



# 陀螺仪理论、设计 及试验技术

国防工业出版社

# 陀螺仪理论、设计 及试验技术

[美] 瓦尔特·里格利、瓦尔特·M·霍利斯特、  
威廉·G·登哈德 著  
余德星、李克孝、沈正华、刘玉峰 等译  
李克孝、沈正华、许心钰 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书专门介绍陀螺仪的原理、设计和试验技术。全书包括两大部分共分十五章：第一章至第十二章为原理部分；第十三章至第十五章为设计与试验技术部分。书中以浮子式陀螺仪为介绍重点，对新型的陀螺仪，如磁悬浮、静电悬浮、超导陀螺等也作了介绍。本书是美国马省理工学院陀螺研究室理论及工程研究的总结，基本上反映了60年代末美国浮子陀螺的水平。书中采用的方法、符号、脚注都是该学院习惯用的。前十二章中每章最后有例题及习题，可供读者进行练习之用。

本书可供从事陀螺仪及惯性导航系统工作的工程技术人员参考，也可作为高等院校陀螺及导航专业的教学参考书。

Gyroscopic Theory, Design, and Instrumentation  
Walter Wrigley, Walter M. Hollister, and William G. Denhard  
The M.I.T. Press

\*

### 陀螺仪理论、设计及试验技术

[美] 瓦尔特·里格利、瓦尔特·M·霍利斯特、威廉·G·登哈德 著

余德星、李克孝、沈正华、刘玉峰 等译

李克孝、沈正华、许心钰 校

\*

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 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 13<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 341 千字

1978年2月第一版 1978年2月第一次印刷 印数：0,001—4,900册

统一书号：15034·1610 定价：1.70元

## 出版说明

遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，为适应我国科学技术发展的需要，我们组织翻译出版了《陀螺仪理论、设计及试验技术》一书，供有关的工程技术人员及高等院校的师生参考。

本书在美国由马萨诸塞理工学院出版，它是该学院航空与宇宙航行系仪表实验室二十五年的经验总结，该实验室研制浮子式陀螺仪较早，美国最初的浮子陀螺仪有相当部分是该实验室研制并转成批生产的。该实验室在研究浮子陀螺仪的工作中形成了整套的工程分析方法，并在理论的工程实现方面具有一定的经验，本书在一定程度上反映了该实验室的研制水平。该实验室从事研制工作的有专职研究人员，教员以及学生，所以该书也部分的反映了该学院陀螺与导航专业的教学内容，可供我国工程技术人员及院校师生参考。

本书包括两大部分共分十五章。第一部分包括第一至第十二章为理论及原理部分，第二部分包括第十三至第十五章为设计及试验技术部分。第一部分的前四章是理论基础，包括了力学定律，运动学基础，座标系等基本概念以及为后面分析用的陀螺模型方程式。第一部分的后八章介绍各种陀螺仪的原理包括二自由度陀螺、单自由度陀螺、飞机姿态指示、陀螺方向仪表、空间积分器、陀螺罗经、垂线指示系统、惯性导航等。本书的分析方法是麻省理工学院仪表实验室所习惯用的，脚注及上下角注较烦琐，但基本概念较清楚而严格，希读者在阅读中加以鉴别。设计及试验技术部分注重工程设计，对从事陀螺及导航系统的研究人员有一定的参考价值。

