



经济管理学术文库·经济类

煤炭矿区节能减排 多目标优化决策研究

Research on Multi-objective Optimization Decision-making of
Energy Conservation and Emissions Reduction for Coal Mines

杨 娟 / 著



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE



经济管理科学文库·经济类

煤炭矿区节能减排 多目标优化决策研究

Research on Multi-objective Optimization Decision-making of
Energy Conservation and Emissions Reduction for Coal Mines

杨 娟 / 著



经济管理出版社
ECONOMY & MANAGEMENT PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

煤炭矿区节能减排多目标优化决策研究/杨娟著. —北京: 经济管理出版社, 2015.7

ISBN 978-7-5096-3801-9

I. ①煤… II. ①杨… III. ①煤矿—矿区—节能—多目标决策系统—研究
IV. ①X322

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 121649 号

组稿编辑: 申桂萍

责任编辑: 张 达

责任印制: 黄章平

责任校对: 张 青

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: www.E-mp.com.cn

电 话: (010) 51915602

印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 720mm×1000mm/16

印 张: 12.5

字 数: 168 千字

版 次: 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5096-3801-9

定 价: 48.00 元

·版权所有 翻印必究·

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

前 言

煤炭资源相对丰富的赋存条件决定了其在我国工业中的主导地位，然而以煤炭为主的能源消费结构导致能源利用效率低、污染物排放多，给生态环境的保护造成了极大的威胁。如今，化石能源日渐枯竭，新能源的成本高且难度大。随着国际碳税的逐渐盛行，不采取节能减排措施就会被新的贸易壁垒阻碍其经济的发展。节能减排作为实现经济发展和保护环境双赢的有效途径，不仅是我国自身可持续发展的内在要求，也是为全球减缓气候变化做出的重要贡献。

煤炭行业作为九大重点耗能产业之一，在节能减排工作中扮演着重要的角色。“十一五”规划节能减排战略的实施，煤炭行业在提高能源效率和减少污染排放两方面都有很大的进展。为了达到“十二五”规划节能减排的目标，必须继续依靠先进科学技术的力量，改变以往高投入、高能耗、高排放的生产模式，提高能源利用效率，加强排放物的回收利用，发展循环经济。

煤炭矿区资源配置系统错综复杂，在制定节能减排策略时需要考虑一系列的因素，如经济、社会、环境、技术等。从可持续发展的角度，本书同时考虑经济效益、能源效益和环境效益三个目标，试图通过多目标优化决策的方法，对能耗和排放的关键工序进行节能设备改造，同时通过投资一定的项目来治理或综合利用排放物，优化配置矿区的煤炭生产计划。主要研究内容如下：

(1) 矿区节能减排潜力。在制定节能减排策略之前，需要首先掌握矿区目前的能源消耗结构、能源利用效率、污染物的回收和排放情

况。针对“十一五”规划末的能源消耗和污染排放数据,确定投入产出指标体系,基于投入的CCR-DEA模型计算矿区的能源利用效率,评估节能减排的潜力。

(2) 静态多目标优化模型。选择“十二五”整个规划期的煤炭产量、关键工序设备节能改造投资、治理或综合利用项目投资作为优化的决策变量,确定经济效益、能源效益、环境效益的表达式,描述矿区煤炭资源储量、投资资金和工序关系等约束条件,建立煤炭矿区节能减排静态多目标优化模型。

(3) 静态多目标模型求解算法。与单目标优化问题不同,多目标问题的优化不仅需要区分可行解和不可行解,而且还需要在多个目标之间辨别同类解的优劣。这些问题的解决依赖于约束条件的正确处理。由于多目标问题的最优解是由多个非支配解组成的 Pareto 解集,故在解空间内尽可能多地搜索到非支配解是得到高质量解的保证。结合非劣分类遗传算法 NSGA-II 和粒子群算法 PSO,充分发挥 NSGA-II 的全局搜索能力和 PSO 局部寻优的特性,提出混合进化算法 PSO-NSGA-II,并验证算法的收敛性、覆盖性及均匀性。

