

# 机载/弹载 视觉导引稳定平台的 建模与控制

Modeling and Control  
of Airborne/Missile-borne  
Vision-Guidance Stabilized Platform

张平 董小萌 付斐生 邓方艺 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 机载/弹载视觉导引稳定 平台的建模与控制

Modeling and Control of Airborne/Missile-borne  
Vision-Guidance Stabilized Platform

张平 董小萌 付奎生 邓方艺 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

机载 / 弹载视觉导引稳定平台的建模与控制 / 张平等著. —北京: 国防工业出版社, 2011. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 07360 - 7

I. ①机... II. ①张... III. ①视觉导航 - 稳定平台(导航) - 系统建模②视觉导航 - 稳定平台(导航) - 自动控制 IV. ①TP242.6②TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 075592 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 960 1/16 印张 15¼ 字数 262 千字

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 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

## 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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王峰				
副主任委员	宋家树	蔡镛	程洪彬		
秘书长	程洪彬				
副秘书长	邢海鹰	贺明			
委员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴	
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁	
	李德毅	杨伟	肖志力	吴有生	
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠	
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起	
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波	

# 前 言

现代先进机载/弹载探测导引系统的一个发展趋势是将传统的动力陀螺式常平架改进为三轴/两轴平台式结构,该类结构由于质量小、工艺相对简单而获得重视并被广泛应用。新型稳定平台是一个三自由度或两自由度的框架式结构,红外/光电探测摄像头或雷达天线固定在内框上,在飞机/导弹的飞行中探测摄像头会受到载体姿态运动的扰动影响,由于在结构改进的同时会失去动力陀螺的自动稳定功能,因此要求新型稳定平台的控制系统具有自动消除机/弹体运动对光轴的扰动影响的能力,这本质上是一个动基座下框架式结构的稳定控制问题。在保证稳定的同时,还需要利用光电/雷达探测信息以及其他机载信息控制框架系统实现对运动目标的跟踪,因此在稳定回路之外还需要设计跟踪控制回路,使得探测跟踪系统成为一个多回路、多信息融合处理的控制系统。另一方面,三轴动框架的相互扰动、框架间的摩擦与质量不平衡、电线电缆的拖动等因素也会引起延迟、畸变等非线性现象,并进一步影响到平台性能以及对目标跟踪的精度与快速性。并且,框架稳定控制与运动目标跟踪控制本质上还存在着矛盾之处,过于稳定的控制特性势必造成跟踪能力的下降并影响到动态跟踪的快速性。综上所述,新型稳定跟踪平台是一个复杂结构、复杂任务的控制系统,其建模问题目前国内外还未见到报道,控制方面目前多应用PID控制方法,但对小视场角跟踪、目标快速识别和精确跟踪、预测控制等方面尚缺少深入的研究。

本书旨在从三轴/两轴结构平台的系统动力学建模、平台的稳定控制与对运动目标的快速跟踪控制、两轴平台的跟踪盲区和小视场角下的预测控制等方面全面地论述其基本概念、系统特性与研究方法,从原理上阐述所涉及的基础理论问题,并结合科研实践,给出一些最新的研究成果,为进一步深入研究与工程应用打下基础。

本书由北京航空航天大学张平、中国空间技术研究院董小萌、中国空空导弹研究院付奎生和邓方艺共同编写。其中董小萌编写第2章、3.5节、4.3节、第5章、第6章、第7章,张平、付奎生和邓方艺编写其余部分,张平负责全书统稿。

北京航空航天大学的高金源、王海涛、张登峰、王昭和吴玉焄都参与了相关课题研究并做出了很好的研究成果;第7章的仿真算例由董小萌、张建宏、王昭、张逾共同完成;在本书的审阅中,北京航空航天大学龚光红、北京理工大学的孟秀云都提出了宝贵的修改意见,在这里一并表示感谢。

