

高等学校教材



郑富强 于 进 汪淑华 编 著

陀螺稳定装置及其应用

西北工业大学出版社

TN965

G90

450414

高等学校教材

陀螺稳定装置及其应用

郭富强 于波 汪叔华 编著



00450414

6



西北工业大学出版社

1995年12月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书讲述陀螺稳定装置的工作原理、构成原理、分析与设计方法及在航空、航天、航海、陆战车辆、制导武器、空间技术等领域的应用,内容充实,取材较新,涉及面广。

本书主要作为高等院校惯性导航与仪表专业的专业课教材,也可供从事导航、制导、海陆空武器装备火力控制系统、空间技术等方面的研究、设计、试验与制造工程技术人员参考。

DZ83/05

高等学校教材
陀螺稳定装置及其应用
郭富强 于波 汪叔华 编著
责任编辑 李珂
责任校对 钱伟峰

© 1995 西北工业大学出版社出版
(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 8493844)
陕西省新华书店发行
西北工业大学出版社印刷厂印装
ISBN 7-5612-0751-4/TH·37 (课)

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11.625 字数: 279 千字
1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷
印数: 1—1 000 册 定价: 9.20 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

陀螺稳定装置既可作为惯性系统的核心部件,又可作为独立装置来使用,它广泛应用于航空、航天、航海、兵器、大地测量及国民经济的某些部门中。它性能的优劣是一个国家理论研究水平、基础工业水平、工业技术水平高低的综合反映,是高新科学技术的一个重要领域,受到了世界上许多国家的高度重视。

“陀螺稳定装置及其应用”这门课程是“惯性导航与仪表”或“自动控制与导航”专业的专业课程。本课程主要学习各类陀螺稳定装置的组成与工作原理,系统设计与分析以及装置的应用等内容。本书具有以下5个特点:

1. 注意了吸收陀螺稳定装置领域内的最新研究成果,特别是作者自己已公开发表和未公开发表的研究成果及在教学工作中的心得和体会;
2. 较全面地阐述了陀螺稳定装置的应用领域,使读者获得较宽的知识面;
3. 注意了阐述陀螺稳定装置和使用对象间的知识衔接,便于读者建立整体概念和理解;
4. 在陀螺稳定装置近百年的发展过程中,其应用都是结合具体系统的,而具体系统又是各种各样的,所以陀螺稳定装置应用的阐述只能结合典型系统来进行;
5. 重视了理论与实际的结合,不仅有丰富的理论知识,而且有许多设计、计算及分析的内容。

本书共分七章,主要内容有:绪论 从典型装置的应用抽象出了陀螺稳定装置的定义,介绍了陀螺稳定装置的类别与各类的特点以及陀螺稳定装置的发展简史;第一章 叙述了各类陀螺稳定装置的工作原理;第二章 讲述了单轴陀螺平台伺服回路的分析与设计;第三章 讲述了三轴陀螺平台的构成原理、工作原理及系统分析;第四章 讲述了模拟水平面的双轴平台的构成、工作原理及性能分析,并介绍了稳定瞄准线的双轴稳定平台的原理;第五章 简要介绍了弹道式导弹惯性制导原理及惯性导航原理,重点讲述了战斗机用四环三轴惯导平台的构成原理、工作原理及系统分析;第六章 介绍了陀螺稳定装置在坦克火炮稳定器、车载及机载火控系统、战术导弹自动导引头、雷达天线稳定中的应用;第七章 讲述了陀螺稳定装置在宇宙飞行器姿态稳定与控制、高空气球吊篮姿态控制中的应用。

本书由西北工业大学郭富强任主编,参加编写的有:郭富强(前言,绪论,第二、三、四、七章,附录A、B、C及第一、六章思考练习题),北京航空航天大学于波(第一、六章),南京航空航天大学汪叔华(第五章)。

本书由空军工程学院张宗麟教授审阅,并提出了许多宝贵意见,作者对此表示衷心感谢!在此作者还对为本书编写、出版给予支持的单位和付出了辛勤劳动的各位同志表示衷心感谢!

由于作者的学术水平所限,书中的缺点和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

1995年3月

目 录

绪论	1
§ 0-1 什么是陀螺稳定装置(器)	1
§ 0-2 陀螺稳定装置(平台)的分类	3
§ 0-3 陀螺稳定平台中的坐标系	5
§ 0-4 惯性系统中的陀螺稳定平台	6
§ 0-5 陀螺稳定装置发展简史	6
第一章 陀螺稳定装置的工作原理	10
§ 1-1 直接式陀螺稳定装置的工作原理	10
§ 1-2 间接式陀螺稳定装置(平台)的工作原理	12
§ 1-3 动力式陀螺稳定装置(平台)的工作原理	13
§ 1-4 指示式陀螺稳定装置(平台)的工作原理	17
§ 1-5 指示—动力式陀螺稳定装置(平台)的工作原理	19
§ 1-6 用速率陀螺仪构成的陀螺稳定装置	19
思考练习题	22
第二章 单轴陀螺稳定装置(平台)系统回路设计	24
§ 2-1 敏感元件——陀螺仪的传递函数	24
§ 2-2 执行元件——力矩装置的传递函数	30
§ 2-3 平台台体(稳定元件)的传递函数	34
§ 2-4 电子网络的传递函数	36
§ 2-5 平台系统的原理方块图及传递函数	37
§ 2-6 平台系统的设计指标	40
§ 2-7 平台系统的校正方法	43
§ 2-8 单轴平台系统对干扰和输入的响应	51
§ 2-9 力矩装置选择中应考虑的问题	57
思考练习题	59
第三章 三轴陀螺稳定平台	61
§ 3-1 三轴平台的结构介绍	61
§ 3-2 坐标系及向量在坐标系中的变换	63
§ 3-3 环架驱动信号的合理分配	64
§ 3-4 三轴平台的工作原理	67
§ 3-5 三轴平台的方位锁定原理	69

