459382
59244
7/4064

惯性导航系统

44
64

国防工业出版社

成都工学院图书馆
基本館藏

毛主席语录

古为今用，洋为中用。

一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

毛主席语录

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

惯性导航系统

怡耳兹·布罗克斯梅耶 著
致学 译

国防工业出版社
1972

内 容 简 介

本书介绍了惯性导航系统的基本工作原理、陀螺、加速度计、单自由度与三自由度稳定平台、惯性导航系统的各种方案、误差分析、有阻尼的惯性导航系统以及惯性导航系统的数字式模拟等，可供有关方面的工程技术人员及高等院校师生参考。

本书与本社出版的《惯性导航分析与设计》可配合使用，互为补充。

INERTIAL
NAVIGATION SYSTEMS
〔美〕 Charles Broxmeyer
McGraw-Hill Book Company 1964

*

惯性导航系统
致学 译

*

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
新华书店北京发行所发行　　各地新华书店經售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32　印张 8 1/4　206 千字
1972年 4 月第一版　1972年 4 月第一次印刷
统一书号：15034·1259　　定价：0.85元

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

出 版 说 明

遵照伟大领袖毛主席关于“**洋为中用**”的教导，我们将《惯性导航系统》这本书翻译出版，供有关方面的同志们参考。

惯性导航系统是一种自主式导航系统，由稳定平台（包括陀螺、加速度计与电子线路）和计算机组成，能为飞行器和船舰提供位置、速度和姿态等信息。惯性导航系统既不发射也不接收无线电波，因而保密性好，不会受到干扰，它不需要任何地面设备就能进行全天候导航，其工作与外界环境条件（如磁场、洋流和风等）无关。因此，惯性导航技术已在飞机、导弹、飞船、船舰和潜艇中获得了广泛应用。

本书比较系统地论述了惯性导航系统的结构及其性能分析，并且由于应用了自动控制理论和矩阵法来进行分析，从而避免了繁琐的叙述，比较简明扼要。本书存在的主要缺点是：偏重于理论分析，应用实例较少；只着重讨论了飞机、船舰和潜艇用的惯性导航系统，未具体研究在导弹和飞船上应用的惯性制导系统。

本书与本社出版的《惯性导航分析与设计》可配合使用，互为补充。

我们删掉了原书中的某些资产阶级观点，并对文字上的错误作了改正。由于我们的水平所限，书中一定还存在不少缺点和错误，欢迎同志们批评指正。

目　录

第一章　基本概念 …… 9

引言 …… 9

惯性参考系的概念 …… 10

加速度计 …… 14

稳定平台 …… 15

陀螺仪 …… 16

限动陀螺仪 …… 19

舒勒原理 …… 22

简单惯性导航系统 …… 24

三轴分析 …… 27

第二章　数学基础 …… 29

动座标系 …… 29

矢量变换 …… 29

速度和加速度变换 …… 33

任意旋转的方向余弦方程 …… 35

反对称矩阵的相似变换 …… 36

相似变换的应用 …… 37

关于旋转角的一个定理 …… 39

接近重合的座标系 …… 40

接近重合的座标系之旋转 …… 42

第三章　地球的形状 …… 44

导航座标 …… 44

引力场和重力场 …… 44

大地水准面 …… 46

参考椭球 …… 46

引力场的表达式 ……48
引力场的改进表达式 ……50
重力异常和垂线偏斜 ……51
地理垂线和地心垂线间的偏差角 ……51
一定高度处的偏差角 ……53
第四章　陀螺仪和单自由度稳定平台 ……54
积分陀螺 ……54
角速度陀螺 ……56
超低温陀螺 ……57
电真空陀螺 ……59
单自由度稳定平台 ……60
平台伺服机构的设计准则 ……66
具有滞后补偿的平衡环伺服机构中的不稳定性 ……74
陀螺测试和不平衡方程 ……75
第五章　三自由度稳定平台 ……80
三自由度稳定平台的一般描述 ……80
一般运动下的陀螺误差方程 ……83
输出轴耦合 ……85
控制回路的隔离 ……93
基座运动耦合 ……96
负载力矩的变化 ……97
锥效应 ……99
四平衡环稳定平台 ……100
第六章　比力方程及其在几个座标系中的分解 ……110
加速度计 ……110
积分陀螺摆式加速度计 ……111
摆式加速度计 ……112
摆式加速度计比力方程的推导 ……112
比力方程的变换 ……114
地心座标系 ……117