(4) 动态多目标优化模型。根据投资决策的时序性特点,以“十二五”规划期内的每一年作为优化对象,考虑节能减排的阶段性效果,将上一年的煤炭生产计划和投资决策作为下一年制定节能减排策略的依据,建立煤炭矿区节能减排动态多目标优化模型。

(5) 动态多目标模型求解算法。动态多目标模型的优化目标和约束条件随时间推移呈现动态变化的特点,决策环境不断发生改变,这就要求算法除了在固定的进化环境内尽可能多地搜索到 Pareto 解,还要能探测到进化环境的任何微小变化,并对环境变化做出正确的响应,确定新环境的进化参数。基于这些考虑,设计混合进化算法 DNSGA-II-PSO 求解动态多目标模型,对算法探测环境变化、保持种群多样性、预测环境变化三个性能进行分析。

(6) 满意解的筛选。快速有效的决策是建立在少数有限的候选方

案的基础之上的,所建立的多目标优化模型最终求得的是一组非劣的 Pareto 解集,候选方案的选取还需要对 Pareto 解集进行进一步筛选,这需要借助于多属性决策的方法。故运用混合聚类方法 SC-MTD-GAM,在保证 Pareto 前端分布特性的基础上,尽量减少 Pareto 解集的大小,考虑决策者的偏好,选择有代表性的 Pareto 解作为候选方案。

基于多目标优化模型和满意解筛选方法,以典型煤炭矿区超化矿的煤炭生产为应用对象,探讨为了达到“十二五”规划节能减排目标,矿区如何安排煤炭生产计划,对哪些生产设备进行节能改造,投资多少项目对污染物进行治理或综合利用。得到如下结论:

(1) 通过对煤炭矿区能源消费结构和污染排放情况的分析,矿区主要消耗原煤、汽油、柴油、电力四种能源,主要排放二氧化硫、矿井水、煤矸石三种污染物。运用 CCR-DEA 模型对矿区的能源效率和减排潜力进行评估,表明矿区当前处于最优的生产前沿,能源利用率已达到最大化,进一步实施节能减排需要利用先进技术来提高生产效率。

(2) 建立的煤炭矿区节能减排投资多目标决策模型,满足了煤炭矿区节能减排投资的决策需要。该模型以原煤产量最大、能耗和污染排放最少为目标,考虑资源、工序、资金和环保等多个约束,较好地描述了中国现阶段典型煤矿节能减排投资的决策需要。

(3) 提出的 PSO-NSGA-II 混合多目标求解算法,比 NSGA-II 算法具有更好的收敛性、覆盖性和均匀性。针对本书建立的多目标优化模型的决策变量类型前有 0-1 和实数的特点,提出一种混合 PSO 实数编码和 NSGA-II 二进制编码的求解算法。通过质心距离、覆盖性、间隔距离三个性能指标与 NSGA-II 的计算结果进行对比,说明 PSO-NSGA-II 发挥了 PSO 和 NSGA-II 两种算法的组合优势,具有更好的收敛性、覆盖性和均匀性。

(4) 提出的 DNSGA-II-PSO 混合进化算法,比 DNSGA-II-A 算法更能够探测到进化环境的任何微小的变化,保持种群多样性避免算

法早熟而陷入局部最优，且能通过预测以响应环境的变化。根据动态决策的特点，本书将每个投资计划年作为决策阶段，建立含有实变量和 0-1 变量的动态多目标模型，提出混合算法 DNSGA-II-PSO，充分利用 DNSGA-II 在全局的角度引导算法的搜索方向，PSO 控制局部区域的快速寻优。此混合算法采用环境探测算子探测投资环境的任何变化，结合惯性预测、高斯分布、随机生成三种新个体产生方式完成对新环境的预测。通过对每个环境下的质心距离、覆盖性、间隔距离三个性能指标与 DNSGA-II 的计算结果进行对比，说明 DNSGA-II-PSO 对决策环境具有更好的探测性和预测性。

