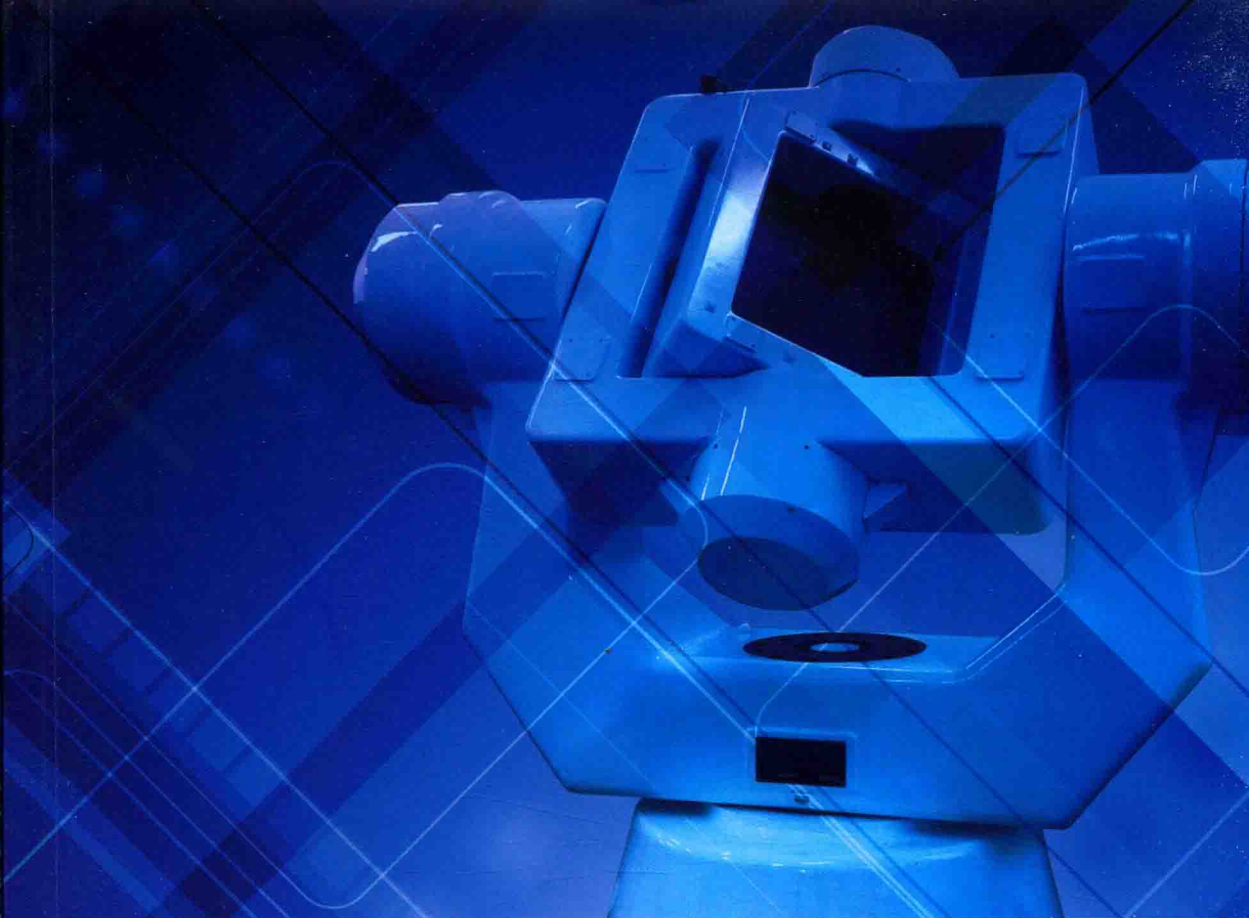




惯导测试设备的 检测及试验技术

任顺清 陈希军 王常虹 著

Measurement and Test
Technology of Inertial Navigation Test Equipment



科学出版社

惯导测试设备的检测 及试验技术

任顺清 陈希军 王常虹 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书立足于惯导测试设备自身精度的检测方法以及惯性仪表在惯导测试设备上的试验方法,主要介绍惯导测试设备的轴系回转误差、轴线垂直度和相交度、角位置误差的检定、误差机理分析以及误差分离技术,角速率检测,设备位姿对准技术,惯性仪表在单轴转台、三轴转台、精密离心机、线振动台的试验技术。