— 本书如有描述不当之处,敬请指导。

作者联系方式: 张平, zhangpingbuaa@126.com

董小萌, dxm@asee.buaa.edu.cn



# 目 录

主要参数表 .....	1
第 1 章 绪论 .....	5
1.1 新型稳定平台系统的结构与特征 .....	5
1.1.1 三自由度框架式结构 .....	5
1.1.2 两自由度框架式结构 .....	6
1.1.3 速率陀螺式稳定平台 .....	6
1.1.4 捷联式稳定平台 .....	6
1.2 新型稳定平台的控制系统与控制技术 .....	7
1.2.1 新型稳定平台的控制技术 .....	7
1.2.2 控制器的变化与关键技术 .....	7
1.2.3 两轴结构的盲区与控制问题 .....	8
1.3 红外/光电探测系统的最新发展与应用 .....	9
1.4 红外/光电探测在导引系统中的作用 .....	12
1.4.1 导引头的小视场角 .....	12
1.4.2 导引系统工作原理 .....	12
1.4.3 导引头控制系统设计要求 .....	14
1.5 本书讨论的问题 .....	16
参考文献 .....	17
第 2 章 新型稳定平台的建模分析 .....	20
2.1 稳定平台结构形式与特点 .....	20
2.1.1 三轴平台结构 .....	20
2.1.2 两轴平台结构 .....	21
2.2 三轴稳定平台建模与分析 .....	24
2.2.1 三轴稳定平台的几个概念 .....	24
2.2.2 坐标系定义 .....	25
2.2.3 坐标变换 .....	26
2.2.4 运动学关系 .....	27

2.2.5	动力学模型 .....	33
2.2.6	动力学模型的简化 .....	43
2.2.7	机电模型 .....	44
2.2.8	三轴模型仿真实例 .....	48
2.3	两轴稳定平台模型 .....	53
2.3.1	两轴直角坐标稳定平台模型 .....	53
2.3.2	两轴极坐标稳定平台模型 .....	55
2.3.3	两轴稳定平台特性分析 .....	57
2.4	小结 .....	57
	参考文献 .....	58
<b>第3章</b>	<b>新型稳定平台的稳定与跟踪控制</b> .....	<b>59</b>
3.1	新型稳定平台控制系统的设计指标 .....	59
3.1.1	设计指标 .....	59
3.1.2	隔离度定义与特性 .....	60
3.1.3	稳定平台输出与制导系统的关系 .....	60
3.2	三轴稳定平台的经典 PID 控制 .....	65
3.2.1	控制机理与控制系统基本结构 .....	65
3.2.2	各轴负载及电机伺服控制回路模型 .....	69
3.2.3	三轴平台的经典 PID 控制 .....	71
3.3	关于具有初始离轴角情况的分析 .....	78
3.3.1	具有离轴角的弹体扰动 .....	79
3.3.2	具有离轴角的框架偏转 .....	79
3.3.3	弹体扰动与框架偏转的合成 .....	80
3.3.4	仿真验证 .....	82
3.4	直角坐标结构捷联式稳定平台的 PID 控制 .....	83
3.4.1	直角两轴平台的速率稳定原理 .....	83
3.4.2	稳定与角跟踪回路的 PID 控制 .....	86
3.5	极坐标结构捷联式稳定平台的经典 PID 控制 .....	92
3.5.1	极坐标跟踪指令生成 .....	92
3.5.2	控制原理 .....	95
3.5.3	稳定与跟踪回路的 PID 控制仿真 .....	98
3.6	小结 .....	100
	参考文献 .....	101

<b>第4章 稳定平台控制系统的现代设计方法</b> .....	102
4.1 基于状态空间的二次型最优 LQR 控制 .....	102
4.1.1 设计原理 .....	102
4.1.2 状态变量与状态方程 .....	103
4.1.3 控制律设计过程 .....	104
4.1.4 闭环控制系统仿真 .....	104
4.1.5 加入前馈提高控制精度 .....	107
4.1.6 控制器的非线性补偿 .....	109
4.2 基于神经网络的智能 PID 控制 .....	115
4.2.1 CMAC 神经网络控制原理与基本算法 .....	115
4.2.2 控制器设计 .....	117
4.2.3 控制效果仿真 .....	121
4.3 基于扩张状态观测器的视线稳定控制 .....	123
4.3.1 扩张状态观测器设计 .....	123
4.3.2 视线稳定控制器设计 .....	126
4.3.3 系统隔离度分析 .....	127
4.3.4 仿真实例 .....	128
4.4 小结 .....	133
参考文献 .....	133
<b>第5章 两轴稳定平台的盲区分析</b> .....	134
5.1 像球面和初始坐标系 .....	134
5.2 直角坐标稳定平台的跟踪盲区问题 .....	139
5.2.1 直角坐标稳定平台的像球面描述 .....	139
5.2.2 直角坐标稳定平台的盲区分析 .....	141
5.3 极坐标稳定平台的跟踪盲区问题 .....	143
5.3.1 极坐标稳定平台的像球面描述 .....	143
5.3.2 极坐标稳定平台的盲区分析 .....	145
5.4 盲区问题在视线稳定中的体现 .....	147
5.5 瞬时视场对盲区的影响以及盲区的实时判别 .....	148
5.6 盲区问题的控制 .....	151
5.7 小结 .....	152
参考文献 .....	152
<b>第6章 极坐标稳定平台小视场角跟踪的预测控制</b> .....	153
6.1 基于框架坐标系的视线稳定控制器 .....	154

