

船用惯性导航系统 海上试验

Sea Experiment for Marine Inertial Navigation System

郑梓祯 刘德耀 等 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

船用惯性导航系统海上试验

Sea Experiment for Marine Inertial Navigation System

郑梓祯 刘德耀 等编著
蔡迎波 马驰新

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

船用惯性导航系统海上试验/郑梓桢等编著. —北京:
国防工业出版社, 2006.1

ISBN 7-118-04000-2

I. 船... II. 郑... III. 航海导航: 惯性导航—试
验 IV. U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 070159 号

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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 167 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

惯性导航系统是利用惯性敏感器、基准方向及最初位置信息来确定运载体的姿态、位置和速度的自主式推算导航系统和空间基准保持系统,由于它完全依靠自身设备自主地进行载体导航,具有隐蔽性强、全天候、不受地域限制和人为外部干扰等突出优点,在国防现代化方面占有十分重要地位,对于以军事为目的的运载体具有特殊的使用价值。

作为惯性导航系统科研进程重要环节的海上试验鉴定,随着实践经验的积淀,其技术日趋成熟。本书是为了适应国防科研和惯性技术发展的需要,系统、深入地总结惯性导航系统试验理论和技术,以期指导试验活动为目的而编写的。

惯性导航是一门新兴的多学科的综合技术,惯性导航系统具有精度高、使用周期长、使用地域广阔和隐蔽性强等特点,在接近其实际使用条件下对系统进行试验鉴定具有很大的难度,是一项复杂的系统工程和人机工程,为此必须进行精心的试验设计和组织实施。

本书在对船用惯性导航系统基本理论、技术性能和使用特点进行系统分析的基础上,全面阐述惯性导航系统海上试验全过程的相关理论和实用技术,可供从事惯性系统研究、生产、使用和试验鉴定各类技术人员使用,亦可作为高等院校相关专业教学参考书。

本书由郑梓桢任主编,刘德耀任副主编,第3章由蔡迎波编写,第4章由马驰新编写,第5章由刘德耀编写,其余各章由郑梓桢编写。哈尔滨工程大学张树侠教授、中国舰船研究院侯正明研

究员和海军装备研究院舒长胜研究员对书稿进行了审查,提出了许多宝贵意见和建议;本书的出版得到天津航海仪器研究所刘玉峰研究员和张树侠教授的推荐,国防工业出版社王华编辑的大力支持和帮助,这里一并致谢。

编 者

2004 年 4 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 惯性技术的发展历程	1
1.1.1 牛顿惯性定律	1
1.1.2 核心惯性器件陀螺仪	1
1.1.3 船用陀螺罗经	2
1.1.4 第一套惯性导航系统的诞生	2
1.1.5 高精度惯性组合系统的研制	3
1.1.6 捷联式惯性系统的崛起	3
1.1.7 当代中国的惯性技术	4
1.2 惯性导航系统简述	4
1.2.1 基本概念	4
1.2.2 地位与作用	6
1.3 海上试验在系统科研中的地位	7
1.3.1 系统海上试验的特性	7
1.3.2 在装备科研中的地位	10
第 2 章 惯性导航系统原理与海上试验要求	11
2.1 惯性技术基础理论	11
2.1.1 惯性器件	11
2.1.2 惯性测量坐标系	12
2.1.3 地球形状及重力场特性	13
2.1.4 比力测量	15
2.1.5 舒勒调谐理论	16
2.2 惯性导航基本理论与技术	18

2.2.1	惯性导航的基本原理	18
2.2.2	无阻尼惯性导航系统	23
2.2.3	惯性导航系统的阻尼	28
2.2.4	惯性导航系统的初始对准	29
2.2.5	惯性导航系统的工作状态设置	31
2.2.6	惯性导航系统的校准	31
2.2.7	捷联惯性导航系统	33
2.3	惯性导航系统海上试验要求	35
2.3.1	试验载体	36
2.3.2	舰上安装	36
2.3.3	试验航区	37
2.3.4	试验环境	37
2.3.5	外部信息	37
2.3.6	数据采集和试验结果评定	38
第3章	惯性导航系统海上试验设计	39
3.1	系统固有属性及海上试验特点	39
3.1.1	惯性导航系统固有属性与试验条件	39
3.1.2	系统海上试验的特点	44
3.2	系统海上试验评价指标体系	48
3.2.1	惯性导航系统指标体系	48
3.2.2	试验评价指标体系的确定	50
3.3	海上试验设计	52
3.3.1	试验系统的构建	52
3.3.2	试验技术设计	56
3.3.3	试验中异常事件的处理	62
第4章	试验的安装标校	65
4.1	系统装舰技术要求	65
4.1.1	对安装基准的要求	65
4.1.2	对载舰安装标校的要求	65