(5) 运用混合聚类方法 SC-MTD-GAM 根据管理者的偏好对 Pareto 方案集进行筛选，最终得到经济偏好型、能源节约型和协调发展型三种节能减排方案。对矿区节能减排前后的煤炭生产情况进行比较分析：对于经济偏好型投资方案，矿区在达到“十二五”规划节能减排目标的前提下，保证最大的生产能力和充分利用投资资金，最大化煤炭产量；能源节约型投资方案偏重减少能源消耗量和污染物排放量，很大程度依赖于大量缩减煤炭产量的方式实现；而协调发展型方案通过降低煤炭产量、投资节能改造工程和减排项目三种方式达到节能减排的目标。无论是哪种方案，虽然煤炭产量有暂时降低的现象，但是随着节能设备的改造和综合治理利用项目的实施，节能减排的效果不断累积，煤炭产量最终呈增加的趋势，最终超过节能减排措施实施前的产量。这说明矿区实施节能减排是一项非常必要和长期的有价值的工作，不仅达成节能减排的目标，还从根本上优化了矿区煤炭生产的资源配置，促进矿区向“低能耗、高效率、零污染”的绿色生产模式转型。

本书在全面总结节能减排、多目标优化、最优决策优选研究现状的基础上，重点分析了煤炭矿区节能减排的现状和潜力。为了完成“十二五”规划关于节能减排的目标，以规划期内原煤产量最大、能源消耗和污染排放最少作为优化的三个目标，考虑资源、工序、资金和环保等多个约束，分别从静态和动态两个决策视角建立多目标优化模

型,该模型较好地描述了中国现阶段典型煤矿节能减排投资的决策需要。针对建立的多目标优化模型的决策变量类型兼有 0-1 和实数的特点,本书提出一种混合 PSO 实数编码和 NSGA-II 二进制编码的求解算法 PSO-NSGA-II;基于动态决策阶段性的特点,利用 DNSGA-II 全局搜索性能引导解的进化方向,并通过 PSO 局部寻优的优点加速算法的收敛,提出 DNSGA-II-PSO。这两个混合进化算法有效地继承了 NSGA 和 PSO 的优点,能在解空间尽可能大的范围内搜索到更多的非支配解,同时不断趋近真实的 Pareto 前端。基于多目标算法求得的 Pareto 解集,考虑管理者偏好,在保证 Pareto 前端分布形状的基础上,选择具有代表性的解点作为矿区节能减排的候选方案,最终得到经济偏好型、能源节约型、协调发展型三种决策方案,希望对矿区制定节能减排投资计划提供科学的参考依据。

本书得以完成,特别感谢中国地质大学(武汉)博士生导师诸克军老师和郭海湘老师多年来的悉心培养及指导,感谢於世为老师对本书相关研究工作提供的很多帮助和支持,感谢团队成员坚持不懈的交流与合作,感谢国家自然科学基金项目(No.71103016 和 No. 71373148)、山东能源经济协同创新中心(山东省 2011 计划)和山东省自然科学基金项目 ZR2014GQ011 等的连续资助,感谢同事、朋友和出版社编辑的大力支持及辛勤劳动。

感谢家人的关怀、理解和鼓励。

由于作者水平有限,加之本书所涉及的内容仍在不断的研究中,书中不妥之处在所难免,恳请专家、读者批评指正。

杨娟

2015 年 3 月

目 录

第一章 绪 论	001
第一节 研究背景及意义	001
一、研究背景	001
二、研究意义	004
第二节 研究内容与技术路线	005
第三节 创新点	008
第二章 国内外研究综述	009
第一节 节能减排	009
第二节 节能减排多目标优化	019
一、多目标优化	019
二、多目标在节能减排中的应用	035
第三节 节能减排动态优化	040
一、多目标动态优化	040
二、多目标动态优化在节能减排中的应用	045
第四节 多目标最优决策优选	048
第五节 文献评述	053
第三章 煤炭矿区节能减排现状和潜力	055
第一节 煤炭行业节能减排现状分析	055