本书可作为惯导测试设备相关的研发与试验人员、从事几何量测量技术的相关人员的参考用书,也可以作为惯性测试技术专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

惯导测试设备的检测及试验技术/任顺清,陈希军,王常虹著. —北京:科学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-03-054968-6

I. ①惯… II. ①任… ②陈… ③王… III. ①惯性制导—测试设备—检测②惯性制导—测试设备—试验 IV. ①V448.131-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 259274 号

责任编辑:张震姜红 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 11 月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:470 000

定价:139.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

惯性导航已在航空、航天、导弹领域得到广泛的应用。惯性仪表包括陀螺仪、加速度计以及由它们组成的惯性组合，是惯性导航的核心部件。要提高惯性导航的精度，必须提高惯性仪表的精度。而在惯性仪表的研制过程中必须要用测试设备对惯性仪表进行测试和评估，才能确定其精度等级。因此测试设备本身的精度和采用的测试方法，对惯性仪表的测试精度、使用精度和评估有直接的影响。

多年来，我国科技工作者一直在惯性测试技术的两个方面进行不懈的探索。一是如何研制出高精度的惯导测试设备，二是如何利用测试设备准确测试出惯性仪表的精度。在近 30 年的时间里，哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心在这两方面都进行了很多的研究工作，不但成功研制了一批多种类型的单轴转台、三轴转台、精密离心机等高精度惯导测试设备和卫星地面试验设备，而且在这些设备研制和使用过程中，对其本身的检测技术和惯性仪表在测试设备上的试验技术积累了丰富经验。该著作是任顺清教授、陈希军副教授和王常虹教授总结多年惯导测试设备的研究经验，并加以提升后共同完成的。

作者在该著作中给出了惯导测试设备技术指标的检测方法，包括轴系回转误差、轴线间垂直度和平行度、轴线相交度、角位置误差及机电误差分离技术、与角速率相关的误差、测试设备对准误差等，还给出了惯性仪表在单轴转台、三轴转台、精密离心机、线振动台上的测试方法，有效补偿和规避了测试设备误差对惯性仪表标定精度的影响，提高了惯性仪表的测试精度。该著作丰富了惯导测试设备的检测方法，深化了惯性仪表在测试设备上的试验技术。该著作对从事惯导测试技术研究和试验的工程技术人员来说是一本具有很强实用价值的参考书。

强文义

2017 年 7 月 20 日

前 言

惯性导航（以下简称惯导）是一种自主式导航系统，在航空、航天、导弹等领域有着广泛的应用。惯性仪表，包括陀螺仪、加速度计以及由它们组成的惯性测量系统，是惯性导航的核心部件，要提高惯性导航的精度，必须提高惯性仪表的精度。在惯性仪表研制过程中，必然要用测试设备对惯性仪表进行测试、试验与评定，因此，测试设备的精度对惯性仪表的测试精度与评估有直接的影响，进而影响惯性仪表的使用精度。目前惯性仪表的测试精度的提高，对测试设备的精度要求越来越高，对测试设备的检测精度与评估的要求也越来越高，同时也对惯性仪表的试验方法、试验精度提出了更高要求。本书是针对惯导测试设备本身误差的检测技术及其如何应用测试设备进行惯性仪表的试验而撰写的。

