

园区综合能源系统智能调度研究与实践

郝飞¹, 季炳伟¹, 黄源烽¹, 陈根军¹, 姜彬¹, 顾全¹

1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102

Research and practice of intelligent dispatching of integrated energy system in district

HAO Fei¹, JI Binwei¹, HUANG Yuanfeng¹, CHEN Genjun¹, JIANG Bin¹, GU Quan¹

System Software Institute NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China.

摘要: 对于园区的综合能源系统来说,合理的能源规划和配置可以有效提供能源的综合利用效率,而对于运行系统。为了提高现有能源系统的能源效率,最直接的手段就是通过信息化技术和人工智能提高调度运行水平,实现多能系统的智能化调度。本文首先对钢铁企业的多能源系统进行分析,融合其他行业的先进技术,提出了一种基于数据驱动的混合推理方法,并对方法中的关键技术进行了论述。在应用实践中,利用该方法完成了煤气调度智能决策系统的架构设计和应用实践,为综合能源系统的智能调度提供了成功的应用案例。

关键词: 流程网络模型; 规则推理; 实例推理; 支持决策系统; 优化导航

ABSTRACT: For the comprehensive energy system of the district, reasonable energy planning and configuration can effectively provide the comprehensive utilization efficiency of energy, while for the operation system. In order to improve the efficiency of the existing energy system, the most direct way is to improve the efficiency of the intelligent system. In this paper, the multi energy system of iron and steel enterprises is analyzed, and the advanced technology of other industries is integrated. A hybrid reasoning method based on data driven is proposed, and the key technologies in the method are discussed. In the application practice, the framework design and application practice of intelligent decision-making system of gas dispatching decision-making system are completed by using this method, which provides a successful application case for intelligent dispatching of integrated energy system.

KEY WORD: flow network model; rule based reasoning; case based reasoning; support decision system; optimization navigation

1 引言

综合能源系统是将多种形式能源有机整合,以经济、安全、高效为最终目标,关注能源的生产、传输、转换、存储和消耗全流程,包括能源系统的规划设计、优化配置、调度运行和运营管理。在园区综合能源系统的规划设计和资源优化配置方面取得了很多有益的研究成果,推动了综合能源系统的技术发展和应用实践^[1-6]。然而,从能源服务角度来说,需要用户的多种需求统一考虑,通过优化调度生成合理的运行方式和调度策略,提高能源的综合利用效率;从能源网络来说,需要通过分析电气网

络、天然气网络、热网等网络的共同特征,借鉴冶金工程流程学中网络化的建模方法^[7],建立的通用的网络化模型,完成多种能源交互融合网络构建,促进多种能源模拟仿真技术的发展^[8]。在综合能源系统的优化运行方面,文献^[9]对综合能源系统仿真的技术路线及其实现思路进行全面探讨,对仿真平台的建设、规划设计及优化运行仿真的实现进行了系统的论述;文献^[10]建立综合能源系统混合时间尺度运行优化框架,实现了电气热多能网络动态过程的协同优化;文献^[11]考虑了正常运行和负荷峰值越限时,上层园区与下层用户之间分层调控目标的不同,建立了分层分布式的协调控制方法,

实现了两级之间的优化互动；文献[12]提出了由供能商，配电网和用户组成的多主体双层博弈互动策略，包括了调度和竞价两个方面，实现了合作博弈下的多能互补。

然而，综合能源系统的技术和优化方法，不能只停留在研究和仿真阶段，要在实际的应用场景中发挥其应有的作用。为了提升综合能源相关技术的应用实践，本文结合园区综合能源系统的调度运行需求，从智能调度出发，对其实现过程中的关键技术进行研究，基于流程网络构建一种工业企业的网络化的综合能源系统；提出了一种基于实例断面的混合推理方法，为建立能源系统的智能调度与支持决策打下基础；其次根据工业园区高耗能企业的能源产生、传输、转换、存储、消耗各个环节的特征，进行了详细的分析，并完成了钢铁企业高炉煤气智能调度系统架构的设计，为实现综合能源系统的智能调度提供了实践案例。

