

中文摘要

随着环境污染问题越来越严重,化石能源等燃料的消耗与日俱增,电力系统的经济环境调度问题成为了学者们研究的重点。电力系统经济环境调度问题是个包含约束在内的复杂多目标优化问题,其目标是既降低燃料成本,同时减少污染物的排放,由于这两个目标间相互冲突,并将受到多种约束条件限制,所以,为了寻找问题的最优解,有必要寻求一种高效,合理的算法来进行优化。本文主要研究电力系统动态经济环境调度问题,并建立电力系统动态经济环境调度的数学模型将风电机组接入系统中,使用优化算法求解。主要研究内容如下:

针对多目标差分进化算法进行设计,改进了算法的选择算子,通过引入帕累托最优理论重新设计选择算子,使算法可以用于求解多目标优化问题;为改进传统差分进化算法容易陷入局部最优的缺陷,使用自适应缩放因子代替原算法的固定值,缩放因子随迭代次数变化而改变;增加二次变异环节,进一步缓解传统算法容易陷入局部最优的问题。通过与其他多目标优化算法的比较,本文改进的多目标差分进化算法在收敛速度、多样性方面都取得了较好的优化效果。

针对火电机组动态经济环境调度问题进行数学建模及问题求解。在建模过程中考虑了系统的阀点效应、网损等因素对电力系统运行状态的影响以及各时段间的机组爬坡速率和不同时间段的功率需求,将系统燃料成本和污染气体排放量设置为模型的目标函数。通过两个由 10 台火电机组组成的系统实验可以得出,多目标差分进化算法可以用于火电机组调度问题的求解,优化得出的机组出力情况所对应的系统燃料成本和污染气体排放量相比其它算法求得的更低。

针对含风电机组的电力系统动态经济环境调度问题建立数学模型,模型考虑到风电出力的不可预测性与波动性对系统运行产生的影响,在火电机组电力系统的调度模型基础上增加了由风电不确定性引起的旋转备用容量等约束条件。使用多目标差分进化算法对含风电机组的电力系统动态经济环境调度模型进行求解,得出的机组出力结果可以对应更好的目标优化效果,得到相对更小的目标函数。与火电机组的处理结果相比,加入风电机组的电力系统调度可以有效降低系统的燃料成本和污染气体排放量,起到节能减排的效果。

综上所述,本文设计多目标差分进化算法并通过测试函数证明其收敛速度、分布性等性能;针对火电机组电力系统动态经济环境调度问题以及加入风电机组后的问题进行建模并求解,达到了降低系统燃料成本以及减少污染气体排放量的目的,得到了效果最

好时的机组出力，同时，实验结果显示，在系统中加入风电机组后，可以更有效的减少系统能源消耗，降低污染气体的排放。

关键词：环境经济调度；风电并网；动态优化调度；阀点效应；多目标差分进化算法

ABSTRACT

With the increasing environmental pollution and the consumption of fossil energy and other fuels, the environmental and economic dispatching of power system has become the focus of scholars' research. The environmental and economic dispatching of power system is a complex multi-objective optimization problem with constraints. It aims at the minimum of fuel cost and pollutant emissions at the same time. This paper mainly studies the problem of power system dynamic economic environment scheduling, and establishes the mathematical model of power system dynamic economic environment scheduling to connect the wind turbine system, using optimization algorithm. The main findings are as follows:

Based on the design of the multi-objective differential evolution algorithm, the selection operator of the algorithm is improved, and the selection operator is redesigned by the Pareto optimal theory to apply the algorithm to the multi-objective optimization problem. In order to improve the traditional differential evolution algorithm, the adaptive scaling factor is used to replace the fixed value, and the parameters change with the number of iterations. By adding the quadratic variation link, the problem of local optimization can be solved further. Compared with other multi-objective optimization algorithms, the improved multi-objective differential evolution algorithm has good convergence speed and distribution.

Mathematical modeling and problem solving for dynamic economic environment scheduling of thermal power units are carried out. In the modeling process, the influence of the valve point effect and network loss on the operation state of power system, the climbing speed of the unit and the power demand of different time periods are considered. Through two system experiments consisting of 10 coal-fired power units, it can be concluded that the multi-objective differential evolution algorithm can effectively solve the scheduling problem of coal-fired power units, and the output of the units can make the fuel cost of the system and the emission of polluting gases relatively

low.

