

21世纪学科发展丛书·惯性技术

丛书主编 周光召

# 神奇的 指路魔杖

山东教育出版社

## 前言

中国科学技术出版社

值此新千年来临之际，谨以介绍惯性技术学科发展历程及其未来发展态势的《神奇的指路魔杖》献给读者，特别是有关科技部门的同志以及全国的青年朋友们。

可能有些读者对惯性技术的名称还很陌生，其实它就在我们日常生活的周围。宇宙中一切物体都处在运动中，人们要观察和控制物体的运动，了解物体所处位置的变化，物体运动的方向，运动速度的大小以及物体的姿态等等，这就需要导航与制导技术。天文导航技术，无线电导航定位技术，卫星导航技术等，都是导航定位的方法，但惯性技术是完全不依赖于外部声、光、电、磁传播的信号自主式地进行导航定位的手段，因而它不受地域的限制，不受自然和人为的干扰和影响，无论太空、空间、地面、地下、水面、水下都能全天候地可靠工作，成为能神奇地为物体导航、定位的“魔杖”。惯性技术可以适时地高精度地输出所需的全部导航信息，这也是其他导航技术尚无法实现的，因而成为国防科技、航天科技、飞机、船舶与海洋科技领域不可缺少、

2006/10/10

不可取代的重要组成部分。

20 世纪是惯性技术飞速发展的时期，它从古典的力学理论发展成为综合性的高新科技，从力学和精密机械学科发展成为集材料科学、精密制造、精密仪表、传感器、微电子、光电子、自动控制技术、计算机技术等于一体的综合性学科。

随着光学陀螺仪和建立在纳米技术基础上的硅微惯性仪表技术的发展，以小型化、高可靠性、低成本的发展优势，展示了惯性技术在新的 21 世纪中，将以更诱人的前景在军事应用的同时，在各种民用领域得到广泛的推广应用，成为真正的军民两用技术，为高新科技发展发挥更重要的作用。

根据中国科协的要求，本书成立了编审委员会，由中国惯性技术学会理事长丁衡高院士主持，由院士陆元九，教授章燕申、范跃祖、高寿祖参加，全书由黄德鸣教授撰写。

愿全国更多的青年朋友们了解惯性技术，投身惯性技术事业，为 21 世纪惯性技术的更大发展共同努力奋斗。

**本册编审委员会**

2000 年 11 月

## 《21 世纪学科发展丛书》编辑委员会、 出版委员会名单

### 一、丛书主编、副主编

主 编:周光召

常务副主编:张玉台

副 主 编:徐善衍 常志海 张 泽 宋南平  
宫本欣 马 阳

### 二、丛书编辑委员会

主 任:庄逢甘

副主任:闵桂荣 杨 乐 张 泽 宫本欣 马 阳

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 孙永大 刘 珩 朱道本 仲增墉  
陈学振 张 鲁 汪稼明 李慧政 金明善  
周 济 胡序威 赵 逊 相重扬 徐世典  
谢荣岱 薛全福

各分册编审委员会主任(名单略)

### 三、丛书出版委员会

主 任:宫本欣

副主任:陈学振 张 鲁 李慧政

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 王昭顺 尹 铭 史 彬 刘传喜  
张力军 宋德万 隋千存 董 正 韩 春  
鲁颖淮

# 序

周光召

人类已跨进了新的千年,21世纪的曙光将给全球带来灿烂辉煌的新篇章。回顾过去的20世纪,科学技术的创新与进步引发了人类经济、社会的巨大变革,由此又带来了全球翻天覆地的变化。马克思曾在《资本论》中指出:“生产力的发展,归根结底总是来源于发挥着作用的劳动的社会性质,来源于社会内部的分工,来源于智力劳动特别是自然科学的发展”,人类社会实践有力地证实了这一精辟论断。

