

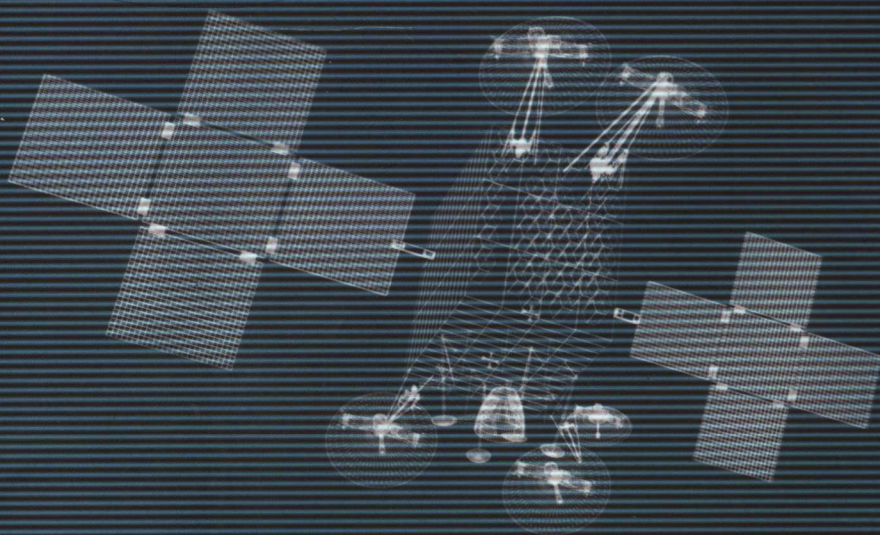
控制科学与工程



国防科工委
十五
规划
教材

惯性技术

● 邓正隆 编著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材. 控制科学与工程

惯性技术

邓正隆 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书从系统设计和应用的角度阐述了惯性技术的主要内容和惯性导航的工作原理。

全书共分九章,分别介绍了惯性导航的基本工作原理及分类、惯性导航系统的主要敏感元件、新型角速度敏感器、惯性导航系统平台、惯性导航系统分析、捷联式惯性导航系统基本算法及其误差传播特性、惯性导航系统的初始对准、组合式惯性导航系统等。

本书可供大专院校自动化及导航类专业师生选用。

图书在版编目(CIP)数据

惯性技术/邓正隆编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.2

ISBN 7-5603-2244-1

I. 惯… II. 邓… III. 惯性技术 IV. TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 012299 号

惯性技术

编著者 邓正隆

责任编辑 田秋 尹继荣

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传真 0451-86414749

印刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开本 787×960 1/16 印张 14.75 字数 313 千字

版次 2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷

书号 ISBN 7-5603-2244-1/TP·221

印数 1~3 000 册

定价 26.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:王泽山 陈懋章 屠森林

编 委:王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禔

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其它技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,



提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

惯性技术是一门综合性技术,用于对运动体的姿态和位置参数的确定,是实现运动体自主式(即工作时不依赖于外界的信息、不受气候和电子干扰的影响等)控制和测量的最佳手段。惯性技术广泛用于航天、航空、航海、大地测量等领域,由于惯性导航的自主性,使得惯性技术在军事上具有特殊的应用价值。

本书以惯性导航系统为主线对惯性技术的原理、元件、系统做一全面的介绍,全书共分九章。第一章介绍惯性导航的基本知识,第二章介绍惯性导航的基本原理和三种常用的惯性导航系统,第三章介绍机械转子陀螺仪的工作原理及其相应的敏感器件和加速度计,第四章介绍光学角速度敏感器件,第五章从系统设计的角度阐述了惯性导航平台的结构和动特性,第六章介绍半解析式惯性导航系统的分析及其误差的传播特性,第七章介绍捷联式惯性导航系统的基本算法和系统误差传播特性,第八章介绍惯性导航系统的初始对准,第九章介绍组合式惯性导航系统。

本书编写的指导思想是向初学者讲述惯性技术的基本概念和相关的基本知识,为进一步的应用和深入研究打下基础。为配合这个教学目的,各章均给出一定的思考题,指出各章需要掌握的主要概念。

本书主要用做自动控制、导航类大学本科生及研究生教材,对于较少学时的本科生,可适当选学相关章节的部分内容,并不影响教材内容的连贯性。



本书在编写过程中,得到国防科工委教材编写委员会、哈尔滨工业大学教务处、哈尔滨工业大学出版社的帮助和指导,同时得到哈尔滨工业大学控制科学和工程系的领导和同仁们的支持和鼓励,王广雄教授和黄德鸣教授对书稿进行了仔细的审阅,编辑做了大量的编审工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,不足和疏漏在所难免,欢迎广大读者批评指正。

