

导弹测试 与发射控制技术

DAODAN CESHI
YU FASHE KONGZHI JISHU

胡昌华 马清亮 郑建飞 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

导弹测试与发射控制技术

胡昌华 马清亮 郑建飞 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以一种全新的体系结构介绍导弹测试与发射控制技术:从导弹控制系统部件或系统的工作原理出发,分析导弹控制系统部件或系统的输入输出传递关系,进而分析对应的导弹控制系统部件或系统的测试技术指标、测试原理与测试方法,并介绍一些故障的分析、排除方法。主要内容包括惯性仪表系统、弹载计算机、变换放大器、伺服机构、电源配电系统、制导系统、姿态控制系统、安全自毁系统及其测试,单项检查、总检查与发射电路及其测试,测试与发射控制系统故障诊断技术。

该书适合作为导弹控制、测试计量技术及仪器、检测技术及自动化装置、导航制导与控制等专业高年级本科生和研究生的教材,对从事导弹测试与发射控制系统设计与使用的广大工程技术人员也不失为一本内容系统全面、视角独特、参考价值高的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

导弹测试与发射控制技术 / 胡昌华, 马清亮, 郑建飞
编著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 6
ISBN 978 - 7 - 118 - 06856 - 6

I. ①导... II. ①胡... ②马... ③郑... III. ①导弹 -
测试技术 ②导弹发射 - 指挥控制系统 IV. ①TJ760.6
②TJ768

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 095626 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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

开本 787 × 1092 1/16 印张 15 3/4 字数 386 千字

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.00 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

第二炮兵工程学院测控工程教研室从 1959 年就一直从事导弹测试与发射控制技术方面的教学、研究工作,教研室先后编写过近十本导弹测试与发射控制技术方面的教材,但这些教材大多以单一型号为背景,缺少能覆盖不同型号背景的通用化公共专业基础教材。国内公开出版的系统论述导弹测试与发射控制技术方面的文献也不多见,宇航出版社出版的导弹丛书中有一些这方面的著作,但也多是结合背景型号展开论述的。冉隆遂研究员 1996 年出版过一本《导弹测试发射控制工程》著作,但随着时间的推移,有许多技术已有新的发展。教学实践的迫切需要,使我们萌生了编写一本内容系统全面而又能反映相关技术最新发展的导弹测试与发射控制技术方面的教材。进入 21 世纪后,国家教育部提出高校教育应朝“重基础,宽口径”的方向发展,更坚定了我们编写一本导弹测试与发射控制技术方面通用教材的想法。为此,我们从 2005 年着手开始这一教材的编写,2007 年 5 月完成第一稿,由第二炮兵工程学院,作为学院本科生教材试用了两期,期间数易其稿,2009 年 10 月完成第二版教材的编写工作,并进行了第三期试用,试用过程中再次对许多内容进行了修改完善,形成了目前的版本。

该书的成稿,凝聚了第二炮兵工程学院测控工程教研室几代人的智慧,胡昌华教授提出并确定了教材的整体编写体系结构:从被测对象工作原理及其传递函数分析出发,阐释设备或系统的测试参数、测试指标及测试方法。这一全新的体系结构是论述导弹测试与发射控制技术的一种全新尝试。该书在写作过程中参阅了学院自编教材的一些内容,在此对相关内容的作者表示感谢。周涛、刘志国、廖守亿同志参与了第六章部分内容的编写,岳瑞华、徐中英同志参加了部分书稿写作思路的研究,并对部分书稿进行了校正,在此也表达我们的谢意。此外,该书还得到了第二炮兵工程学院许多领导和同事的关心、支持和帮助,在此一并致谢。

该书的出版得到了军队“2110 工程”和教育部“新世纪优秀人才支持计划”的支持,在此表示感谢!

限于我们的水平和本书所涉及知识面的宽广性,书中难免存在一些不足之处,恳请广大读者批评指正!

