



国防科技图书出版基金

Research on Extremum Seeking
Algorithm and Its Application

极值搜索 算法研究及其应用

■ 左斌 李静 胡云安 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

014042667

0172
254

极值搜索算法研究及其应用

Research on Extremum Seeking Algorithm
and Its Application

左斌 李静 胡云安 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1728963

图书在版编目(CIP)数据

极值搜索算法研究及其应用 / 左斌, 李静, 胡云安
著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 09282 - 0

I. ①极... II. ①左... ②李... ③胡... III. ①极值
(数学) - 搜索 - 研究 IV. ①O172②O229

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 046780 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 × 1000 1/16 印张 15 1/4 字数 294 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 89.00 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。

设立出版基金是一个新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断摸索、认真总结和及时改进,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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	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		

前 言

极值搜索问题是存在于工业生产和军事应用等领域的普遍问题,如多任务调度问题、系统性能优化问题、结构设计优化问题等。在实际的控制系统中,系统的参考输入量与输出量之间往往存在某种未知的参考轨迹关系,而这种未知的参考轨迹关系意味着在参考输入的作用下,系统的输出轨迹中存在某个最优输出量(极大值或者极小值)。如果采用合适的方法,使得系统的输出量能够收敛于此最优值处,那么通过控制所取得的利益将得到极值化,而关于这些问题的探讨都属于极值搜索问题研究的范畴。然而,如何有效解决极值搜索问题一直是科研工作者苦于钻研的内容,极值搜索算法的出现与发展为解决此类问题提供了有效的手段。

极值搜索算法作为自适应控制、最优控制等控制理论与技术发展中的一个基础性热点领域,在美国、澳大利亚、韩国等科技发达国家受到了高度重视,并得到了深入研究,一致认为该方法可在国防建设和工业生产中发挥重大作用,发展前景广阔。虽然极值搜索算法已经引起了国外学者的关注,但是在国内鲜有学者对其进行深入的研究。本书主要结合作者在极值搜索算法研究及其应用中已取得的最新研究成果,以作者在该领域的研究积累为主线,分别阐述了具有自主知识产权的离散型退火递归神经网络极值搜索算法和基于混沌退火的参数扰动递归神经网络极值搜索算法,提出了现有极值搜索算法与控制器的一体化设计方法,针对块控型极值搜索系统、单输入、单输出(Single - Input Single - Output, SISO)非仿射型非线性系统以及多输入、多输出(Multi - Input Multi - Output, MIMO)非仿射型非线性系统,设计出相应的极值搜索控制方法等,从算法设计、理论分析、仿真分析和应用实例等多方面进行了全面描述。本书内容翔实、层次分明、特色突出,为推动极值搜索算法研究的发展提供了新思路,具有较强的理论基础和应用指导价值。

全书的章节内容安排如下:

第1章综述了国内外极值搜索算法的研究现状,并对比分析了各类算法的优缺点,介绍了极值搜索算法的研究意义以及当前针对该算法的应用研究状况。

第2章针对现有参数优化算法存在的寻优能力差和鲁棒性弱的问题,提出了

一种离散型的退火递归神经网络极值搜索算法,应用此优化算法建立了针对 PID (Proportion Integration Differentiation) 控制器参数的自动调节系统,通过最小化代价函数输出值的方法,获得优化的 PID 控制器参数。此外,还针对现有的参数寻优代价函数难以综合评价系统的稳定性和动态性能的问题,设计了一种新的代价函数,利用调节权值优化了系统的稳定性与动态性能之间的关系。结合当前导弹的 PID 控制系统参数调节问题,采用所设计的离散型退火递归神经网络极值搜索算法对导弹三通道控制系统的参数实施了自动调节,并采用调节后的控制系统对导弹进行了全弹道六自由度的飞行仿真实验。

第 3 章针对传统的极值搜索控制系统采取极值搜索算法与控制器分开进行设计,导致系统难以发挥其最佳性能的问题,充分考虑到系统的非线性和不确定性,分别将基于正弦激励函数的极值搜索算法、滑模极值搜索算法、退火递归神经网络极值搜索算法与控制器进行了一体化设计,利用变结构控制策略,设计了极值搜索系统的一体化控制律,保证极值搜索系统的输出量指数收敛至其极值的一个有限邻域内。结合无人机紧密编队飞行时的最优编队结构控制问题,建立了无人机编队飞行时僚机的动力学和运动学模型,并采用所提出的 3 种极值搜索算法与控制器的一体化设计方法,分别设计出僚机的一体化极值搜索控制系统,实现了对僚机编队飞行时最小动力需求的控制目标。

