

分层协同进化模型在热力系统在线优化中的应用研究

王鑫鑫, 徐向东

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 热力系统的非线性、滞后、多回路耦合以及工况频繁变动等特点导致常规优化方法难以实现在线运行优化。本文通过对进化优化理论的研究, 说明了运用进化优化方法解决热力系统在线优化问题的可行性, 指出现有的进化优化理论在热力系统在线优化应用中所存在的障碍。通过对热力系统特点和人类社会进化过程与机制的深入分析, 创建了社会进化层与群体进化层分层协同进化模型, 模拟人类的立法机制与同司法机制, 解决了热力系统在线进化优化时的适应度评价难题和安全性障碍, 并通过实验验证了该模型的可行性。

关 键 词: 分层协同进化; 模拟进化理论; 在线优化; 热力系统

中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

1 引言

目前, 热力系统在运行过程中没有建立整体优化的概念, 没有充分考虑各主要设备以及系统内部各个回路之间的最佳静、动态配合问题, 从而导致整体低效率和高污染。因此, 研究适用于热力系统的优化技术对提高热力系统效率、保护环境都具有十分重要的意义和经济价值。

常规的优化方法在解决热力系统动态过程中的非线性、大滞后、不连续优化等问题以及一些组合优化问题时, 往往容易陷入局部最优解, 难以用于热力系统的在线优化运行。模拟进化理论通过模拟生物进化过程的本质特征, 形成了一类具有鲜明特色的优化方法, 并逐步得到普遍认可。

模拟进化理论具有下述明显优点: 方法是通用的; 在每次迭代过程中都保留一群候选解, 从而有较大的机会摆脱局部极值点; 具有并行处理特性, 易于并行实现; 可以产生一组好的解; 可求得多个全局最优解。这些优点恰好对应常规优化方法在解决热力系统优化问题时存在的不足之处。目前国内外研究者已在进化优化理论研究方面做了大量工作, 并且

在电力系统应用中取得了相当的结果, 但是在热力系统中尚无应用的先例。因此, 研究探索进化优化理论及其在热力系统中的应用, 必将丰富和发展热力系统优化与控制理论, 具有重大的理论价值和应用前景。

2 模拟进化理论研究

现在比较流行的模拟进化理论或进化算法, 典型的代表有美国 J. H. Holland 教授提出的遗传算法(GA)、美国科学家 L. J. Fogel 提出的进化规划(EP)与德国科学家 I. Rechenberg 建立的进化策略(ES)。他们用不同的方式模拟了生物进化过程, 成为三种具有普遍影响的进化优化方法, 其中遗传算法影响最大, 应用也最为广泛。随着这类优化方法研究的不断深入及应用领域的逐步拓宽, 已经形成了一些新的研究分支, 如遗传编程(GP)、分类器系统(CS)和进化神经网络(ENN)等, 在各个分支中已形成了一整套比较系统的理论与方法。在这些分支中, 遗传编程的研究最引人注目, 它是由美国的 J. R. Koza 教授近年来提出的利用遗传算法实现自动编写计算机程序的一种全新的方法。

进化优化理论的应用研究已经从早期的组合优化问题扩展到现在广泛应用于神经网络、机器学习、智能控制、非线性优化、系统辨识、信号处理及故障诊断等问题。特别是最近几年, 随着计算机技术的飞速发展, 进化优化方法受到了不同领域的科学家与工程师的普遍重视, 在很多科学与工程领域中已得到实际应用。但是, 现有进化优化方法主要的应用领域还限于调度、设计优化、组合优化、系统辨识等, 这些应用的特点是离线、无实时性要求, 或有明确的优化目标模型。而对于实际热力系统的在线实时优化还存在很大障碍, 主要包括以下几个方面。

2.1 进化个体适应值的在线评价障碍

收稿日期: 2001-07-06; 修订日期: 2001-10-30

基金项目: 国家攀登计划 B 基金资助项目(85-35)

作者简介: 王鑫鑫(1974-)男, 辽宁大连人, 清华大学博士研究生

Copyright © 1994-2014 China Academic Electronic Journal Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