§ 3-6 三轴平台的运动分析	71
§ 3-7 三轴平台的动力学方程及系统的传递函数阵	75
§ 3-8 以积分陀螺仪为敏感元件的三轴平台系统的输出轴耦合分析	84
§ 3-9 三轴平台的误差分析	89
思考练习题	100
第四章 双轴陀螺稳定平台	101
§ 4-1 稳定瞄准线的双轴稳定平台	101
§ 4-2 模拟水平面的双轴平台的结构及工作原理	104
§ 4-3 模拟水平面的双轴平台系统的性能分析	106
§ 4-4 模拟水平面的双轴平台的误差分析	113
§ 4-5 TPW-1 型陀螺稳定平台介绍	115
思考练习题	119
第五章 陀螺稳定平台在航向—姿态测量及惯性导航中的应用	120
§ 5-1 弹道式导弹惯性制导原理简介	120
§ 5-2 惯性导航(惯导)原理简介	121
§ 5-3 惯导平台的组成和工作原理	126
§ 5-4 战斗机用惯导平台——四环三轴平台	128
思考练习题	137
第六章 陀螺稳定装置在武器装备及其他方面的应用	138
§ 6-1 坦克火炮稳定器	138
§ 6-2 瞄准线稳定装置及其在火控系统中的应用	142
§ 6-3 自动导引头的陀螺传动装置	148
§ 6-4 雷达天线稳定装置	150
思考练习题	152
第七章 陀螺稳定装置在空间技术中的应用	153
§ 7-1 在宇宙飞行器角运动稳定中的应用	153
§ 7-2 在高空气球吊兰姿态稳定中的应用	160
思考练习题	164
附 录	165
附录 A 动力式陀螺稳定装置分析	165
附录 B 三轴平台测量飞机航向—姿态角的原理	169
附录 C 四环平台运动分析及力矩电机的力矩容量	170
参考文献	178

绪 论

§ 0-1 什么是陀螺稳定装置(器)

一、坦克火炮稳定器

图 0-1 所示为一归式坦克火炮稳定器的结构示意图。它能使在崎岖不平的地面上行驶的坦克上的火炮炮身的高低角(俯仰角)不受坦克车身颠簸的影响。这种稳定器的被稳定对象就是火炮的炮身 1, 稳定轴就是火炮的耳轴 2(炮身绕车体的转动轴)。使炮身偏离给定方位的干扰因素是车体通过耳轴加给炮身的摩擦力矩和炮身绕耳轴的质量不平衡力矩等。要使炮身方位不变就必须沿稳定轴施加稳定力矩。要能发现干扰因素的存在, 必须有敏感元件——陀螺仪。此装置中稳定轴的数目仅有一个。

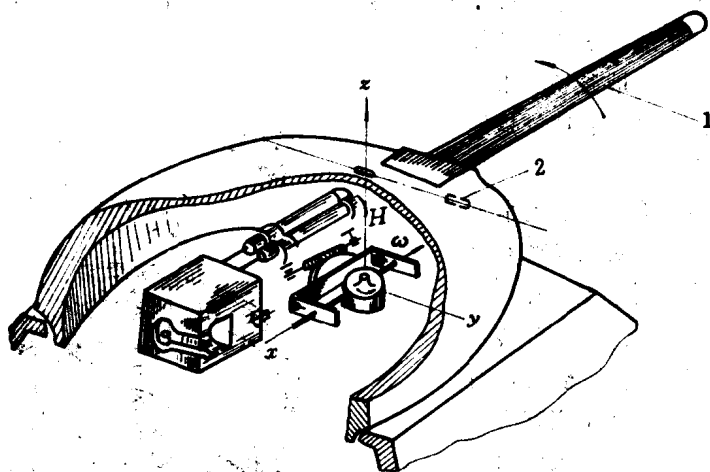


图 0-1 坦克火炮稳定器的结构示意图

二、雷达天线稳定器

图 0-2 所示为一雷达天线稳定器的结构示意图, 它由雷达天线及其基座和陀螺垂直器两大部分组成。这种稳定器的作用是当载体绕 $I-I$ 轴线作角运动时保持雷达天线的安装基座 1 的方位不变。它的被稳定对象是雷达天线及其安装座。稳定轴就是被稳定对象的安装轴 $I-I$ 。使被稳定对象 1 偏离给定方位的干扰因素是载体通过轴承加给被稳定对象的摩擦力矩、被稳定对象绕稳定轴的质量不平衡力矩及其他干扰力矩。欲使被稳定对象在干扰作用下方位保持不变就必须沿稳定轴施加稳定力矩。要发现干扰因素就必须有敏感元件——陀螺垂直器。此装置中稳定轴的数目只有一个。

