

电气与控制实验科学技术

王科俊 主编

惯性技术基础实验

QUAN XING JI SHU JI CHU SHI YAN

高延滨 许德新 胡文彬 编著

黑龙江人民出版社

· 电气与控制实验科学技术 · 王科俊 主编

江南大学图书馆



91142433

7M921/087:13

惯性技术基础实验

高延滨 许德新 胡文彬 编著



黑龙江人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

电气与控制实验科学技术/王科俊 主编. —哈尔滨:黑龙江人民出版社,2008.7

ISBN 978-7-207-07885-8

I. 电… II. 王… III. 电气控制—实验—研究 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据字(2008)第 110906 号

责任编辑:李荣焕

装帧设计:李若聃

惯性技术基础实验

高延滨 许德新 胡文彬 编著

出版发行 黑龙江人民出版社
通讯地址 哈尔滨市南岗区宣庆小区1号楼
邮 编 150008
网 址 www.longpress.com
电子邮箱 hljrmcbs@yeah.net
印 刷 哈尔滨太平洋彩印有限公司
开 本 16 开
印 张 135 印张
字 数 355 万字
印 数 2000 套
版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-207-07885-8/TP·14
定 价 350.00 元(全套 14 本)

(如发现本书有印制质量问题,印刷厂负责调换)

本社常年法律顾问:北京市大成律师事务所哈尔滨分所律师赵学利、赵景波

前言

惯性技术基础是测控技术与仪器专业的一门必修课程。惯性技术融合了计算机技术、检测技术、控制技术等多种专业知识,开展相关的实验是提高教学效果的重要途径和手段。虚拟仪器技术实现了测量仪器的集成化、智能化、多样化及可编程化,在实验教学中,虚拟仪器软件编程环境给学生提供了一个充分发挥自己才能和想象力的空间,有利于学生能力的培养。将惯性技术与虚拟仪器技术融合在一起开展实验教学工作无疑是一件极有意义的事情。本实验教材便是基于这种思想编写而成。本教材可作为高等学校测控技术与仪器专业本科生实验教材和参考书,也可以供从事检测技术和自动化工作的工程技术人员参考。

本教材共8章。第一章为惯性技术基础理论内容。第二章介绍了惯性器件的相关知识。第三、四章为平台式惯性系统、捷联式惯性系统的理论知识。第五章为虚拟仪器及LabVIEW概述。第六章为LabVIEW图形语言编程基本操作入门。第七章介绍了如何利用LabVIEW进行信号采集及分析。第八章介绍了如何利用LabVIEW进行惯性系统的设计。

本书第1章由哈尔滨工程大学高延滨教授编写,第2~4章由哈尔滨工程大学胡文彬助理研究员编写,哈尔滨工程大学许德新讲师编写第5~7章。第8章由许德新和胡文彬共同编写。全书由高延滨教授审阅。

本书部分内容参考了许多院校编写的教材及文献资料,在此也致以谢意。

由于本书涉及多学科,加之编者学识有限,书中有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2008年1月

内容简介

本教材立足于让读者能够掌握惯性技术和虚拟仪器的理论基础和实践动手能力,为此在章节的编写中,从基本理论入手,扩展到相关实验内容。全书共8章,较全面地介绍了惯性技术基础、惯性器件、平台式惯性系统、捷联式惯性系统、虚拟仪器图形编程方法、虚拟仪器测控系统综合设计、虚拟仪器惯性系统设计等内容。相关实验内容紧随理论知识的介绍,在掌握理论基础的前提下开展相关的实验内容。

本教材可作为高等学校测控技术与仪器专业本科生实验教材和参考书,也可以供从事检测技术和自动化工作的工程技术人员参考。

普 编

2008年1月

目 录

第1章 惯性技术基础知识	(1)
1.1 坐标系	(1)
1.2 惯性仪表	(3)
1.3 惯性导航系统简介	(4)
1.4 大地测量的作用	(6)
第2章 惯性仪表	(8)
2.1 陀螺仪	(8)
2.2 加速度计	(16)
2.3 旋转飞轮式陀螺仪基本特性演示实验	(23)
2.4 摆式加速度计原理演示实验	(25)
2.5 动力调谐陀螺调谐演示实验	(26)
2.6 动力调谐陀螺力反馈闭环演示实验	(28)
第3章 平台式惯性系统简介	(30)
3.1 稳定平台	(30)
3.2 罗经找北原理	(31)
3.3 陀螺方位仪工作原理	(32)
3.4 陀螺水平仪工作原理	(32)
3.5 舒勒原理	(33)
3.6 平台式惯性导航系统工作原理	(34)
3.7 陀螺罗经无阻尼振荡演示实验	(35)
3.8 陀螺罗经阻尼振荡演示实验	(36)
3.9 陀螺方位仪误差补偿演示实验	(37)
第4章 捷联式惯性系统简介	(39)
4.1 捷联系统基本结构	(39)
4.2 捷联惯性导航算法	(40)
第5章 虚拟仪器及 LabVIEW 概述	(48)
5.1 虚拟仪器概述	(48)

