

内 容 简 介

本书主要论述液浮惯性器件的原理、设计、制造工艺和试验等问题。全书共 11 章, 包括: 概论, 单自由度液浮积分陀螺, 液浮摆式加速度计, 液浮惯性仪表用传感器、力矩器、磁悬浮支承, 液浮陀螺稳定平台系统, 平台电磁元件, 陀螺稳定平台的自标定、自对准和自动定位, 液浮惯性器件的测试与试验, 液浮惯性器件的制造工艺, 加速度计的再平衡回路与输出数字化技术, 惯性器件的应用与发展。

本书可供液浮惯性器件专业的科技人员阅读, 也可供高等院校有关专业的师生参考。

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

液浮惯性器件/钟万登主编. —北京: 中国宇航出版社,
1994. 12(2009. 8 重印)

(导弹与航天丛书. 第 2 辑, 固体弹道导弹系列)

ISBN 978 - 7 - 80034 - 680 - 4

I. 液… II. 钟… III. 弹道导弹—液浮陀螺仪 IV. TJ761. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 067489 号

责任编辑 尚秉民 装帧设计 宇航数码

出 版 社 中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 内部发行

零售店 读者服务部

(010)68371105

(010)68522384(传真)

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 1994 年 12 月第 1 版

2009 年 8 月第 2 次印刷

规 格 850 × 1168 开 本 1 / 32

印 张 20.75 字 数 537 千字

印 数 1001 ~ 1800

书 号 ISBN 978 - 7 - 80034 - 680 - 4

定 价 100.00 元

如有印装质量问题, 可与读者服务部联系调换

草
彈
子
航
天
丛
書

張
文
華

导弹与航天丛书
固体弹道导弹系列

液浮惯性器件

主 编 钟万登



中国宇航出版社

· 北 京 ·

《导弹与航天丛书》
编辑工作委员会

名誉主任 宋 健 鲍克明

主 任 刘纪原

副 主 任 任新民 孙家栋

委 员	屠守锷	黄纬禄	梁守槃	陈怀瑾
	王 卫	权振世	谢昌年	赵厚君
	曹中俄	张新侠	高本辉	

办 公 室 宋兆武 史宗田 任长卿 孙淑艳

固体弹道导弹系列 编辑委员会

主 任 黄纬禄

副主任 陈德仁 王觉先 戴诗正 徐乃明
谈风奎

委 员 (按姓氏笔画排列)

吕应祥 朱忠惠 阮崇智 吴明昌
宋兆法 陈世年 钟万登 黄寿康
黄启珍

编辑部 宋兆法 何一清 李淑英 周显云

《液浮惯性器件》

作者名单

主 编 钟万登

责任编辑 吕应祥

编 委 戴世荣 刘次良 崔佩勇 程克珍
张耀南

作 者 钟万登 郭诚杰 陈锦杜 周凤春
崔佩勇 敖茂全 郑书文 张双庆
张振民 杨志魁 牛 犇 刘 廉
程克珍 戴世荣

重印版序

我国的航天事业在 50 多年的发展历程中，从无到有，从小到大，创造了以“两弹一星”、载人航天和绕月探测为重要里程碑的辉煌成就，构筑了专业齐全、功能配套、设施完备的航天科技工业体系，掌握了一大批具有自主知识产权的核心技术，积累了独具特色的航天工程管理经验和方法，造就了一支技术精湛、作风优良的航天人才队伍，孕育形成了具有鲜明时代特征的航天精神、“两弹一星”精神和载人航天精神，在世界高科技领域占有了一席之地，并在一些重要技术领域跻身世界先进行列，为维护国家安全、带动科技进步、推动经济发展、促进社会和谐和振奋民族精神作出了重要贡献。

回顾 50 多年的发展与建设，我国的航天事业，在创业中起步，在探索中发展，在改革中腾飞，走出了一条具有中国特色的创新发展之路，在取得辉煌成就的同时，通过无数航天科技工作者的探索与实践，也创造积累了十分宝贵的经验。为了将这些知识财富传承下来，用以指导新时期的航天重大工程实践，促进航天科技成果在更加广阔的领域推广应用，为推动国民经济建设和社会进步发挥更大的作用，自 20 世纪 80 年代起，数以千计的航天科技工作者历时 20 余年，从导弹武器、运载火箭和空间飞行器等航天产品的设计、研制、生产、试验等各个方面，系统总结了在实践中形成的理论、方法和工程经验，编纂了一部共 156 册、6500 余万字的鸿篇巨制——《导弹与航天丛书》，奉献给广大读者。

