

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.08.013

量子计算在火电机组优化控制中的应用综述

Review on the application of quantum computing in optimization control on thermal power units

高明明¹, 杨磊^{1*}, 于浩洋¹, 张洪福¹, 刁友锋², 宋琚琤³
GAO Mingming¹, YANG Lei^{1*}, YU Haoyang¹, ZHANG Hongfu¹,
DIAO Youfeng², SONG Juncheng³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中国华电集团天津公司, 天津 300203;
3. 华电国际电力股份有限公司 天津开发区分公司, 天津 300270)

(1.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2.Tianjin Company, China Huadian Corporation Limited, Tianjin 300203, China; 3.Tianjin Development Area Branch, Huadian Power International Corporation Limited, Tianjin 300270, China)

摘 要: 量子计算及其衍生算法近年来快速发展, 成为优化领域和人工智能领域的研究热点。随着我国电力行业清洁化和智能化的发展, 量子计算逐渐应用于火电机组优化控制领域并取得了诸多成效。介绍了量子计算的基本理论, 详细论述了众多量子衍生算法在火电机组优化控制领域中的应用研究进展。从量子群智能优化算法、量子遗传算法和量子机器学习算法等多个角度综述了量子计算在火电机组优化控制领域的机遇与挑战。最后总结并展望了量子计算未来在火电机组优化控制领域的发展趋势。

关键词: 量子计算; 量子衍生算法; 火电机组; 优化控制; 智能算法; 人工智能

中图分类号: TP 301.6; TM 621.7

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)08-0090-07

Abstract: Quantum computing and its inspired algorithms have developed rapidly in recent years, and have become the hot spot in optimization and artificial intelligence fields. With the clean and intelligent development of China's electric power industry, quantum computing has gradually been being applied in the optimization control on thermal power units and has obtained certain achievements. Starting by a brief introduction to quantum computing basic theory, the progress of quantum-inspired algorithm in optimization control on thermal power units is expounded in details. The opportunities and challenges of quantum computing in this field is analyzed from multiple aspects including the quantum swarm intelligence optimization algorithm, the quantum genetic algorithm and machine learning algorithm. At last, the prospects of quantum computing in the optimization control on thermal power units are summarized.

Keywords: quantum computing; quantum-inspired algorithm; thermal power plant; optimization control on units; intelligence algorithm; AI

0 引言

目前, 我国火电机组控制正向着智能化的方向发展, 火电机组智能优化控制技术是其中的重要一环。随着智能算法的不断进步, 火电机组优化控制技术与时俱进, 不断提升机组的运行水平。量子计算于 20 世纪下半叶开始快速发展, 其利用量子力学

理论中的量子纠缠和量子叠加等特性, 高效地对搜索问题进行求解, 有助于实现机组的高性能优化控制。

量子计算最初可追溯至 1982 年 Feynman^[1]首次提出的利用量子计算方式对量子系统演化行为进行模拟, 从而实现经典计算无法处理的大规模计算量。后续的量子计算发展可划分为 2 大分支: 量子算法和量子衍生算法^[2]。量子算法更贴近量子力学的本质, 主要代表为 20 世纪末提出的 Shor 算法^[3]和 Grover 算法^[4]。Shor 算法利用量子傅里叶变换 (QFT) 将大数质因子分解问题转化为对函数周期的

收稿日期: 2020-06-05; 修回日期: 2020-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0600205); 中国华电集团科技项目 (CHDKJ19-01-88); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2019MS019)

求取,借助在量子环境下高效率运行,可以实现多项式时间内的大数分解;Grover量子搜索算法的核心思想是利用量子叠加态原理将无序搜索问题的复杂度从 N 降至 \sqrt{N} ,从而极大地减少了计算量。

量子算法的大规模应用将实现计算领域的革命性突破,但量子算法必须运行在量子计算机上,不能通过传统计算机实现,目前关于量子算法的研究仍主要处于理论阶段,其广泛应用仍需等待。

