



航天科技图书出版基金资助出版

静压液浮陀螺螺平台系统

邓益元 编著



中国宇航出版社

静压液浮陀螺平台系统作为一种新型的惯性平台系统，具有精度高、体积小、技术先进、使用性能好等特点，相对于液浮陀螺平台系统、挠性陀螺平台系统、静压气浮陀螺平台系统而言，在许多方面有其独特的优势。本书全面、系统地介绍了静压液浮陀螺平台系统的组成、工作原理、设计思路、试验及使用方法等相关内容，层次清晰、系统性强、图文并茂，适用于相关专业的科技人员、管理人员及高等院校的学生使用。

ISBN 978-7-5159-0147-3



9 787515 901473 >

定价：108.00元

航天科技图书出版基金资助出版

静压液浮陀螺螺平台系统

邓益元 编著



中国宇航出版社

· 北京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

静压液浮陀螺平台系统 / 邓益元编著. — 北京 :
中国宇航出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0147 - 3

I. ①静… II. ①邓… III. ①航天器仪表 - 液体静压力
- 液浮陀螺仪 IV. ①V441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 273865 号

责任编辑 张艳艳 阎 列 责任校对 王 妍 封面设计 京鲁图文

出 版 社 中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 22.875 字 数 639 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0147 - 3

定 价 108.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

前 言

惯性技术是一门多学科的综合技术，也是一门前沿科学。作为导航与控制技术中的惯性测量部件，在航空、航天、航海及交通运输等领域，有着广泛的应用。

在惯性技术中，惯性平台作为主要技术门类之一，大多应用需要高精度的领域中。国内外普遍使用的惯性平台有液浮（含三浮）陀螺平台系统、静压气浮陀螺平台系统、挠性陀螺平台系统、浮球平台系统等。这些惯性平台各有长处，应用在不同的对象中。技术的复杂程度也不相同，浮球平台系统的技术最为复杂，其精度也最高。

静压液浮陀螺平台系统是一种新型的惯性平台，精度高，体积小，技术先进，使用性能好。

静压液浮陀螺平台系统相对于液浮陀螺平台系统来说，启动时间快，加温时间短，不需要复杂的磁悬浮技术；相对于挠性陀螺平台系统来说，过载能力大，精度高；相对于静压气浮陀螺平台系统来说，不需要外带气压源，仪表自动增压。静压液浮技术有阻尼，介于几乎无阻尼的静压气浮技术和大阻尼的液浮技术之间，这对平台系统的回路稳定性非常有好处。静压液浮技术可以部分继承静压气浮技术；相对于浮球平台系统来说，静压液浮陀螺平台系统技术简单、成熟，价格便宜。

本书将全面、系统地介绍静压液浮陀螺平台系统。为便于各方面的读者了解本书，在构成的方式上，本书采取了从总体到分系统，从分系统到仪表、元件的顺序，并将仪表、元件结合到分系统中来叙述；在叙述的方式上，采取了从系统组成、工作原理、设计思路，到试验方法、使用方法、问题理解的顺序；在内容上，不仅包括平

台系统总体、回路、仪表，还包括平台系统的自标定技术、测试技术，以及电磁兼容性技术、可靠性技术等，并介绍了实用误差模型。为了叙述方便，书中给出了一些例题和参数，这些参数和数据都是假定的，不是真实数据，这一点请读者见谅。

本书的读者对象为惯性技术专业人员、控制系统设计人员、静压液浮陀螺平台系统使用人员、技术管理人员，以及有关专业的研究生和高年级大学生，也可供具有同等学历的其他人员学习参考。

对于想要全面了解静压液浮陀螺平台系统的读者，建议对全书进行系统的阅读；对于只想了解大概的内容，或者只关心“使用”的人员，只需要阅读系统组成、工作原理、问题理解的有关章节，不必要学习系统分析、公式推导等内容。