2 智能调度运行技术

综合能源系统的调度运行的好坏直接影响到整个系统的实际能源利用效率。而这方面也是在综合能源研究领域比较容易忽略的，多种能源系统的网络化建模及决策分析是调度运行智能化应用实践的有效手段。园区综合能源系统调度运行的智能化包括4个方面，分别为能源路径、优化导航、互动响应和仿真培训[13]。

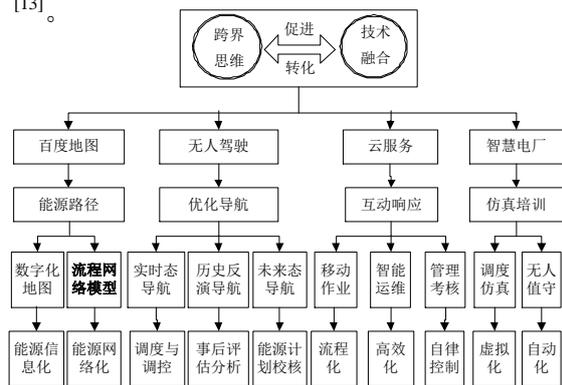


图1 调度运行智能化路径

Fig. 1 Intelligent path of scheduling operation

2.1 能源路径的构建

能源路径借鉴百度地图，利用数字化地图技术、流程网络模型技术将能源的产生、传输、

存储、转换和消耗的所有设备用管道连接起来，采用通用的图模库一体化技术，建立各种能源介质的网络化系统，并可以根据系统中设备状态和实时量测变化实现动态连接和拓扑着色分析；同时，能源路径是能源介质传输的通道，存在诸多约束，有平衡的约束、压力的约束、检修和计划的约束等。因此，基于冶金流程工程学中的流程网络理论，将钢铁制造流程中性质不同的各种工序，按照“流”、“网络”、“流程网络”进行划分，将复杂网络结构简单化、立体化，明确流程网络中的发生节点、终止节点、汇集节点、中间节点；同时，通过连接器将上述节点连接起来，通过“程序”将能源系统中各种形式的序、规则、策略和途径的集合形式化，通过数据驱动整个网络的高效运行^[14]。能源路径的构建实现了能源系统的信息化和网络化，是实现优化导航的基础，反映了不同能量“流”的在管网中的动态变化过程，实现了人机界面模型、工艺设备物理模型、数据库模型的统一管理和维护，为各种能源介质的优化导航提供最真实的能源路径。

2.2 优化导航的设计

能源路径的构建将不同能源介质通过管网、线路连接起来，形成了导航路径。优化导航就是借鉴无人驾驶的理念，实现目标设定、多路径规划、多目标导航、分析预警、信息推送、路况实时播报等功能。建立基于能源路径的多能源介质、多模态、多目标的优化导航体系，必然会推动综合能源系统调度运行智能化的发展和应用实践。其中，“多能源介质”应包括煤气、蒸汽、电力、水、技术气体等能源系统，采用基于流程网络的图模库一体化建模技术，实现各种能源介质的网络化建模，完成能源路径的构建；“多目标”根据各种能源介质的优化分析需求，建立多目标优化模型，例如最小运行成本、最大发电、生产优先、放散最小、能耗最小、能效最高等；“多模态”按照时间维度分为实时态、历史反演、未来态3种能源的运行场景，并通过数据中心构建各个模态的数据集合，保证各种模态下优化导航的可达性。

优化导航要适应能源系统运行的过去、现

在和将来，即历史反演导航、实时态导航、未来态导航。历史反演导航是对已经发生特殊事件，如设备故障、应急响应、供需失衡等历史情景进行事后的评估分析，并找出更好的处理方法；实时态导航借助态势感知和调度运行驾驶舱，强化调度与调控的及时性和预见性，通过支持决策系统，保证能源系统的稳定健康运行；未来态导航是基于能源预测和生产计划信息，实现对未来能源供应平衡分析和能源计划校核^[15]。