地理座标系 …… 118
大圆座标系 …… 119
逆座标系 …… 123
惯性座标系 …… 125
惯性座标系（改型的）…… 128
第七章　惯性导航系统的一些设计方案 …… 131
完整的惯性导航系统 …… 131
系统 A …… 131
系统 B …… 134
系统 C …… 138
系统 D …… 140
系统 E …… 144
系统 F …… 145
计算 …… 146
第八章　线性分析 …… 150
用线性微分方程作误差分析 …… 150
系统 A 误差方程的推导 …… 152
系统 A 误差方程的解 …… 155
傅科摆效应 …… 157
模拟结果 …… 159
高度计算 …… 160
完整的比力方程组的不稳定性 …… 161
系统 B 的误差方程 …… 162
相平面图 …… 164
模拟机模拟 …… 168
加速度计误差的影响 …… 170
系统 D 的误差方程 …… 171
系统 D 的模拟 …… 173
元件安装误差的影响 …… 175
垂线偏斜的影响 …… 179
小结 …… 180

第九章　阻尼问题 …… 182
问题的实质 …… 182
阻尼系统的性能指度 …… 184
随机输入对线性振荡器的作用 …… 185
垂直误差的阻尼 …… 189
阻尼垂直误差的补偿器 …… 192
外部速度补偿 …… 195
运载器运动对垂直误差的影响 …… 196
阻尼方位误差（简化情形） …… 197
阻尼方位误差（一般情形） …… 200
另一种阻尼结构 …… 204
方位误差阻尼补偿器的设计 …… 207
初始对准 …… 213
垂线的修正 …… 214
方位对准 …… 215
第十章　用通用数字计算机研究惯性导航系统的性能 …… 222
模拟问题 …… 222
运载器航迹 …… 224
惯性导航系统 …… 227
运载器航迹和惯性导航系统之间的联系 …… 227
实例 1 …… 228
实例 2 …… 230
附录 A　矩阵代数概要 …… 237
矩阵的定义 …… 237
各种类型的矩阵 …… 237
矩阵的相等 …… 238
矩阵的加法 …… 239
矩阵与数量相乘 …… 239
矩阵乘法 …… 239
矩阵的结合 …… 240
矩阵的转置 …… 240

逆矩阵 …… 242
附录B 稳定平台的力矩方程 …… 245
力矩方程的推导 …… 245
附录C 傅科摆 …… 247
运动方程 …… 247
附录D 随机过程理论概要 …… 250
随机函数的定义 …… 250
概率密度函数 …… 250
平稳性 …… 251
期望值 …… 251
自相关函数 …… 252
埃尔过德特性 …… 252
功率密度谱 …… 252
维纳定理 …… 253
物理系统的平均输出 …… 254
参考文献 …… 259

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

第一章　基本概念

引　言

在过去十五年里，由于精密陀螺仪和加速度计的改进，已使得制造一种不需要用目视或无线电与环境相联系的惯性导航装置成为可能。惯性导航系统完全依赖反应惯性力和万有引力的机电仪表的工作；它们是真正的“黑箱”，当其由一个运载器携带时，能保持对运载器❶运动作连续记录。

对惯性导航和惯性制导加以区分是很重要的。惯性导航系统用于能自由操纵的运载器，例如船舰和飞机。惯性导航系统可通过自动驾驶仪控制运载器，它的基本功能是在数小时或数天的时间内，保持位置、速度、航向和地垂线方向的指示。当惯性导航系统与自动驾驶仪连用时，通常作为一个调节器，使运载器保持一定的航线；但当作一个独立装置使用时，它跟随运载器的任意运动，对运载器的作用只限于影响操作人员驾驶船舰或飞机，使之达到目的地或很好地按照一定的航线航行。

惯性制导系统则直接控制运载器的航线，它用于制导火箭，诸如弹道导弹、人造卫星运载火箭或宇宙探测等。制导系统的特点是工作时间比导航系统短得多，一般至多只有数分钟，直到火箭燃料烧完为止。在燃料烧完以后，运载器只受引力的作用继续飞行；而已为自由落下的航迹非常精确地建立了一组初始条件的制导系统就不再起作用了。

本书完全叙述适用于能自由操纵的运载器的导航系统，而不

---

❶ 运载器是指飞机、船舶和潜艇等运载工具的通称。——译者

探讨用于限定航迹的运载器，如火箭的制导系统。可是，这两类系统在许多方面是共同的：通常都采用由陀螺控制的稳定平台，以建立空间基准，还采用安装在平台上的加速度计，以感受有关运载器运动的信息；结构中所用的机械安排和计算方法方面有类似之处；由于这两类系统的工作特性都取决于它们对惯性力和地球引力场的反应，分析它们的数学方法也有许多共同点。然而，由于任务不同，这两类系统所构成的特定方程组差别相当大。对惯性制导最先进技术的探讨还没有在公开文献中发表过。