量子衍生算法是量子计算的另一大实用发展方向,是量子力学与传统算法结合形成的新型算法。Kak^[5]首先提出了量子神经计算,是量子衍生计算技术的发展开端,Kouda等^[6]在此基础上进一步提出了量子神经网络的概念。随后,量子衍生算法不断发展并被引入智能算法领域,陆续出现了量子衍生模拟退火算法、量子衍生遗传算法等。量子衍生算法本质上仍属于传统算法,因此可以直接在传统计算机平台上执行,目前已在众多领域有所应用^[7],本文所论述的在火电机组优化控制中的应用和发展均为量子衍生算法。

本文首先对量子计算的基本特征进行介绍,文中综合讨论多种量子衍生算法在火电机组优化控制中的应用形式和改进方法,并介绍其各自前沿研究的应用领域,最终展望量子计算在该领域的可能发展方向,为后续量子计算在火电机组优化控制领域的发展应用提供参考。

1 量子计算基础

1.1 量子比特和量子叠加态

在量子计算中,“量子比特”这一概念被引入,对应于传统计算中的“比特”概念,用于描述量子所处的状态。量子计算中,量子可以处于3种状态: $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 和叠加态 $|\varphi\rangle$,叠加态是前2个状态的线性叠加,即

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (1)$$

式中: α 和 β 为复数,称为概率幅。

α 和 β 需满足以下要求

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (2)$$

处于叠加态的量子被观测后将被以概率 $|\alpha|^2$ 测量到 $|0\rangle$ 或以概率 $|\beta|^2$ 测量到 $|1\rangle$,这一现象即为量子坍缩。

以遗传算法(GA)为例,典型GA的染色体表示方式为

$$[1 \ 0 \ 1 \ \cdots \ 1], \quad (3)$$

即通过二进制比特序列的方式表示优化问题的一个潜在可行解。但在量子遗传算法(QGA)中,量子

染色体序列以量子比特序列的形式构成

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \alpha_n \\ \beta_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据式(1)、式(2)的规则,此时由式(4)所表示的染色体将同时处于 2^n 种叠加态中,各状态间可实现并行进化,因而与传统GA相比极大地增加了种群的多样性,在搜索过程中存在巨大优势。

1.2 量子门

量子门是用于实现量子比特相位改变的机构,量子门的种类多样,常用的有量子旋转门、泡利-X门(非门)、Hadamard门等,以量子旋转门为例,其定义为

$$\begin{bmatrix} \cos \Delta\theta & -\sin \Delta\theta \\ \sin \Delta\theta & \cos \Delta\theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

旋转门作用于单位量子,使其概率幅发生改变

$$\begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta & -\sin \Delta\theta \\ \sin \Delta\theta & \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: θ 为旋转变角; α' 和 β' 为相角偏移后的概率幅, α' 和 β' 依然需满足式(2)的要求。

在迭代过程中对 θ 进行控制,可实现对量子染色体种群的定向进化控制。

量子叠加和量子门的概念是量子计算中的重要基础,相当一部分量子衍生算法采用其作为设计的核心。伴随着量子计算在优化控制领域的深入应用,更多基于深层次量子计算原理的算法也在不断发展中。

2 量子计算在火电机组优化控制中的应用

随着我国电力行业清洁化和智能化的发展,智能优化控制技术迅速兴起,在火电机组优化控制中,粒子群算法、蚁群算法、遗传算法等多种智能优化算法都实现了成熟的应用;同时,伴随着人工智能技术的爆发,机器学习算法也迅速融入该领域。但是,常用的智能优化算法和机器学习算法均存在不同程度的缺陷,如计算效率低、易陷入早熟或参数繁多不易确定等,对算法在训练和寻优过程中的效果影响极大,对这些因素的处理是否得当,将直接影响优化结果。

量子衍生算法为解决以上问题提供了一种思路,量子计算远胜于经典计算的并行搜索性适用于大规模数据运算,可极大地提升原算法的运算效率和寻优能力,实现优于传统算法的控制效果。

