



国防科技图书出版基金

坦克武器

稳定系统建模与控制技术

Modeling and Control Technology for Tank Weapon Stabilization System

■ 马晓军 袁东 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

坦克武器稳定系统 建模与控制技术

Modeling and Control Technology for
Tank Weapon Stabilization System

马晓军 袁 东 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

坦克武器稳定系统建模与控制技术 / 马晓军, 袁东
著. —北京: 国防工业出版社, 2019. 5

ISBN 978 - 7 - 118 - 11754 - 7

I. ①坦… II. ①马… ②袁… III. ①坦克—武器装
备—稳定系统—系统建模②坦克—武器装备—稳定系统—
操作控制 IV. ①TJ811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 030911 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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 字数 260 千字

2019 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,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
第七届评审委员会组成人员

主任委员 柳荣普
副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥
秘书长 赵伯桥
副秘书长 许西安 谢晓阳
委员 (按姓氏笔画排序)
才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利
刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣
李德仁 李德毅 杨伟 肖志力
吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军
陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起
郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南
傅惠民 魏炳波

序 言

坦克的发明,创造性地将传统单纯武器系统与运载平台有机结合起来,实现了火力、机动力和防护力的综合集成,使得地面突击作战的形态发生了深刻变化,因此从其诞生之日起,就显示出强大的生命力,素有“陆战之王”的美誉。也正是这种特殊的结构模式和作战使命,使其武器稳定系统在性能指标、驱动特性与工作条件等方面呈现出与其他运动控制系统迥然不同的鲜明特征。如性能要求方面,为了实现“先敌开火,首发命中”,要求其稳定系统兼具响应速度快、稳定精度高、低速跟踪平稳等优良特性。随着未来新型武器技术迅猛发展,武器系统的打击距离更远,这些性能指标还将进一步提高。再如,在武器驱动控制链路中,由于内部存在齿圈间隙、摩擦力矩、参数漂移等多种非线性特性,且各种非线性特性相互耦合,系统呈现出强不确定特性,这大大增加了控制难度。此外,武器稳定系统的工作条件也不同于一般运动控制系统,运载平台本身的运动以及路面起伏不平等引起的扰动力矩也将成为影响武器稳定的重要因素,特别是随着坦克越野机动性能的大幅提高和路面复杂程度的增加,坦克武器所受扰动力矩的模式和强度都会急剧地变化,成为制约武器稳定系统性能提升的瓶颈。上述特征使得坦克武器稳定系统的设计与控制成为一项非常重要同时又极具挑战的工作。

我国科研工作者经过百折不挠的艰苦努力,先后突破了坦克炮控系统多项关键技术,取得了一系列具有自主知识产权的研究成果,从根本上改变了传统炮控系统的体系结构和控制方法,实现了炮控系统从传统的电机放大机到PWM控制、直流到交流控制、液压到全电控制、模拟到数字控制的进步,跨越了西方国家炮控系统全液式和直流全电式两个发展阶段,使我国坦克炮控系统的战技指标达到了国际先进水平。同时,我国的坦克顶置遥控武器站等其他武器稳定系统也取得了快速发展,并已陆续开始装备各型新研制的主战坦克。

在此基础上,作者研究团队近年来又持续开展了卓有成效的坦克武器稳定系统的理论研究工作,本书即是这些研究成果的高度总结与凝练。面对这样一个强干扰、快时变与高性能要求的复杂控制系统的建模与控制问题,本书以独特的视角,从最基本的动力学原理(力是改变物体运动状态的原因)入手,建立了基于“扰动链-驱动链”的系统动力学模型,并以此为纽带,构建了武器稳定系统“分析—建模—控制—优化”完整的理论体系。

(1)在系统分析部分,介绍了路面-车体-火炮系统多体动力学瞬态建模与解析方法,基于磁流变液阻尼器的火炮扰动测试和基于希尔伯特-黄变换的扰动时频谱分析方法,从理论解析与实验分析两个角度诠释了扰动力矩的作用机理、影响因素和变化规律。

(2)在系统建模部分,分析了武器稳定系统的构架与参数匹配计算,非线性数学模型与虚拟样机模型的构建以及参数辨识方法,同时对系统运行过程中的稳态“牵移”,驱动死区、延时与振荡,低速“爬行”和高速调炮“超回”等问题进行了理论分析与实验验证。