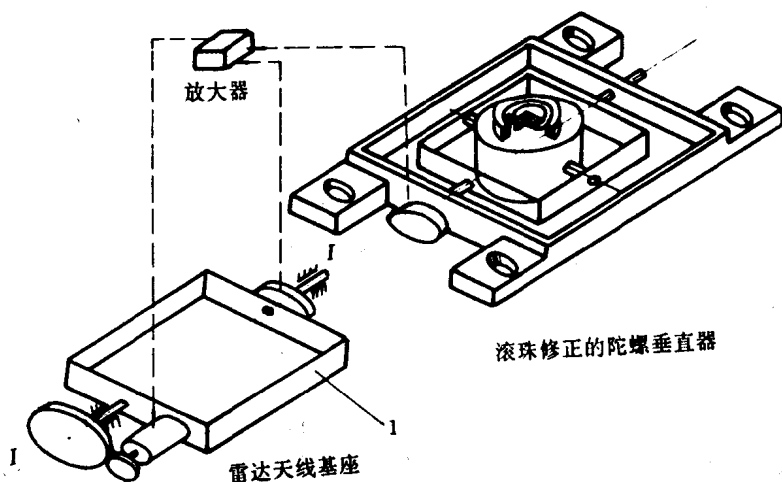


图 0-2 单轴雷达天线稳定器的结构示意图

三、地磁敏感元件水平稳定器

图 0-3 所示为一地磁敏感元件水平稳定器的结构示意图。它的作用是当飞机有俯仰、横滚角运动及线运动时把地磁敏感元件保持在当地水平内以敏感地磁场的水平分量。这种稳定器的被稳定对象是地磁敏感元件 3 及其安装基座——平台台体 2。稳定轴就是台体 2 的支承轴 1 和外环轴 4。使被稳定对象偏离水平面的干扰因素是沿两个支承轴作用给台体的各种干扰力矩、地球自转及飞机飞行速度的影响。欲使被稳定对象相对水平面的方位保持不变就必须沿稳定轴施加稳定力矩并引入消除地球自转及飞机飞行速度影响的修正回路。要发现力矩型干扰因素的存在必须有敏感元件——两个单自由度陀螺仪。此装置中稳定轴的数目为二。

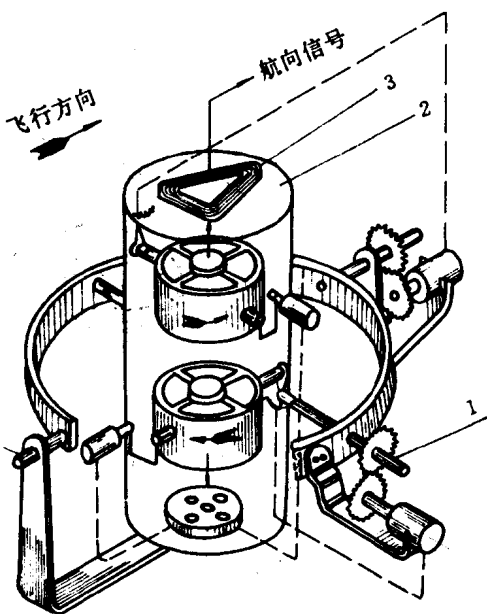


图 0-3 地磁敏感元件水平稳定器的结构示意图

四、载体航向-姿态系统

图 0-4 示出了载体航向-姿态系统的结构示意图。它的作用是能向载体上多种设备输送航向-姿态角信息。这种稳定器的被稳定对象是平台的台体 2。稳定轴是台体支承轴 1、内环支承轴 3 和外环轴 4。使被稳定对象偏离给定方位——当地水平面和磁北的干扰因素是沿各支承轴的摩擦力矩（包括轴承的摩擦力矩、导电滑环的摩擦力矩、电位计式角度传感器的摩擦力矩和力矩电机电刷的摩擦力矩）、有关部件绕支承轴的质量不平衡力矩、稳定轴上电磁元件的电磁干扰力矩、地球自转角速度及载体的

线速度等。欲使被稳定对象相对 给定方位保持不变就必须沿稳定轴施加平衡干扰力矩的稳定力矩并引入消除地球自转及载体线速度影响的修正指令。要发现力矩型干扰因素的存在就必须有敏感元件 —— 三个单自由度陀螺。此装置中稳定轴的数目有三个。

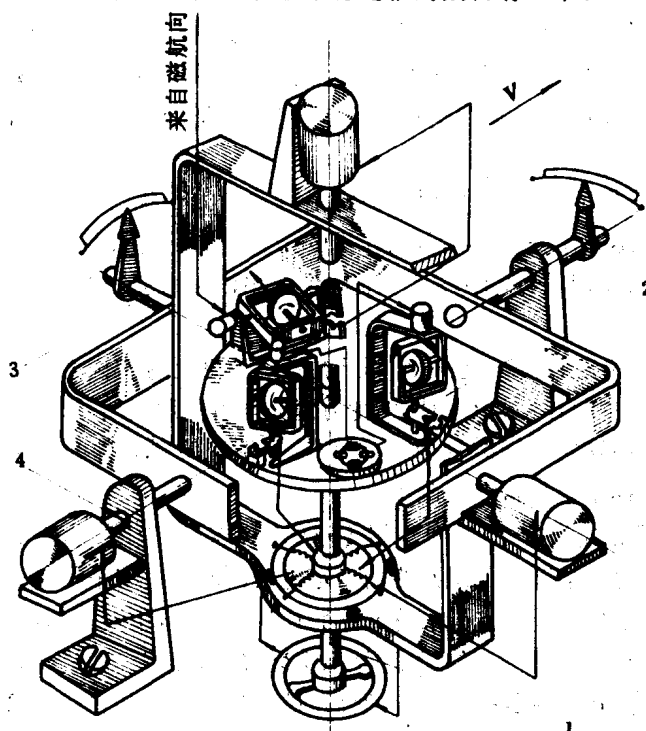


图 0-4 载体航向-姿态系统的结构示意图

从对以上四个典型的陀螺稳定器的结构分析可归纳出陀螺稳定器构成的五个要素：

① 被稳定对象；② 敏感元件 —— 陀螺仪或陀螺装置；③ 干扰因素的干扰作用；④ 1 至 3 个稳定轴；⑤ 产生稳定力矩的装置 —— 力矩电机或陀螺本身。

从以上五个要素可总结出陀螺稳定装置的定义：它是一种以陀螺仪为敏感元件，使被稳定对象在干扰因素作用下能相对惯性空间保持方位不变或在指令（修正）力矩作用下使其按给定规律相对惯性空间转动的陀螺装置。它的独特功能是能隔离掉载体的角运动对装在载体上的被稳定对象方位的改变。