我们讨论的大多数理论将应用于所有惯性导航系统，第七章到第十章则应用于被认为有代表性的几个系统。惯性导航系统之间有着血统般的类似，因而使一系统的工作和分析与另一系统很相象，尽管如第八章所述的那样，特定的工作情况可以有显著的差别。处理不同系统时所遇到的数学方法问题通常是座标变换问题，不难用本书叙述的方法掌握。

本章略述惯性导航系统的基本概念及其主要组件的特性，而且概略地描述一个为二维运动的简单系统，说明组件如何互相连接以组成一个惯性导航系统。以下各章将更一般地论述组件的性质和系统方程。

惯性参考系的概念

物理观测指出，存在着某些参考系——惯性参考系，用以表达经典物理的定律。最先由牛顿制定的力学定律在绝对空间里是成立的。“绝对空间，就其自身性质来说，与外界任何东西都没有关系，始终保持一样而且不运动。”（参考文献59，6页）表达力学定律的天然参考系被认为是绝对空间中静止的刚性轴系。随着广义相对论的出现，空间和时间的观念已有了根本的变化。这种与物质无关的、惯性参考系可在其中静止的绝对空间的古典形象就不再为人们所接受了。在新理论中，物理现象归因于宇宙的其他物体，这时惯性参考系仍保持其基本的重要意义，但有了一个与物

质有关的广义定义。广义惯性参考系的性质可在经典力学的范围内推断。

我们用运动学第一定律来定义惯性参考系可得到此概念的初步概括。按照第一定律，物体使自身保持静止或作匀速直线运动。运动的匀速性只能参照某个座标系才能得到证实。如果我们假定有实际上不受力或近似不受力的物体存在，则惯性参考系可定义为一个具有三条非共面刚性轴的座标系，这三条轴都是该物体按照第一定律运动的轨线。假如这样一个参考系存在的话，那末相对于它作匀速移动的任何别的座标系也是一个惯性参考系。而且，若这样一个参考系存在，同时牛顿第二定律，即力等于质量乘加速度，在这个参考系中成立，则在所有其他惯性参考系中第二定律也成立。借助于将牛顿第二定律从一个参考系变换到另一参考系，这一点就很容易证明。

令 $\mathbf{r}$ 是物体参照一个惯性参考系的参考矢量，$\mathbf{r}'$ 是同一物体参照另一惯性参考系的参考矢量，$\mathbf{v}$ 是参考系间的相对速度。若假定在 $t=0$ 时它们的原点是重合的，则我们有

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}'+\mathbf{v}t \tag{1-1}$$

牛顿第二定律是

$$\mathbf{F}=m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}=m\frac{d^2\mathbf{r}'}{dt^2} \tag{1-2}$$

只要惯性参考系一找到，就可任意地引入动参考系。在任意转动和移动的参考系中，牛顿第二定律取以下形式：

$$\mathbf{F}+\sum_i \mathbf{F}_i=m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \tag{1-3}$$

$\mathbf{F}_i$ 称为表观力，它与受它作用的质量 m 成正比，而且与所选参考系对惯性参考系的运动有关。在以下诸章中，我们将会遇到它们的分析形式。表观力有时以下列方式分类（参考文献 46，96～104页）。

表1-1 表观力

表观力	非惯性参考系之运动
爱因斯坦	直线加速度
欧拉	角加速度
离心力	角速度
哥里奥利	角速度

根据上述观点，惯性参考系是可应用运动定律的参考系。这样的参考系有无数个，它们象牛顿绝对空间那样弥漫于整个空间。

通过增加另一条件，我们就得到一个更一般而且有用的定义。惯性参考系可定义为这样一个参考系，其中运动定律只在一个有限的区域内可应用。这样的参考系可叫做局部惯性参考系。这种参考系的存在是根据引力质量和惯性质量相等这一原理而得到的。

首先考虑对太阳系质心静止而且对恒星不转动的一个参考系。已知这类参考系是惯性的，因为当它用作参考系时，力学定律所预测的行星运动可得到证实。根据我们给的第一个定义，随地球移动的参考系不是惯性参考系，这是由于地球绕太阳作加速运动的缘故。可是依靠在地球上做实验来试验牛顿第二定律的观测者发现，第二定律在随地球移动的参考系中成立，而不引入任何表观力。这个答案不足以说明实验结果和地球在其轨道上运动的关系。

可以下这样一个结论：在一个大质量例如地球的附近，存在着一个局部惯性座标参考系，对地球附近的力学现象，此参考系是合适的参考系。地球的引力场必须认为与局部惯性参考系重迭起来，但太阳的引力场可以忽略。用广义相对论的语言来说，即它**“被变换掉了”**。

