

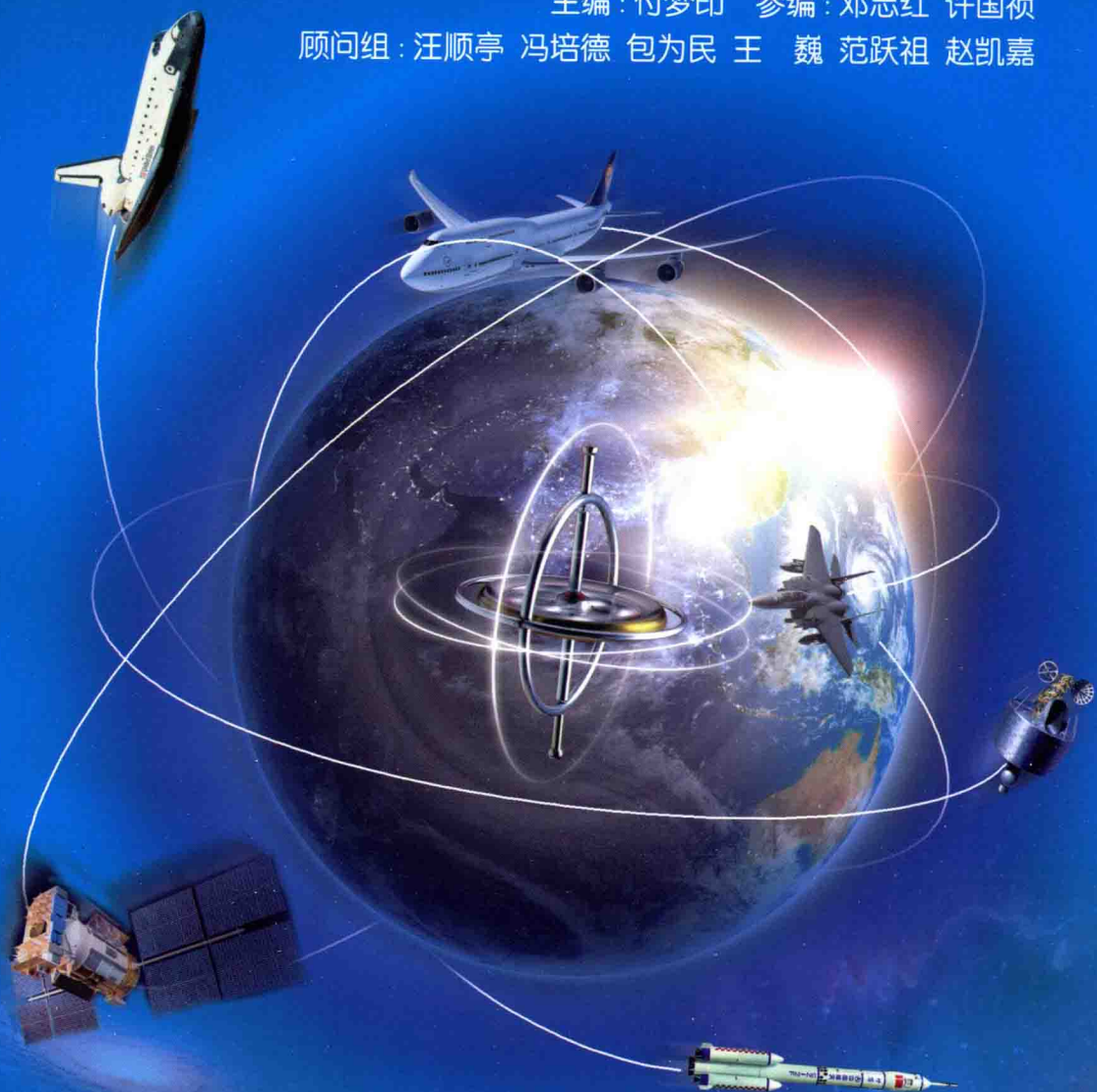
国家自然科学基金科普专项资助

神奇的惯性世界

The Magic World of Inertia

主编：付梦印 参编：邓志红 许国祯

顾问组：汪顺亭 冯培德 包为民 王 巍 范跃祖 赵凯嘉



国家自然科学基金科普专项资助

神奇的惯性世界

The Magic World of Inertia

主编：付梦印 参编：邓志红 许国祯

顾问组：汪顺亭 冯培德 包为民 王 巍 范跃祖 赵凯嘉



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

神奇的惯性世界 / 付梦印主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 1
ISBN 978 - 7 - 5682 - 0164 - 3

I. ①神… II. ①付… III. ①惯性导航 - 基本知识 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 005350 号



出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 13.75

字 数 / 212 千字

版 次 / 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 36.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

Foreword 前言

你知道“天宫一号”与“神舟八号”飞船是如何实现精准对接的吗？你知道核潜艇在茫茫大海深处是如何不迷路的吗？你知道导弹是如何有如神助般精确打击目标的吗？这一切都是因为惯性技术的存在！

惯性技术无处不在，它广泛存在于陆、海、空、天所有运动体存在的领域。为了普及拓展惯性技术知识，编者经过几年的努力，在编委会及顾问组的大力支持下，广泛搜集素材进行加工整理。本书的出版得到了本领域各专业院所的大力支持，同时得到了国家自然科学基金科普专项（61220001）的支持。本书力求集知识性、趣味性、前沿性和系统性于一身，全面展示惯性技术在人类探索世界过程中所发挥的伟大作用，引导广大读者了解并关注惯性技术，享受惯性世界无穷无尽的乐趣。

