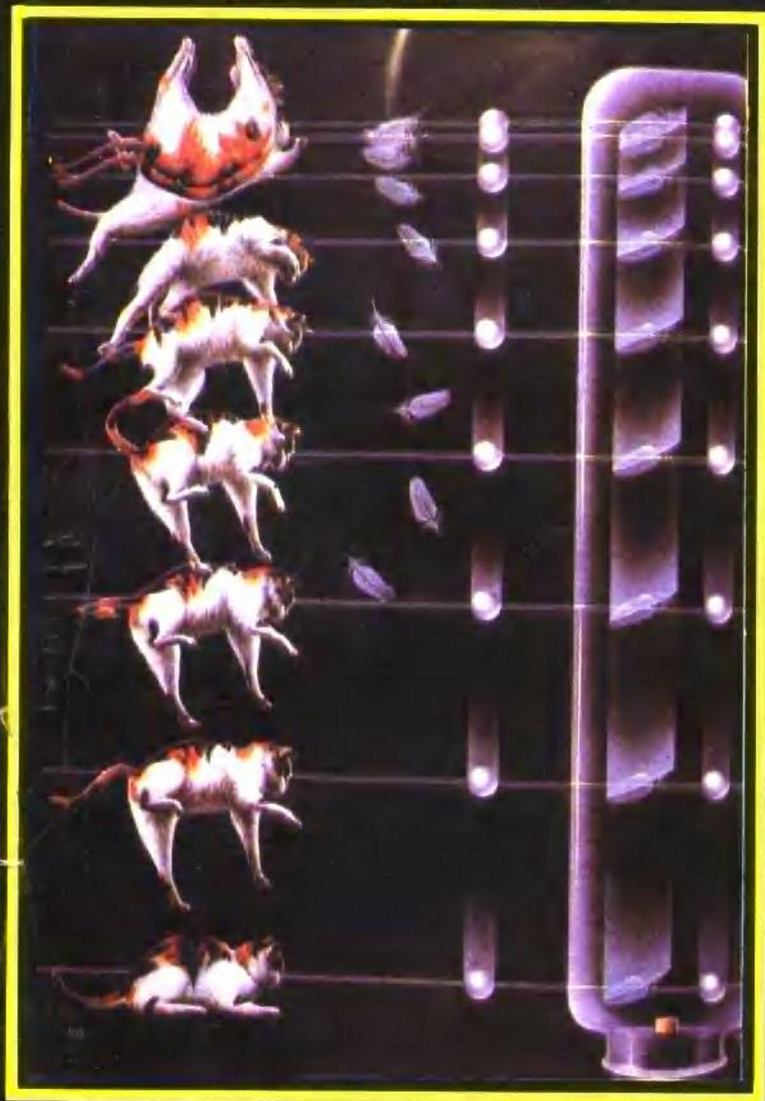


力从横丛书

从猫下落谈起

贾书惠



高等教育出版社

力学纵横丛书

从猫下落谈起

贾书惠
賈書惠

从猫下落谈起

JY11102/16

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是“力学纵横丛书”中的一本。

力学是研究物质机械运动规律的科学，和各种自然现象及工程问题有着十分密切的关系。“力学纵横丛书”力求用通俗的语言从力学原理出发阐述一些自然现象及力学原理在现代科学技术中的应用。“丛书”具有高级科普读物的性质，可作为高等学校力学课程的课外读物、讲座的教材，亦可供广大工程技术人员和自然科学爱好者阅读。