(3)在系统控制部分,首先针对常规结构,分析了串联滑模控制、可变给定多模态控制等武器稳定系统新型控制结构体系与控制方法,实现系统柔性模态切换与一体化高精度控制;在此基础上,又介绍了一种坦克武器稳定系统高精度无间隙传动的结构及其高精度抗扰控制方法。

(4)在系统优化部分,探讨基于智能优化算法的系统控制参数整定,系统参数优化平台的开发等问题,并进一步介绍了智能学习型武器稳定系统的设计方法。

全书体系完整,理论性强,思想新颖,研究内容涉及机械、力学、电子、控制、信息、兵器等诸多学科领域,也反映了坦克武器稳定系统多学科交叉的基本属性。

衷心希望本书的出版能为从事坦克装甲车辆、武器系统控制以及机载、舰载武器等其他领域工作的科技人员提供参考,促进相关领域技术的进步和发展。

臧克茂^①

① 臧克茂,中国工程院院士。

前 言

坦克火力系统的总体性能要求为“先敌开火,首发命中”,而武器稳定系统则是实现这一目标的关键环节,对发挥坦克火力性能具有决定性的作用。特别是在新时期高机动作战条件下,坦克武器稳定系统的性能要求越来越高,如何针对系统强干扰、快时变性和高性能要求等特点,进一步提高系统控制性能和抗扰能力,是武器稳定系统研究设计面临的新课题。这一课题涵盖诸多子课题,例如坦克机动对武器稳定有什么影响,如何影响的,影响究竟多大,又如,武器稳定系统应该怎样构架,部件怎样选型设计,如何实现高精度控制等,这些问题涉及系统的理论构架、建模控制及其工程应用等方面,具有耦合性、复杂性、多学科交叉性等特点。

针对上述问题,本书从理论研究和工程实践两个角度系统地进行坦克武器稳定系统建模与控制技术的研究分析,研究内容既注重理论体系构建,又紧密联系装备科研实践和作战需求,分析方法涉及理论计算、仿真分析、工程设计与实装试验。

全书共分为7章:第1章,概论,概述坦克武器及其稳定控制系统的基本原理、结构和性能指标要求,分析近年来系统的发展趋势及关键技术,探讨高机动作战条件下系统面临的挑战与对策;第2章,坦克-武器耦合动力学与扰动谱测试分析技术,从理论计算和测试分析两个方面对坦克机动过程中扰动力矩的传递路径、作用规律、测试方法以及频谱特性进行分析研究;第3章,武器稳定系统构架与建模分析,首先根据系统需求开展部件选型和参数匹配计算,在此基础上,构建系统非线性数学模型,分析系统非线性特性及其对运动性能的影响,最后探讨系统虚拟样机模型构建方法及其应用;第4章,系统非线性状态估计与参数辨识技术,分析状态估计与参数辨识器的构架与设计,提出基于串联结构的辨识器降阶方法,构建状态估计与参数辨识的误差传递模型,探讨辨识误差的动态补偿原理;第5章,武器稳定系统非线性补偿与多模态控制,首先对齿隙、摩擦分析与补偿控制研究中的典型方法进行介绍,在此基础上,分析整系统的多非线性补偿与抗扰控制策略,最后针对武器稳定系统的特殊应用工况,探讨其多模态一体化控制的问题;第6章,无间隙传动武器稳定系统及其高精度控制,针对常规武器稳定系统结构存在的问题,探讨了一种基于座圈电机/直线电机的无间隙传动武器稳定系统体系结构,分析该系统中特种电机设计、驱

动器死区抑制等特殊问题,在此基础上讨论高精度抗扰控制策略及其工程实现方法,并对其他应用中的高精度传动技术进行简要概述;第7章,系统控制参数自适应调整与自优化技术,探讨基于智能优化算法的系统控制参数整定以及系统参数优化平台的开发方法,在此基础上进一步开展智能学习型武器稳定系统的设计,实现控制参数全程实时自动调整与动态自优化,从而实现系统性能的自动维护,即构成“免维护武器稳定系统”。

全书内容围绕坦克武器稳定系统的“分析—建模—控制—优化”理论体系展开,同时又贯穿武器装备“分析论证—研制设计—使用维护”这一寿命周期。研究大量采用了理论分析与工程实验相结合的方法,二者相互验证,互为补充,各章节的最后还给出了相关理论方法的应用/开发实例分析,为读者进一步开展装备工程实践提供借鉴。