本书主编付梦印教授一直从事导航、制导与控制领域的教学、科研和人才培养工作，负责中国惯性技术学会科普传播及继续教育工作，并主持建设了国内第一个惯性技术科普展厅。在完成这些工作的过程中，真切地感受到人们对惯性技术、科学技术普及与推广的迫切需求，拜读了本领域前辈的科普著作，如丁衡高先生的《海陆空天显神威——惯性技术纵横谈》、黄德鸣先生的《神奇的指路魔杖》等，深受启发，遂组织编写本书。

在本书编写过程中，汪顺亭院士、冯培德院士、包为民院士、王巍院士、范跃祖教授、赵凯嘉研究员提供了热心的帮助并提出了宝贵的建议，在此表示衷心的感谢。同时，编者在此向所参考文献的作者表示由衷的感谢！

惯性技术涉及的知识面广、领域宽、服务对象类型丰富，本书难免会有分析、阐述不准确的地方，恳请广大读者批评指正。

感谢中国惯性技术学会、感谢国家自然科学基金委对本书出版的支持！

编 者

2014 年 10 月

CONTENTS目录

第1章 源远流长的惯性技术	(1)
1.1 惯性技术的由来	(1)
1.1.1 奇妙的惯性力	(1)
1.1.2 从陀螺到惯性导航系统	(2)
1.1.3 惯性技术的两条基准线	(3)
1.2 惯性技术的历史足迹	(5)
1.2.1 我国古代的导航技术	(5)
1.2.2 从牛顿三大定律到北极冰下航行	(8)
1.2.3 从平台式惯性导航系统到惯性组合导航	(9)
1.3 惯性技术应用史上的重大历史事件	(10)
1.3.1 第二次世界大战期间德国 V-2 导弹袭击英国	(10)
1.3.2 1953 年首次横贯美国大陆的纯惯性导航飞行	(12)
1.3.3 1958 年美国核潜艇北极冰下探险成功	(13)
1.3.4 1969 年“阿波罗 11 号”使人类首次登上月球	(14)
1.3.5 1970 年“阿波罗 13 号”脱险记	(16)
1.3.6 1982 年英阿马岛之战	(18)
1.3.7 1991 年海湾战争中“爱国者”大战“飞毛腿”	(19)
1.3.8 1991 年海湾战争拉开了高技术战争的序幕	(21)
1.3.9 1993 年韩国 007 民航机空难之谜	(23)
1.3.10 美国宇航员五次维修“哈勃”太空望远镜上的 陀螺仪	(26)