4.2	标校技术设计	68
4.2.1	标校环境的选择	68
4.2.2	测量模式设计	69
4.2.3	标校精度要求	70
4.3	标校原理与技术	70
4.3.1	方位标校	70
4.3.2	水平标校	75
4.3.3	综合标校	77
4.4	安装标校技术问题及处理	77
4.4.1	几项关键技术	77
4.4.2	关键技术问题的处理	77
4.5	方位标校专用工装	78
4.5.1	方位标校难点分析	78
4.5.2	方位标校工装的设计	79
4.5.3	方位标校工装的标定	80
4.6	综合标校系统	81
4.6.1	系统的组成与功能	81
4.6.2	综合标校的工程实施	82
第 5 章	变形抑制与测量	83
5.1	载体变形分析	83
5.1.1	概述	83
5.1.2	舰船变形分析	83
5.2	变形对试验影响的消除	86
5.2.1	变形对系统精度试验发生影响	86
5.2.2	消除船体变形影响的技术途径	87
5.3	舰船永久变形测量	87
5.3.1	测量环境	87
5.3.2	测量方法	88
5.4	消除船体变形影响的实用技术	89
5.4.1	采用联合安装基座抑制变形	89

5.4.2	联合安装基座设计模式	89
5.5	联合安装基座的变形测量	91
5.5.1	重要性及技术方案	91
5.5.2	联合基座变形测量系统	92
5.6	安装基座间相对变形的实时测量	94
5.6.1	适用范围	94
5.6.2	变形测量方案	95
第 6 章	海上试验项目和方法	99
6.1	海上试验项目	99
6.1.1	海上试验性质分类	99
6.1.2	海上试验项目	100
6.2	试验航次的确定	103
6.2.1	确定试验航次的依据	103
6.2.2	海上试验航次的确定	104
6.3	被试系统安装调试与交验	106
6.3.1	被试系统进场条件	106
6.3.2	被试系统的安装调试	107
6.3.3	被试系统的交验	107
6.4	码头系泊试验方法	107
6.4.1	常规性检查	107
6.4.2	系统的对接试验	109
6.4.3	精度试验	109
6.5	海上航行试验方法	109
6.5.1	精度试验	110
6.5.2	环境试验	115
6.5.3	使用性能考核试验	118
6.5.4	可靠性和维修性试验	121
6.5.5	海上试验的工程实施	123
第 7 章	海上试验测量与数据录取	125

7.1 测量参数的确定	125
7.1.1 系统输出信息分析	125
7.1.2 试验测量参数的确定	126
7.2 试验测控系统的构建	127
7.2.1 测控系统的地位与作用	127
7.2.2 测控系统的构成	128
7.3 海上试验测量技术	128
7.3.1 用光学经纬仪测量舰船航向	128
7.3.2 舰船瞬时姿态测量技术	131
7.3.3 舰位的实时测量	137
7.3.4 舰船速度测量	143
7.4 试验的数据采集	144
7.4.1 海上试验数据采集的特点	144
7.4.2 海上试验数据采集要求	146
7.5 海上试验数据的同步录取	146
7.5.1 试验数据同步录取模式	146
7.5.2 一种实用的试验数据同步录取方案	147
第8章 试验结果的分析与综合	150
8.1 概述	150
8.1.1 试验结果分析的主要任务	150
8.1.2 系统误差特性研究的重要性	150
8.2 惯性导航系统误差特性	151
8.2.1 系统的三种振荡周期	151
8.2.2 系统误差特性分析	153
8.2.3 系统误差的相关特性	155
8.3 试验结果的分析与综合	156
8.3.1 试验结果分析的基础	156
8.3.2 海上试验条件分析	157
8.3.3 被试系统运行情况分析	158
8.3.4 试验误差曲线分析	159