惯导测试设备用来提供精密的角度基准、角速率基准、比力基准、角加速度基准等，为给各种各样的加速度计、陀螺仪及由它们组成的惯性测量系统提供精密的输入量，然后根据它们的输出量来辨识惯性仪表的误差模型系数，以衡量惯性仪表的精度水平，确定惯性仪表能否满足导航和制导的精度等级要求。惯导测试设备本身的精度水平决定了惯性仪表的测试精度，所以对惯导测试设备的各项技术指标进行准确的检测，意义非常重大。同时，如何使用惯导测试设备准确规避各种环境因素、误差源，提高惯性仪表的测试精度，也对惯性测试技术提出了更高要求。

20 世纪 60 年代末，我国开始研制惯导测试设备。哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心成立已近 30 年，在研制惯导测试设备的过程中，经过几代人的努力，积累了一些与惯导测试设备本身误差检测技术和惯性仪表在测试设备上的试验技术相关的经验。本书是转台课题组的老师和参与转台研制与试验的历届研究生在惯导测试设备的研究与开发过程中集体智慧的结晶。

本书涉及的研究工作得到了哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心承担的很多科研项目的支持与资助。感谢原总装备部预研基金项目“测试设备关键技术”（项目编号：51309050202）、“半球谐振陀螺测试技术”（项目编号：51309050601）等对本书持续大力的资助。感谢众多横向项目的支持，为本书提供了大量的实测数据，感谢空间控制与惯性技术研究中心的全体老师对本书的持续支持，感谢转台研制的合作单位的大力支持。

作者自 20 世纪 90 年代初开始从事测试设备的精密检测技术，参与了多台测试设备的检测与机电联调工作，在继承老一辈科研工作者成果的基础上，将实践中获得的一些新知识、感想与研究成果加以凝练，并在 13 年讲授“惯导测试设

备的检测与试验技术”研究生课程的过程中不断对本书进行检验与完善，终于成稿。

本书由强文义教授主审，强老师对本书提出了很多宝贵的修改意见，谨表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，真诚欢迎读者批评指正。

任顺清

2017年3月20日于哈尔滨

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 惯导测试设备综述	3
1.1.1 惯导测试设备的发展现状	3
1.1.2 对惯导测试设备的要求	4
1.1.3 惯导测试设备的分类	6
1.1.4 国内外惯导测试设备的差距	14
1.2 惯导测试设备的检测仪器及检测方法	15
1.2.1 检测仪器	15
1.2.2 检测方法	16
1.3 惯性仪表试验方法综述	17
1.3.1 惯性仪表各种试验发展状况	19
1.3.2 测试技术的差距与发展趋势	22
1.3.3 测试技术发展的必要性	23
1.3.4 对惯性仪表测试技术的建议	23
1.4 本书内容结构	24
参考文献	25
第 2 章 基本知识	26
2.1 向量运算的基本知识	26
2.2 姿态矩阵的定义及基本性质	28
2.3 小角度变换矩阵的性质	35
2.4 齐次变换矩阵的性质	37
2.4.1 姿态矩阵与位姿矩阵	37
2.4.2 旋转和平移的综合变换阵	38
2.4.3 H 变换的有序性	40
2.4.4 H 变换的相对性	41
2.4.5 H 变换的单向耦合性	41
2.4.6 小角度及平移变换的无序性	42
2.4.7 小角度旋转变换与小平移变换的解耦性	44