5.2 虚拟仪器发展及应用领域	(52)
5.3 LabVIEW 概述	(54)
第 6 章 LabVIEW 基础及入门	(60)
6.1 LabVIEW 编程环境	(60)
6.2 VI 程序的组成与创建	(65)
6.3 VI 程序的数据与结构	(72)
6.4 LabVIEW 基本操作实验	(79)
6.5 LabVIEW 循环和图表实验	(80)
6.6 LabVIEW 字符串和文件 I/O 实验	(83)
第 7 章 LabVIEW 信号采集与分析	(85)
7.1 LabVIEW 实现数据采集	(85)
7.2 LabVIEW 数字存储示波器设计实验	(90)
7.3 LabVIEW 数字滤波器设计实验	(93)
7.4 LabVIEW 频谱分析仪设计实验	(95)
7.5 LabVIEW 信号发生器设计实验	(99)
第 8 章 LabVIEW 实现惯性系统设计	(102)
8.1 LabVIEW 开发捷联式惯性导航系统	(102)
8.2 LabVIEW 开发平台式寻北定向系统	(103)
8.3 LabVIEW 控制系统设计	(104)
8.4 LabVIEW 串口通讯实验	(106)
8.5 LabVIEW 网络通讯实验	(110)
8.6 LabVIEW 惯性寻北实验	(112)
8.7 LabVIEW 陀螺仪建模实验	(114)
8.8 LabVIEW 加速度计建模实验	(116)
参考文献	(118)

第1章 惯性技术基础知识

惯性技术是对惯性测量、惯性导航、惯性制导等技术的统称。惯性测量是指通过惯性测量传感器(惯性仪表)敏感载体相对惯性空间的变化。惯性导航是指通过根据惯性仪表的信息,加上一些辅助措施,最后经导航计算机得到载体相对指定导航坐标系的导航信息。惯性制导是指根据惯性仪表(或惯性导航系统)的信息,通过对载体运动的控制使载体到达指定目标。下面简单介绍一些惯性技术所常用到的一些知识。

1.1 坐标系

惯性技术简单来说研究的是载体的运动,为了精确而方便地描述这种运动,往往把某一空间或某一物体抽象为一个坐标系来表示。要研究物体的运动必须先指明是相对什么坐标系的运动,因此根据研究对象和具体任务的要求来选取合适的坐标系非常重要。下面简单介绍一些常用的坐标系。

1.1.1 日心惯性坐标系和地心惯性坐标系

由于宇宙中一切物体都在运动,所以绝对不动的惯性空间是不存在的。根据精度的要求我们可以忽略一些相对运动来建立惯性坐标系。比如日心惯性坐标系和地心惯性坐标系。

如图1-1-1所示,日心惯性坐标系 $OX_i Y_i Z_i$ 的原点设在太阳中心, Z_i 轴指向北极星(平行于地球自转方向), Y_i 轴平行于地球赤道面, X_i 位于地球公转平均轨道面, X_i 轴与 Y_i 轴、 Z_i 轴构成右手直角坐标系。研究行星的运动或向其他行星发射航天器常使用日心惯性坐标系。

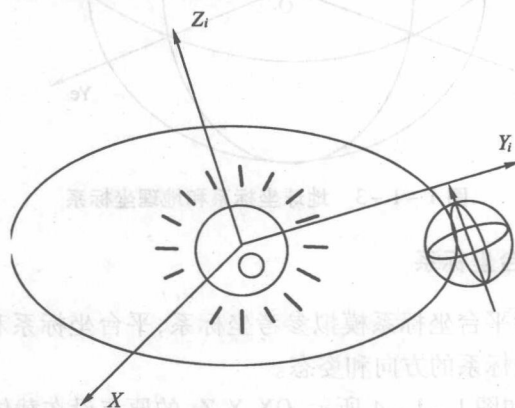


图1-1-1 日心惯性坐标系

如图1-1-2所示,地心惯性坐标系 $OX_{ei} Y_{ei} Z_{ei}$ 的原点设在地球中心, Z_{ei} 轴指向地球自转轴, X_{ei} 轴和 Y_{ei} 轴在赤道平面内不随地球自转,与 Z_{ei} 轴构成右手直角坐标系。研究地球附近的物体运动常使用地心惯性坐标系。

1.1.2 地球坐标系和地理坐标系

由于我们所研究的对象都位于地面附近,所以经常要使用地球坐标系和地理坐标系。

如图1-1-3所示,地球坐标系 $OX_e Y_e Z_e$ 的原点设在地球中心, Z_e 轴指向地球自转轴, X_e 轴为0°经线所在子午面(参考子午面)与赤道面交线, Y_e 轴与 X_e 、 Z_e 轴构成右手直角坐标系。地球坐标系跟随地球自转一起旋转。

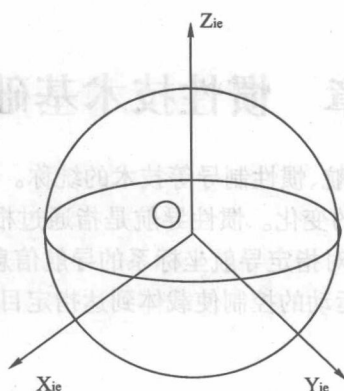


图 1-1-2 地心惯性坐标系

如图 1-1-3 所示,地理坐标系(简称 n 系) $OX_n Y_n Z_n$ 的原点设在载体质心在地球表面投影点, Z_n 轴沿当地垂线指天, X_n 轴指东, Y_n 轴指北。地理坐标系不仅跟随地球自转一起旋转,而且原点会跟随载体运动,原点由经纬度来确定。