本书在设计与试验技术部分的某些内容反映了作者的资本主义观点之处，希读者加以批判吸收。

本书不但对从事飞机、导弹、舰艇等的导航、稳定系统的工程技术人员有所裨益，对从事教学的各大专院校师生也具有一定的参考价值。

由于我们水平有限，加之参加翻译工作的人员较多，其缺点错误可能不少，欢迎广大读者批评指正。

参加本书翻译工作的还有夏延、冯德星、肖正山、王大根、毛永泉、金振兴、邹金水等同志。

# 目 录

## 第一部分 理 论

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....            | 13 |
| 1.1 定义 .....            | 13 |
| 1.2 陀螺模型 .....          | 15 |
| 1.3 二自由度陀螺仪 .....       | 17 |
| 1.4 单自由度陀螺仪 .....       | 18 |
| 1.5 姿态仪表 .....          | 20 |
| 1.6 陀螺罗盘 .....          | 22 |
| 1.7 惯性导航 .....          | 24 |
| 1.8 陀螺技术 .....          | 25 |
| 1.9 矢量、矩阵和记号 .....      | 29 |
| 参考文献 .....              | 32 |
| 例题 .....                | 33 |
| 习题 .....                | 35 |
| 第二章 运动、参考坐标系和哥氏定理 ..... | 37 |
| 2.1 运动 .....            | 37 |
| 2.2 任意的参考坐标系 .....      | 38 |
| 2.3 特殊的参考坐标系 .....      | 40 |
| 2.4 哥里奥利现象 .....        | 41 |
| 2.5 常规的导航坐标系 .....      | 44 |
| 例题 .....                | 46 |
| 习题 .....                | 48 |
| 第三章 力学定律 .....          | 51 |
| 3.1 牛顿定律 .....          | 51 |
| 3.2 力学基础 .....          | 52 |
| 3.3 质点系质量中心的运动 .....    | 55 |
| 3.4 线加速度表的性能 .....      | 57 |

|                    |             |            |
|--------------------|-------------|------------|
| 3.5                | 质点系的旋转运动    | 59         |
| 3.6                | 刚体的角动量      | 62         |
| 3.7                | 欧拉方程式       | 63         |
| 3.8                | 刚体无力矩运动的稳定性 | 64         |
| 3.9                | 波因素图形       | 67         |
|                    | 参考文献        | 71         |
|                    | 例题          | 71         |
|                    | 习题          | 74         |
| <b>第四章 陀螺模型</b>    |             | <b>77</b>  |
| 4.1                | 术语          | 77         |
| 4.2                | 假设          | 78         |
| 4.3                | 陀螺组合件       | 79         |
| 4.4                | 陀螺组合件的运动方程  | 80         |
| 4.5                | 陀螺自转驱动动力学   | 83         |
|                    | 参考文献        | 86         |
|                    | 例题          | 86         |
|                    | 习题          | 88         |
| <b>第五章 二自由度陀螺仪</b> |             | <b>90</b>  |
| 5.1                | 重力陀螺        | 90         |
| 5.2                | 章动阻尼        | 93         |
| 5.3                | 指令角速度       | 97         |
| 5.4                | 二自由度陀螺的特性方程 | 98         |
|                    | 参考文献        | 100        |
|                    | 例题          | 101        |
|                    | 习题          | 102        |
| <b>第六章 单自由度陀螺仪</b> |             | <b>104</b> |
| 6.1                | 单自由度陀螺的性能方程 | 104        |
| 6.2                | 速率陀螺        | 108        |
| 6.3                | 积分陀螺        | 109        |
| 6.4                | 非约束单自由度陀螺   | 110        |
| 6.5                | 阻尼陀螺的强迫频率响应 | 112        |
| 6.6                | 工程方面        | 114        |
| 6.7                | 单自由度加速度表    | 118        |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 参考文献 .....              | 119        |
| 例题 .....                | 119        |
| 习题 .....                | 121        |
| <b>第七章 飞机姿态指示 .....</b> | <b>123</b> |
| 7.1 飞机与驾驶的结合 .....      | 123        |
| 7.2 转弯倾斜指示器 .....       | 124        |
| 7.3 陀螺垂直仪 .....         | 126        |
| 7.4 陀螺摆 .....           | 129        |
| 7.5 人工地平仪 .....         | 130        |
| 参考文献 .....              | 135        |
| 例题 .....                | 135        |
| 习题 .....                | 141        |
| <b>第八章 陀螺方向仪 .....</b>  | <b>143</b> |
| 8.1 方向基准 .....          | 143        |
| 8.2 磁罗盘 .....           | 144        |
| 8.3 水平陀螺 .....          | 146        |
| 8.4 转弯误差 .....          | 148        |
| 8.5 速度罗盘 .....          | 149        |
| 8.6 显示 .....            | 151        |
| 例题 .....                | 153        |
| 习题 .....                | 157        |
| <b>第九章 空间积分器 .....</b>  | <b>158</b> |
| 9.1 单轴空间积分器 .....       | 159        |
| 9.2 齿轮系 .....           | 160        |
| 9.3 被控部件 .....          | 162        |
| 9.4 陀螺 .....            | 163        |
| 9.5 放大器、马达和阻尼器 .....    | 163        |
| 9.6 单轴情况下的结论 .....      | 163        |
| 9.7 三轴空间积分器 .....       | 165        |
| 9.8 常平架转换 .....         | 168        |
| 9.9 陀螺组件 .....          | 173        |
| 9.10 力矩计算矩阵 .....       | 174        |
| 9.11 三轴分析的结论 .....      | 174        |