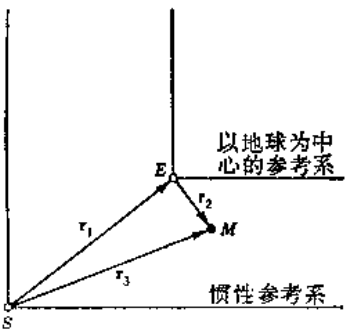

图1-1 测试质量的运动

在图 1-1 中，令 S、E 和 M 代表太阳、地球和测试的小质量，它们的质量分别为 s、e 和 m。对于惯性参考系，此小质量的运动方程是

$$-sm\gamma\frac{\mathbf{r}_3}{r_3^3}-em\gamma\frac{\mathbf{r}_2}{r_2^3}=m\ddot{\mathbf{r}}_3 \tag{1-4}$$

式中，γ 是引力常数。方程的两边都出现 m 是因为质量有两个定义；在运动第二定律和引力的逆平方定律中都以同一参数出现。

如果我们把式（1-4）写成

$$-sm\gamma\frac{\mathbf{r}_3}{r_3^3}-em\gamma\frac{\mathbf{r}_2}{r_2^3}-m\ddot{\mathbf{r}}_1=m\ddot{\mathbf{r}}_2 \tag{1-5}$$

我们可认为小质量参照以地球为中心的座标系而运动，既然我们现在所涉及的是作加速运动的参考系，表观力 $-m\ddot{\mathbf{r}}_1$ 出现在方程左边。地球的运动方程是

$$-se\gamma\frac{\mathbf{r}_1}{r_1^3}=e\ddot{\mathbf{r}}_1 \tag{1-6}$$

以 m/e 乘（1-6）并把它从（1-5）中减掉，我们得到

$$-sm\gamma\left(\frac{\mathbf{r}_3}{r_3^3}-\frac{\mathbf{r}_1}{r_1^3}\right)-em\gamma\frac{\mathbf{r}_2}{r_2^3}=m\ddot{\mathbf{r}}_2 \tag{1-7}$$

由于小质量靠近地球，则

$$\mathbf{r}_1\approx\mathbf{r}_3 \quad 和 \quad \left|\frac{\mathbf{r}_3}{r_3^3}-\frac{\mathbf{r}_1}{r_1^3}\right|\leqq\left|\frac{2\mathbf{r}_2}{r_1^3}\right|$$

太阳质量对地球质量之比是 3.334×10^5，r_1 是 9.3×10^7 哩（$\approx1.5\times10^8$公里）。若取 r_2 为 4×10^3哩（$\approx6.44\times10^3$公里），则(1-7)的第一项与第二项之比决不会大于

$$2\frac{sr_2^3}{er_1^3}=5.3\times10^{-8}$$

于是式（1-7）成为

$$-em\gamma\frac{\mathbf{r}_2}{r_2^3}=m\ddot{\mathbf{r}}_2 \tag{1-8}$$

同时我们看到，一开始就可用地心系作为惯性参考系来计算测试质量在很邻近地球处的运动。

刚才考虑的地心系是沉浸在引力场中的，但它有一个运动，因此可使我们忽略部分引力场。显然，在所有接近地球的运动都据以参照的一个参考系中，不可能给这个参考系以合适的运动来使整个引力场消失。然而在一个足够小的区域里，有可能变换掉整个引力场。例如在自由落下的电梯里，从电梯中一个观测者的角度来看，引力场可假定为零。在广义相对论中，对于局部惯性参考系而言，整个引力场在一个小区域内被变换掉。这种参考系不仅对描述力学现象来说是基本的，而且对描述电磁现象来说也是基本的。

加速度计

往往有人指出“加速度计”这个术语是一个误称，因为叫这个名称的器件不测量加速度而是测量加速度与引力之差。这个概念可以用有名的“爱因斯坦箱”设想实验生动地表达。

运动电梯中的人观测由弹簧悬挂于天花板的一个质量，而且试图从弹簧的变形推测其运动。如果质量是m，而且引力场G向下作用，则弹簧受力mG的作用而延伸。另外，如果电梯以加速度a向上加速，则弹簧也会延伸，这时是受力ma作用的缘故。没有附加的信息，观察者不能告诉弹簧变形是引力引起的，还是相反方向的加速度引起的，或两者联合引起的。然而，不管引力场多大，也不管加速度有多大，使弹簧变形的力的确切量度为

$$mG-ma$$

这里G和a都是以向下测量为正。

由于m已知，则差值

$$f=G-a \tag{1-9}$$

就可以测定，这个量叫做比力。显然，上述关系式对所有分量都成立，可以推广到矢量方程为

$$\mathbf{f}=\mathbf{G}-\mathbf{a} \tag{1-10}$$

在形成广义相对论时，爱因斯坦箱实验是一个重要的概念步骤，我们不打算进一步探索这条思路，因为对惯性导航理论没有

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com