本书所述六个专题，都与理论力学课程内容有关，分别讲解了点的复合运动、质点动力学及质系普遍定理等理论在现代科学技术中的应用，内容广泛，生动有趣，可读性强。

责任编辑 黄 毅

力学纵横丛书

从猫下落谈起

贾书惠

•

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

天津新华印刷一厂印装

•

开本 787×1092 1/32 印张4.75 插页1 字数100 000

1990年7月第1版 1990年7月第1次印刷

印数0 001—2 170

ISBN7-002435-7/TB·141

定价 1.65 元

前 言

本书是“力学纵横丛书”中的一本，所述六个专题均与理论力学课程内容有关。本书着重讲解力学原理在现代科学技术中的应用。“惯性导航与有害加速度”介绍了现代航空、航海中最重要的一种导航方法——惯性导航，并应用点的复合运动理论及科氏加速度公式推导导航方程。“人造地球卫星的轨道问题”结合质点动力学分析了人造地球卫星的运动及其三种基本轨道——倾斜轨道、地球同步轨道及太阳同步轨道。“从猫在下落时的翻身谈起”研究了这一奇特自然现象的力学机理，并引申到动量矩守恒原理在运动生物力学这一新学科中的应用。“陀螺三特性及其工程应用”利用理论力学中熟知的动量矩定理讨论了陀螺仪器的工作原理，并结合动静法解释了自旋炮弹的陀螺稳定现象。“万有引力是怎样发现的”则介绍了力学发展的历史，并按已知运动求力的途径由开普勒关于行星运动的三大定律推导出牛顿万有引力。

理论力学在高等工科院校中是一门重要的基础课程。它与各种自然现象及工程问题有着十分密切的联系，有些复杂的实际问题甚至可以直接用理论力学的概念分析清楚，或用理论力学的方法初步解决。然而，这么丰富的内容不可能在理论力学的课程内充分地介绍给学生；因此，出版这方面的课外读物，就有可能使学生巩固、深化课堂所得、增加实际知识、开阔眼界并激发学习和钻研理论力学的兴趣。

这本书的材料取自作者近年来在清华大学举办理论力学课外讲座的部分内容，难度大致与现行理论力学课程教学大

纲相当。每篇后面都给出了必要的参考文献，并作了简要介绍，以供进一步阅读时参考。上海交通大学刘延柱教授阅读了书稿并提出了宝贵意见，于效兰同志绘制了部分插图，仅在此表示衷心的感谢。

作 者

1988年2月

目 录

一、惯性导航与有害加速度	(1)
§ 1 什么叫导航	(1)
§ 2 几种导航系统	(2)
§ 3 惯性导航	(6)
§ 4 有害加速度	(13)
参考文献及阅读建议	(20)
二、万有引力定律是怎样发现的	(21)
§ 1 哥白尼的日心说	(22)
§ 2 开普勒的行星运动三大定律	(29)
§ 3 牛顿的万有引力定律	(32)
§ 4 海王星的发现	(39)
参考文献及阅读建议	(44)
三、人造地球卫星的轨道问题	(45)
§ 1 地球对卫星的引力	(46)
§ 2 在地心引力作用下卫星的运动	(49)
§ 3 宇宙速度、特征长度与运动周期	(57)
§ 4 人造卫星的基本轨道	(62)
参考文献及阅读建议	(69)
四、从猫在下落时的翻身谈起	(70)
§ 1 形形色色的力学解释	(71)
§ 2 人体的模仿	(76)
§ 3 体操运动员的空翻动作	(84)
§ 4 一种现代研究方法——计算机数值仿真	(89)
参考文献及阅读建议	(96)

五、陀螺三特性及其工程应用（一）……………（97）

§1 实现定点支承的具体方法……………（97）

§2 陀螺三特性……………（111）

§3 关于陀螺三特性的进一步讨论……………（116）

参考文献及阅读建议……………（121）

六、陀螺三特性及其工程应用（二）……………（122）

§1 几种陀螺仪表的工作原理……………（123）

§2 含有转动部件的机械系统……………（134）

§3 进动理论的局限性及其改进……………（138）

参考文献及阅读建议……………（145）

一、惯性导航与有害加速度

惯性导航是在航海、航空及航天等领域中广泛采用的一种先进导航技术。这里介绍惯性导航的力学原理及加速度合成定理在其中的应用。

§ 1 什么叫导航

现代航海、航空及航天技术都离不开导航。“导航”一词在不同领域中的含义虽略有不同，但粗略地说，都是指将运动物体（即舰船、飞机、导弹、火箭等运载工具，以下简称载体）通过最有利的航线引导到目的地的技术。在日常生活中也能遇到导航的例子。例如我们在首都北京，想从天安门出发去动物园。这时应该首先拿一张北京市的地图，选择一条由天安门到动物园的合适路线。假如所选的路线是：天安门→复兴门立交桥→西直门立交桥→动物园。那么，在天安门出发时，首先向西前进，当我们确信已到达复兴门立交桥时（这可以通过观察周围的地面标志做到），改为向北前进，当确信已到达西直门立交桥时，再改为向西前进，这样就能到达动物园。同样，飞机领航员的任务也是如此，当飞机飞向目的地时，他不断判断飞机的位置（除了靠观察地标外，主要是通过各种导航仪器），当到达航线转向点时，向驾驶员发出改变航向的命令，从而使飞机始终沿着预定航线飞行。由此可见，导航包含两方面的任务：定位及定位之后确定下一步的运动方向，简单地说就是定位与定向。显然，

