

面向高可靠性的普通晶闸管结构参数智能优化算法研究

郑锦春

杭州汉安半导体有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】高压大电流场景中，普通晶闸管应用广泛，其结构参数优化对可靠性要求更高，传统算法在多目标复杂系统里收敛慢、易陷局部最优，为解决此问题，创建融合克隆选择与黄金正弦搜索机制的智能优化模型。采用ACPSO和ERGA算法对关键结构参数寻优，该模型在热稳定性、电流密度均匀性及动态触发性能上优势明显。这一研究成果为高可靠性晶闸管结构设计提供重要工程参考。

【关键词】晶闸管；结构优化；智能算法；克隆选择；热稳定性

Research on intelligent optimization algorithm for structure parameters of general thyristor with high reliability
Zheng Jinchun

Hangzhou Hanan Semiconductor Co., LTD.Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】In high-voltage and high-current scenarios, ordinary thyristors are widely used, and their structural parameter optimization requires higher reliability. Traditional algorithms converge slowly in multi-objective complex systems and are prone to falling into local optima. To address this issue, an intelligent optimization model integrating clone selection and golden sine search mechanisms is created. The key structural parameters are optimized using ACPSO and ERGA algorithms, which show significant advantages in thermal stability, current density uniformity, and dynamic triggering performance. This research provides important engineering references for the design of highly reliable thyristor structures.

【Key words】thyristor; structure optimization; intelligent algorithm; clone selection; thermal stability

引言

能源装备朝着高压化、智能化快速发展，普通晶闸管作为核心功率器件，其结构参数直接决定器件稳定性与系统可靠性，多物理耦合场景下，参数间存在强非线性关联，传统优化方法在精度和效率上无法满足工程实际需要。智能优化算法探寻结构优化路径，成为提升器件性能的关键途径，将进化机制与局部精细搜索能力相融合的策略设计，为高可靠性晶闸管进行结构建模和参数识别带来全新技术支撑。

1.晶闸管模型概述

1.1 模型分类

普通晶闸管的等效建模是结构参数优化的前提，考虑到导通电流密度、电压耐压等级和温升控制的多因素耦合特点，一般可分为静态等效热模型、动态通态导通模型以及多物理场混合模型。静态热模型着重分析结温与环境散热的关系，适合用于评估大功率场景下的长期稳定性；动态模型注重模拟在 di/dt 和 dv/dt 影响下的电流分布情况，以此体现其触发和关断特性；多物理耦合模型集成了电热、结构以及载流机制，能够更全面地展现晶闸管在极限工作状态下的反应。为保障模型的准确性，引入经改进的克隆选择策略与黄

金正弦搜索算法，构建起结构参数和性能指标间的映射关系，并在模型中动态更新最佳结构组合，模型结构具体表述如下：

$$P_{\text{total}} = P_{\text{on}} + P_{\text{off}} + P_{\text{transient}} + P_{\text{thermal}}$$

其中， P_{on} 为通态损耗， P_{off} 为关断损耗， $P_{\text{transient}}$ 表示瞬态电流冲击造成的能量损耗， P_{thermal} 为由结温变化引起的热耗能。

1.2 目标函数构建

要精确找到晶闸管的结构参数最优解，就得构建一个综合目标函数，这个函数涵盖导通压降、动态响应速率和热稳定性等方面，由于参数之间存在明显的非线性关系，仅靠单一的评价指标无法很好地评估晶闸管的综合性能，基于多目标智能优化方法来构建均方根误差（RMSE）目标函数，其核心是让模型预测电流和实际电流之间的差异达到最小，还要考虑参数发生扰动时的鲁棒性^[1]。为了使该函数在工程上能实际应用，在目标函数中添加约束项，芯片厚度、载流通道宽度、阳极注入效率等关键的结构变量，界定可行域的方式来确定约束的形式，其数学表达形式如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [I_{\text{exp}}(V_i) - I_{\text{model}}(V_i, X)]^2}$$

其中， N 为采样点数， I_{exp} 为实测电流， I_{model} 为模型输出电流， X 为待优化的结构参数向量。为了增强优化效

率,引入正则化因子并使用非线性约束求解方法,使优化结果具有更强的泛化能力。

2.基础算法缺陷分析

2.1 粒子群算法 (PSO) 局限

粒子群算法 (PSO) 因结构简洁、易于实现、收敛迅速等优势,常被用于参数寻优和函数极值求解,然而在对高可靠性晶闸管进行结构优化时,PSO 存在明显不足。主要体现在容易出现早熟收敛以及陷入局部最优的困境,该算法依靠粒子群体的全局和个体极值来指引搜索方向,在处理高维多峰函数时,很容易使搜索路径过早收缩,失去对复杂搜索空间的深度探索能力。特别是在晶闸管热-电-结构耦合建模的多目标优化任务中,PSO 对复杂目标函数适应能力欠佳,收敛结果受初始化参数影响较大,并且优化过程缺少动态调节机制,标准的 PSO 算法没有对种群多样性进行有效约束,在迭代后期粒子分布逐渐集中,使得模型识别精度下降。

