

惯性导航的物理基础

杨世荣

徐海荣

(空军高炮学院 桂林 541003) (第一军医大学 广州 510515)

导航就是引导舰船、飞机、导弹等航行体到达预定目的地的过程。完成导航任务的设备叫导航系统，以航空导航为例，测量飞机的位置、速度、姿态等导航参数，通过驾驶员或自动驾驶仪引导其按预定航线航行的整套设备就是飞机的导航系统。能测得航行体导航参数的物理原理和技术很多，因此有各种类型的导航，除惯性导航外有无线电导航、卫星导航等。有些航行体的导航任务并不需要驾驶员操纵和控制，而是由航行体自身设备自动测出导航参数，由航行体上的控制系统自动完成，这种系统称为制导系统。惯性导航以牛顿定律为理论基础，利用惯性敏感元件测量导航参数。最主要的惯性敏感元件是加速计和陀螺仪。

一、加速计

加速计用于感测航行体的加速度，图1为其原理图。质量为 m 的重物两边各系一倔强系数为 k 的弹簧，两弹簧另一端固定在基座上。航行体以加速度 a 沿加速计敏感方向运动时，由于惯性力，重物相对于基座后移 Δs ，并拉伸前弹簧，压缩后弹簧，弹力、惯性力平衡时有

$$ma = 2k\Delta s \quad \therefore a = 2k\Delta s/m$$

所以，从 Δs 可感测出航行体的加速度。

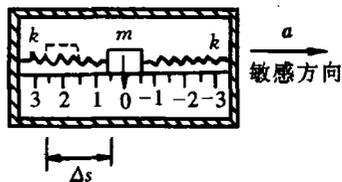


图1 加速计原理图

二、陀螺仪

陀螺仪用于感测航行体的旋转。图2为三自由度陀螺仪，由转子、内框、外框构成。转子是质量对称分布的刚体，在内框中高速旋转，其

角速度叫自转角速度，其轴叫自转轴。内框可绕内框轴相对于外框转动，外框又可绕外框轴相对于基座转动，这两种转动的角速度叫牵连角速度，图3为二自由度陀螺仪，只有一个框

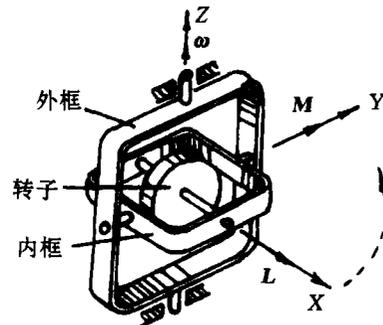


图2 三自由度陀螺仪及其进动

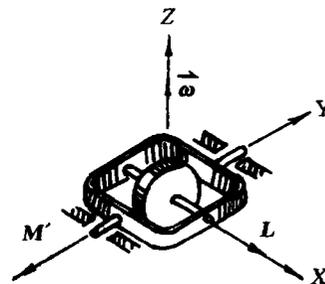


图3 二自由度陀螺仪及其进动

架。后来人们又研制出了许多采用特殊支承方法的无框架刚体转子陀螺仪。随着科学技术的发展，人们又相继发现了数十种物理现象可以用来感测旋转。“陀螺”希腊文原意为“旋转指示器”，因此任何装置，不论基于何种原理，只要能感测旋转，都可称为陀螺仪。从这个观点出发，现在又出现了许多新型陀螺仪，如激光陀螺仪、粒子陀螺仪等，它们不是建立在牛顿定律基础之上，本文不涉及这些陀螺。

1. 陀螺仪的基本特性

①三自由度仪的定轴性 三自由度陀螺仪的转子高速旋转时，若不受任何外力矩，自转轴

相对于惯性空间方向永不改变。

②三自由度陀螺仪的进动性 三自由度陀螺仪在垂直于自转轴方向受到外力矩作用时,陀螺自转轴绕第三个正交轴转动,这种特性称为陀螺的进动。如图2,转子绕X轴以角动量 \vec{l} 自转,若受到沿Y方力矩 \vec{M} 的作用,则 \vec{l} 沿最短路径绕Z轴以角速度 $\vec{\omega}$ 转向 \vec{M} , $\vec{\omega}$ 叫进动角速度。当外界对陀螺施加力矩使陀螺进动时,陀螺必然也对外界施加反作用力矩 \vec{M}' ,称为陀螺力矩。 \vec{M} 、 \vec{l} 、 $\vec{\omega}$ 、 \vec{M}' 之间关系为

$$\vec{M} = \vec{\omega} \times \vec{l} \quad \vec{M}' = -\vec{M} = \vec{l} \times \vec{\omega}$$