随着科学技术在近现代的蓬勃发展,新思维、新理念、新发现推动着新兴学科、交叉学科不断涌现。许多传统学科一方面派生出新的分支学科,另一方面又在与其他学科的融合中形成新的综合性学科。展望21世纪,信息科学技术、生物科学技术、纳米科学技术将成为发展迅速,带动社会经济技术快速进步的前沿学科。环境、能源、材料、航天、海洋等科学技术将继续发展,解决人类面临的持续发展课题。社会进步和经济发展的需求为人类今后如何驾驭科学技术的骏骑,如何继续攀登科技巅峰提出了新的课题。

一个国家的科技水平不仅体现在少数科学家的科技成就中,更要体现在广大群众对科学技术的理解、掌握和应用之中。“科技先行,以人为本”有赖于公众科技文化素质整体水平的提高。因此,弘扬科学精神、传播科学知识和科学方法

就成为科技工作者又一不可推卸的、任重而道远的职责。中国科学技术协会作为党领导下的科技群团组织，肩负着促进学科发展、推动科技进步和普及科学知识、提高全民科技文化素质的重要责任。编写《21世纪学科发展丛书》是使这种重要责任有机融合的一次新尝试。科学普及的对象可分为若干社会群体，其中青少年群体的科普教育尤为重要，因为他们是21世纪的后备人才，是攀登科技高峰的生力军。让广大青少年了解自然科学和技术科学的发展历程、卓越成就，对人类文化、社会、经济发展的巨大贡献，培养他们对科学技术的兴趣、爱好，以及为科技事业献身的精神，是老一辈科技工作者义不容辞的责任，也是我们编撰此套丛书的初衷所在。因此，专家学者们对编著此套丛书表现了极大的热情与关注。68个全国性学会参与了丛书的组织编写，很多院士、知名科学家在百忙中亲自挥笔，运用通俗的语言、生动的描绘、深入浅出的方式，将科学的奥秘揭示给读者。全套丛书介绍了60多个不同学科的起源、发展历程、著名科学家、重大科技成就，以及未来学科发展的态势，为广大读者特别是高中以上文化程度的各阶层读者提供了一套科学性、知识性、前瞻性、趣味性和可读性相统一的科普读物。希望通过浏览这套丛书，不仅能够帮助广大青少年读者拓宽知识领域，而且对于他们选择未来发展方向起到引导和参考作用。同时，此套丛书通俗易懂，也适合其他不同社会群体的干部与公众阅读。丛书将由山东省出版总社于2001年分两批出版发行。

