

惯性导航陀螺平台

西北工业大学 郭富强 毛玉增 合编



国防工业出版社

内 容 简 介

这本教材是根据北京航空学院、南京航空学院及西北工业大学三院校“航空陀螺仪表与惯性导航”专业共同审订的《惯性导航陀螺平台》课程编写大纲编写的。本教材对各类陀螺稳定平台的工作原理及特点、单轴稳定平台的分析、三轴稳定平台的构成原理，工作原理及性能分析、平台机械设计中的一些问题及典型结构原理等内容作了比较系统的阐述。

本教材适用于高等工业学校“航空陀螺仪表与惯性导航”专业，也可供从事惯性导航，惯性制导及陀螺稳定平台方面工作的工程技术人员参考。

惯 性 导 航 陀 螺 平 台

郭富强 毛玉增 合编

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

西北工业大学印刷厂印装 内部发行

*

787×1092 1/16 印张 10.75 257 千字

1980 年 12 月第一版 1980 年 12 月第一次印刷 印数 0001—1000 册

统一书号：N 15034(三教)23 定价 1.17 元

目 录

前 言

第一章 陀螺稳定器的工作原理

§ 1—1 陀螺稳定器的分类	3
§ 1—2 直接式陀螺稳定器的工作原理	4
§ 1—3 间接式稳定平台的工作原理	6
§ 1—4 动力式稳定平台的工作原理	7
§ 1—5 惯导系统中的稳定平台——指示式稳定平台	13
§ 1—6 各类陀螺稳定器的主要优缺点比较	19

第二章 单轴稳定平台

§ 2—1 惯导平台敏感元件——陀螺仪的传递函数	21
§ 2—2 伺服放大器的传递函数	27
§ 2—3 伺服力矩电机的传递函数	28
§ 2—4 单轴稳定平台台体动力学方程	30
§ 2—5 单轴稳定平台伺服回路的传递函数	36
§ 2—6 单轴稳定平台伺服回路的静态分析	41
§ 2—7 伺服回路的主要性能指标	42
§ 2—8 伺服回路的校正	48
§ 2—9 惯导平台伺服回路分析实例	56
§ 2—10 放大器、力矩电机的饱和非线性及 平台轴干摩擦对平台伺服回路性能的影响	64

第三章 三轴稳定平台

§ 3—1 三轴稳定平台的坐标系及向量在坐标系中的变换	78
§ 3—2 三轴稳定平台各环架驱动讯号的合理分配	80
§ 3—3 三轴稳定平台的构成原理及工作原理	85
§ 3—4 三轴稳定平台的动力学方程及传递函数阵	90
§ 3—5 第一类三轴稳定平台系统交叉耦合及 三轴稳定平台方案中陀螺仪敏感轴的配置	101
§ 3—6 四环三轴稳定平台的构成和工作原理	107
§ 3—7 四环三轴稳定平台的力矩方程式及环架力矩电机所需力矩的计算	127
§ 3—8 三轴稳定平台的误差分析	132
§ 3—9 LTN-51 惯导系统的 P-1 平台简介	137

第四章 惯导平台的机械结构

§ 4—1 惯导平台机械结构设计中的几个问题..... 142

§ 4—2 平台环架的力矩装置..... 149

§ 4—3 环架系统的典型结构介绍..... 154

§ 4—4 外装式和内装式环架系统优缺点的比较..... 164

结束语..... 165

前 言

惯性导航系统和惯性制导系统统称为惯性系统。在现代尖端科学技术中，最引人注目的现代国防尖端科学技术就是所谓的战略武器技术。洲际导弹，远程轰炸机和核潜艇是当代所谓的三大战略武器。原子弹、氢弹以及美国最近投入生产的中子弹，是用这些战略武器投放的杀伤力很大的弹头，当然它们是这些战略武器的重要部分。而惯性导航和惯性制导系统则是这些战略武器中必不可少的另一重要部分。这是因为它们保障了武器的导航和命中精度。没有惯性制导系统，导弹就不能进入预定的轨道，从而就不能准确地命中目标；没有惯性导航系统，飞机和核潜艇就不能准确地判定自己所在的位置，就不能准确地发射导弹，也就谈不上它的战略地位。

惯性导航系统是一种完全自主的导航系统。因为它不需要任何外部讯息就可独立地完成运载体的导航任务，所以它比起诸如天文导航、无线电导航、多普勒导航、仪表导航以及地标导航等方式来说，具有其独特的优点：它不受外界（自然的或人工的）干扰因素的影响，因而它在导航事业发展的现阶段占有极其重要的地位。现代新型的航空、航天以及航海运载体大多是用它，或以它为中心的组合适导系统进行导航的。

惯性导航是以在运载体上测得本身的运动加速度，并对其进行二重积分以求得运载体位置为原理的一种导航方式。不论那一种型式的惯性导航系统，要实现这一原理，都必须满足四项基本要求：第一，系统里必须以物理方式实现或计算贮存一个坐标系，以便使运载体加速度和重力加速度的测量值能够在其上进行分解；第二，系统里必须要有能够测得运载体加速度和重力加速度的元件；第三，必须预先知道重力场的分布，以便从惯性元件测出的加速度中计算出运载体的惯性加速度；第四，系统必须能够完成二重积分的运算。在具体的惯导系统中，第一个要求可通过陀螺仪来实现；第二个要求可通过加速度计来实现；第三个要求或者是由重力分解器以解析方式给定，或者是通过体拉调谐方式以几何方式给定来实现；第四个要求可通过计算机来实现。

在对惯导系统进行分类时，惯性坐标系和导航坐标系的概念是十分重要的。对目前的惯导系统来讲，所谓惯性坐标系，它是一个原点在地球中心且相对惯性空间不旋转的坐标系，而导航坐标系，则是一个原点在运载体所在地且相对地垂线和当地水平面内的某一航向基准（如地理真北方向）不旋转的坐标系。导航坐标系相对惯性坐标系的角位移就与运载体在地球上的位置（就是导航数据，如经度、纬度）有关，因为惯导系统求解导航数据的方法也是通过以物理方式实现或计算贮存这两种坐标系而得到的，所以，根据对这两种坐标系的不同实现方式惯导系统可分为三类。第一类称为几何式惯导系统，它是通过平台结构以物理方式实现惯性坐标系和导航坐标系的导航系统；第二类称为半解析式惯导系统，它是通过平台结构以物理方式实现惯性坐标系或导航坐标系两者之一的惯导系统；第三类称为解析式惯导系统，它是惯性坐标系和导航坐标系两者都不是通过平台结构以物理方式实现，而是在计算机内计算贮存的惯导系统。因为前两类惯导系统都离不开陀螺稳定平台，所以统称为平台式惯导系统，而把不需要陀螺稳定平台的第三类惯导系统称为捷联式惯导系统。