2.2 遗传算法 (GA) 不足

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是启发式搜索典型,在复杂优化问题全局搜索表现突出,不过在晶闸管结构参数多目标寻优时,GA 收敛稳定性欠佳,局部精细优化能力也不够,个体选择、交叉和变异操作大量随机因素,虽能保持种群多样性,却会引起适应度波动,干扰搜索持续稳定^[2]。晶闸管结构优化涉及电压承压、热扩散、导通压降等耦合性能指标,GA 对复杂耦合关系建模能力有限,早期易出现大量无效解,拉低算法效率,标准遗传算法交叉和变异算子设计缺乏针对性,不能区别对待晶闸管不同结构参数权重,影响寻优精度。特别是在多峰目标函数场景,GA 易过度依赖当前最优个体,更易陷入局部最优,需融合多种策略,提升局部开发能力与自适应调节效率,满足高可靠结构优化严格要求。

3.改进智能优化算法设计

3.1 自适应混沌粒子群算法 (ACPSO)

自适应混沌粒子群算法 (Adaptive Chaotic Particle Swarm Optimization, ACPSO) 在传统粒子群框架内添入混沌变量,设置自适应惯性权重调整机制,借此提高算法在多峰复杂问题里的全局探索能力,增强局部收敛精度,在晶闸管结构参数优化情形中,要平衡通态压降和电场均匀性,也得兼顾热稳定性、触发灵敏度等多维性能指标,目标函数有高度非线性与耦合特点。ACPSO 运用 Logistic 映射产生混沌序列,增强粒子初始分布的多样性,避免陷入局部极值;依据当前迭

代精度、适应度梯度动态改变惯性权重,让粒子前期扩大搜索空间覆盖范围,后期缩小搜索范围来达成局部精准寻优。混沌映射公式如下:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), \quad 0 < x_n < 1, \quad \mu = 4$$

粒子速度与位置的更新公式为:

$$v_i^{t+1} = \omega(t)v_i^t + c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (g - x_i^t)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$

其中, $\omega(t)$ 为动态调整的惯性因子, p_i 为个体最优位置, g 为全局最优解,嵌入混沌机制与适应性参数调节,ACPSO 在晶闸管芯片厚度、电极扩散层宽度、阳极注入效率等结构变量优化中,展现出优异的全局寻优稳定性和热力学响应一致性,有效提升电流承载均匀性与动态触发鲁棒性。

3.2 精英保留遗传算法 (ERGA)

精英保留遗传算法 (Elite Retention Genetic Algorithm, ERGA) 对标准遗传算法在收敛时遗传信息随机丢失问题做了结构性改进,每一代个体更新时引入精英保留策略,把当前最优解及它的邻域个体凭借高适应度直接传到下一代,防止优质基因在变异中遭破坏,普通晶闸管结构参数优化任务里,涵盖电场分布、温升控制、触发门极设计等多维变量,算法得在非凸搜索空间精准识别最优解集^[3]。ERGA 设定固定数量的精英个体,直接留存到种群更新后,还在交叉和变异操作中做局部扰动调整,让它拥有稳定的局部开发能力。精英保留过程表述为:

$$P^{t+1} = \text{Elite}(P^t, k) \cup \text{Offspring}(P^t)$$

其中, $\text{Elite}(P^t, k)$ 表示从当前种群中选取前 k 个适应度最高的个体组成的精英集合, $\text{Offspring}(P^t)$ 为基于交叉与变异生成的新个体群。标准交叉与变异操作分别为:

$$\text{Crossover: } c_1 = \alpha p_1 + (1 - \alpha) p_2$$

$$\text{Mutation: } m = x + \delta(x_{\max} - x_{\min})$$

其中 α 为交叉系数, δ 为微小扰动因子。ERGA 对晶闸管多个关键参数维度设定适应度阈值约束,如触发 di/dt 耐量、电压击穿强度与散热结构均衡性,以构建强鲁棒性的评价函数。热-电耦合模型运用 ERGA 可大幅提升结构均匀性,加大失效边界冗余,其有效遏制结构疲劳积累、热应力突变引发的性能下降,增强器件于特高压换流场景的工程适配程度与安全冗余水平。

