



装备科技译著出版基金

Inertial MEMS

Principles and Practice

# 惯性MEMS器件 原理与实践

【德】沃克尔·肯普 (Volker Kempe) 著

张新国 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

CAMBRIDGE



装备科技译著出版基金

# 惯性 MEMS 器件 原理与实践

**Inertial MEMS Principles and Practice**

[德] 沃克尔·肯普 (Volker Kempe) 著  
张新国 等译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-083 号

图书在版编目(CIP)数据

惯性 MEMS 器件原理与实践/(德)肯普(Kempe, V.)  
著;张新国等译. —北京:国防工业出版社, 2016. 5  
书名原文: Inertial MEMS Principles and Practice  
ISBN 978-7-118-10887-3

I. ①惯… II. ①肯… ②张… III. ①微电子技术-  
传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 068107 号

This is a translation of the following title published by Cambridge University Press:  
Inertial MEMS Principles and Practice ISBN 978-0-521-76658-6

© Volker Kempe 2011

This translation for the People's Republic of China(excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and National Defense Industry Press 2016

This translation is authorized for sale in the People's Republic of China(excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this translation is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and National Defense Industry Press.

本书简体中文由 Cambridge University Press 授权国防工业出版社出版发行, 版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 26½ 字数 520 千字

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 128.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

## TRANSLATOR PREFACE | 译者序

MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)即微电子机械系统,基于 MEMS 技术的惯性传感器,采用半导体晶片制作工艺,具有类似 IC 工业适合大批量生产、体积小、重量轻、价格低、可靠性高及易于集成等特点。MEMS 技术自从 20 世纪 80 年代出现以来引起了世界各国的高度重视,西方国家尤其是美国投入了大量的资金及研究人员进入这一领域,目前已广泛应用于汽车、医疗及消费电子等领域。而惯性 MEMS 技术研发的器件性能已经从普通车用级发展到了战术级的水平,并且将军事应用作为其主要方向。

当加工尺度达到微米级时,传感器芯片结构的阻尼特性、噪声水平及机械耦合等特性成为高精密工艺制作的技术瓶颈;同时,微结构本身带来的寄生效应、对微弱信号的检测和控制以及封装引线等一系列技术问题是影响传感器面向实际应用的技术难题。近几年来,我国在惯性 MEMS 器件方面开展了大量的研究工作,并取得一定成果,在设计水平、高精度制造技术特别是集成制造技术及微弱信号检测技术等方面与国际先进水平差距逐渐缩小。在立足自主研发的基础上我们仍需要积极借鉴国际先进的技术知识和解决问题的思维方式,取长补短,勇于探索和创新。

本书基于作者在学术界和工业界 40 多年的研究与开发经验而精心编写,在描述惯性 MEMS 器件的理论知识和最新发展的基础上,揭示了惯性 MEMS 器件内部多学科间的复杂物理机制,并重点阐明了如何对应用需求进行分析并将其转变为设计观念。这些技术方法和思路可为我国从事惯性 MEMS 器件设计和研制的专业技术人员提供参考,避免潜在的错误并缩短研发周期。

本书工程研制的分析和解决问题的方法对传感器研制所面临的实践性困难提出了独到的见解。希望我国从事惯性 MEMS 器件的科研工作者及广大院校师生能从中汲取有用信息,启发思路,为促进我国 MEMS 技术跨入世界先进行列做出积极贡献!