2.1 量子粒子群优化算法的应用

2.1.1 2种不同量子粒子群优化算法

粒子群优化(PSO)算法是典型的群智能优化算法,基于对鸟类群体捕食过程的模拟。PSO算法应

用简单、收敛速度快,但在优化过程中,由于粒子在 n 维空间中以有限轨迹运动进行搜索,不能保证对整个解空间完全遍历,因此传统 PSO 算法不是严格的全局收敛算法^[8]。孙俊^[8]和李士勇等^[9]结合量子计算理论,于同一时期分别提出了 2 种不同的量子粒子群优化(QPSO)算法,以解决传统 PSO 算法中存在的问题。

李士勇等提出的 QPSO 算法(以下简称李 QPSO 算法)采用典型量子计算方式,将粒子速度更新转化为旋转门转角更新,位置矢量更新转化为概率幅更新,并利用量子非门进行变异,以进一步提高粒子种群多样性。

孙俊提出的 QPSO 算法(以下简称孙 QPSO 算法)基于 δ 势阱模型,根据“量子空间内粒子的速度和位置不能同时确定”这一特性,以波函数的方式描述粒子状态,舍去了算法中粒子速度这一参数,简化了计算形式和算法参数并提高了算法的全局搜索能力。

有试验认为^[10],孙 QPSO 算法在运算效率和搜索能力上具有优势,其模型参数更少,实现方式简单,因此孙 QPSO 算法目前的应用和发展范围更广,也是目前火电机组优化控制中应用最广泛的量子衍生优化算法。

2.1.2 在 PID 整定中的应用

孙 QPSO 算法首先应用于控制回路的比例-积分-微分(PID)参数优化中,典型的应用方式如图 1 所示。算法应用于超临界机组主汽温度串级控制系统仿真,对外回路 PID 控制器参数进行整定,结果表明,系统经参数优化后控制品质有所提高^[11]。

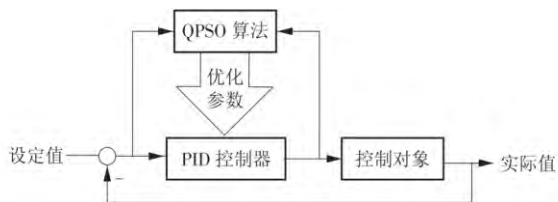


图 1 QPSO 算法在 PID 控制器整定中的典型应用方式

Fig. 1 Typical application of QPSO algorithm in PID controller tuning

后续有学者^[12]分析认为,孙 QPSO 算法在机制上仍具有陷入局部最优的可能性,为解决这一问题,向算法中引入扰动变异,克服粒子在进化中后期的早熟现象。改进后的 QPSO 算法在主汽温 PID 控制器的整定试验中得到了验证,使系统调节时间缩短,超调量变小。这一改进算法进一步应用在再热汽温调节系统 PID 参数优化中,优化结果良好,与传统 QPSO 算法相比,有效缩短了寻优时间^[13]。

2.1.3 基于混沌理论的 QPSO 算法改进

孙 QPSO 算法具有高效的寻优能力,但在搜索后期同样可能因粒子聚集导致搜索能力下降,这也是 PSO 算法的常见问题。常见解决方式是向 QPSO 算法引入混沌搜索机制,构建混沌粒子群优化(CQPSO)算法,混沌系统的伪随机性和遍历性可以一定程度扩大粒子群在优化后期的搜索范围和搜索均匀性,遏制局部最优现象的出现。CQPSO 算法用于某 600 MW 机组主汽温控制系统的辨识和参数优化中,具有和传统 PSO 算法基本一致的结果,但在多模态、高参数量的情况下具有更快的搜索速度和成功率^[14]。CQPSO 算法继续应用于循环流化床(CFB)机组大延迟对象的 PID 控制器参数二次优化中,其效果明显优于使用经验公式和传统 PSO 算法的效果^[15]。