§ 0-2 陀螺稳定装置的分类

自从 1904 年施里克 (Otto Schlick) 研制出世界上第一个舰船减摇装置，至今已有 90 年的历史了。在这一历史阶段，世界各国已研制出多种类型、多种用途的陀螺稳定装置。在书中，不可能，也没有必要对它们一一研究，而应当找出共同性的、规律性的东西，并上升到理论，用这些理论去指导实践或发展新的理论。因为同属一类的稳定装置，必然有相同的特点或相近的基本结构，所以应首先对其进行分类。

陀螺稳定装置如何分类，在国外的文献资料中也无统一的结论。作者参考国外的分类方法，根据陀螺稳定装置的发展历史及现状，并结合我国的实际，提出了两种分类法：一是按陀螺

力矩在稳定装置中的作用分;二是按稳定轴的数目分。

1. 按陀螺力矩在稳定装置中的作用分

陀螺稳定装置可分为以下五类:

(1) 直接式陀螺稳定装置 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装置。在这类稳定装置中,陀螺既是装置的敏感元件,又是装置的执行元件。施里克研制的舰船横摇陀螺稳定器就是这类稳定装置。这类稳定装置在现代空间技术中也得到了广泛的应用。

(2) 间接式陀螺稳定装置 作用于被稳定对象上的干扰力矩完全依靠伺服回路输出的电动力矩来平衡、陀螺力矩完全不起平衡作用的一种陀螺稳定装置。在这类稳定装置中,陀螺装置仅起敏感元件的作用。国产 LZ—1 型航向系统中消除航向陀螺传感器支架误差的稳定装置即属此类。

(3) 动力式陀螺稳定装置 在对作用于被稳定对象上的干扰力矩平衡过程中,陀螺力矩仅在系统的过渡过程中起作用,稳态时,干扰力矩完全由伺服回路稳定电机的输出力矩平衡的一种陀螺稳定装置。在这类稳定装置中,陀螺仪除起系统敏感元件的作用外,还起阻尼元件的作用。TPW—1 型陀螺稳定平台即属此类。

(4) 指示式陀螺稳定装置 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,外干扰力矩全部由伺服回路的稳定电机输出力矩来平衡的一种陀螺稳定装置。在这类稳定装置中,陀螺仪仅起角位置敏感元件的作用。以二自由液浮角位置陀螺、静电陀螺、挠性陀螺为敏感元件的惯性平台均属此类陀螺稳定装置。需要指出的是,指示式陀螺稳定装置和间接式陀螺稳定装置间的区别:前者的陀螺仪和被稳定对象安装在同一平台台体上,陀螺仪和被稳定对象有直接的机械联系;后者的陀螺装置和被稳定对象没有直接的机械联系,仅有电气方面的联系,也可以说,陀螺装置和被稳定对象是安装在载体上不同的地方。

(5) 指示-动力式陀螺稳定装置 在平衡作用于被稳定对象上的干扰力矩的过渡过程中,陀螺力矩虽起作用,但作用很小,稳态时,干扰力矩完全由伺服回路稳定电机的输出力矩平衡的一种陀螺稳定装置。在这类稳定装置中,陀螺仪主要起角速度敏感元件的作用,是稳定装置的角速度指示器。以单自由度液浮积分陀螺仪和速率陀螺仪为敏感元件的稳定平台均属此类。

2. 按稳定轴数目分

除直接式陀螺稳定装置外,均可分为以下三类:

(1) 单轴陀螺稳定装置 能使被稳定对象在惯性空间绕一根稳定轴保持方位稳定或按给定规律转动的陀螺稳定装置。

(2) 双轴陀螺稳定装置 能使被稳定对象在惯性空间绕两根互相垂直的稳定轴保持方位稳定或按给定规律转动的陀螺稳定装置。

(3) 三轴(空间)陀螺稳定装置 能使被稳定对象在惯性空间绕三根相互垂直的稳定轴保持方位稳定或按给定规律转动的陀螺稳定装置。

在常用的专业术语中,经常把两种分类法结合起来对陀螺稳定装置命名,例如:单轴动力式陀螺稳定装置、双轴间接式陀螺稳定装置及三轴指示式陀螺稳定装置等。

在这里,还需要对“陀螺稳定装置”与“陀螺稳定平台”或“稳定平台”间的异同作以说明。它们间的异同,主要是根据各自要实现的功能确定的。“所谓平台,广义上讲,是指测定与仪器壳体相固连的坐标轴相对某一参考坐标系位置的全部装置,即定向器。从狭义上讲,是指定向

器中实现(模拟)参考坐标系的结构部件。这一结构部件,包括安装在它上面的陀螺装置,有时也称为平台的核心部件”。根据这一论述,在今后的叙述中,对凡用来实现“建立某一参考坐标系”功能的陀螺稳定装置命名为陀螺稳定平台(稳定平台,平台),如惯性平台等;对凡用来实现“使被稳定对象(如瞄准具镜头、火炮炮身等)相对某方位保持稳定”功能的陀螺稳定装置仍命名为陀螺稳定装置。按照国内外习惯,当讲到“陀螺稳定装置”时,也包括“陀螺稳定平台”在内。但“陀螺稳定平台”并不包括“陀螺稳定装置。”