6.2	指令生成的几个难点 .....	157
6.2.1	指令多值性和指令跳变 .....	157
6.2.2	瞬时像平面的旋转 .....	158
6.3	跟踪微分器 .....	159
6.3.1	新型跟踪微分器结构及稳定性证明 .....	160
6.3.2	相空间分析 .....	165
6.3.3	频率特性分析 .....	168
6.3.4	仿真实例 .....	172
6.3.5	小结 .....	178
6.4	基于跟踪微分器的指令规划系统 .....	178
6.4.1	基于坐标系旋转的指令优化 .....	178
6.4.2	指令预测滤波与规划 .....	183
6.4.3	仿真实例 .....	185
6.5	非线性目标跟踪控制器 .....	186
6.6	视线稳定和目标跟踪系统总体结构 .....	188
6.7	仿真实例 .....	190
6.7.1	仿真系统结构 .....	190
6.7.2	复杂轨迹 .....	191
6.7.3	目标轨迹跟踪仿真 .....	193
6.8	小结 .....	197
	附录 .....	197
	参考文献 .....	198
<b>第7章</b>	<b>新型光电稳定平台在视觉导引中的应用 .....</b>	<b>201</b>
7.1	基于机器视觉导引的无人机自主着陆控制与仿真 .....	201
7.1.1	仿真环境的组成 .....	202
7.1.2	实时通信 .....	207
7.1.3	总体仿真系统特点 .....	209
7.1.4	仿真环境与结果分析 .....	211
7.2	红外寻的导弹导引头对运动目标的跟踪导引应用 .....	220
7.3	小结 .....	223
	参考文献 .....	223

# Contents

<b>Main Parameters Table</b> .....	1
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	5
1.1 Structure and characteristics of late-model stabilized platform system .....	5
1.1.1 Three-degrees-of-freedom frame structure .....	5
1.1.2 Two-degrees-of-freedom frame structure .....	6
1.1.3 Rate gyro stabilized platform .....	6
1.1.4 Strapdown stabilized platform .....	6
1.2 Control system and control technique of late-model platform system .....	7
1.2.1 Control method of late-model platform system .....	7
1.2.2 Changes and key technologies of controller .....	7
1.2.3 Blind zone and control problems of two-axis structure .....	8
1.3 Latest developments and application of IR/photoelectric detection system .....	9
1.4 The role of IR/photoelectric detection system in guidance system .....	12
1.4.1 Narrow field of view(FOV) .....	12
1.4.2 Working principle of guidance system .....	12
1.4.3 Design requirements of seeker control system .....	14
1.5 Issues discussed in this book .....	16
References .....	17
<b>Chapter 2 Modeling analysis of late-model stabilized system</b> .....	20
2.1 Structure and characteristics of stable platform .....	20
2.1.1 Three-axis platform structure .....	20
2.1.2 Two-axis platform structure .....	21
2.2 Modeling and analysis of three-axis stabilized platform .....	24

2.2.1	Conceptions of three-axis stabilized platform	24
2.2.2	Coordinate system definition	25
2.2.3	Coordinate transformation	26
2.2.4	Kinematic modeling	27
2.2.5	Dynamic modeling	33
2.2.6	Simplification of dynamic model	43
2.2.7	Electromechanical model	44
2.2.8	Simulation example of three-axis model	48
2.3	Model of two-axis stabilized platform	53
2.3.1	Model of two-axis rectangular coordinate stabilized platform	53
2.3.2	Model of two-axis polar coordinates stabilized platform	55
2.3.3	Analysis of two-axis stabilized platform	57
2.4	Summary	57
	References	58