作 者

2010 年 3 月于古都西安

目 录

第一章 导弹测试与发射控制系统	1
第一节 概述	1
第二节 导弹测试与发射控制系统的功用、组成及测试体制	2
一、导弹测试与发射控制系统的功用	2
二、导弹测试与发射控制系统的结构和组成	2
三、导弹测试与发射控制系统的测试体制	2
第三节 导弹测试与发射控制系统的发展	3
思考题	4
第二章 惯性仪表系统及其测试	5
第一节 陀螺仪及其测试	5
一、转子陀螺仪	5
二、光学陀螺仪	10
三、陀螺仪漂移误差模型	18
四、转子陀螺仪测试	21
五、光学陀螺仪测试	30
第二节 加速度计及其测试	34
一、加速度计概述	34
二、加速度计的基本原理与动力学分析	34
三、加速度计的误差数学模型	36
四、加速度计测试	37
第三节 陀螺稳定平台系统及其测试	42
一、陀螺稳定平台系统	42
二、陀螺稳定平台系统测试	54
第四节 捷联惯性测量组合及其测试	62
一、惯性测量组合	63
二、惯性测量组合测试	68
第五节 惯性系统的“三自”技术	75
一、陀螺稳定平台系统的自标定	75
二、陀螺稳定平台系统的自对准	78
三、陀螺稳定平台系统的自检测	79

四、“三自”技术的发展趋势	80
思考题	80
第三章 弹载计算机和变换放大器测试	81
第一节 弹载计算机及其测试	81
一、弹载计算机的工作原理	81
二、弹载计算机测试	85
第二节 变换放大器及其测试	88
一、变换放大器	88
二、变换放大器测试技术指标与测试方法	89
思考题	90
第四章 伺服机构及其测试	91
第一节 导弹伺服机构概述	91
一、导弹伺服机构的功用	91
二、导弹伺服机构的分类	92
三、电液、燃气和电动伺服机构的比较	92
四、导弹伺服机构的特点	94
五、导弹伺服机构的发展趋势	94
第二节 电液伺服机构及其测试	96
一、电液伺服机构的结构原理	96
二、伺服机构主要元部件的工作原理及作用	98
三、电液伺服机构的测试项目及性能指标	102
四、电液伺服机构的测试原理	104
第三节 电动伺服机构及其测试	108
一、电动伺服机构的功能、组成和工作原理	109
二、电动伺服机构的数学模型描述	109
三、电动伺服机构的性能指标	111
四、电动伺服机构的测试	111
第四节 燃气伺服机构及其测试	112
一、燃气伺服机构的结构原理	112
二、燃气伺服机构的性能指标	113
三、燃气伺服机构的测试	113
思考题	113
第五章 电源配电系统及其测试	114
第一节 电源配电系统	114
第二节 一次电源及其测试	114

	一、一次电源	114
	二、一次电源测试	115
第三节	二次电源和配电仪器测试	116
	一、二次电源和配电仪器	116
	二、二次电源和配电仪器的主要技术指标	119
	三、电源配电仪器的测试	120
思考题		120
第六章 制导系统及其测试		121
第一节 制导系统概述		121
	一、制导系统的主要功能	121
	二、制导系统的分类	121
	三、制导系统的组成	126
第二节 惯性制导系统及其测试		126
	一、惯性制导原理	126
	二、惯性制导系统测试	133
第三节 卫星导航定位系统及其测试		136
	一、概述	136
	二、卫星导航系统的组成	137
	三、卫星导航定位系统的工作原理	138
	四、主要性能指标和测试	140
第四节 地形/景象匹配辅助导航系统及其测试		142
	一、概述	142
	二、地形匹配辅助导航系统	143
	三、景象匹配辅助导航系统	150
第五节 其他重要精确制导系统		155
	一、雷达制导	155
	二、激光制导	158
	三、红外制导	165
思考题		170
第七章 姿态控制系统及其测试		171
第一节 姿态控制系统		171
	一、姿态控制系统的任务与组成	171
	二、姿态控制系统的工作原理	172
	三、姿态控制系统的运动方程和传递函数	173
	四、姿态控制系统传递函数框图	174
第二节 姿态控制系统测试		176