本课程为“航空陀螺仪表与惯性导航”专业的一门专业课。它以讲解与惯性导航陀螺稳定平台总体有关的内容（如方案构成、工作原理、误差分析及结构设计等）和与平台伺服回路有关的内容（如伺服回路的性能指标、分析与参数选择等）为主。关于休拉回路有关问题的讨论，将在《惯性导航系统》课程中进行。因为惯性制导系统中的陀螺稳定平台和惯性导航系统中的陀螺稳定平台在本教材所涉及的范围内没有多少本质差别，所以本课程的基本内容也适用于惯性制导系统中的陀螺稳定平台。因为陀螺稳定的原理除了在惯性系统中应用以外，还在其它方面得到了广泛的应用，所以本课程也对其它类型的陀螺稳定平台或陀螺稳定器的工作原理作了介绍。

因为陀螺稳定平台是一种以安装有加速度计的平台台体这一机械部件为控制对象的、以陀螺仪为敏感元件的机电控制系统，它的工作原理、分析与设计是建立在《理论力学》、《陀螺仪原理与结构》、《自动控制理论》、《自动器元件》、《电子线路》及《机械设计》等课程基础上的，所以在学习本课程前读者必须具有以上各课程的基本知识。通过本课程及其它基础课程的学习，读者应具有从惯导系统对稳定平台总体的主要技术要求和稳定平台的使用环境出发，对稳定平台总体进行方案论证、元部件选择，对元部件的性能提出要求等方面的初步能力，具有对现有稳定平台进行反设计和性能分析的初步能力。

在建立惯导平台或惯性器件的运动方程时，经常要用到惯性坐标系和地理坐标系。虽然我们在前面给惯性坐标系和地理坐标系下定义时把它们的原点分别规定在地球中心和运载体所在地，但在建立惯导平台和惯性器件运动方程时，往往把它们的原点分别从地球中心和运载体所在地移到惯导平台或惯性器件的支承中心，这并不改变惯性坐标系和地理坐标系的定义。对此，读者应加以注意。

从机械结构上讲，三轴稳定平台是由三个、四个甚至五个支承环架通过一定的装配关系组合在一起的机械装置。在讨论它的构成原理及工作原理时，要用到好几个坐标系，而且除惯性坐标系外，各坐标系在空间的方位都是可变的，所以在学习本课程时，搞清各坐标系的定义、各坐标系及其各轴的记号、各坐标系间的关系，建立空间概念是非常重要的，读者对此必须加以重视。在本教材中，在讨论平台各环架的运动和建立平台的运动方程时，采用了角运动传递矩阵和力矩传递矩阵的符号，读者必须搞清各符号的含意及其型式才能有利于理解各环架运动的相互关系和力矩对各环架运动的影响。

附带说明一下，由于印刷条件的限制，本书插图中的向量符号是用带箭头的字母表示的，而正文中的向量符号则用粗体字母来表示，阅读时请予注意。

在本教材的编写过程中，三机部 618 研究所和国营华燕仪表厂，七机部 1 院 16 所等单位，从资料上给予了许多帮助；在本教材的编写过程中，北京航空学院的于波同志、南京航空学院的郭秀中同志以及西北工业大学的俞济祥、梅硕基、郭子正、任思聪等同志曾提出过许多宝贵意见，编者在此表示衷心感谢。

第一章 陀螺稳定器的工作原理

§ 1—1 陀螺稳定器的分类

航行中的军舰,要想使火炮的瞄准和鱼雷的发射具有所需的精确度,必须消除海浪引起舰体摇摆的影响。欲使行驶于崎岖不平的地面上的坦克的火炮瞄准目标,欲使飞机上照像机的镜头、轰炸瞄准具的观测线或雷达设备的天线等稳定在给定方位上,欲使弹道导弹上惯性制导系统的加速度计在导弹飞行的主动段保持发射前的空间方位等等,都必须将上述这些要稳定的对象同运载体的角运动相隔离,以免基座角运动引起的干扰作用破坏被稳定对象的期望方位。这些就是陀螺稳定器所要完成的任务。由此可见,所谓陀螺稳定器,是一种以陀螺仪为敏感元件使被稳定对象在空间保持给定方位或使其按一定规律运动的陀螺装置。

自从1904年德国工程师施里克(Otto Schlick)设计出世界上第一个船舶侧向摇摆陀螺稳定器以来,陀螺稳定器的发展已经历了近八十年的历史。在这段时间里,出现了用于各个领域里的不同用途的陀螺稳定器。时至今日,它们已成为许多军事装备和空间技术领域里不可缺少的一部分。当然各种具体的陀螺稳定器随其型号不同,它们的工作原理和结构也不尽相同。我们不可能,也没有必要对每一种都进行分析和研究。我们的目的是要从中找出规律性的东西。为此,我们需要对它们进行分类。目前,虽然在国外对陀螺稳定器的分类看法不尽一致(可参考文献〔3〕、〔4〕、〔5〕),但大多数都是按它们的工作原理和稳定轴的数目来分类的。

按工作原理分类,主要是依据在稳定过程中陀螺力矩参与工作的程度和陀螺仪在稳定器中所起的作用来区别的。按照这种分法,陀螺稳定器可分为:

(一)直接式陀螺稳定器 作用于被稳定对象上的干扰力矩完全依靠陀螺力矩来平衡的一种陀螺稳定器。在此种装置中,陀螺仪既是稳定器的敏感元件,又是稳定器的执行元件。

(二)间接式陀螺稳定器(间接式陀螺稳定平台或间接式稳定平台) 全部依靠伺服系统的卸荷力矩来平衡加在被稳定对象上的外干扰力矩的一种陀螺稳定器。在此种装置中,陀螺装置仅起伺服系统角位置敏感元件的作用,它和被稳定对象往往安装在运载体上不同的地方。

(三)动力式陀螺稳定器(动力式陀螺稳定平台或动力式稳定平台) 在对作用于被稳定对象上的干扰力矩的平衡过程中,陀螺力矩仅在过渡过程中起作用,稳态时主要依靠伺服系统的卸荷力矩起作用的一种陀螺稳定器。这里,陀螺仪除作为敏感元件外,还作为反馈元件参与系统的工作。

(四)指示式陀螺稳定器(指示式陀螺稳定平台或指示式稳定平台) 在对作用于被稳定对象上的干扰力矩的平衡过程中,陀螺力矩不起作用(对双自由度陀螺仪而言)或其作用小到可以忽略的程度(对角动量很小的单自由度速率积分陀螺仪而言)的一种陀螺稳定器。这里,外干扰力矩的全部或大部依靠伺服系统的卸荷力矩来平衡,陀螺仪仅起角度或角速度敏感元件的作用。需要指出,以双自由度陀螺仪为敏感元件的指示式陀螺稳定器与间接式陀螺

稳定器是有区别的。这种区别主要在机械结构上。前者，陀螺仪和被稳定对象同安装在稳定器的台体上，两者有密切的机械联系；后者，陀螺仪和被稳定对象两者没有直接的机械联系。

- 按稳定轴的数目，陀螺稳定器可分为：
- (一)单轴陀螺稳定器（单轴陀螺稳定平台或单轴稳定平台） 能使被稳定对象在空间绕某一根轴保持给定方位的陀螺稳定装置。
 - (二)双轴陀螺稳定器（双轴陀螺稳定平台或双轴稳定平台） 能使被稳定对象稳定于互相正交且相对空间保持给定方位的两根轴组成的平面内的陀螺稳定装置。
 - (三)三轴（空间）陀螺稳定器（三轴(空间)陀螺稳定平台或三轴(空间)稳定平台） 能使被稳定对象在空间绕三根互相正交的轴保持给定方位的陀螺稳定装置。
- 为了简便起见，在今后的叙述中，有时将陀螺稳定器或陀螺稳定平台简称为稳定器或稳定平台。