2.4.8 小角度旋转与小平移变换的相加性	44
2.5 周期函数的傅里叶级数	45
2.6 本章小结	46
参考文献	46
第3章 轴系回转误差的测试方法及应用	47
3.1 有关回转误差的术语	47
3.2 自准直仪-平面反射镜测试倾角回转误差	51
3.3 轴系回转误差测试数据中的一次谐波	55
3.3.1 一次谐振的机理分析	55
3.3.2 一次谐振的分离	57
3.3.3 一次谐振的测试实例	59
3.4 水平仪法测试竖直轴系的倾角回转误差	63
3.4.1 水平仪测量竖直轴系铅垂度的工作原理	63
3.4.2 水平仪测量倾角回转误差的四种数据处理方法	67
3.4.3 用水平仪和自准直仪测试回转误差方法的比较	73
3.5 径向、轴向回转误差的测试方法	74
3.5.1 标准球测量轴系的径向回转误差	74
3.5.2 轴向回转误差的测试方法	76
3.6 回转误差在球度检测补偿中的应用	77
3.6.1 气浮球的调心	80
3.6.2 球度的测试及误差分离	82
3.7 回转误差对精密离心机比力输入的影响分析	85
3.7.1 回转中心误差与回转轴心误差的计算	86
3.7.2 主轴一次谐波运动对离心机工作半径的影响	87
3.7.3 主轴回转误差的测试	88
3.7.4 回转误差对向心加速度的影响	90
3.7.5 倾角回转误差对重力加速度输入的影响	91
3.8 本章小结	95
参考文献	95
第4章 垂直度和平行度的测试技术	96
4.1 线和面的引出	96
4.2 打表法测量轴线垂直度	98
4.3 水平仪引出竖直轴线与平板法线	100
4.3.1 水平仪测试双轴转台的轴线垂直度	100
4.3.2 非整周旋转轴系竖直轴线铅垂度的测试与调整原理	101

4.3.3 平板对水平面的平行度	102
4.3.4 卧式双轴转台的轴线垂直度测试	104
4.4 水平仪测试卧式三轴转台的垂直度	105
4.4.1 中环轴轴线与外环轴轴线垂直度检测	106
4.4.2 内环轴轴线与中环轴轴线垂直度检测	107
4.5 水平仪测试立式三轴转台的垂直度	108
4.6 两竖直回转轴线的平行度测试	112
4.7 平面反射镜翻转法测量轴线的垂直度	116
4.8 平动导轨垂直度检测	121
4.8.1 水平平动导轨水平度测试方法	122
4.8.2 竖直导轨铅垂度测试方法	124
4.8.3 两水平导轨垂直度的测试	125
4.8.4 导轨垂直度的测试误差分析	127
4.9 本章小结	128
参考文献	129
第 5 章 相交度的测试技术	130
5.1 相交度的定义	130
5.1.1 双轴转台的轴线相交度	130
5.1.2 三轴转台的轴线相交度	131
5.1.3 圆弧导轨的轴线相交度	131
5.2 打表法测试轴线相交度	132
5.2.1 中环轴轴线与外环轴轴线的相交度测试	133
5.2.2 内环轴与中环轴、内环轴与外环轴轴线相交度测试	133
5.3 十字靶标法测试轴线相交度	136
5.4 心轴法测试三轴转台的轴线相交度	141
5.5 两十字靶标测试小型三轴转台的轴线相交度	142
5.5.1 测试系统及相应坐标系	142
5.5.2 相交度测试原理	144
5.5.3 相交度测试实例	146
5.6 细丝法测试三轴转台的轴线相交度	147
5.6.1 中环轴有通孔时相交度测试	147
5.6.2 中环轴无通孔时相交度测试	151
5.7 圆弧导轨相交度测试方法	153
5.8 本章小结	157
参考文献	157