为了模拟(建立)某一参考坐标系,陀螺稳定平台需要具有两种工作状态:即几何稳定状态(稳定工作状态)和空间积分状态(指令角速度跟踪状态)。——对惯性平台或几何稳定状态和修正工作状态——对非惯性平台。所谓几何稳定状态,指的是平台在基座角运动和干扰力矩扰动下能相对惯性空间保持方位稳定(不变)的工作状态;所谓空间积分状态,指的是平台在与指令角速度成比例的指令电流控制下能相对惯性空间以指令角速度的规律转动的工作状态;所谓修正工作状态,指的是由地磁敏感元件或重力敏感元件和其他元件构成的修正回路控制下跟踪磁北或水平面的工作状态。实现这些工作状态的原理,将在有关章节中介绍。

§ 0-3 陀螺稳定平台中的坐标系

1. 惯性坐标系 x_i, y_i, z_i (i 系)

设原点在地球中心, x_i, y_i 轴在地球赤道平面内正交且指向某二恒星, z_i 轴与 x_i, y_i 轴垂直并组成右手坐标系。

2. 地球坐标系 x_e, y_e, z_e (e 系)

原点在地球中心, x_e, y_e 轴在地球赤道平面内, x_e 轴是格林威治子午面与地球赤道平面的交线, y_e 轴是东经 90° 子午面与地球赤道平面的交线, z_e 轴沿地球自转轴指向北极。

3. 地理坐标系 x_l, y_l, z_l (l 系)

原点是载体重心在地球表面上的投影, x_l, y_l 轴位于当地水平面内, x_l 轴指东, y_l 轴指北, z_l 轴沿当地地垂线向上。使用中常将其原点平移至平台坐标系原点 o 。

4. 当地水平坐标系 ξ, η, ζ (l 系)

原点和 l 系相同, ξ 轴、 η 轴位于当地水平面内, η 轴和载体纵轴在水平面内的投影重合, ζ 轴和当地地垂线重合向上为正, ξ 轴与 η, ζ 轴组成右手坐标系。使用中常将原点平移至平台坐标系原点 o 。

5. 载体坐标系 x_b, y_b, z_b (b 系)

原点在载体重心, x_b, y_b, z_b 轴分别沿载体横轴向右、纵轴向前、竖轴向上。使用中常将其原点平移至平台坐标系原点 o 。

6. 平台坐标系 $o x_p, y_p, z_p$ ($oXYZ$) (p 系)

原点设在平台支承中心, x_p, y_p 轴位于台面内相互垂直, z_p 轴与 x_p, y_p 轴垂直, 向上为正, 并与 x_p, y_p 轴组成右手坐标系。

7. 导航坐标系 x_n, y_n, z_n (n 系)

在其上进行加速度分解并进行导航参数运算的坐标系。可作为导航坐标系的有地理坐标系等。

§ 0-4 惯性系统中的陀螺稳定平台

惯性技术是利用力学惯性原理和其他等效原理,测量和控制物体运动的姿态、速度和位置的一门工程技术。其内容包括惯性导航、惯性制导、惯性测量、惯性仪表四个主要方面。

惯性导航是以在载体上用加速度计测得载体的运动加速度,并对其进行积分以求得载体速度,对其进行二次积分以求得载体位置和经过距离的一种导航方式。它是一种完全自主、自足的导航方式。因为它不需要任何外部信息就可独立地完成载体的导航任务,所以它比起诸如天文导航、无线电导航、多普勒导航、GPS 导航以及地标导航等导航方式,具有其独特的优点——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位置。要实现惯性导航原理,必须满足四项基本要求:第一,系统里必须以物理方式或计算储存方式建立一个导航坐标系,以便使载体的加速度和重力加速度的测量值在其上进行分解;第二,系统必须能测得非引力加速度(比力);第三,必须预先知道重力场的分布,以便从惯性元件测出的比力中计算出载体的加速度;第四,系统必须能完成二重积分运算和有害加速度的补偿运算。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;第三个要求或者由重力分解器以解析方式实现,或者通过休拉调谐以几何方式实现;第四个要求可通过计算机来实现。实现上述四项基本要求的硬件组成了惯性导航系统(简称惯导系统),也可以说,惯导系统是实现惯性导航原理的硬件设备的总体。在惯导系统中,用陀螺仪来实现一个坐标系,就是在载体上建立一个平台。这个平台可以是物理方式实现的,也可以是计算存储方式实现的。物理方式实现的平台就是陀螺稳定平台(陀螺稳定装置),计算存储方式实现的平台就是数学平台。具有陀螺稳定平台的惯导系统称为平台式惯导系统,具有数学平台的惯导系统称为捷联式惯导系统。

惯性制导和惯性导航,虽然在原理上是相同的,系统组成上也是基本相同的,但它们要达到的目的却不相同。对弹道式导弹来说,惯性制导的目的主要是测定火箭发动机关车点的速度向量和位置坐标。对其他非弹道式导弹来说,主要目的在于控制导弹的轨迹使导弹从初始发射点运动到末制导的作用距离范围内的某点或为其他导引匹配方式(地形匹配、景象匹配等)提供位置偏差信息。

惯性大地测量(简称惯性测量)是利用惯性导航技术,同时、快速地获得多种大地测量数据(如经纬度、高程、方位角、重力异常和垂线偏差等)的一种新的测量方式。有关它的仪器,统称为惯性测量系统。惯性测量系统是从 20 世纪 70 年代中叶在惯性导航系统的基础上开始发展起来的,它的基本原理仍是惯性导航的原理,结构上两者也基本相同,只是软件差别较大。在此系统中增加了一些数据处理软件和误差的控制与补偿软件。

上述已经提到,惯性制导系统、惯性测量系统和惯性导航系统在原理和系统组成上基本是相同的。在平台式惯导系统里陀螺稳定平台是其核心组成部分,所以陀螺稳定装置在惯性系统中的应用,是其应用的一个重要领域,也是本课程的重点内容之一。