进化优化理论方法的本质特征是对种群进行随机搜索、选择、繁殖、变异。寻优的关键步骤是对种群中每个个体的适应值进行评价,这需要明确的适应值计算模型或在相对稳定运行过程中验证。然而,由于以下原因难以实现这一评价过程:

(1) 大部分热力系统优化对象无法建立明确的适应值计算模型;

(2) 如果通过实际运行验证,为保证适应值评价的公正性,在对同一种群的个体进行评价时,要求热力系统处于一个较长期的稳定状态,这在实际热力系统中很难实现。

2.2 进化个体应用的安全性障碍

在进化过程中,由于随机搜索的本质,无法保证每个个体解的可行性与安全性,而这又是热力系统运行的最基本要求,因而使得对每个个体解进行实际验证受到限制。

2.3 进化过程的效率障碍

进化优化的种群搜索包括种群中每个个体的产生和评价,计算量很大,如果没有快速的产生机制和评价机制,特别是如果利用相对缓慢的热力系统实际运行效果进行评价,将造成进化优化过程与实际运行严重脱节,优化结果无法投入使用。

3 分层协同进化模型研究

欲突破上述这些障碍,核心问题是解决进化过程中个体适应度的在线评价问题,这一步骤对于进化优化理论中的任何一种方法都是不可缺的。因而,个体适应度在线评价问题成为实现热力系统在线进化优化的关键所在。

为了克服进化个体适应值的在线评价障碍以及应用安全性障碍,通过对人类社会的高速进化过程的模拟,提出建立分层协同进化模型。实质是通过建立社会进化层和群体进化层(直接优化层),并在社会进化层中引入立法机制(动态建立适应值评价函数)和司法机制(社会进化层对群体进化层个体进行适应值评价),构成分层协同进化模型,通过这种分层协同进化模型的自优化和对实际优化对象进化优化实现热力系统的在线进化优化。

通过上面的分析,提出并设计了分层协同进化模型。其本质方法是在直接进化优化模型之上建立一个进化评价系统,由这一系统对直接进化层的种群进行考核,即适应度的评价。通过这一方法,排除

了前面论述的实现热力系统在线进化优化所面临的障碍。同时,直接进化层的优化结果在实际系统的运行时得到的数据又可通过立法机制促进评价系统的进化。直接进化优化层作用于实际优化对象,根据实际优化对象的工况(状态)得出相应优化指令(优化控制量),起到群体进化层的作用;进化评价系统作为群体进化层的适应值评价函数,在群体进化层的进化过程中预评价每一代个体的适应值,起到社会进化层的作用。社会进化层的进化过程对应立法过程。基于上述设计思想,由各进化层次的功能需求与特点确定分层协同进化模型结构如图1所示。

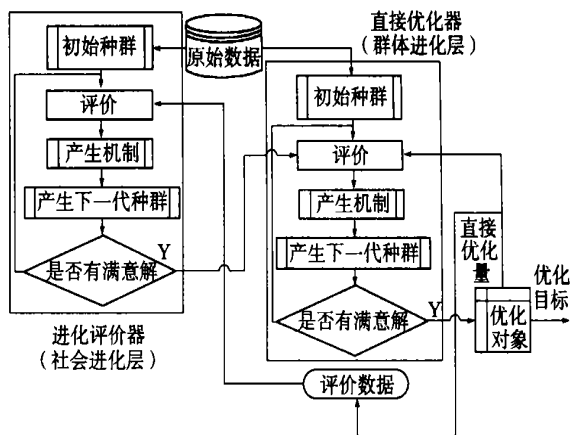


图1 分层协同进化模型结构

在图1所示的结构中,可以明确看出社会进化层与群体进化层间的协同进化关系,它们都是典型的进化优化结构。其中的社会进化层作为适应值评价函数解决了适应值评价的建模问题,即相当于解决了进化个体适应值的在线评价障碍,同时,由于它以函数运算的方式对群体进化层的所有个体进行预评价,避免非可行或不安全的个体解,从而解决了进化个体应用安全性障碍。根据社会进化层的这些功能特点,选择遗传编程的方法实现。