§ 1—2 直接式陀螺稳定器的工作原理

直接式陀螺稳定器有着非常广泛的生活基础：骑自行车的人会感到，自行车的速度越快，车身也越稳定。这是因为自行车的车轮转得越快，由它产生的陀螺力矩越大的缘故。当自行车转弯时，我们会很自然地一面操纵车头转动，一面使车身向转弯方向倾斜一个适当的角度，而且，车子的速度越快，车身的倾斜角度也应越大，否则，车身将会向外倾倒。这是因为转弯时必须由车身倾斜提供一个重力力矩去平衡车轮产生的陀螺力矩的缘故。此外，在杂技表演中，也有许多地方应用了直接式陀螺稳定器的工作原理。

直接式陀螺稳定器是在实践中最早采用的陀螺稳定装置。在二十世纪初，航海事业的发展已经有了一定的水平，但船舶在风浪中的摇摆引起的后果却非常严重。若摇摆的角度过大，将会使船的阻力加大，速度降低，燃烧消耗增加，续航时间缩短，严重时，可能使船舱进水，甚至使船体倾复。因摇摆时惯性力的作用，使船体各部的内应力增加，从而可能使船上的部件损坏。对乘客来说，船体摇摆带来的痛苦是不言而喻的。对军用舰艇来说，舰体摇摆会使火炮和鱼雷发射的精度降低。为此，人们才设计和制造出用于舰船上的陀螺稳定器。

一九零四年，德国工程师施里克利用陀螺的力学特性设计了一个船舶侧向摇摆稳定器，其结构示意图如图 1-1 所示。在图 1-1 中：装有陀螺转子的内环 1 用轴颈和轴承支承在支架 2 上，支架 2 和船体固连。陀螺的下部有一个配重 3，其作用是使陀螺本身具有下摆性，并成为稳定的系统。4 是一个阻尼器，其作用是对带有陀螺转子的内环 1 相对船

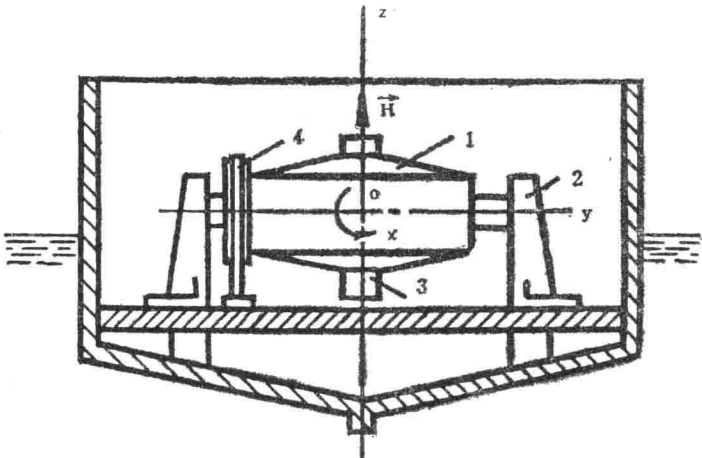


图 1-1 施里克船舶稳定器简图

体的振动提供阻尼。陀螺大体上装在船体的中心部分，其重量约为船重的百分之一。船舶侧向摇摆稳定器的工作原理可简述如下。如图 1-2 所示：当船舶在海浪的侧向摇摆力矩 M_D （其大小设为常值）作用下摇摆时，绕船体坐标系 $ox_b y_b z_b$ 的纵轴 ox_b 的角速度为 $\dot{\alpha}$ ， $\dot{\alpha}$ 对陀螺来说，是牵连角速度，因此，沿陀螺内环坐标系 $oxyz$ 的 oy 轴方向就有陀螺力矩 $H\dot{\alpha}$ 。在 $H\dot{\alpha}$ 的作用下，陀螺将绕 oy 轴以角速度 $\dot{\beta}$ 转动，从而沿 ox 轴出现了第二个陀螺力矩的 $H\dot{\beta}$ ， $H\dot{\beta}\cos\beta$ 将通过陀螺内环轴的支承传给船体，这个力矩与 M_D 大小相等，方向相反，从而抑制了船舶绕纵轴的角速度 $\dot{\alpha}$ 。以上的解释是对 M_D 的大小为常值而说的。实际上，海浪对船体的纵摇是不规则的摇摆运动。在这种情况下，因为船体绕纵轴、陀螺绕内环轴都是有惯性的，所以 $H\dot{\beta}\cos\beta$ 和 M_D 不一定同相，因而 $H\dot{\beta}\cos\beta$ 不可能全部用以抑制船舶的纵摇，尤其是当 M_D 的周期和船体、陀螺所组成的系统的固有周期相同时， $H\dot{\beta}\cos\beta$ 不但不能起到抑制 M_D 的作用，反而使船体共振而使纵摇振幅越来越大。解决这个问题的办法是沿陀螺的内环轴安装一个阻尼器。当陀螺绕内环轴转动时，阻尼器产生与 $\dot{\beta}$ 大小成正比的但方向相反的阻尼力矩，该力矩把海浪加给船体的动能以热量的形式耗散一部分。这样，就可以在船舶-陀螺系统固有频率附近大大抑制了船舶的纵摇振幅。阻尼器的存在也有不利因素，主要表现在甚低频的干扰力矩可使船体纵摇的振幅稍有增大。这是因为在干扰力矩的甚低频区，阻尼作用把本来起抑制船体摇摆作用的陀螺力矩减小了的缘故。在设计和制造中，可通过设计和调整阻尼器的阻尼系数使稳定器工作在比较理想的状态。因为在抑制船舶纵摇的过程中，以上叙述的陀螺稳定器没有引入其它型式的能源，所以又称它为被动式或无源式陀螺稳定器。

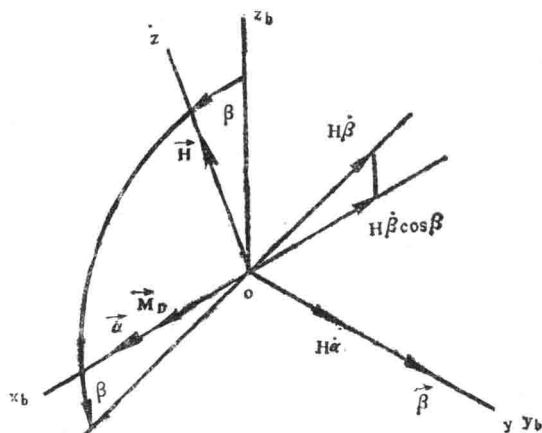


图 1-2 施里克船舶稳定器工作原理图

施里克陀螺稳定器的缺点，在于它的阻尼器对任何外来作用的反应都相同。按照我们所期望的最佳效应的要求，抑制作用应与经常改变着的波浪作用相适应。能解决这一问题的稳定器是所谓的有源式陀螺稳定器。关于有源式陀螺稳定器的工作原理和直接式陀螺稳定器的理论可参考文献〔6〕、〔7〕。