第 4 章针对一类块控型的极值搜索系统,基于反演设计方法、神经网络理论和反馈线性化方法,设计了通用的极值搜索系统一体化设计方法,此方法适用于目前主要的极值搜索算法,包括基于正弦激励函数的极值搜索算法、滑模极值搜索算法和退火递归神经网络极值搜索算法,可避免极值搜索算法回路与控制回路之间的一体化建模过程,简化了系统结构设计,同时保证了闭环系统的状态跟踪误差、极值搜索变量的跟踪误差、输出量与极值之间的误差以及神经网络各参数的估计误差均有界,且指数收敛至系统原点的一个有限邻域内。

第 5 章针对现有的极值搜索算法只能保证极值搜索控制系统的输出量搜索并稳定于输出函数局部极值点的问题,提出了一种基于混沌退火的参数扰动递归神经网络极值搜索算法,这种极值搜索算法利用了混沌的遍历性和随机性以及参数扰动策略,使得极值搜索系统具有更强的全局搜索能力和更好的收敛性。对于任意的系统输出函数形式,这种极值搜索算法都可以实现全局极值点的搜索和跟踪,解决了多极值点的函数优化问题,并针对航空发动机燃烧不稳定时燃烧室内压力的振荡最小化问题和碟式飞行器在不同飞行条件下的平衡状态求解问题,利用所提出的基于混沌退火的参数扰动递归神经网络极值搜索算法解决了上述两类问

题,实现了振荡幅值的最小化控制和多目标组合最优化等目标。

第6章针对状态不可测的非仿射型非线性系统的跟踪控制问题,提出了基于极值搜索算法的输出跟踪控制方法,仅利用系统的输出量和极值搜索变量形成反馈控制律,并应用平均化理论分析了平均化系统的稳定性,然后利用奇异值扰动方法分析,证明了闭环系统的稳定性和输出跟踪误差的收敛性。这类方法无需引入状态观测器,简化了控制系统的设计结构,并可以取得期望的控制目标。

本书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助。在本书的撰写过程中得到了许多专家的认真审阅,提出了非常宝贵和中肯的意见与建议及鼓励,在此表示衷心的感谢!此外,还要特别感谢海军航空工程学院为本书的出版提供的大力支持。借此机会,还要感谢多年来与本书作者们亲密合作的所有老师和研究生,衷心感谢他们的无私奉献。

虽然作者在极值搜索算法的理论研究和应用方面取得了一些成果,但是极值搜索算法作为一种新颖的优化方法,仍处于迅速发展过程中,至今尚未形成一套完整的理论体系,还有一些研究问题亟待解决,也希望有更多的国内外学者关注和从事这个富有挑战性的研究,使该领域的相关问题得到进一步的研究和解决。

由于作者水平有限,本书难免存在错误与不足,热忱欢迎阅读本书的老师、研究生以及相关的科研人员批评指正。

作者

2013年9月20日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 极值搜索算法简介	1
1.1.1 基于正弦激励函数的单变量极值搜索算法	1
1.1.2 简单极值搜索算法	4
1.1.3 滑模极值搜索算法	4
1.1.4 斜率搜索算法	5
1.1.5 离散时间极值搜索算法	6
1.1.6 基于正弦激励函数的多变量极值搜索算法	7
1.2 极值搜索算法的研究意义	9
1.3 极值搜索算法的国内外研究现状	9
第 2 章 离散型退火递归神经网络极值搜索算法	14
2.1 系统建模与分析	15
2.2 离散型退火递归神经网络的设计	20
2.3 离散型退火递归神经网络的收敛性分析	22
2.4 基于 ESA-ARNN 的 PID 控制器参数自动调节方法	26
2.5 鲁棒性能分析	28
2.5.1 鲁棒性能指标的设计	28
2.5.2 鲁棒稳定性的评价方法	29
2.6 仿真实例分析	29
2.6.1 仿真实例一	30
2.6.2 仿真实例二	33
2.6.3 仿真实例三	35
2.6.4 带有 PID 控制器调节的自动电压稳压器仿真研究	37
2.7 新型代价函数设计	43