群体进化层作用于优化对象的直接控制量,其输入量(基因座)为优化对象的工况。对于热力系统的优化,直接控制量和工况的表示一般为浮点数,选择进化策略的方法实现该层次的优化。

4 分层协同进化模型实验验证

4.1 实验系统结构

从现有的锅炉运行情况来看,普遍存在配风、燃

烧状况不理想, 热效率偏低的现象。究其原因, 主要存在以下问题: 工况频繁变动, 不易随时保持较佳的风煤比; 很多锅炉运行过程中, 对二次风的配风不做细调, 无法与负荷变化、煤种变化相适应。

锅炉燃烧控制系统中的主蒸汽压力调节回路包括给煤调节回路和送风调节回路。给煤调节回路的作用是保证主蒸汽压力稳定, 而送风调节回路可保证进入炉膛的煤粉能充分燃烧。不同于大多数生产过程控制系统, 该控制系统存在动态品质调节和锅炉经济燃烧两个方面问题。如何使主蒸汽压力既具有良好的动态特性, 又能使入炉燃料得以充分燃烧, 是燃烧优化控制的真正目标, 也是一大难点。而调整风/煤比是高效燃烧的关键。

目前仍被广泛应用于主蒸汽压力控制的燃烧控制方式是比值控制, 即风与煤比控制。这种方法是燃料流量随负荷变化, 而空气流量通过风/煤比跟随燃料流量的变化。其特点是简单易行, 但不具备判断实际风/煤比是否合适的的能力, 更不能对其进行动态修正, 很难保证锅炉处于充分燃烧状态。

针对上述问题, 建立了如下的实验系统结构来验证分层协同进化模型。以主蒸汽压力为主调, 炉膛温度为反馈的燃烧控制系统设计思想, 在充分利用传统主调节回路的基础上, 建立风/煤比与炉膛温度的定性模型, 运用前面提出的方法优化最佳风与煤比, 进行燃烧优化控制, 达到提高燃烧效率的目的。