In this paper, a mathematical model is set up for the dynamic economic environment scheduling of power system with wind turbine. Considering the unpredictability and volatility of wind turbine output, some constraints such as rotating reserve capacity caused by wind turbine uncertainty are added to the scheduling model of thermal turbine power system. The dynamic economic environment transfer model of power system with wind turbine is solved by using the multi-objective differential evolution algorithm. Compared with the processing result of thermal power unit, the power system dispatching with wind power unit can obtain lower system fuel cost and emit less polluting gas, and can save energy and reduce emissions.

In conclusion, this paper designs a multi-objective differential evolution algorithm and proves its convergence speed and distribution by test function. Modeling and solving the dynamic economic environment scheduling problem of thermal power system and the problem after joining the wind power unit, the system fuel morning report and pollution gas emission are reduced, and the output of the unit with the best effect is obtained.

key words: Environmental and economic dispatch; Wind power grid connection; Dynamic optimal scheduling; Valve point effect; Multi-objective differential evolutionary algorithm

目 录	
第一章 绪 论.....	1
1.1 课题的研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状与发展趋势.....	2
1.2.1 动态经济环境调度模型的研究.....	3
1.2.2 电力系统动态经济环境调度求解方法的研究.....	4
1.3 本文主要工作.....	6
第二章 多目标差分进化算法.....	9
2.1 引言.....	9
2.2 差分进化算法.....	9
2.3 改进多目标差分进化算法.....	11
2.3.1 选择算子的改进.....	11
2.3.2 控制参数的改进.....	12
2.3.3 自适应二次变异操作.....	13
2.3.4 AMODE 算法的执行步骤及算法流程图.....	14
2.4 算例分析.....	16
2.4.1 算法的评价指标及测试函数.....	16
2.4.2 测试结果.....	18
2.5 本章小结.....	22
第三章 火电机组的电力系统动态经济环境调度.....	23
3.1 引言.....	23
3.2 火电机组动态经济环境调度模型目标函数.....	23
3.2.1 火电机组动态经济调度.....	23
3.2.2 火电机组动态环境调度.....	24
3.3 火电机组动态经济环境调度模型约束条件.....	25
3.3.1 模型约束条件.....	25
3.3.2 约束条件处理.....	26
3.3.3 最优折中解.....	27
3.4 火电机组动态经济环境调度模型求解.....	28
3.4.1 目标函数归一化.....	28
3.4.2 实例计算及结果分析.....	28

3.5 本章小结.....	34
第四章 含风电机组的电力系统动态经济环境调度.....	35
4.1 风电的优势.....	35
4.2 风电接入对电力系统的影响.....	35
4.2.1 风电接入对传统环境经济调度的影响.....	35
4.2.2 风电的不确定性.....	36
4.3 含风电的电力系统动态经济环境调度模型.....	37
4.3.1 目标函数.....	37
4.3.2 约束条件.....	38
4.4 仿真实验.....	39
4.5 本章小结.....	42
第五章 总结与展望.....	43
5.1 总结.....	43
5.2 展望.....	44
参 考 文 献.....	45
致 谢.....	51

第一章 绪 论

1.1 课题的研究背景及意义

电力系统的目的是向广大用户提供电能，它的组成环节包括电能的产生、运输、配电，最终将电能送入千家万户^[1]。电力系统调度，简单来说就是为确保电力系统安全稳定的运行，通过控制系统中各个原件的运行状态来控制整个电力系统^[2]。当今最主要的调度方式就是电力系统动态经济调度，电力系统的动态经济调度主要以实现发电成本最小为目标，通过负荷预测的结果，根据系统的变化进行调节，动态调整各个时刻机组的开启状态和输出能力^[3]。通过合理的经济调度方案，我们可以取得巨大的经济和环境效益，根据国外资料和华北等电网的实际测算，节约能源可以达到总耗量的 0.15%~1.15%。因此，在满足能源节约和电力市场经济要求的前提下，探究电力系统动态经济调度问题具有重大的意义^[4]。