2.8	导弹控制参数的自动调节应用研究	47
2.8.1	导弹的数学模型	48
2.8.2	俯仰通道控制系统设计与仿真分析	51
2.8.3	偏航通道控制系统设计与仿真分析	56
2.8.4	导弹全弹道六自由度仿真分析	60
第3章	极值搜索算法与控制器的一体化设计方法	67
3.1	基于正弦激励函数的极值搜索算法与控制器的一体化设计方法	67
3.1.1	系统建模与分析	67
3.1.2	一体化控制方法的设计	69
3.1.3	仿真实例分析	75
3.2	滑模极值搜索算法与控制器的一体化设计方法	77
3.2.1	系统建模与分析	78
3.2.2	滑模极值搜索控制系统的一体化模型建立	79
3.2.3	一体化控制方法的设计	81
3.2.4	仿真实例分析	82
3.3	退火递归神经网络极值搜索算法与控制器的一体化设计方法	85
3.3.1	退火递归神经网络极值搜索系统的一体化模型建立	85
3.3.2	一体化控制方法的设计	90
3.3.3	仿真实例分析	94
3.4	无人机的紧密编队飞行控制应用研究	96
3.4.1	紧密编队飞行时僚机的数学模型	96
3.4.2	基于正弦激励函数的一体化极值搜索控制系统设计	100
3.4.3	一体化滑模极值搜索控制系统设计	107
3.4.4	基于退火递归神经网络的一体化极值搜索控制系统设计	109
3.4.5	紧密编队飞行的极值搜索控制系统分析	111
3.4.6	无人机紧密编队飞行的仿真分析	112
第4章	基于反演设计的块控型极值搜索系统一体化控制方法	117
4.1	块控型极值搜索系统的模型分析	117
4.2	理论基础	118
4.3	基于反演设计的一体化控制方法设计	120

4.4	仿真实例分析	135
第5章	基于混沌退火的参数扰动递归神经网络极值搜索算法	138
5.1	系统建模与分析	139
5.2	具有参数扰动的递归神经网络极值搜索算法的设计与分析	143
5.2.1	参数扰动递归神经网络的设计	143
5.2.2	参数扰动递归神经网络的收敛性分析	144
5.2.3	参数扰动递归神经网络解的最优性分析	146
5.3	基于混沌退火的参数扰动递归神经网络极值搜索 算法设计与分析	149
5.3.1	基于混沌退火的参数扰动递归神经网络的设计	150
5.3.2	基于混沌退火的参数扰动递归神经网络的全局收敛性分析	152
5.3.3	参数设计方法	154
5.4	仿真实例分析	156
5.4.1	ESA - CARNNPD 在系统控制中的应用	156
5.4.2	ESA - CARNNPD 在 Schaffer 函数寻优中的应用	158
5.4.3	ESA - CARNNPD 在静态非线性函数优化中的应用	161
5.5	航空发动机的燃烧主动控制应用研究	163
5.5.1	航空发动机不稳定燃烧过程的数学模型建立	164
5.5.2	燃烧室内压力模型分析	167
5.5.3	极值搜索算法在发动机不稳定燃烧主动控制中的应用	169
5.5.4	航空发动机不稳定燃烧过程的仿真分析	170
5.6	一类碟式飞行器平衡状态的求解应用研究	173
5.6.1	基于质量/推力矢量复合控制的碟式飞行器模型建立	174
5.6.2	极值搜索算法在碟式飞行器平衡状态求解中的应用	178
5.6.3	仿真实例分析	180
第6章	非仿射型非线性系统的极值搜索控制方法	185
6.1	SISO 非仿射型非线性系统的极值搜索控制方法	185
6.1.1	模型建立	185
6.1.2	基于极值搜索算法的控制方法设计及稳定性分析	186
6.1.3	仿真实例分析	191

6.2 MIMO 非仿射型非线性系统的极值搜索控制方法	193
6.2.1 模型建立	193
6.2.2 基于极值搜索算法的控制方法设计及稳定性分析	194
6.2.3 仿真实例分析	201
附录	204
附录 A 矩阵 P_3 计算	204
附录 B 矩阵 P 与 Q 计算	205
附录 C 系统矩阵与向量的计算	208
参考文献	228

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction of ESA	1
1.1.1 Single-parameter ESA Based on Sinusoidal Excitation Function	1
1.1.2 The Simple ESA	4
1.1.3 ESA with Sliding Mode	4
1.1.4 Slope Seeking Algorithm	5
1.1.5 Discrete-time ESA	6
1.1.6 Multi-parameter ESA Based on Sinusoidal Excitation Function	7
1.2 Research Significance of ESA	9
1.3 Current Research Status and Analysis of ESA at Home and Abroad	9
Chapter 2 A Discrete-time ESA Based on Annealing Recurrent Neural Network (ESA-ARNN)	14
2.1 System Modeling and Analysis	15
2.2 Design of the Discrete-time ARNN	20
2.3 Convergence Analysis of the Discrete-time ARNN	22
2.4 Auto-tuning Method of PID Controller Parameters Utilizing ESA-ARNN	26
2.5 Robustness Analysis	28
2.5.1 Design of Robust Performance Indicators	28
2.5.2 Evaluation of Robust Stability	29
2.6 Simulation Analysis	29
2.6.1 Simulation Example One	30
2.6.2 Simulation Example Two	33

