



数据加载失败，请稍后重试！

惯导系统陀螺仪理论

郭秀中 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

惯导系统陀螺仪理论/郭秀中编著. —北京:国防工业出版社, 1996. 7

ISBN 7-118-01119-3

I. 惯… II. 郭… III. 陀螺仪-惯性导航 IV. V241.5

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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 11¼ 305 千字

1996 年 7 月第 1 版 1996 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 17.40 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾铎		
秘书长	刘琯德		
委员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

序

惯性导航仪为精确导航系统中不可缺少的设备。这种设备广泛应用于飞机、飞船、火箭、卫星、远洋舰船、陆地载具、大地及河流测量、油井勘探、海底探查、辅助综合小张角雷达(synthetic aperture radar)及许多其它方面。一个惯性导航仪是由许多元件组合而成的,但其中最重要的元件是陀螺仪。所以掌握陀螺仪原理及性能是从事惯性导航工作的先决条件。

近 50 年来,陀螺仪理论一直在不断地发展,种类逐渐增加,性能愈来愈好。因此,惯性导航的精度也随之上升。陀螺仪有不同的类别和结构形式。若按工作原理分,有刚体转子式(又分为液浮支承式、气浮支承式、动力调谐式、静电支承式)、振动式、光学式等等。若按工作精度分,有高精度类、亚精度类及低精度类。各类陀螺仪都有其应用场合,以能达到工作规格,能适应工作环境,及合乎经济条件为选择原则。选择及应用陀螺仪牵涉到很多实际考虑,但有关陀螺仪书籍对此鲜有很完整的分析。

《惯导系统陀螺仪理论》一书,是作者在多年从事陀螺仪教学和科研工作的基础上并参考了国内外文献资料而写成的。本书有许多独到见解,其特色表现在以下几方面:

一、此书学术思想新颖,从导航工程应用角度来阐述陀螺仪理论,保持了陀螺仪理论与惯导系统的密切结合关系。书中内容有很强的针对性,并摒弃了传统的进行大量陀螺力学分析的做法,使之具有良好的工程实用性。

二、本书对惯导系统应用的各种新型陀螺仪作了全面而系统的论述。对每一类型都客观地评价了它的特点,不仅从物理概念上清晰地解释了其工作原理,而且对工作特性和误差也作了必要的

分析。

三、本书对陀螺仪在惯导系统应用中必须考虑的实际问题,诸如陀螺漂移误差建模、误差补偿算法和捷联陀螺配置中的余度技术等都作了系统的阐述和讨论。此外,还列述了明确的应用方法和步骤。

四、从书的内容及叙述的方式来看,此书的使用对象有三:(1)它是从事惯性技术研制工作的科技人员很实用的参考书;(2)海陆空导航系统使用和维护人员均能由此书了解到惯性系统中使用的新型陀螺仪的全貌;(3)它可作为高等院校有关专业本科生及研究生的教学参考书。

五、书中叙述文理流畅,物理概念清晰,插图直观形象,从而更增加了可读性。能很好地帮助读者理解和应用有关的知识。

六、此类专著目前尚属少见。已有陀螺仪书籍中能与本书的完整性相比者甚少。

总而言之,本书实为一部既有学术水平又有实用价值的专著,亦属对中国惯性技术发展有推动作用的著作。值本书出版之际,谨向作者致贺,并向读者推荐。

洪葳 谨序于美国田州诺城行文书斋

前 言

惯性传感器、惯性稳定、惯性导航、惯性制导和惯性测量等技术,统称为惯性技术。它是在经典理论上发展起来的,但又是综合了当代科技最新成果的多学科、综合性实用尖端技术,在航空、航天、航海、兵器及许多其它方面获得广泛应用。惯性技术在现代国防科学技术中占有十分重要的地位,并在众多民用领域中发挥越来越大的作用。

惯性技术的发展与陀螺仪的发展密切相关。陀螺仪是敏感相对于惯性空间角运动的装置。它作为一种重要的惯性传感器,广泛用于测量运载体的姿态角和角速度,而且还是构成惯导系统的核心元件。惯导系统的性能在很大程度上取决于陀螺仪的性能。

