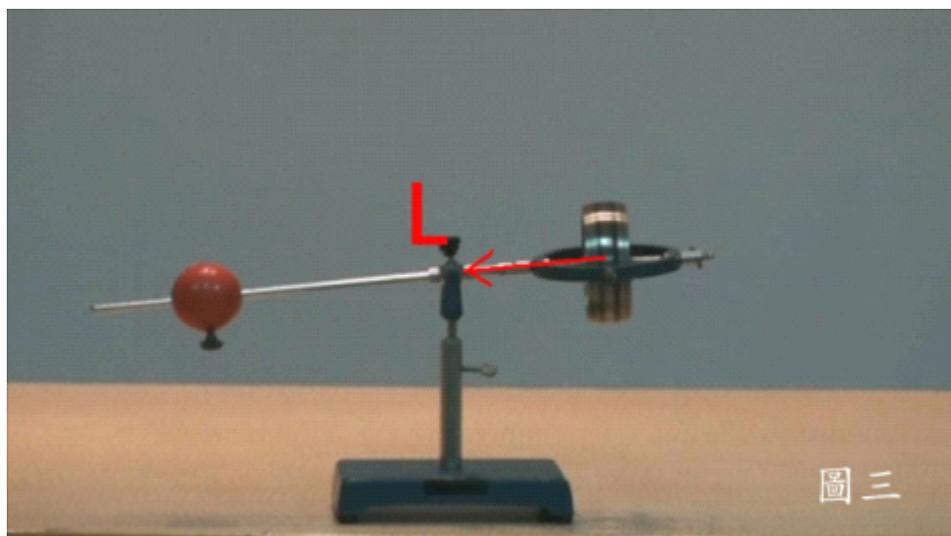
儀器介紹

原理說明

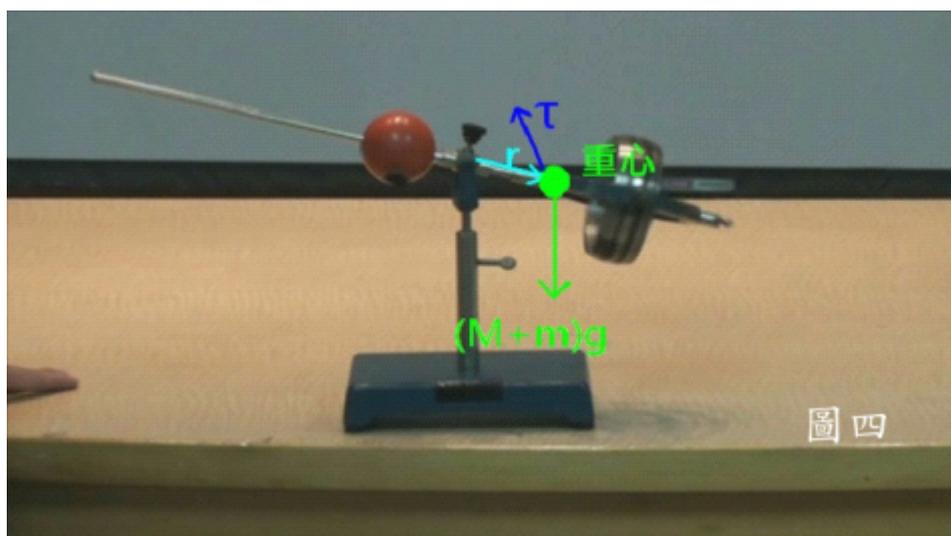


由於這陀螺儀是平衡的，從圖片中我們可以知道重心在支點處，所以我們移動或轉動基座，對陀螺儀的系統（旋轉中的陀螺、紅色重

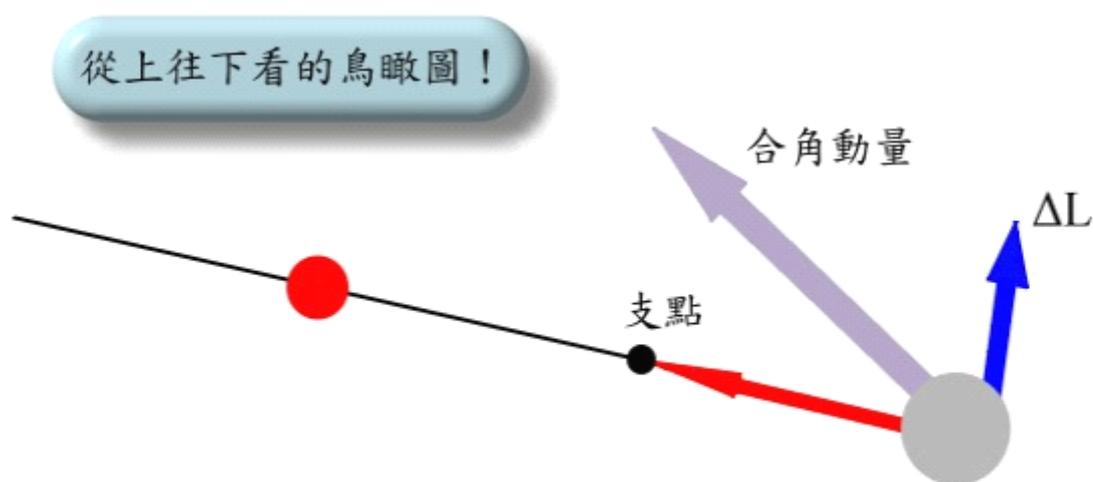
物、鐵軸)來說,所產生的力矩($\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$)等於零,所以不改變自轉軸的指示方向。