### **Chapter 3 Stabilization and tracking control of late-model stabilized platform**

	<b>platform</b>	59
3.1	Design specifications of late-model stabilized platform control system	59
3.1.1	Design specifications	59
3.1.2	Definition and characteristics of Isolation	60
3.1.3	The relationship between stabilized platform output and guidance system	60
3.2	Classical PID control of three-axis stabilized platform	65
3.2.1	Control mechanism and basic structure of control system	65
3.2.2	The axis load and motor servo control loop model	69
3.2.3	Classical PID control of three-axis platform	71
3.3	Analysis of the case with initial off-axis angle	78
3.3.1	Missile-body perturbation with initial off-axis angle	79
3.3.2	Frame deflection with off-boresight angle	79
3.3.3	Synthesis between missile-body disturbance and frame motion	80
3.3.4	Simulation Verification	82
3.4	PID control of rectangular coordinate strapdown stabilized platform	83
3.4.1	Rate Stabilization theory of two-axis rectangular coordinate	

platform .....	83
3.4.2 PID control of stabilized and angle tracking loop .....	86
3.5 Classical PID control of polar coordinates strapdown stabilized platform .....	92
3.5.1 Polar coordinates trace command generation .....	92
3.5.2 Control theory .....	95
3.5.3 PID control simulation of stabilized and tracking loop .....	98
3.6 Summary .....	100
References .....	101
<b>Chapter 4 Modern design theory of stabilized platform .....</b>	<b>102</b>
4.1 Quadratic optimal control (LQR) .....	102
4.1.1 Design principle .....	102
4.1.2 State variables and state equations .....	103
4.1.3 Design procedure of control law .....	104
4.1.4 Closed-loop control system simulation .....	104
4.1.5 Adding feedforward to improve the control accuracy .....	107
4.1.6 Nonlinear compensation controller .....	109
4.2 Intelligent PID control based on neural network .....	115
4.2.1 CMAC neural network control theory and basic algorithm .....	115
4.2.2 Controller design .....	117
4.2.3 Control simulation results .....	121
4.3 Line-of-sight stabilization control based on extended state observer .....	123
4.3.1 Extended state observer design .....	123
4.3.2 Line-of-sight stabilization controller design .....	126
4.3.3 Analysis of system isolation .....	127
4.3.4 Simulation example .....	128
4.4 Summary .....	133
References .....	133
<b>Chapter 5 Blind zone analysis of two-axis stabilized platform .....</b>	<b>134</b>
5.1 Image-sphere and initial coordinate system .....	134
5.2 Tracking blind zone of rectangular coordinate stabilized platform .....	139
5.2.1 Image-sphere description of rectangular coordinate stabilized	

platform .....	139
5.2.2 Blind zone analysis of rectangular coordinate stabilized platform .....	141
5.3 Tracking blind zone of polar coordinates stabilized platform .....	143
5.3.1 Image-sphere description of polar coordinates stabilized platform .....	143
5.3.2 Blind zone analysis of polar coordinates stabilized platform .....	145
5.4 Blind zone problem embodied in line-of-sight (LOS) stabilization .....	147
5.5 Impact of instantaneous FOV and real-time discrimination of blind zone .....	148
5.6 Control of blind zone problem .....	151
5.7 Summary .....	152
References .....	152

**Chapter 6 Forecast tracking control of polar coordinates Narrow FOV stabilized platform .....** 153

6.1 LOS stability controller based on frame coordinate system .....	154
6.2 Difficulties in command generation .....	157
6.2.1 Multi-command and command jump .....	157
6.2.2 Rotation of instantaneous image plane .....	158
6.3 Tracking differentiator .....	159
6.3.1 Late-model Tracking differentiator structure and stability prove .....	160
6.3.2 Phase space analysis .....	165
6.3.3 Frequency Characteristics .....	168
6.3.4 Simulation example .....	172
6.3.5 Summary .....	178
6.4 Command planning system based on tracking differentiator .....	178
6.4.1 Command optimization based on coordinate system rotation .....	178
6.4.2 Command forecast filtering and planning .....	183
6.4.3 Simulation example .....	185
6.5 Nonlinear target tracking controller .....	186
6.6 General structure of LOS stabilization and target tracking system .....	188
6.7 Simulation example .....	190
6.7.1 Simulation system structure .....	190
6.7.2 Complex locus .....	191



6.7.3	Target tracking simulation .....	193
6.8	Summary .....	197
	Appendix .....	197
	References .....	198
<b>Chapter 7</b>	<b>Application of late-model photoelectronic stabilized platform in vision guidance .....</b>	<b>201</b>
7.1	Unmanned air vehicle (UAV) autonomous landing control and simulation based on machine vision guidance .....	201
7.1.1	Composition of simulation environment .....	202
7.1.2	Real-time communication .....	207
7.1.3	General feature of simulation system .....	209
7.1.4	Simulation environment and interpretation of result .....	211
7.2	Application of infrared seeker guidance on moving targets tracking .....	220
7.3	Summary .....	223
	References .....	223