鉴于经典的陀螺力学理论、各种航空陀螺仪表和航海陀螺仪在国内外的许多专著中已有详尽论述,而从惯导应用角度系统地阐述陀螺仪理论尚感欠缺,故编写本书的目的在于弥补这方面的不足。书中在简要介绍惯导系统基本原理及其对陀螺仪性能要求(第一章)的基础上,主要论述以下两部分内容:

一是,惯导系统应用的各种新型陀螺仪的实用理论(第二章至第六章),包括动力调谐陀螺仪、静电陀螺仪、振动陀螺仪、激光陀螺仪、光纤陀螺仪、核磁共振陀螺仪及多功能惯性传感器的工作原理与特性分析。

二是,陀螺仪在惯导系统应用中需要考虑的实际问题(第七章至第十章),包括陀螺仪静态与动态漂移数学模型、误差补偿算法、陀螺随机漂移的统计分析及其数学模型、陀螺仪冗余配置技术。

本书以陀螺仪理论与惯导系统密切结合为主线,以物理概念的介绍为重点,同时也有必要的数学推导。在内容中,还注意了反

映这个领域的最新研究成果和发展趋向。希望通过本书的出版,能对我国惯性技术的发展起到促进和推动作用。

在本书编写过程中,得到美国田纳西大学(The University of Tennessee)洪箴教授(Prof. James C. Hung)的热情指导与帮助。在出版之时,洪箴教授特为本书作序。在此谨致诚挚的感谢。

北京航空航天大学酆吉臣教授、南京航空航天大学袁信教授、西北工业大学刘盛武教授和北京航空航天大学陈哲教授曾对本书提出宝贵意见。中国航空工业总公司 628 研究所许国祯研究员在资料上给予了很多帮助。在此一并致以衷心的感谢。

限于作者的水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

于南京航空航天大学

目 录

第一章 陀螺仪及惯性导航系统综述	1
§ 1.1 陀螺仪的分类、应用与发展概况	1
§ 1.2 惯导系统的基本原理	8
§ 1.3 陀螺仪精度指标及惯导系统对陀螺仪性能要求	17
第二章 动力调谐陀螺仪	29
§ 2.1 动力调谐陀螺仪的特点与发展概况	29
§ 2.2 动力调谐陀螺仪的结构组成及工作原理	33
§ 2.3 动力调谐陀螺仪的动力学方程	42
§ 2.4 动力调谐陀螺仪的运动分析	51
§ 2.5 动力调谐陀螺仪的漂移误差	58
§ 2.6 动力调谐速率陀螺仪的构成原理与基本分析	63
第三章 静电陀螺仪	75
§ 3.1 静电陀螺仪的特点与发展概况	75
§ 3.2 静电陀螺仪的结构组成	78
§ 3.3 静电陀螺仪的静电支承原理	85
§ 3.4 静电陀螺仪的角度读取原理	94
§ 3.5 静电陀螺仪的动力学方程	100
§ 3.6 静电陀螺仪的运动分析及漂移误差源简介	104
第四章 振动陀螺仪	113
§ 4.1 振动陀螺仪的特点与发展概况	113
§ 4.2 音叉振动陀螺仪和微型振动陀螺仪	117
§ 4.3 压电振动陀螺仪的基本原理与分析	123
§ 4.4 壳体谐振陀螺仪的结构组成及工作原理	129
§ 4.5 壳体谐振陀螺仪的基本分析	138
第五章 激光陀螺仪与光纤陀螺仪	146
§ 5.1 光学陀螺仪的特点与发展概况	146
§ 5.2 激光陀螺仪的工作原理及结构组成	152
§ 5.3 激光陀螺仪的基本误差	162