2.6.3	Simulation Example Three	35
2.6.4	Simulation Study of Automatic Voltage Regulator with PID Controller	37
2.7	Design of New Cost Function	43
2.8	Research on Auto-tuning Parameters of Missile's Controller	47
2.8.1	Missile Modeling	48
2.8.2	Design of the Control System in the Pitch Channel and Simulation Analysis	51
2.8.3	Design of the Control System in the Yaw Channel and Simulation Analysis	56
2.8.4	Simulation Analysis Based on 6 DOF Missile Model	60
Chapter 3 Research on Integrated Design Methods for ESAs and Controllers		67
3.1	Research on Integrated Design Method for ESA Based on Sinusoidal Excitation Function and Controller	67
3.1.1	System Modeling and Analysis	67
3.1.2	Design of the Integrated Control Method	69
3.1.3	Simulation Analysis	75
3.2	Research on Integrated Design Method for ESA with Sliding Mode and Controller	77
3.2.1	System Modeling and Analysis	78
3.2.2	Integrated Modeling of Extremum Seeking Control System with Sliding Mode	79
3.2.3	Design of the Integrated Control Method	81
3.2.4	Simulation Analysis	82
3.3	Research on Integrated Design Method for ESA-ARNN and Controller	85
3.3.1	Integrated Modeling of Extremum Seeking Control System Based on ARNN	85
3.3.2	Design of the Integrated Control Method	90
3.3.3	Simulation Analysis	94

3.4	Research on Integrated Extremum Seeking Control for UAV Tight Formation Flight	96
3.4.1	Modeling of the Wingman in UAV Tight Formation Flight	96
3.4.2	Design of Integrated Extremum Seeking System for a Wingman Utilizing ESA Based on Sinusoidal Excitation Function	100
3.4.3	Design of Integrated Extremum Seeking System for a Wingman Utilizing ESA with Sliding Mode	107
3.4.4	Design of Integrated Extremum Seeking System for a Wingman Utilizing ESA-ARNN	109
3.4.5	Analysis of Extremum Seeking System for UAV Tight Formation Flight	111
3.4.6	Simulation Analysis of UAV Tight Formation Flight	112
Chapter 4	Research on Integrated Design Method for Block Control Extremum Seeking System Based on Backstepping Design	117
4.1	Model Analysis of Block Control Extremum Seeking System	117
4.2	Theoretical Foundation	118
4.3	Design of the Integrated Control Method Based on Backstepping Design	120
4.4	Simulation Analysis	135
Chapter 5	ESA Based on Chaotic Annealing Recurrent Neural Network with Parameter Disturbances (ESA-CARNNPD)	138
5.1	System Modeling and Analysis	139
5.2	Design and Analysis of ESA Based on Recurrent Neural Network with Parameter Disturbances (RNNPD)	143
5.2.1	Design of RNNPD	143
5.2.2	Convergence Analysis of RNNPD	144
5.2.3	Optimal Solutions of RNNPD	146
5.3	Design and Analysis of ESA-CARNNPD	149
5.3.1	Design of CARNNPD	150

5.3.2	Global Convergence Analysis of CARNNPD	152
5.3.3	Design Method of Parameters	154
5.4	Simulation Analysis	156
5.4.1	Application of ESA-CARNNPD to the Controlled System	156
5.4.2	Application of ESA-CARNNPD to Optimizing Schaffer Function	158
5.4.3	Application of ESA-CARNNPD to Optimizing Static Nonlinear Functions	161
5.5	Research on the Application of ESA-CARNNPD to Active Control of Combustion in Aeroengines	163
5.5.1	Modeling of Combustion Instability in Aeroengines	164
5.5.2	Analysis of Pressure Model in the Combustion Chamber	167
5.5.3	Application of ESA-CARNNPD to Active Control of Combustion in Aeroengines	169
5.5.4	Simulation Analysis of Combustion Instability in Aeroengines	170
5.6	Research on the Application of ESA-CARNNPD to Solving the Equilibrium State of a Class of Saucer-like Air Vehicles	173
5.6.1	Modeling of Saucer-like Air Vehicles Based on Mass Moment and Thrust Vector Complex Controller	174
5.6.2	Application of ESA-CARNNPD to Solving the Equilibrium States of Saucer-like Air Vehicle	178
5.6.3	Simulation Analysis	180

Chapter 6 Extremum Seeking Control for Non-affine Nonlinear Systems

6.1	Extremum Seeking Control for SISO Non-affine Nonlinear Systems	185
6.1.1	System Modeling	185
6.1.2	Design of the Control Method Based on ESA and Stability Analysis	186
6.1.3	Simulation Analysis	191