陀螺加速的過程中,因為陀螺高速的轉動而產生很大的角動量,角動量方向指向由陀螺指向支點(根據陀螺自旋方向的右手定則所定的)如圖三所示,今天我們改變了它的重物位置,也就是改變了整個陀螺系統的重心位置,而這個改變導致左右不平衡,使重力作用讓較重的一邊往下傾,就跟蹺蹺板的原理一樣,而這重力作用產生了一個新的力矩 $\boldsymbol{\tau}$ (方向是進入紙面),如圖四所示。

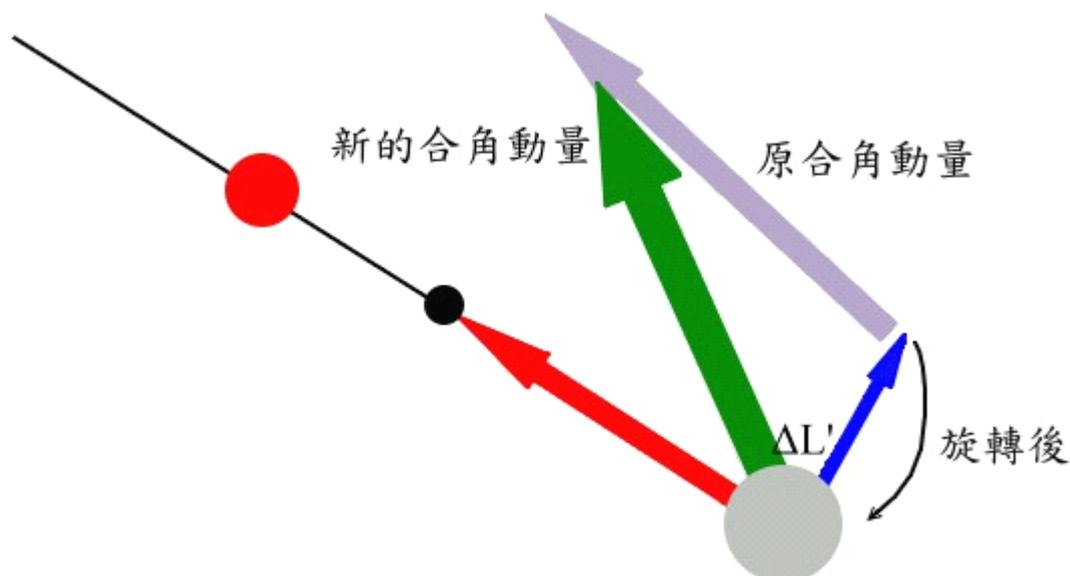


產生了新的力矩後，就對陀螺的運動產生了改變，因為重力所產生的力矩（註一）在即短時間也產生一個跟力矩同方向的角動量 ΔL （ $\tau = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$ ），所以根據合角動量的圖所示（圖五），我們可以知道陀螺順時針或逆時針的轉動的趨勢。



圖五

知道了合角動量方向後，陀螺會有順時針的趨勢，使自己的角動量會有往和角動量方向吻合的趨勢



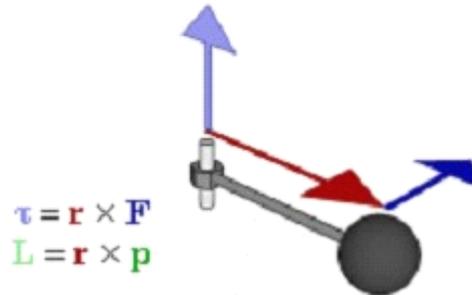
可以看到旋轉後角動量方向有較吻合先前的合角動量，但這個時候同時有產生了一個新的合角動量，所以陀螺會不停的順時針轉下去。因為摩擦力會使自轉的轉速變慢，紅色的自轉角動量也跟著變小，所以重力就把陀螺漸漸的往下拉，直到結束為止。所以我們只要知道陀螺自轉的方向、調整重物後重心的位置我們就可以判斷出進動的方向了！

討論

1. 陀螺儀在日常生活中有什麼應用呢？
2. 進動跟歲差有什麼關係？
3. 精密陀螺儀中進動的速度跟重物質量有關係嗎？
4. 在進動演示二中，陀螺儀會有點頭的擺動，原因是什麼呢？

備註

註一：力矩的說明



力矩的右手定則