一、节能减排现状	055
二、节能减排存在的问题	059
三、节能减排目标	060
四、节能减排基本路径	062
第二节 典型煤炭矿区能耗和排放现状分析	063
一、超化矿区能源消费结构	064
二、超化矿区主要能耗分析	066
三、超化矿区污染排放与综合利用	074
第三节 煤炭矿区节能减排潜力估计	079
一、节能减排潜力估计	080
二、超化矿区节能减排潜力估计	081
本章小结	082
第四章 煤炭矿区节能减排静态多目标优化	083
第一节 静态多目标优化模型的构建	083
一、目标和约束条件	083
二、模型简化	087
三、约束条件的处理	088
第二节 静态多目标模型求解算法	089
一、NSGA-II 和 PSO 优缺点	089
二、PSO-NSGA-II 算法步骤	091
第三节 超化矿区节能减排静态多目标优化	094
一、问题背景和数据来源	094
二、模型输入参数	096
三、静态优化结果	097
四、算法性能分析	101
本章小结	104

第五章 煤炭矿区节能减排动态多目标优化	106
第一节 动态多目标优化模型构建	106
一、目标和约束条件	106
二、约束条件处理	109
第二节 动态多目标模型求解算法	110
一、DNSGA-II-PSO 算子设计	110
二、DNSGA-II-PSO 的算法步骤	115
第三节 超化矿区节能减排动态多目标优化	120
一、问题背景和模型输入参数	120
二、动态优化结果	120
三、算法性能分析	124
本章小结	128
第六章 煤炭矿区节能减排最终决策方案	129
第一节 混合聚类方法	129
一、减法聚类	130
二、多属性联赛决策	134
三、混合聚类算法	136
第二节 静态决策方案	137
第三节 动态决策方案	147
本章小结	158
第七章 结论与展望	160
第一节 结论	160
第二节 展望	162
参考文献	164

第一章 绪 论

第一节 研究背景及意义

一、研究背景

改革开放 30 多年来,随着我国经济的高速发展,能源消耗总量也大幅度增长。从 1978 年的 5.71 亿吨标准煤增长到 2011 年的 34.8 亿吨标准煤。^① BP 最新发布的《世界能源统计》(2013) 数据显示:2012 年我国一次能源消费总量 27.35 亿吨标准煤,同比增长 7.4%,占世界一次能源消费总量的 21.9%,超过美国,跃居世界第一。

我国政府一直高度重视并贯彻实施能源节约政策,而且取得了巨大的成就。近几年,单位 GDP 能耗得到了一定的控制,但二氧化硫排放量和化学需氧量在 2011 年有反弹的势头。2009 年、2010 年、2011 年单位 GDP 能耗分别为 0.9 吨标准煤/万元、0.81 吨标准煤/万元和 0.74 吨标准煤/万元,分别比上年下降 3.07%、10.03%和 9.07%;二氧化硫排放量分别为 2214.4 万吨、2185.1 万吨和 2217.91 万吨,前两年比上年分别下降 4.6%和 1.32%,2011 年上升 3.2%;化学需氧量排放

^①《中国统计年鉴》(2010~2012)。

分别为 1277.5 万吨、1238.1 万吨和 2499.9 万吨,前两年比上年分别下降 3.27%和 3.08%,2011 年以 101.91%的比例增长。究其原因,主要是废水的排放量增加了 1.5%。