二者之中关键是定位问题。

导弹有时要追踪活动目标，这时航线不能事先确定，但仍然可以给定一种合适的导引规律。例如，地空或空空导弹追踪敌机时，可以将导弹的速度方向始终对准目标，亦即永远沿目标的“视线”方向；也可以控制导弹速度的方向永比目标视线超前一个确定的角度。前者称为纯追踪导引法，后者称为定常前置角导引法，不同的导引规律得到不同的航迹。这类对导弹的控制与导引技术常称为**制导**。制导与导航虽不相同，但都离不开定位与定向两项基本内容。

§ 2 几种导航系统

导航问题最早在中世纪的航海事业中就已提出。在茫茫的大海中，没有任何陆地目标可循，怎样确定自己的位置？为驶向目的地又应采用怎样的航向呢？人们很早就知道天体相对地球的运动是已知的，因此可以利用观测天体来解决这一问题。最初利用北极星的高度来确定所在地的纬度，后来又学会利用几个亮星及时钟来确定经度，于是逐渐形成了利用天体来测定载体位置和航向的**天文导航技术**。天文导航的原理简单，所用仪器也不复杂，所以直到现在仍在广泛应用。例如，船员手中只要有一张地图、一本天文年历、一架精确的时钟及一架六分仪，就能在其他导航仪器失灵时，用天文导航方法可靠地确定船位。天文导航中所使用的天体主要是亮度较强的恒星，星体在地球表面的投影点称为**星下点**。由地球表面某位置观测星体可得星体的高度角，高度角相同的所有位置构成以星下点为中心的圆周，称为**等高圆**（图1.1）。因此，船员只要用六分仪（一种光学仪器）测得某恒星的高度角，再根据天文年历及时钟查出该时刻此恒星星下点的位

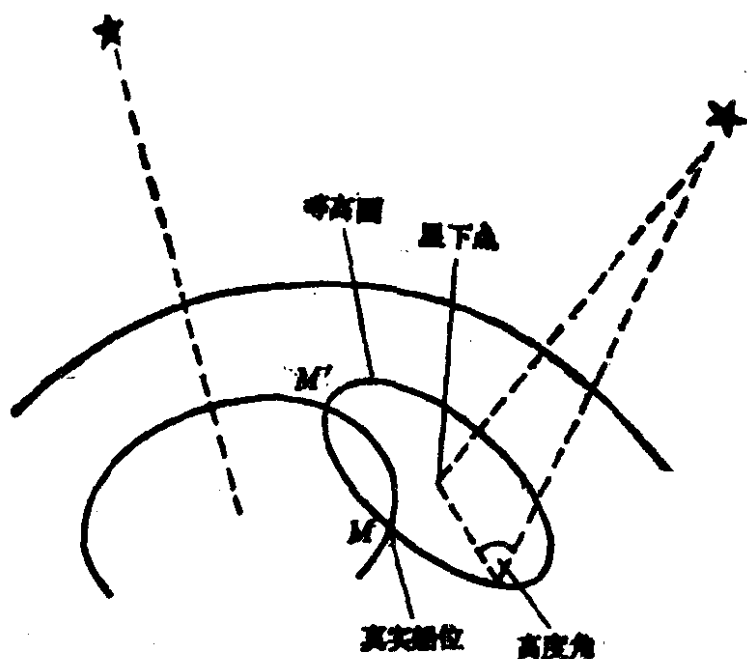


图 1.1

置，就能在地图上作出一个等高圆。用同样的方法观测另外一个星体，可得第二个等高圆。两个圆有两个交点，一个是舰船的真实船位 M ，另一个是虚假船位 M' 。根据舰船在测量时刻以前的航迹或借助第三个等高圆，就能排除虚假船位确定真实船位。当然，在实际使用的天文导航系统中，上述过程都是由仪器自动完成的。星体跟踪器是天文导航系统的主要设备，一般由光学望远镜装置、星体扫描装置、信号处理电路及驱动机构等组成。它通过扫描对指定星体进行搜索，搜索到以后即转入跟踪状态，同时不断测出星体高度角及方位角。这些信号与标准时间发生器的信号一起输给专用计算机，通过计算给出载体所在的经纬度及航向。