2.3 仿真培训系统

面向调度人员的仿真培训从优化导航的角度来说，它可以建立在平行系统的基础上，可以定义为平行态优化导航。其主要平行系统主要由人工系统、计算试验和平行执行3部分组成，主要过程包括学习与培训、试验和评估、管理与控制^[16]，如图2所示。

1) 学习与培训。将实际与人工系统的数据交互与反馈机制，使管调度人员掌握复杂系统的各种状况和应对扰动的响应办法，不断完善和提供人工系统的模拟仿真能力；在条件允许的情况下，以程序化的管理与控制方法来运行人工系统，获得更佳的真实效果。

2) 试验和评估。利用人工系统进行计算试验，分析各种不同的复杂系统的行为和反应，并相似应用场景对不同的解决方案的效果进行评估，作为选择和支持管理与控制决策的依据。

3) 管理与控制。提升人工系统的智能水平，尽可能地真实地模拟实际运行系统，对其行为进行预估，并提供当前方案的改进提高的依据，建立实际系统与人工系统评估反馈机制，不断对人工系统的评估方式或参数进行修正。

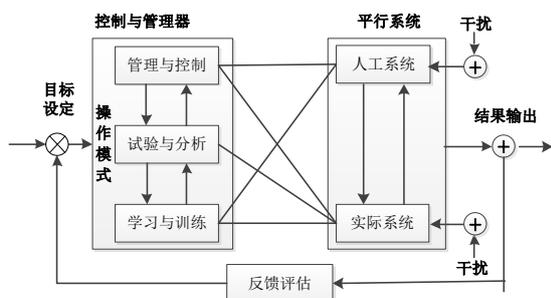


图2 平行系统的框架

Fig. 2 Framework of parallel system

平行系统的干扰源既可以是自于假想故障和实验，也可以实际系统的外界扰动，最终的作用结果都会通过反馈机制传送到控制与管理器，进行进一步的管理与控制、试验与分析、学习与训练，直到获得满意的执行结果。

2.4 智能化驱动引擎

调度运行智能化的关键是建立优化导航和仿真培训的驱动引擎，并能够充分利用网络化能源路径，提供的系统关联关系，为调度员提供决策分析信息。

专家系统是一种很有效的技术手段，其中规则推理（Rule Based Reasoning, RBR）是构建专家系统的核心，其包括三个重要组件：规则库、事实库、规则推理机。规则库是推理的基础，存储了业务领域中的规则知识；事实库存储推理中的事实数据；规则推理机负责问题求解过程的执行和控制，模拟领域专家的思维过程。在实际应用中发现，规则推理知识获取困难、缺乏自学习能力、知识库维护困难，并且难以处理复杂问题。因此需要根据综合能源系统的运行特征，融合其他的智能化方法。

实例推理（Case Based Reasoning, CBR）是从源实例库中选择与待求解问题案例最相似的实例，将该相似实例的解作为新问题的解，即用源实例表示经验知识，以目标实例表示待求解问题，从源实例库中查找与目标实例相同或相似的实例，并把它的推理结论作为新问题的结论，是一种基于过去求解类似问题的经验获得当前问题求解结果的推理模式^[17]。

本文基于数据驱动设计一种融合规则推理和实例推理的混合推理引擎，由其驱动综合能源系统调度的智能决策与高效运行。混合推理引擎的运转要依靠数据来驱动，需要设计一种通用的，并且能包含网络化能源系统的数据集合，将设备模型、数据、连接关系都存储起来，建立完整的实例存储、管理和搜索的应用机制。

2.4.1 实例断面定义

在电力系统中，断面是指在某一特定时间，按照 IEC61970CIM 模型，将电网中的设备状态、量测数据、设备间的连接关系保存到

一个特定格式的文件中。对于综合能源系统来说,按照流程网络模型的建模方法,通过图模库一体化建模技术,实现设备与设备之间的连接和拓扑分析,实现系统的网络化建模。在实例断面中包含了网络中所有设备的名称、标识、关键参数、设备连接关系等信息,并可以通过实例断面的管理将文件中的信息重现。