以上研究表明,引入混沌机制是 QPSO 算法寻优能力下降时可首先采取的措施。

2.1.4 在系统辨识中的应用

部分学者对孙 QPSO 算法中的粒子状态更新方式进行了改进,以提高粒子搜索的随机性,强化粒子群的遍历能力^[16-18]。改进的 QPSO 算法用于对超超临界机组主汽温控制系统进行辨识,可以获得比传统 PSO 算法和原 QPSO 算法更加精确的主汽温控制模型。近期有学者向 QPSO 算法中加入引力作用机制,提高算法的进化速度和对最优值的逼近能力,实现对 600 MW 机组喷氨脱硝系统的有效预测,可为后续优化控制提供基础^[19]。QPSO 算法同样对热工系统辨识表现出广泛的适用性,采用 QPSO 算法对 1 000 MW 超超临界机组多个子系统进行辨识,均获得了较为精确的结果^[20]。

QPSO 算法在火电机组系统辨识应用中展现了良好的效果。高精度辨识模型的建立将助于系统优化控制的设计,从而提高系统的控制品质,是值得进一步推广的应用。

2.1.5 2 种 QPSO 算法的联合使用

李 QPSO 算法在火电优化控制中应用较少,其特点是可以提高粒子群搜索的精细度。黄宇等^[21]采用李 QPSO 算法并结合混沌序列对初始种群进行多样化优化,进行循环流化床机组煤量-床温模型和风量-床温模型的辨识,模型精度极高且迭代次数较少。

双量子粒子群优化(DQPSO)算法^[22]结合了孙、李 QPSO 算法的特点,对粒子个体和种群进化方式同时进行了量子化,在多个寻优测试中均获得了优于原始孙、李 QPSO 算法的结果。这种新型综合算法未来可能成为火电机组优化控制领域的前沿

算法。

2.1.6 QPSO算法小结

以上研究成果表明,QPSO算法及多种改进型算法^[23]可适用于火电机组系统优化,或进行系统辨识为后续控制系统的设计和优化提供基础。该算法成熟且应用广泛,目前仍具有很大的发展空间。

2.2 QGA的应用

2.2.1 QGA在应用中面临的困难

QGA是火电机组优化控制领域中量子衍生算法的另一主要应用分支。QGA形成时间相对较早^[24-25],利用量子染色体编码和量子旋转门实现种群的迭代进化,在缩小种群规模的同时提高了算法的搜索效率。目前,QGA可能不适用于连续函数的优化问题,试验表明^[26],单纯的QGA在一些优化问题中甚至可能逊于传统GA和模拟退火遗传算法(SAGA)。实际应用中QGA常需进行适当改良,使其适用于特定问题。

2.2.2 针对旋转变异角的改进

QGA的常见改进方式之一是针对量子门旋转变异角的调整策略进行改进,根据模糊推理规则自适应地调整进化过程中的旋转变异角。这种改进方式可以提高收敛速度,对某循环流化床机组的一次风-床温模型进行了有效辨识^[27]。采用相似思路改进旋转变异角调整策略,可以实现对分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器进行整定^[28],进一步证明改进后的QGA可应用于复杂热工系统的参数优化。

目前,针对QGA旋转变异角调整策略的改进方式并不唯一,实际应用中可进行灵活的设计,采用适用于具体问题的调整策略。

2.2.3 小生境技术与混沌变异机制的引入

为解决CFB锅炉汽温时变、大滞后和大惯性的控制难点,有学者^[29]采用了自抗扰控制方式(ADRC),其控制效果优于传统的PID控制,但参数更多,整定也更加困难。采用QGA对ADRC参数进行整定,并引入小生境进化策略和混沌变异机制提高QGA种群间的竞争行为和多样性。试验表明,这一改进取得了极佳的优化控制效果,证明了量子优化算法与其他控制策略结合共同用于优化控制的可行性。