1.3.11	1999 年科索沃战争成为新武器试验场	(29)
1.3.12	2001 年阿富汗战争使无人机成为杀人武器	(31)
1.3.13	2003 年伊拉克战争拉开了信息化战争的序幕	(33)
1.3.14	中国“神舟”系列宇宙飞船计划	(37)
1.3.15	2011 年“天宫一号”与“神舟八号”成功对接	(43)
1.3.16	中国“嫦娥”探月工程	(54)
1.3.17	中国“蛟龙号”载人潜水器	(61)
1.4	惯性技术领域人物记	(66)
1.4.1	牛顿	(66)
1.4.2	傅科	(67)
1.4.3	安休茨	(68)
1.4.4	舒勒	(70)
1.4.5	冯·布劳恩	(71)
1.4.6	德雷珀	(73)
1.4.7	钱学森	(74)
1.4.8	林士谔	(75)
1.4.9	陆元九	(76)
1.4.10	丁衡高	(77)
1.4.11	汪顺亭	(78)
1.4.12	高伯龙	(79)
1.4.13	冯培德	(79)
1.4.14	包为民	(80)
1.4.15	王巍	(81)

第2章 惯性导航系统的“心脏”——陀螺仪和加速度计

2.1	从惯性导航系统的原理看陀螺仪和加速度计的作用	(82)
2.2	初识陀螺仪	(84)
2.2.1	什么是陀螺仪	(84)
2.2.2	陀螺技术的百年发展历史	(85)
2.2.3	陀螺仪的分类及评价	(87)
2.2.4	影响陀螺性能的最大“杀手”——陀螺漂移	(88)

2.3 陀螺仪的工作原理与特性	(90)
2.3.1 机械转子式陀螺仪的“怪脾气”——定轴性与进动性	(90)
2.3.2 光学陀螺的工作原理——Sagnac 效应	(92)
2.3.3 振动陀螺的工作原理——哥氏效应	(93)
2.4 陀螺仪“大阅兵”——主流陀螺仪简介	(94)
2.4.1 框架陀螺仪	(94)
2.4.2 液浮陀螺仪	(95)
2.4.3 静电陀螺仪	(96)
2.4.4 挠性/动力调谐陀螺仪	(97)
2.4.5 环形激光陀螺仪	(98)
2.4.6 干涉型光纤陀螺仪	(100)
2.4.7 石英音叉式振动陀螺仪	(102)
2.4.8 半球谐振陀螺仪	(103)
2.4.9 微机械陀螺仪	(104)
2.5 加速度计“大阅兵”	(106)
2.5.1 比力与比力测量	(106)
2.5.2 挠性加速度计	(109)
2.5.3 液浮摆式加速度计	(110)
2.5.4 振梁式加速度计	(111)
2.5.5 摆式积分陀螺加速度计	(112)
2.5.6 微机械加速度计	(113)
2.5.7 其他类型加速度计	(115)
2.6 陀螺仪与加速度计技术展望	(116)
2.6.1 陀螺仪未来发展趋势	(117)
2.6.2 加速度计未来发展趋势	(119)
第3章 惯性导航是陀螺应用史上最光辉的一页	(122)
3.1 什么是惯性导航	(122)
3.2 各显其能的惯性导航系统	(123)
3.2.1 陀螺罗经	(123)
3.2.2 陀螺地平仪	(124)

3.2.3	船用平台罗经	(127)
3.2.4	平台式惯性导航系统	(128)
3.2.5	捷联式惯性导航系统	(131)
3.2.6	航向姿态基准系统	(132)
3.2.7	惯性为基的组合导航系统	(133)
3.2.8	惯性执行机构	(135)
3.3	提高惯性导航系统精度的主要技术途径	(137)
3.3.1	实时在线补偿技术	(137)
3.3.2	自动补偿技术	(138)
3.3.3	多传感器信息融合技术	(138)
3.4	测试是保障惯性导航系统性能的关键	(138)
3.4.1	提高导航系统综合性能的重要性	(138)
3.4.2	测试是惯性器件及系统可靠使用的重要保证	(140)