以转子为参照系,陀螺力矩可认为是转子既自转又进动而受到的科氏惯性力矩。

③二自由度陀螺仪的进动 如图3,二自由度陀螺仪自转角动量 \vec{l} 沿X方向,基座带动框架连同转子一起绕Z轴以角速度 $\vec{\omega}$ 转动时,自转角速度和牵连角速度共同作用,产生陀螺力矩 $\vec{M}' = \vec{l} \times \vec{\omega}$,在此力矩作用下,陀螺绕框轴转动,称为二自由度陀螺仪的进动。这表明二自由度陀螺仪能敏感地绕其缺少自由度轴线转动。

2. 陀螺仪的应用 飞机在空中飞行,飞行员必须判明飞机的姿态角,才能正确操纵。

①垂直陀螺仪 能感测出航行体倾斜角——航行体绕其纵轴之转角和俯仰角——航行体与水平面之夹角。如图4,三自由度陀螺仪

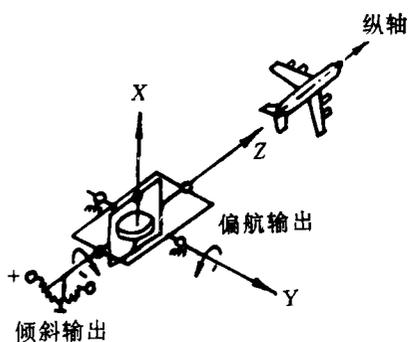


图4 垂直陀螺仪

转子轴X与航行体立轴重合,外框轴Y与航行体横轴重合,内框轴与航行体纵轴重合。电位器滑臂安装在内框轴上,电位器绕组与航行体固联。航行体倾斜时,内框轴与转子轴方向不变,

电位器滑臂与绕组相对转动,转角就等于航行体倾斜角,于是电位器输出与倾斜角成比例的电信号。若在外框轴Y上安装电位器滑臂,可输出俯仰角信号。

②方向陀螺仪 能感测出航向角——从正北顺时针到航行体纵轴之转角和俯仰角的陀螺仪称为方向陀螺仪,在航行体上安装情形如图5。

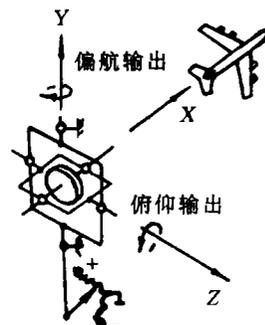


图5 方向陀螺仪

③积分陀螺仪 如图6,在二自由度陀螺仪框轴Y(输出轴)上安装一阻尼器和电位器滑臂,电位器绕组固定在航行体上。当航行体绕Z轴(输入轴)以角速度 $\vec{\omega}$ 旋转时,产生陀螺力矩 $\vec{M}' = \vec{l} \times \vec{\omega}$,使陀螺绕框轴以角速度 $\vec{\phi}$ 进动,同时阻尼器产生阻尼力矩 $k_1\vec{\phi}$,平衡时有

$$l\omega = k_1\dot{\phi}, \text{ 则 } \dot{\phi} = \frac{k_1}{l}\omega$$

$$\phi = \int_0^t \frac{k_1}{l}\omega dt = \frac{k_1}{l}\psi = k\psi$$

k_1 、 k 为常数, ϕ 为框绕其轴的转角,等于电位器滑臂的转角, ψ 为基座绕Z轴的转角,于是从电位器输出可感测出航行体绕Z轴的转角。

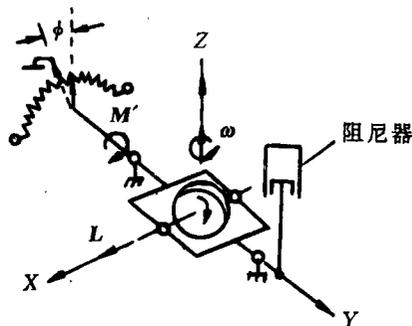


图6 积分陀螺仪

三、陀螺稳定平台

陀螺稳定平台的作用是建立一个和航行体旋转运动相隔离的、相对于惯性空间或相对于地球姿态稳定、用于安装加速度计的平台。

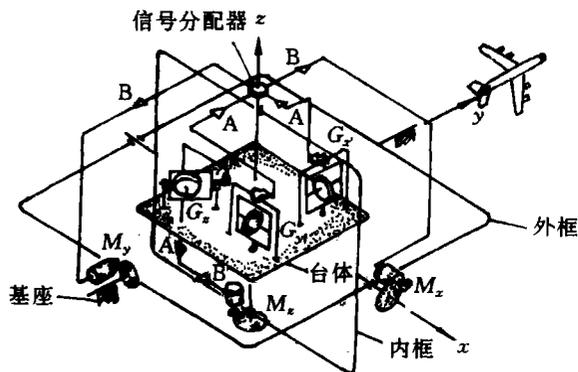


图7 三轴陀螺稳定平台
(A. 前置放大器; B. 平台控制回路)