§ 0-5 陀螺稳定装置发展简史

17 世纪中叶至 18 世纪中叶,牛顿、欧拉、泊松(Poisson)、潘索(Poisot)、雅可毕等著名学者

已奠定了高速旋转刚体的力学基础。傅科于 1852 年对这种刚体命名为陀螺,并应用它对惯性空间具有定轴性的特性,设计并制造出了在实验室里显示地球自转的测量仪器。自傅科陀螺问世至今的 100 多年历史中,随着科学技术的迅速发展,陀螺的类型越来越多,应用越来越广泛,以致发展成为现今的“惯性技术”这一高科技领域,陀螺也由初期单一的刚体转子类型发展成为多种类型。除刚体转子陀螺外,还有激光陀螺、光纤陀螺、半球谐振陀螺、压电振动陀螺、低温超导陀螺、粒子陀螺等类型。就刚体转子陀螺来说,其支承方式也由原来的滚珠轴承支承方式改进成诸如液浮、静压气浮、动压气浮、静电悬浮、挠性、磁悬浮等多种支承方式。在这一期间,陀螺稳定装置也得到了长足的发展。

1904 年,奥多·施里克(Otto Schlick)提出用陀螺仪表稳定整个轮船的设想。这种陀螺系统被放在当时德国的“海狗式”扫雷艇上进行了试验,使原来横摇角度达 14° ,个别情况下达 40° 的扫雷艇的摇摆几乎完全消除,它的摇摆幅度最大也不超过 1° 。1905 年德国排水量为 900 t 的“Silvana”号汽船上也装备了施里克陀螺稳定器。这种稳定器的一大缺点是稳定力矩(陀螺力矩)的方向不能及时随干扰力矩(海浪的冲击力矩)方向的改变而改变,而且在陀螺进动角速度较小时不能有效耗散掉船体摇摆的能量,甚至在某些干扰频率下陀螺力矩对系统呈正反馈的形式而加强了干扰作用。1911 年埃尔默·阿·斯派里(Elmer A. Sperry)提出了一种主动式陀螺稳定器。这种装置是对施里克稳定器的巨大改进,并在以后完全取代了施里克稳定器。斯派里稳定器的陀螺进动轴上安装有一直流电动机,该电动机施矩的方向是由一角速率陀螺来控制的,因速率陀螺能敏感船体摇摆角速度的大小和方向,所以陀螺力矩始终能起到抑制干扰力矩的作用。因为斯派里稳定器引进了外能源,故称为主动式稳定器,而施里克稳定器称为被动式稳定器。1909 年由布连南(L. Brennan)、谢耳(A. Scherl)与谢洛夫斯基(П. П. Шиловский)提出用陀螺来稳定单轨列车,并开展过他们的车辆模型。这种车辆在曲线行驶和直线变速行驶时其稳定很难保证,系统过渡过程也特别长,车辆在轨道接头处受到沿运动方向的冲击后会产生侧滚振动,以致最后未得到实际应用。直接式陀螺稳定器虽是早期发明的一种陀螺稳定器,但它在现代的空间技术中仍得到了广泛的应用。

动力式陀螺稳定装置是在直接式陀螺稳定装置出现以后才发展起来的。在动力式陀螺稳定装置的发展过程中前苏联学者 С. А. 诺兹特洛夫斯基(С. А. Ноздровский)、А. Н. 克雷洛夫(А. Н. Крылов)、美国学者 E. S 费里(E. S. Ferri)等人作了奠基性的工作。С. А. Ноздровский 在 1924 年 8 月 24 日的发明申请中命名为“人造进动的陀螺”的装置同现今的动力式双轴陀螺稳定装置的原理和结构基本相同。他在发明书中还指出,三个自转轴相互垂直的陀螺,加上一个万向环和伺服机构(在第三个平面中),则可以保持三个平面的位置不变。这实际上就是现今的动力式三轴陀螺稳定装置的结构模型。1932 年 А. Н. 克雷洛夫在他的《陀螺仪及其某些技术应用的概论》一书中指出:“把平台挂在万向支架并固定在内环上,而在平台上安置两个陀螺稳定器,其中一个消除平台的纵向摇动,另一个则消除侧向摇动”。由克雷洛夫这一思想发展起来的多陀螺垂直器的精度要比带有一个陀螺的陀螺摆的精度高得多。1933 年费里出版了 Applied Gyrodynamics 这本著作,在该著作中指出,利用这样两个成对的稳定陀螺可以得到人造的地平面,即是保持接近于地平面位置的平面。在动力式陀螺稳定装置的发展过程中,世界上许多著名学者都作出了巨大的贡献,如前苏联学者 Б. В. 布尔加可夫及其学生 Я. Н. 罗森别尔格等。从 1942 年起前苏联开始生产动力式陀螺稳定装置,相继用于雷达天线、武器观测台、坦克火炮、探照灯及航空摄像机的稳定,以后还用于飞机自动驾驶仪中航向—姿态角的敏感

装置。

惯性平台的发展是和惯性系统的发展同步进行的。1923年休拉教授提出了著名的休拉摆原理。他在他的著作中写道：“我断言：如果陀螺具有84 min的周期，则将保持在重力平衡位置。在地面上作任意运动时，陀螺都不会偏离平衡位置。”休拉摆原理为在载体上建立不受载体加速度影响的人工地垂线奠定了理论基础。此后，一些学者，如Л. И. 特卡乔夫、А. Ю. 依希林斯基等也对休拉摆原理的深化和应用作过许多理论研究，这对惯性系统的发展都是重要贡献。惯性平台的技术实现都是围绕惯性系统的技术实现而开展的。第一个采用惯性制导的火箭是德国于1934年发射的A-2火箭。首先采用三轴惯性平台的惯性制导系统是第二次世界大战将结束时德国发射的改进型V-2火箭。该惯性平台的直径约508 mm，重量约为45.4 kg。第二次世界大战以后，美国得到了许多成套的V-2火箭，从此开展了对惯性器件及惯性系统的大量研究。因为世界上的许多国家都认识到了惯性系统的重要性，所以从20世纪40年代后期起，除美国外，苏、英、法都重视起惯性系统的研究。