由于过度使用化石燃料，导致全球环境质量日趋恶化，能源消耗与日俱增，全球气候变暖也逐渐加剧，因此全球都面临着节能减排的重大挑战。根据 2016 年我国签署的《巴黎气候变化协定》，各国政府都要立即采取措施缓解温室气体排放，增强应对气候变化的能力，对全球各个国家来说改善能源结构，减少有害气体的排放都显得迫在眉睫。对于我国当今的能源结构来看，通过燃烧煤炭的火力发电机组仍然是我国电力行业的产能支柱，燃煤机组在发电过程中，会向大气中释放出大量的有毒有害的一氧化碳、二氧化碳等污染气体，严重污染我国的大气环境，其中，一氧化碳更是全球变暖的主要污染气体之一，而全球变暖问题又是如今全球重点关注，亟待解决的问题。由于传统火力发电主导的能源结构给环境带来了巨大压力，国家电网提出了节能减排的战略方针，使电力能源结构面临新的挑战。因此，为了响应国家节能减排的号召，经济环境调度对于改善电网能源结构具有十分重要的战略意义。为了让国民生活质量得到保障的同时减轻社会压力，改善电网能源结构成为电力系统必须解决的首要问题^[5]。

传统的电力系统调度问题是电力系统面临的基本问题^[6]，其内容主要包括在电力系统运行约束的条件下，合理分配各机组的出力，以达到总发电成本最小化的目标。但传统的电力系统调度没有考虑例如爬坡效率、阀点效应等实际机组会遇到的问题，这样就使得其不具备很强的现实意义。同时传统的电力系统静态调度只研究单个时间段内的优化问题，没有考虑机组在不同时间段内的相互作用，而且在实际的情况下负荷需求会随时间的变化而改变，这是静态调度无法体现的^[7]。因此，本文在考虑阀点效应等实际情况的基础上加入了环境污染这个新的优化目标，并考虑不同时间段之间的负荷变化，从

而建立电力系统的动态经济环境调度模型。

电力工业作为全国基础能源行业,煤炭等不可再生能源的消耗给环境带来了沉重的负担,为加强环境保护,节约不可再生资源,在以污染排放量降低为优化目标的同时,还可以充分利用我国北方和东部沿海地区丰富的风力资源,将风电机组并入电力系统实现大规模风电并网已经成为我国电力系统发展的前进方向^[8-9]。大规模风电机组并网在电力系统的调度中,其作用主要表现在以下几方面:①风电洁净性能降低火电机组的污染气体排放量,并减少系统在运行过程中需要花费的环境费用。②风力发电具有随机性、不可控性等特点,这将会加大不稳定的输出功率对电力系统安全的威胁,提高了系统安全运行风险。所以为了保证系统在运行中电力系统的安全性和稳定性,构建模型时需考虑风电不确定性因素的影响。③因为风力发电具有不连续性、波动性强等特点,为了确保风电接入电网后系统运行可靠,以及应对风电场发电功率的随机波动,需根据原运行方式,附加布置一定量旋转备用容量,使电力系统保持功率平衡和稳定,这又在某种程度上提高了系统运行的费用。④大规模风电机组接入电网后,输电线路会存在过负荷问题、电压水平下降、系统暂态稳定性改变等相关问题,为降低影响,要求调度时的约束条件必须对这些问题予以考虑,优化控制策略,最终提高系统运行的安全性。因此,风电并网的电力系统经济调度作为一个多约束、非线性、非凸性、多维的混合优化问题亟待人们提出解决方法。由于风电具有间歇性,波动性等特点,为建立以大规模风电接入电网为基础的电力系统经济实用调度模型造成了较大的复杂性及求解困难,为此本文建立了电力系统动态经济环境调度数学模型,并将风电机组并入其中,论证新能源发电可以减少系统的污染排放量并节约能源成本,同时研究了多目标优化问题的求解方法,以求快速准确地得出模型的最优解。

本文首先建立了电力系统动态经济环境调度的数学模型,和传统的调度问题相比,本文考虑了阀点效应、系统爬坡速率等实际情况、考虑了时段之间的相互影响,同时增加了环境污染作为另一个目标函数。之后还在模型的基础上加入风电机组,考虑风电不确定性造成的影响。在模型建立之后,通过改进的多目标差分进化算法进行求解。

