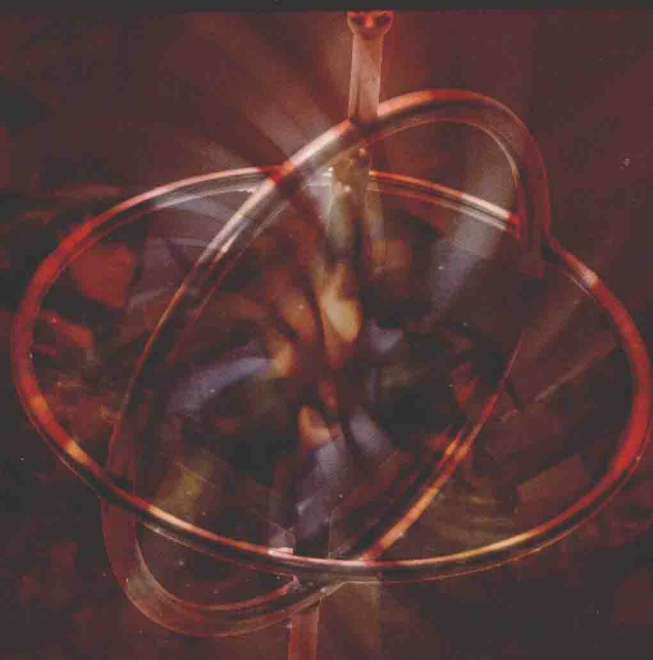




张福学 张伟 著

# 无驱动结构 微机械陀螺及其应用



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金

# 无驱动结构微机械陀螺 及其应用

---

张福学 张伟 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

## 内 容 简 介

本书全面系统地介绍了无驱动结构机械陀螺和无驱动结构微机械陀螺的原理、结构、性能及其应用。

全书共分四篇,第1篇共5章,主要介绍无驱动结构机械陀螺的数学模型、精度、性能、运行误差和实验研究。第2篇共5章,主要介绍旋转飞行载体用无驱动结构微机械陀螺的工作原理、误差、相移和性能实验。第3篇共6章,主要介绍微电子机械系统的电子材料及其加工处理、MEMS用材料及其制备、标准微电子工艺、硅体的微机械加工、硅的表面微机械加工和MEMS的微立体平版光刻技术。第4篇共2章,主要介绍无驱动结构微机械陀螺在旋转飞行载体姿态控制系统中的应用。

本书可供旋转飞行载体用惯性器件和自动控制系统研制、使用单位的有关科技人员阅读,也可作为高等院校有关专业的本科生、研究生和教师的教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

无驱动结构微机械陀螺及其应用 / 张福学, 张伟著.  
—北京: 国防工业出版社, 2013. 12  
ISBN 978 - 7 - 118 - 08905 - 9

I. ①无… II. ①张… ②张… III. ①微机械陀螺仪  
IV. ①U666. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 013577 号

## 无驱动结构微机械陀螺及其应用

著 者 张福学 张伟

责任编辑 陈洁

出版发行 国防工业出版社(010 - 88540717 010 - 88540777)

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号, 邮政编码 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京奥鑫印刷厂印刷

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 27.5

印 数 1—2500 册

字 数 628 千字

定 价 119.00 元

版 印 次 2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

---

本书涉及的研究成果得到国家自然科学基金和北京自然科学基金的资助。

## 前 言

陀螺按工作原理可分为机电陀螺和光学陀螺,机电陀螺如滚珠轴承陀螺、液浮陀螺、气浮陀螺、挠性陀螺、静电陀螺、压电陀螺和微机械陀螺,光学陀螺如激光陀螺和光纤陀螺。目前发展最快的是微机械陀螺和光纤陀螺。

微机械陀螺按其结构原理可分为有驱动结构和无驱动结构两类,前者美、日等发达国家和我国均已相继研制成功并投入使用,后者国内外至今未见专利、文献报道。无驱动结构微机械陀螺的出现,使陀螺由有驱动结构的一类,扩展为不同用途的有驱动结构和无驱动结构两类。