本书由张新国组织的中航工业西安飞行自动控制研究所 MEMS 技术团队担

任翻译,张新国负责统稿,余才佳和王小斌负责校对。具体分工如下:第1、2章由王猛翻译;第3章由宋运康翻译;第4章由闫鑫翻译;第5、6章由王玉朝翻译;第7、9章由肖鹏翻译;第8章由王刚翻译。全书在翻译和整理过程中也得到其他MEMS技术团队成员的支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促和水平有限,翻译难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

译者

2016.1

对惯性微机电传感器(简称“惯性 MEMS 器件”)的研究、开发与商业化已超过 20 年。有时人们并未察觉到它们已经进入了军事和航天相关的应用中,并且存在于我们日常生活的诸多产品中。带安全气囊释放传感器与电子稳定控制的汽车已司空见惯。随着带有心脏起搏器患者的活动监测、搬运机器人与相机内的平台稳定等功能的应用,我们的生活质量在逐步提升。简单易用的人机界面发明使很多人可以操控复杂的设备,而不仅仅是玩玩计算机游戏。惯性 MEMS 器件通常与其他传感器系统融合进入新的应用领域已成为一种趋势,并保持上升势头。

本书将阐释惯性 MEMS 器件的多学科复杂性,试图对基于 MEMS 的惯性传感器的设计、加工以及性能评估进行系统性阐述,并着重关注受技术缺陷以及常见恶劣环境影响产生的实际问题。必须保证投向市场的产品在其使用寿命周期内拥有一定程度的可靠性。

本书将阐释惯性测量的基本概念以及理论背景,将按照工业领域的研发和试制要求而非学术类要求进行描述,目的在于表明理论与实践之间的互利关系。因此,对应用需求进行分析并将其转变为设计观念是重中之重。本书将用相当大的篇幅对诸如寄生效应、冲击与振动鲁棒性,以及主要性能参数的稳定性等进行分析建模,因为这些都是实际工作中必须要面对的。

本书分为 9 章。其中 6 章(含第 1 章绪论)涉及了 MEMS 的不同方面,并着重于惯性 MEMS 器件。第 2 章叙述了最重要的换能器及其特性。第 3 章主要分析了弹性力、阻尼力等非惯性力,它们在惯性 MEMS 器件的设计中扮演着重要角色。接下来 4、5 章涉及了包括封装在内的主要 MEMS 工艺,而电路接口的内容在第 6 章介绍。无论惯性 MEMS 器件领域的专业人士还是希望对 MEMS 领域有大体了解的人都可以从这 6 章中获益。

接下来的两章介绍两种惯性 MEMS 器件的代表:加速度计与陀螺仪。其重点是基本原理、描述动态特性的方法与模型,以及不同方法与结构的全面介绍,包括

其优劣两个方面。另外对测试与标定做了简短的概述。

本书基于工程水平级编写,并尽可能通过数学模型分析各种效应与工艺,从而让读者对不同效应的数量级产生感性认识。

本书的适用对象不仅包括开发、制造和使用惯性传感器的专业人士,也包括在应用、生产管理和销售领域希望了解背景知识的人们。本书可以作为进行深入理论研究的起点,例如在整体封装陀螺仪碰撞影响分析领域,其中包括对信号处理的分析效果。

根据作者的经验,很多工程师、物理学家和数学家都乐意看到对复杂晦涩的基于 MEMS 的惯性传感器领域有一个准确、易懂的阐释,在揭示实际问题背后的影响与模型机理时,避免不当的简化或表象描述。本书针对这些挑战进行了初步的尝试。作者与很多专家在惯性传感器的生产、测试与设计中均有共事经历,相信本书能够满足实际需求,也希望能够激起该领域从业者与科研人员的兴趣。对于学生等感兴趣的人群,本书也可以作为机械 MEMS 领域的入门读物。

# 致 谢

我希望向奥地利 SensorDynamics AG 的同事与(德国)弗劳恩霍夫协会硅技术研究中心(ISIT)的同事表达谢意,他们为解决 MEMS 工业化中的诸多问题创造了良好环境。感谢“Inertial Micro Sensor Systems”团队,我有幸与这个团队一同工作,包括在新创立的 SensorDynamics AG 公司的起步阶段。这是卓有成效的时刻,我们所有人都面临着新的课题,并以严谨的科学态度去解决这些问题。

感谢来自 SensorDynamics 的同事,他们为本书提供了 SEM 照片及测试图表。Gottfried Fraiss、Manfred Heller、Christian Rossadini、Jörg Schönbacher、Ute Stotter 及 Johann Wagner 准备了大量材料,以便我从中选取适合的内容。Gerd Radl 和他的团队一直帮助我解决在新硬件与软件上出现的错误。