1. 基本结构 图7是惯性导航系统中三轴陀螺稳定平台示意图,由外框、内框和台体构成常平架结构,和三自由度陀螺仪相似,但平台不像三自由度陀螺仪转子那样高速旋转.以飞机上的安装方式为例,当飞机水平飞行时台体轴子和当地铅重线一致,叫方位稳定轴;内框平面垂直于水平面,其轴 x 平行于飞机横轴,叫横向稳定轴;外框轴 y 沿飞机纵轴,叫纵向稳定轴.各轴上装有电机 M_x, M_y, M_z ,分别称为横向稳定电机、纵向稳定电机和方位稳定电机.台体面上安装有三个二自由度陀螺仪 G_x, G_y, G_z (也可以是两个三自由度陀螺仪),其输入轴互相垂直, G_z 输入轴沿台体轴, G_x, G_y 输入轴平行于台面。

2. 稳定原理 常平架结构本可以使平台和飞机偏航、倾斜、俯仰相隔离,但由于基座和框架间轴承摩擦及静不平衡等干扰而引起台体转动,这一转动被相应的陀螺仪感受并输出与转角成比例的电信号,经放大后控制相应的稳定电机,产生与干扰力矩大小相等、方向相反的恢复力矩,从而使台体不受航行体旋转运动的影响,保持相对惯性空间姿态的稳定.要使平台相对于地球姿态稳

定,由于地球相对于惯性空间有一角速度,必须使平台相对于惯性空间有一同样的角速度.用计算机算出该角速度的三个分量,变为电信号加给相应的陀螺仪,控制各稳定电机,使平台相对地球姿态稳定。

3. 信号分配器 平台上的陀螺仪相对于内外框的方位是变化的,因此除 G_z 可直接控制 M_z 外, G_x, G_y 不能直接控制 M_x, M_y .图8(a)、(b)为无信号分配器时图7的俯视图(未画 G_z 和 M_z),在图8(a)中航向角为 0° 时 G_y 感受纵向干扰力矩,信号加给 M_y , G_x 感受横向干扰力矩,信号加给 M_x ,此时信号分配正确.但如图8(b),航向角变为 90° 时, G_x, G_y 输入、输出轴方向不变, G_x 变为感受纵向干扰力矩,但却仍然控制着 M_x ; G_y 变为感受横向干扰力矩,但却仍然控制着 M_y .为了解决这一矛盾,设置了信号分配器,这实质上是一个旋转变压器,如图8(c)、(d)、(e).转子安装在方位稳定轴上,转子上有两个互相垂直的绕组 G'_x, G'_y ,分别与 G_x, G_y 输

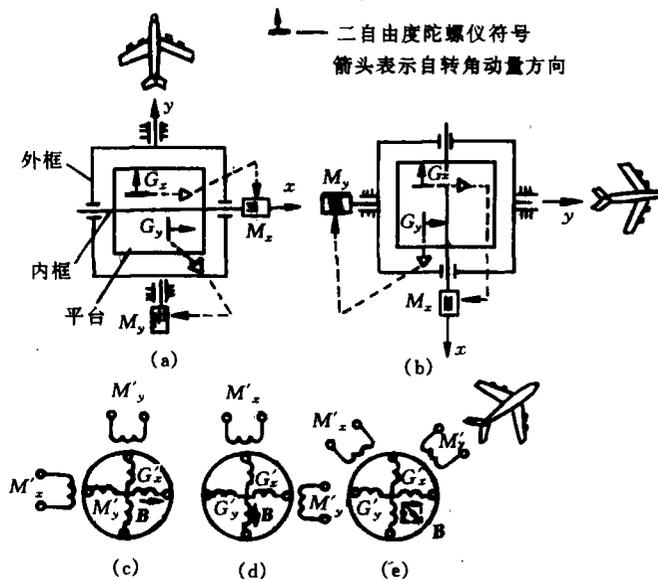


图8 信号分配器的作用和原理

出端相连.定子固定在内框架上,定子上也有两个互相垂直的绕组 M'_x, M'_y ,分别与 M_x, M_y 相连.当航向角为 0° 时 G'_x, G'_y, M'_x, M'_y 位置如图8(c),此时若有干扰力矩作用于纵向稳定轴, G_x 不敏感此力矩而 G_y 敏感之, G_y 输出电信