|             |                              |            |
|-------------|------------------------------|------------|
| 9.12        | 锥效应 .....                    | 176        |
| 9.13        | 四常平架系统 .....                 | 178        |
| 9.14        | 无常平架系统 .....                 | 180        |
|             | 参考文献 .....                   | 181        |
|             | 例题 .....                     | 181        |
|             | 习题 .....                     | 183        |
| <b>第十章</b>  | <b>陀螺罗经 .....</b>            | <b>188</b> |
| 10.1        | 历史背景 .....                   | 188        |
| 10.2        | 工作原理 .....                   | 189        |
| 10.3        | 动态的研究 .....                  | 191        |
| 10.4        | 无阻尼陀螺罗经 .....                | 192        |
| 10.5        | 安休茨系统 .....                  | 197        |
| 10.6        | 斯派雷系统 .....                  | 200        |
| 10.7        | 采用单自由度陀螺的陀螺罗经 .....          | 203        |
| 10.8        | 静基座罗经状态 .....                | 206        |
|             | 参考文献 .....                   | 208        |
|             | 例题 .....                     | 209        |
|             | 习题 .....                     | 211        |
| <b>第十一章</b> | <b>垂线: 垂线指示系统与舒拉调谐 .....</b> | <b>213</b> |
| 11.1        | 地球形状 .....                   | 213        |
| 11.2        | 有关垂线的一些定义 .....              | 214        |
| 11.3        | 用作垂线指示器的摆 .....              | 217        |
| 11.4        | 垂线指示系统 .....                 | 218        |
| 11.5        | 外部速度阻尼 .....                 | 224        |
| 11.6        | 舒拉调谐 .....                   | 225        |
|             | 参考文献 .....                   | 227        |
|             | 例题 .....                     | 227        |
|             | 习题 .....                     | 230        |
| <b>第十二章</b> | <b>惯性导航 .....</b>            | <b>232</b> |
| 12.1        | 惯性导航的基本原理 .....              | 232        |
| 12.2        | 惯性导航系统的分类 .....              | 233        |
| 12.3        | 几何式系统 .....                  | 233        |
| 12.4        | 半解析式系统 .....                 | 235        |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 12.5 自由方位系统 ..... | 240 |
| 12.6 解析式系统 .....  | 241 |
| 12.7 初始校整 .....   | 244 |
| 参考文献 .....        | 245 |
| 例题 .....          | 245 |
| 习题 .....          | 246 |

## 第二部分 设计与试验技术

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第十三章 陀螺仪设计的一般问题 .....                 | 249 |
| 13.1 概述——陀螺仪设计的主要基础 .....             | 249 |
| 13.1.1 陀螺仪的功用 .....                   | 249 |
| 13.1.2 理想陀螺仪 .....                    | 251 |
| 13.1.3 实际陀螺仪 .....                    | 251 |
| 13.1.4 理论和设计的关系 .....                 | 252 |
| 13.1.5 单自由度陀螺仪作用原理图解 .....            | 255 |
| 13.1.6 二自由度陀螺仪作用原理 .....              | 260 |
| 13.1.7 设计员的任务 .....                   | 266 |
| 13.2 陀螺仪设计的若干意见 .....                 | 269 |
| 13.2.1 回顾与展望 .....                    | 269 |
| 13.2.2 经验的价值 .....                    | 270 |
| 13.2.3 清理设计 .....                     | 270 |
| 13.2.4 人和“效率”的问题 .....                | 271 |
| 13.2.5 资料与经验 .....                    | 271 |
| 13.2.6 关于提高 .....                     | 271 |
| 13.2.7 可靠性、寿命和精度的设计指标 .....           | 272 |
| 13.3 原理的物理实现 .....                    | 273 |
| 13.3.1 角动量( $H$ ) .....               | 273 |
| 13.3.2 信号传感器 .....                    | 276 |
| 13.3.3 力矩发生器 .....                    | 278 |
| 13.3.4 阻尼和浮动 .....                    | 280 |
| 13.4 陀螺模型方程(有微动同步器的单自由度浮子积分陀螺仪) ..... | 281 |
| 13.4.1 简化假设 .....                     | 282 |
| 13.4.2 陀螺力矩综合方程表示法 .....              | 282 |
| 13.4.3 陀螺动态模型方程 .....                 | 285 |
| 13.4.4 用于设计的陀螺动态模型方程的说明——性能的变化 .....  | 287 |