一、姿态控制系统测试原则	176
二、姿态控制系统测试方法	176
三、姿态控制系统测试内容与原理	178
思考题	182
第八章 安全自毁系统及其测试	183
第一节 安全自毁系统概述	183
第二节 安全自毁方案	183
一、无线安全自毁方案	183
二、惯性安全自毁方案	183
第三节 安全自毁系统的组成和工作原理	184
一、安全自毁系统的组成	184
二、安全自毁系统的工作原理	185
第四节 安全自毁系统的单元测试	186
一、发动机压力敏感装置及其测试	186
二、安全起飞零点敏感装置及其测试	186
三、安全程序控制器及其测试	188
第五节 安全自毁系统的综合测试	189
一、安全自毁系统综合测试的目的和内容	189
二、安全自毁系统综合测试的步骤	189
思考题	190
第九章 综合测试	191
第一节 综合测试概述	191
一、综合测试的内容	191
二、综合测试的特点	192
三、不同状态下的综合测试	192
第二节 单项检查	194
一、单项检查的内容	194
二、单项检查的原理	194
第三节 分系统测试	198
一、电源配电系统测试	198
二、姿态控制系统测试	200
三、制导系统测试	201
第四节 系统匹配检查	201
一、控制系统与安全自毁系统的匹配检查	201
二、控制系统与遥测系统的匹配检查	202
三、控制系统、安全自毁系统、外测系统与遥测系统的匹配检查	202

第五节	总检查	204
	一、垂直模拟飞行总检查	204
	二、模拟发射总检查	209
	三、紧急断电总检查	210
	四、水平模拟飞行总检查	212
思考题		212
第十章	发射控制	214
第一节	导弹发射控制的基本任务	214
	一、对导弹进行发射前测试	214
	二、完成发射控制过程中的调平、瞄准和装定任务	214
	三、综合并监视导弹发射条件	214
	四、对导弹实施点火发射	214
	五、紧急情况处理	215
	六、发射后撤离或组织连续发射	215
第二节	导弹发射控制程序	215
	一、发射准备阶段	215
	二、发射预令阶段	216
	三、发射主令阶段	216
第三节	发射预案	216
	一、最低发射条件	217
	二、允许最大延迟时间	217
	三、射前应急情况处理	218
第四节	导弹发射控制技术的发展展望	219
思考题		220
第十一章	导弹测试与发射控制系统故障诊断技术	221
第一节	故障诊断的基本概念	221
	一、故障的定义	221
	二、故障的分类	221
	三、故障的基本特征	222
	四、设备的故障诊断	223
	五、其他与故障及故障诊断相关的概念	223
第二节	故障模式和故障机理	223
	一、外部环境影响因素	224
	二、设备故障机理分析	224
	三、元器件故障机理分析	225
第三节	故障诊断的任务	230

第四节	故障诊断的基本方法	231
	一、基于动态数学模型的故障诊断方法	231
	二、基于信号处理的故障诊断方法	232
	三、基于知识的故障诊断方法	234
第五节	智能自动化导弹测试与发射控制系统故障诊断系统	235
	一、导弹测试与发射控制系统故障诊断专家系统	235
	二、基于特征检测与模式识别的导弹测试与发射控制系统故障诊断系统	236
	三、基于电原理仿真的导弹测试与发射控制系统故障模式仿真、 故障诊断与维修决策系统	237
第六节	导弹测试与发射控制系统故障诊断技术的发展趋势	238
	思考题	238
	参考文献	239

第一章 导弹测试与发射控制系统

第一节 概 述

导弹测试与发射控制系统是对导弹控制系统性能及全弹配合性信号的协调性实施测试、发射条件检查和准备、对检查合格的导弹按命令进行发射的系统。

导弹控制系统测试包括单元测试和综合测试。其中,单元测试是对弹上各仪器进行的单机测试,通过测试判断导弹各仪器设备的功能是否正常,参数是否符合要求;综合测试是对控制系统各分系统的功能与参数所进行的测试,以及对全系统的综合性能、外部系统配合信号的协调性所进行的检查,通常包括单项检查、分系统测试、总检查等内容。