在陀螺稳定器的发展过程中，直接式稳定器原理还曾用于坦克火炮稳定器上，也设想过用来稳定单轨列车（文献〔6〕、〔7〕）。虽然这些装置是古老的，但它的原理即使在现代空间技术上也还被采用。如人造地球卫星的姿态控制就采用了这一原理（文献〔8〕）。当卫星被送上天时，在与火箭分离之前，由火箭中的一个施转装置使它以每分钟 10 至 100 转的转速旋转。旋转着的卫星就好象陀螺一样，旋转轴始终指向一个方向，就不会随意翻滚了。如有使卫星姿态改变的干扰力矩作用在它上面，按照直接式稳定器的作用原理，陀螺力矩就会抑制干扰力矩引起的扰动。

§ 1—3 间接式稳定平台的工作原理

间接式稳定平台在实践中得到了非常广泛的应用。它可以是单轴的、双轴的和三轴的。例如在苏联生产的 KCI-2 型航向系统中, 为了消除陀螺机构 $\Gamma A-2$ 的支架误差, 需要将陀螺机构 $\Gamma A-2$ 的航向测量轴保持在地垂线附近。为此采用了一个双轴间接式稳定平台。在此装置中, 整个陀螺机构 $\Gamma A-2$ 是被稳定对象, 它是绕水平面内两个相互垂直的轴稳定的。水平信号由远距传送式垂直陀螺传感器 $A\Gamma\Delta-1$ 提供。此外, 间接式陀螺稳定器也广泛用于坦克上的火炮、飞机上的航空摄影机及雷达天线等的稳定。

间接式稳定器的结构原理和工作原理是非常简单的。它就是一个以陀螺仪为角位置敏感元件的普通伺服系统。以下我们以双轴间接式稳定平台为例加以介绍。

双轴间接式稳定平台的传感器可以是垂直陀螺传感器, 如苏联生产的 $\Delta\Gamma-6M$ 垂直陀螺传感器, 也可以是双轴动力式稳定平台, 如苏联生产的 $\Pi\Gamma B-4$ 中心陀螺垂直器等。图 1-3 示出了以垂直陀螺传感器为角位置敏感元件的双轴间接式稳定平台的作用原理图。在图 1-3 中, 被稳定对象安装在平台上。在平台外环轴和平台(内环)轴上安装了稳定电机 SM_1 和 SM_2 、电位计式传感器 p_1 和 p_3 的电刷以及减速器。陀螺仪的外环轴和平台的外环轴平行, 它们都安装在运载体上。在陀螺仪的外环轴和内环轴上分别安装了电位器式传感器 p_2 和 p_4 的电刷。 p_1 和 p_2 的绕组分别安装在各自的基座上。 p_3 和 p_4 的绕组分别安装在平台的外环和陀螺仪的外环上。垂直陀螺传感器及其外环轴上的电位器 p_2 、安装在平台外环轴上的电位器 p_1 和伺服电机 SM_1 以及伺服放大器 A_1 组成了一个使平台绕外环轴稳定的单轴间接式稳定平台。垂直陀螺传感器及其内环轴上的电位器 p_4 、安装在平台内环轴上的电位器 p_3 和伺服电机 SM_2 以及伺服放大器 A_2 组成了一个使平台绕内环轴稳定的单轴间接式稳定平台。今以平台外环轴的单轴间接式稳定平台为例来介绍它的工作原理。

(一) 当有外干扰力矩 M_D 沿平台外环轴 ox_0 作用在平台上时, 平台将绕 ox_0 轴产生旋转

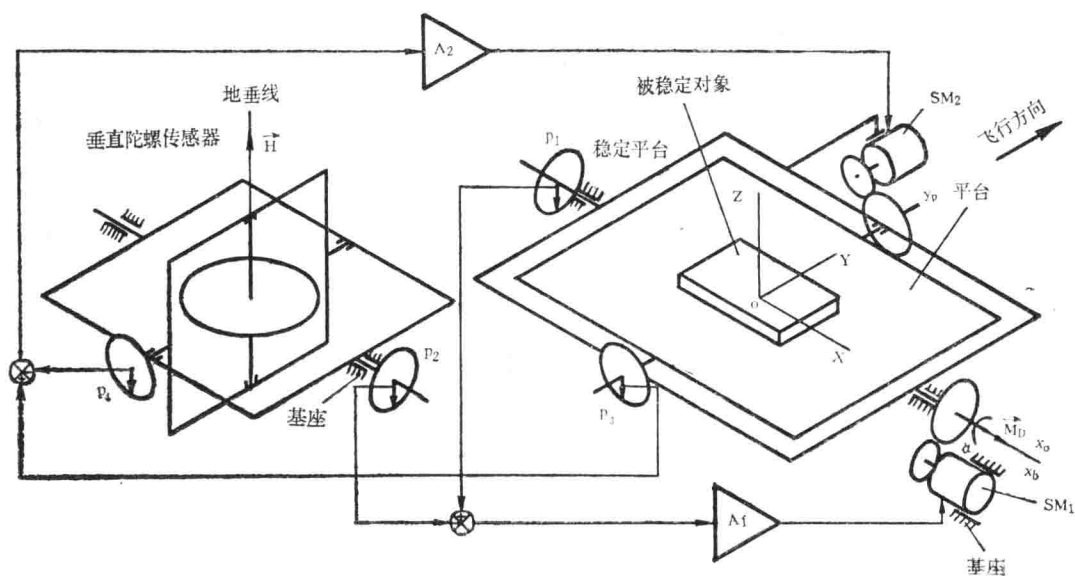


图 1-3 双轴间接式稳定平台的一种结构原理方案

角速度 $\dot{\alpha}$ ，从而带动电位器 p_1 的电刷沿绕组转动 α 角。这样， p_1 就输出与转角 α 成比例的讯号。这时，因为垂直陀螺传感器的稳定作用，故电位器 p_2 的电刷仍处于原来的位置上。因之，进入放大器 A_1 的讯号仍为一从 p_1 来的且与 α 成比例的讯号。该讯号经放大器 A_1 放大后输入给伺服电机 SM_1 。 SM_1 产生与干扰力矩 M_D 方向相反的卸荷力矩以阻止平台绕外环轴的角速度 $\dot{\alpha}$ 的继续增大。当稳定电机的卸荷力矩和干扰力矩 M_D 的大小相等时，平台便处在稳定位置上。

(二)今设运载体相对其纵轴 ox_o 有倾斜角 ϑ_r ，因为 p_1 和 p_2 的绕组安装在基座上，故它们也和基座一起倾斜 ϑ_r 角，因之， p_1 和 p_2 输出同样大小的讯号。因该二讯号在放大器 A_1 中相互抵消，故平台仍保持在原来的位置上。也就是说，平台的外环轴方位始终跟踪着陀螺仪外环轴的方位。