无驱动结构微机械陀螺结构简单、成本低、可靠性高,其最大特点是它能同时敏感旋转飞行载体横向角速度和滚动角速度,即具有两个有驱动结构微机械陀螺的功能,大大降低了使用成本。历经十几年的研制,无驱动结构微机械陀螺在我国研制成功并用于旋转体。无驱动结构微机械陀螺相关技术已授权中国、美国、英国、法国、德国发明专利 29 项,获省部级技术发明一等奖 1 项和二等奖 3 项,在国内外学术刊物和学术会议上发表论文 123 篇。本书较详细地介绍了该陀螺及其应用。

在本书撰写过程中,航天科技集团公司王家光教授多次认真审阅修改了全书,李耀宗教授提供了与第 1 篇相关的外文资料译稿。严庆文、王宏伟、毛旭、吴立锋、刘宇、赵辉、张增平、王凌等博士研究生,张楠、徐晓松、孙成祥、徐鸿卓、刘海林、文江川、叶青、岳冠南、明亮、江世宇、王领、赵启风、谈林霞、秦胜杰、于小龙、单言丰、郭亨、万品君、孟东、高幸、马弢、高银娟、张宁、刘晓敏、徐红薇、乔瑾、赵海肖等硕士研究生参与了无驱动结构微机械陀螺及其应用的研制或书稿审校,书中包括了他们的劳动成果。在此向他们表示深深的感谢!

无驱动结构微机械陀螺及其应用的诸多技术问题有待充实完善,书中不妥之处,诚望读者提出宝贵意见。

张福学 张伟

2013 年 10 月 12 日

# 目录 Contents

无驱动结构微机械陀螺及其应用

## 第一篇 无驱动结构机械陀螺

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第1章 无驱动结构机械陀螺的数学模型        | 4  |
| 1.1 飞行中飞行器的特征             | 4  |
| 1.2 无驱动结构机械陀螺敏感元件的运动方程式   | 8  |
| 1.3 飞行器以常值角速度旋转时陀螺的性能     | 13 |
| 1.4 无驱动结构机械陀螺系统方案的选择      | 15 |
| 1.5 已知等级仪器的调节质量           | 20 |
| 1.6 带有速度负反馈的无驱动结构机械陀螺的稳定性 | 26 |
| 1.7 无驱动结构机械陀螺的技术性能        | 39 |
| 第2章 带速度负反馈的无驱动结构机械陀螺的精度   | 41 |
| 2.1 绕横轴转动的常值角速度测量精度       | 41 |
| 2.2 无驱动结构机械陀螺的调节质量        | 55 |
| 第3章 在交变角速度条件下无驱动结构机械陀螺的性能 | 59 |
| 3.1 在角振动条件下无驱动结构机械陀螺的性能   | 59 |
| 3.2 在角振动条件下无驱动结构机械陀螺的输出信号 | 69 |
| 3.3 飞行器的谐波角速度测量精度         | 73 |
| 3.4 在圆周振动时无驱动结构机械陀螺的性能    | 91 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第4章 无驱动结构机械陀螺的工具性和运行性误差</b>  | <b>97</b>  |
| 4.1 框架静不平衡引起的误差                 | 97         |
| 4.2 角振动和圆周振动引起的误差               | 99         |
| 4.3 安装不精确产生的误差                  | 101        |
| 4.4 环境温度变化产生的误差                 | 102        |
| <b>第5章 无驱动结构机械陀螺实验研究</b>        | <b>106</b> |
| 5.1 带速度负反馈的无驱动结构机械陀螺技术说明        | 107        |
| 5.2 无驱动结构机械陀螺的参数和反馈参数计算         | 108        |
| 5.3 高精度三轴转台                     | 116        |
| 5.4 带温箱的双轴转台                    | 118        |
| 5.5 频率特性拾取的特殊性                  | 119        |
| 5.6 实验结果                        | 121        |
| 5.6.1 工作能力的测量法和测量结果             | 122        |
| 5.6.2 零偏信号的测量方法和结果              | 123        |
| 5.6.3 阈值的测量方法和结果                | 123        |
| 5.6.4 输出特性的测量方法和结果              | 123        |
| 5.6.5 输出信号稳定性的测量方法和结果           | 128        |
| 5.6.6 频率特性采集的方法和结果              | 129        |
| 5.6.7 安装不精确影响测量方法和结果            | 131        |
| 5.6.8 带自身旋转倍频的角振动输出信号影响的测量方法和结果 | 133        |