单项检查是对影响导弹发射成败至关重要的机械部件或电子线路的工作状态和性能进行的单独检查,如发动机点火保险栓栓开和栓闭功能的检查、脱落连接器(弹地信号连接插头)插拔功能的检查。

分系统测试是从分系统的角度考查组成各个分系统的部件整体性能及相互之间的协调匹配性能是否正常。控制系统通常包括电源配电系统、制导系统(又称射程控制系统)和姿态控制系统(又称稳定系统)等分系统。

总检查是对导弹全系统综合性能进行的检查测试,重点检查各系统工作的协调性和典型的系统参数。作为对导弹总体使用性能的最后检验,总检查通常包括模拟飞行、模拟发射和紧急断电等检查。模拟飞行完成导弹飞行时序、全系统极性关系、制导准确性以及各系统之间工作协调性的检查。模拟发射主要考核调平、瞄准、诸元装定、电源转换、点火发射程序,检查导弹“发射”后飞行状态下的性能和参数。紧急断电检查是在转电之后,发射之前,发现紧急危险时,通过切断弹上供电和地面供电,从而中止整个发射进程的一种应急电路检查。通过紧急断电检查,实现对发射电路的检查和发射不成功时各系统实施紧急断电,以及关机功能的检查。

导弹的发射控制是对导弹实施控制系统接通、状态初始化控制以及综合各种发射准备条件,并对检查合格、准备好的导弹实施发射点火控制。

导弹测试与发射控制系统是导弹武器系统的重要组成部分,配合指挥控制系统(指挥自动化设备),共同完成导弹的作战使命。此外,为完成导弹的作战任务,还有许多作战保障系统,如气象保障、大地测量、射击诸元计算、火力规划、任务规划、航迹规划、情报保障系统等。

导弹测试与发射控制系统在导弹武器研制和使用中具有重要的地位,主要体现在以下三点。

(1) 导弹测试与发射控制系统是导弹武器系统性能检验的重要设备。导弹武器从研制、飞行试验到储存使用全寿命周期的每个环节,都需借助导弹测试与发射控制系统来测试评价导弹武器的工作性能和工作状态。从研制的角度看,通过导弹测试与发射控制系统对导弹进行测试,检验设计指标是否合乎要求,发现设计问题,进而对设计进行调整、改进和优化;从使

用角度看,通过导弹测试与发射控制系统对导弹的测试,实现对导弹工作状态和工作性能的评价,发现并定位故障,决策导弹是否可以投入战备和作战使用。

(2) 导弹测试与发射控制系统的性能影响和制约导弹武器的使用性能。导弹测试与发射控制系统承担着对导弹进行测试与发射控制的任务,其可靠性和自动化程度,直接决定和影响导弹武器的生存能力和快速反应能力。

(3) 导弹测试与发射控制系统是导弹武器系统指挥决策的重要依托。导弹测试与发射控制系统是 C⁴ISR 一体化作战模式下实施导弹武器指挥决策的重要依托。导弹在作战中的进程、技术状态、发射等控制,都需要依托导弹测试与发射控制系统来实现。

第二节 导弹测试与发射控制系统的功用、组成及测试体制

一、导弹测试与发射控制系统的功用

- (1) 对导弹控制系统的功能和参数进行检查和测试。
- (2) 对导弹发射电路进行检查。
- (3) 对导弹进行发射条件综合,实施发射点火控制。
- (4) 配合指挥自动化系统,对导弹实施测试和发射的指挥控制。

二、导弹测试与发射控制系统的结构和组成

导弹测试与发射控制系统通常由如下主要设备组成。

- (1) 发射控制台。
- (2) 配电转接箱。
- (3) 自动测试设备(ATE)。
- (4) 测试发射控制计算机。
- (5) 瞄准设备(或定位定向设备)。
- (6) 指挥自动化设备。
- (7) 配套信号转接电缆。
- (8) 绝缘通路测试仪。
- (9) 产品等效器。