在实验系统中建立的最佳风/煤比在线进化优化系统结构如图 2 所示。图中“风/煤比动态优化控制”即由上面提出的分层协同进化模型结构来实现。

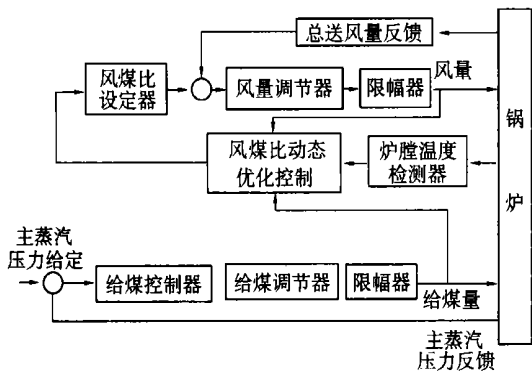


图 2 最佳风/煤比动态优化控制

4.2 实验结果

在 130 t/h 煤粉炉运行一年后, 优化运行前后氧

量分布的投影图如图 3 和图 4 所示。

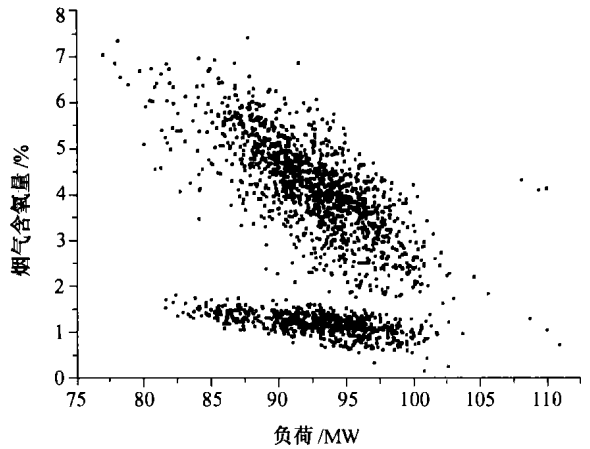


图 3 优化前实际氧量分布图投影

由图中可以看到, 经过长时间的优化运行后, 对应一定的锅炉负荷, 有一个对应的最佳烟气含氧量, 这个烟气含氧量跟煤种也有相当的关系, 所以, 该烟气含氧量和负荷关系为近似直线关系。随着负荷的增加, 最佳含氧量逐渐减少。这种规律可以通过对锅炉运行的分析得到合理的解释。低负荷时, 煤量与空气量都变得比较少, 流动量降低, 煤与空气的混合接触不好, 不完全燃烧的程度加剧, 这时需要更多的空气量, 最佳过量空气系数较大。优化过程实质是随机搜索过程, 得出的结果一般为甚优解。

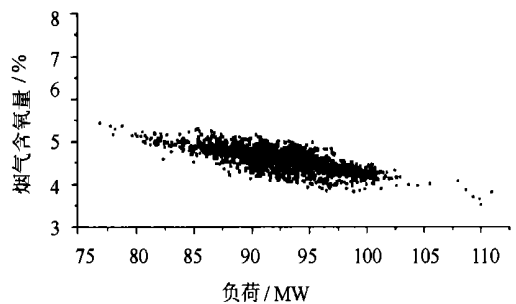


图 4 优化后实际氧量分布图投影

在线进化优化系统试验运行时, 锅炉飞灰含碳量明显降低, 由原来的 8% 左右降低到 5% 左右, 锅炉热效率有很大提高。在对比实验中, 相同条件下在线进化优化系统投运前后锅炉热效率由 81.22% 提高到 85.15%。

5 结论

传统的优化方法无法解决热力系统动态过程中

循环函数法在供热机组经济性分析中的应用

江 浩, 徐治皋

(东南大学 动力系, 江苏 南京 210096)

摘 要: 介绍了循环函数法在供热机组热力系统节能分析中的几点应用, 包括基于循环函数法的节能指标体系的应用和循环函数法对传统节能指标体系中的关键指标热化发电量求取的有力支持等。

关 键 词: 循环函数法; 供热机组; 经济性分析; 节能指标

中图分类号: TM621.4 文献标识码: A

1 前言

循环函数法是循环的函数与方程法的简称, 它是一种电厂蒸汽动力循环的定量分析理论, 它以传统的热平衡法为基础, 在此之上建立了循环的函数式与方程式, 提供了热力系统计算的通用算法, 它对供热机组热力系统的分析计算尤为适用。本文重点介绍循环函数法在供热机组热力系统节能分析上的应用。

2 基于循环函数法的节能指标体系

2.1 传统的供热机组节能指标体系

传统的供热机组节能指标体系是将热电联产和热电分产进行比较, 并把总节煤指标分解为供热节煤和发电节煤两部分, 即 $\Delta B = \Delta B_h^s + \Delta B_e^s$ 。其中供

热节煤 ΔB_h^s 是由联产供热比分产供热的锅炉效率高引起的, 发电节煤 ΔB_e^s 是由热化发电量 W_h 引起的。

这种节煤指标体系存在以下缺点:

(1) 将总煤耗按热、电两种能量的数量进行分配, 热用户只享受高效率锅炉供热的好处, 而热电联产抽汽供热减少冷源损失带来的节能效益完全归于发电方面(好处归电法)。

(2) 对不同压力抽汽的节煤效果不加区分, 在供热煤耗内部仍按数量比例分配。

因此, 这种节煤指标体系既没有反映热、电两种产品的不等价, 也不能反映供热蒸汽参数品质差异的不等价; 既不能调动热用户降低用热参数的积极性, 也不能调动电厂改进热功转换过程的积极性。

2.2 基于循环函数法的新节能指标体系

利用循环函数法理论, 可以方便的获得一种新的供热机组节煤指标体系, 它与循环函数法的特性系数, 尤其是综合特性系数密切相关, 并能克服传统节能指标体系的诸多缺点。