跨入21世纪的中华民族将面临重新崛起的机遇和挑战，衷心地祝愿充满希望的一代丰获知识的硕果，为我国的繁荣富强贡献出才智和力量，作出无愧于伟大中华的重大业绩！

2001年1月16日

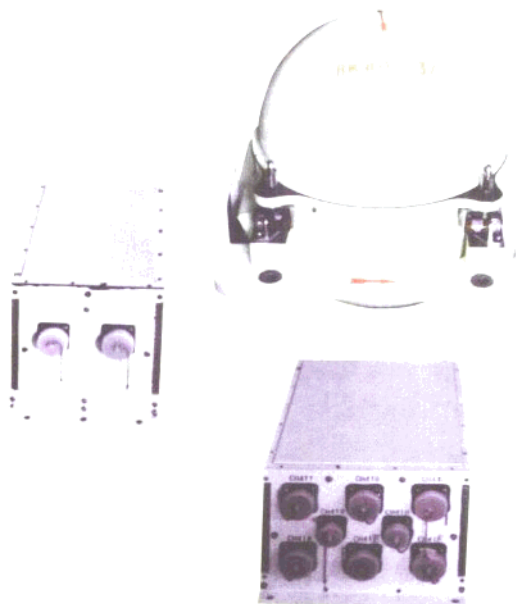


图1 挠性陀螺四框架平台

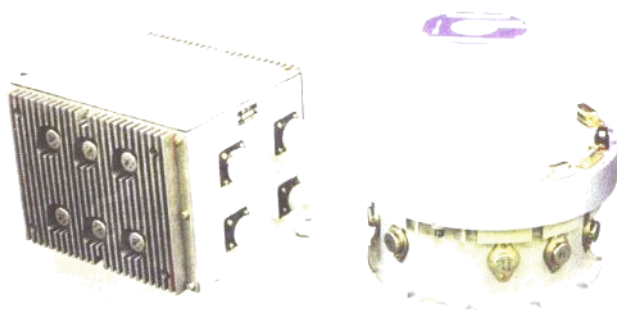


图2 捷联惯性测量组合

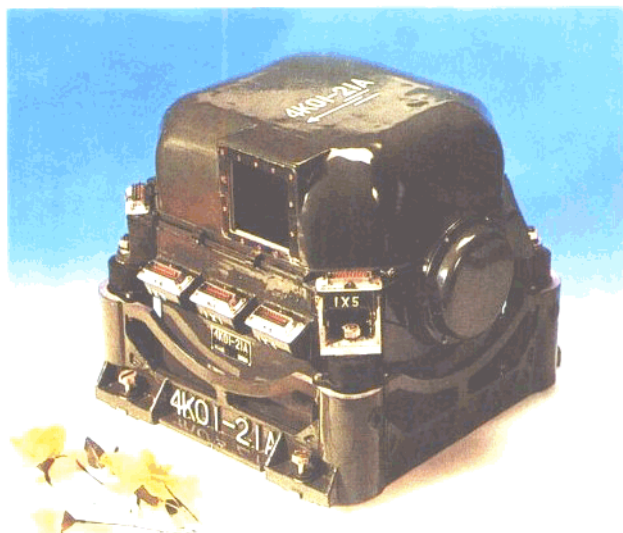


图3 三轴液浮稳定平台



图4 石英挠性加速度计





图5 静压液浮陀螺仪、静压气浮陀螺仪、液浮单自由度陀螺仪



图6 静压气浮陀螺加速度计、静压液浮加速度计、气浮陀螺加速度计



图7 动力调谐陀螺仪

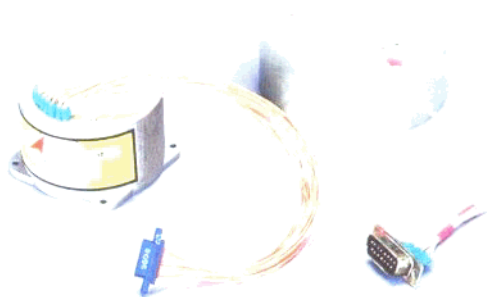


图8 光纤陀螺仪

## 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第一章 你知道什么是惯性技术吗，它与高科技发展有什么关系 ..... | 1  |
| 第一节 序言 .....                       | 2  |
| 一、先从导航制导说起 .....                   | 2  |
| 二、对物体运动状态的测量和控制，这就是导航和制导 .....     | 5  |
| 第二节 惯性技术扬威陆海空天 .....               | 7  |
| 一、靠惯性制导提高导弹命中精度 .....              | 8  |
| 二、惯性导航是潜艇水下的眼睛 .....               | 12 |
| 三、战略远程轰炸机与惯性技术 .....               | 14 |
| 四、惯性技术为陆上战斗猛虎添翼 .....              | 16 |
| 第三节 惯性技术在现代高科技发展中大显身手 .....        | 18 |
| 一、惯性技术是空间技术发展的关键支撑技术 .....         | 18 |
| 二、机器人与惯性技术 .....                   | 21 |
| 三、现代化的高速交通运输与惯性技术 .....            | 24 |
| 四、惯性技术在测量勘探中的应用 .....              | 27 |
| 五、摄影、稳像，惯性技术显身手 .....              | 28 |
| 六、现代医疗仪器妙用惯性技术 .....               | 29 |