关于外干扰力矩沿 oy_p 轴作用时平台的稳定过程和当运载体相对横轴有转角时平台内环轴方位始终跟踪陀螺垂直器内环轴方位的过程，读者可自己叙述。

一般用于航空上的陀螺垂直器在静基座上的精度，最好也不过是 $0.25^\circ \sim 0.2^\circ$ 左右。如果这个精度满足不了间接式稳定平台的要求，则可采取 ИГВ 型双轴动力式稳定平台作为水平基准的传感器。ИГВ-4 在静基座上的精度可在 5 角分以内。

§ 1—4 动力式稳定平台的工作原理

动力式稳定平台在技术上也得到了广泛的应用。它可以是单轴的，双轴的和三轴的。苏联 АП-5 型自动驾驶仪的航向稳定器可以把重量和转动惯量很大的轰炸瞄准具稳定在一定的航向上。ИГВ 型双轴动力式平台可以给许多系统提供飞机的姿态角讯息。АП-15 型自动驾驶仪是一个三轴动力式稳定平台，它可以作为飞机的姿态角和航向角的角度传感器。此外，动力式稳定平台也应用于坦克火炮的稳定、航空照像机和雷达天线的稳定等许多方面。

无论是双轴动力式稳定平台或三轴动力式稳定平台，它们的工作原理或参数选择都基于单轴动力式稳定平台，所以我们将首先对单轴动力式稳定平台的工作原理作一介绍。因为双轴动力式稳定平台的应用范围极广，我们在此也对其工作原理作一介绍。

1-4-1 单轴动力式稳定平台的工作原理及其系统的稳定性

(一)陀螺力矩的稳定作用 为了叙述问题比较清楚，我们先从一个普通的双自由度陀螺谈起。如图 1-4 所示： $ox_o y_o z_o$ 和 $ox_i y_i z_i$ 分别为与陀螺仪外环和内环相固连的坐标系。设沿外环轴 ox_o 作用有外干扰力矩 M_D ，如果不考虑陀螺仪的章动运动，则在它的作用下，陀螺仪就绕内环轴 oy_i 以相对角速度 $\dot{\epsilon}$ 进动。当不考虑陀螺仪基座的运动时， $\dot{\epsilon}$ 就是陀螺仪绕内环轴的绝对角速度。根据陀螺仪的进动原理，有

$$\dot{\epsilon} = \frac{M_D}{H \cos \epsilon} \quad (1-1)$$

与进动角速度出现的同时，又出现相应的陀螺

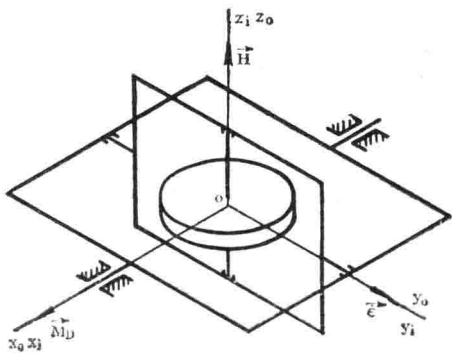


图 1-4 双自由度陀螺仪原理图

力矩 M_g ，其方向垂直于角动量 H 和 $\dot{\epsilon}$ 构成的平面，即在 ox_i 的负方向上，其表达式为

$$M_g = -H\dot{\epsilon} \tag{1-2}$$

它在 ox_o 轴上的投影为

$$M_{gxo} = M_g \cos \epsilon = -H\dot{\epsilon} \cos \epsilon \tag{1-3}$$

将 (1-1) 式代入 (1-3) 式得

$$M_{gxo} = -M_D \tag{1-4}$$

上式说明，在陀螺仪绕 oy_i 轴以角速度 $\dot{\epsilon}$ 进动的过程中，绕 ox_o 轴的陀螺力矩 M_{gxo} 与同轴作用的干扰力矩 M_D 在一段时间内一直保持大小相等，方向相反的关系。因此，陀螺仪绕 ox_o 轴仍然能够保持稳定，即陀螺仪不会绕 ox_o 轴相对基座转动。这时，唯一所需要的条件是陀螺仪必须绕 oy_i 轴以角速度 $\dot{\epsilon}$ 进动。

以上过程的本质就是双自由度陀螺仪的进动特性。如果我们把陀螺仪外环及其上的负载看作是被稳定对象，从提供抵抗干扰力矩的稳定力矩的角度看，可以对问题作如下理解：

1. 双自由度陀螺仪受到绕 ox_o 轴的干扰力矩 M_D 作用时，一方面绕 oy_i 轴产生进动，同时产生相应的陀螺力矩 M_g 与干扰力矩 M_D 相平衡，从而保证陀螺仪绕 ox_o 轴的稳定。由于陀螺力矩 M_g 是与进动角速度 $\dot{\epsilon}$ 同时出现的，所以它的稳定作用具有很好的快速性。
2. 因为陀螺力矩 M_g 是以角速度 $\dot{\epsilon}$ 的存在为条件的，所以这种稳定作用是不能持久的。事实上，如果干扰力矩一直作用在陀螺上，随着进动角 ϵ 的不断增大，从 (1-1) 式可见，角速度 $\dot{\epsilon}$ 的值将越来越大。当进动角 ϵ 接近 90° 时，由于陀螺仪的角动量 H 的方向和 ox_o 轴相重合，陀螺仪失去一个自由度，致使陀螺的进动特性消失，陀螺力矩也不再存在，从而使它失去了稳定性。这时，陀螺将在干扰力矩 M_D 的作用下，象普通刚体一样，绕 ox_o 轴快速转动起来。这种现象称为陀螺仪的“倾复”或“翻倒”。显而易见，“翻倒”的根源在于陀螺力矩 M_g 不是一个在任何情况下都能持续存在的力矩。

3. 为了使陀螺能始终具有稳定作用，必须引入与 $\dot{\epsilon}$ 无关的稳定力矩来逐渐代替陀螺力矩 M_g 的作用。为此，必须在陀螺里增加一套专门的稳定回路。

(二)单轴动力式稳定平台的组成和工作原理 如图 1-6 所示，我们把由一个具有大角动量的双自由度陀螺和一套稳定回路组成的整个系统称为单轴动力式陀螺稳定平台。因为在双自由度陀螺的外环上通常安装有被稳定对象，而且它相对空间被保持在一定的方位上，所以，我们通常把它称为“平台”。我们