邓正隆

2005年9月

目 录

第一章 惯性导航的基本知识

1.1 惯性导航的概念	(1)
1.2 地球的形状和重力特性	(3)
1.3 坐标系	(6)
1.4 用矩阵法推导方向余弦表	(8)
1.5 用四元数表示坐标变换	(14)
思考题	(22)

第二章 惯性导航的基本原理及分类

2.1 基本概念的描述	(23)
2.2 惯性导航系统中加速度计输出信号公式推导	(29)
2.3 半解析式惯性导航系统	(34)
2.4 解析式惯性导航系统	(39)
2.5 捷联式惯性导航系统	(42)
2.6 各类系统的特点及适用范围	(55)
思考题	(56)

第三章 惯性系统的主要敏感元件

3.1 陀螺仪的力学基础	(57)
3.2 单自由度陀螺仪	(61)
3.3 二自由度陀螺仪	(66)
3.4 挠性陀螺仪	(67)
3.5 加速度计	(71)
思考题	(77)

第四章 新型角速度敏感器

4.1 概 述	(78)
4.2 光学陀螺仪基础	(78)
4.3 环形激光陀螺仪	(81)
4.4 光纤陀螺仪	(86)
4.5 激光陀螺仪漂移误差模型	(91)
思考题	(92)

第五章 惯性导航系统平台

5.1 惯导平台概述	(93)
------------------	------



5.2 用单自由度浮子积分陀螺仪组成的单轴稳定器	(97)
5.3 用二自由度陀螺仪组成的单轴稳定器	(104)
5.4 半解析式惯性导航系统的修正回路	(108)
5.5 舒拉调整	(113)
思考题	(117)
第六章 惯性导航系统的分析	
6.1 半解析式惯导系统的基本方程	(118)
6.2 ψ 方程	(123)
6.3 单通道惯导系统的分析	(128)
6.4 惯导系统误差方程式的建立	(135)
6.5 惯导系统误差传播特性	(142)
思考题	(146)
第七章 捷联式惯性导航系统基本算法和系统误差传播特性	
7.1 捷联式惯导算法概述	(147)
7.2 姿态矩阵的计算	(148)
7.3 姿态矩阵的实时计算	(154)
7.4 旋转矢量法	(165)
7.5 捷联惯导系统误差传播特性	(171)
思考题	(177)
第八章 惯性导航系统的初始对准	
8.1 概 述	(178)
8.2 静基座惯导系统误差方程	(179)
8.3 单回路的初始对准	(180)
8.4 陀螺漂移的测定	(187)
8.5 捷联式惯导系统的初始对准	(190)
思考题	(194)
第九章 组合式惯性导航系统	
9.1 概 述	(195)
9.2 惯导系统的阻尼	(196)
9.3 阻尼式组合导航系统	(198)
9.4 最优组合导航系统	(208)
9.5 惯性导航系统误差的统计分析	(219)
思考题	(222)
参考文献	(223)

第一章 惯性导航的基本知识

1.1 惯性导航的概念

一、牛顿定律

1867 年英国科学家牛顿发表论文“自然哲学的数学原理”,提出了 3 条定律,建立了经典力学的基本框架,这 3 条定律也是惯性导航的力学基础。

牛顿第一定律陈述的是,任何物体都保持其静止或匀速直线运动状态,直到作用在物体上的外力迫使它改变这种状态为止。牛顿第二定律陈述的是,一个力作用在一个物体上,这个力就使物体沿着力的方向产生加速度,加速度的大小和物体的质量成反比,即

$$F = ma \quad (1.1.1)$$

式中 F ——外作用力;

m ——物体的质量;

a ——物体产生的加速度。

牛顿第三定律对作用力的性质进行了进一步的说明,对于每一个作用力,总存在一等值反向的反作用力;或者说两个物体之间的相互作用总是大小相等而方向相反的。

牛顿第一定律表明了物体的惯性,它是牛顿第二定律的特殊情况。牛顿第二定律是对物体的惯性的量度。牛顿第三定律表明了作用和反作用是同时发生的。对其定量的描述是相对惯性空间成立的。

通过对上述牛顿 3 个定律的描述,我们看出,任何运动体的运动状态都可以用加速度来表征。如,当加速度 $a = 0$ 时,表示运动物体保持原来的运动速度。用 V_0 表示运动物体的初始速度,当 $a = 0$ 、 $V_0 = 0$ 时,表示运动物体不动;当 $a = 0$ 、 $V_0 = \text{const}$ 时,表示运动物体仍以原来的速度运动;当 a 与前进方向相同时,表示运动物体加速运动;当 a 与前进方向相反时,表示运动物体减速运动。当我们知道了加速度的这个特性之后,就可以知道运动物体的运动特性。