第 6 章 角位置误差的检定技术	158
6.1 角度的计量单位	158
6.2 分度误差的表示方法	159
6.2.1 刻线误差	159
6.2.2 间隔误差	160
6.2.3 间隔累积误差	161
6.3 圆分度检定器件	162
6.3.1 正多面棱体	162
6.3.2 多齿分度台	163
6.3.3 自准直仪	164
6.4 圆分度及其检定	165
6.5 角位置误差检定的递推算法	171
6.6 部分组合序列的选定问题	173
6.6.1 素数面棱体检定的序列组合问题	173
6.6.2 合数面棱体检定的序列组合问题	175
6.7 用棱体检定角位置误差时符号的确定	178
6.8 角位置误差的重复性	183
6.9 本章小结	184
参考文献	185
第 7 章 测角系统的机电误差分离技术	186
7.1 圆感应同步器测角系统的机电误差分离技术	186
7.1.1 圆感应同步器测角系统的组成	187
7.1.2 测角误差的检测方法	187
7.1.3 测角系统的主要误差源	189
7.1.4 机械误差与电气误差的分离方法	191
7.1.5 误差信号的正交性与一次分离技术	194
7.1.6 机电误差的完整模型与误差分离技术	197
7.1.7 非整周旋转的感应同步器测角系统的误差分离技术	199
7.2 圆光栅测角系统的机电误差分离技术	203
7.2.1 位姿误差矩阵的推导	203
7.2.2 误差机理分析	205
7.2.3 算例验证	207
7.3 直尺光栅用于大直径的测角系统	209
7.4 本章小结	211
参考文献	211

第 8 章 角速率的测试方法	213
8.1 角速率误差对离心机向心加速度的影响	213
8.2 角速率精度与角速率平稳性	214
8.2.1 测试方法	214
8.2.2 误差分析	216
8.3 角速率重复性检测	217
8.4 角速率分辨力	217
8.5 角速率对称性	219
8.6 波形失真度	219
8.7 最大转速和最大角加速度	220
8.8 角速率漂移率	221
8.9 转速上升时间和下降时间	221
8.10 本章小结	221
参考文献	222
第 9 章 测试设备的位姿对准技术	223
9.1 重力加速度矢量和地球自转角速度矢量的确定	223
9.2 双轴位置转台的方位对准	224
9.2.1 棱镜、平面反射镜对北法	224
9.2.2 直接对北法	225
9.2.3 基点、平面反射镜对北法	225
9.3 三轴转台的姿态对准	226
9.3.1 立式三轴转台的姿态对准	227
9.3.2 卧式三轴转台的姿态对准	228
9.4 导引头仿真转台的对准	229
9.5 雷达仿真转台的对准	235
9.5.1 初始位姿对准误差的测试方法与位姿对准方案	236
9.5.2 位姿对准方案的实际应用验证	242
9.6 五轴转台的位姿对准	244
9.6.1 测试系统简介	245
9.6.2 三轴转台与双轴转台的位置对准	245
9.6.3 两偏航轴的姿态对准	249
9.7 本章小结	251
参考文献	251
第 10 章 惯性器件在单轴转台上的试验技术	252
10.1 惯性器件的基本技术指标与误差模型	252
10.1.1 惯性器件的基本技术指标	252

10.1.2 惯性器件常用的误差模型·····	253
10.2 单加速度计重力场测试技术·····	255
10.2.1 重力场下等比力法旋转测试·····	256
10.2.2 重力场等角位置测试·····	257
10.2.3 测试误差分析·····	258
10.3 正交双加速度计重力场测试技术·····	260
10.3.1 正交双表误差模型系数的测试系统·····	260
10.3.2 加速度计误差的标定模型·····	261
10.3.3 角位置误差对标定精度的影响·····	262
10.3.4 正交双表的标度因子算法·····	262
10.3.5 正交双表两种安装位置的角误差分离技术·····	264
10.3.6 加速度计误差模型系数的辨识与误差分析·····	266
10.4 陀螺仪测试技术·····	271
10.4.1 陀螺标度因子测试·····	271
10.4.2 与标度因子相关的参数测试·····	274
10.5 本章小结·····	277
参考文献·····	277
第 11 章 惯性器件在三轴转台上的试验技术·····	278
11.1 陀螺仪的极轴翻滚试验·····	278
11.2 陀螺仪的单轴速率、双轴位置滚转试验·····	281
11.3 陀螺仪的单轴位置、双轴速率滚转试验·····	283
11.4 陀螺仪的三轴速率试验·····	287
11.5 基于三轴转台误差分析的惯性组合标定方法·····	291
11.5.1 惯性组合标定模型的建立·····	291
11.5.2 标定方案设计·····	295
11.5.3 仿真分析·····	299
11.6 本章小结·····	302
参考文献·····	302
第 12 章 惯性仪表在精密离心机上的测试方法·····	303
12.1 精密离心机的主要误差源·····	303
12.2 惯性仪表的输入量的计算·····	310
12.2.1 方位轴位置状态下的比力计算·····	310
12.2.2 反转平台同步反转的比力计算·····	312
12.2.3 方位轴位置状态下的角速率计算·····	315
12.2.4 反转平台轴同步反转的角速率计算·····	315