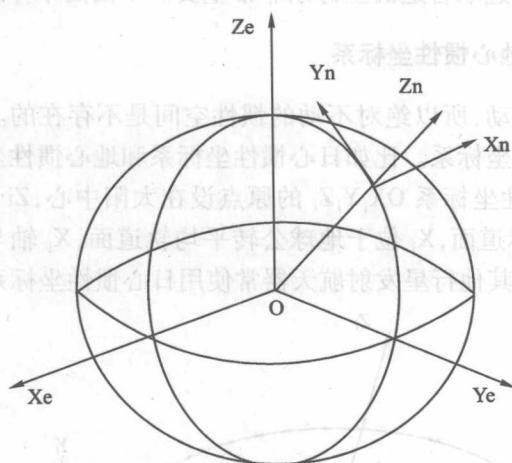


图 1-1-3 地球坐标系和地理坐标系

1.1.3 载体坐标系和平台坐标系

惯性导航系统正常工作后平台坐标系模拟参考坐标系,平台坐标系和载体坐标系的相对位置就确定了载体坐标系相对参考坐标系的方向和姿态。

载体坐标系(简称 b 系)如图 1-1-4 所示, $OX_b Y_b Z_b$ 的原点设在载体的重心,并与载体固联。 Z_b 轴指向载体的竖轴方向, Y_b 轴指向载体的纵轴方向, X_b 与 Y_b 、 Z_b 构成右手坐标系。

平台坐标系 $X_p Y_p Z_p$ 用来描述平台罗经和惯导系统平台的姿态的。通常把 X_p 轴和 Y_p 轴定义在平台平面内, Z_p 轴垂直于平台平面,构成右手坐标系。在平台罗经和惯导系统正常工作状态, Y_p 轴模拟水平指北轴 Y_n , X_p 模拟水平指东轴 X_n , Z_p 模拟天顶轴 Z_n , 整个平台坐标系 $X_p Y_p Z_p$ 模拟地理坐标系 $X_n Y_n Z_n$ 。在捷联式惯性导航系统中没有实际意义上的平台,这时平台坐标系实际由导航计算机中的“数字平台”所提供。

1.1.4 坐标系间的矢量变换

从一个坐标系到另一个坐标系的转换可由绕不同轴的三次连续旋转实现。比如,从参考系到新坐标系的转换可以这样表示:绕参考系 z 轴转过角 γ ,再绕新坐标系 y 轴转过角 β ,最后绕新坐标系 x 轴转过角 α 。其中 α 、 β 、 γ 为欧拉旋转变角。

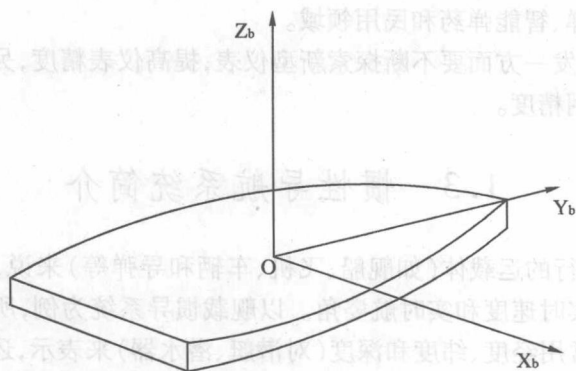


图 1-1-4 载体坐标系

这三次转动的方向余弦阵分别为:

$$C_1 = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

由此可得从参考系到载体系的转换为:

$$C_n^b = C_3 C_2 C_1 \quad (1-4)$$

同理,从载体系到参考系的反转为:

$$C_b^n = C_1^T C_2^T C_3^T \quad (1-5)$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & -\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & -\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

1.2 惯性仪表

所谓惯性仪表就是用在惯性导航系统中的那些根据惯性定律(牛顿运动定律)进行测量的仪表。加速度计(不管是非积分加速度计,还是积分加速度计)和陀螺仪就是一些典型的惯性元件。

惯性仪表根据其偏置稳定性的大小分为高、中、低3种精度。高精度陀螺仪的偏置稳定性在 $0.0015^\circ/\text{h}$, 刻度因数稳定性优于 100ppm 。高精度加速度计的偏置稳定性在 $10\mu\text{g}$ 以下, 刻度因数稳定性优于 10ppm 。高精度陀螺仪和加速度计又称为战略级惯性仪表, 主要用于核潜艇、战略导弹等战略武器以及高精度的测量领域。

中等精度陀螺仪的偏置稳定性为 $0.0015 \sim 15^\circ/\text{h}$, 刻度因数稳定性为 $100 \sim 1000\text{ppm}$ (半球谐振陀螺多数属于中等精度陀螺仪但刻度因数稳定性一般优于 10ppm)。中等精度加速度计的偏置稳定性为 $10 \sim 100\mu\text{g}$, 刻度因数稳定性为 $10 \sim 100\text{ppm}$ 。这种精度的惯性仪表又称为导航级惯性仪表, 主要用于舰船、飞机、战车的导航系统。

低精度陀螺仪的偏置稳定性为 $15^\circ/\text{h}$ 以上, 刻度因数稳定性在 100ppm 以上。低精度加速度计偏置稳定性在 $100\mu\text{g}$ 以上, 刻度因数稳定性在 100ppm 以上。此类陀螺仪和加速度计有时称为低成本惯