1.2 国内外研究现状与发展趋势

经济调度问题包括动态经济调度和静态经济调度,动态经济调度是根据预测信息,在满足约束条件的情况下考虑机组爬坡约束和各时段负荷需求的不同,以发电总成本最小为目标,优化各发电机组的有功出力。动态经济调度由于考虑了各时段之间的联系,因此比静态经济调度更能反应电力系统的实际情况。由于风电功率具有强烈的间接性和随机性,为保证系统安全可靠的运行,在涉及风电的电力系统调度中,应当重视风电预

测的准确性，对于问题中的随机变量，需要用不同的方法处理。为解决这一问题，国内外学者对其进行了大量研究，提出了各种不同的处理方法。

1.2.1 动态经济环境调度模型的研究

经济调度是一个单目标的优化问题，通常是以系统的燃料成本最小为目标，需要在满足电力系统安全运行的条件，保证电能质量的条件下，将发电成本降到最低，保证用户的电量供应。但在对电力系统调度的研究中发现，不应简单地考虑以经济效益作为单一目标对象的传统调度模式，还应考虑化石燃料发电过程中机组污染物排放给生态环境带来的不利影响，因此，提出了综合考虑成本与污染的多目标调度方案，环境经济调度问题也已成为国内外学者关注的一个热点。

环境经济调度要求既要考虑系统燃料成本，又要考虑污染排放量，所建模型需尽可能地减少燃料成本，减少气体污染排放，同时满足系统运行约束^[10]。对于电力系统环境经济调度数学模型的建立，文献[11-12]建立环境经济调度问题的数学模型时，按对象的重要性，对于多目标优化问题，通过给目标函数赋予不同的权重系数，并采用线性加权的方法来解决，由此将其转化为单目标优化问题，以搜索该模型最优解。文献[13-14]采用一种价格惩罚因子，将多目标优化问题转换为单目标优化问题，以价格惩罚因子作为立方准则来求解环境经济调度问题的最优解；文献[15]把环境经济调度问题作为真实的多目标问题进行研究，在这两方面的目标上没有表现出作者的主观态度，构建环境经济调度的多目标数学模型，直接采用多目标智能优化算法求解。文献[16-17]是通过将降低污染气体排放量这个目标当作一个约束条件加到单独的经济调度模型中去。该方法是需先确定一个目标函数为主函数，然后再将另外一个目标函数作为约束条件加到数学模型的优化计算当中。但采用该方法可能会使得作为约束条件的目标函数优化效果不如主函数好，得出的最终结果会无法兼顾多个目标。文献[18]先对机组的能耗水平排序，对燃料成本的单目标优化问题求解，得出最优解，再将最优解基础上对机组的污染排放量进行排序，进行环境方面的优化调度。该方法简单易操作，但没有考虑到两个目标见相互冲突的问题。

对于含风电的电力系统动态经济环境调度模型，可以单独建模也可以综合建模，若是同时优化两个目标函数，就会得出一组帕累托最优解集^[19-20]，同时风电机组也会对模型产生影响。文献[21]通过提出一种双目标经济调度模型，同时优化了燃料成本和污染量排放两个优化目标，在数学模型的建立中，考虑到了系统输电网损、阀点效应以及旋转备用约束等多个现实情况，之后采用一种微分进化算法求解，但是该文章没有考虑风电等清洁能源接入电网的情景。文献[22]通过提出基于机会约束的日前调度模型，经过

一系列的验证,将机会约束规划的随机模型转化为确定性模型,但文章所建立的为静态模型,没有考虑不同时间段之间的联系。文献[23]针对风电场风力预测的随机性,根据风速预测结果,利用随机规划理论,建立了计及机组组合情况的含风电场电力系统动态经济调度模型。基于概率分布进行建模,可以定量刻画风电出力概率分布特征,在应对风电不确定性方面,比模糊建模方法更精确,更客观。文献[24]为了使调度模型更加注重安全性,将风电的出力定义为不确定度,但在系统的输出功率中没有考虑系统的网损问题和系统的阀点效应。

1.2.2 电力系统动态经济环境调度求解方法的研究

电力系统动态经济环境调度是一个高维度、多约束、非线性的复杂优化问题,其理论上求解难度极大,很难找到最佳解决方案。因经济价值显著,国内外学者对此均有不少研究。如今,通常用于求解问题的主要是传统和智能两种优化算法^[25]。