## 第二篇 无驱动结构微机械陀螺

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>第6章 微机械加速度计和微机械陀螺</b>   | <b>136</b> |
| 6.1 微机械加速度计                | 136        |
| 6.1.1 微机械加速度计的基本原理、工艺类型和应用 | 136        |
| 6.1.2 微机械加速度计的工作原理         | 138        |
| 6.1.3 用体微细加工工艺制造的微机械加速度计   | 139        |
| 6.1.4 用表面微细加工工艺制造的微机械加速度计  | 141        |
| 6.1.5 力反馈                  | 144        |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 6.1.6 | 谐振微机械加速度计                | 146 |
| 6.2   | 微机械陀螺                    | 147 |
| 6.2.1 | 微机械陀螺的结构基础               | 147 |
| 6.2.2 | 微机械陀螺的基本原理               | 148 |
| 6.2.3 | 频率带宽                     | 150 |
| 6.2.4 | 热机械噪声                    | 152 |
| 6.2.5 | 微机械陀螺的类型                 | 153 |
| 第7章   | 无驱动结构微机械陀螺的工作原理          | 158 |
| 7.1   | 结构原理                     | 158 |
| 7.2   | 动力学模型                    | 159 |
| 7.2.1 | 质量振动方程                   | 159 |
| 7.2.2 | 角振动方程的解                  | 162 |
| 7.3   | 动力学参数分析计算                | 163 |
| 7.3.1 | 弹性支撑梁扭转刚度                | 163 |
| 7.3.2 | 弹性接头参数计算                 | 164 |
| 7.3.3 | 振动元件角振动阻尼系数              | 166 |
| 7.3.4 | 陀螺角振动固有频率、角振动幅度与被测角速度的关系 | 167 |
| 7.4   | 信号检测                     | 168 |
| 7.4.1 | 输出电压与摆角的关系               | 168 |
| 7.4.2 | 信号处理电路                   | 170 |
| 7.5   | ANSYS 仿真与模拟              | 174 |
| 7.5.1 | 模态分析                     | 174 |
| 7.5.2 | 频响分析                     | 174 |
| 第8章   | 无驱动结构微机械陀螺的误差            | 176 |
| 8.1   | 振动陀螺运动方程                 | 176 |
| 8.2   | 振动陀螺的误差原理                | 183 |
| 8.3   | 无驱动结构微机械陀螺误差计算           | 187 |
| 8.4   | 无驱动结构微机械陀螺的误差            | 189 |
| 第9章   | 无驱动结构微机械陀螺相移             | 191 |
| 9.1   | 无驱动结构微机械陀螺相移的计算          | 191 |
| 9.2   | 无驱动结构微机械陀螺的相移            | 194 |

|             |                          |            |
|-------------|--------------------------|------------|
| 9.3         | 通过调整位置来补偿输出信号相移的可行性      | 195        |
| 9.4         | 无驱动结构微机械陀螺在角振动台上特性的计算    | 199        |
| <b>第10章</b> | <b>无驱动结构微机械陀螺的静态性能实验</b> | <b>202</b> |
| 10.1        | 无驱动结构微机械陀螺样机的性能          | 202        |
| 10.1.1      | 样机的温度性能                  | 202        |
| 10.1.2      | 样机的性能                    | 204        |
| 10.1.3      | 样机温度稳定性                  | 205        |
| 10.2        | CJS-DR-WB01型硅微机械陀螺性能     | 207        |
| 10.3        | CJS-DR-WB02型硅微机械陀螺性能     | 208        |
| 10.4        | CJS-DR-WB03型硅微机械陀螺的性能测试  | 209        |