2.2.4 QGA小结

以上实例表明,QGA未来在火电机组优化控制领域仍具有广阔的发展前景,通过引入合理的改进机制,QGA可广泛应用于各种热工系统辨识、参数优化问题中。

3 量子计算在其他算法中的应用

3.1 在其他智能优化中的应用

目前,其他量子智能优化算法在火电机组优化控制领域的应用较少,尚处于研究起步阶段,对这一方面的应用和研究可能具有很大前景,如量子退火算法(QA)、量子免疫算法(QIA)等。目前,不断有新型的量子群智能优化算法诞生并逐步应用于火电机组优化控制领域,尤其以量子群智能优化算法居多,如量子自适应鸟群算法(QBSA)^[30]、量子灰狼优化(QGWO)算法^[31]、量子同步鲸鱼优化(QSWO)算法^[32]以及量子迭代混沌涡流搜索(QIVS)算法^[33]等。这些算法的诞生和应用,预示着量子计算在火电机组优化控制领域蓬勃发展的前景。

3.2 采用量子计算优化的机器学习算法

得益于计算能力和互联网技术的高速发展,机器学习(包括深度学习)算法发展迅速并广泛应用于实际工程。在火力发电领域,聚类算法、支持向量机(SVM)和神经网络等机器学习算法的应用为机组优化控制提供了新的方法。同时,基于量子计算高性能寻优能力和机器学习算法优秀函数逼近能力的新型应用方式也陆续出现,并可能在未来出现突破式的发展。

目前,常见且有效的一种方式联合使用量子优化算法和机器学习算法,用以解决机器学习算法在工程应用中的参数整定问题,从而大幅提高算法的建模精度,如图2所示。

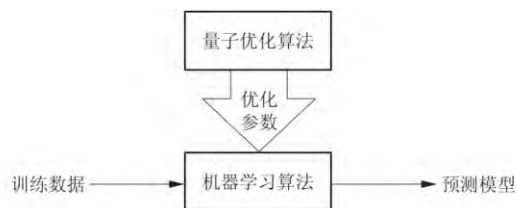


图2 量子优化算法与机器学习算法的联合使用方式

Fig. 2 Joint use of quantum optimization algorithm and machine learning algorithm

例如,径向基函数(RBF)神经网络可以有效辨识热工系统,但RBF网络具有隐含层参数较多的问题,可以采用QGA对RBF网络的参数进行估计,优化后的RBF网络可以实现对多种热工过程的有效辨识^[34]。近期有学者^[35]采用差分进化量子粒子群优化(DE-QPSO)算法对超限学习机(ELM)的网络参数进行优化,成功提高了ELM的泛化能力,实现了对超超临界机组 NO_x 排放量的较高精度预测。另有学者^[36]应用QPSO算法对最小二乘支持向量机(LSSVM)的核函数参数进行优化,对某机组主汽温

控制系统的建模证明这一策略的预测精度可超过反向传播(BP)神经网络。

3.3 量子计算与机器学习算法的直接结合

除以上常用的优化方式外,量子计算与机器学习算法正逐渐实现融合式发展,形成新型的量子机器学习算法,如图3所示。这类新型算法已在火电机组优化控制领域初步应用,并不断发展与完善。

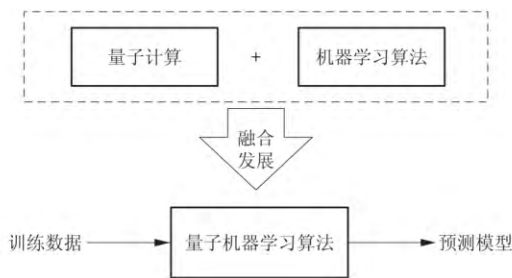


图3 量子计算与机器学习算法融合应用的发展方向

Fig. 3 Development direction for the fusion application of quantum algorithm and machine learning