第4章 惯性技术在海陆空天应用中大显神威 (144)

4.1	惯性技术是现代武器装备中的关键技术	(144)
4.1.1	惯性技术可贵的军用特点	(144)
4.1.2	惯性技术在战略武器系统中的突出作用与地位	(145)
4.1.3	惯性导航系统是现代军用飞机的中心信息源	(155)
4.1.4	惯性制导系统在战术导弹中的应用及发展	(159)
4.1.5	惯性技术在水面舰艇及其武器装备中的应用	(167)
4.1.6	地面战车和现代炮兵用惯性导航系统	(171)
4.1.7	惯性技术使常规弹药变成了制导弹药	(176)
4.1.8	惯性导航系统在未来信息化战争中仍不可替代	(179)
4.2	惯性技术在经济建设中的贡献	(181)
4.2.1	惯性技术在空间技术发展中发挥关键支撑作用	(181)
4.2.2	机器人与惯性技术	(183)
4.2.3	惯性技术在现代交通运输中大显身手	(184)
4.2.4	在向地下及水下的进军中惯性技术功不可没	(189)
4.2.5	摄影、摄像及测绘中的惯性稳定平台	(192)
4.2.6	消费电子中的惯性技术	(194)

4.2.7 医疗电子领域中的惯性技术·····	(196)
4.2.8 室内导航中的惯性技术·····	(198)
第5章 惯性技术的明天更灿烂 ·····	(200)
5.1 发展新原理固态陀螺技术 ·····	(201)
5.1.1 真正的芯片陀螺——集成光学陀螺·····	(202)
5.1.2 光学 MEMS 传感器——MOEMS ·····	(204)
5.1.3 一种高精度惯性传感器——原子陀螺·····	(205)
5.2 发展新的系统技术, 拓展应用领域 ·····	(207)
5.2.1 海洋地球物理场匹配辅助导航技术·····	(207)
5.2.2 旋转捷联式惯性导航系统技术·····	(208)
参考文献 ·····	(210)

第1章 源远流长的惯性技术

1.1 惯性技术的由来

1.1.1 奇妙的惯性力

300多年前，英国大科学家牛顿提出了著名的“力学三大定律”，奠定了经典力学的基础。

牛顿第一定律就是关于惯性的定律，即世上万物在无外力作用时，静者恒静，动者恒动。牛顿将物体的这种总是保持自身原来状态的性质称为“惯性”。

任何物体都有惯性，所以就有了惯性力。这种惯性力只有在物体运动状态改变时，才会表现出来，这就是牛顿第二定律的解释，即

$$F = ma$$

式中， F 为惯性力； m 为物体质量； a 为运动加速度。

也就是说，物体的质量和加速度是产生牛顿惯性力的充分必要条件。

物体的惯性在任何时候（受外力或不受外力作用）、任何情况（静止或运动）下都不会改变，更不会消失，也即惯性力是客观存在的，如乘坐电梯上升时，自己的脚好像在用力踩着电梯的地板。事实上，这不是乘客自己在对地板用力，而是惯性力作用在人体上，它企图使乘客停留在原地不动（图 1.1）。

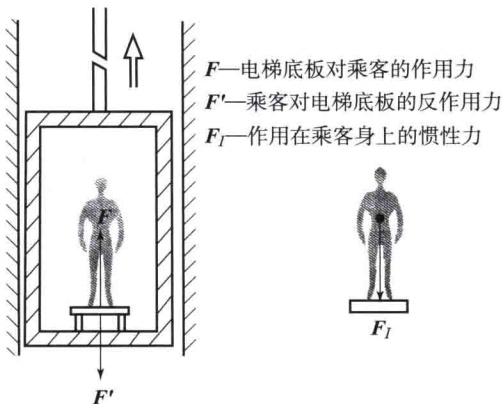


图 1.1 电梯上升时乘客承受的惯性力

1.1.2 从陀螺到惯性导航系统

陀螺的神奇现象，在上古时代就被人类所认识。在孩子们和纺线老奶奶们的手里，陀螺不知旋转了多少个春秋（图 1.2）。



(a)