性仪表,主要用于战术导弹、智能弹药和民用领域。

惯性仪表的运用和开发一方面要不断探索新型仪表,提高仪表精度,另一方面也要不断提高系统补偿技术,提高仪表的使用精度。

1.3 惯性导航系统简介

对于靠近地球表面航行的运载体(如舰船、飞机、车辆和导弹等)来说,所需的主要导航参数为其相对于地球的实时位置、实时速度和实时航姿角。以舰载惯导系统为例,所提供的导航参数为舰艇相对于地球的实时位置,通常用经度、纬度和深度(对潜艇、潜水器)来表示,还可提供舰艇的实时速度以及航向角、纵摇角、横摇角。这些参数均可由平台式惯导系统或捷联式惯导系统提供。

1.3.1 平台式惯性导航系统简介

平台式惯导系统主要由陀螺稳定平台、导航计算机、控制修正系统、人机界面等部分组成。其中陀螺稳定平台用来在运载体上模拟所选定的导航坐标系,同时为加速度计提供精确的安装基准、使3个加速度计(水面舰艇用平台式惯导系统一般只需2个加速度计)的测量轴始终沿着导航坐标系的3个坐标轴,以测量导航计算所需的运载体沿导航坐标系3个轴向的加速度。

以地理坐标系为导航坐标系的平台式惯导系统为例,其中陀螺稳定平台为由3个单自由度陀螺仪或2个双自由度陀螺仪所构成的三轴稳定装置。借助于稳定回路使平台绕3根轴保持空间方位稳定,借助于修正回路使平台始终跟踪当地地理坐标系,由此安装在平台上的3个(或2个)加速度计能够精确地测量运载体相对地球运动的北向加速度、东向加速度和地向加速度(水面舰艇没有地向速度);对三个方向的一次积分和两次积分就可以分别得到载体在三个方向的速度、位移;在这三个位移进行球面运算就可以得到载体的经度、纬度和深度(高度)。

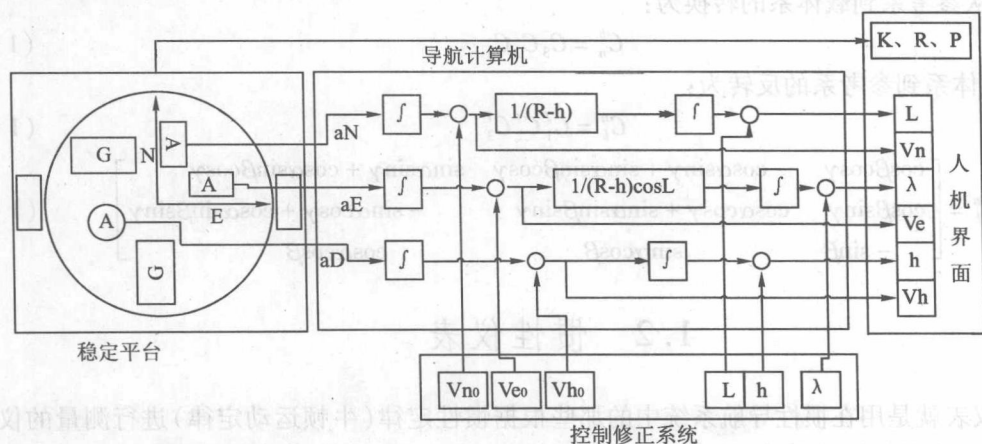


图 1-3-1 平台式惯性导航系统原理框图

1.3.2 捷联式惯性导航系统简介

捷联式惯导系统与平台式惯导系统的区别,在于前者没有实体的稳定平台,取而代之的是导航计算机产生的数学平台,陀螺仪和加速度计直接与运载体固联。此种惯导系统主要由惯性测量组件(简称 IMU)、导航计算机以及人机界面等组成。IMU 包括陀螺仪组件和加速度计组件。陀螺仪组件测量沿载体坐标系3个轴向的角速度信号,并被送入导航计算机,经误差补偿校正运算后进行姿态矩阵计算;加速度计组件测量沿载体坐标系3个轴向的加速度信号,并被送入导航计算机,误差补偿校正运算后,进行载体坐标系至“数字平台”坐标系的坐标变换运算。

姿态矩阵一方面用于坐标变换,即把沿载体坐标系的加速度信号转换成“数字平台”坐标系(即导

航坐标系)各轴的加速度信号,以便于导航参数计算;另一方面,利用姿态矩阵的元素可以提取水平姿态角和航向角信息。这样,由捷联惯导系统中的姿态矩阵运算、加速度计信号的坐标变换运算以及姿态与航向运算实现了平台式惯导系统中稳定平台和修正系统的功能,从而构成所谓“数学平台”。