在航空或航海中使用的另外一种更为方便的导航系统是无线电导航系统，它通过量测无线电台所发出的导航信号来确定载体的位置。根据工作方式的不同，又可分为伏尔导航

系统、塔康导航系统、罗兰导航系统、奥米加导航系统、卫星导航系统等。罗兰 (Loran) 导航系统是一种根据测距离差来定位的系统, 它的全名是远程导航系统 (long range navigation system)。在地面上设立一系列的无线电发射台, 每三个台 (一主二辅) 为一组, 主台和一辅台同时发出脉冲信号, 装在载体上的接收机接收每个信号并测量其时差 Δt , 它相当于载体距二发射台的距离差。据根解析几何可知, 与此二台距离之差相等的各点构成以此二台为焦点的双曲线, 因此, 在此二导航台周围就形成了一个双曲线族, 每条曲线对应不同的距离差或时间差。主台和另一辅台之间亦有一族双曲线。因此, 若在载体上测定这两个时间差后, 即能在绘有这些双曲线的罗兰导航图上找到相应的两条双曲线, 它们的交点就是载体的位置 (图1.2)。显然, 这里用到的导航方法是双曲线导航方法。由于电台的作用距离有限, 所以在地球上分别由各国设置自己的导航台, 供国际航行使用。通常, 主台发射信号后, 辅台需经过一段时间滞后再发射, 在战时, 此滞后时间可以更换并保密, 这样, 平时大家都可使用的罗兰导航海图, 在战时就只能为我方及友方服务。目前使用的罗兰-C导航系统, 其作用距离可达2000公里, 定位精度可达0.3公里。

上述导航系统都有一共同缺点就是它们的抗干扰性差, 因为它们都要依赖载体以外的外部信息。当天空有云, 或星体的能见度低时, 天文导航失效; 而无线电导航中, 在接收导航信号时也容易受到自然的及人为的 (来自敌方) 干扰。还有一些导航系统能从载体发射信号 (如多普勒导航系统), 这样虽然抗干扰性会得到改善, 但容易暴露自己, 因而隐蔽性差。而这两点在军事上尤其重要。例如, 近年来由于侦察卫星的