(b)

图 1.2 日常生活中的陀螺现象

(a) 小孩抽玩具陀螺（图片来源：<http://www.5time.cn/show.php?/tid=2611>）；

(b) 老奶奶纺线图

几个世纪以来，经过无数科学家的研究，人们对陀螺原理有了深刻的了解。原来，一个物体旋转起来后，它的旋转轴在一个静止的空间（惯性空间）里能够保持方向不变，这就是陀螺的定轴性。而且，物体旋转的速度越快，保持方向稳定的能力越强。在图 1.3 中，蹬自行车的速度越快，自行车越稳，也就是车轮的定轴性越强。这也是杂技演员骑自行车走钢丝不会摔下来的原因。

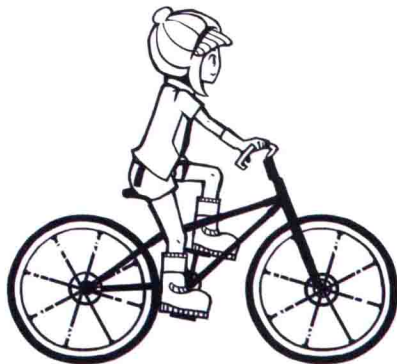


图 1.3 旋转的自行车车轮具有定轴性

1905年，世界上首台利用陀螺原理做成的、可供实际使用的陀螺罗经诞生，并被应用到铁壳舰船上指示方向。与此同时，另一种利用摆的原理、测量运动物体加速度的仪表——加速度计也诞生了。陀螺和加速度计的理论基础都是牛顿力学原理，这两类仪表被统称为惯性仪表（惯性器件），利用惯性仪表测量值进行测量推算的导航被称为惯性导航。

1.1.3 惯性技术的两条基准线

在惯性技术中，单纯依靠陀螺仪和加速度计的输出还不能真正实现导航。尤其是对地球附近的运载体，对其进行导航还要和我们居住的地球发生千丝万缕的联系，即地球为惯性导航提供了两条基准线——真北和垂线。

真实的地球不是一个规则的球体，地球内部是熔岩，地球表面上有山脉、河流、陆地、海洋，形成了高低起伏、形状复杂、不规则的物理实体。同时，由于自转的影响，地球呈扁圆状，沿赤道的方向突出，南极稍微凹入，形状似梨（图1.4）。地球表面是一个不规则的曲面，在实际导航问题中不能按照这个真实表面来确定地球的形状和建立地球的模型，通常用大地水准体、圆球和参考旋转椭球体三种模型来描述地球的形状。图1.5为地球的参考旋转椭球体的模型描述。