二、加速度、速度和位移的关系

加速度计可以测量运动体的加速度。惯性导航是以测量运动体的加速度为基础的导航定位方法,测量到的加速度经过一次积分可以得到运动速度,经过二次积分可以得到运动距离,



从而给出运动体的瞬时速度和位置数据。它们三者之间的关系可表示为

$$\begin{aligned} a &= \frac{dV}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2} \\ V &= V_0 + \int_0^t a dt \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

$$S = S_0 + \int_0^t V dt = S_0 + V_0 t + \int_0^t \int_0^t a dt dt$$

式中 a ——运动体的加速度；

V ——运动体的速度；

S ——运动体的位移。

设 $t = 0$ 时, $V_0 = 0$, $S_0 = 0$, 当 $a = \text{const}$ 时, 则有

$$V = at \quad (1.1.3)$$

$$S = \frac{1}{2} at^2 \quad (1.1.4)$$

从上面的公式, 我们可以看出一个沿直线(一维)运动的载体, 只要借助于加速度计测出载体的运动加速度, 载体在任何时刻的速度和相对出发点的距离就可以实时地计算出来。同样的推理可以推广到三维状态。这种不依赖外界信息, 只靠对载体自身的惯性测量来完成导航任务的技术称做惯性导航, 也称做自主式导航。

三、在平面上的导航

这是一个简化的二维导航例子。考虑一个载体在平面上运动, 在此平面上取坐标系 OXY 。为简单计, 设 $t = 0$ 时, 载体在坐标系原点 O 处。载体上放置一个平台, 平台上放置两个加速度计 A_X 和 A_Y , 他们的敏感轴分别平行于 OX 和 OY 轴。在载体做各种机动运动状态下, 平台能够保持加速度计 A_X 和 A_Y 的敏感轴方向始终分别平行于 OX 和 OY 轴方向。这样, 依据前面的公式, 只要对加速度计 A_X 和 A_Y 的输出信号 a_X 和 a_Y 进行计算, 就可以实时计算出载体在坐标系中的位置和瞬时速度, 图 1.1 给出简化二维导航系统方块图。

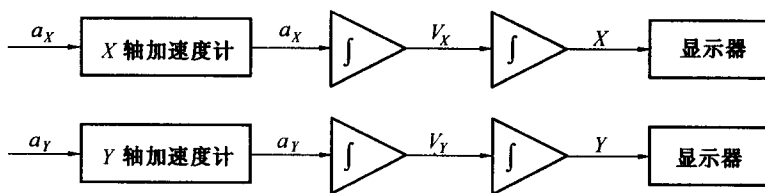


图 1.1 简化二维导航系统方块图



1.2 地球的形状和重力特性

一、地球的形状

使用惯性导航系统的载体,在运动中都必须和地球发生联系,因此,应当对地球的形状和重力场的特性有一定的了解。

地球表面的形状是不规则的,实际上不可能按照这个真实表面来确定地球的形状和建立模型。在确定地球形状的时候,是采用海平面作为基准,把“平静”的海平面延伸到全部陆地所形成的表面称做“大地水准面”,它所包围的几何体称做“大地体”或“地球体”。大地体的表面是地球重力场的一个等位面,也可认为地球体的法线方向和重力方向一致。地球上的重力,是由万有引力和地球自转引起的离心力合成的。由于地球质量分布的不均匀,即太阳、月亮等天体运动影响等原因,地球重力场的大小和方向实际上是不规则的,在工程技术的应用中对此必须采取某种近似的描述。把地球看做是具有半径为 R 的球体,这是一般工程技术中所采用的最简单的表示方法。

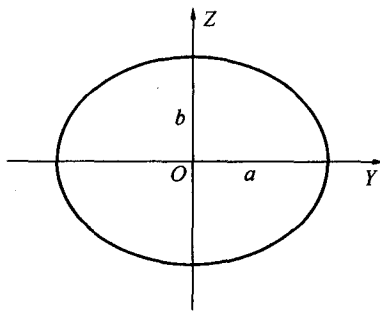


图 1.2 地球椭球体

进一步的精确近似,把地球看做是一个旋转椭球体,称其为参考椭球,长半轴 a 在赤道平面内,短半轴 b 和地球自转轴重合,如图 1.2 所示。

目前不同国家和地区所采用的旋转椭球的参数是不同的,它们根据各自不同的地理条件选择不同的参数旋转椭球体,4 种主要的参考椭球的基本数据见表 1.1。

表 1.1 地球参考椭球参数

参考椭球	长半轴 a/km	扁率 α	适用地区
克拉克 (Clarke) (1866)	6 378.206	1/294.978 698 2	北美
克拉索夫斯基 (Krasovski) (1940)	6 378.245	1/298.30	前苏联
国际椭球体 (International) (1924)	6 378.388	1/297.0	前苏联
WGS - 84 (1984)	6 378.137	1/298.257 223 568	全球

注:扁率 $\alpha = \frac{a-b}{a}$.