这些内容主要源自研究团队的科研实践,同时也包含了国内外相关技术的最新成果。在长期的科研和本书出版过程中,得到了臧克茂院士、王哲荣院士的亲切关心、指导和帮助,臧克茂院士还欣然为本书作序;研究团队中的魏曙光副教授、廖自力副教授、刘春光副教授、徐礼博士后、徐海亮博士后、冯亮博士、刘秋丽博士、李嘉琪博士等为本书的出版做出了大量工作和重要贡献;此外,中国兵器工业集团的周黎明研高工、吴立新研高工、刘勇研高工,以及陆军装甲兵学院的张豫南教授、李匡成教授、张进秋教授、毕忠安副教授等专家学者对本书内容提出了宝贵意见。在此向上述专家学者表示衷心感谢。同时感谢国防工业出版社和国防科技图书出版基金评审委员会的各位专家,他们为本书出版付出了辛勤劳动和提出了宝贵意见。

限于作者水平和实际工作的局限性,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 坦克武器及其稳定控制原理	1
1.1.1 坦克武器概述	1
1.1.2 坦克武器的自动控制	2
1.1.3 坦克武器稳定系统的一般结构	4
1.2 坦克武器稳定系统的性能指标	6
1.2.1 系统稳定精度	6
1.2.2 最低瞄准速度	8
1.2.3 最大调炮速度	10
1.2.4 其他性能指标	11
1.3 坦克武器稳定系统的发展概况与关键技术	12
1.3.1 动力子系统的发展与关键技术	12
1.3.2 控制子系统的发展与关键技术	19
1.4 高机动作战条件下系统面临的挑战与对策	21
1.4.1 高机动作战条件及其影响	21
1.4.2 基于“扰动链-驱动链”的系统分析研究方法	22
参考文献	24
第2章 坦克-武器耦合动力学与扰动谱测试分析技术	26
2.1 坦克-武器系统构型与振动受力分析	26
2.1.1 系统构型与基本假设	26
2.1.2 系统耦合振动受力分析	27
2.2 武器系统多体耦合动力学建模与解析	28
2.2.1 路面-车体-火炮系统多体动力学瞬态建模	28
2.2.2 系统动力学模型简化与解析	32
2.2.3 扰动力矩的关联因素分析	38
2.3 武器系统扰动力矩动态测试与时频谱分析	40
2.3.1 扰动力矩的动态测试	40

2.3.2	扰动力矩频谱特性分析方法	42
2.3.3	应用实例分析	47
	参考文献	49
第3章	武器稳定系统构架与建模分析	51
3.1	系统部件选型与参数匹配设计	51
3.1.1	控制对象分析	51
3.1.2	系统构架与部件匹配计算	52
3.2	武器稳定系统非线性数学建模	56
3.2.1	火炮/炮塔运动分析	56
3.2.2	动力传动装置建模	57
3.2.3	驱动电机建模	57
3.2.4	功率放大装置建模	58
3.2.5	动力子系统整体建模	59
3.2.6	系统整体模型及其化简	59
3.3	计及驱动非线性作用的系统运动特性分析	61
3.3.1	系统的稳定状态分析	61
3.3.2	系统的低速运动分析	64
3.3.3	系统的高速运动分析	72
3.3.4	“低速/高速”分段控制分析	74
3.4	系统虚拟样机模型构建方法与应用	75
3.4.1	虚拟样机建模的基本方法与步骤	75
3.4.2	系统虚拟样机建模的关键问题	81
3.4.3	系统虚拟样机模型的应用	84
	参考文献	86
第4章	系统非线性状态估计与参数辨识技术	88
4.1	状态估计与参数辨识器构架	88
4.1.1	系统不确定特性分析	88
4.1.2	状态估计与参数辨识的互逆性与解耦方法	89
4.1.3	基于串联结构的辨识器降阶设计	90
4.2	基于扩张状态观测器的系统状态估计	90
4.2.1	积分型扩张状态观测器及其滤波特性	90
4.2.2	基于积分型 ESO 的炮控系统状态估计	94
4.3	基于 CVMLS 的炮控系统非线性参数辨识	96