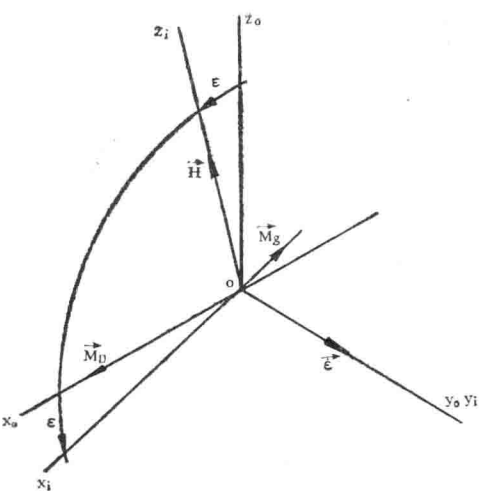


图 1-5 陀螺力矩的动力效应

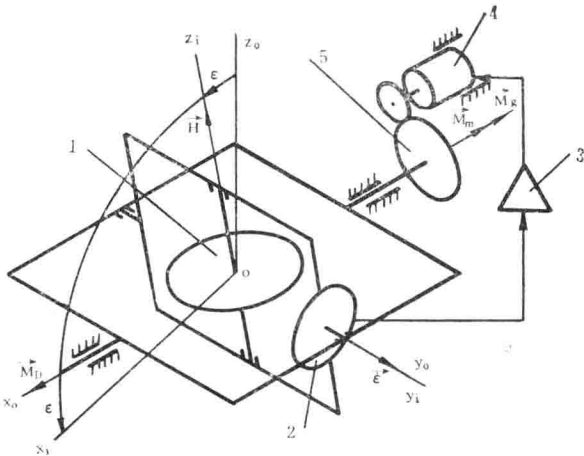


图 1-6 单轴动力式稳定平台的结构示意图

还把平台的支承轴称为稳定轴，把平台绕稳定轴相对基座的转角称为误差角。在这类平台中，我们还把陀螺的内环轴称为平台的进动轴，把陀螺绕进动轴相对平台的转角称为平台的进动角。从图 1-6 可见，稳定回路由以下元部件组成。

1. 进动角传感器 2 进动角传感器是陀螺绕平台进动轴相对转角 ε 的测量、变换元件，也是稳定回路电讯号的来源。它可以是接触式的（如线绕电位器或接触电门），也可以是非接触式的（如山型变压器，微动同步器或电容式传感器等）。当进动角传感器为接触电门时，它输出与进动角大小无关的常值电讯号，其极性随进动角的方向而改变。当进动角传感器为其它型式的传感器时，它输出一与进动角大小成比例的电讯号，其相位或极性随进动角的方向而改变。

2. 放大器 3 通常，进动角传感器输出讯号的功率较小，所以需要在放大器中进行电压放大和功率放大。在动力式陀螺稳定器中，可采用多种型式的放大器，如电子管放大器，晶体管放大器，磁放大器或电机放大机等。有时，当进动角传感器采用接触式传感器时，传感器可输出较大的电功率，在稳定回路中也可以不要放大器。

3. 稳定电机 4（或称卸荷电机）它是稳定回路的执行元件。它可用带有齿轮减速器 5 的交、直流伺服电机 4 构成，也可用不带齿轮减速器的交、直流力矩电机构成。

现在我们结合图 1-6 来介绍一下这种稳定平台的工作过程。当绕 ox_o 轴有干扰力矩 M_D 作用时，陀螺 1 立即绕 oy_i 轴以角速度 $\dot{\varepsilon}$ 进动。如前所述， $\dot{\varepsilon}$ 引起的陀螺力矩 M_g 与干扰力矩 M_D 相平衡。另一方面，装在 oy_i 轴上的进动角传感器 2 将输出一个与进动角 ε 成正比电讯号。该电讯号经放大器 3 放大后进入稳定电机 4，从而产生一个与干扰力矩 M_D 方向相反的稳定性矩 M_m 。随着进动角 ε 的增大，稳定性矩 M_m 也不断增大。这样，两个反向力矩的差值 $(M_D - M_m)$ 越来越小，致使角速度 $\dot{\varepsilon}$ 也越来越小，直至该差值等于零时，陀螺就停止进动，陀螺力矩 M_g 即完全消失。此时，进动角 ε 有一定大小的数值，稳定电机的力矩 M_m 完全抵消了外干扰力矩 M_D 。从这一过程可见，在抵消干扰力矩的过程中，稳定电机的稳定性矩 M_m 逐渐代替了陀螺力矩 M_g 的作用。由于在这一过程中，陀螺力矩参与了抵消外干扰力矩的作用，所以把这种稳定平台称为动力式平台。设稳定回路的总传递系数为 K ，则在稳定情况下，下述关系式成立：

$$M_m = K \varepsilon = -M_D \tag{1-5}$$

很显然，由于稳定性矩 M_m 不以角速度 $\dot{\varepsilon}$ 的存在为条件，而以一定的 ε 角度为条件，所以，绕 ox_o 轴的稳定作用将能长久保持。绕 oy_i 轴的偏角 ε 可以看作是为了保证平台绕 ox_o 轴的稳定所付出的一种代价。由此可见，一个稳定回路，只能保证平台绕一个轴的稳定。

当干扰力矩 M_D 去掉后，陀螺就在稳定性矩 M_m 的作用下，向反方向进动到起始位置，这时，随着角度 ε 的减小，稳定性矩 M_m 也逐渐减小到零。

（三）关于修正回路的作用 以上叙述的单轴稳定平台是相对惯性坐标系稳定的，所以对地球存在着绕 ox_o 轴的表现运动。有时，我们希望平台相对地球的当地水平面定位，即要求 oy_i 轴始终跟踪当地水平面。这样，就需要在系统中引入修正回路。如图 1-7 所示，在平台上装有一个液体开关（也可以是其它摆式元件）6，在陀螺的内环轴 oy_i 上安装一个修正电机（它可以是带有减速器的交、直流伺服电机，也可以是交、直流力矩电机）8，便可完成跟踪当地水平面的任务。我们把由液体开关 6、放大器 7 和修正电机 8 组成的回路称为修

正回路。

如图 1-7 所示, 当平台台体 (即双自由度陀螺的外环) 绕稳定轴 ox_o 以 $\dot{\alpha}$ 偏离水平位置时, 液体开关就把平台的偏差角变成电讯号。该讯号经放大器 7 放大后进入修正电机 8, 并使修正电机产生绕 oy_i 轴的修正力矩 M_r , 它将使陀螺仪绕 ox_o 轴进动以消除绕 ox_o 轴的偏差角。这样就使平台回到了水平位置。但是在返回水平位置的过程中, 如果遇到绕 ox_o 轴干扰力矩 M_D 的阻碍, 那么稳定回路就立即工作, 从而克服了干扰力矩 M_D 的作用。这样就保证了修正过程的顺利进行。如果没有稳定回路的存在, 在绕 ox_o 轴有干扰力矩 M_D 作用时, 陀螺不但会出现“翻倒”现象, 而且修正回路将无法正常工作。由此可见, 稳定回路虽不能代替修正回路的作用, 但却保证了修正回路的正常工作, 并提高了工作质量。

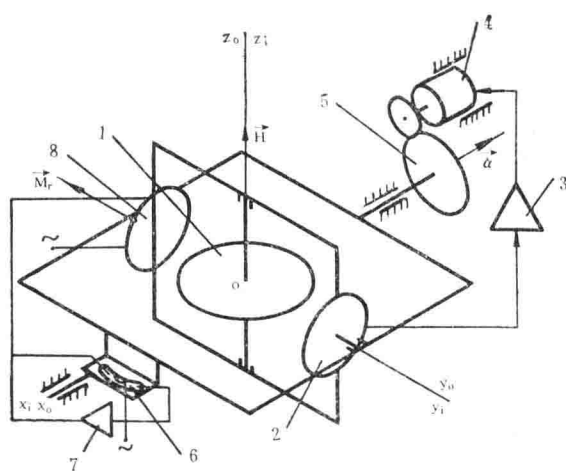


图 1-7 具有修正回路的单轴动力式稳定平台

这两个回路元件的配置有着明显的区别：稳定回路的进动角传感器是通常的角度传感器，而且沿进动轴安装，而执行电机就沿着稳定轴安装；修正回路的角度敏感元件是摆式角度敏感元件，它沿稳定轴安装，而执行电机则沿进动轴安装。这两个回路的工作特性也大不一样。稳定回路的工作，是一种强力的、快速的力矩平衡过程，而修正回路的工作是一种缓慢的进动过程。由于这两个回路的时间常数的差别很大，所以在分析稳定回路的工作特性时，完全可以忽略修正回路的影响；同样，在分析修正回路的工作特性时，也可以完全忽略稳定回路的影响。