采用结合量子计算与深度学习技术的样本增量量子神经网络(SIQNN)建立锅炉 NO_x 排放质量浓度和煤耗模型,并在此基础上通过量子人工蜂群(QABC)算法对锅炉运行参量进行优化,降低不同负荷下的 NO_x 排放质量浓度和煤耗,该系统已成功应用于某330 MW煤粉炉机组^[37]。另有结合量子力学与快速学习网络(FLN)提出的量子双并行前馈神经网络(QIDPFNN),可以建立精准度更高的CFB机组热效率与 NO_x 排放模型,被证明具有比FLN和ELM等传统算法更强的泛化能力和稳定性^[38]。

量子机器学习算法的研究和应用将逐渐成为未来算法研究领域的热门学科,量子机器学习算法的工程应用也标志着火电机组优化控制领域的一次革新,未来势必有更多高效能的量子机器学习技术逐步应用于这一领域,为提高火电机组控制水平做出贡献。量子机器学习算法的产生并不表示传统联合使用方式被取代,二者将形成并列式发展。

4 总结与展望

量子计算正在迎来自己飞速发展的时代,在可预见的未来,量子衍生算法仍将是量子计算在工程领域应用的研究热点。在火电机组优化控制领域,量子衍生算法目前仅应用于较为有限的区域,更多的应用空间有待扩展,本文认为,未来的应用和研究方向应包含以下几个要点。

(1)QPSO算法目前在火电机组优化控制中应用广泛且有效,未来具有进一步发展的空间。

(2)其他量子群智能优化算法的应用较少,而且当前已有多种新型量子智能优化算法产生,这些

算法在应用层面将具有良好的发展前景。

(3)QGA本身存在寻优能力较低的情况,在应用过程中需要结合其他改进机制形成混合优化算法,如混沌理论、小生境技术等。

(4)通过量子优化算法对机器学习算法进行参数寻优并应用于火电机组优化控制具有很高的可行性。

(5)量子计算与机器学习算法直接结合形成的新型机器学习算法已成为热门发展方向,未来可为优化控制提供一种新的智能平台。

参考文献:

- [1]FEYNMAN R P. Simulating physics with computers [J]. International Journal of Theoretical Physics, 1982, 21 (6/7):467-488.
- [2]张毅,卢凯,高颖慧.量子算法与量子衍生算法[J].计算机学报,2013,36(9):1835-1842.
ZHANG Yi, LU Kai, GAO Yinghui. Quantum algorithms and quantum-inspired algorithms [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(9):1835-1842.
- [3]SHOR P W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring [C]// Proceedings of the 35th Annual IEEE Symposium on Foundation of Computer Science, 1994: 124-134.
- [4]GROVER L K. A fast quantum mechanical algorithm for database search[C]// Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 1996: 212-219.
- [5]KAK S C. Quantum neural computing [J]. Advances in Imaging and Electron Physics, 1995, 94: 259-313.
- [6]KOUUDA N, MATSUI N, NISHIMURA H, et al. Qubit neural network and its learning efficiency [J]. Neural Computing & Applications, 2005, 14(2): 114-121.
- [7]李盼池.量子计算及其在智能优化与控制中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [8]孙俊.量子行为粒子群优化算法研究[D].无锡:江南大学,2009.
- [9]李士勇,李盼池.求解连续空间优化问题的量子粒子群算法[J].量子电子学报,2007,24(5):569-574.
LI Shiyong, LI Panchi. A quantum particle swarm optimization algorithm for continuous space optimization [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2007, 24 (5): 569-574.
- [10]丁颖.量子粒子群算法的改进及其在认知无线电频谱分配中的应用[D].南京:南京邮电大学,2013.
- [11]聂燕敏,常喜茂.主汽温量子粒子群-PID优化控制[J].电力科学与工程,2010,26(12):61-63.
NIE Yanmin, CHANG Ximao. Main steam temperature control optimization based on quantum particle swarm-PID