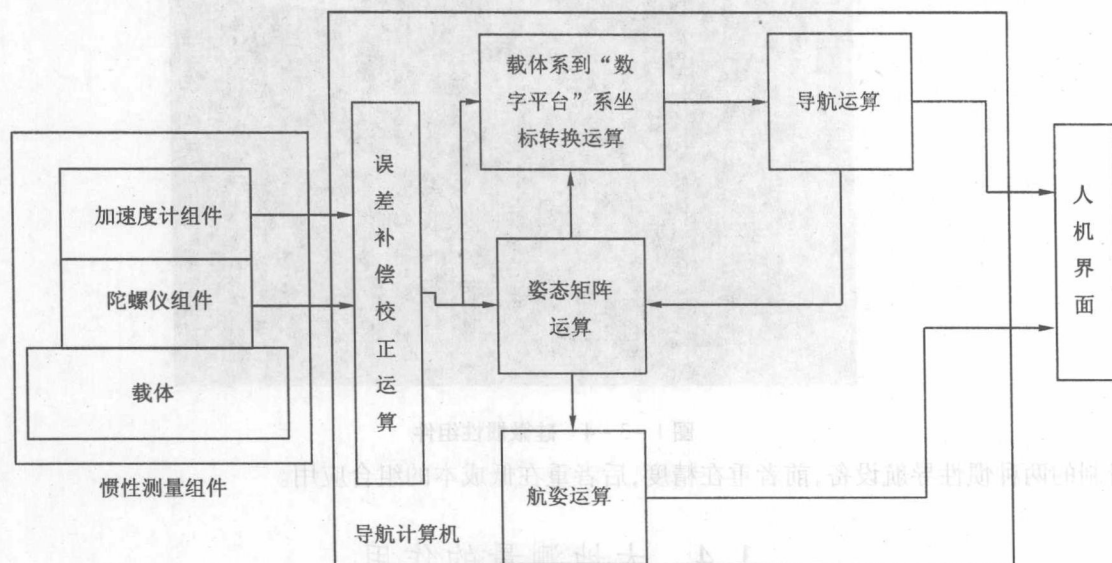


图 1-3-2 捷联式惯性导航系统原理框图

与平台式惯导系统相比,捷联式惯导系统省却了结构复杂的实体平台,减少了系统中精密的机械零件及相关电子线路和电气元件,从而可靠性高、体积小、重量轻、功耗小、维修方便和成本低。但是,捷联系统的陀螺仪和加速度计直接固连于运载体上,运载体的运动又直接传递到这些惯件仪表上,从而引起更大的动态误差,所以对惯性仪表的动态性能要求高。其次,捷联系统中的导航计算机除了必须承担平台式系统所需完成的运算任务外,还需进行姿态矩阵运算和动态误差补偿运算,因此捷联系统对计算机的容量和速度的要求均比平台式系统高。