§ 5.4	克服激光陀螺仪自锁效应的方法	166
§ 5.5	光纤陀螺仪的工作原理和基本类型	175
§ 5.6	光纤陀螺仪的结构方案与光学元件	186
第六章	核磁共振陀螺仪与多功能惯性敏感器	193
§ 6.1	核磁共振陀螺仪的基本原理	193
§ 6.2	多功能惯性敏感器的技术方案	205
§ 6.3	压电式多功能敏感器的工作原理及特性分析	210
第七章	陀螺仪静态与动态漂移数学模型	223
§ 7.1	陀螺漂移数学模型的分类	223
§ 7.2	单自由度陀螺仪静态漂移数学模型	226
§ 7.3	二自由度陀螺仪静态漂移数学模型	232
§ 7.4	单自由度陀螺仪动态漂移数学模型	239
§ 7.5	二自由度陀螺仪动态漂移数学模型	248
第八章	陀螺仪静态与动态误差补偿算法	259
§ 8.1	陀螺仪误差补偿方法的分类	259
§ 8.2	陀螺仪的施矩方式与输出方式	261
§ 8.3	陀螺测量组件输出角速度的表达式	269
§ 8.4	陀螺测量组件静态误差补偿算法	278
§ 8.5	陀螺测量组件动态误差补偿算法	284
第九章	陀螺随机漂移的统计分析及其数学模型	289
§ 9.1	描述陀螺随机漂移的特征函数	289
§ 9.2	陀螺随机漂移数据的统计检验	300
§ 9.3	平稳随机时间序列线性模型的结构形式	306
§ 9.4	平稳随机时间序列线性模型的辨识方法	311
§ 9.5	线性模型的参数估计及适用性检验	319
§ 9.6	建立陀螺随机漂移数学模型的步骤	323
第十章	陀螺仪冗余配置技术	332
§ 10.1	概述	332
§ 10.2	陀螺仪的冗余配置方案及可靠性评价	336
§ 10.3	陀螺仪冗余系统的故障检测与诊断	346
§ 10.4	陀螺仪冗余系统的数据处理及系统重编	354
参考文献		360

第一章 陀螺仪及惯性导航系统综述

§ 1.1 陀螺仪的分类、应用与发展概况

一、陀螺仪的分类

陀螺仪是敏感壳体相对惯性空间的角运动的装置。这一术语的英文为“gyroscope”或“gyro”。它来自希腊文,其意即为“旋转敏感器”。

100 多年前问世的陀螺仪是由高速旋转的刚体转子(具有自转动量矩)支承在框架上而构成的。随着科学技术的发展,相继发现了数十种物理效应可以被用来敏感相对于惯性空间的角运动。人们亦把陀螺仪这一名称扩展到没有刚体转子而功能与经典陀螺仪等同的敏感器。

目前,已经研制出了许多不同原理和类型的陀螺仪。总括来看,陀螺仪可分成两大类:一类以经典力学为基础,如刚体转子陀螺仪、流体转子陀螺仪、振动陀螺仪等;另一类以近代物理学为基础,如激光陀螺仪、光纤陀螺仪、核磁共振陀螺仪、超导陀螺仪等。

刚体转子陀螺仪是把绕自转轴高速旋转的刚体转子支承起来,使自转轴获得转动自由度。按自转轴相对壳体所具有转动自由度的数目,可分为二自由度陀螺仪和单自由度陀螺仪。按转子支承方式的不同,可分为框架陀螺仪、液浮陀螺仪、气浮陀螺仪、动力调谐陀螺仪和静电陀螺仪等。

在刚体转子陀螺仪中,最先采用的是由框架装置来支承转子。直到目前,这种结构的陀螺仪在航空陀螺仪表、飞行控制系统、战术导弹制导系统以及许多场合中仍被广泛应用。但因框架轴上的

轴承存在较大的摩擦力矩,不可能使陀螺仪达到高的精度。为了满足惯性导航系统和惯性制导系统对陀螺仪的精度要求,传统的技术途径是把二自由度陀螺仪或单自由度陀螺仪的框架做成薄壁密封浮子,并由浮液的浮力来支承浮子组件,此称为液浮陀螺仪。对于单自由度陀螺仪,还可采用气体静压悬浮技术作支承,此称为静压气浮陀螺仪。

提高刚体转子陀螺仪精度的另一技术途径,是革除其框架装置,而采用各种特殊的支承办法来支承转子。其中,应用转子高速旋转时产生的气体动压力来支承转子的称为动压气浮陀螺仪;利用动力调谐的挠性接头来支承转子的称为动力调谐陀螺仪;采用在真空腔内的静电悬浮来支承转子的称为静电陀螺仪。在这些陀螺仪中,自转轴相对壳体均具有2个转动自由度,故均属于二自由度陀螺仪。