- [J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26 (12):61-63.
- [12]赵巍巍.改进粒子群算法在火电厂主汽温控制系统中的应用[D].北京:华北电力大学,2010.
- [13]刘锦廉.基于改进量子粒子群算法的火电厂再热汽温调节系统PID参数自整定[J].机电信息,2020(8):5-6.
LIU Jinlian. PID parameters self-tuning of reheat steam temperature control system in thermal power plant based on improved QPSO algorithm [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(8):5-6.
- [14]韦根原,冯新强,韩璞.基于CQPSO算法的控制系统参数优化[J].系统仿真学报,2015,27(7):1570-1576.
WEI Genyuan, FENG Xinqiang, HAN Pu. CQPSO algorithm based control system parameter optimization [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1570-1576.
- [15]刘静,刘瑞敏.混沌量子粒子群算法在火电厂中的应用[J].电力科学与工程,2018,34(3):57-63.
LIU Jing, LIU Ruimin. Application of chaos quantum particle swarm optimization in thermal power plant [J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34 (3) : 57-63.
- [16]韩璞,袁世通,张金营.超超临界锅炉主汽温控制系统的建模研究[J].计算机仿真,2013,30(12):115-120.
HAN Pu, YUAN Shitong, ZHANG Jinying. Modeling research on USC boiler's main steam temperature control system [J]. Computer Simulation, 2013, 30 (12) : 115-120.
- [17]胡尊民,于国强,爰建军,等.1 000 MW 二次再热机组汽温控制策略[J].华电技术,2018,40(5):33-37.
HU Zunmin, YU Guoqiang, SHU Jianjun, et al. Control strategy on steam temperature of 1 000 MW double reheat units [J]. Huadian Technology, 2018, 40(5):33-37.
- [18]侯晓宁.基于现场数据和主元分析的主汽温系统多变量建模[J].华电技术,2018,40(5):25-29,32.
HOU Xiaoning. Multivariable modeling of the main steam temperature based on field data and PCA [J]. Huadian Technology, 2018, 40(5):25-29,32.
- [19]袁世通.基于改进的量子粒子群算法的脱硝系统线性参数变化模型辨识[J].热力发电,2017,46(6):94-100.
YUAN Shitong. Identification of LPV model for denitrification system using improved QPSO algorithm [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6):94-100.
- [20]郑瑞祥.1 000 MW 火电机组燃烧系统的建模与控制方法研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [21]黄宇,韩璞,刘长良,等.改进量子粒子群算法及其在系统辨识中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(20):114-120.
HUANG Yu, HAN Pu, LIU Changliang, et al. An improved quantum particle swarm optimization and its application in system identification [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(20):114-120.
- [22]袁世通.1 000 MW 超超临界机组建模理论与方法的研究[D].北京:华北电力大学,2015.
- [23]WANG Dongfeng, YUAN Shitong. Identification of LPV model for superheated steam temperature system using AQPSO [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2016, 69: 1-13.
- [24]NARAYANAN A, MOORE M. Quantum-inspired genetic algorithms [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996: 61-66.
- [25]HAN K H, KIM J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem [C]// Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, 2000: 1354-1360.
- [26]WEI Zhongbao, LI Xiaolu, XU Lijun, et al. Comparative study of computational intelligence approaches for NO_x reduction of coal-fired boiler [J]. Energy, 2013, 55: 683-692.
- [27]焦嵩鸣,韩璞,黄宇,等.模糊量子遗传算法及其在热工过程模型辨识中的应用[J].中国电机工程学报,2007, 27(5):87-92.
JIAO Songming, HAN Pu, HUANG Yu, et al. Fuzzy quantum genetic algorithm and its application research in thermal process identification [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5):87-92.
- [28]杨勇,李荣,张君.基于自适应量子遗传算法的分数阶控制器参数整定[J].华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(2):72-77.
YANG Yong, LI Rong, ZHANG Jun. Fractional PI^λD^μ parameters tuning based on adaptive quantum genetic algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2014, 41(2):72-77.
- [29]王子杰,黄宇,韩璞,等.循环流化床锅炉汽温自抗扰控制器的优化设计[J].动力工程学报, 2010, 30(1): 31-35.
WANG Zijie, HUANG Yu, HAN Pu, et al. Optimal design of active disturbance rejection controller for steam temperature of circulating fluidized bed boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30 (1) : 31-35.
- [30]牛培峰,王丘亚,马云鹏,等.基于量子自适应鸟群算法的锅炉NO_x排放特性研究[J].计量学报,2017,38(6): 770-775.
NIU Peifeng, WANG Qiuya, MA Yunpeng, et al. Study on NO_x emission from boiler based on quantum adaptation bird swarm algorithm [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(6):770-775.
- [31]史春见.基于自适应量子灰狼算法的循环流化床锅炉燃烧优化研究[D].秦皇岛:燕山大学,2018.
- [32]HOU Guolian, GONG Linjuan, YANG Zhile, et al. Multi-