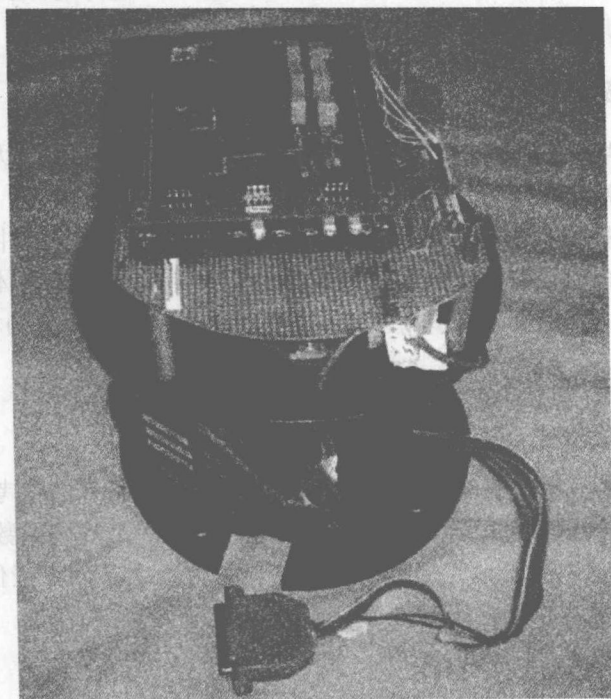


图 1-3-3 光纤陀螺捷联式惯性导航仪

注:图 1-3-3、1-3-4 所示两种陀螺的捷联式惯性系统是哈尔滨工程大学 402 教研室目前正在

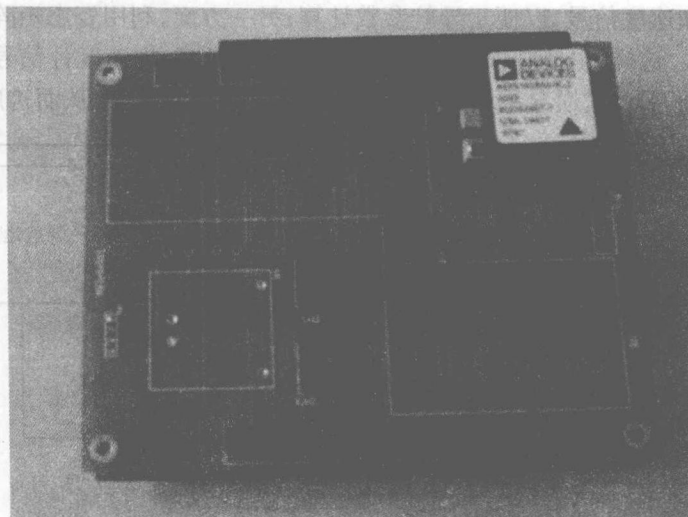


图 1-3-4 硅微惯性组件

在研制的两种惯性导航设备,前者重在精度,后者重在低成本的组合应用。

1.4 大地测量的作用

下面我们将讨论大地测量学的一些基本原理,以便了解惯性导航系统如何与它的环境相联系。

当载体在接近地球表面作机动航行时,它在一个坐标网格上运动,其导航系统则以此为基准,而且借助于这个坐标网格,载体在地图上的位置可标志出来。在大范围测量工作中和测绘地图中所用的普通坐标是地理纬度和经度,这是一个球面坐标系,它覆盖在用来近似表示地球形状的虚拟球形表面上。在有些情况下选用其他参考坐标系可能更加方便。不论采用何种参考坐标系,在惯性导航系统的设计中有某些惯例,通过这些惯例,空间的点和线可以唯一地与地球表面上的点和线相联系。与这些惯例密切相关的是地球尺寸和形状及其重力场的分析和描述。

1.4.1 地球引力场和重力场

地球每一点的引力场,定义为该点的测试物体的单位质量所受的矢量力(由地球引力所产生的)。与这个矢量场对应的是地球的引力场。

用来测量引力的实验受地球自转离心力的影响。因此在大地测量学中,实际上直接测量的是引力和地球自转离心力的合力。引力场和由于地球自转而产生的作用于物体的设想的力场二者之和,称为重力场。重力的另一个定义是:使单位质量的测试物体保持与地球的相对位置不变所需的力的负值称为重力。

1.4.2 大地水准面

重力场等势面是形状不规则的椭球面,取出一个等势面作为特殊的参考面,这个面称为大地水准面,它是与平均海平面最接近重合的等势面。大地水准面不是一个规则的数学形式,其形状由这一点到那一点是起伏不平的,这取决于地壳局部密度的变化。大地水准面在任何点的垂线由铅锤线的方向给出,由于它为天文观测提供了一个基准,故称之为天文垂线。

1.4.3 参考椭球体

可以在数学上定义的,而且近似于大地水准面的曲面是在大地测量基础上作为近似形状推导出一系列椭球面。一些文献中列出了测量得到的 19 种参考椭球体,它们在各个年代被推荐用来表示

地球的形状。这些参考面基本上是通过测量长圆弧和推断地球的尺寸而构成的,长圆弧由边相邻的三角形网组成。由弧长和天文测量测得的端点经纬度来推断地球的尺寸。这些测量最早是在十七世纪进行的。

表 1-4-1 我国常用参考椭球体参数

椭球体	长半轴 a(米)	短半轴 b(米)
Krassovsky (北京 54 采用)	6378245	6356863.0188
IAG 75(西安 80 采用)	6378140	6356755.2882
WGS 84	6378137	6356752.3142

大地水准面和参考椭球面彼此近似相当,但大地水准面有时上升到椭球面之上,有时下降到椭球面之下。在山区,大地水准面以上的物质的大质量会使它升到高于椭球面;在海洋,大地水准面会降到椭球面之下。

参考椭球面上或接近参考椭球面的点,以曲线坐标系作参考系。测量点的地理纬度定义为通过此点且垂直于椭球面的线(地理垂线)与赤道平面间的夹角;经度是包含此点和极轴的平面与通过格林威治的对应平面间的角。地心纬度则是通过此点和地球中心曲线(地心垂线)与赤道平面的夹角。

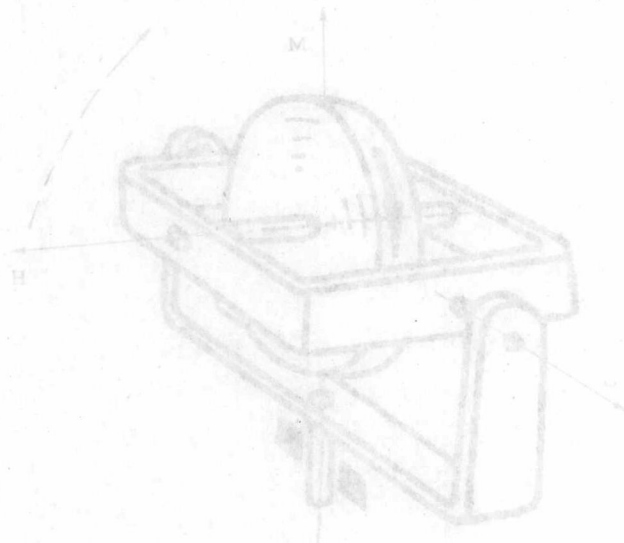


图 1-1-2 参考椭球体

第2章 惯性仪表

这一章我们将分别针对一些陀螺仪和加速度计简单介绍各种惯性仪表的基本原理,并结合了四个演示性实验使读者对惯性仪表有一个基本的认识。

2.1 陀螺仪

我们研究一下悬挂在框架内部的金属飞轮组成的玩具陀螺,用绳子拉动金属飞轮使之高速旋转后,它将保持旋转轴向在空间中的指向,即使支撑他的框架发生改变也是如此。这种玩具陀螺演示了旋转物体的角动量守恒,这就是旋转飞轮式陀螺的基本原理。