从图3可以看出,在三维坐标中 t 轴是时间轴, x 轴 y 轴对应高炉煤气流程网络的二维平面简图。在该实例断面(CASE)中各个时刻网络化的模型是不变的,变化的是设备的状态和量测数据;图中 T_{now} 代表当前时刻, $This$ 代表从当前时刻往后退18(可设置)个时间间隔(如1分钟)历史数据,历史时间跨度可以人工设定; $Trend$ 代表从当前时刻向前12(可设置)个时间间隔的趋势数据,时间跨度同样可以人工设定。在数据处理中,在当前时刻 T_{now} ,并不能获得未来趋势的数据,需要以 T_{now} 时刻为基点,把未来趋势的12个点的数据记录下来后,才能生成 T_{now} 时刻的完整的实例断面。

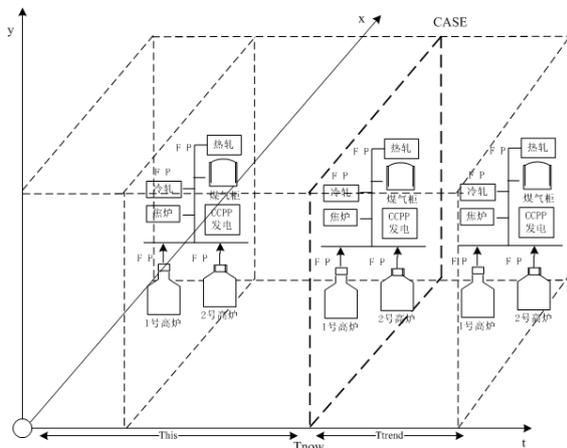


图3 实例断面的数据序列

Fig. 3 Data series of case section

在实例断面中历史数据的存储是为了在搜索过程进行源实例断面和目标实例断面的相似度计算和相关性分析,以此来选择最能体现当前运行工况下的能源系统的运行态势;实例断面中的趋势数据代表了能源系统运行的未来走向,可以给调度人员提供丰富的信息。

2.4.2 实例断面管理

实例断面的管理包括实例断面保存、实例断面调用、实例断面管理、实例断面特征标记。

1) 实例断面保存:实例断面是以文件的

形式存在的,即把网络化的模型、设备的各个时段的数据、设备状态在特定的时间,以特定的文件格式写入到一个文件中,文件的命名要体现存储时间和系统分类,保存的方式可以是人工保存、定时保存、事件触发保存等。

2) 实例断面调用:指通过人机界面提供的操作方式,将历史中按照时间管理的断面重新读入到数据库中,并通过研究态的方式将断面中的数据、设备状态和变化趋势呈现出来。同时,也可以为反演评估的优化导航提供研究和分析的基础断面。该过程的本质是“文件→数据库”的回写过程。

3) 实例断面管理:按照年月日进行断面的管理,日存储断面可以根据需求进行设置,默认为15分钟存储一个实例断面;用户断面由不同用户进行手工保存,或为特殊工况的典型实例保存,断面可以按照煤气系统的不同状态进行分类,以提高范例搜索的效率。

4) 实例断面的特征标记:在整个网络化系统在存储实例断面中,要将该断面的主要特征分析出来,并将这些特征以数据或状态的方式标记出来,以方便实例的相似度搜索。实例断面的特征是一个需要逐渐分析总结的过程,要根据能源网络中的各个设备的主要运行特征,进行提炼,并通过状态辨识的方式,来提前获知未来系统的趋势。

2.4.3 实例断面搜索

实例断面的搜索是实例推理的核心,其过程是对现有能源系统的运行态势进行分析,并归纳出主要特征,然后在历史存储的众多断面中找到最适合当前运行工况的相似实例,并根据实例中的趋势数据,为调度员的问题处理和操作,提供决策信息。实例断面搜索要求能够快速地从当前实例提取所需要的特征信息,并快速地从实例库中找到1个或若干个与当前问题或工况匹配的实例断面。因此,可以利用实例库中实例断面的历史数据,可以利用海明距离和欧几里德距离反函数、时间序列相似性计算、时间序列数据挖掘等方法来计算两个实例间的相似性程度。

海明距离:

$$SIM(X, Y) = 1 - DTST(X, Y) = 1 - \sum_i w_i dist(x_i, y_i)$$

(1)