(四)单轴动力式稳定平台的动力学方程及稳定性分析 以上我们介绍了这种稳定平台的工作原理。为了进一步了解它的系统特性，需要讨论它的传递函数。为此，必须先从列写平台系统各环节的动力学方程入手。

从单轴动力式稳定平台的组成可知，如图 1-6 所示的平台，可以看作是一个带有稳定回路的双自由度陀螺仪。所以它的方程可以由双自由陀螺仪、进动角传感器、放大器以及稳定电机等部件的方程式所组成的方程组而得到。设陀螺的角动量为 H ，绕外环轴的转动惯量（包括被稳定对象的转动惯量）为 J_x ，绕 ox_o 轴的角加速度为 $\ddot{\phi}$ ，绕内环轴 oy_i 的转动惯量为 J_y ，相对角加速度为 $\ddot{\epsilon}$ 。若沿陀螺外环轴作用的力矩为 M_x ，沿内环轴作用的干扰力矩为 M_d ，沿外环轴作用的粘性阻尼力矩的阻尼系数为 C_x ，沿内环轴作用的粘性力矩的阻尼系数为 C_y ，则沿陀螺仪内环轴 oy_i 和外环轴 ox_o 作用的力矩的大小和方向可如图 1-8 所示。按照动静法列写动力学方程，沿陀螺外环轴和内环轴作用的主动力矩应和沿各自轴上的惯性力矩大小相等，方向相反。在不考虑基座运动情况下，于是得陀螺的动力学方程为

$$\begin{aligned} J_x \ddot{\phi} + C_x \dot{\phi} + H \dot{\epsilon} \cos \epsilon &= M_x \\ J_y \ddot{\epsilon} + C_y \dot{\epsilon} - H \dot{\phi} &= M_d \end{aligned} \quad (1-6)$$

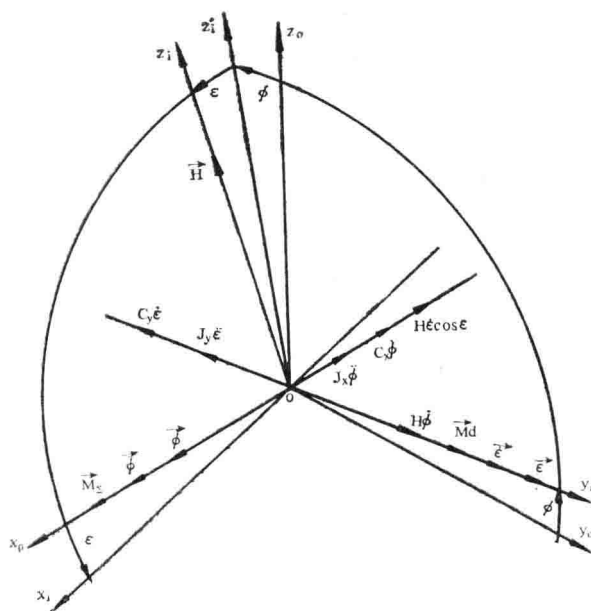


图 1-8 作用于陀螺上的力矩

根据单轴动力式稳定平台的工作原理知, M_z 应为外干扰力矩 M_D 和稳定力矩 M_m 之差, 即

$$M_z = M_D - M_m \quad (1-7)$$

设陀螺的进动角传感器的传递系数为 k_P , 放大器的放大系数为 k_A , 稳定电机的力矩系数为 k_m , 根据稳定回路各元件的关系有

$$M_m = k_m k_A k_P \varepsilon = K \varepsilon \quad (1-8)$$

上式中的 $K (=k_m k_A k_P)$ 为稳定回路的总传递系数。

因为通常 ε 是一个很小的角度, 所以可以认为 $\cos \varepsilon \approx 1$ 是成立的。对 (1-6) 式至 (1-8) 式在零初始条件下进行拉氏变换后得

$$\begin{cases} J_x P^2 \phi(P) + C_x P \phi(P) + H P \varepsilon(P) = M_z(P) \\ J_y P^2 \varepsilon(P) + C_y P \varepsilon(P) - H P \phi(P) = M_d(P) \\ M_z(P) = M_D(P) - M_m(P) \\ M_m(P) = K \varepsilon(P) \end{cases} \quad (1-9)$$

(1-9) 式即为单轴动力式稳定平台的动力学方程的拉氏变换式。从 (1-9) 式可得出系统的方块图如图 1-9 所示:

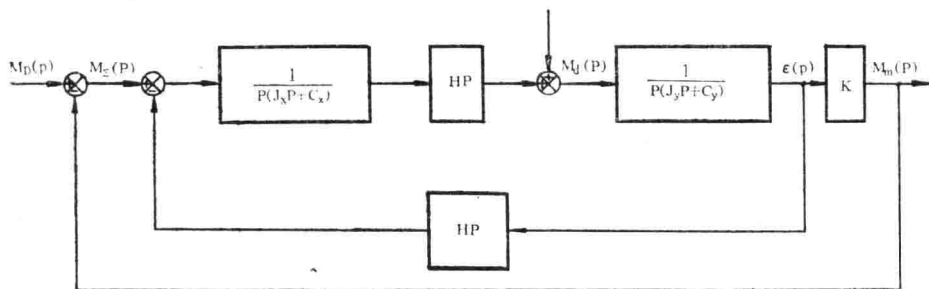


图 1-9 单轴动力式稳定平台系统方块图

从系统方块图可明显地看到：(1)陀螺力矩 $H\dot{\varepsilon}$ 和稳定力矩 M_m 都起着抵消干扰力矩 M_D 的作用。(2)由于陀螺力矩 $H\dot{\varepsilon}$ 是与 $\dot{\varepsilon}$ 有关的，所以它只在系统的动态过程中抵消干扰力矩 M_D ，在稳态下，它是不起这一作用的，因之，它不是一个持久作用的力矩。(3)由于稳定电机力矩 M_m 是与 ε 有关的，所以它是一个持久作用的力矩。在稳态下，外干扰力矩完全由它来克服。(4)在系统里，陀螺仪起着敏感干扰力矩 M_D 的作用，而且由于 $H\dot{\varepsilon}$ 的反馈作用，它还起着反馈元件的作用。由方块图得出系统稳定力矩 M_m 对干扰力矩 M_D 的开环传递函数 $W(P)$ 的表达式为

$$W(P) = \frac{KH}{P[J_x J_y P^2 + (J_x C_y + J_y C_x)P + (H^2 + C_x C_y)]} \quad (1-10)$$