惯性平台和惯性系统的发展是以惯性器件，特别是陀螺仪的发展为前提的。有什么陀螺仪就有什么陀螺仪构成的惯性平台。第一代陀螺仪主要是滚珠轴承支承的框架陀螺仪，它的精度不高，约为 $10^{(6)}/h$ 的数量级，由此种陀螺仪制造不出高精度的惯性平台。第二代陀螺仪的典型代表为液浮陀螺、气浮陀螺和动压气浮自由转子陀螺。1946年至1950年期间气浮支承陀螺研制成功，漂移角速率降低到不足 $10^{(6)}/h$ 时。本第克斯公司用气浮支承陀螺仪先后于1955年、1958年、1961年为红宝石(REDSTONE)导弹、丘辟特(JUPITER)导弹和PERSHING导弹研制成ST-80、ST-90、ST-120平台。以Chas. S. Draper博士为首的美国麻省理工学院仪表实验室于20世纪50年代研制成液浮陀螺仪，其漂移角速率达到 $0.01^{(6)}/h$ 左右。后来液浮陀螺仪又发展成为所谓的“三浮(陀螺马达采用动压气浮支承，浮子式框架采用液浮加磁悬浮支承)”陀螺仪，使陀螺仪漂移角速率有了进一步降低。总的来说，60、70年代是液浮陀螺的全盛时期。这个时期的惯性平台也多为液浮陀螺仪构成的平台。如美国利登公司的机载惯导系统LN-3、LN-12、LN-15等的平台，杭尼威尔公司人马座惯性制导系统的DGG 8024平台等。50年代诞生的动压气浮自由转子陀螺也是属于第二代的陀螺仪，它成功地用于美国“民兵”导弹的平台式惯性制导系统而闻名于世。第三代陀螺仪的典型代表是干式动力调谐陀螺仪。因为它具有结构简单、制造容易、成本低廉且具有惯性级精度等优点，在70年代得到了广泛的应用。用它制成的惯性平台也很多，例如卡尔福特公司的KT-70平台，利登公司的LTN-72、LN-31、LN-33、LN-35、LN-40机载惯导系统的平台，“探险者号”宇宙飞船的惯性参考装置等。第四代陀螺仪的代表被认为是激光陀螺仪、半球谐振陀螺仪、光纤陀螺仪和静电陀螺仪。它们的主要应用对象是捷联式惯性系统。从近几年的国际评论来看，对静电陀螺应用于捷联系统出现了一些不同看法。有些专家认为，虽然静电陀螺的高精度潜力方面有吸引力，其漂移角速率可达 $10^{-3} \sim 10^{-5}/h$ ，甚至更低，但因其仍有刚体转子的活动部分，并非捷联系统的理想元件。

惯性平台的机械结构是平台的重要部分，总的技术要求是：刚性好、体积小、重量轻、结构紧凑、可维修性好。从这些技术要求出发，利登公司的航空惯导系统的平台从哑铃式(LN-3)、分块组合式(LN-15)、悬臂式(LTN-72)发展到悬臂-分块组合式(LN-33)。在航空惯导平台中还有一种很特殊的平台结构，即是美国台尔柯(Delco)电子公司的轮盘木马Ⅳ型惯导系统的平台。该平台的台体由上、下两部分组成，下平台可相对上平台在方位上以1 r/min的角速度转动。在平台环架驱动装置上已从早期的间接驱动装置发展成为现今的直接驱动装置。

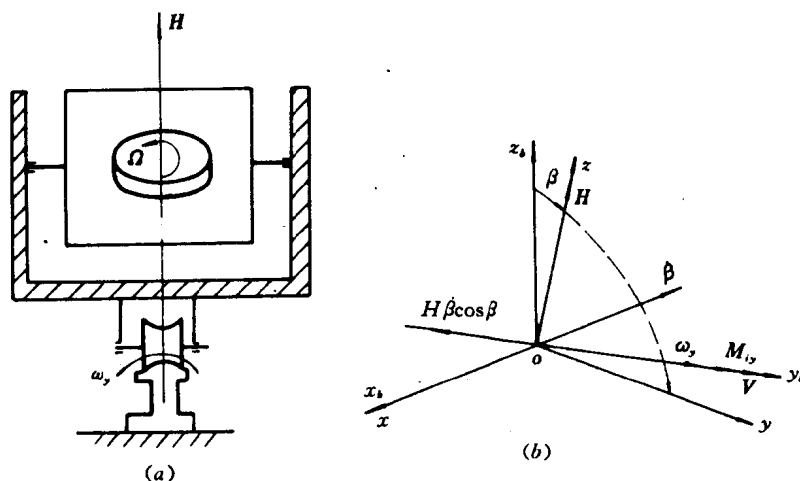
我国的陀螺稳定装置事业是和惯性技术事业一起发展起来的。解放前,我国在这一领域是一块空白。解放后,在党和政府的领导和关怀下,遵循自力更生为主的方针,已从仿制走向自行设计,目前,已拥有一批具有一定经验的专业技术人员和工人,已具有相当规模和水平的制造设备和测试手段。洲际导弹和人造地球卫星的发射成功,战术导弹惯性制导、航空惯导、潜艇惯导等所取得的研究成果,都标志着我国惯性技术事业的长足进步。我们有信心,在不远的将来,一定能赶上世界先进水平。