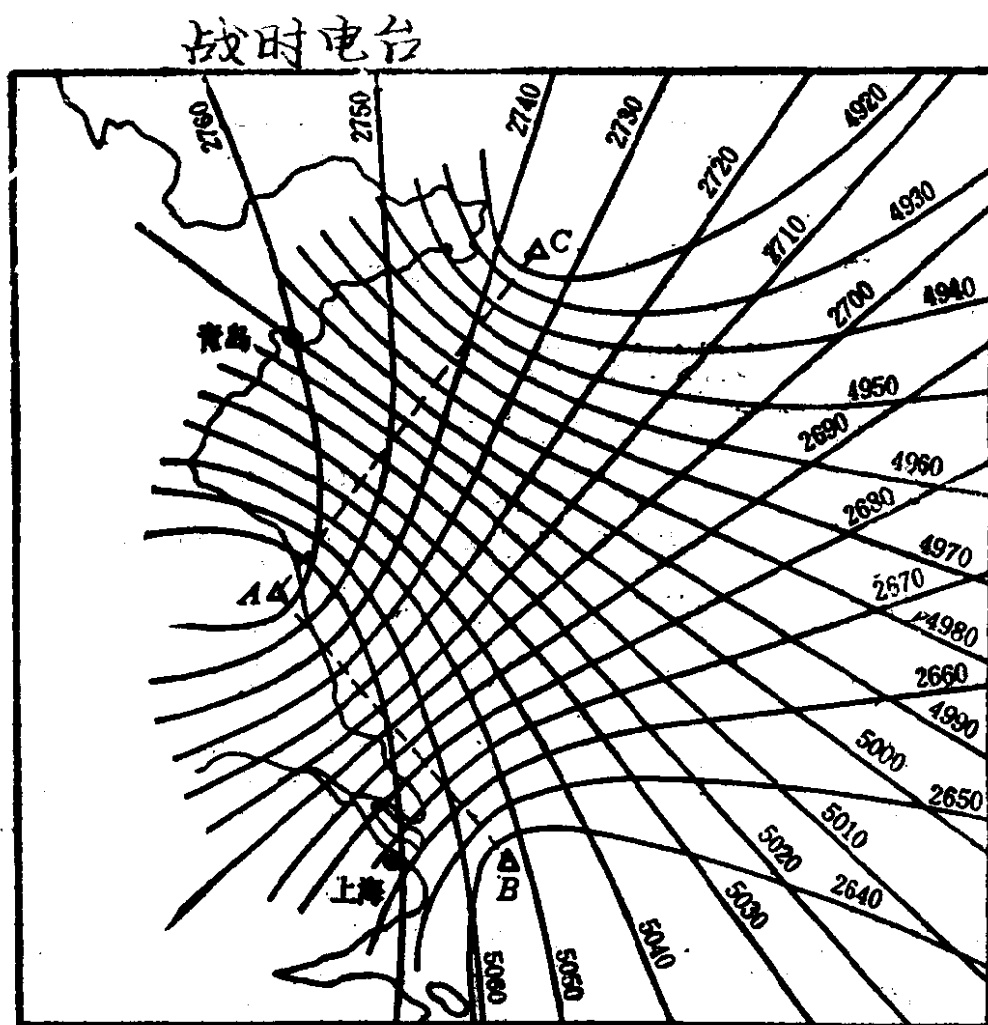


图 1.2

作用愈来愈大，各国的弹道导弹发射基地（发射井）实际上已无法保密，极容易被摧毁，因而需寻求机动发射，目前最常见的是核潜艇发射。核潜艇在水下连续运行可长达数月，可以极其隐蔽地接近敌人，突然发射导弹。核潜艇在水下的运动及发射导弹时的舰位都要求有极高的精度，而且其导航系统必须在长时期内有极高的抗干扰性及军事隐蔽性，亦即必须不依赖任何外部信息，完全自主地定位定向。这就好象把一个人的眼睛蒙上，耳朵堵上，别人带着他出门旅行，使用了步行、火车、轮船、飞机等各种交通手段，经过了曲折

复杂的旅行路线，数月后来到了某地，要求他自己判断他的位置。这样的导航方法存在吗？我们的回答是肯定的，这就是惯性导航。

§ 3 惯性导航

众所周知，物体机械运动最基本的规律由牛顿运动定律所给出，凡是牛顿运动定律在其中能够成立的参考系就称为惯性参考系或惯性系统。在精度要求不太高的一般工程问题中，地球就是一个可靠的惯性系统。我们还知道，相对惯性系统作等速直线运动的参考系也是惯性系统。由此可见，在各种参考系中，惯性系统具有特殊的地位，所有惯性系统在以下的意义上是等价的，即用动力学实验不可能揭示它们本身在任何绝对意义上的运动。这一动力学的等价性给出了经典力学的相对性原理：

没有任何动力学观测能使我们认为一个惯性系统比另一个惯性系统更优越，因而没有任何动力学实验会告诉我们，我们是否正以一恒定速度通过空间。

上述事实实际上早在牛顿以前就被注意到了。伽里略在他的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中支持哥白尼的“地动说”，他举了一个例子，从一条船的桅杆上落下的石块总是落在桅杆的脚下，而不管这条船是否在动。他由此论证说，一个落体的铅直路程并不足以使人得出地球是静止不动的结论。因此，上述相对性原理也常称为伽里略相对性原理。我们的日常生活经验也使我们容易相信这一点。在一个静止或作等速直线行驶的密闭车厢里，如在天花板上吊悬的一个单摆，它总是铅垂向下；如果垂直向上抛出一球，它总能重新落回手中。此时车厢是静止还是在运动？如在

运动，其速度又是多少？只有打开窗子观看外界的地面标志才能知道。所以，根据经典力学的相对性原理，不依赖外部信息，在运动物体内部的任何动力学实验都无法测出物体的速度。

然而，当运动物体有了加速度，情况就不同了。当车厢向前加速运动时，天花板上吊下的单摆将向后摆动而偏离铅垂线，垂直上抛的小球将落到抛出点的后方。因此，不依赖外界信息，就可在运动物体的内部通过动力学实验测出物体的加速度。当然，这个加速度是相对惯性空间而言的。测量运动物体加速度的仪器称为**加速度计**，上面所说的单摆就可作加速度计使用。只要测出单摆偏离铅垂线的稳定偏角 θ ，就能根据图1.3a所示力的合成关系求出运动物体的加速度 a 。