4.3.1	参数辨识性能的评价指标	96
4.3.2	协方差修正最小二乘算法设计	97
4.3.3	基于 CVMLS 的炮控系统参数辨识	99
4.4	状态估计与参数辨识误差分析与动态补偿	100
4.4.1	积分型 ESO 的误差分析	101
4.4.2	CVMLS 的辨识误差分析	102
4.4.3	辨识误差动态补偿方法	106
4.4.4	应用实例分析	108
	参考文献	110
第 5 章	武器稳定系统非线性补偿与多模态控制	112
5.1	齿隙非线性的频域特性分析与补偿控制	112
5.1.1	问题描述	112
5.1.2	基于描述函数的齿隙稳定性分析	113
5.1.3	齿隙模型的连续化近似	116
5.1.4	齿隙非线性终端滑模补偿控制	117
5.2	摩擦非线性系统的分析与滑模控制	120
5.2.1	问题描述	120
5.2.2	摩擦非线性系统的稳定性分析方法	120
5.2.3	摩擦非线性模糊滑模补偿控制	121
5.3	基于串联结构的系统多非线性补偿与抗扰控制	124
5.3.1	基于等效扰动的 Backstepping 滑模控制	124
5.3.2	串联滑模控制器设计与稳定性分析	129
5.3.3	基于系统辨识的炮控系统串联滑模控制	133
5.3.4	针对辨识误差的鲁棒串联滑模控制	137
5.4	武器稳定系统多模态一体化控制技术	139
5.4.1	多模态控制问题的引出	139
5.4.2	基于切换给定的系统多模态串联滑模控制	141
5.4.3	应用实例分析	144
	参考文献	149
第 6 章	无间隙传动武器稳定系统及其高精度控制	151
6.1	无间隙传动武器稳定系统结构与设计	151
6.1.1	系统总体结构	151
6.1.2	特种电机的设计	152

6.1.3	逆变器死区效应及其补偿控制	155
6.2	无间隙传动系统自抗扰控制及其参数配置	163
6.2.1	系统建模与线性自抗扰控制器设计	163
6.2.2	LESO 收敛性与滤波性能分析	166
6.2.3	控制器稳定性与抗扰特性分析	169
6.2.4	考虑噪声的系统频带特性分析	179
6.2.5	基于频带特性分析的控制器参数配置	182
6.3	控制策略的快速集成开发技术	183
6.3.1	基于 dSPACE 平台的算法快速集成开发基本方法	183
6.3.2	系统线性自抗扰控制算法集成开发设计	184
6.4	其他高精度传动技术	187
6.4.1	双电机驱动技术	187
6.4.2	谐波齿轮传动技术	190
	参考文献	191
第 7 章	系统控制参数自适应调整与自优化技术	193
7.1	基于混沌化粒子群的参数整定算法研究	193
7.1.1	控制参数优化目标与算法	193
7.1.2	粒子群算法及其收敛性分析	194
7.1.3	采用混沌映射优化粒子群算法	200
7.1.4	基于混沌化粒子群算法的参数整定	202
7.2	武器稳定系统控制参数优化平台开发	203
7.2.1	基于总线交互的控制参数优化平台构架	203
7.2.2	开发实例分析	204
7.3	智能学习型武器稳定系统设计方法	207
7.3.1	多核并行开放式控制器硬件架构	207
7.3.2	混沌化粒子群优化算法的 FPGA 实现	208
	参考文献	212
附录 1	常用符号	213
附录 2	常用缩略语	217

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Tank weapons and their stable control principles	1
1.1.1 Overview of tank weapons	1
1.1.2 Automatic control for tank weapons	2
1.1.3 General structure of tank weapon stabilization system	4
1.2 Performance indexes of tank weapon stabilization system	6
1.2.1 Stabilization accuracy	6
1.2.2 Minimum aiming speed	8
1.2.3 Maximum gun – laying speed	10
1.2.4 Other performance indexes	11
1.3 Development and key technologies of tank weapon stabilization system	12
1.3.1 Development and key technologies of power subsystem	12
1.3.2 Development and key technologies of control subsystem	19
1.4 Challenges and countermeasures faced by the system in case of high – mobility operations	21
1.4.1 High – mobility operation conditions and their influences	21
1.4.2 System analysis and study methods based on “Disturbance Chain – Drive Chain”	22
References	24
Chapter 2 Tank – weapon coupling dynamics and testing/analysis technology of disturbance spectrum	26
2.1 Configuration and vibration force analysis of tank – weapon system	26
2.1.1 System configuration and its fundamental hypothesis	26
2.1.2 Force analysis of system coupling vibration	27
2.2 Multi – body coupling dynamics modeling and analysis of weapon system	28
2.2.1 Multi – body dynamics transient modeling of	

ground – hull – gun system	28
2. 2. 2 Simplification and analysis of system dynamics model	32
2. 2. 3 Analysis of related factors of disturbance moment	38
2. 3 Dynamic testing and time – frequency spectrum analysis of weapon system disturbance moment	40
2. 3. 1 Dynamic testing of disturbance moment	40
2. 3. 2 Analysis method of time – frequency spectrum characteristic of disturbance moment	42
2. 3. 3 Application example analysis	47
References	49