随着科技的发展各种新型陀螺的出现打破了原有陀螺的概念,如激光陀螺、半球谐振陀螺等。这些所有能够敏感载体相对惯性空间方向的改变的传感器都可以称之为陀螺仪。

2.1.1 旋转飞轮式陀螺仪及陀螺力学原理

1、陀螺仪基本特性

根据角动量守恒定律,如果作用在旋转飞轮上的外力矩之和为零,那么旋转飞轮角动量保持不变。对于旋转飞轮,假设它绕自转轴转动惯量为 J ,旋转角速度 $\vec{\omega}$,则它的角动量 $\vec{H} = J * \vec{\omega}$ 。在外力矩之和为零时,角动量保持在惯性空间不变的特性我们称之为“定轴性”,这是所有旋转飞轮式陀螺仪工作的基本原理。

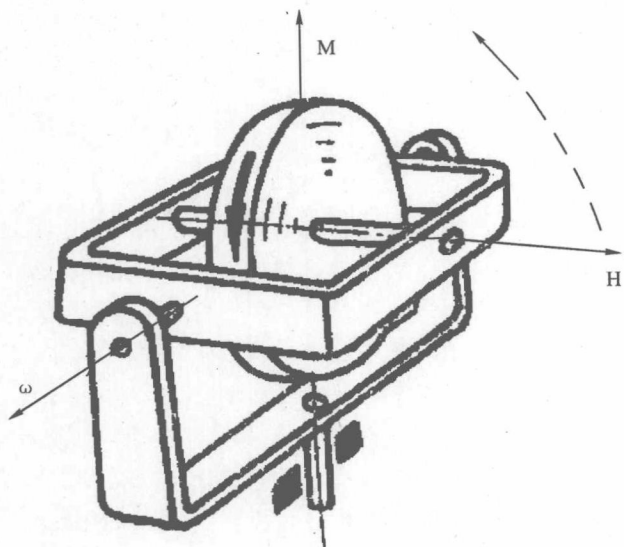


图 2-1-1 陀螺转子进动示意图

如图 2-1-1,陀螺角动量 $\vec{H}$ 指向自转角速度方向,当我们沿外框轴施加一力矩 $\vec{M}$ 时, $\vec{H}$ 轴将绕内框轴产生 $\vec{\omega}$ 的旋转角速度,这种运动称之为陀螺的“进动运动”,这个运动简单的判断方法是:陀螺受外力矩作用时产生进动,这种进动运动总是力图使陀螺角动量轴趋向与外力矩方向保持一致。进动角速度为:

$$\vec{\omega} = \frac{\vec{H} \times \vec{M}}{H^2} \quad (2-1)$$

利用陀螺进动性原理,可以对角位移和角速度进行精确测量。因为陀螺受外力矩作用时才会产生进动,如果对陀螺转子进行合适的支撑框架使得外力矩相对角动量可以忽略不计,这时自转轴在惯性空间保持方位不变,如果在支撑框架上安装角度传感器就可以测量出陀螺壳体在惯性空间的角位移。另一种工作方式下,如果我们安装力矩器对陀螺转子施加可控的力矩使得自转轴始终与陀螺壳体保持一致,测出施加力矩值就可以测量出陀螺壳体运动角速度。

旋转飞轮式陀螺仪根据支撑框架的数目分为单自由度陀螺仪和双自由度陀螺仪。

单自由度陀螺仪由单个支撑框架支撑转子,陀螺只有一个进动自由度。常规单自由度陀螺仪有三个相互正交的轴:自转轴(动量轴)、进动轴(输出轴)、施矩轴(输入轴)。如果采用弹性约束施矩来平衡陀螺壳体运动角速度,陀螺角速度传感器输出的角度正比于陀螺壳体运动角速度,这种陀螺称为速率陀螺;如果取消弹性约束,陀螺角度传感器直接反映的就是陀螺壳体的角位移,这种陀螺称为速率积分陀螺或自由陀螺。

双自由度陀螺仪由两个正交框架支撑,有两个进动自由度。与单自由度陀螺仪不同的是,与自转轴正交的两个轴向同时成为进动轴和施矩轴。

双自由度陀螺仪的两个进动轴和施矩轴,两个轴之间交叉施矩进动会产生和单自由度陀螺不同的特性。根据理论力学动静法我们可以列出双自由度陀螺仪基本技术方程:

$$\begin{cases} A\ddot{\theta}_x + H\dot{\theta}_y = M_x \\ B\ddot{\theta}_y - H\dot{\theta}_x = M_y \end{cases} \quad (2-2)$$

其中 H 为陀螺转子角动量, A 、 B 为转子组件绕内外框架转动惯量, M_x 、 M_y 分别于作用于内、外框架的外力矩, θ_x 、 $\dot{\theta}_x$ 、 $\ddot{\theta}_x$ 、 θ_y 、 $\dot{\theta}_y$ 、 $\ddot{\theta}_y$ 分别为陀螺仪自转轴绕内外框架相对惯性空间的角位移、角速度、角加速度。 M_x 、 M_y 为零时,技术方程描述了陀螺的定轴性;技术方程描述的陀螺稳态输出就是陀螺的进动性;技术方程描述的陀螺运动到稳态输出的过渡过程瞬态输出就是陀螺的章动性。陀螺章动性描述的是陀螺自转轴在原来的方位附近做振荡运动,这种章动运动不需外力矩来维持,有其固有频率,称为“章动频率”为:

$$\omega_y = \frac{H}{\sqrt{AB}} \quad (2-3)$$

一般情况下陀螺角动量非常大,章动运动是微幅高频振荡,可以忽略不计,但并不是所有场合都可以忽略不计。比如,陀螺稳定平台中,平台框架的转动惯量相对陀螺角动量并不是非常小,这样章动频率变低,过渡过程加长,所以在研究陀螺平台运动规律时必须考虑章动的影响。