全球大地系(参考椭球)(World Geodetic System)的数据的形成,考虑了大地测量、多普勒雷达、卫星等的测量数据,因此有更好的拟合精度。

我国在测量中曾采用克拉索夫斯基测定的地球椭球体的数值,目前,采用 WGS 系统。描述参考椭球半径的公式为



$$r = a \left[1 - \alpha \sin^2 \varphi_c - \frac{3}{8} \alpha^2 \sin^2 \varphi_c - \dots \right] \quad (1.2.1)$$

式中 a ——赤道半径(参考椭球长半轴);

φ_c ——地心纬度;

α ——扁率。

本书将把地球看做一个圆球体。

二、地球重力场特性

地球的重力场是由万有引力(或地心引力)和地球自转所产生的离心力合成的,如图 1.3 所示。即

$$W = j + F \quad (1.2.2)$$

式中 W ——重力矢量;

j ——地心引力矢量;

F ——地球自转离心力矢量。

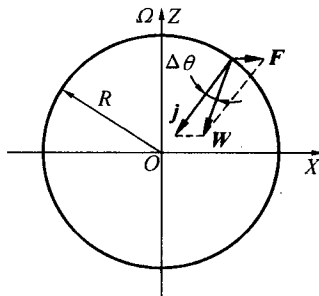


图 1.3 地球的重力

图中的圆代表地球为理想的球体, R 代表地

球平均半径,地心引力矢量沿 j 的方向,地球自转的离心力矢量 F 将随纬度 φ 变化。重力 W 的方向也随纬度变化。

由于离心力 F 比重力 W 小得多, $\Delta\theta$ 角只有几角分,当 $\varphi = 45^\circ$ 时, $\Delta\theta$ 角约为 $9''$ 。

由于地球是椭球体,地心引力的方向一般不和法线方向 R 重合。 j 的大小和方向还取决于地球上被测点附近的物质密度的分布状况,而且也可能随时受地质变化的影响。实际测量数据表明,在 100 年间重力 W 的方向变化小于 $10''$ 。

单位质量在重力场的作用下所获得的加速度称为重力加速度,通常用符号 g 来表示,可见重力加速度 g 是重力大小和方向的一种表征。在地球上,随着纬度和距离地面高度 H 发生变化,重力加速度 g 的大小和方向也要变化。

三、垂线及纬度的定义

地球表面某点的纬度,是该点的垂线方向和赤道平面之间的夹角,由于地球是不规则的椭球体,纬度的定义变得复杂。

垂线的定义主要有以下 3 种。

- 1) 地心垂线——地球表面一点和地心的连线。
- 2) 测地垂线(大地垂线)——地球椭球体表面一点的法线方向。
- 3) 重力垂线——重力方向,有时也称天文垂线。

当考虑地球为椭球体时,3 种垂线的方向各不相同,由于椭球体的表面和大地水准面不完



全相符,因此重力垂线和测地垂线也不完全一致。由于地球椭球体已很接近大地体的形状,所以这两个垂线之间的偏差是很小的,一般不超过 $30'$,实际上可以认为重力垂线和测地垂线方向相同。

对应上述 3 种垂线定义,则有以下 3 种纬度定义。

1) 地心纬度——地心垂线和赤道平面之间的夹角,如图 1.4 中的 φ' 。在研究一般导航问题时,就是采用地心纬度的概念。实际上是把地球看做一个圆球体。

2) 测地纬度(大地纬度)——通过大地测量方法定出的纬度,即椭球法线方向和赤道平面之间的夹角,如图 1.4 中的 φ 。目前,大地测量及精确导航中均采用此概念。在惯性导航中,经纬度的推算也是建立在此基础上的。