欧几里德距离:

$$SIM(X, Y) = 1 - DTST(X, Y) = 1 - \sqrt{\sum_i w_i dist(x_i, y_i)}$$

(2)

式中, 权重 w_i 代表第 i 个属性的重要度, $i = 1, 2, \dots, n$, n 是案例中属性的个数。标准的 $dist(x_i, y_i)$ 通常表示成:

$$dist(x_i, y_i) = |x_i - y_i| / |\max(x_i) - \max(y_i)| \quad (3)$$

对于数字属性值, $\max(x_i)$ 和 $\max(y_i)$ 分别代表范例第 i 个属性的最大和最小值。对于符号属性值, 如果 $x_i = y_i$, 则 $dist(x_i, y_i) = 1$, 表明 $DTST = 0$, SIM 有最大值 1, 则两个实例是相同的; 反之, 当 $DTST = 1$, SIM 有最大值 0, 则两个实例完全不同。

基于时间序列的相似性搜索是从时间序列中查找对象的量测数据的时间序列的相似度, 可以采用全序列匹配和子序列匹配两类搜索方法。时间序列数据挖掘用于处理较复杂系统的实例断面搜索, 具有时间序列挖掘、相关性分析及预测预警等功能。通过建立特征模式库和数学模型库来提高数据挖掘的准确性。

2.4.4 混合推理的构建

规则推理和实例推理是两种典型的推理技术, 集合的模式主要有 4 大类: 并行、串行、主辅和转换^[18]。并行模式即采用并行推理, 最后将推理结合合并; 串行模式可以是先 RBR 后 CBR, 也可以先 CBR 后 RBR, 第一步推理出来中间结果, 第二步完成最终解决的推理; 主辅模式根据需要解决问题的特点, 将一种推理方法作为主推理, 由主推理负责基本推理, 辅推理技术进行优化或补充; 转换模式在规则知识和实例知识存在共性时, 可以将两种推理进行相互转化, 其最大缺点是转换过程复杂, 无法实现自动化执行。

根据园区综合能源系统的调度运行特点, 采用串行模式可以简化推理过程的复杂性, 也可以提高混合推理引擎的执行效率, 并可以充分利用实例断面中的设备和数据信息。混合推理的实现过程如图 4 所示。

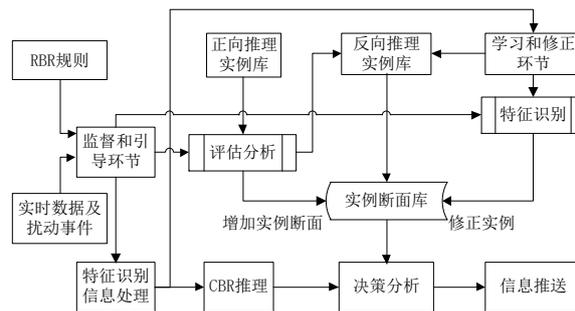


图 4 混合推理的实现过程

Fig. 4 Realization process of hybrid reasoning

RBR 规则根据调度员及能源系统设备参数、运行工况、专家经验来实例断面的特征, 并结合实时数据及扰动事件进行监督和引导, 实现对特征识别信息的处理; 结合正向推理实例库对规则推理结果进行评估分析, 对全新的工况通过增加实例断面, 将其保存到实例断面库中; 学习和修正环节处理来自与规则推理的特征识别信息, 并根据特征模式库中的特征进行特征识别, 从实例断面库中找到相似度最高的若干实例断面, 结合 CBR 的推理, 对找到的源实例断面进行综合处理, 实现能源系统的决策分析, 并将指导信息推送给调度人员。