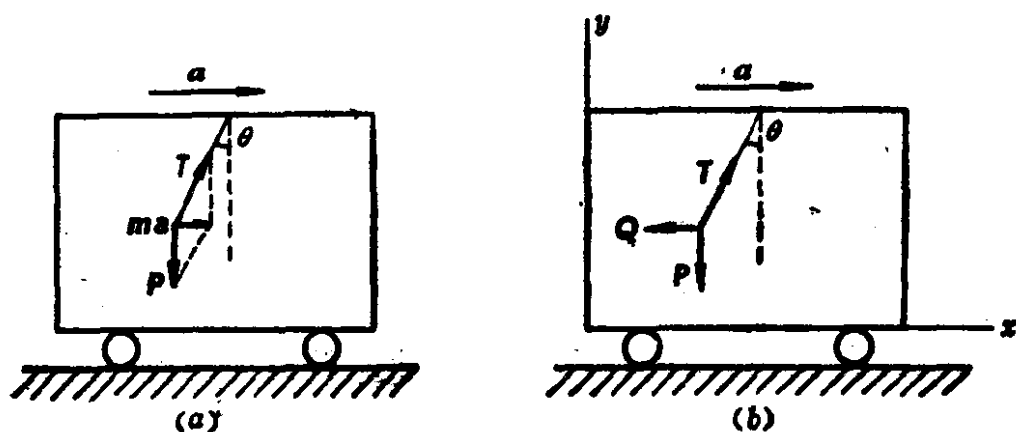


图 1.3

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{a}{g}, \quad a = g \operatorname{tg} \theta$$

通常多采用与运动物体相固结的非惯性坐标系讨论问题，这时可在摆上再附加一惯性力 $Q = -ma$ ，而讨论单摆的相对平衡。由图1.3b可得

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{Q}{P} = \frac{a}{g}, \quad a = g \operatorname{tg} \theta$$

图1.4是一种加速度计的简图。当仪器壳体(安装在载体上)沿敏感轴(又称输入轴)的方向有加速度时,惯性力作用于惯性质量上,引起弹簧变形,电位计的滑针偏离中间位置,电路就有与加速度成正比的信号输出。容易看出,这里实际上是根据弹簧力测出惯性力,通过惯性力测得载体的加速

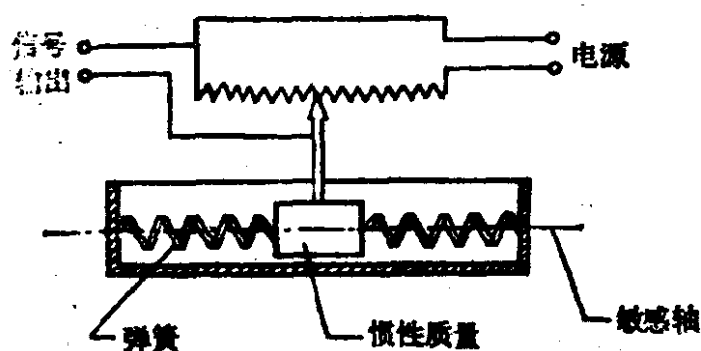


图 1.4

度①。

对所测得的加速度 a ,经过一次积分,即可求得载体的速度增量,经过两次积分,即得载体在积分时间间隔中的位移。如果考虑到载体的运动初始条件,就能完全确定载体在任一时刻的位置与速度(图1.5)。这种导航方法是依据了牛顿的惯性原理,利用了惯性元件(加速度计),故通常称为惯性导航。

必须指出,加速度计是依靠测量惯性力来确定载体的加速度的,然而,加速度计却不能区分惯性力与引力。例如,当载体静止,而加速度计相对水平面有一安装倾斜角 $\Delta\alpha$ 时,作