- objective economic model predictive control for gas turbine system based on quantum simultaneous whale optimization algorithm [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 207: 112498.
- [33] 李霞, 牛培峰, 刘建平, 等. 基于量子迭代混沌的涡流搜索算法预测锅炉飞灰含碳量[J]. 动力工程学报, 2019, 39(7): 531-540.
- LI Xia, NIU Peifeng, LIU Jianping, et al. Prediction of carbon content in boiler fly ash based on quantum and iterative chaos vortex search algorithm [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39 (7) : 531-540.
- [34] 董泽, 黄宇, 韩璞. 量子遗传算法优化 RBF 神经网络及其在热工辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 99-104.
- DONG Ze, HUANG Yu, HAN Pu. Thermal process identification with radial basis function network based on quantum genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 99-104.
- [35] 董泽, 马宁, 孟磊. 基于差量子粒子群算法的锅炉 NO_x 排放模型优化[J]. 动力工程学报, 2019, 39(3): 191-197.
- DONG Ze, MA Ning, MENG Lei. Model improvement for boiler NO_x emission based on DEQPSO algorithm [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39 (3): 191-197.
- [36] 陈其松, 陈孝威, 张欣, 等. 基于粒子群优化支持向量机的火电厂主汽温预测模型[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(7): 218-221.
- CHEN Qisong, CHEN Xiaowei, ZHANG Xin, et al. Main stream temperature forecasting model based on QPSO and SVM in power plant [J]. Microelectronics & Computer, 2010, 27 (7): 218-221.
- [37] 牛培峰, 马云鹏, 张欣欣, 等. 基于人工智能技术的火电厂燃煤锅炉智能燃烧优化研究及应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 163-170.
- NIU Peifeng, MA Yunpeng, ZHANG Xinxin, et al. Research and application on combustion optimization of coal-fired boiler in thermal power plant based on artificial intelligence technology [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 163-170.
- [38] MA Yunpeng, NIU Peifeng, ZHANG Xinxin, et al. Research and application of quantum-inspired double parallel feed-forward neural network [J]. Knowledge Based Systems, 2017, 136: 140-149.
- (本文责编: 刘芳)

作者简介:

高明明(1979—), 男, 山西吕梁人, 副教授, 工学博士, 从事大型循环流化床机组状态监测与控制研究工作(E-mail: gmm1@ncepu.edu.cn)

杨磊(1996—), 男, 北京人, 在读硕士研究生, 从事循环流化床机组智能优化控制研究工作(E-mail: yl1996@ncepu.edu.cn)。

 中国华电科工集团有限公司
CHINA HUADIAN ENGINEERING CO., LTD.

华电郑州机械设计研究院有限公司
HUADIAN ZHENGZHOU MECHANICAL DESIGN INSTITUTE CO., LTD.



设计咨询与技术服务

高端装备研发与制造

系统工程总承包

电话: 0371-58501491 传真: 0371-58501234 网址: www.hdmdi.com
地址: 河南省郑州市郑东新区龙子湖湖心岛湖心环路 27 号 邮编: 450046

高端制造及系统工程

电站投资建设

环保水务

清洁能源

CHEC

电话：010-63918999 传真：010-62267226 网址：www.chec.com.cn
地址：北京市丰台区汽车博物馆东路6号院 邮编：100070