3 应用案例分析与设计

3.1 综合能源系统分析

大型联合钢铁企业是工业园区中典型的综合能源系统, 其能源种类多, 调度运行复杂, 具有煤气能源网络、电力能源网络和气体及动力能源网络。从图 5 的能量流网络可以看出, 钢铁企业的综合能源系统也是以电力系统为核心, 且与煤气系统、蒸汽系统、气体系统等其他能源介质存在强耦合关系的复杂能量流网络系统^[19]。副产煤气是钢铁生产过程中最重要的二次能源, 包括高炉煤气 (Blast Furnace Gas, BFG)、转炉煤气 (Linz-Donawitz gas, LDG)、焦炉煤气 (Coke Oven Gas, COG), 经过管网、煤气柜、加压站、混合站形成各种压力参数、热值的煤气, 供应给消耗单元使用, 如烧结、球团、热风炉、加热炉, 还可以用来制乙醇、制氢等, 构成了完整的煤气能源网络; 电力能源网络包括了大电网的电力供应、自身的煤气发电、余热余压发电、企业完整的供配电网络;

气体及动力网络主要用于能源的汇集、转化和供应,包括产生氧气、氮气、氩气等制氧系统、水系统和各类管网和调节系统等。

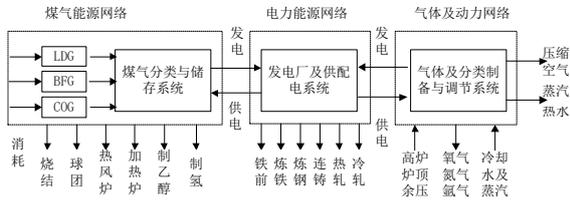


图5 能量流网络图

Fig. 5 Energy flow network diagram

在高耗能企业的综合能源系统中,存在多种能源介质的耦合协同运行,能源系统较为复杂。以长流程钢铁企业为例,包括电力、煤气、蒸汽、技术气体和水,其中最为复杂的是煤气系统和电力系统。在各自应用场景中,可以采用基于流程网络的建模方法,将能源介质的产生端和消耗用户,通过管网将相关节点连接起来,形成有向网络图,实现能源系统的网络化建模,如图6所示。

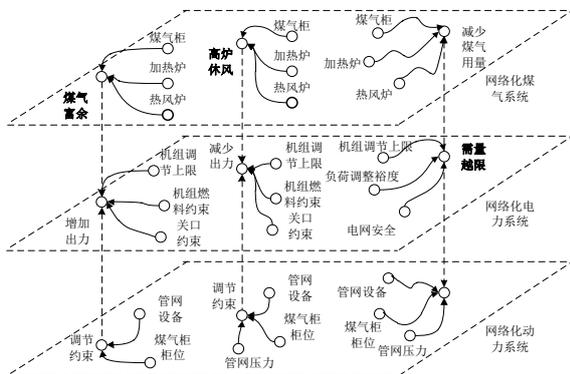


图6 多能系统的调度分析

Fig. 6 Scheduling analysis of multi-energy system

同时,在此基础上可以按照固定时间间隔生成实例推理的实例断面。在某些特定节点处,存在不同能源介质的转换、替代和关联调控。例如,当煤气富余时,而煤气柜已到存储高值,加热炉、热风炉等煤气用户又无新增需求,需要调整电力系统中的发电机组,在调节约束满足的情况下,多用煤气进行发电,提高煤气的用量,减少放散。

当高炉生产工况变化(如发生休风),此时高炉煤气的产量会大幅度减少,会发生煤气产量不足,影响下游的正常生产。此时,可以通过减少煤气发电的出力,减少煤气用量。但

是,要机组本身的约束,也要考虑企业供电关口的电力需量限值的约束,并对可能产生的费用进行评估。如果越限太多,将启动应急响应,推送信息给生产调度系统,减少下游生产单元的煤气用量。

当电力系统发生供电关口电力需量越限时,可以采取的措施一个是提高自发电出力,这也就意味着要减少其他生产工序的煤气用量,加大煤气发电的煤气消耗;另一方面可以降低用户的用电负荷,根据负荷调整裕度来有计划地错峰,减轻供电关口的高负载,从而减少需量电费的支出。