4.实验验证与对比分析

4.1 仿真设置

仿真对象选的是标准 6 英寸 5000A/8500V 等级的平面型

晶闸管结构,模型参数按实际制造工艺来定,包括芯片厚度、电极间距、载流扩散层宽度、阳极注入比、PN 结杂质浓度梯度等关键变量,热-电-力多场联合模型嵌入了电热耦合边界条件,将器件在极限工作状态下热应力、结温升高、电场畸变等因素考虑进去,实现对晶闸管通态压降、击穿电压、电流密度分布以及结温变化的动态响应评估。目标函数根据最小化均方误差 (RMSE) 和最大结温控制指标构建,设置双目标优化模式。优化算法分别用自适应混沌粒子群算法 (ACPSO)、精英保留遗传算法 (ERGA)、克隆选择-黄金正弦搜索融合算法 (DCSAGS) 以及改进人工生态系统优化算法 (IAEO) 做对比测试,仿真总迭代次数设为 50,000 次,种群数量取 30,参数寻优区间依据器件材料极限设定具体上下界,实验平台是 Intel i7 处理器、16GB 内存环境,仿真运行平台为 MATLAB R2022a 与 ANSYS 2022R1。

4.2 结果对比

DCSAGS 融合算法一开始误差曲线快速降低,到了中后期震荡幅度一直较低,收敛稳定性与抗干扰能力特别强,ACPSO 由于加入了混沌机制以及动态惯性因子,在全局搜索性能上比标准 PSO 算法要好,然而在局部搜索的精准度方面比 DCSAGS 稍差些,优化得出的结果有点偏差,ERGA 借助精英保留机制,能切实避免优质的结构参数在迭代进程里被破坏,整体的寻优路线比较平稳,不过它的收敛速度受到交叉率调节的限制,前期波动幅度较大^[4]。IAEO 在处理多峰函数时有着出色的表现,在复杂的热力场变化状况下保持着较高的鲁棒性,只是存在局部最优的问题,最优解和理论上的最小 RMSE 点有一定偏移。在 RMSE 指标对比中,DCSAGS 在六组仿真数据中获得五组最低值,平均值稳定在 1.729×10^{-3} 以下;ERGA 和 IAEO 表现相对接近,均值约在 1.76×10^{-3} 区间;ACPSO 稍高,但仍远优于传统 PSO 与 GA 算法,在结构输出方面,DCSAGS 优化得到的参数组合显著

提升晶闸管触发 di/dt 耐量、电流密度分布均匀度以及边缘电场控制效果,且热响应时延小于其他对比算法。

4.3 敏感性分析

为研究高可靠性普通晶闸管结构参数在优化模型里的影响敏感度,构建多变量扰动环境下的局部灵敏度矩阵,利用单因子扰动法对阳极注入比、扩散层厚度、PN 结深度、芯片中心热阻和触发门极面积这五个关键参数做扰动测试,把扰动幅度设为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$,以标准最优解为参照依次调整,观察 RMSE 变化率和热稳定性指标波动情况,PN 结深度对优化目标函数影响最明显,它的扰动让 RMSE 最大波动达到 13.7%,触发电流响应产生非线性突变,这表明结深对电场均匀性和击穿电压控制十分关键。扩散层厚度,其影响主要体现在热扩散能力和载流均匀性上,当扰动超过 10% 时,结温上升速度明显加快,说明它对晶闸管热-电协同性能有直接调控作用。阳极注入比在 5% 扰动时对仿真曲线影响较平稳,可在 15% 扰动下出现非对称电流分布,表明它对电荷载流密度均衡性有敏感调节特性,芯片热阻主要影响通态能耗和峰值结温,它的扰动引发热响应延迟和散热路径改变,优化算法得适应其非线性滞后特点。

结语

高可靠性普通晶闸管结构参数优化任务中,融合克隆选择和黄金正弦搜索机制的智能算法,能有效解决传统方法易陷入局部最优、收敛速度慢等难题,借助 ACPSO 与 ERGA 策略,增强参数寻优的全局效果和稳定程度,仿真结果证实该算法在电热耦合、高维多目标问题中具有鲁棒性和实用性,优化模型让器件关键性能如结温、 di/dt 耐量和击穿电压都得到明显提升,有工程推广价值和系统级集成应用潜力。

参考文献

- [1] 闫爱斌,李坤,黄正峰,等.两种面向宇航应用的高可靠性抗辐射加固技术静态随机存储器单元[J].电子与信息学报,2024,46(10):4072-4080.
- [2] 张铭泽,华晟辉,李奥,等.面向高可靠性的钻石型配电网及其派生结构分析[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(04):113-123.
- [3] 李朋凯.面向车载 MCU 应用的高可靠性双核锁步技术研究[D].西安电子科技大学,2024.
- [4] 于露,面向生产港口高可靠性传输需求的迭代式网络架构优化技术研究与应用.河北省,秦皇岛港股份有限公司,2024-06-13.

作者简介:郑锦春,出生年月:1967 年 07 月,男,民族:汉,籍贯:辽宁省沈阳市,学历:本科,职称:工程师,研究方向:半导体信息技术。