Chapter 3 Architecture and modeling analysis of weapon

stabilization system	51
3. 1 Selection of system components and design of parameters matching	51
3. 1. 1 Analysis of control objects	51
3. 1. 2 System architecture and components matching calculation	52
3. 2 Non – linear mathematical modeling of weapon stabilization system	56
3. 2. 1 Motion analysis of gun/turret	56
3. 2. 2 Modeling of power transmission unit	57
3. 2. 3 Modeling of drive motor	57
3. 2. 4 Modeling of power amplifier	58
3. 2. 5 Integrated modeling of power subsystem	59
3. 2. 6 System integrated model and its simplification	59
3. 3 System motion characteristics analysis with consideration of non – linear action in the drive chain	61
3. 3. 1 Analysis of stabilizing state	61
3. 3. 2 Analysis of low – speed motion	64
3. 3. 3 Analysis of high – speed motion	72
3. 3. 4 Subsection control analysis of “low – speed/ high – speed”	74
3. 4 Modeling method and applications of system virtual prototype	75
3. 4. 1 General modeling method and steps of virtual prototype	75
3. 4. 2 Key problems of modeling system virtual prototype	81
3. 4. 3 Applications of system virtual prototype	84
References	86

Chapter 4	System non – linear state estimation and parameter identification technology	88
4.1	Architecture of state estimation and parameter identifier	88
4.1.1	Analysis of system uncertainty	88
4.1.2	Reciprocal invertibility and decoupling method of state estimation and parameter identification	89
4.1.3	Reduced – order design of identifier based on series structure	90
4.2	System state estimation based on Extended State Observer(ESO)	90
4.2.1	Integral ESO and its filtering characteristics	90
4.2.2	System state estimation based on integral ESO	94
4.3	Non – linear parameter identification based on Covariance Modification Least Squares Algorithm (CVMLS)	96
4.3.1	Evaluation indexes of parameter identification performance	96
4.3.2	Design of CVMLS	97
4.3.3	System parameter identification based on CVMLS	99
4.4	Error analysis and dynamic compensation of system state estimation and parameter identification	100
4.4.1	Error analysis of integral ESO	101
4.4.2	Error analysis of CVMLS	102
4.4.3	Dynamic compensation method of identification error	106
4.4.4	Application example analysis	108
	References	110
Chapter 5	Non – linear compensation and multi – mode control of weapon stabilization system	112
5.1	Frequency domain characteristics analysis and compensation control of backlash nonlinearity	112
5.1.1	Problem description	112
5.1.2	Stability analysis of non – linear system with backlash based on describing function	113
5.1.3	Continuous approximation of backlash model	116
5.1.4	Terminal sliding mode compensation control of backlash nonlinearity	117
5.2	Analysis and sliding mode control of non – linear system with friction	120

5.2.1	Problem description	120
5.2.2	Stability analysis methods of non – linear system with friction	120
5.2.3	Fuzzy sliding mode control of friction nonlinearity	121
5.3	Multiple nonlinearities compensation and disturbance rejection control based on series structure	124
5.3.1	Backstepping sliding mode control based on equivalent disturbance	124
5.3.2	Design and stability analysis of series sliding mode controller	129
5.3.3	Series sliding mode control based on system identification	133
5.3.4	Robust series sliding mode control against identification error	137
5.4	Multi – mode integrated control technology of weapon stabilization system	139
5.4.1	Introduction to multi – mode control problem	139
5.4.2	Multi – mode series sliding mode control based on the given switching principle	141
5.4.3	Application example analysis	144
	References	149

Chapter 6 Gapless – transmission weapon stabilization system and its high accuracy control 151

6.1	Structure and design of gapless – transmission weapon stabilization system	151
6.1.1	Overall architecture of system	151
6.1.2	Design of special motor	152
6.1.3	Dead – time effects of driver and its compensation control	155
6.2	Auto Disturbance Rejection Control(ADRC) for gapless – transmission system and its parameters configuration	163
6.2.1	System modeling and design of linear ADRC	163
6.2.2	Convergence and filtering performance analysis of LESO	166
6.2.3	Stability and disturbance rejection characteristics analysis of LADRC	169
6.2.4	Frequency – band characteristics analysis of control	