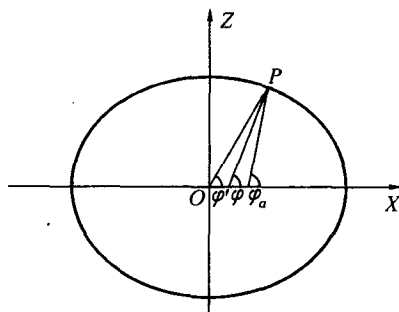


图 1.4 各种纬度示意图

3) 天文纬度——通过天文方法测定的纬度,即重力方向和赤道平面之间的夹角,如图 1.4 中的 φ_a 。在惯性导航系统中,加速度计是放置在与重力方向相垂直的定位面上,因此,根据加速度计输出信号所求得的纬度,实际上就是天文纬度。

如上所述,由于重力垂线和测地垂线之间的偏差角很小,一般不超过 30 角秒,因此,测地纬度和天文纬度可以不加区别,统称为地理纬度。

地理纬度 φ 和地心纬度 φ' 之间的偏差角 δ 有各种表达式,其近似表达式为

$$\delta = c \sin 2\varphi \quad (1.2.3)$$

式中

$$c = \frac{a^2 - b^2}{2ab} \approx \frac{a - b}{a} \quad (1.2.4)$$

偏差角 δ 最大值可达 $11.5'$ 。

四、地球的运动和时间的定义

地球相对惯性空间的运动是由多种运动形式组成的,科学家们对此进行了长期研究工作,从所得结论来看,其中大部分运动对惯性导航技术来说,是没有实际意义的。因为它们的值太小,还不能计为惯性元件的干扰源。

主要运动有:地球绕自转轴的逐日旋转(自转);相对太阳的旋转(公转);进动和章动;极点的漂移;随银河系的一起运动。

对于惯性导航系统来说,重要的数据是地球相对惯性空间的旋转角速度,这个值能被惯性元件所敏感到。地球在不断地自转运动时还有公转运动,这些运动均是相对太阳来计时的。由



于地球相对太阳旋转一周(自转)定义为 24 h,所以,相对惯性空间旋转一周的时间就要小于 24 h,地球在完成一次公转时,其相对太阳转过 365 次,而相对惯性空间恰好是 366 次。则地球相对惯性空间的旋转角速度为

$$\Omega = 15.041\ 07^\circ/\text{h}$$

通常把地球相对太阳自转的时间称为平太阳时,平太阳时 24 h,则地球相对太阳自转一周。把地球相对惯性空间的自转时间称为恒星时,恒星时 23 h 56 min 4.1 s,地球则相对惯性空间自转一周。

1.3 坐标系

在物理学和力学的研究工作中,为了方便,往往把一个空间或一个运动体抽象为一个坐标系来表示,所以坐标系可以代表惯性空间、地球、飞行器等。由于运动的相对性,研究运动对象的运动必须指明是相对哪个坐标系的运动。在惯性导航中,无论是导航还是姿态控制的研究都必须引入相应的坐标系才能进行。如惯性元件的输出信号是相对惯性空间的测量信号,据导航的任务不同,则必须将其转换为地理坐标系或其它坐标系的信号。因此,针对不同的研究对象和具体任务要求,正确地选取不同的坐标系是十分必要的。本节只讲述确定地球相对惯性空间的运动和确定运动体相对地球运动的两大类坐标系,而和飞行器、惯导平台等相固连的坐标系则在适当的章节中给出。

一、确定地球相对惯性空间运动的坐标系

由于宇宙间的一切物体,包括空间都在运动,因此,绝对不动的,或做等速直线运动的惯性空间是不存在的,要采用惯性坐标系来表示适用于牛顿定律的惯性空间,只能根据需要选择某些近似系统作为惯性坐标系,导航中应用的有以下两种。

1. 太阳中心惯性坐标系

以太阳系作为惯性空间,坐标原点设在太阳中心,如图 1.5 所示, Z_s 轴垂直于地球公转的轨道平面, X_s 和 Y_s 轴在地球公转轨道平面内成右手坐标系。

2. 地心惯性坐标系

地心惯性坐标系的原点取在地球中心, Z_e 轴沿地球自转轴,而 X_e 轴、 Y_e 轴在地球赤道平面内和 Z_e 轴组成右手坐标系,如图 1.6 所示。坐标系 $OX_eY_eZ_e$ 不和地球固连,不参与地球的自转。当运动体在地球附近运动时,多采用此坐标系为惯性坐标系。

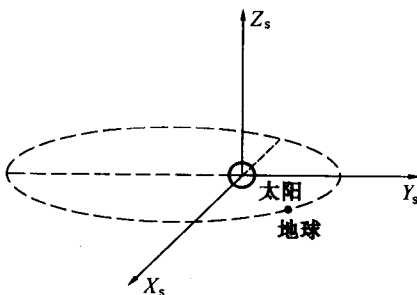


图 1.5 太阳中心惯性坐标系