我由衷地感谢卢布雅尔那大学的 Drago Strle,我们在  $\Sigma\Delta$  相关问题上一保持着密切的合作。在工艺相关的问题上,ISIT 的 Peter Merz 给予我宝贵的反馈信息。格拉茨大学的 Karl Wohllhart 教授帮助我更深刻地理解了陀螺仪的运动学知识。Hanno Hammer 承担了前几章的校对工作,向我提供了宝贵的反馈信息。

最后,除了所有尽职尽责的人,我还要向家人表达最亲切的感谢。Julia 与 Oded 帮助我处理了各种资料的无数问题。Vera、Ian 与 Marius 在英文措词上提出了宝贵的建议。我亲爱的夫人带病超负荷工作。感谢你们!

# 说 明

(1) 本书中约定,将“ $s$ ”记为微分算子,  $s = d/dt$  记为拉普拉斯变换变元,傅里叶变换变元记为  $s = j\omega$ 。不同情况下可以通过上下文判断语意。相应地,将滤波函数记为  $f = f(s)$ ,该表达式在传递函数中为拉普拉斯或傅里叶变换,而在微分方程中为两个多项式微分算子的有理分式。与之相对,  $x$  等变量在假定  $s = d/dt$  的情形下为时域中的描述,在  $s$  作为拉普拉斯或傅里叶变换变元的情形下为相应的变换函数。

(2) 除另做声明,认为坐标系依附于承载惯性传感器的平台上。此情形下,  $x$  轴与  $y$  轴位于平台面内,而轴在面外。面外方向与  $z$  轴方向含义相同。

## 内 容 简 介

通过基于 MEMS 的惯性传感器的设计、制作与测试进行实用性与系统性的概述,这本综合、严密的手册展示了如何对应用需求进行分析,并将其转变为切实可行的设计,同时帮助人们避免潜在的错误,缩短设计时间。

读者通过对本书的阅读,将会迅速掌握相关基本原理,包括 MEMS 工艺、封装、运动学与机械学以及换能器等,也能够全面评判设计用的不同方法与结构,纵览测试与校准的关键内容。

这本书描述了惯性 MEMS 器件领域的最新状态,对真实世界应用中制造传感器所面临的实践性困难拥有独到的见解,为工业领域中的专业工程师、管理者以及应用工程师提供了理想的资源,也适用于希望对该领域进行充分了解的学生。

Volker Kempe 在学术界和工业界有着 40 多年的研究与开发经验,他曾领导 Austria Mikro Systems 的微电子工程系达 10 年之久。2003 年,Volker Kempe 与人合作创立了 SensorDynamics AG 公司,并担任公司副总裁,他现在的研究方向为惯性 MEMS 器件的功能、工艺与应用。

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第 1 章 绪论           | 1  |
| 1.1 MEMS 时期之前的概况   | 1  |
| 1.2 应用与市场          | 5  |
| 1.3 惯性 MEMS 器件的组成  | 7  |
| 参考文献               | 9  |
| 第 2 章 换能器          | 10 |
| 2.1 各向异性材料特性、张量和旋度 | 10 |
| 2.1.1 应力、应变与压阻效应   | 11 |
| 2.1.2 坐标系旋转        | 21 |
| 2.2 压阻式换能器         | 27 |
| 2.2.1 压电电阻器        | 27 |
| 2.2.2 硅压阻式传感器      | 28 |
| 2.2.3 多晶硅的压电电阻     | 31 |
| 2.3 压电换能器          | 32 |
| 2.3.1 压电效应         | 32 |
| 2.3.2 压电方程         | 35 |
| 2.4 电容式换能器         | 39 |
| 2.4.1 静电力          | 40 |
| 2.4.2 平行板式电容       | 41 |
| 2.4.3 倾斜板式电容       | 45 |
| 2.4.4 梳齿电容         | 51 |
| 2.4.5 悬浮           | 56 |
| 参考文献               | 61 |
| 第 3 章 非惯性力         | 65 |
| 3.1 弹簧             | 65 |
| 3.1.1 梁            | 66 |
| 3.1.2 刚度矩阵         | 67 |
| 3.1.3 梁的弯曲方程       | 67 |
| 3.1.4 悬臂梁          | 71 |
| 3.1.5 扭力弹簧         | 78 |