本书是根据作者长期从事该项目研制的心得笔记、论文报告，参阅了大量的参考资料而写成的。虽然作者力图将本书写成内容全面、层次清晰、系统性强、理论分析清楚、图文并茂的著作，但限于作者的水平和能力，本书可能还未达到这些要求。错误和遗漏定然不少，诚恳希望专家和读者批评指正，作者不胜感激。

谨以本书献给为静压液浮陀螺平台系统的研制而辛勤工作的同事们！

作 者

2011年7月

目 录

第 1 章 绪 论	1
第 2 章 静压液浮陀螺平台系统的功能、组成及原理	3
2.1 静压液浮陀螺平台系统的功能综述	3
2.2 静压液浮陀螺平台系统的组成	6
2.3 静压液浮陀螺平台系统的工作原理	8
第 3 章 静压液浮陀螺平台系统的总体设计	11
3.1 平台框架系统	11
3.2 惯性仪表及元件的选取	14
3.3 平台上仪表安装取向的确定	17
3.4 静压液浮陀螺平台系统的布局设计	21
3.5 静压液浮陀螺平台系统的回路设置	22
3.6 平台电路箱	24
3.7 静压液浮陀螺平台系统信号流程的设计	25
3.8 静压液浮陀螺平台系统的极性设计	27
3.9 平台温控系统的设置	42
3.10 静压液浮陀螺平台结构的特点	46
3.11 静压液浮陀螺平台轴上干扰力矩的估算	48
3.12 静压液浮陀螺平台转动惯量的估算	50
3.13 静压液浮陀螺平台系统的频率设计	54
第 4 章 静压液浮陀螺平台系统的电源	58
4.1 静压液浮陀螺平台系统电源的设置	58
4.2 静压液浮陀螺平台系统电源箱的设计	60

4.3 平台电源箱的温控设计	66
4.4 平台电源箱的减振与结构特点	70
第5章 静压液浮技术	72
5.1 静压液浮轴承的工作原理	72
5.2 静压液浮轴承的设计	75
5.3 液体螺旋泵	83
5.4 液体螺旋泵的结构特点	89
5.5 浮油	91
第6章 柱形动压气浮轴承磁滞马达	93
6.1 磁滞马达的工作原理	93
6.2 交流同步磁滞马达的特性	95
6.3 柱形动压气浮轴承	100
6.4 柱形动压气浮轴承磁滞马达的性能	104
第7章 静压液浮单自由度积分陀螺仪	108
7.1 静压液浮单自由度积分陀螺仪的工作原理	108
7.2 静压液浮单自由度积分陀螺仪的特性	110
7.3 静压液浮单自由度积分陀螺仪的传感器和力矩器	111
7.4 静压液浮单自由度积分陀螺仪的运动方程	120
7.5 静压液浮单自由度积分陀螺仪的精度	122
7.6 静压液浮单自由度积分陀螺仪输出轴上的干扰力矩	127
7.7 静压液浮单自由度积分陀螺仪的实用漂移率误差模型	134
7.8 静压液浮单自由度积分陀螺仪漂移率误差系数的标定方法	135
7.9 静压液浮单自由度积分陀螺仪的可靠性	142
第8章 静压液浮陀螺加速度计	144
8.1 陀螺加速度计概述	144

8.2	静压液浮陀螺加速度计的工作原理	145
8.3	静压液浮陀螺加速度计的运动学方程	149
8.4	静压液浮陀螺加速度计的动力学方程	152
8.5	静压液浮陀螺加速度计伺服回路的特性	156
8.6	静压液浮陀螺加速度计伺服回路的传递函数	160
8.7	静压液浮陀螺加速度计伺服回路的稳态误差分析	165
8.8	静压液浮陀螺加速度计伺服回路的系统设计	167
8.9	静压液浮陀螺加速度计伺服回路的电路设计	170
8.10	永磁式直流力矩电机	177
8.11	无刷直流力矩电机及其伺服回路	183
8.12	变磁阻式角度传感器	193
8.13	静压液浮陀螺加速度计输出回路的工作原理	205
8.14	锁相倍频环路的工作原理	207
8.15	锁相倍频环路的系统设计	215
8.16	锁相倍频环路的系统分析	225
8.17	输出回路中的三相时钟电路和加减识别电路	227
8.18	静压液浮陀螺加速度计测角系统的误差分析	233
8.19	输出回路受到干扰时对输出脉冲影响的分析	236
8.20	静压液浮陀螺加速度计的误差模型	239
第9章	石英挠性摆式加速度计	242
9.1	视加速度与比力	242
9.2	石英挠性摆式加速度计的工作原理	244
9.3	石英挠性摆式加速度计的组成	247
9.4	石英挠性摆式加速度计的系统框图	258
9.5	石英挠性摆式加速度计的输出电路	259
9.6	石英挠性摆式加速度计的误差模型及误差分析	268
9.7	石英挠性摆式加速度计误差系数的标定方法	272