8.3.5 试验结果综合分析	161
第9章 试验数据处理与结果评定	163
9.1 试验数据统计方式的确定	163
9.1.1 试验数据统计方式分析	163
9.1.2 试验数据统计方式的确定	163
9.2 精度评定方法	164
9.2.1 通则	164
9.2.2 位置精度评定方法	164
9.2.3 首向精度评定方法	166
9.2.4 水平精度评定方法	168
9.2.5 水平速度精度评定方法	169
9.2.6 角速度精度评定方法	170
9.3 使用性能评定方法	170
9.3.1 使用性能试验项目	170
9.3.2 使用性能评定方法	170
9.4 可靠性与维修性评定方法	172
9.4.1 平均故障间隔时间试验	172
9.4.2 平均修复时间试验	173
9.5 海上试验结果的综合评定	173
9.5.1 试验结果综合评定的基础	173
9.5.2 试验结果综合评定方法	173
9.6 试验结果报告	174
9.6.1 给出试验结论遵循的原则	174
9.6.2 试验结论的给出	175
9.6.3 试验结果报告编制原则	177
9.6.4 试验结果报告的内容	178
第10章 海上试验发展前景展望	179
10.1 船用惯性导航系统的发展趋势	179
10.1.1 20世纪惯性技术的发展	179

10.1.2 21 世纪惯性导航系统发展预测	180
10.2 试验方法的改革与创新	184
10.2.1 当今试验方法分析	184
10.2.2 试验方法的改革创新	187
参考文献	197

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Developing Experience of Inertial Technology	1
1.1.1 Law of Inertia of Newton	1
1.1.2 Gyroscope of Core Inertial Component	1
1.1.3 Marine Gyroscopic Compass	2
1.1.4 Naissance of the First Inertial Navigation System	2
1.1.5 Development of High Accuracy Inertial Assembled System	3
1.1.6 Growing up of Strap-down Inertial System	3
1.1.7 Now China Inertial Technology	4
1.2 Brief Introduction of Inertial Navigation System	4
1.2.1 Basic Concept	4
1.2.2 Status in Marine Navigation and weapon Arming	6
1.3 Sea Experimental Status in systematic Scientific Research	7
1.3.1 System Characteristic of Sea Experiment	7
1.3.2 Sea Experimental Status in Arming Scientific Research	10
Chapter 2 Inertial Navigation System Principle and Sea Experimental Request	11
2.1 Basic Theory of Inertial Technology	11
2.1.1 Inertial Component	11
2.1.2 Inertial Measurement Reference Frame	12

2.1.3	Earth Shape and Gravitational Field	
	Characteristic	13
2.1.4	Specific Force Measurement	15
2.1.5	Tuning Theory of Schuler	16
2.2	Basic Theory and Technology of Inertial Navigation	18
2.2.1	Basic Principle of Inertial Navigation	18
2.2.2	Undamped Inertial Navigation System	23
2.2.3	Damping of Inertial Navigation System	28
2.2.4	Initialization Zeroing of Inertial Navigation	
	System	29
2.2.5	Setup of Inertial Navigation System Work state	31
2.2.6	Zeroing of Inertial Navigation System	31
2.2.7	Strap-down Inertial System	33
2.3	Sea Experimental Request of Inertial Navigation System	35
2.3.1	Experimental Carrier	36
2.3.2	Setting on the Marine	36
2.3.3	Sail Field of Experiment	37
2.3.4	Experimental Surroundings	37
2.3.5	Exterior Information	37
2.3.6	Data Gathering and Experimental Result	
	Assessing	38
Chapter 3	Sea Experimental Design of Inertial	
	Navigation System	39
3.1	System Attribute and Sea Experimental Characteristic ...	39
3.1.1	Attribute and Experimental Condition of Inertial	
	Navigation System	39
3.1.2	Sea Experimental Characteristic of System	44
3.2	Guide Line System of Sea Experimental Evaluating	48
3.2.1	Guide Line System of Inertial Navigation System	48
3.2.2	Guide Line System Confirming of	