12.3 加速度计高阶误差模型系数的标定	315
12.3.1 加速度计的误差模型	315
12.3.2 加速度计的安装	316
12.3.3 加速度计的误差模型的 12 位置标定法	317
12.3.4 12 位置标定法的综合	329
12.4 振动整流法辨识加速度计非线性误差模型系数	330
12.5 本章小结	333
参考文献	333
第 13 章 惯性仪表在线振动台上的测试方法	335
13.1 线振动台的误差及测试	335
13.1.1 寄生位移的测试方法	335
13.1.2 台面与运动直线的垂直度	337
13.1.3 振动加速度稳定度	338
13.2 PIGA 在线振动台上的测试方法	341
13.2.1 线振动台振动整周期标定方法	341
13.2.2 PIGA 进动整周期标定方法	345
13.3 本章小结	350
参考文献	350
索引	352

第1章 绪 论

为了提高导弹武器的打击能力与命中精度,必须对惯性仪表提出更高的要求。仅靠持续改进惯性仪表设计与制造工艺来提高其精度的方法,在实践中遇到了制造精度极限的限制。结构和工艺的改进将使仪表结构变得更为复杂,还给生产、装配、调试等环节带来诸多不便。因此,依靠对仪表的误差机理分析,建立误差模型方程,通过惯性测试技术准确评价其性能,最后经误差补偿与抑制来进一步提高其使用精度变得更有理论意义与实用价值。通过对测试结果的利用,原来被认为不合格的产品恢复了应用价值。也正由于有这种趋势,设计人员的指导思想由原来片面追求降低仪表的绝对误差转为保证仪表的稳定性、最大限度地减少仪表的随机误差。目前,越来越被重视的惯性仪表及系统的测试与试验技术是以高精度的惯导测试设备以及产生任务剖面内精确试验环境的设备为基础的,所以各国不惜投入高昂费用来建设高精度的测试设备和测试试验环境以及研究更加先进的试验方法。

惯导测试设备(inertial guidance test equipment, IGTE)用来产生精密的姿态基准、角速率基准、比力基准以及其他的温度、湿度、气压等环境基准和条件,为各种类型的加速度计、陀螺仪及由它们组成的惯性导航系统提供精密的输入量,然后根据它们的输出将惯性仪表的误差模型系数辨识出来,以衡量惯性仪表的精度水平,确定惯性仪表能否满足导航和制导的精度要求。

仿真设备通常包括飞行运动仿真(flight motion simulator, FMS)、目标运动仿真(target motion simulator, TMS)和负载仿真(load simulator)等设备,主要用于复现载体姿态、模拟目标的运动和提供气动铰链力矩等的机动载荷模拟环境。仿真设备针对的运动载体对象可以是飞机、航天器、舰船、地面机动车辆及导弹等武器系统,可以模拟单个载体的姿态运动,也可以模拟多个载体间的相对运动,如目标跟踪、交会过程等。接入实际部件以取代相应部分数学模型的半实物仿真系统,可以使试验更加接近实际,从而能够获得更确切的信息;将超载、振动、温度、气压、湿度等多种环境因素融入测试过程,有助于深入研究被测物体