第 10 章 静压液浮陀螺平台姿态角测量系统	276
10.1 平台姿态角测量系统的组成及工作原理	276
10.2 双通道正、余弦旋转变压器	282
10.3 平台姿态角传感器的变换电路	287
10.4 平台姿态角传感器粗通道误差分析	291
10.5 平台姿态角传感器精通道误差分析	302
10.6 平台姿态角传感器的动态误差	307
10.7 减小波形畸变引起角度误差的方法	309
10.8 平台姿态角传感器的几个问题	312
第 11 章 静压液浮陀螺平台系统稳定回路	319
11.1 平台系统稳定回路的功能及组成	319
11.2 平台信号分解器和平台力矩电机	321
11.3 静压液浮陀螺平台系统稳定回路的工作原理	324
11.4 静压液浮陀螺平台系统稳定回路的传递函数	325
11.5 静压液浮陀螺平台系统稳定回路的力矩刚度	331
11.6 静压液浮陀螺平台系统稳定回路的误差分析	333
11.7 陀螺输出轴上的干扰力矩对平台系统稳定回路的影响	336
11.8 静压液浮陀螺平台系统稳定回路的系统设计	338
11.9 静压液浮陀螺平台系统稳定回路的电路设计	343
11.10 静压液浮陀螺平台系统稳定回路的失效模式	348
11.11 平台系统稳定回路的“失稳”试验	350
第 12 章 静压液浮陀螺平台系统粗锁回路	357
12.1 静压液浮陀螺平台系统粗锁回路的功能和组成	357
12.2 静压液浮陀螺平台系统粗锁回路的工作原理	358
12.3 静压液浮陀螺平台系统粗锁回路的传递函数	361
12.4 静压液浮陀螺平台系统粗锁回路的误差分析	365
12.5 静压液浮陀螺平台系统粗锁回路的系统设计	367

12.6	静压液浮陀螺平台系统粗锁回路的电路设计	371
12.7	静压液浮陀螺平台系统粗锁回路中的几个问题	382
第 13 章	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路	405
13.1	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路的功能和组成 ...	405
13.2	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路的工作原理	406
13.3	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路的传递函数	409
13.4	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路的误差分析	414
13.5	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路的系统设计	416
13.6	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路的电路设计	424
13.7	静压液浮陀螺平台系统方位锁定回路中的几个问题 ...	437
第 14 章	静压液浮陀螺平台系统调平回路	442
14.1	静压液浮陀螺平台系统调平回路的功能及组成	442
14.2	静压液浮陀螺平台系统调平回路的工作原理	443
14.3	静压液浮陀螺平台系统调平回路的传递函数	447
14.4	静压液浮陀螺平台系统调平回路的系统设计和电路设计	450
14.5	静压液浮陀螺平台系统调平回路中的几个问题	455
第 15 章	静压液浮陀螺平台减振系统	459
15.1	静压液浮陀螺平台减振的意义	459
15.2	振动的基本概念	460
15.3	静压液浮陀螺平台系统的减振方法	472
15.4	静压液浮陀螺平台减振器参数的确定	474
15.5	平台减振器的设计	482
15.6	平台减振器的试验	486
第 16 章	静压液浮陀螺平台恒温控制系统	497
16.1	静压液浮陀螺平台的恒温控制与温控点的确定	497
16.2	静压液浮陀螺平台恒温控制方案	499