导弹测试与发射控制系统结构图如图 1.2.1 所示。另外,在试验弹的测试与发射控制系统中,还包括遥测系统、外测系统等。

三、导弹测试与发射控制系统的测试体制

按照测试顺序分类,导弹有两种测试体制:①由局部到整体、自底向上的测试方法,即先进行单元测试,再进行分系统测试,最后全系统进行总检查;②由整体到局部、自顶向下的测试方法,即先测试整个系统,如正常则通过,如有问题则测试分系统,进而测试单个仪器。

按照测试设备配置的位置分类,导弹有三种测试体制:地测体制、弹测体制以及弹测与地测相结合体制。地测体制的所有测试设备放在地面,弹地之间通过模拟电缆实现信号的连接和信息的交互。弹测体制的测试设备放在弹上,测量结果通过通信的方式发送地面。弹地结合体制通过弹测和地测结合,完成导弹的测试。

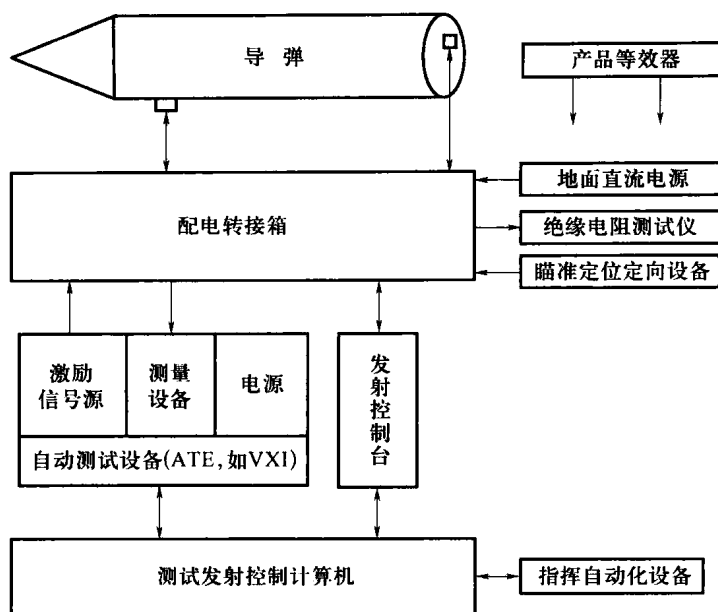


图 1.2.1 导弹测试与发射控制系统结构图

第三节 导弹测试与发射控制系统的发展

导弹测试与发射控制系统经历了手动测试、半自动测试和总线式自动测试三个主要的发展阶段。

早期的导弹测试采用手动测试。测试所需激励信号通过发射控制台上的开关、按钮或旋钮施加,测试结果通过指示台上的指示灯、表头加以显示,人工对测试结果进行观察判读和分析。此时,导弹测试与发射控制系统包括发射控制台、配电转接箱、配套信号转接电缆、瞄准设备(或定位定向设备)、绝缘通路测试仪、产品等效器等。

导弹测试与发射控制系统发展的第二阶段是半自动测试系统。此阶段导弹测试所需激励的施加和系统测试响应的分析及判断在程序控制下自动完成。此时,导弹测试发射控制系统包括发射控制台、配电转接箱、半自动测试设备、配套信号转接电缆、瞄准设备(或定位定向设备)、绝缘通路测试仪、产品等效器等。

导弹测试发射控制系统发展的第三阶段是总线式自动测试系统。测试系统采用 CAMAC、PCI、VXI 等总线式自动测试系统,系统结构图如图 1.2.1 所示。此时,导弹测试发射控制系统中的测试软件在系统中占据重要的地位和作用。

随着电子技术、计算机控制技术、仪器仪表技术的迅速发展,导弹测试与发射控制系统也呈现一些新的特点和发展趋势,主要体现在:

(1) 普遍采用总线式测试技术。测试系统普遍采用国际通用总线式测试技术,实现测试设备的标准化、系列化和模块化,测试设备的互换性和可维修性大大提高。

(2) 测试与发射控制的时间越来越短。为提高导弹的生存能力和快速反应能力,普遍采用自动化测试和智能化信息分析处理技术,测试的时间越来越短。

(3) 任意点随机快速发射。采用自寻北、星光制导、卫星定位定向、惯性系统自检测、自对准和自标定技术,实现导弹任意点随机机动发射。

(4) 越来越普遍采用弹内测试技术。随着弹上系统越来越多地采用数字化总线式控制系统,分布式总线化弹内测试技术得到越来越普遍的应用。

(5) 抗恶劣环境工作能力越来越强。为应对战场恶劣环境,导弹测试与发射控制系统普遍采用耐高低温、耐高压、电磁加固等耐环境设计和可靠性设计保障技术,使导弹测试与发射控制系统的抗恶劣环境适应能力越来越强。

思考题

1. 导弹控制系统的测试包括哪些内容?
2. 导弹测试与发射控制系统在导弹武器系统中的地位和作用是什么?
3. 简述导弹测试与发射控制系统的结构和组成。
4. 按照测试设备配置的位置,导弹测试与发射控制系统有哪些测试体制?

第二章 惯性仪表系统及其测试

惯性仪表主要包括陀螺仪和加速度计。广义上讲,凡能保持给定方位,并能敏感或测量载体绕给定方位转动角位移或角速度的装置均可称为陀螺仪。能够保持给定的方位,并敏感载体角位移或角速度的功能称为陀螺效应。能够敏感载体运动加速度的装置称为加速度计。

导弹制导系统中惯性仪表的主要功能是:建立导弹空间运动的方位基准(惯性坐标系);测量载体相对惯性坐标系转动的角速度、角度和运动的线加速度。

惯性制导系统可分为平台惯导系统和捷联惯性测量组合两大类。平台惯导系统通过惯性测量元件和稳定控制回路,使平台台体与外部相对隔离、方位保持不变(或按给定规律改变),惯性元件置于平台台体上。捷联惯性系统中的惯性测量元件直接固连在弹体上,用于测量导弹在飞行过程中相对于弹体坐标系的运动参数。

研究表明,对于纯惯性制导的导弹,惯性仪器的工具误差引起的落点偏差占整个落点偏差的近 70%,因此,提高惯性测量系统的测量精度,或通过测试建立惯性测量系统的误差模型,并在飞行中用补偿的方法加以抑制或消除,有重要的现实意义。

第一节 陀螺仪及其测试

产生陀螺效应的机理有很多种,人们根据不同的陀螺效应产生机理,研制出了不同形式的陀螺仪。例如,刚体转动陀螺仪就是利用高速旋转的刚体具有陀螺效应而形成的陀螺仪;振动陀螺仪是利用振动叉旋转时的哥氏加速度效应做成的角速度测量装置;半球谐振陀螺仪是利用振动环旋转时的哥氏加速度效应做成的角位移测量装置;静电陀螺仪利用悬浮技术支撑转子,并利用光电传感器摄取转子特制刻线形成的光脉冲来间接测量偏差角;压电陀螺仪利用晶体的压电效应做成角速度测量装置;粒子陀螺仪利用基本粒子的陀螺磁效应做成角速度测量装置;光学陀螺仪利用光学 Sagnac(萨格奈克)效应制成角速度测量装置。

目前,转子陀螺仪和光学陀螺仪应用较广泛。本节重点讨论这两类陀螺仪。

一、转子陀螺仪

(一) 单自由度转子陀螺仪

单自由度转子陀螺仪包含两个刚体:一个是具有两个转动自由度的转子;另一个是具有单一转动自由度的内框架。单自由度转子陀螺仪的结构图如图 2.1.1 所示。

在描述单自由度陀螺仪运动时,可采用如图 2.1.2 所示的两套坐标系。固连于陀螺仪内框架上的坐标系 $Ox_1y_1z_1$, x_1 轴为陀螺内框轴,也是测量信号的输出轴, y_1 轴为陀螺缺少自由度的轴,该轴是被测角速度的敏感轴,通常称为输入轴或测量轴, z_1 轴为转子自转轴。 $Ox_0y_0z_0$ 为固连于基座的坐标系。