对于传统优化算法,包括非线性规划法、动态规划法^[26]和拉格朗日松弛法等算法^[27]。文献[28]提出了 DP-TC (插值动态规划法) 这一方法,其根本来说是一种路径寻优方法,在满足约束条件的基础上找出最优路径从而找出最优解,其可以成功解决机组爬坡约束问题,同时考虑机组启停时间约束条件。但同其他的动态规划算法一样,它求得的只能是局部最优解。文献[29]提出的 DP-SC 算法是一种基于优先顺序的动态规划法,相比于传统的动态规划算法,它的计算量较小,但由于启停顺序是按优先顺序决定的,可能会导致最优解的丢失。文献[30]改进了传统的拉格朗日算法,采用自适应更新的拉格朗日乘子用来提高算法的运算效率。文献[31]首先利用拉格朗日松弛方法确定机组的启停时间,同时利用梯度法更新拉格朗日乘子,将原问题转换为对偶问题,然后将动态规划法与拉格朗日松弛算法结合起来构成混合算法进行求解。

由于经典优化算法往往只有局部寻优特性,而智能优化算法具有更强的全局搜索能力,因此近年来,伴随着计算机与人工智能的不断发展与完善,智能优化算法已广泛应用于中外学者研究经济调度问题。文献[32]设计了 MCS-GA 求解算法,由于模型中包含较多的随机变量,在求解模型时,首先用蒙特卡洛模拟产生模型随机变量,虽然无法得到确定结果,但得出的数据可以作为遗传算法的输入数据,提高算法精度,降低随机变量的影响保证全局最优性。文献[19]除了与文献[32]一样用随机模拟技术处理风速预测结果作为输入样本外,在通过遗传算法得到最优解之前,先通过反向传播算法训练神经元不断逼近模型中的不确定函数。这样可以很好的解决传统的遗传算法精度低收敛速度慢的缺点,很大程度上提高了算法的性能,但文献没有考虑环境效益,而且遗传算法的编程步骤实现比较复杂,且搜索速度较慢,局部搜索能力较差。文献[33]针对传统遗传

算法易陷入局部最优这一缺陷,笔者介绍了一种带有自适应改变特性的功能,并且将特殊算子加入到具体分析过程,结果显示,改进遗传算法能获得较好的优化效果。在文献[34]中作者为解决经济调度问题改进了粒子群算法,提出了“循环处理策略”建立排错系统提高粒子合格率用来解决粒子群算法难以处理等式约束的问题,之后用“优先启停策略”在确认机组组合状态的同时降低随机启停的盲目性,最后用“机会停机策略”优化结果。通过经典算例的优化结果证实,作者提出的策略具有稳定性良好、优化搜索速度快、优化结果优异、高效搜索能力和较高的适应性。文献[35]对机组启停状态进行 0-1 编码,用于经济调度问题,随后,利用离散粒子群算法进行求解,获得较优异效果。文献[36]提出一种改进粒子群算法,文献为提高粒子的搜索能力使粒子跳出局部最优,提出了精英学习策略,同时提出了粒子信息共享策略,使得算法粒子的信息可以与其它粒子共享。

差分进化算法是从遗传算法的进化思想上提出的,是一种用于求解连续优化问题的随机并行直接搜索算法^[33]。文献[37]由于问题变量中包含 0-1 编码是一个二进制优化问题,因此要使用二进制差分进化算法在优化流程中使用离散个体。为解决算法易早熟的问题,提出共享适应度的改进措施,减少相似成员的个体适应度,保持群体的多样性,同时由于算法的准确度依赖控制参数,为解决算法控制参数难以合理设置的问题,使用不断变化的控制参数,同时比较实验个体和父代个体的目标函数对其进行自适应调整,大大提高了算法的收敛速度和全局寻优能力。文献[38]采用三角函数法将离散变量问题转换为连续变量问题,然后通过利用空间的连续性与离散性的映射关系,利用差分进化算法进行求解。文献[39]研究人员针对电力系统小规模机组问题提出变异修正策略,文中还提出了一种高效处理约束条件的方法,这样就可以在对模型进行求解时,得到较好的结果,它的求解结果比其他算法要好,但是在应对大型机组的时候,迭代时间更长,精度亦不理想。差分进化算法优势明显,但依然存在不足之处。其控制参数选择不当时容易诱发停止问题,对控制参数非常敏感;由于其收敛速度过快,容易造成早熟收敛等问题。因此,为有效的解决优化问题,需要针对其不足进行改进^[40]。