16.3	静压液浮陀螺平台的传热途径与热阻	500
16.4	静压液浮陀螺平台加温系统	508
16.5	静压液浮陀螺平台制冷系统	518
16.6	轴流风扇的应用	540
16.7	静压液浮陀螺平台恒温系统的几个问题	541
16.8	制冷剂性能对制冷系统的影响	545
第 17 章	静压液浮陀螺平台系统误差系数自标定技术	550
17.1	平台系统误差系数自标定技术概述	550
17.2	静压液浮陀螺平台系统状态的设置与状态控制	552
17.3	静压液浮陀螺平台系统位置的设置	560
17.4	静压液浮陀螺平台系统位置设置的控制原理	564
17.5	平台系统转位控制和误差系数自标定时的程序设计	569
17.6	静压液浮陀螺平台系统瞄准接口与状态控制	572
17.7	静压液浮单自由度陀螺仪误差系数自标定	575
17.8	加速度计误差系数自标定	584
第 18 章	静压液浮陀螺平台系统的测试及试验	589
18.1	静压液浮陀螺平台系统的测试原理	589
18.2	静压液浮陀螺平台系统中参数的测试方法	596
18.3	加速度计安装误差的标定	601
18.4	静压液浮陀螺平台系统的试验	608
第 19 章	静压液浮陀螺平台系统的电磁兼容性	623
19.1	静压液浮陀螺平台系统电磁兼容性设计的意义	623
19.2	静压液浮陀螺平台系统的电磁兼容环境分析	624
19.3	静压液浮陀螺平台系统中电磁干扰的传播途径	631
19.4	静压液浮陀螺平台系统的电磁兼容设计	635
19.5	静压液浮陀螺平台系统的电磁兼容试验	649

第 20 章 静压液浮陀螺平台系统的可靠性	652
20.1 平台系统可靠性概述	652
20.2 静压液浮陀螺平台系统的可靠性分析	653
20.3 静压液浮陀螺平台系统的可靠性预计	660
20.4 平台系统的故障树分析法	664
20.5 静压液浮陀螺平台系统的故障模式及影响性分析	669
20.6 静压液浮陀螺平台系统的可靠性增长	675
20.7 静压液浮陀螺平台系统的可靠性评定	680
第 21 章 静压液浮陀螺平台系统误差模型	684
21.1 静压液浮陀螺平台系统误差模型的意义	684
21.2 静压液浮陀螺平台系统静差模型	685
21.3 静压液浮陀螺平台系统轴间交链问题	690
21.4 静压液浮陀螺平台系统动差模型	693
21.5 静压液浮单自由度陀螺仪漂移率误差模型的简化	700
21.6 静压液浮陀螺平台系统误差补偿模型	702
参考文献	714
后记	716

第1章 绪 论

在当今世界上，飞机、舰船、火箭、导弹及各种飞行器的控制，都离不开惯性器件的使用。特别是高精度的飞行体和运动体，都必须采用高精度的惯性器件进行导航和控制。就惯性器件领域本身来说，可以分为捷联惯性系统和平台惯性系统两大类。一般地说，捷联惯性系统的精度相对较低，多使用在战术武器和精度要求低的飞行器上；平台惯性系统的精度相对较高，多使用在战略武器和精度要求高的飞行器上。

随着惯性器件的广泛使用，惯性器件的发展越来越快，研制水平越来越高，领域也越来越宽。除了传统的机电型之外，光纤型、激光型的惯性器件，以及微机电型的惯性器件，也在迅速的发展之中，应用的范围不断扩大。

对于平台惯性系统来说，它是惯性技术领域中的一重要技术，有着半个多世纪的发展历史，有过辉煌的应用范例，至今仍然是高精尖型号的首选。在平台惯性系统中，有静压气浮陀螺平台系统、挠性陀螺平台系统、液浮陀螺平台系统、具有磁悬浮技术的液浮陀螺平台系统以及浮球平台系统，现在又有了静压液浮陀螺平台系统。