### 第三篇 无驱动结构微机械陀螺的微机械加工技术

|             |                    |            |
|-------------|--------------------|------------|
| <b>第11章</b> | <b>电子材料及其加工处理</b>  | <b>223</b> |
| 11.1        | 电子材料的生成            | 223        |
| 11.1.1      | 热氧化形成的氧化物层         | 224        |
| 11.1.2      | 二氧化硅和氮化硅的沉积生长      | 225        |
| 11.1.3      | 多晶硅薄膜的沉积           | 227        |
| 11.2        | 图形转移               | 228        |
| 11.2.1      | 光刻工艺               | 228        |
| 11.2.2      | 掩模的制备              | 229        |
| 11.2.3      | 光致抗蚀剂              | 230        |
| 11.2.4      | 去胶工艺               | 232        |
| 11.3        | 电子材料的刻蚀            | 232        |
| 11.3.1      | 湿法刻蚀               | 232        |
| 11.3.2      | 干法刻蚀               | 233        |
| 11.4        | 掺杂半导体              | 235        |
| 11.4.1      | 扩散                 | 238        |
| 11.4.2      | 离子注入               | 239        |
| <b>第12章</b> | <b>MEMS用材料及其制备</b> | <b>241</b> |
| 12.1        | 原子、原子间结合和晶体的概述     | 241        |
| 12.1.1      | 原子结构和周期表           | 241        |