当基座绕缺少自由度的输入轴以 ω_y 角速率旋转时,将强迫陀螺仪跟随基座转动,但陀螺

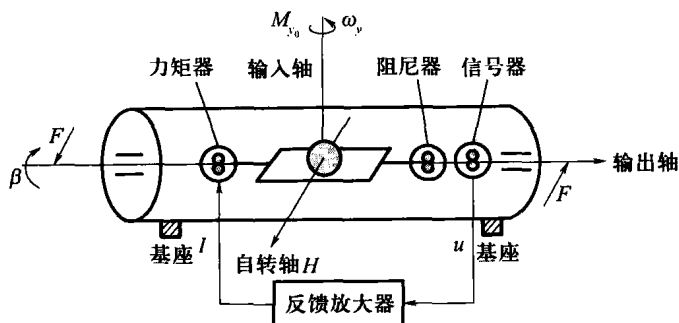


图 2.1.1 单自由度陀螺仪结构图

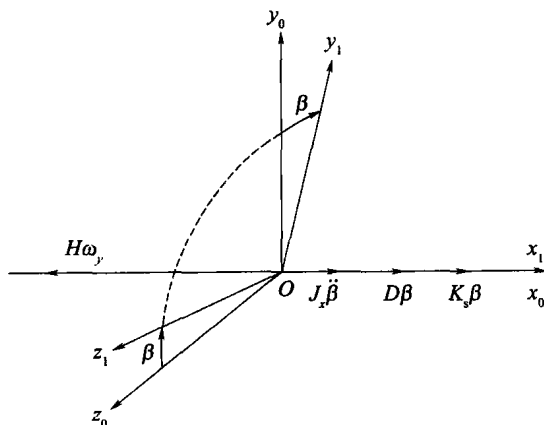


图 2.1.2 单自由度陀螺仪运动平衡原理图

仪在 y_0 轴方向缺少运动自由度,内框架上的一对支撑形成推力 F 作用在内框架的两端,形成作用在陀螺仪上的推力矩 M_{y_0} , M_{y_0} 的方向与 ω_y 方向一致,由于陀螺仪内框架绕输出轴有转动自由度,由陀螺仪的进动特性,陀螺仪在 M_{y_0} 的作用下会发生进动,进动的方向为按照右手定则,由陀螺仪的转动方向 H 握向 M_{y_0} 的拇指所指方向。进动角度 β 会被输出轴上的传感器敏感到。单自由度陀螺仪的这一特性是指具有敏感绕其缺少自由度方向旋转角速度的特性。

陀螺仪绕 y_0 轴以 ω_y 转动时,会产生陀螺力矩,陀螺力矩大小为 $H\omega_y$,方向为右手从 H 握向 ω_y ,大拇指指向的方向。同时, ω_y 会使陀螺沿 x_0 轴负向进动,沿输出轴的进动角度、角速度、角加速度分别为 β 、 $\dot{\beta}$ 、 $\ddot{\beta}$ 。其中, $\ddot{\beta}$ 会产生惯性力矩 $J_x \ddot{\beta}$, $\dot{\beta}$ 会产生阻尼力矩 $D\dot{\beta}$, β 通过力矩再平衡回路会形成再平衡力矩 $K_u K_i K_m \beta$ (K_u 为转角传感器传递系数, K_i 为反馈回路放大校正环节, K_m 为陀螺力矩器的传递系数),这些力的方向如图 2.1.2 所示,由图 2.1.2 可列出力矩平衡方程:

$$J_x \ddot{\beta} + D \dot{\beta} + K_u K_i K_m \beta = H\omega_y \quad (2.1.1)$$