静压液浮陀螺平台系统是一种高精度的新型惯性平台，是一种先进的陀螺平台系统。相对于静压气浮陀螺平台系统来说，静压液浮陀螺平台系统同样具有启动快的优点，而且具有一定的阻尼，稳定性能好。静压气浮陀螺平台系统需要外部提供气源，因此使用中需要携带高压气瓶，以及输送高压气体的管路及减压装置。静压液浮陀螺平台系统自带浮液，使用十分方便。而且，静压气浮轴承与静压液浮轴承技术有许多相似之处，生产加工技术可以

继承。

相对于挠性陀螺平台系统来说,静压液浮陀螺平台系统的承载能力高,抗冲击振动的能力强,精度可以做得更高。

相对于液浮陀螺平台系统来说,静压液浮陀螺平台系统启动快。液浮陀螺平台系统的浮液黏度大、阻尼大,需要长时间、大功率的加温后才能启动,并且需要依靠磁悬浮技术进行浮子定位对中,技术复杂,难度大。

相对于浮球平台系统来说,静压液浮陀螺平台系统的技术难度小,成本低,实用性强,精度也能做得很高。

静压液浮技术是在静压气浮技术的基础上发展起来的一种新的支撑技术,它介于静压气浮技术和全液浮技术之间,兼具有二者的优点,规避了二者的不足。

为了系统地说明静压液浮陀螺平台系统,本书的第2章、第3章介绍平台系统的功能、组成、原理及总体设计,第4章介绍平台系统的电源,第5章介绍静压液浮技术,第6章介绍柱形动压气浮轴承磁滞马达,第7章、第8章、第9章分别介绍静压液浮单自由度积分陀螺仪、静压液浮陀螺加速度计和石英挠性摆式加速度计,第10章介绍平台姿态角测量系统,第11章、第12章、第13章和第14章分别介绍平台系统稳定回路、平台系统粗锁回路、平台系统方位锁定回路和平台系统调平回路,第15章、第16章分别介绍平台减振系统和平台恒温控制系统,第17章、第18章分别介绍平台系统误差系数自标定技术和平台系统的测试及试验,第19章、第20章分别介绍平台系统的电磁兼容性和可靠性技术,第21章介绍平台系统的误差模型。

本书是以系统和回路为主线来叙述的,除比较复杂的部件外,元件多在有关的系统和回路中进行说明。在每一部分的内容中,一般都是以组成、原理、设计思想和重要概念的思路进行说明。不同部分中的相同或相似的内容,一般在最先出现的部分中进行说明。

第2章 静压液浮陀螺平台系统的 功能、组成及原理

2.1 静压液浮陀螺平台系统的功能综述

2.1.1 提供高精度的惯性坐标

提供高精度的惯性坐标是惯性平台最基本的功能。高精度的惯性基准需要高精度的陀螺仪，静压液浮陀螺仪就可以做到高精度。所谓惯性坐标，就是将平台建立的三轴直角坐标系，稳定在惯性空间。这样它就不受外界时空的影响，可以作为加速度计测量的基准方向和姿态角测量的起始基准。因此，它是惯性平台极其重要的性能指标。

如果惯性基准发生了漂移，必然带来飞行器航行误差。应当尽量减小惯性基准的漂移，因此，必须采用高精度的陀螺仪。

2.1.2 测量沿惯性坐标轴各向的视加速度

测量沿惯性坐标轴各向的视加速度，首先要求加速度计的敏感轴要沿着惯性坐标各轴。而惯性坐标轴的建立，是以三个正交的陀螺仪敏感轴为依据。因此，三个加速度计的敏感轴，需要与相应陀螺仪的敏感轴在空间平行，成为事实上的惯性坐标系。即真正实用的惯性坐标轴是三个加速度计的敏感轴。

加速度计测量出来的加速度为视加速度，它与飞行器的运动加速度相差一个地心引力加速度 g ，有如下的关系式

$$W = a - g \quad (2-1)$$

式中 W ——视加速度；