|                    |                      |            |
|--------------------|----------------------|------------|
| 13.4.5             | 不定性误差                | 289        |
| 13.5               | 实际问题                 | 291        |
| 13.5.1             | 清洁                   | 291        |
| 13.5.2             | 摩擦                   | 293        |
| 13.5.3             | 材料的特性                | 294        |
| 13.5.4             | 机械加工实践               | 294        |
| 13.5.5             | 公差                   | 296        |
| 13.5.6             | 浮液的适应性               | 296        |
|                    | 参考文献                 | 297        |
| <b>第十四章 陀螺仪的设计</b> |                      | <b>298</b> |
| 14.1               | 概述                   | 298        |
| 14.1.1             | 探讨的范围                | 298        |
| 14.1.2             | 工作与性能指标和环境要求的关系      | 300        |
| 14.1.3             | 陀螺-力矩-稳定性要求的分析       | 302        |
| 14.1.4             | 设计组                  | 303        |
| 14.1.5             | 工程布局                 | 304        |
| 14.1.6             | 总体尺寸                 | 304        |
| 14.1.7             | 材料性能的相互作用            | 307        |
| 14.1.8             | 组合件的采用               | 308        |
| 14.1.9             | 清洁                   | 309        |
| 14.1.10            | 由外向里进行设计             | 310        |
| 14.2               | 陀螺设计改进的演变            | 312        |
| 14.2.1             | 输出轴轴承                | 312        |
| 14.2.2             | 自转轴轴承                | 313        |
| 14.2.3             | 结构材料                 | 313        |
| 14.2.4             | 密封                   | 314        |
| 14.2.5             | 线圈                   | 316        |
| 14.2.6             | 结构的类型                | 316        |
| 14.2.7             | 未来的陀螺                | 316        |
| 14.3               | 具体的设计范围              | 317        |
| 14.3.1             | 转子轴承(自转轴轴承)——非弹性和依从性 | 318        |
| 14.3.2             | 陀螺转子、轴承和马达部件         | 336        |
| 14.3.3             | 框架和浮子结构              | 345        |
| 14.3.4             | 浮子和壳体之间的空间           | 351        |
| 14.3.5             | 壳体                   | 356        |
| 14.3.6             | 热量控制                 | 364        |
| 14.3.7             | 磁屏蔽                  | 365        |
| 14.3.8             | 安装配合面                | 366        |
| 14.4               | 工具和夹具                | 367        |

|   |            |
|---|------------|
| 14.5 清洁和超净工作室 .....                               | 367        |
| 参考文献 .....  | 369        |
| <b>第十五章 陀螺仪的试验 .....</b>                          | <b>370</b> |
| 15.1 陀螺试验的目的 .....                                | 370        |
| 15.2 试验的经济性 .....                                 | 372        |
| 15.3 陀螺性能、陀螺误差和不定性误差的单位 .....                     | 373        |
| 15.4 开环试验 .....                                   | 373        |
| 15.5 闭环试验 .....                                   | 374        |
| 15.5.1 伺服回路 .....                                 | 376        |
| 15.5.2 速率反馈或力矩-约束回路 .....                         | 386        |
| 15.6 伺服试验的力矩综合方程——性能说明 .....                      | 391        |
| 15.7 力矩-约束回路试验 <sup>[5]</sup> 的力矩综合方程——性能说明 ..... | 402        |
| 15.8 环境试验——振动 .....                               | 406        |
| 15.9 环境试验——离心试验 <sup>[5]</sup> .....              | 413        |
| 15.9.1 离心试验的弊病 .....                              | 420        |
| 15.10 用比力表示的陀螺力矩系数 .....                          | 420        |
| 参考文献 .....  | 421        |
| <b>附录：座标变换 .....</b>                              | <b>422</b> |
| 附录一 方向余弦 .....                                    | 422        |
| 附录二 欧拉角 .....                                     | 423        |
| 附录三 矢量角度 .....                                    | 426        |
| 附录四 哥氏定理 .....                                    | 427        |
| 附录五 从角速度到角方位的变换 .....                             | 429        |
| 附录六 哥氏定理的矩阵形式 .....                               | 430        |
| 附录七 结束语 .....                                     | 430        |
| 参考文献 .....  | 431        |

# 陀螺仪理论、设计 及试验技术

[美] 瓦尔特·里格利、瓦尔特·M·霍利斯特、  
威廉·G·登哈德 著  
余德星、李克孝、沈正华、刘玉峰 等译  
李克孝、沈正华、许心钰 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书专门介绍陀螺仪的原理、设计和试验技术。全书包括两大部分共分十五章；第一章至第十二章为原理部分；第十三章至第十五章为设计与试验技术部分。书中以浮子式陀螺仪为介绍重点，对新型的陀螺仪，如磁悬浮、静电悬浮、超导陀螺等也作了介绍。本书是美国麻省理工学院陀螺研究室理论及工程研究的总结，基本上反映了60年代末美国浮子陀螺的水平。书中采用的方法、符号、脚注都是该学院习惯用的。前十二章中每章最后有例题及习题，可供读者进行练习之用。