由式(2.1.1)可得单自由度陀螺仪的传递函数结构框图,如图 2.1.3 所示。

在零初始条件下,式(2.1.1)两边取拉普拉斯变换,可得到单自由度陀螺仪的传递函数:

$$G(s) = \frac{\beta(s)}{\omega(s)} = \frac{H}{J_x s^2 + Ds + K} \quad (K = K_u K_i K_m) \quad (2.1.2)$$

实际的单自由度转子陀螺仪,可能不完全具有阻尼器和弹性元件。根据在稳态时所加的平衡力矩不同,一般将单自由度陀螺仪划分为速率陀螺仪、积分陀螺仪和二重积分陀螺仪。

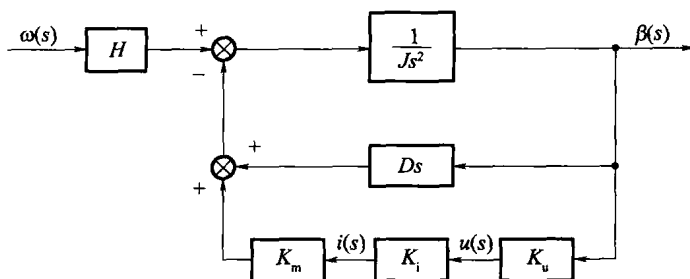


图 2.1.3 单自由度转子陀螺仪传递函数结构图

1. 速率陀螺仪

在速率陀螺仪的内框架轴上,既装有阻尼器,也装有弹性元件。在稳态时是用弹性力矩来平衡陀螺力矩,即 $K\beta = H\omega$,因此有

$$\beta = \frac{H}{K}\omega \quad (2.1.3)$$

即陀螺仪的输出转角信号与输入角速度成比例。

2. 积分陀螺仪

在积分陀螺仪的内框架轴上,只装有阻尼器,而没有装弹性元件。在稳态时是用阻尼力矩来平衡陀螺力矩,即 $D\dot{\beta} = H\omega$,因此有

$$\beta = \frac{H}{D} \int \omega dt \quad (2.1.4)$$

即陀螺仪的输出转角信号与输入角速度的积分成比例。

3. 二重积分陀螺仪

在二重积分陀螺仪的内框架轴上,没有装阻尼器和弹性元件,主要是由框架组件的惯性来建立其动态。此时,陀螺仪动力学方程为 $J\ddot{\beta} = H\omega$,因此有

$$\beta = \frac{H}{J} \iint \omega dt dt \quad (2.1.5)$$

即陀螺仪的输出转角信号与输入角速度的二重积分成比例。

(二) 二自由度转子陀螺仪

二自由度转子陀螺仪的结构如图 2.1.4 所示。

当二自由度转子陀螺仪受绕内环轴 x 轴正向力矩 M_x 作用时,陀螺会产生绕内环轴 x 方向转动角加速度 $\ddot{\beta}$ 和转动角速度 $\dot{\beta}$, $\ddot{\beta}$ 的存在会形成沿 x 轴负方向的惯性力矩 $J_x \ddot{\beta}$; $\dot{\beta}$ 的存在会产生陀螺力矩 $H\dot{\beta}$, 其方向按角动量 H 转向角速度方向的右手定则确定,即沿 y 轴正向。同理,陀螺受绕外环轴 y 轴正向力矩 M_y 作用时,陀螺会绕 y 轴正向产生转动角加速度 $\ddot{\alpha}$ 和转动角速度 $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ 的存在会产生沿 y 轴负方向的惯性力矩 $J_y \ddot{\alpha}$; $\dot{\alpha}$ 的存在会产生陀螺力矩 $H\dot{\alpha}$, 其方向按角动量 H 转向角速度方向的右手规则确定,即沿 x 轴负向。

若忽略摩擦力矩,二自由度转子陀螺仪受力的力矩平衡图如图 2.1.5 所示。

根据力矩平衡关系,有

$$\begin{cases} J_x \ddot{\beta} + H\dot{\alpha} = M_x \\ J_y \ddot{\alpha} - H\dot{\beta} = M_y \end{cases} \quad (2.1.6)$$