|                                              |           |
|----------------------------------------------|-----------|
| 七、惯性技术的发展,促进和带动了相关高新技术的发展 .....              | 30        |
| <b>第二章 惯性技术发展的轨迹,从牛顿三大定律到爱因斯坦相对论实验 .....</b> | <b>33</b> |
| 第一节 惯性技术的理论基础 .....                          | 34        |
| 一、三百年前,伟大科学家牛顿为惯性导航和惯性制导奠定了理论基础 .....        | 34        |
| 二、是谁奠定了陀螺仪的理论基础 .....                        | 38        |
| 第二节 现代陀螺仪器发展的“史前期” .....                     | 42        |
| 第三节 百年回眸——突飞猛进的惯性技术,现代高科技的标志 .....           | 48        |
| 一、船用摆式陀螺罗经的问世 .....                          | 48        |
| 二、舒勒原理是惯性仪表系统设计的准则 .....                     | 50        |
| 三、陀螺地平仪的发明与应用 .....                          | 52        |
| 四、V-2 导弹,惯性制导问世 .....                        | 53        |
| 五、浮子陀螺仪——陀螺仪技术历史性的巨大进步 .....                 | 54        |
| 六、斯伯利 MK-19 型平台罗经开创了电磁控制罗经的新纪元 .....         | 56        |
| 七、世界上第一套惯性导航系统 XN-1 样机 1950 年试飞成功 .....      | 58        |
| 八、动力调谐陀螺仪争夺浮子陀螺仪市场 .....                     | 59        |
| 九、静电陀螺仪——高精度陀螺仪的顶峰 .....                     | 60        |
| 十、捷联系统挑战平台系统 .....                           | 61        |
| 十一、组合导航技术的发展,使惯性导航系统的使用性能趋于完美 .....          | 63        |
| 十二、光电陀螺仪拓展了传统机械旋转陀螺仪的概念 .....                | 66        |
| 十三、硅微惯性器件将引起惯性技术彻底的革命性变革 .....               | 69        |
| 十四、四十多年的艰苦奋斗,我国建立了惯性技术进一步发展的基础 .....         | 71        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第三章 惯性系统的核心——陀螺仪和加速度计</b> | 77  |
| 第一节 陀螺仪                      | 78  |
| 一、什么是陀螺仪                     | 79  |
| 二、陀螺仪的特性                     | 80  |
| 三、广义陀螺仪的定义                   | 87  |
| 四、机械旋转陀螺仪的原理结构               | 88  |
| 五、典型的机械旋转陀螺仪                 | 93  |
| 六、全固态长寿命的光学陀螺仪               | 102 |
| 七、振动陀螺仪                      | 114 |
| 八、异军突起的硅微陀螺仪                 | 117 |
| 九、其他类型的陀螺仪                   | 121 |
| 十、陀螺仪的分类                     | 127 |
| 十一、陀螺仪的性能参数                  | 129 |
| 第二节 加速度计                     | 131 |
| 一、比力与比力的测量                   | 132 |
| 二、各具特色的加速度计                  | 133 |
| 三、加速度计的性能参数                  | 141 |
| 第三节 惯性敏感器的发展与应用              | 144 |
| 一、20 世纪惯性敏感器技术性能大飞跃          | 144 |
| 二、新世纪惯性敏感器的发展与应用             | 145 |
| <b>第四章 形形色色的惯性系统</b>         | 149 |
| 第一节 最简单的航向检测仪器——陀螺方位仪        | 151 |
| 一、陀螺仪的视运动                    | 151 |
| 二、陀螺方位仪原理                    | 152 |
| 三、陀螺半罗盘                      | 154 |
| 第二节 能自动找北的仪器——陀螺罗经           | 155 |
| 一、陀螺罗经的自由振荡运动                | 155 |
| 二、陀螺罗经自由振荡的阻尼                | 159 |
| 三、陀螺罗经原理的工程实现                | 160 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第三节 陀螺找北仪和陀螺经纬仪 .....                | 162 |