本书可供从事陀螺仪及惯性导航系统工作的工程技术人员参考，也可作为高等院校陀螺及导航专业的教学参考书。

Gyroscopic Theory, Design, and Instrumentation  
Walter Wrigley, Walter M. Hollister, and William G. Denhard  
The M.I.T. Press

### 陀螺仪理论、设计及试验技术

〔美〕 瓦尔特·里格利、瓦尔特·M·霍利斯特、威廉·G·登哈德 著  
余德星、李克孝、沈正华、刘玉峰 等译  
李克孝、沈正华、许心钰 校

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 各地新华书店经售  
国防工业出版社印刷厂印装

850 × 1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 13<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 341千字

1978年2月第一版 1978年2月第一次印刷 印数：0,001—4,900册

统一书号：15034·1610 定价：1.70元

## 出版说明

遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，为适应我国科学技术发展的需要，我们组织翻译出版了《陀螺仪理论、设计及试验技术》一书，供有关的工程技术人员及高等院校的师生参考。

本书在美国由马萨诸塞理工学院出版，它是该学院航空与宇宙航行系仪表实验室二十五年的经验总结，该实验室研制浮子式陀螺仪较早，美国最初的浮子陀螺仪有相当部分是该实验室研制并转成批生产的。该实验室在研究浮子陀螺仪的工作中形成了整套的工程分析方法，并在理论的工程实现方面具有一定的经验，本书在一定程度上反映了该实验室的研制水平。该实验室从事研制工作的有专职研究人员，教员以及学生，所以该书也部分的反映了该学院陀螺与导航专业的教学内容，可供我国工程技术人员及院校师生参考。

本书包括两大部分共分十五章。第一部分包括第一至第十二章为理论及原理部分，第二部分包括第十三至第十五章为设计及试验技术部分。第一部分的前四章是理论基础，包括了力学定律，运动学基础，座标系等基本概念以及为后面分析用的陀螺模型方程式。第一部分的后八章介绍各种陀螺仪的原理包括二自由度陀螺、单自由度陀螺、飞机姿态指示、陀螺方向仪表、空间积分器、陀螺罗经、垂线指示系统、惯性导航等。本书的分析方法是麻省理工学院仪表实验室所习惯用的，脚注及上下角注较烦琐，但基本概念较清楚而严格，希读者在阅读中加以鉴别。设计及试验技术部分注重工程设计，对从事陀螺及导航系统的研究人员有一定的参考价值。

本书在设计与试验技术部分的某些内容反映了作者的资本主义观点之处，希读者加以批判吸收。

本书不但对从事飞机、导弹、舰艇等的导航、稳定系统的工程技术人员有所裨益，对从事教学的各大专院校师生也具有一定的参考价值。

由于我们水平有限，加之参加翻译工作的人员较多，其缺点错误可能不少，欢迎广大读者批评指正。

参加本书翻译工作的还有夏延、冯德星、肖正山、王大根、毛永泉、金振兴、邹金水等同志。

# 目 录

## 第一部分 理 论

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....            | 13 |
| 1.1 定义 .....            | 13 |
| 1.2 陀螺模型 .....          | 15 |
| 1.3 二自由度陀螺仪 .....       | 17 |
| 1.4 单自由度陀螺仪 .....       | 18 |
| 1.5 姿态仪表 .....          | 20 |
| 1.6 陀螺罗盘 .....          | 22 |
| 1.7 惯性导航 .....          | 24 |
| 1.8 陀螺技术 .....          | 25 |
| 1.9 矢量、矩阵和记号 .....      | 29 |
| 参考文献 .....              | 32 |
| 例题 .....                | 33 |
| 习题 .....                | 35 |
| 第二章 运动、参考坐标系和哥氏定理 ..... | 37 |
| 2.1 运动 .....            | 37 |
| 2.2 任意的参考坐标系 .....      | 38 |
| 2.3 特殊的参考坐标系 .....      | 40 |
| 2.4 哥里奥利现象 .....        | 41 |
| 2.5 常规的导航坐标系 .....      | 44 |
| 例题 .....                | 46 |
| 习题 .....                | 48 |
| 第三章 力学定律 .....          | 51 |
| 3.1 牛顿定律 .....          | 51 |
| 3.2 力学基础 .....          | 52 |
| 3.3 质点系质量中心的运动 .....    | 55 |
| 3.4 线加速度表的性能 .....      | 57 |