当前，面对世界格局多极化、全球经济一体化、科学技术突飞猛进以及新军事变革不断向纵深发展的新形势，航天科技工业

作为国家的战略安全基石以及科技进步、经济发展、社会和谐的重要推动力量，越来越凸现出其重要的战略地位。十七大以来，党和国家高度重视航天科技工业的发展，提出了富国强军的明确要求，部署了包括载人航天工程第二步、探月工程二期、高分辨率对地观测系统、新一代运载火箭在内的一系列国家重大工程和重大科技专项任务，可以说，航天科技工业正处于历史上任务最多、发展最快的重大战略机遇期，形势和任务对航天科技工业的发展提出了新的更高要求。如何抓住难得机遇，乘势而上，圆满完成国家任务，从而推动我国航天事业全面、协调、可持续发展，真正担负起富国强军、建设创新型国家和推动我国成为航天大国、强国的历史责任，是新一代航天科技工作者必须面对的重大考验。

因此，在新时期航天事业蓬勃发展和读者需求的强力推动下，重印《导弹与航天丛书》凸显了重要的现实意义和深远的历史意义。希望这部丛书能够使我国航天事业 50 多年的创新成果和实践经验，在新的历史时期彰显出无穷活力，给人以更加深刻的启示，从而推动更多的航天科技工作者在新的航天工程实践中，不断继承、完善、发展航天事业 50 多年形成的宝贵经验，积极探索新形势下航天科技工业发展的内在规律，努力建设航天科技工业新体系，使我国的航天事业在新的起点上不断谱写更加辉煌的历史篇章。

马兴瑞

2009 年 6 月

总 序

导弹与航天技术是现代科学技术中发展最快的高技术之一。导弹武器的出现，使军事思想和作战方式发生了重大变革；航天技术把人类活动的领域扩展到太空，使人类认识自然和利用外层空间的能力发生了质的飞跃。

导弹与航天工程是复杂的系统工程，它运用了现代科学技术众多领域的最新成果，是科学技术与国家基础工业紧密结合的产物，是一个国家科学技术水平和工业水平的重要标志。

中国人民经过 30 年的努力，依靠自己的力量，勇于开拓，坚韧不拔，在经济和科学技术比较落后的条件下，走出了自己发展导弹与航天技术的道路；造就了一支能打硬仗的技术队伍；建立了具有相当规模和水平的导弹与航天工业体系；形成了遍布全国的科研、生产协作网。这是党中央独立自主、自力更生方针的伟大胜利，是全国各地区、各部门大力协同，组织社会主义大协作的丰硕成果。

30 年来，我国已有多种型号经历了研究、设计、生产、试验、装备、使用的全过程，装备了各种射程的战略和战术弹道导弹、各种类型的防空导弹和飞航导弹，用多种运载火箭发射了不同轨道和用途的人造卫星。我国导弹与航天工业的这些重大物质成果，对增强我国的国防实力、促进经济发展、带动科技进步发挥了重要的作用。

我们不仅取得了丰硕的物质成果，而且积累了宝贵的实践经验。为了发展中国的导弹与航天事业，多少人投入毕生的精力，贡献了宝贵的智慧，付出了辛勤的劳动，备尝了失败的苦痛和成功的欢欣。付出高昂代价取得的实际经验，从书本上学不到，更

不可能从外国买来，只能靠自己在实践中总结。为了加速我国导弹与航天事业的发展，需要全面、系统地归纳以往研制过程中建立和应用的设计理论，总结其工程经验，用以指导今后的研制实践，并传授给导弹与航天事业一代又一代新生力量，使他们能在较高的起点上开始工作。为此，我们组织多年来从事导弹、人造卫星和运载火箭研制工作的专家与工程技术人员，编著了这套《导弹与航天丛书》。它以工程应用为主，力求体现工程的系统性、完整性和实用性，是我国导弹与航天技术队伍 30 年心血凝聚的精神成果，是多领域专业技术工作者通力合作的产物。

作为一项系统工程，要求参加导弹与航天工程研制工作的各类技术人员，不仅精通自己的专业，而且充分理解相关专业的要求和特点，在统一的总体目标下，相互协调、配合密切地工作。因此，本丛书也是导弹与航天技术队伍各专业间以及和其他有关人员进行技术交流的读物。

本丛书按液体弹道导弹与运载火箭（Ⅰ）、固体弹道导弹（Ⅱ）、防空导弹（Ⅲ）、飞航导弹（Ⅳ）、卫星工程（Ⅴ）等 5 个型号系列编排；对各系列共用的固体推进技术和空气动力学两种专业技术，将有关著作编为系列（Ⅵ和Ⅶ），其他共用专业技术则分别纳入 5 个型号系列中的一个系列，并供其他系列选用。

本丛书的各级编委会、各册的主编、副主编及各章节的作者是一个庞大的科学技术群体，为了编写好这部大型丛书，编著人员在组织和技术工作上都付出了巨大劳动。期望这套丛书能帮助人们加深对于导弹与航天技术的了解，促进中国的导弹与航天事业向更高的目标迈进。