|            |                 |     |
|------------|-----------------|-----|
| 3.1.6      | 应力集中            | 83  |
| 3.1.7      | 支承              | 84  |
| 3.2        | 阻尼力             | 88  |
| 3.2.1      | 流体流动模型          | 88  |
| 3.2.2      | 滑膜阻尼            | 96  |
| 3.2.3      | 压模阻尼            | 103 |
| 3.2.4      | 阻力              | 119 |
| 3.2.5      | 自由分子流           | 120 |
| 3.2.6      | 结构阻尼            | 122 |
|            | 参考文献            | 123 |
| <b>第4章</b> | <b>MEMS 工艺</b>  | 127 |
| 4.1        | 惯性 MEMS 器件微加工技术 | 128 |
| 4.1.1      | 基础微电子工艺制造步骤     | 129 |
| 4.1.2      | 刻蚀              | 135 |
| 4.1.3      | 干法刻蚀            | 140 |
| 4.2        | 晶圆键合            | 143 |
| 4.2.1      | 零级封装和晶圆键合       | 144 |
| 4.2.2      | 晶圆键合工艺          | 145 |
| 4.3        | 工艺集成            | 151 |
| 4.3.1      | 体工艺             | 152 |
| 4.3.2      | 表面工艺            | 153 |
| 4.3.3      | SOI MEMS 工艺     | 158 |
| 4.3.4      | CMOS - MEMS     | 161 |
|            | 参考文献            | 167 |
| <b>第5章</b> | <b>一级封装</b>     | 172 |
| 5.1        | 一级封装壳体          | 173 |
| 5.2        | 一级封装技术          | 176 |
| 5.2.1      | 划片和裂片           | 176 |
| 5.2.2      | 粘片              | 177 |
| 5.2.3      | 电气连接            | 182 |
| 5.2.4      | 包封              | 185 |
|            | 参考文献            | 189 |
| <b>第6章</b> | <b>电路接口</b>     | 191 |
| 6.1        | 检测电路-组成模块       | 192 |
| 6.1.1      | MOS 晶体管         | 192 |
| 6.1.2      | 运算和跨导放大器        | 197 |