|                       |                |            |
|-----------------------|----------------|------------|
| 12.1.2                | 原子键合           | 245        |
| 12.1.3                | 晶体             | 248        |
| 12.2                  | 金属             | 251        |
| 12.2.1                | 金属的物理和化学性质     | 251        |
| 12.2.2                | 金属化            | 252        |
| 12.3                  | 半导体            | 253        |
| 12.3.1                | 半导体的电学和化学性质    | 253        |
| 12.3.2                | 半导体的生长和沉积      | 255        |
| 12.4                  | 陶瓷、聚合物和合成材料    | 257        |
| <b>第 13 章 标准微电子工艺</b> |                | <b>259</b> |
| 13.1                  | 微细加工技术概述       | 259        |
| 13.2                  | 硅晶圆片的制备        | 260        |
| 13.2.1                | 晶体生长           | 260        |
| 13.2.2                | 晶圆制备           | 262        |
| 13.2.3                | 外延沉积           | 262        |
| 13.3                  | 单片电路工艺         | 265        |
| 13.3.1                | 双极工艺           | 267        |
| 13.3.2                | BJT 的特性        | 273        |
| 13.3.3                | MOS 工艺         | 280        |
| 13.3.4                | FET 的特性        | 283        |
| 13.3.5                | SOI 的 CMOS 工艺  | 286        |
| 13.4                  | 单片电路的封装        | 287        |
| 13.4.1                | 管芯焊接和引线焊接      | 288        |
| 13.4.2                | 带式自动焊接         | 289        |
| 13.4.3                | 倒装式 TAB 封装     | 289        |
| 13.4.4                | 倒装芯片封装         | 289        |
| 13.5                  | 印制电路板工艺        | 290        |
| 13.5.1                | 刚性印制电路板        | 290        |
| 13.5.2                | 挠性印制电路板        | 291        |
| 13.5.3                | 塑封模块           | 293        |
| 13.6                  | 混合电路和 MCM 工艺技术 | 293        |
| 13.6.1                | 厚膜             | 293        |
| 13.6.2                | 多芯片模块          | 294        |
| 13.6.3                | 球形栅格阵列         | 297        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 13.7 可编程器件和 ASIC             | 297        |
| <b>第 14 章 体微机械加工</b>         | <b>301</b> |
| 14.1 各向同性和各向异性湿法刻蚀           | 302        |
| 14.2 自停刻蚀技术                  | 306        |
| 14.2.1 掺杂选择性刻蚀               | 306        |
| 14.2.2 常规偏压控制 BSE 或电化学自停刻蚀技术 | 308        |
| 14.2.3 n 型硅的脉冲电压阳极化选择性刻蚀     | 311        |
| 14.2.4 光电效应电化学刻蚀自停技术         | 311        |
| 14.3 干法刻蚀                    | 313        |
| 14.4 埋层氧化物工艺                 | 316        |
| 14.5 硅熔融键合                   | 316        |
| 14.5.1 晶圆的熔融键合               | 316        |
| 14.5.2 退火处理                  | 317        |
| 14.5.3 硅基材料的熔融键合             | 317        |
| 14.6 阳极键合                    | 318        |
| <b>第 15 章 表面微机械加工</b>        | <b>321</b> |
| 15.1 牺牲层技术                   | 321        |
| 15.1.1 单一工艺                  | 322        |
| 15.1.2 制作多结构层的牺牲层工艺          | 325        |
| 15.2 牺牲层工艺的材料组合              | 327        |
| 15.2.1 多晶硅和二氧化硅              | 327        |
| 15.2.2 聚酰亚胺和铝                | 328        |
| 15.2.3 氮化硅和多晶硅、钨和二氧化硅        | 328        |
| 15.3 等离子体刻蚀表面微机械加工技术         | 329        |
| 15.3.1 中心销轴承侧驱动微电机           | 329        |
| 15.3.2 间隙电梳驱动谐振执行器           | 330        |
| 15.4 IC 工艺和湿法各向异性刻蚀技术的结合     | 331        |
| 15.5 组合应用体和表面微机械加工技术的工艺      | 333        |
| 15.5.1 微喷嘴                   | 334        |
| 15.5.2 伸臂式微夹具                | 335        |
| 15.6 表面微机械加工技术的粘连问题          | 336        |
| 15.7 表面和体微机械加工技术间的比较         | 337        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>第 16 章 MEMS 的微立体平版光刻技术</b> | <b>339</b> |
| 16.1 光致聚合作用与光刻技术              | 339        |
| 16.1.1 光致聚合作用                 | 340        |
| 16.1.2 立体平版光刻系统               | 342        |
| 16.2 微立体平版光刻技术                | 343        |
| 16.3 扫描法                      | 344        |
| 16.3.1 典型的 MSL                | 344        |
| 16.3.2 IH 工艺                  | 345        |
| 16.3.3 批量 IH 工艺               | 347        |
| 16.3.4 超级 IH 工艺               | 347        |
| 16.4 双光子 MSL                  | 349        |
| 16.5 其他 MSL 方法                | 350        |
| 16.6 投影法                      | 351        |
| 16.6.1 掩模投影 MSL               | 351        |
| 16.6.2 动态掩模投影 MSL             | 353        |
| 16.7 硅、金属、陶瓷构造的聚合体 MEMS       | 354        |
| 16.7.1 陶瓷 MSL                 | 354        |
| 16.7.2 金属微结构                  | 355        |
| 16.7.3 金属—聚合物微结构              | 358        |
| 16.7.4 定位电化学沉积                | 359        |
| 16.8 硅和聚合物组合的结构               | 361        |
| 16.8.1 光成形工艺的结构组合             | 361        |
| 16.8.2 MSL 和厚膜平版印制术的集成        | 363        |
| 16.8.3 AMANDA 工艺              | 363        |
| 16.9 应用例举                     | 365        |
| 16.9.1 MSL 制造的微执行器            | 365        |
| 16.9.2 微浓缩器                   | 367        |
| 16.9.3 AMANDA 工艺制作的微器械        | 368        |