《导弹与航天丛书》

编辑工作委员会

1987 年 8 月

固体弹道导弹系列

序 言

固体弹道导弹系列是《导弹与航天丛书》的系列之一。

固体弹道导弹与液体弹道导弹虽同属弹道式导弹，但在技术上有许多重要差别，尤其是固体推进剂和固体发动机与液体弹道导弹的相应部分区别更为明显。因此，无论是对导弹的总体设计技术、发射使用技术，还是随之而来的各个分系统的变化，都需要深入研究。特别是我国固体战略弹道导弹在发展初期选择了难度较大的潜艇水下发射和车载机动发射方式，又增加了一系列必须专门研究的新课题。对固体弹道导弹武器系统研制过程中特有的这部分经验应该加以总结，形成一个独立的系列。

由于固体弹道导弹具有多种优点，因而，世界各国把固体弹道导弹作为战略弹道导弹和战术弹道导弹的主要发展方向。我国固体战略弹道导弹的研制，从推进剂的探索开拓到型号定型、批生产，前后经历了近 30 年的漫长过程。30 年来，在“一穷二白”的基础上，自力更生、艰苦创业，几代人为之作出了无私的奉献。30 年的努力，终于结出了丰硕的成果。陆上机动和潜艇水下发射两个型号的相继定型，为增强我国国防力量作出了突出的贡献，也为后续型号研制开辟了道路。30 年的历程，积累了丰富的实践经验，也培育、锻炼了一支成熟的高素质的专业队伍。本系列图书的编写，就是为了系统总结这一宝贵财富，使之“形诸文字，传之后世”。本系列图书取材兼顾理论与实际两个方面，而以后者为重点，务求实用。内容着重论述工程技术问

题，诸如设计要求、程序和方法以及研制各阶段的相应试验等，同时介绍一些新技术的应用和发展方向。对基本理论及其概念不作详细论述，对计算公式亦避免复杂推导，但引证力求准确。本系列图书可供本专业技术人员在工作中借鉴和参考，又可使新走上工作岗位的大学生和研究生能较快“入门”，在一个较高的起点上开拓前进，也可作为与本专业有关的院校、部队的教学参考材料。

本系列图书分为 14 册，其中导弹总体设计 6 册，控制系统 3 册，地面设备 2 册，固体发动机、惯性器件和伺服机构各 1 册。其他与液体型号相同的专业内容不再单独成书。

在本系列图书编写过程中，得到了各级领导的大力支持。主要撰稿者都是一些兼具基础理论和实践经验的技术骨干，从提供素材、提炼加工到编纂评审付出了艰辛的劳动。经过反复审校、修改补充，本系列图书终于定稿出版，与读者见面了。对提供宝贵研制经验的广大参与者和对本系列图书编写出版作出贡献的所有人员，在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限，加之缺乏经验，书中缺点错误在所难免，恳望专家、读者提出宝贵意见。

固体弹道导弹系列

编辑委员会

1991 年 3 月

前 言

本书是《导弹与航天丛书》固体弹道导弹系列中的一册。本书较系统地阐述了液浮陀螺稳定平台的设计、制造、试验等问题,对浮球平台、捷联惯性测量组合以及有发展前景的部分新型惯性器件诸如挠性动调陀螺、全光纤陀螺、微型硅惯性元件等也作了简要介绍。本书力求做到将惯性技术的基本原理与液浮惯性器件的特殊性相结合,理论与实践相结合,以供从事惯性器件专业的工程技术人员阅读参考。

全书共11章。第1章为概论。第2、3、4章分别介绍单自由度液浮积分陀螺,液浮摆式加速度计,液浮仪表用的力矩器、传感器和磁悬浮组件。第5、6章分别介绍平台系统以及平台上用的框架角传感器、分解器与力矩电机。第7章介绍平台系统的自动对准、自标定和自动定位。第8、9章分别介绍液浮摆式加速度计、液浮积分陀螺、稳定平台的试验和制造过程中的一些特殊工艺。第10章介绍加速度计再平衡电路与输出数字化技术。第11章介绍浮球平台、捷联惯性组合及部分新型惯性器件。本书各章均有独立性,各章之间又有连贯性和系统性。

本书由航空航天工业部第十六研究所多年从事液浮惯性器件研制的部分工程技术人员编写。在本书编写过程中,刘筑霞、黎家富、寿士荣、侯焕、李嵩生、邱麟鹤等同志曾提出过不少宝贵意见。尹作英、陈效真两位同志以及资料室、标准化室的同志为本书的编写做了大量工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,漏误与不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