① 一般情况下,加速度计的输入中除惯性力外还有引力成分,见后。

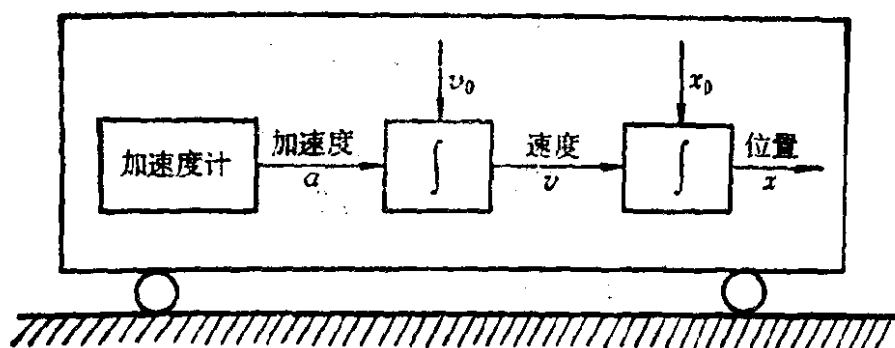


图 1.5

用在惯性质量上的重力分量将引起加速度计的输出(图1.6), 就好象载体有了加速度 $g\Delta\alpha$ 一样^①。这是虚假信号, 由此将产生定位误差

$$\Delta S = -\frac{1}{2} g t^2 \Delta\alpha$$

当有 $\Delta\alpha = 1'$ 的倾角时, 一小时造成的导航定位误差达 $\Delta S = 18\text{km}$ 。因此加速度计不能直接安装在载体上, 而要安装在一个

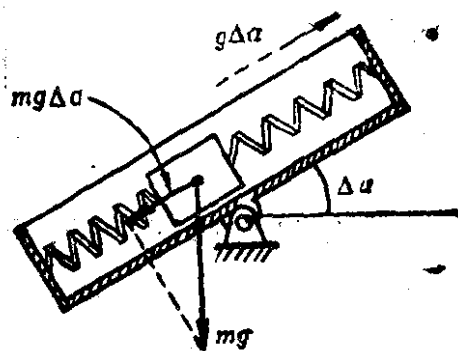


图 1.6

一个高精度的水平平台上。地球是圆的并有自转, 所以随着载体在地球表面的运动, 载体所在的当地水平面将在惯性空间改变方向。为了从数学上描述这些变化, 在导航理论中建立了若干坐标系, 最常用的一种是地理坐标系, 它的三根坐标轴分别指向载体所在地的东向 E 、北向 N 及地垂线方向 Z

① 参考系加速度所产生的效应完全同于引力的吸引效应, 惯性力与引力都与物体的质量成正比。这一重要事实有十分深刻的意义。爱因斯坦由此出发于1911年提出了他的著名的等效原理, 并借助这些概念创立了广义相对论。

(图1.7)，因而又称东北天坐标系。坐标平面 EON 就是当地水平面，惯导用的水平平台应能模拟这个坐标平面。

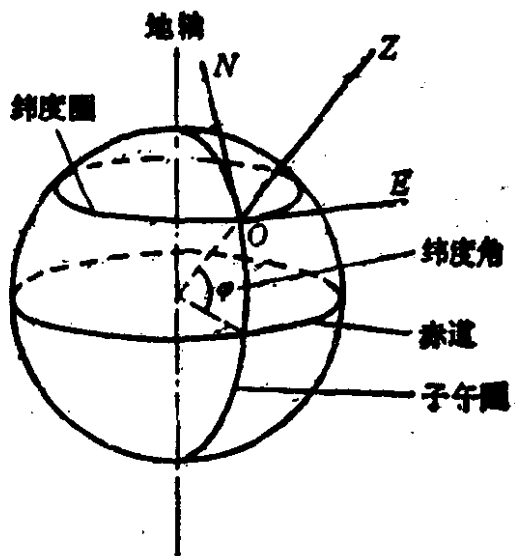


图 1.7

当载体沿直线运动时,为确定载体的位置,一个加速度计两个积分器就够了。但实际的载体可在地球表面作任意运动,飞机及火箭甚至在高度上还有变化,因此实际的导航系统应包含几套仪器。下面简单介绍航海用的半解析式惯导系统的构造,它一般包含五个主要部件(图1.8):

(1) **三轴稳定平台** P 它通过框架系统（又称卡尔丹环）支承于载体上，因而它的方位不受载体姿态的影响。作直角坐标系 xyz 与平台相固结，控制平台的运动使 x 、 y 、 z 轴分别与地理坐标系的 E 、 N 、 Z 轴永远重合，或者说，使平台模拟地理坐标系。为了做到这点，平台上装有稳定回路与修正回路。陀螺 G_E 、 G_N ，前置放大器 K_1 ，坐标变换器 C ，平台控制放大器 K_2 及力矩电机 T_1 、 T_2 组成纵摇与横摇的稳定回路；陀螺 G_Z ，前置放大器 K_1 ，平台控制放大器 K_2 及力