#### 第四篇 无驱动结构微机械陀螺的应用

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>第 17 章 信号处理</b>           | <b>372</b> |
| 17.1 抑制旋转体滚动角速度变化对输出信号稳定性的影响 | 372        |
| 17.1.1 旋转体滚动角速度对输出信号的影响      | 372        |

|        |                             |     |
|--------|-----------------------------|-----|
| 17.1.2 | 抑制滚动角速度变化对输出信号影响的方法         | 373 |
| 17.1.3 | 抑制影响方法验证                    | 374 |
| 17.2   | 基于相位差的微机械陀螺姿态解调方法           | 377 |
| 17.2.1 | 陀螺输出信号和基准信号之间相位差的研究         | 377 |
| 17.2.2 | 影响相位差的因素                    | 383 |
| 17.2.3 | 相位差补偿方法                     | 387 |
| 17.3   | 基于微机械陀螺的旋转体姿态解调             | 389 |
| 17.3.1 | 解调算法                        | 389 |
| 17.3.2 | 仿真实验                        | 396 |
| 第 18 章 | 飞行姿态控制系统                    | 399 |
| 18.1   | 设计解算方法和编制软件                 | 399 |
| 18.1.1 | 解算方法和软件                     | 399 |
| 18.1.2 | 计算机设计软件                     | 400 |
| 18.2   | 三轴同时运动时牵连运动(角振动)的影响         | 402 |
| 18.3   | DSP 数字输出陀螺                  | 403 |
| 18.3.1 | 硬件电路设计                      | 403 |
| 18.3.2 | 算法及软件实现                     | 405 |
| 18.3.3 | 测试结果                        | 405 |
| 18.4   | 旋转飞行载体单通道控制姿态敏感系统           | 408 |
| 18.5   | 旋转飞行载体直角坐标变换三通道姿态敏感系统       | 410 |
| 18.6   | 旋转飞行载体极坐标变换姿态敏感系统           | 412 |
| 18.6.1 | 获取相对于旋转飞行载体坐标系的横向角速度的方法     | 413 |
| 18.6.2 | 获取相对于准旋转飞行载体坐标系的滚动角速度的方法    | 415 |
| 18.6.3 | 获取相对于准旋转飞行载体坐标系的偏航和俯仰角速度的方法 | 416 |
| 18.7   | 在非旋转飞行载体中的应用                | 416 |
| 参考文献   |                             | 418 |

# 第一篇

## 无驱动结构机械陀螺

无驱动结构机械陀螺的数学模型



带速度负反馈的无驱动结构机械陀螺的精度  
在交变角速度条件下无驱动结构机械陀螺的性能  
无驱动结构机械陀螺的工具性和运行性误差  
无驱动结构机械陀螺实验研究

如图 01-1 所示,陀螺可分为机电陀螺和光学陀螺两类,机电陀螺的工作原理是科里奥利力(Coriolis Force)效应,光学陀螺的工作原理是萨格奈克(Sagnac)效应。随着惯性导航和惯性制导技术不断发展,多种机电陀螺和光学陀螺相继研制成功并投入应用,如滚珠轴承陀螺、液浮陀螺、挠性陀螺、静电陀螺、压电陀螺、气流陀螺、微机械陀螺等机电陀螺,以及激光陀螺和光纤陀螺,其中发展最快的是光纤陀螺和微机械陀螺。



图 01-1 陀螺分类

如图 01-1 所示,机电陀螺分为有驱动结构陀螺和无驱动结构陀螺两类,前者国内外已有大量论著,后者报道较少,作者试图弥补。无驱动结构陀螺分为机械陀螺和微机械陀螺两类,本书第 1 篇论述无驱动结构机械陀螺,第 2~4 篇在第 1 篇基础上论述无驱动结构微机械陀螺的微机械加工、性能和应用。

无驱动结构陀螺主要用于旋转飞行载体单通道控制,它的敏感平面用于测量垂直于飞行器转动轴的角速度矢量。陀螺敏感元件角振动变换为交变电信号,其频率与敏感元件旋转的自身频率相对应,而其幅度和相位都带有角速度矢量的信息。