1994年1月

目 录

第 1 章 概论	钟万登
1.1 惯性仪表的基本工作原理	(1)
1.2 液浮惯性器件的发展	(2)
1.3 液浮惯性技术的展望	(4)
第 2 章 单自由度液浮积分陀螺	郭诚杰 钟万登
2.1 概述	(6)
2.2 单自由度液浮积分陀螺总体设计	(6)
2.2.1 单自由度陀螺的工作原理	(6)
2.2.2 单自由度液浮积分陀螺的误差模型	(11)
2.2.3 陀螺主要参数的选择	(13)
2.3 陀螺电机设计	(17)
2.3.1 磁滞同步电机	(18)
2.3.2 直流永磁同步电机	(30)
2.4 陀螺电机轴承	(34)
2.4.1 精密滚珠轴承	(35)
2.4.2 气体动压轴承	(40)
2.5 陀螺转子动平衡与电机动态测试	(52)
2.5.1 陀螺转子动平衡	(52)
2.5.2 陀螺电机的综合测试	(56)
2.6 陀螺浮子组合件设计	(59)
2.6.1 框架组件受力分析	(60)
2.6.2 浮子组件的热设计	(64)
2.6.3 浮子组件的悬浮与支承	(68)
2.7 陀螺充油、输电和温度控制	(70)
2.7.1 陀螺充油	(70)

2.7.2 陀螺的输电和温度控制	(73)
------------------------	------

参考文献	(81)
------------	------

第3章 液浮摆式加速度计 陈锦杜

3.1 概述	(82)
--------------	------

3.2 结构方案设计	(84)
------------------	------

3.3 主要参数设计与计算	(85)
---------------------	------

3.3.1 特性方程	(85)
------------------	------

3.3.2 主要参数设计、计算	(86)
-----------------------	------

3.4 元件组件的设计与选择	(88)
----------------------	------

3.4.1 浮子组合件设计	(88)
---------------------	------

3.4.2 支承和激振系统设计	(92)
-----------------------	------

3.4.3 其他元组件的选择	(100)
----------------------	-------

3.4.4 与浮液有关的几个问题	(105)
------------------------	-------

3.5 加速度计参数的一致性、标度因数稳定性 及误差补偿	(110)
---------------------------------------	-------

3.5.1 参数的一致性问题	(110)
----------------------	-------

3.5.2 标度因数的稳定性	(110)
----------------------	-------

3.5.3 偏值误差的补偿	(114)
---------------------	-------

参考文献	(115)
------------	-------

第4章 液浮惯性仪表用传感器、力矩器、 磁悬浮支承 周凤春

4.1 概述	(116)
--------------	-------

4.2 角度传感器	(118)
-----------------	-------

4.2.1 动圈式传感器	(118)
--------------------	-------

4.2.2 微动同步器式传感器	(132)
-----------------------	-------

4.2.3 差动电容式角度传感器	(139)
------------------------	-------

4.2.4 动圈式传感器设计程序	(145)
------------------------	-------

4.3 力矩发生器	(157)
-----------------	-------

4.3.1 电磁式力矩器	(158)
--------------------	-------

4.3.2 永磁式力矩器	(167)
--------------------	-------

4.3.3 永磁式力矩器设计质量评定	(171)
--------------------------	-------

4.3.4 永磁式力矩器磁路设计要点	(175)
--------------------------	-------

4.3.5 永磁式力矩器的误差因素	(188)
4.4 动圈式组合传感器	(194)
4.4.1 结构及与组合有关的干扰误差	(194)
4.4.2 组合传感器设计要点	(196)
4.4.3 组合传感器软磁材料的选择	(199)
4.5 磁悬浮支承	(200)
4.5.1 磁悬浮支承的技术要求	(201)
4.5.2 无源型磁悬浮支承的工作原理	(202)
4.5.3 磁悬浮支承设计要点	(212)
4.5.4 双功能磁悬浮支承与有源型磁 悬浮支承	(215)
参考文献	(218)

第5章 液浮陀螺稳定平台系统

钟万登 崔佩勇 敖茂全

5.1 概述	(220)
5.2 平台系统的组成与要求	(220)
5.3 稳定平台的结构设计	(223)
5.3.1 平台框架系统结构	(223)
5.3.2 框架系统的振型	(227)
5.3.3 减振器设计	(233)
5.3.4 液浮陀螺稳定平台的热设计	(234)
5.4 液浮陀螺稳定平台稳定回路	(238)
5.4.1 三轴液浮陀螺稳定平台系统 数学模型及三轴交链耦合影响分析	(238)
5.4.2 单轴稳定回路设计	(247)
5.4.3 对稳定回路各级的要求	(255)
5.5 平台稳定回路的电磁兼容设计	(263)
5.5.1 噪声耦合途径	(264)
5.5.2 平台系统抗干扰措施	(268)
参考文献	(272)

第6章 平台电磁元件 郑书文 张双庆 张振民

6.1 概述	(273)
--------------	-------