图 1.4 真实的地球

（图片来源：http://tupian.baik.com/a0_87_20_01300000261651123606205608416_.jpg.html）

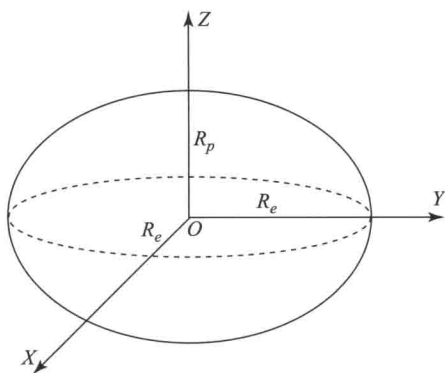


图 1.5 地球的参考旋转椭球体

地球作为太阳系中的行星之一，在绕太阳公转的同时，还绕自身的地轴自转，这就形成了在地球上居住的我们所感受到的白天和黑夜的交替以及一

年四季的变化。地球一天自转一周，一年绕太阳公转一周，因此，地球相对惯性坐标系的转动角速度为 $15.041\ 1$ 度/小时，一般用 ω_{ie} 来表示（图 1.6）。为利用惯性特性实现导航，必须先确定一个公认的方向基准——真北。所谓真北，就是测量者所在的子午面与当地水平面的交线，其方向指向地理北极的方向，称为真北方向，用地球自转角速度的北向水平分量 $\omega_{ie} \cos \varphi$ (φ 为当地纬度) 来表示。真北是确定运载体方向的基准，只要设法找到 $\omega_{ie} \cos \varphi$ 的方向，就可以确定运载体的方向。由于地球自转角速度是一个不受人为因素干扰的常值，这一信息资源是全人类所共有的，因此，真北是惯性技术中一条重要的基准线。

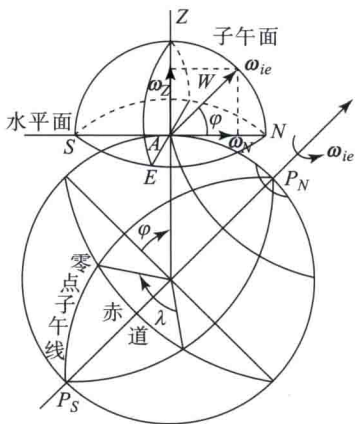


图 1.6 地球自转角速度分解图

与地球形状直接相关的是地球的重力场特性。假如地球是一个匀质球体，悬浮在空中且不旋转，则地球表面各点的引力都相等。但是对于实际的地球来说，由于地球形状的不规则，且受地球自身旋转运动的影响，使得地球表面单位质量的物体除了受地心引力 J 外，还受地球自转带来的离心力 F 的作用（图 1.7），重力 G 是地心引力 J 和离心力 F 的合力，即

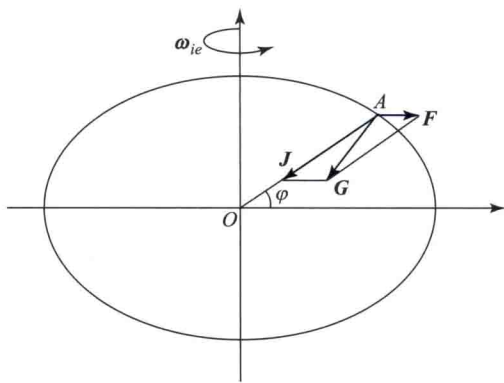


图 1.7 地球重力场示意图

$$G = J + F$$

其中， $F = -m\omega_{ie} \times (\omega_{ie} \times r)$ ， ω_{ie} 为地球自转角速度向量； m 为物体的质量； r 为地心到物体所在点的位置向量。可见，重力 G 的方向不是指向地心的。

单位质量的物体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，重力加速度 g 是重力的大小和方向的一种表征，用公式表示为

$$\mathbf{g} = \mathbf{G}_e - \boldsymbol{\omega}_{ie} \times (\boldsymbol{\omega}_{ie} \times \mathbf{r})$$

式中, $\mathbf{G}_e$ 为地球的引力加速度。

1.2 惯性技术的历史足迹

1.2.1 我国古代的导航技术

• 指南针

指南针是古代航海、行军中不可缺少的, 简单而古老的指示方向的仪器, 是我国古代四大发明之一。在战国时期, 人们用天然磁铁研磨成针的形状, 这种装置称为“司南”(图 1.8 (a)), 这就是指南针的原型。图 1.8 (b) 为三国时期司马钧创造的指南车, 车上有一小人, 其手指方向即为南方。利用磁石的天然特性, 指南针可以自动指北和寻北, 从而为运动物体提供辨别方向的基准。由于依赖于磁场的特性工作, 在磁暴、磁异常和强电磁场附近, 指南针将会失灵。