|       |              |     |
|-------|--------------|-----|
| 6.2   | 传感器接口        | 208 |
| 6.2.1 | 电阻式接口        | 208 |
| 6.2.2 | 压电式接口        | 210 |
| 6.2.3 | 容式接口         | 214 |
| 6.3   | 数据转换器        | 225 |
| 6.3.1 | 采样和保持        | 225 |
| 6.3.2 | 幅值的单采样转换     | 227 |
| 6.3.3 | 时域转换         | 227 |
|       | 参考文献         | 237 |
| 第7章   | 加速度计         | 240 |
| 7.1   | 测量对象         | 240 |
| 7.2   | 弹簧-质量块系统     | 241 |
| 7.2.1 | 传递函数         | 242 |
| 7.2.2 | 加速度计非理想因素    | 248 |
| 7.2.3 | 加速度计反馈控制     | 253 |
| 7.2.4 | 非线性力矩器反馈控制   | 262 |
| 7.3   | 谐振加速度计       | 270 |
| 7.3.1 | 谐振梁          | 271 |
| 7.3.2 | 谐振加速度计系统     | 274 |
| 7.4   | 梁式加速度计       | 276 |
| 7.4.1 | 梁动力学         | 277 |
| 7.4.2 | 模型建立         | 282 |
| 7.5   | 几种其他类型加速度计原理 | 285 |
| 7.5.1 | 隧道加速度计       | 285 |
| 7.5.2 | 对流和起泡式加速度计   | 287 |
| 7.6   | 从单轴到六轴加速度计   | 289 |
| 7.6.1 | 单轴加速度计       | 289 |
| 7.6.2 | 2D 和 3D 加速度计 | 296 |
| 7.6.3 | 6D 加速度计      | 300 |
|       | 参考文献         | 302 |
| 第8章   | 陀螺仪          | 308 |
| 8.1   | 基本理论         | 308 |
| 8.2   | 陀螺运动学        | 311 |
| 8.2.1 | 载体的转动及角速度    | 312 |
| 8.2.2 | 非惯性系统中体的旋转   | 315 |
| 8.2.3 | 角动量理论        | 316 |
| 8.2.4 | 动量方程         | 318 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 8.2.5 | 小角度近似 .....              | 319 |
| 8.3   | 陀螺的性能 .....              | 321 |
| 8.4   | 速率积分陀螺 .....             | 323 |
| 8.4.1 | 二自由度陀螺 .....             | 323 |
| 8.4.2 | 角度陀螺原理 .....             | 324 |
| 8.4.3 | 非理想模型 .....              | 327 |
| 8.4.4 | 角度陀螺中的非理想性 .....         | 329 |
| 8.4.5 | 陀螺控制 .....               | 330 |
| 8.5   | 角速率陀螺 .....              | 331 |
| 8.5.1 | 系统架构 .....               | 333 |
| 8.5.2 | 谐振检测 .....               | 336 |
| 8.5.3 | 非谐振检测 .....              | 339 |
| 8.5.4 | 噪声 .....                 | 341 |
| 8.5.5 | 零角速率输出 .....             | 343 |
| 8.5.6 | 偏置稳定性 .....              | 350 |
| 8.5.7 | 加速度抑制及音叉 .....           | 352 |
| 8.5.8 | 驱动运动控制及弹性梁非线性 .....      | 357 |
| 8.6   | 陀螺结构 .....               | 362 |
| 8.6.1 | 模态解耦结构 .....             | 362 |
| 8.6.2 | z 轴陀螺 .....              | 362 |
| 8.6.3 | 面内敏感陀螺 .....             | 366 |
| 8.6.4 | 扭摆陀螺 .....               | 368 |
| 8.7   | 非平面式 MEMS 陀螺 .....       | 374 |
| 8.7.1 | 梁式陀螺 .....               | 374 |
| 8.7.2 | 石英音叉 .....               | 376 |
| 8.7.3 | 环式陀螺 .....               | 377 |
| 8.7.4 | 体声波陀螺 .....              | 378 |
| 8.8   | 多轴陀螺及 6 轴 IMU 设计思路 ..... | 379 |
| 8.8.1 | 单质量块多自由度惯性传感器 .....      | 380 |
| 8.8.2 | 双轴陀螺 .....               | 382 |
| 8.8.3 | 三轴陀螺 .....               | 383 |
|       | 参考文献 .....               | 386 |
| 第 9 章 | 测试与标定 .....              | 393 |
|       | 参考文献 .....               | 397 |
|       | 结束语 .....                | 398 |
|       | 参考文献 .....               | 399 |
|       | 中英文对照表 .....             | 400 |

# 第 1 章

## 绪 论

---

惯性传感器是置于完全屏蔽环境下,测量其相对于外部惯性参考坐标系的位置变化的观测器。

惯性传感器利用作用于物体的惯性力测定其动态特性。基本动态参数包括某个轴向上的加速度和角速度。作用于物体的外力产生加速度和/或方位(角坐标)的变化。角位置的变化率为角速度。速度计不属于惯性传感器,因为它能够测量不受惯性力作用的物体的恒定速度,而惯性传感器没法这样测试。但是,如果物体的初始条件已知,基于测量的加速度和速率信号,通过对运动方程进行积分就能计算出其变化。