闭环传递函数 $C(P)$ 的表达式为

$$C(P) = \frac{KH}{[J_x J_y P^3 + (J_x C_y + J_y C_x)P^2 + (H^2 + C_x C_y)P + KH]} \quad (1-11)$$

由(1-11)式得系统的特征方程式 $\Delta(P)$ 的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta(P) &= J_x J_y P^3 + (J_x C_y + J_y C_x)P^2 + (H^2 + C_x C_y)P + KH \\ &= a_0 P^3 + a_1 P^2 + a_2 P + a_3 \end{aligned} \quad (1-12)$$

从霍尔维茨稳定性判据可知，欲使该系统稳定，除特征方程式各项系数大于零外，还需满足

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0 \quad (1-13)$$

将 a_0, a_1, a_2, a_3 各系数的表达式代入(1-13)式后，可得该系统稳定的条件为

$$K < \frac{1}{H} \cdot \frac{(J_x C_y + J_y C_x)(H^2 + C_x C_y)}{J_x J_y} \quad (1-14)$$

因为在动力式稳定平台的稳定回路中和陀螺的内环轴上一般都不设置专门的阻尼装置，而 C_x 和 C_y 仅是由轴承中的干、湿摩擦力矩转化而来的，所以比起 H^2 来 $C_x C_y$ 可以忽略不计。这样(1-14)式可简化为

$$K < H \left(\frac{C_y}{J_y} + \frac{C_x}{J_x} \right) \quad (1-15)$$

显然，为了使系统在 ε 角不大的条件下能克服足够大的干扰力矩 M_D ，希望 K 具有足够大的值。但从(1-15)式所表示的结果可知， K 的数值是有限的。因为 J_x 通常是一个很大的量， C_x 和 C_y 均是很小的量，在 M_D 足够大而 ε 又不允许太大的条件下，要使系统稳定，只能靠增大陀螺的角动量 H 来达到。由此可见，这类稳定平台系统的一个很大特点是陀螺必须具有较大的角动量，而且角动量还应该随着被稳定对象绕稳定轴的转动惯量的增大而增大。

1-4-2 双轴动力式稳定平台的组成和工作原理 图 1-10 示出了双轴动力式稳定平台的原理示意图。图中：在平台 1 上安装有被稳定对象 4。 $OXYZ$ 坐标系为平台坐标系（图中 Z 轴未示出）。在平台 1 上还安装有两个角动量较大的单自由度陀螺仪 G_1 和 G_2 。 G_1 和 G_2 的环架轴 y_1 和 y_2 分别与 OY 轴和 OX 轴平行。平台 1 由支承轴 oy_p 支承在外环 2 上，外环 2 由支承轴 Ox_r 支承在基座 3 上。 oy_p 轴和 Ox_r 轴形成了平台 1 两个自由度的支承轴，且是它的两个稳定轴。当基座 3 和平台 1 完全处于水平位置时， OY 与 oy_p 相重合， OZ 由修正回路保持在铅垂方向上。在图中：陀螺 G_1 的讯号器 P_1 （相当于双自由度陀螺仪内环轴上

的平台进动角传感器)，放大器 A_1 和稳定电机 SM_1 组成了平台外环轴的稳定回路。液体开关 5 的横向通道，陀螺 G_1 的力矩器 T_1 （相当于双自由度陀螺内环轴上的修正电机）组成了平台绕 ox_r 轴的修正回路（横向修正回路）。陀螺 G_2 ，进动角传感器 P_2 ，放大器 A_2 和稳定电机 SM_2 组成了平台绕 oy_p 轴的稳定回路。液体开关 5 的纵向通道，陀螺 G_2 的力矩器 T_2 组成了平台绕 oy_p 轴的修正回路（纵向修正回路）。各回路的工作原理和单轴情况下相同，在此不作赘述。 ps 为俯仰角发送同步器， rs 为横滚角发送同步器。当运载体有俯仰角和横滚角时，平台仍然处于水平位置，因而两个同步器 ps 和 rs 可以测量出运载体俯仰角和横滚角的大小。

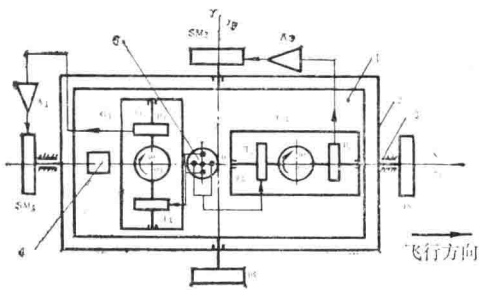


图 1-10 双轴动力式稳定平台的结构原理示意图

由于两个陀螺装在同一平台上，因此，它们在力学关系上又不可避免地存在着相互影响。例如，如果平台绕 ox_r 轴偏离水平面一个角度，就会使 G_2 绕 oy_p 轴相对平台输出一个不必要的角度讯号。该讯号驱动稳定电机 SM_2 工作，从而引起平台绕 oy_p 轴运动。同样，如果平台绕 oy_p 轴偏离水平面一个角度，也会使平台绕 ox_r 轴产生运动。通常把这两个回路间的影响称为陀螺仪输出轴耦合影响。实际上，在正常工作条件下，平台围绕稳定轴的振荡角度是很小的，所以，在一般的分析中可以忽略这些影响，而首先把注意力放在如何选好各个单轴稳定回路的参数和有关元件上。

ЦГБ 型双轴动力式稳定平台在飞机上得到了广泛的应用。它的功能与一般陀螺垂直器相同，即用来确定运载体相对当地水平面的角位置。通过平台轴和外环轴上的俯仰角和横滚角讯号传感器可将运载体的俯仰角和横滚角讯号传送到有关设备上去。这些设备可以是导航系统，自动驾驶仪系统，雷达系统以及姿态指示系统等。虽然，双轴动力式稳定平台在功能上和陀螺垂直器相同，但因为它用两套稳定回路克服了平台沿两个稳定轴作用的干扰力矩，所以它比起陀螺垂直器来不仅能带动较多的角度传感器，而且水平精度还高。

§ 1—5 惯导系统中的稳定平台——指示式稳定平台

1-5-1 稳定平台在惯导系统中的作用和它的工作原理 直至最近，几乎所有的惯导系统还都采用稳定平台。稳定平台在惯导系统中的功能，简单地说，就是支承加速度计，并把加速度计稳定在惯性空间，或按导航计算机的指令使加速度计相对惯性空间转动。所以，从自动控制的角度讲，稳定平台可以看作是一种稳定系统和伺服系统相结合的自动控制系统。从惯性导航的要求讲，它应当能够完善地工作在几何稳定状态和空间积分状态下。所谓几何稳定状态（又称稳定工作状态），指的是平台不受基座运动和干扰力矩的影响而能相对惯性空间保持方位稳定的工作状态；所谓空间积分状态（又称指令跟踪状态或指令角速度跟踪状态），指的是在指令角速度（或指令电流）控制下平台相对惯性空间以给定规律转动的工作状态。

惯导系统中稳定平台的敏感元件，可以是单自由陀螺仪，也可以是双自由度陀螺仪。以