2、旋转飞轮式陀螺仪的基本组成

- 陀螺壳体:陀螺仪必须借助陀螺壳体才能安装在载体上。
- 陀螺转子:本质是一高速旋转飞轮,它的转动惯量和转速就决定了陀螺角动量。
- 支撑框架组件:隔离转子与壳体,并决定陀螺进动轴的方向。
- 角度传感器:检测陀螺转子与支撑框架的相对运动。常用的有三种形式:动圈式传感器、变磁阻式传感器、电容式传感器。
- 力矩马达或电磁式力矩器:对陀螺转子施加外力矩使其绕相应框架轴进动。
- 陀螺电机:驱动陀螺转子旋转,使陀螺获得一定角动量。

3、旋转飞轮式陀螺仪的种类

旋转飞轮式陀螺仪按照支撑方式的不同可分为多种类型,常用的有以下这些种类。

a) 液浮陀螺

早期陀螺仪采用滚珠轴承支撑,为了减小框架支撑的轴系摩擦力矩,将陀螺组件悬浮在氟油中,并用宝石轴承替代滚珠轴承,宝石轴承仅起定位作用。这样,氟油密度决定了陀螺组件悬浮的状态,所以液浮陀螺需要对氟油温度进行严密控制。

b) 磁悬浮陀螺

上面讲到为了提高陀螺仪精度将陀螺转子组件悬浮在氟油中并采用精度很高的宝石轴承定位,但是不管轴承精度多高,它们之间仍然会产生倾斜,这种倾斜对随机误差的产生有很大影响,为了进一步提高精度采用磁悬浮支撑。磁悬浮支撑是一套反馈控制系统,通过检测轴间位移调整磁支撑力使支撑轴平衡。采用这种支撑方式的陀螺就称为磁悬浮陀螺。

c) 静电陀螺

为了满足人们对陀螺仪精度要求的不断提高,出现了一种超高精度的陀螺仪,称为静电陀螺。静电陀螺是指在超高真空的条件下,利用静电力支撑起来的高速旋转的球形转子。由于具有超高真空条件、无接触的静电支撑、光电读取、理想球面的转子,静电陀螺成为一个理想自由陀螺,具有很高的精度和稳定性。图 2-1-2 是静电陀螺的结构示意图。

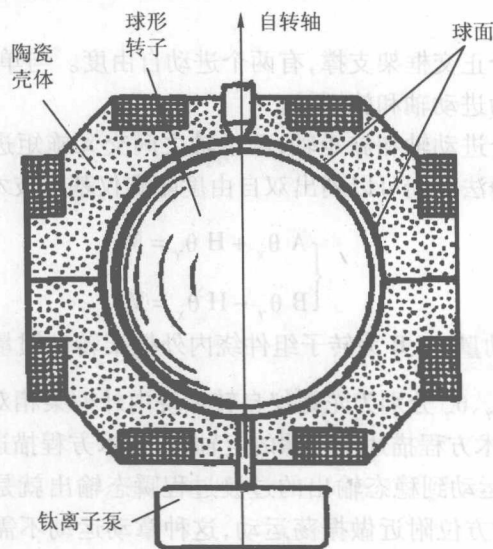


图 2-1-2 静电陀螺结构示意图

d) 动力调谐陀螺

动力调谐陀螺仪又称挠性陀螺,是一种利用挠性支承悬挂陀螺转子,并将陀螺转子与驱动电机隔开,其挠性支承的弹性刚度由支承本身产生的动力效应来补偿的新型的二自由度陀螺仪。动力调谐陀螺仪与液浮陀螺仪相比,两者精度相当,但动力调谐陀螺仪具有以下优点:结构简单,零部件少,体积小,重量轻,抗冲击能力强,可靠性高,寿命长,功耗少,启动快,成本较低,加工装配较容易,适合于大批量生产等。图 2-1-3 是挠性支撑示意图。

e) 超导陀螺

超导陀螺利用的是超导体的磁镜效应,使球形转子在磁力的托浮下与壳体脱离机械接触,从而完全消除机械摩擦引起的陀螺漂移。磁镜效应就是:在均匀磁场中放入一个由超导体材料制成的小球,在球体未达到超导温区前,磁力线会均匀透过球体,但当球体温度达到超导温区而成为超导体时,球体内的磁力线就会排出并沿球体表面绕行。

球体在超导状态下自身电阻为零,外界磁场在球体表面引起的感应电流会一直沿球面流动,这个电流产生的磁场与外界磁场相互作用就会产生垂直于球面的悬浮力。

4、旋转飞轮式陀螺仪的误差模型简介

任何陀螺仪均会有误差存在,因此限制了陀螺仪测量角位移与角速度的精度。由于设计限制和结构缺陷而产生的干扰力矩会作用在转子上,使转子产生进动,从而引起陀螺漂移。自由陀螺用于测量角位移,常用漂移角速率来表示其性能。而力反馈式陀螺仪用于测量角速率,干扰力矩将产生一个