我国石油和天然气资源较少、煤炭资源相对丰富的能源赋存条件决定了我国的一次能源消耗以煤炭为主。2010 年,在我国能源消费结构中,煤炭占 70.45%、石油占 17.62%、天然气占 4.03%、可再生能源占 7.9%。2011 年,煤炭占 68.8%、石油占 18.6%、天然气占 4.6%、可再生能源占 8%。预计到 2020 年,中国一次能源需求量至少是 25 亿~33 亿吨标准煤,其中煤炭为 21 亿~29 亿吨^[1]。随着工业化和城镇化进程的不断加快,我国煤炭消费量持续增加。2011 年,世界煤炭产量 38.45 亿吨标准煤,比 2005 年增加 9.03 亿吨标准煤,其中我国占增量的 71.98%;2011 年,世界煤炭消费量 37.3 亿吨标准煤,比 2005 年增加 8.07 亿吨标准煤,其中我国占增量的 92.32%。^①

以煤炭为主的能源消费结构导致能源利用效率低、污染物排放多,给生态环境的保护造成了极大的威胁。煤炭能源消费对生态环境的破坏主要表现为煤炭开采造成的大气污染;开采过程中对水资源的破坏和污染;煤矸石堆存,地表沉陷、裂缝,水土流失,加剧土地荒漠化;远距离运输的煤炭损失和沿线环境污染等。据调查,我国因采矿直接破坏的森林面积累计达 106 万公顷,破坏草地面积为 26.3 万公顷;我国累计占用土地约 586 万公顷,破坏土地约 157 万公顷,且每年仍以 4 万公顷的速度增加,而矿区土地复垦率仅为 10%。另据测算,中国每开采 1 万吨煤,平均塌陷土地 0.2 公顷,在村庄密集的平原矿区,每开采 1000 万吨煤就约有 2000 人需要迁移^[1]。2011 年,我国煤炭开采和洗选业废水排放总量 6591922 万吨;废水排放量 104765 万吨;废气排放总量 42.55 万吨,其中二氧化硫、烟尘、粉尘分别为 16.03 万吨、11.62 万吨、14.91 万吨。据世界银行估计,中国空气和水污染造

①《BP 世界能源统计》(2013)。

成的经济损失，大约占 GDP 的 3%~8%。我国有学者甚至认为，中国环境污染的不完全经济损失大约相当于当年 GDP 的 2.1%~7.7%，中国生态破坏的经济损失大约相当于 GDP 的 5%~13%，两者之和大约为 7%~20%。

为了应对全球气候变化，中国政府在 2009 年举办的哥本哈根会议上庄重承诺：到 2020 年，碳排放强度比 2005 年降低 40%~45%。“十一五”规划以来，国家实施“节能减排”的战略举措，能耗强度从 2005 年的 1.28 吨标准煤/万元下降到 2010 年的 1.03 吨标准煤/万元，累计下降 19.1%，年均下降 4%，全国化学需氧量排放量和二氧化硫排放量分别下降 12.45% 和 14.29%，其中，二氧化硫减排目标提前一年实现，化学需氧量减排目标提前半年实现。从总体上看，基本实现了“十一五”规划既定的目标。目前，我国积极推进的“十二五”规划将继续大力实施节能减排政策，按照资源化、减量化、再利用的原则，发展循环经济，扩大资源综合利用规模，建立能源节约型、环境友好型的煤炭矿区。国家已经提出了一系列积极的措施：合理利用山西北部和内蒙古中西部高铝煤炭资源，推行定点集中利用，建设煤—电—铝—建材一体化循环经济园区；在大型选煤厂周边地区建设洗矸、煤泥和中煤综合利用电厂；加强采煤沉陷区综合治理、土地复垦和植被恢复；高硫煤、高砷煤要采取洗选加工等措施降低含硫量、含砷量，集中利用、集中治理、达标排放等^[2]。

但是在“十二五”开局之年，能源消费弹性系数出现反弹，能源消费弹性系数上升到 0.77，为 2006 年以来的最高水平，2011 年能耗强度下降 2%，是自 2006 年以来下降幅度最小的一年。按照“十二五”规划中提出的能耗强度下降 16% 的目标，平均每年能耗强度需要降低 3.4%，2011 年能耗强度下降幅度没有满足规划目标，节能减排形势较为严峻。煤炭工业则更是节能减排的重点单位之一。为了实现既定的节能减排目标，有关部门相应地提出了煤炭工业发展“十二五”规划，用以指导煤炭工业健康发展。2010 年 7 月 9 日，由中国煤炭工业协会