摆组件结构简单可靠,按固有旋转频率成正比地自动调谐的性能,能以最佳形式(交流电压形式)获取输出信号,因此,单通道角速度测量仪有广阔的应用前景。

因为在旋转状态下的飞行器中,使用无驱动结构陀螺代替旋转飞行载体飞行状态控制通道内产生阻尼的角速度传感器,实现了单通道角速度测量仪方案,从而大大缩小了仪器尺寸,显著简化了仪器的结构和制造工艺流程,所以在旋转状态下的飞行器上,有可能利用飞行器绕其纵轴的旋转速度,代替敏感元件旋转的固有频率,这就可以在仪器中免用产生频率的驱动装置。

供旋转状态飞行器使用的无驱动结构机械陀螺的运动力学图如图 01-2 所示。做成框架形式的敏感元件固定连接于仪器基座的轴承座中,而仪器基座又与旋转飞行载体壳体作硬性连接,从而使框架具有两个自由度。框架与基座和飞行器(旋转飞行载体)一起以角速度  $\dot{\phi}_0$  旋转,并能围绕仪器基座的轴承座中的  $OY_1$  轴转动。

与陀螺敏感元件旋转轴相垂直的平面  $OX_1Y_1$ ,是仪器的敏感平面或测量平面。飞行器的旋转运动产生仪器的输出信号,而旋转运动矢量就位于此平面内。例如,设飞行器以角速度  $\Omega$  旋转,其矢量位于  $OX_1Y_1$  平面内(图 01-3)。这时产生惯性力矩  $M_{\text{惯性}}$ ,  $M_{\text{惯性}}$  矢量也位于此平面  $OX_1Y_1$  内,而其方向却与矢量  $\Omega$  相互垂直。

$M_{\text{惯性}}$  在  $OX_1$  轴上的投影  $M_{\text{惯性},X_1}$ ,被轴承座内的反作用力矩所抵消,而当  $OY_1$  轴上有投影  $M_{\text{惯性},Y_1}$  时,框架就发生围绕  $OY_1$  轴转动。 $M_{\text{惯性},X_1}$  分量对敏感元件的运动没有影响,却对轴承座给予附加压力。因此,在利用弹性支承时,就必须保证绕测量轴的支承具有大

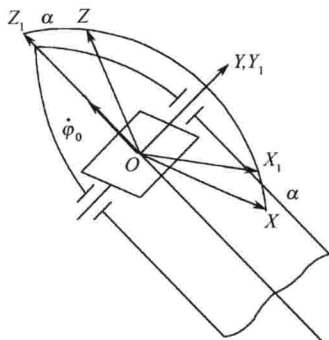


图 01-2 运动力学图

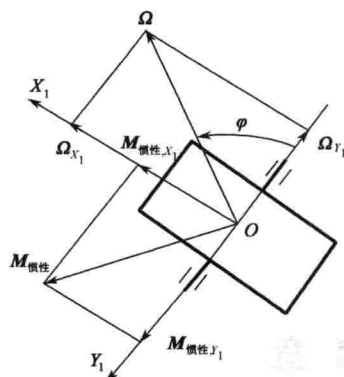


图 01-3 敏感元件产生振荡的示意图

的刚度。所以,框架与基座和旋转飞行载体一起按自旋角速度  $\dot{\varphi}_0$  旋转,力矩  $M_{\text{惯性}}$  在  $OY_1$  轴上的投影  $M_{\text{惯性}, Y_1}$  随频率  $\dot{\varphi}_0$  按谐波规律变化。换句话说,飞行器的旋转调制飞行器(旋转飞行载体)的常值角速度,该角速度对与旋转飞行载体坐标系相连的仪器框架产生的谐波,与被测量的旋转飞行载体角速度成正比。

这样一来,框架将同样以  $\dot{\varphi}_0$  转速的频率振荡,其振动幅度与被测量的角速度  $\Omega$  的大小成正比,而相位却由飞行器上舵机位置与仪器的测量轴位置之间的失调量的角度,以及仪器本身产生的一些相位移所决定。