图 1.8 指南针和指南车

(a) 古代我国指南针——“司南”(图片来源: <http://baike.baidu.com/subview/100626/5127326.htm>);

(b) 我国古代的指南车(图片来源: <http://www.c-c.com/ctrl/pic-18627993.html>)

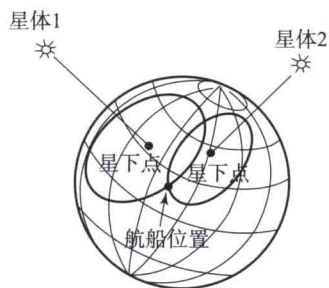
• 牵星过洋术

1 500 多年前, 我国东晋有个法显和尚, 他提出了一种可以在茫茫大海中为船只导航的方法, 即“牵星过洋术”。明朝永乐年间, 大航海家郑和七次下西洋(图 1.9 (a)), 一直采用的就是这种古老的天文导航方法。具体来说,

就是使用简单的测角仪，测量从水平线到星体的仰角，从而来为船队定位。星体在天上好比灯塔，如能分别测出两座灯塔的基点（这种基点称为“星下点”——星体与地心的连线与地球表面上的交点）与航船的距离，就能得到航船的大致方向和位置（图 1.9（b））。但测星定位受天气影响很大，看不见星体时就无法使用。



(a)



(b)

图 1.9 郑和下西洋航海图和测星定位

(a) 郑和下西洋航海图；(b) 测星定位基本原理

• 记里鼓车

记里鼓车是我国古代一种能自报行车里数的车辆，这种记里鼓车利用汉代鼓车改装而成，车中装有传动齿轮和凸轮杠杆等机械，车行一里^①，车上木人受凸轮的牵动，由绳索拉动木人右臂击鼓（图 1.10（a））。古代军队每行进一里路，记里鼓车上的小人就会击鼓一次，记下击鼓的次数，也就知道了前进的里程。据考证，记里鼓车是东汉以后出现的，当时仅用作帝王出行时的仪仗（图 1.10（b））。

现在出租车上用的计价器实际上就是记里鼓车的延伸和改进，只不过计价器不是靠击鼓，而是通过“蹦字”来记录行驶里程。

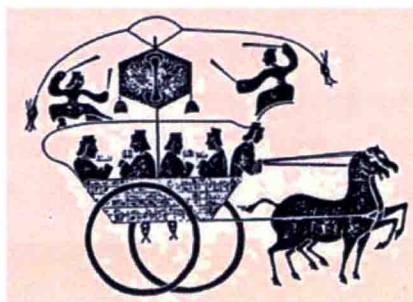
• 候风地动仪

我国东汉著名科学家张衡成功创造了能观测地震的仪器——候风地动仪（图 1.11）。这种装置内底中央竖有一根立柱，即倒立的惯性震摆。利用惯性

^① 1 里 = 500 米。



(a)



(b)

图 1.10 记里鼓车

(a) 记里鼓车复原模型 (图片来源: http://tupian.baike.com/a0_09_02_01200000012881116100248625309_.jpg.html); (b) 汉代孝堂山画像石中的鼓车图 (图片来源: http://tupian.baike.com/a4_03_27_013000000247011124296271644157_.jpg.html)

原理,当立柱感受到地震时,会失稳倒下,成为地震敏感器。候风地动仪是我国古代乃至世界早期利用垂直倒立摆惯性原理的极好例证,它比欧洲地震仪出现的时间早了 1 500 年,它体现了中国古代劳动人民的勤劳和智慧。在首都机场 3 号航站楼大厅内,可以看到这种装置的一个仿造艺术品。



图 1.11 候风地动仪复原图

(图片来源: <http://baike.baidu.com/view/140440.htm>)

• 镂空银熏球

公元前 140 年,西汉大辞赋家司马相如在其所作的《美人赋》中,首次提到了供皇宫贵族用的卧褥香炉,这是一种基于平衡环原理工作的装置,而