等离子体聚合简介

刘之景

(中国科学技术大学基础物理中心 合肥 230026)

等离子体聚合是一种特殊类型的等离子体化学,它包括等离子体种类间的反应,等离子体和表面种类间以及表面种类之间的反应.有机单体或有机金属单体的辉光放电形成等离子体聚合物,并以薄膜或粉末形式沉积在衬底的表面上.

等离子体聚合的系统研究始于60年代,目前它是一个活跃的研究领域,并将具有很大的商业市场.它的研究内容包括:等离子体化学、等离子体加工参量、等离子体聚合物的性质和分析技术以及它的应用等.与此相关的问题还有:金属或绝缘体的溅射,有机等离子体合成,无机薄膜沉积,聚合物膜的等离子体刻蚀,低温

等离子体粉末,聚合物表面改性等.

等离子体聚合物有一些有趣的应用,主要是因为:它容易被制成厚度为50纳米到1微米的等离子体聚合物薄膜,这样的薄膜常常能非常强的凝聚和粘附到玻璃、金属、聚合物的表面上.这种薄膜无孔且高度交联,用等离子体聚合加工方法容易制备多层膜和具有物理化学特性的薄膜.

对等离子体聚合物薄膜性质的控制,通常采用如下办法:

1. 选择单体:如甲烷、乙烷、环乙烷、乙炔、乙烯、苯等碳氢化合物;又如吡啶、乙炔吡啶、烯丙胺等含极性基的碳氢化合物;氟碳化合物;环

号给 G_y' , G_y' 中产生磁场 \vec{B} , 其方向和 M_x' 垂直,不在 M_x' 中产生感应电动势,而和 M_y' 平行在 M_y' 中产生感应电动势控制 M_y 以平衡干扰力矩.如图8(d),当航向角变为 90° 时, G_x , G_y , G_x' , G_y' 方位不变, M_x' , M_y' 转过 90° . 若仍有干扰力矩作用于纵向稳定轴,对此力矩此时 G_y 不敏感而 G_x 敏感, G_x 输出电信号给 G_x' , G_x' 中产生磁场 \vec{B} , 其方向仍和 M_x' 垂直和 M_y' 平行,在 M_y' 中产生感应电动势控制 M_y . 如图8(e),当航向为 ϕ , $0^\circ < \phi < 90^\circ$ 时,仍假设干扰力矩作用于纵向稳定轴,此时 G_x , G_y 均感受到这一力矩,并输出电信号给 G_x' , G_y' , G_x' , G_y' 中均产生磁场,合磁场 \vec{B} 仍和 M_x' 垂直和 M_y' 平行,仍然只在 M_y' 中产生感应电动势而控制 M_y . 同理,沿横向稳定轴,或同时沿横向、纵向稳定轴作用有干扰力矩时,信号分配器都能正确地将 G_x , G_y 感受到的信号正确分配给 M_x , M_y .

四、惯性导航的物理原理

安装在陀螺稳定平台上的、敏感方向互相垂直的三个加速度计可检测出航行体在三个互

相垂直方向上相对于惯性空间或相对于地球的加速度 a_x , a_y , a_z , 并除去重力加速度等不需要的加速度,用计算机积分一次可得航行体的速度 v_x , v_y , v_z , 再积分一次可得航行体的位置 x , y , z . 于是通过惯性导航系统,便可即时地提供全部导航参数. 还有一种捷联式惯性导航系统,陀螺仪和加速度计直接固联于航行体上,取消了陀螺稳定平台. 由于这时加速度计输出的加速度分量是沿航行体坐标轴的,需经计算机转换成沿惯性坐标系或沿地球坐标系的加速度分量,这种转换起着“数学平台”的作用. 这种系统要求计算量大,计算速度高,事实上是在高速计算机问世后才得以实现的.

五、惯性导航的特点

惯性导航由于不依赖于任何外界信息,不受外界电磁波、光波和周围气象条件等干扰,也不向外界发射任何能量,所以有较强的抗干扰能力和良好的隐蔽性. 因此惯性导航系统在导弹、潜艇、飞机、宇宙飞船中得到了广泛的应用.