Experimental Evaluating	50
3.3 Design of Sea Experiment	52
3.3.1 Constructing of Experimental System	52
3.3.2 Design of Experimental Technology	56
3.3.3 Processing of Abnormal Accident in Experiment ...	62
Chapter 4 Installation and Calibration of Experiment	65
4.1 Technology Request for System Equipping Marine	65
4.1.1 Request for Installation Zeroing	65
4.1.2 Equipping Marine Request for Installation and Calibration	65
4.2 Technology Designing of Calibration	68
4.2.1 Choice of Calibration Surroundings	68
4.2.2 Designing of Measurement Mode	69
4.2.3 Request of Calibration Accuracy	70
4.3 Principle and Technology of Calibration	70
4.3.1 Azimuth Calibration	70
4.3.2 Level Calibration	75
4.3.3 Integration Calibration	77
4.4 Technology Problem and Management of Installation and Calibration	77
4.4.1 Some of Crucial Technologies	77
4.4.2 Management of Crucial Technology Problem	77
4.5 Special Work Equipment of Azimuth Calibration	78
4.5.1 Difficulty Analyzing of Azimuth Calibration	78
4.5.2 Work Equipment Designing of Azimuth Calibration	79
4.5.3 Work Equipment Demarcating of Azimuth Calibration	80
4.6 Integration Calibration System	81
4.6.1 System Composing and Function	81

4.6.2	Project Actualizing of Integration Calibration	82
Chapter 5	Transmogrification Restraining and	
	Measuring	83
5.1	Carrier Transmogrification Analyzing	83
5.1.1	Summary	83
5.1.2	Marine Transmogrification Analyzing	83
5.2	Experimental Impact Removing for Transmogrification	86
5.2.1	Transmogrification Affects System Accuracy Experiment	86
5.2.2	Technology Approach of Removing Hull Transmogrification Effect	87
5.3	Marine Permanence Transmogrification Measuring	87
5.3.1	Measurement Surroundings	87
5.3.2	Measurement Method	88
5.4	Practical Technology of Removing Hull Transmogrification Effect	89
5.4.1	Adopt United Installation Base Removing Transmogrification	89
5.4.2	Design Mode of United Installation Base	89
5.5	Transmogrification Measuring of United Installation Base	91
5.5.1	Importance and Technology Project	91
5.5.2	Transmogrification Measurement System of United Base	92
5.6	Real Time Measuring of Relative Transmogrification between Installation Base	94
5.6.1	Apply Range	94
5.6.2	Project of Transmogrification Measurement	95
Chapter 6	Sea Experimental Item and Method	99
6.1	Sea Experimental Item	99

6.1.1	Character Sort of Sea Experiment	99
6.1.2	Sea Experimental Item	100
6.2	Confirming of Experimental Voyage	103
6.2.1	Gist of Confirming Experimental Voyage	103
6.2.2	Confirming of Experimental Voyage	104
6.3	Installation and Adjust and Deliver of System Tested ...	106
6.3.1	Entering Condition of System Tested	106
6.3.2	Installation and Adjust of System Tested	107
6.3.3	Deliver of System Tested	107
6.4	Experimental Method of Mooring Wharf	107
6.4.1	General Examining	107
6.4.2	Experiment of System Engaging	109
6.4.3	Accuracy Experiment	109
6.5	Experimental Method of Voyage on the Sea	109
6.5.1	Accuracy Experiment	110
6.5.2	Surroundings Experiment	115
6.5.3	Examining Experiment of Use Capability	118
6.5.4	Experiment of Reliability and Maintenance	121
6.5.5	Project Actualizing of Sea Experiment	123
Chapter 7 Sea Experimental Measurement and Data		
	Gathering	125
7.1	Confirming of Measurement Parameter	125
7.1.1	Analyzing of System Output Information	125
7.1.2	Confirming of Experimental Measurement Parameter	126
7.2	Constructing of Experimental Measurement and Control System	127
7.2.1	Status and Function of Measurement and Control System	127
7.2.2	Composing of Measurement and Control	