| 一、摆式陀螺找北仪 .....                      | 163 |
| 二、解析式陀螺找北仪 .....                     | 164 |
| 三、陀螺经纬仪 .....                        | 164 |
| 第四节 运动载体上的人工水平面——陀螺地平仪 .....         | 166 |
| 一、动力稳定平台 .....                       | 166 |
| 二、径向修正的陀螺地平仪 .....                   | 167 |
| 第五节 平台式惯性导航系统 .....                  | 167 |
| 一、平台式惯导系统的主体仪器结构 .....               | 168 |
| 二、平台式惯导系统的修正回路 .....                 | 171 |
| 三、静电陀螺监控器 ESGM .....                 | 172 |
| 四、航向、水平姿态基准系统和平台罗经 .....             | 174 |
| 第六节 用数学平台代替物理平台——捷联式<br>惯性系统 .....   | 175 |
| 一、捷联系统的原理方案 .....                    | 176 |
| 二、捷联惯性系统的优点和实现的技术关键 .....            | 178 |
| 第七节 取长补短, 信息科技的新成就——组合<br>导航系统 ..... | 182 |
| 一、几种成功应用的组合系统 .....                  | 183 |
| 二、多传感器信息融合组合导航系统 .....               | 185 |
| 三、神奇的组合滤波器 .....                     | 185 |
| 第五章 怎样提高惯性仪表和惯性系统的精度 .....           | 189 |
| 第一节 影响惯性仪表和系统精度的主要误差<br>因素 .....     | 190 |
| 一、影响惯性仪表精度的主要因素 .....                | 190 |
| 二、影响惯性仪表和系统的主要误差因素 .....             | 194 |
| 第二节 提高惯性仪表精度的技术途径 .....              | 199 |
| 一、聚沙成塔, 不断完善 .....                   | 199 |
| 二、充分利用一切新技术成果 .....                  | 201 |
| 三、测试是提高惯性仪表和系统精度不可缺少的重要              |     |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 手段 .....                   | 201 |
| 四、锐意创新,探索和发明新型的惯性仪表 .....  | 205 |
| 第三节 提高惯性系统精度的主要技术途径 .....  | 206 |
| 一、实时在线补偿 .....             | 206 |
| 二、惯性系统的自动补偿技术 .....        | 207 |
| 三、多传感器信息融合导航系统 .....       | 213 |
| 第六章 迎接 21 世纪,惯性技术新发展 ..... | 217 |
| 第一节 惯性技术发展百年回顾 .....       | 218 |
| 一、从框架陀螺到多种支承方式的陀螺仪 .....   | 219 |
| 二、全固态陀螺仪的问世 .....          | 219 |
| 三、全自动控制技术的应用 .....         | 219 |
| 四、先进的导航系统技术 .....          | 220 |
| 五、平台式惯性系统向捷联式系统过渡 .....    | 221 |
| 六、多功能、组合化系统的发展 .....       | 221 |
| 七、导航仪表数字化 .....            | 221 |
| 八、小型化,高精度 .....            | 222 |
| 九、高稳定,高可靠 .....            | 222 |
| 十、走向军民两用 .....             | 222 |
| 第二节 惯性技术明天更灿烂 .....        | 223 |
| 一、新世纪对惯性技术的新要求 .....       | 223 |
| 二、惯性技术发展方向预测 .....         | 225 |
| 三、惯性技术灿烂的应用前景 .....        | 227 |
| 后记 .....                   | 230 |

# 第 1 章

第一章 绪论



## 你知道什么是惯性技术吗， 它与高科技发展有什么关系

### 第一节 序 言

#### 一、先从导航制导说起

一颗卫星在发射场腾空而起，一架飞机在蓝天翱翔，一艘舰船在汹涌的波涛中穿行，一队探险人员在沙漠中跋涉……宇宙中的一切物体均随着时间在三维空间中运动。运动有快有慢，这就是速度。有了速度，运动物体经历的路程随着时间积累而增长，从而引起运动物体位置的变化，在三维空间里就是沿直角坐标系的三个轴位移。习惯上人们把在地球表面附近的位置用纬度、经度和高度来表示。例如某科学考察卫星的近地点轨道高度是 260 公里，最后返回地球落点的位置在东经 103 度 31.5 分，北纬 41 度 17.6 分。有了三维坐标，它的位置就确定了。运动物体运动时，它的速度还会变化。在路上行驶的车辆受地面摩擦和空气的阻力，速度会慢慢降低，发动机提供了推力，推力大于阻力汽车就加速前进，推力小于阻力，速度就会减小。所以运动物体受了