在绝大多数的实际应用中,例如在振动测量、主动悬挂系统、碰撞检测系统、警报系统、医疗放射性监测、车内安全系统和计算机游戏接口中,关注的是物体短时间的动态变化情况。但也有很多应用需要惯性传感器来测定物体的位置和方位,例如机器人技术、普通电动机控制及导航,由于需要对相应运动方程进行积分,这些应用通常要求更高的精度,因为测量误差和传感器的不稳定性会随着积分时间积累。通常惯性传感器是与其他测量系统协同使用,例如在机器人技术中与位置和力/力矩传感器的结合,或者在惯性导航系统(INS)中与车内的全球定位系统(GPS)结合。通过 GPS 数据修正,并采用卡尔曼滤波器,INS 测量精度可以得到显著提高。即使 GPS 受到抑制或干扰而导致性能变差或中断,INS 依然能够辅助导航。

---

### 1.1 MEMS 时期之前的概况

惯性传感器的历史相对短暂。除了在物体运动的控制中扮演重要角色外,关于惯性传感器的早期应用就知之甚少。更值得注意的是,构成加速度和角速率传感器的大多数组成部分,例如精细部件和精密弹簧技术,自中世纪后期就存在并用于精美的钟表等结构中。

## 1. 加速度计

加速度传感器(简称加速度计)出现较晚,最有可能的原因之一是仪表技术的缺乏,或者按照现代的措词来说,是接口的缺乏。这就是一些早期加速度开关的应用只需要非常简单的机械接口的原因。加速度开关在一定加速度水平下才会作用,例如第一次世界大战中某些炸药的引爆。

面向更广泛应用的第一例商用加速度计要归功于 B. McCollum 和 O. S. Peters, 其开发于 1920 年左右[McCollum, Peters 1924]。它基于惠斯通半桥的拉力-压力敏感电阻,该电阻由石墨环形成。下一个技术阶段是 1938 年左右开始的应变式换能器的应用,然后是 20 世纪 40 年代末压电和压阻式换能器的出现。这些换能器能够捕捉传感器结构中由弹性支撑质量块的位移所产生的力。此类传感器的小型化和高鲁棒性,为其在工业、陆上运输、航空航天、军事应用、地震学及科学等领域的广泛应用开辟了道路。压电和压阻式换能器工作原理也是惯性微机电系统(MEMS)领域最早采用的原理之一——它是在同一载体甚至单芯片上,将微米和纳米尺度的机械单元、传感器、执行器与电子电路进行集成。20 世纪 70 年代末已经开始应用这项技术,如批量生产的采用压阻式换能器的硅加速度计的出现。采用体硅工艺加工的质量块与两个玻璃片键合在一起[Roylance, Angell 1979]。类似器件的商业化应用大约出现在 10 年之后,这些器件都是基于现有的各种换能器原理,例如检测固定与可动极板之间的电容变化、谐振器件的频率、闭环系统隧道电流的稳定性、加热器与可动散热片之间的热量变化,以及气泡内部温度场的分布。这些新产生的和已有的理念被广泛用于微电子技术领域,为惯性传感器在工业、汽车、医学及生活消费品等方面的低成本、大批量应用开辟了道路。

众所周知,基于 MEMS 技术的 50g 量程的加速度计在安全气囊启动装置中的应用起到了先驱作用,并成为惯性 MEMS 器件领域中最早大批量生产的产品。尤其令人振奋的是,这些成功的大批量产品为完全单片集成传感器与信号处理电路提供了先例。在政府资金的强力支持下,AD 公司开发出一种独有的 BiCMOS-MEMS 工艺,可将已有的微电子工艺与多晶硅沉积、刻蚀及释放等工艺相结合。基于此工艺已经研制出各种惯性传感器,其中 50g 量程的加速度计为首例[Analog Devices 1993]。

## 2. 陀螺仪

很早之前人们就发现了快速旋转圆盘具有稳定效应,并在早期将其应用在悠悠球等玩具及庆典中。真正的角速率传感器的出现则很晚,但与加速度计相比已有相当长的历史了。这显然是由早期接口速度要求很低,以及需要测试的信号值适中所决定。例如,地球转动速度为  $360^\circ/24\text{h}$  或  $0.0042^\circ/\text{s}$ 。