实际工作环境下的性能特性。近些年来,惯导测试与仿真试验技术的应用范围在不断拓展,技术水平不断提升,在军事、民用高科技领域发挥着越来越重要的作用^[1]。

如何检测、综合评价这些高精度设备的技术指标,如何正确使用这些设备来测试、评估惯性仪表的性能参数,是目前亟须解决的问题。

有的惯导测试设备有多个轴系,惯性仪表测试标定时一般安装在设备的末端,设备给定的标称运动参数与实际的运动参数之间有误差,这样给惯性仪表的输入激励带来误差,从而也将带来惯性仪表误差模型系数的标定误差。设备的误差主要由各个轴系间的位姿误差、各个轴系本身的位姿精度以及运动参数的误差综合引起。所以对各个轴系、轴系间的位姿误差以及运动参数误差必须进行检测与评估,确保受控后的运动参数的准确度。因此,测试设备的自身精度检测与评估也是一项非常重要的技术。

有了先进的高精度惯导测试设备,还得有先进的测试技术相配合,才能更加准确地标定惯性仪表的误差模型系数,提高其使用精度。在惯性仪表的设计、制造和应用的全寿命过程中,需要进行各种试验、标定与测试,一般分为研究性测试、鉴定性测试和应用性测试。惯性测试的目的就是要揭示惯性仪表的误差机理,对误差系数进行测试,明确实际应用过程的性能指标,为改善惯性仪表的性能、克服惯性仪表自身的不足提供依据^[2]。

随着惯性仪表精度的不断提升,其性能指标逐渐接近其精度极限,若想提高10%的制造精度,可能要付出10倍的努力。因此,深入研究惯性仪表误差机理,建立精确完备的误差模型,采用适当的测试设备激励出惯性仪表的误差,并对其进行精确辨识后加以补偿,有可能做到多付出10%的努力,收到提高一倍精度的效果。

目前国内惯性仪表在研制方面进步很快,但在测试方法、测试精度方面的进步却相对滞后。因此,大力开展惯性仪表的测试技术与试验验证评估技术,促进惯性测试技术的跨越式发展,提升惯性技术的整体水平,具有重要的理论意义与军事意义。

本书将针对惯导测试设备本身的主要技术指标的检测技术进行展开,以及对如何用惯导测试设备来标定惯性仪表的误差模型系数,如何克服设备误差对惯性仪表标定精度的影响等方面进行研究。

1.1 惯导测试设备综述

1.1.1 惯导测试设备的发展现状

随着先进的飞行器控制、导航制导、目标探测技术的发展,惯导测试与运动仿真技术和相应的试验设备技术受到广泛的重视,成为发展中不可或缺的地面试验手段。惯导测试设备一般有单轴转台、双轴转台、三轴转台、角振动台、线振动台、精密离心机等。按照功能分为位置转台、速率转台和伺服转台。以下根据测试设备的分类情况来综述其发展状况。

20 世纪 50 年代,美国德雷伯实验室为惯性级陀螺仪专门研制了高精度的测试设备,现在欧美大多数航天、航空等国防项目承制企业均拥有一个或多个测试和半实物仿真实验室,1974 年,著名的 Contraves Goerz Corporation (CGC) 成立,它与 20 世纪 60 年代初期建立的美国 Carco Electronics 公司成为当时实力最强的两家专业化惯导测试与运动仿真设备研制、生产企业。进入 21 世纪,CGC、Carco Electronics、Benton 公司和瑞士 Acutronic 公司于 2005 年组建了全球规模最大、实力最强的专业化惯导测试与运动仿真研制、生产企业——Acutronic 公司,该公司采用了材料与工艺新技术、测量与控制新技术、数字化新技术,进一步提升了产品的质量与可靠性,代表了当前的国际先进水平,在市场上有较高的占有率,中国也购买了该公司的一些产品。其他专业企业还有法国的 Wulfert 公司、美国 Ideal Aerosmith 公司等,产品各具特色。近几年来,Acutronic 公司为微机械惯性敏感器件及系统的测试开发了小型化、高动态的测试设备。