与刚体转子陀螺仪工作机理相似的有流体转子陀螺仪。这种陀螺仪的转子不是固体材料,而是在特殊容器内按一定速度旋转的流体。

振动陀螺仪的主体是一个作高频振动的音叉、梁或轴对称壳。它有音叉振动陀螺仪、压电振动陀螺仪和壳体谐振陀螺仪等类型,半球谐振陀螺仪就是后者当中典型的一种。

以近代物理学为基础的陀螺仪中,最为突出的代表是激光陀螺仪,其主体是一个环形谐振腔,在谐振腔的环路中有沿正反向绕行的激光束。与激光陀螺仪工作机理相似的有光纤陀螺仪,但它是用光纤线圈构成激光传播的通路。以近代物理学为基础的陀螺仪中,比较引人注目的还有核磁共振陀螺仪和超导陀螺仪。

根据陀螺仪的精度,还常把随机漂移率达到 $0.01^{\circ}/h$,即能满足惯性导航精度要求的,叫做惯性级陀螺仪;低于该精度的,依次分别为次惯性级陀螺仪和常规陀螺仪。目前能达到惯性级陀螺仪精度要求的,有液浮陀螺仪、气浮陀螺仪、动力调谐陀螺仪、静电陀螺仪、半球谐振陀螺仪和激光陀螺仪等。

若按陀螺仪的基本功能,则可分为角位置陀螺仪和角速率陀

陀螺仪。前者用于敏感角位置或角位移,常称位置陀螺仪(速率积分陀螺仪可归于此类)。后者用于敏感角速度,常称速率陀螺仪。

二、陀螺仪的应用

陀螺仪的基本功能是敏感角位移和角速度。在航空、航海、航天、兵器以及其它一些领域中,有着十分广泛和重要的应用。

在航空上,陀螺仪用来测量飞机的姿态角(俯仰角、横滚角、航向角)和角速度,成为飞行驾驶的重要仪表。飞行控制系统如自动驾驶仪和自动稳定器,则是在测量出这些参数的基础上,实现对飞机的自动控制或稳定,因而陀螺仪又是飞行控制系统的重要部件。飞机上的其它特种设备如机载雷达系统、武器投放系统和航空照相系统等,也需要陀螺仪提供这些信息。陀螺地平仪、陀螺方向仪、陀螺磁罗盘和速率陀螺仪等仪表,都是首先在航空上获得应用。在现代先进的飞机上,一般使用全姿态组合陀螺仪或陀螺稳定平台或捷联航向姿态系统,作为飞机姿态和航向的测量中心,给座舱综合显示系统、飞行控制系统以及其它机载特种设备提供飞机的姿态和航向信息。

在航海上,陀螺仪早已成为航行的重要导航仪器。各种舰船广泛应用的陀螺罗经(陀螺罗盘),就是一种能自动寻北的导航仪器,它不仅可为舰船导航提供精确可靠的航向基准,而且也能舰船上的火炮控制、鱼雷、导弹、声纳、雷达及自动舵等装置提供方位基准。舰船的纵摇和横摇则使用陀螺稳定平台来测量。在现代先进的舰船上,一般使用平台罗经,作为舰船姿态和航向的测量中心,给舰位推算系统、武器发射系统以及导弹指挥系统等提供精确的航向和纵、横摇信息。

在航天上,陀螺仪则是人造卫星、宇宙飞船等航天飞行器姿态控制系统重要的组成部件。例如对地球定向的卫星中,采用地球敏感器和陀螺仪组成的装置测量卫星的俯仰角及横滚角,采用轨道陀螺罗盘测量卫星的偏航角。在航天飞行器的姿态控制系统中,还采用大动量矩转子的所谓控制力矩陀螺,直接作为控制飞行器转动的执行元件。

在近、中程战术导弹的控制系统中,广泛采用水平自由陀螺仪和垂直自由陀螺仪测量导弹的俯仰角、横滚角及偏航角。在各种战术导弹的控制系统中,还广泛采用速率陀螺仪作为敏感元件。陀螺仪还用于鱼雷和反坦克导弹的定向以及坦克火炮的控制系统。