第一章 陀螺稳定装置的工作原理

§ 1-1 直接式陀螺稳定装置的工作原理

直接式陀螺稳定装置有着广泛的生活基础: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,车手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当越大,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以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装置的工作原理。

直接式陀螺稳定装置是一种用陀螺力矩抵抗作用于被稳定对象上的干扰力矩而使被稳定对象相对惯性空间保持方位稳定的陀螺稳定装置。在此装置中,陀螺既是敏感干扰力矩的敏感元件,又是抵抗干扰力矩的执行元件。下面结合它在单轨列车中和舰船减摇装置中的应用来叙述它的工作原理。



(a) 单轨列车的结构原理图 (b) 单轨列车稳定原理图

图 1-1

一、单轨列车

在 1912 年前后,科技工作者曾研制了单轨列车,并生产出了可乘坐 40 多人的样车。图 1-1(a) 示出了单轨列车的结构原理示意图。 $o x_b y_b z_b$ 为车体坐标系, $o x y z$ 为陀螺坐标系。列车的前进方向沿 y_b 轴方向, $o x_b$ 沿车体横轴指向右, $o z_b$ 沿车体竖轴向上。起始时, $o x y z$ 坐标系同 $o x_b y_b z_b$ 坐标系同名轴重合, $o z$ 轴为陀螺自转轴, $o x$ 轴为陀螺环架支承轴,又称为稳定装置的进

动轴。单轨列车稳定的原理如下：如图 1-1(b) 所示，当沿车体 x 轴有使车体以 ω_x 角速度倾侧的干扰力矩 M_{ix} 作用时，装在车体上的陀螺就会敏感到 M_{ix} 的存在，并绕支承框架轴（稳定装置的进动轴） oy 的负向产生进动角速度 β ，且

$$\beta = -M_{ix}/H \cos \beta \quad (1-1)$$

β 就会产生沿 y 负向作用的陀螺力矩 M_{iy} ，且

$$M_{iy} = -H\dot{\beta} \cos \beta \quad (1-2)$$

将式 (1-1) 代入 (1-2) 中得

$$M_{iy} = H \cos \beta M_{ix} / H \cos \beta = -M_{ix} \quad (1-3)$$

可见，陀螺力矩 M_{iy} 和干扰力矩 M_{ix} 大小相等，方向相反，从而完全抵消了干扰力矩的作用，并保持了单轨列车的稳定。

因为单轨列车的重心在轨道之上，所以它是一个结构不稳定的系统。在当时对这项内容也进行了研究，并且取得了成果。由于安全等原因，单轨列车没有得到实际应用。尽管如此，它开始了直接式陀螺稳定装置的一项应用研究。

二、舰船减摇装置

20 世纪初期，航海事业的发展已达到一定水平，但舰船在风浪中的摇摆却引起了许多新问题：若摇摆角度过大，将会使船行的阻力增大，从而使速度降低，燃料消耗增加，续航时间缩短，严重时，还可能使船舱进水而导致船体倾复；船摇摆时所产生的惯性力会使船体构件受到内应力的作用，从而使其损坏；对乘客来说，摇摆带来的痛苦是不言而喻的；对军用舰艇来说，船体摇摆会使火炮射击和鱼雷发射的精度降低。为此，减小船体摇摆是必须解决的重要问题。

1904 年，德国工程师施里克 (Otto Schlick) 利用陀螺的力学特性设计了一个舰船侧向减摇装置，其结构示意图如图 1-2 所示。陀螺转子轴是垂直安置的，进动轴沿船体横轴。当海浪和海风绕船体纵轴向船体作用干扰力矩 M_{ix} 时，陀螺以与单轨列车稳定装置相同的工作原理平衡掉干扰力矩对船体的扰动，使船体的横摇幅度大大减小。当时在一艘 56.2 t 的扫雷艇上做过试验，使船体 $\pm 14^\circ$ 的横摇角（个别情况下为 $\pm 40^\circ$ ）下降到不足 $\pm 1^\circ$ 。

因为海浪对船体的干扰不是规则的正余弦规律，而是频率和幅值可变的干扰，又因为船体绕纵轴、陀螺绕进动轴都是有惯性的，所以稳定装置输出的陀螺力矩 M_{iy} 和干扰力矩不可能始终大小相等方向相反，特别是当 M_{ix} 的周期同船体—陀螺组成的机械系统周期相同且 M_{iy} 和 M_{ix} 的相位相同时， M_{iy} 不但不能起到抑制 M_{ix} 的作用，反而加强了干扰的作用。虽然在施里克舰船减摇装置中增设了机械阻尼器用以耗散掉干扰力矩的部分能量，但也没有从根本上克服这一缺陷。

以上叙述的施里克舰船减摇装置，因为没有引入外部能源，所以称为被动式或无源式直接

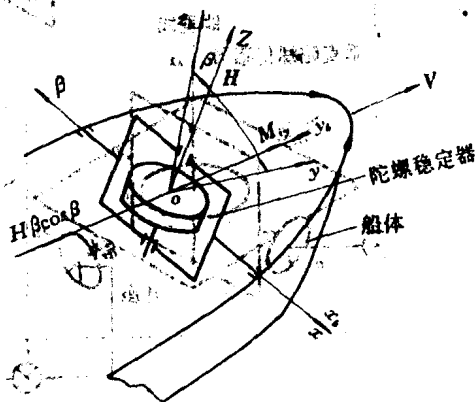


图 1-2 舰船减摇装置的结构示意图