以双抽供热机组为例, 比较热电联产与分产的标准煤耗, 若不考虑锅炉侧的影响, 即 $\eta_{b(d)} \eta_{p(d)} = \eta_b \eta_p$, 则可得到总节煤量(标煤):

收稿日期: 2001-07-06;

作者简介: 江 浩(1976-), 男, 江苏南京人, 东南大学博士研究生。

的非线性、大滞后、紧密耦合等问题, 因而难以在线优化运行的现实。模拟进化理论可以解决热力系统在线优化的问题, 分层协同进化模型通过建立社会进化层与群体进化层的协作模型, 模拟人类的立法机制与司法机制, 解决了热力系统在线进化优化时的适应度评价难题和安全性障碍, 并通过实验加以验证。试验数据表明, 该方法可有效解决热力系统中的非线性优化问题, 与常规的优化方法相比, 具有很大的优越性。

参考文献:

- [1] 张 涛. 热力系统在线进化优化体系研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [2] 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] 阎平凡, 张长水. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

(何静芳 编辑)

狭缝通道两相流强化换热研究综述 = **A Overview of the Intensified Heat Exchange Research of Two-phase Flows in a Narrow-gap Channel** [刊, 汉] / WANG Zeng-hui, JIA Dou-nan, LIU Rui-lan (Nuclear & Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 329 ~ 331, 335

Under the sweep action of a high-speed fluid in a narrow gap channel the narrow gap is immune from foreign matter sedimentation which may pollute heat transfer surfaces, resulting in a deterioration of the heat transfer conditions. Narrow-gap two-phase heat transfer technology features a compact structure and, endowed with remarkable intensification effectiveness, represents a kind of both economical and effective intensified heat transfer method. Hence, the narrow gap heat transfer has been widely utilized in various engineering sectors, such as aerospace and aeronautics, microelectronics and nuclear reactors. The main heat transfer mechanism of the above-cited heat transfer is based on the micro-liquid film evaporation at the bottom of pressured and deformed gas bubbles. The authors have given a brief account of the research progress made in the area of two-phase flow intensified heat transfer in a narrow-gap channel with an overview of the present status of the on-going study. **Key words:** narrow-gap channel, micro-film evaporation, intensified heat transfer

两相流超音速流动、激波及其应用研究 = **A Study of Two-phase Flow Supersonic Flows, Shock Waves and Their Applications** [刊, 汉] / ZHAO Liang-ju, ZENG Dan-ling (College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 332 ~ 335

On the basis of the specific features of two-phase fluid sonic speed a study was conducted of two-phase supersonic flows followed by an analysis of the shock waves triggered by the supersonic flows. Moreover, by the use of the features of two-phase shock-wave accelerating condensation and pressure rise designed is a supercharged heat exchanger. The sonic speed of two-phase flows under the influence of its compressibility presents some features different from those of single-phase flows. Their relatively low sonic speed makes it easier to realize two-phase supersonic flows. The two-phase flow shock waves are closely related to wave-front Mach number. Wave-rear vapor condensation results in a pressure rise. A steam-water direct-contact heat exchangers designed by exploiting the above-mentioned feature is characterized by a high-efficiency heat exchange and pressure charging. **Key words:** vapor-liquid two-phase flow, supersonic flow, shock wave, supercharged heat exchanger

利用 T 型三通测量气液两相流体的流量和干度 = **Measurement of Flow Rate and Dryness of a Vapor-liquid Two-phase Fluid by Using a T-junction** [刊, 汉] / WANG Dong, LIN Yi, LIN Zong-hu (Energy and Power Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 336 ~ 338, 348

Through the use of the phase separation features of a T-junction a portion of single-phase gas stream is extracted and separated from a measured gas-liquid two-phase fluid. By the measurement of this portion of the single-phase gas flow rate determined is the flow rate or dryness of the measured gas-liquid two-phase fluid. The specific feature of this method lies in the conversion of flow rate measurement of a two-phase fluid into the measurement of a single-phase fluid, resulting in a significant improvement of instrumentation stability and reliability and a remarkable enhancement of measurement precision. Test results indicate that the flow extraction ratio is directly proportional to the dryness of the measured two-phase flow. Within the test range adopted by the authors the average measurement error of flow rate and dryness is less than $\pm 5\%$. **Key words:** flow meter, two-phase flow, T-junction, flow extraction and separation