来自仪器的信息传递给舵机,传递过程在与旋转飞行载体相连的坐标系中进行。因为飞行器绕自身的纵轴按  $\dot{\varphi}_0$  角速度旋转,其舵机也参与该旋转,考虑到飞行器这一旋转的调制性能,为补偿绝对空间中的常值角速度  $\Omega$ ,必须产生以  $\dot{\varphi}_0$  为频率的舵机谐波运动。仪器框架的振动也按此规律进行。因而,为了控制舵机,必须使用仪器所测量的瞬时角速度。仪器输出信号瞬时值和角速度矢量  $\Omega$  在轴  $OX_1$  上投影成正比,也就是与仪器的测量轴上的投影成正比,既由其幅度,又由其相位所决定。为了使仪器框架与旋转飞行载体舵机两者振荡相位重合,必须将仪器正确地安装在旋转飞行载体上。当仪器存在常值相位移,而在整个飞行过程中自身大小没有变化的情况下,则仪器安装到旋转飞行载体内时,采取仪器偏转一定角度的措施,即可起到补偿作用。

用于旋转状态飞行器的仪器,就是带有滑动轴承的单自由度框架的敏感元件,而框架的平面与飞行器构成的旋转轴互相垂直。为了提取信号,在仪器中使用了由永久磁铁和绕在敏感元件上的线圈构成的磁系统,线圈在恒定磁场中移动时,线圈中就产生电动势。电动势的振幅和相位与敏感元件振荡的振幅和相位相对应。同一个磁系统和敏感元件的骨架,有短路线匝,用来对仪器敏感元件振动产生电磁阻尼。

## 第 1 章

# 无驱动结构机械陀螺的数学模型

### 1.1 飞行中飞行器的特征

在详细研究各种不同飞行状态下旋转载体上的陀螺性能之前,必须研究该载体飞行的运动特性。

旋转状态飞行器用的无驱动结构机械陀螺就是角速度传感器。因此,在详细研究旋转状态飞行中的性能时,要研究限于围绕质心可能发生的运动。精确测定飞行器旋转状态飞行的运动参数不是本节的目的,以质心为参照的运动特性的定性研究才是我们的工作任务。

仪器原本专用于在绕纵轴旋转的自动导引旋转飞行载体的控制通道中产生阻尼力矩。旋转飞行载体绕其纵轴旋转的任务首先是保证其飞行稳定性,这种自身的旋转运动会降低一些围绕旋转飞行载体质心的转动力矩对旋转飞行载体运动特性的影响。例如,有些转动力矩由其壳体的加工工艺缺陷(旋转飞行载体发动机对于纵轴的倾斜弯曲)产生,这些缺陷在旋转飞行载体旋转中的平均作用,可使干扰力矩作用得以改善。

在自导引旋转飞行载体中没必要采用倾斜陀螺,因为其控制飞行过程是在与旋转飞行载体相连的坐标系中实现的,而且自导引的任务在任何一个倾角下都可以实现,即与倾角无关,无论倾角是恒定不变或者是随时间而变化的。因此,旋转飞行载体的自身旋转速度可在某个区间内变化(如 10 ~ 20Hz)而“无影响”。

为了确定飞行中旋转飞行载体以质心为参照的运动特性,列出旋转飞行载体绕纵轴旋转频率 10 ~ 20Hz 时,以质心为参照的旋转飞行载体运动方程。

仔细研究在倾斜力矩  $-M_{x_1}$  作用下,围绕纵轴旋转的旋转飞行载体相对于其质心的运动,如图 1-1 所示。

借助于第二类拉格朗日微分方程式,可得到以旋转飞行载体质心为参照的运动方程:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = Q_i \quad (1-1)$$

式中:  $E_k$  为旋转飞行载体旋转运动的动能;  $q_i$  为广义坐标;  $Q_i$  为广义力。