国内对惯导测试设备与技术的研究工作起步于 20 世纪 60 年代末。在研制这些测试设备的过程中,哈尔滨工业大学、北京航空精密机械研究所(航空三〇三所)、中国船舶工业第 6354 研究所等单位起步最早,在 20 世纪 70 年代开始研制惯导测试设备,其专业特长和业绩在国内也最为突出,同时也培养了专门研制惯导测试设备的人才队伍,为后续的发展奠定了良好的基础。目前,国内涉足此类设备研制生产的单位有十多家,分属不同行业。精密轴系、角度测量、低转速驱动与运动控制等专项基础技术在 20 世纪 80 年代得到了快速的发展,在 20 世纪 90 年代取得了较大突破,并建设了一批半实物仿真系统和惯性测试实验室,如射频制导、红外制导半实物仿真系统和歼击机工程飞行仿真器等,有关惯导测试设备技术的专著也应时出版^[3],这些为国防型号任务提供了有力的技术支持。随着应用范围的拓展,此类设备的种类和生产规模也逐步增加和扩大。据估计,各种

仿真测试设备国内年需求量超过千台（套），其中一些通过各种渠道从国外引进。从总体上看，国内的研制水平在有些技术指标方面已经接近或达到了国际领先水平。由于基础技术储备不足和专业化生产基础薄弱，在一些关键的基础技术单元、可靠性、高动态的性能方面与国外先进水平有一定的差距^[4]。

1.1.2 对惯导测试设备的要求

高精度惯性仪表是一种极精密的仪器，在惯性技术中，传统陀螺仪以旋转质量惯性为特征，加速度计以平移或旋转质量惯性为特征，激光陀螺仪、光纤陀螺仪以光的惯性为特征，原子陀螺仪以物质波为特征。不管是传统的还是新兴的惯性仪表，陀螺仪和加速度计都是惯性导航系统或惯性制导系统中不可缺少的核心传感器，惯性测量装置就是由它们组成的。其中，陀螺仪用来检测运载体在惯性空间中的角运动，加速度计用来检测运载体运动时的比力，进而解算出相关的运动信息。惯导测试设备则是评价惯性仪表的工具。没有高精度的现代化测试设备，就不可能评定惯性仪表的实际工作性能，也不可能为改进仪表设计、制造工艺以及误差补偿提供充分可靠的依据。因此，测试设备的研究也是惯性技术的一个重要组成部分。

对惯导测试设备的要求大致可以归纳为以下 3 个方面，其中有通常标准测试设备的共性要求，也有惯性仪表测试设备的一些特殊要求^[5]。

1. 测试原理方面的要求

惯导测试设备的基本任务在于通过测试试验与数据处理估计、分离惯性仪表的标度因子、零位偏置和各项误差模型系数。惯性仪表的输出是比力、角速度或其他运动参数、环境参数的函数，所以在测试中必须给惯性仪表提供精确的运动参数、环境参数的输入，然后通过其输入和输出来辨识相关的误差模型系数。这是惯导测试设备区别于一般仪器设备的特点。

比如，为了测定惯性仪表的静态误差，测试设备必须能够相对地球重力加速度方向（当地垂线）和地球自转角速度方向（地球极轴）精确定位，或者按照某种已知的规律相对这些基准改变方位。这样使被测试的惯性仪表得到精确的比力输入和角速率输入。

不同测试原理和方法，对测试设备有不同的要求。例如，陀螺静态漂移误差测试通常有 3 种不同的测试方法：在力矩反馈法的位置试验中，只需双轴位置倾斜转台即可；在力矩反馈法的翻滚试验中，需要速率转台；在伺服试验中，则需要伺服转台。