分层协同进化模型在热力系统在线优化中的应用研究 = **Applied Research of a Multi-tier Synergetic Evolution Model in the On-line Operation Optimization of a Thermodynamic System** [刊, 汉] / WANG Xin-xin, XU Xiang-dong (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 339 ~ 341

Owing to the nonlinearity, hysteresis, multi-loop coupling and the frequency of operating condition changes all specific to a thermodynamic system it is difficult to realize its on-line operation optimization by the use of a conventional optimization method. Through the study of an evolutionary optimization theory the authors expound the feasibility of resolving the on-line optimization of a thermodynamic system by using the evolutionary optimization method. It is noted that there are yet some obstacles in the use of existing evolutionary optimization theory for the on-line optimization of a thermodynamic system. Through an in-depth analysis of the thermodynamic system features and the evolutionary process and mechanism of human society a multi-tier synergetic evolution model involving social and community evolution tiers has been established, which simulates human legislative and jurisdictional mechanism. On the basis of the above the difficult issues of adaptation evaluation and safety obstacles have been solved during the on-line evolutionary optimization of a thermodynamic system. The feasibility of the recommended model was experimentally verified and the prospects of the wide applications of the method also expounded. **Key words:** multi-tier synergetic evolution, simulated evolutionary theory, on-line optimization, thermodynamic system

循环函数法在供热机组经济性分析中的应用 = The Use of Cyclical Function Method for the Economic Analysis of a Heat Energy Supply Unit [刊, 汉] / JIANG Hao, XU Zhi-gao (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 342 ~ 344

Described are some cases concerning the use of a cyclical function method for the energy-saving analysis of the thermodynamic system of a heat energy supply unit. They include the use of cyclical function method-based energy saving index system and the effective support of the cyclical function method in determining the key index (thermification power generation rate) in the traditional energy-saving index system. **Key words:** cyclical function method, heat energy supply unit, economic analysis, energy saving index

联产供冷与电力供冷能耗比较分析 = Analysis of Refrigeration Energy Consumption under a Tri-generation Production Mode as Compared with That under a Single Electric Power Production Mode [刊, 汉] / HAN Xue-ting, YU Gang, CHANG Ru, et al (Thermal Energy Engineering Department, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin, China, Post Code: 300381), YU Gang (Thermal Energy and Electric Power Committee under the China National Electric Machine Engineering Society, Beijing, China, Post Code: 100031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 345 ~ 348

In accordance with heat quantity balance method an analysis is performed of the refrigeration energy consumption under a tri-generation (electric power, heat energy, cooling energy) production mode and a single electric-power production one. A method is presented to compare energy consumption under various conditions. It is concluded that in general the refrigeration energy consumption under the tri-generation mode will be greater than that under the single electric-power production one. The proposed method has provided a basis for the comprehensive study and comparison of refrigeration energy consumption under the tri-generation mode and the single generation one. **Key words:** refrigeration under a tri-generation production mode, electric power-based refrigeration, heat quantity balance method, difference in coal consumption, electric power consumption, tri-generation (electric power, heat, cooling energy) production mode, single production mode

循环流化床烟气脱硫多层喷水的试验研究及其产物分析 = Experimental Research on the Multi-level Water Spray for Flue Gas Desulfurization in a Circulating Fluidized Bed and Analysis of Reaction Products [刊, 汉] / LI Da-ji, FENG Bin, WU Ying-hai, et al (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 349 ~ 352

An experimental study was conducted of flue gas desulfurization by the use of multi-level water spray on a pilot test stand for flue gas desulfurization in a circulating fluidized bed with an analysis of the reaction generation mechanism. Desulfurization products were analyzed with the help of an electronic microscope along with a clarification of the desulfurization re-