在民用方面,陀螺仪还可为地面设施、矿山隧道、地下铁路、石油钻井提供精确的方位基准;可用于铁路轨道检查和汽车动态性能测量;还可制成精密的称重衡器(俗称陀螺秤)。

特别需要指出,在飞机、舰船、导弹、航天飞行器等运载体的惯性导航系统和惯性制导系统中,陀螺仪是极其重要的敏感器。

所谓惯性导航(inertial navigation),就是直接利用加速度计测出运载体的运动加速度,经过数学运算,进而确定载体即时位置的一种导航方法。实现这种导航定位计算所需的基准坐标系(导航坐标系),则是由陀螺仪建立的。惯性导航系统有两种工作状态:一种工作状态是提供载体(飞机、舰船等)的位置和速度等导航信息,驾驶员根据此信息,人工引导载体沿预定的航线到达目的地;另一种工作状态是在提供导航信息的基础上,通过控制系统,自动引导载体沿预定的航线到达目的地,这时驾驶员只起监控作用。

所谓惯性制导(inertial guidance),则是惯性导航与自动控制的结合。它利用惯性导航原理获得载体(导弹、火箭等)的位置和速度等导航信息,在此基础上形成制导指令,通过控制系统,把载体引向预定的目标。从惯性制导系统的功能来看,它与惯性导航系统工作于自动导航状态相似。但习惯上称无人操纵的运载体的自动惯性导航系统为惯性制导系统。

惯性导航系统通常简称为惯导系统。它有平台式与捷联式两种类型。以陀螺仪和加速度计为敏感器(敏感元件)的惯导系统,是一种完全自主式的系统,它不依赖外界任何信息,也不向外辐射任何能量,具有隐蔽性、全天候和全球导航能力。惯导系统所提供的位置、速度等导航信息能达到相当高的精度,其定位精度一般为

1n mile/h(圆概率误差^①,全书以下同),速度精度一般为 1m/s(标准偏差,全书以下同)。还能给出运载体的姿态和航向信息,其姿态精度可达 0.1° 的量级,航向精度可达 0.2° 的量级。而且,惯导系统除了完成导航任务这一主要功能外,往往都与多种系统交连。例如在飞机上,它与飞行控制系统、武器攻击系统、地形跟随匹配系统等交连,从而极大地提高了飞机的战术技术性能。

因此,惯性导航系统成为现代飞机、大型舰只和潜艇的一种重要导航设备,而惯性制导系统则成为地地战术导弹、战略导弹、巡航导弹和运载火箭的一种重要制导设备。尤其对体现国防尖端科学技术水平的三大战略武器——洲际导弹、远程轰炸机和核潜艇来说,如果没有精确可靠的惯导系统,就不可能发挥其应有的战略威慑作用。

现代战争是立体战争,要求各军、兵种协同作战。对陆军而言,为在复杂的地理环境和各种外界干扰条件下迅速地调动地面部队,有效地发挥地面火力,也需要精确的定位和定向。于是,惯导系统被应用到陆军炮兵测位和地面战车导航。

目前,惯导系统的应用范围还扩展到众多领域。以惯导系统为基础发展起来的惯性测量和惯性定位系统,可以用于大地测量、地图绘制、海洋调查、地球物理勘探、管道铺设选线、石油钻井定位和机器人等需要大范围测量及精确定位的场合。

三、陀螺仪的发展概况

陀螺仪的发展是从刚体转子陀螺仪开始的。对于高速旋转刚体的力学问题,早在 18 世纪,欧拉、拉格朗日等许多学者都作了详细的研究,并指出这种刚体具有进动性和定轴性。尤为突出的是,俄国数学家和物理学家欧拉发表的《刚体绕定点运动理论》这一名著,导出了刚体绕定点转动的动力学方程,为陀螺仪理论奠定了基

^① 圆概率误差为表示惯导系统定位精度的统计量,单位常用 n mile/h(1n mile=1.852km)。当沿 2 根相互垂直的坐标轴的定位误差都服从正态分布且彼此独立时,以平均位置为圆心作一个圆,使定位误差数据中的 50% 落在圆内,这个圆的半径称为圆概率误差(CEP)。