首次在技术上实现角速率传感器大约在 1817 年,该传感器是一种由德国图宾根的 Johann Gottfried Friedrich von Bohnenberger 设计的机械陀螺仪。这还谈不上

真正意义上的传感器,但它展示出了转动效应。

该系统基于旋转原理,并被用来演示地球自转轴极其缓慢运动的机制,其加速时间由 25800 年的全周期至几秒或者几分钟。1830 年左右美国的 Walter Johnson 也进行了类似的演示(Johnson 的回转仪)。

1851 年,法国科学家莱昂·傅科在巴黎的先贤祠建造了一个长 67m、质量 28kg 的钟摆(图 1.1),演示了在旋转的非惯性坐标系中的科里奥利力原理。这是第一个真正意义上的测量地球转动的传感器。顺便提一下,类似实验最早是由意大利物理学家温琴佐·维维亚尼于 1661 年完成的。在傅科之后,此类实验相继出现在世界各国。受到地球自转的影响,这种摆的摆动平面在 24h 内的变化角度为  $360^\circ \sin \phi$ , 角度  $\phi$  为实验所在地的地理纬度。在赤道上,傅科钟摆无任何变化;而在地极区

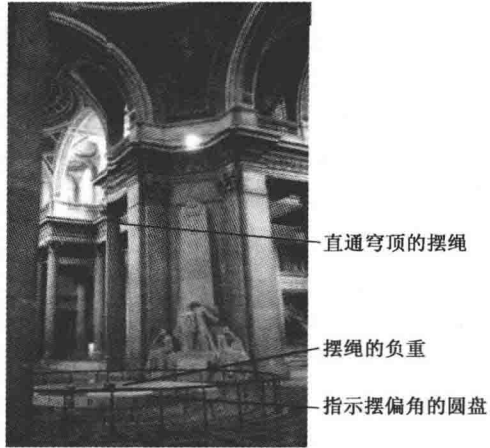


图 1.1 傅科摆,巴黎先贤祠

域,转动量是完全的  $360^\circ/24\text{h}$ 。在其他区域,钟摆末端会在地面上划出美妙的玫瑰形图案。

科里奥利力最早于 1835 年由法国科学家科里奥利提出。科里奥利力出现在旋转参考坐标系中物体的运动方程中,并与运动物体的线速度或角速度有关。我们将在第 8 章对其进行详细分析。

1852 年,傅科运用该原理建造了一个旋转式陀螺仪(“Meridiankreisel”),它可以看做是现代旋转式陀螺仪的基础。这时出现了“陀螺仪”(Gyroscope)这一术语(“gyros”——旋转,“skopein”——幻觉)。然而,转动传感器的兴起起源于鱼雷与炮弹中转轮的稳定性控制。直到 1904 年,德国美术史学者 Hermann Anschütz-Kämpfe 取得了高速旋转陀螺仪的技术专利[Schell 2005],他提出了将陀螺仪用于罗盘的想法(1908 年)。陀螺仪中的转子安装在万向环上,这样就成为自由转子。罗盘的关键在于引入一个机械装置,使得当罗盘轴不指向北时都能产生一个外加扭矩。如果罗盘轴受干扰后指向其他方位,进动会使其重新指北。

美国人 Elmer Ambrose Sperry(1910)继续了 Anschütz-Kämpfe 的研究,而海军对陀螺仪-罗盘的使用使其很快首次应用到大型舰船上,之后又发展到小型舰船和飞机上。

在相当长时间内,旋转式陀螺仪一直占据着航空器与舰艇上惯性导航与平台稳定的领域。在低成本与小型化需求的驱动下,1960 年左右出现了振弦式陀螺仪[Quick 1964]、音叉式陀螺仪[Hunt, Hobbs 1964]及振动框架式谐振器等新型陀螺