和中国煤炭加工利用协会联合举办的全国煤炭工业节能减排暨循环经济现场会在山西大同煤矿集团召开，会议提出了《关于推进煤炭行业发展循环经济促进节能减排工作的指导意见》。该意见根据国家发展循环经济、促进节能减排工作要求和行业发展实际，提出“到 2015 年要实现全国原煤入洗率达到 60%、煤矸石等固体废弃物综合利用率达到 75%、瓦斯抽采利用率达到 55%、矿井水综合利用率达到 80%、土地复垦率提高到 50%，大型煤炭企业基本做到全部污染物达标排放”的目标。其中，煤炭工业的节能减排工作面临着更大的挑战。

目前，有关煤炭矿区节能减排的研究具有以下特点：①集中于一些节能减排技术介绍或强调某个环节的节能减排^[3]，缺乏从“点”向“面”的延伸，未着眼于煤炭生产的整个业务流程，并未充分发掘矿区的节能减排潜力。②对减排的研究主要集中于如何减少污染物的排放和废弃物的回收利用^[4,5]，即在能源已经消耗、污染物已经产生和废弃物已经弃置的情况下，做出环境污染影响的弥补性措施，侧重末端治理的研究，尚未从源头上进行控制；有关煤炭温室气体（GHG）减排的研究，集中于煤炭燃烧利用，特别是煤电行业的 GHG 减排问题^[6-8]，而对煤炭生产过程的 GHG 排放研究有待进一步深入。③在节能减排实践中，因没有针对矿区实际正确选择路径，缺乏科学的节能减排技术投资决策，一些矿区陷入了节能不经济、减排阻发展的困境。

二、研究意义

煤炭矿区资源配置系统错综复杂，在构建时需要考虑一系列的因素，如经济、社会、环境、技术等。传统煤炭矿区在生产煤炭时一味地追求经济效益，忽略了环境问题和能源消耗问题，而如今化石能源日渐枯竭，开发新能源的成本高且难度大，煤炭矿区生产煤炭时排放的污染物也对生态环境造成了严重的影响。随着国际碳税的逐渐盛行，不采取节能减排措施就会被新的贸易壁垒阻碍其经济

的发展。节能减排作为实现经济发展和保护环境双赢的有效途径，不仅是我国自身可持续发展的内在要求，也是为全球减缓气候变化做出的重要贡献。

根据环境污染控制理论，煤炭矿区节能减排主要通过生产工艺优化、节能设备采用、源头污染物减排、排放物事后治理、废物循环利用及管理控制（能耗与排放精细化管理）来实现降低能耗与排放。因此，为实现节能减排目标，煤炭矿区需要针对关键工序能耗与排放物的种类，选用不同的节能减排技术设备和治理方式。而选择什么样的节能设备、治理方法、工艺技术，从根本上决定着矿区节能减排效果的大小。在一定的规划期内，选择哪种技术设备和什么时间投资，它既要考虑满足削减能耗与生态环境负荷的要求，又要考虑矿区成本投入的成本规模，是一个多目标决策问题。

因此，将煤炭矿区节能减排看成一个多目标复杂系统（矿区效益最大、能耗最小、污染排放最少），着眼于煤炭生产的整个业务流程，对在煤炭矿区生产关键工序中的设备进行节能改造，同时投资一定的项目来治理或综合利用排放物，有利于矿区实现节能减排的目标，保证可持续发展，最终为矿区选择节能减排路径提供科学的依据。