对于差分进化算法的改进主要聚集在两个方面,第一个问题是当算法求解的是多峰复杂的目标函数时算法可能会陷入局部最优,这样就很难找到全局的最优解,或者因为控制参数的选取不当,也容易造成这样的问题。第二个方面是面对高维的目标函数,其收敛速度可能会减慢。对于这两个问题,可以通过改进算法的控制参数、操作算子或改进种群结果,使用混合算法等方式进行改进。算法的优劣很大程度上都与其控制参数的选取有关^[41],控制参数主要改进方向有:缩放因子、交叉概率和种群规模,其中缩放因

子 F 出现在算法变异操作中, 其主要作用为影响算法对基向量的扰动程度, 在文献[42]中作者没有将缩放因子设计为固定值, 而是将其根据每一代种群中个体的目标函数进行调整。文献[43]作者提出了一种 jDE 算法, 针对参数设置问题, 作者引入了两个新的控制参数来调整缩放因子 F 的值。交叉概率 CR 的值会影响种群的多样性, 文献[44]提出的 $SaDE$ 算法引入了经验自适应调整交叉概率 CR , 以促使交叉概率随代数变化时, 其分布满足均值为随代数变化的高斯分布, 从而挖掘出前期产生优质解的可能性。种群规模 NP 的大小很大程度上会影响算法的收敛速度, 文献[45]研究了种群规模 NP 对算法性能的影响, 由于 NP 过大或过小都会影响种群的收敛速度, 作者提出以自适应方式调整种群规模。差分进化算法的操作算子改进如下: 文献[46]Price 提出了 $DE/current-to-rand/1$ 策略, 增加了一个组合系数; 文献[47]研究者利用 $JaDE$ 算法求解模型, 并通过引入 $DE/current-to-pbest/1$ 变异策略来提升算法的搜索能力和收敛速度, 从而解决算法早熟的问题。文献[48]计算出一些特定解的协方差矩阵的特征向量, 加入到算法的交叉算子中, 使得算法的交叉操作具有旋转不变性。针对算法的种群结构的设置, 文献[49]利用环形网络拓扑并行化设计种群进行差分进化算法, 从而提高了算法的速度和性能。文献[50]作者采用基于岛屿模型的并行分布差分进化算法, 将种群划分为多个独立的亚种群, 并为不同的亚种群分配不同的控制参数, 在一定的迭代次数内, 经过子种群之间的迁移, 以保持亚种群的多样性。多种优化算法混合也是当今常见的算法改进措施, 文献[51]笔者提出一种将粒子群算法与差分进化算法相结合的混合优化算法, 用以解决对于算法控制参数的重配置, 仿真实验表明, 这种算法可以提高种群的发展与探索能力。文献[52]提出了一种将差分进化算法和蜂群算法相结合的新型算法, 作者在迭代过程中结合差分进化算子, 利用差分算法具有的全局收敛性和高度鲁棒性, 可以最大限度地发挥其优势。人工蜂群进化速度较慢, 影响着解决问题的效率, 容易陷入搜索进展缓慢的困境。

综上所述, 对于常规机组的电力系统动态经济环境调度, 解决方案主要集中于如何解决多目标优化问题, 对于经济成本和环保效益两个优化目标如何做到平衡发展。而对于加入风电机组的电力系统, 上述文献对含风电场的动态经济调度问题提出了解决方法, 取得了一定的进展, 但在模型的建立中都没有考虑电网稳定运行的约束, 对于算法的改进也需要进一步的完善。

1.3 本文主要工作

本文以电力系统动态经济环境调度为研究课题, 设计了多目标差分进化算法, 建立电力系统动态经济环境调度的数学模型, 并将算法用于模型的求解中。论文的主要内容以及章节内容安排如下所示:

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/795122321223011244>