第二节 研究内容与技术路线

图 1-1 显示了本书的研究内容与技术路线。在对煤炭矿区节能效率分析和减排潜力估计的基础上，根据矿区投资的时序性特征，本书分别从静态和动态两个视角，建立了煤炭矿区节能减排静态多目标优化模型和动态多目标优化模型，运用进化算法和多属性决策方法探讨矿区节能减排决策方案，并将其应用到超化煤矿的煤炭生产优化配置中，实现矿区经济效益、能源效益、环境效益同时最优化。主要研究

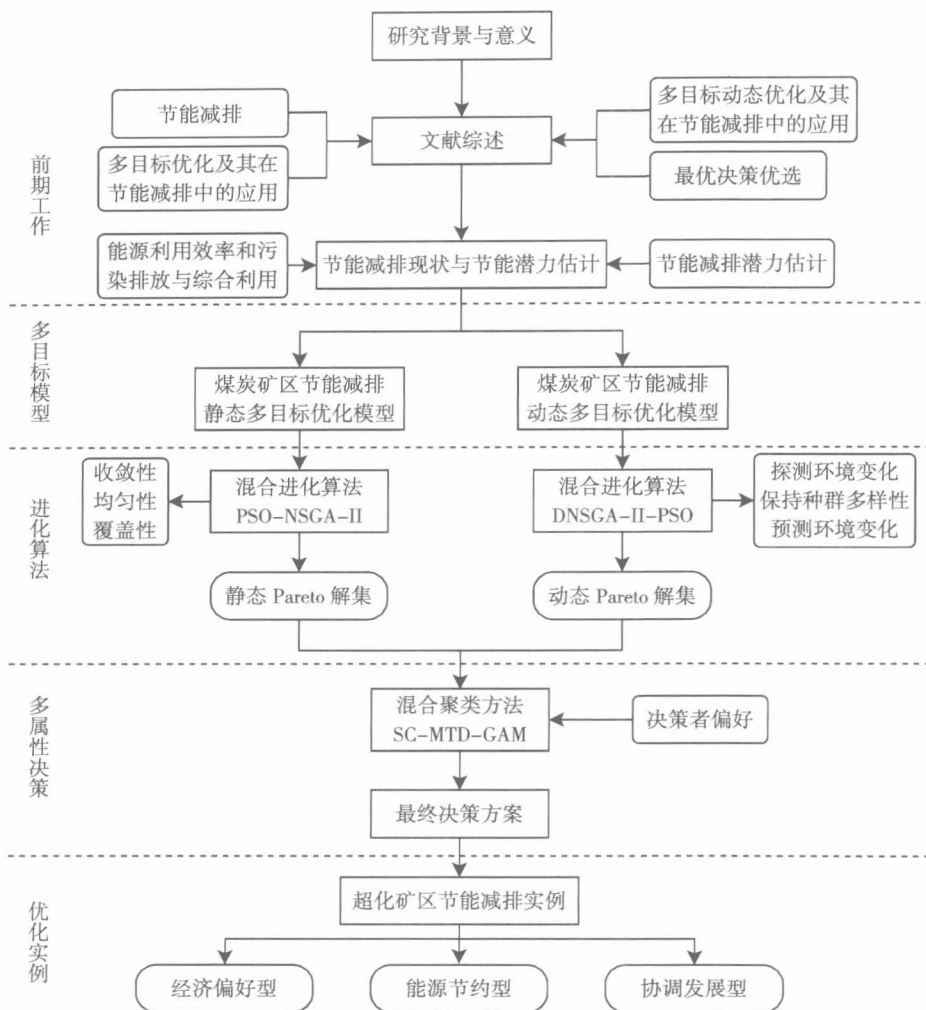


图 1-1 技术路线

内容如下：

(1) 矿区节能减排潜力。在制定节能减排策略之前，需要首先掌握矿区目前的能源消耗结构、能源利用效率、污染物的回收和排放情况。针对“十一五”规划末的能源消耗和污染排放数据，确定投入产出指标体系，基于成本投入的 CCR-DEA 模型计算矿区的能源利用效率，评估节能减排的潜力。

(2) 静态多目标优化模型。选择“十二五”整个规划期的煤炭产