在钢铁企业的调度运行中,以上三种情况是调度员经常遇到的调度问题。完全可以利用智能化的手段,通过建立不同能源介质的支持决策系统,实综合能源系统的智能调度。

3.2 煤气智能化调度架构设计

煤气调度知识决策分析主要面向调度运行人员和能源部能源计划制定人员,同时为企业提供对外能源交流的窗口。系统从煤气运行监控、设备状态分析、系统优化调度、智能决策分析4个方面进行系统构建。根据产品定位和用户调研,设计了煤气系统智慧监盘、煤气系统态势感知、高炉热风炉决策分析、煤气系统优化调度、煤气系统优化导航5个主要功能模块。

1) 智慧监盘。基于驾驶室技术构建煤气的智慧监盘系统,提高调度员的操控效率。包括网络化煤气系统、煤气发生监盘、煤气消耗监盘、煤气调控分析等人机界面的设计和数据关联分析。

2) 态势感知。包括煤气发生趋势分析、煤气消耗趋势分析、煤气柜位趋势分析、煤气运行状态预警,从煤气的发生、消耗、缓冲3个主要环节,结合智能化的趋势分析及预测模型,实现对煤气系统未来态势发展的全面感知。

3) 决策分析。以高炉、热风炉、烧结为主要研究对象,构建钢铁企业铁前能源产消的决策分析系统,深入研究工序模型和工艺状态的转换规律,实现高炉炉况在线分析、热风炉状态辨识、热风炉燃烧优化、高炉热风炉协同

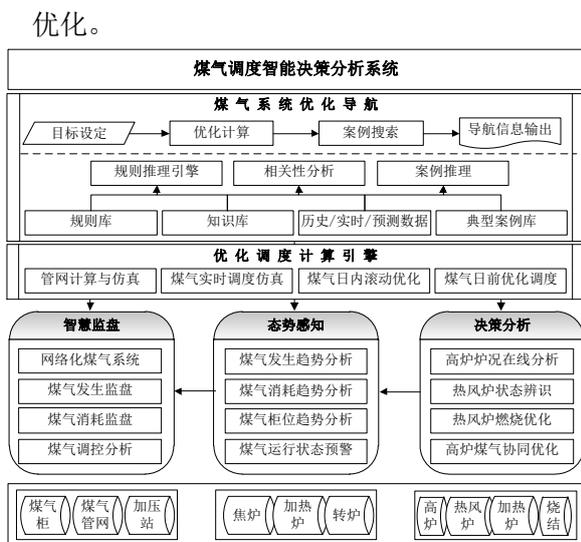


图8 煤气调度智能决策系统架构

Fig. 8 Structure of smart decision system for gas dispatching

4) 优化调度。旨在建立优化调度的计算引擎（日前计划、日内滚动优化、实时校正调整）提供管网计算与仿真、煤气实时调度仿真、煤气日内滚动优化、煤气日前优化调度。

5) 优化导航。将智慧监盘、态势感知、决策分析、优化调度4个模块联系起来。基于能源路径，实现目标设定、多路径规划、多目标导航、分析预警、信息推送、路况实时播报等功能^[20]。

4 结论与展望

综合能源系统的技术应用和实践要重点关注高耗能企业，其为综合能源技术应用和发展提供了丰富的应用场景；融合其他行业的先进的能源管理方法和经验从调度运行的智能化做起，将人工智能技术与能源系统的运行特征相结合，促进智慧能源管控系统的发展。本文完成了以下内容：

1) 以钢铁企业的综合能源系统为例，对其典型生产过程中的能源耦合关系、多种能源介质的能量流网络进行了系统性的分析；

2) 完成了综合能源系统调度运行智能化实践路径的设计，包括能源路径的生成方法、优化导航模式设计、互动响应和仿真培训，旨在构建一种基于能源路径的多能源介质、多目标、多模态的优化导航体系；

3) 为了实现调度运行的智能化，提出了

一种能源系统的实例断面的生成、存储、管理和搜索方法，并将规则推理和实例推理进行融合，完成了基于数据驱动的混合推理引擎的设计，为建立各种能源系统的支持决策系统打下了基础；

4) 在案例分析中基于已有研究成果，设计了煤气调度支持决策系统，通过智慧监盘、态势感知、决策分析、优化调度和优化导航的联动，提高系统运行调度的智能化水平，在实际应用中取得了很好的效果。

综合能源系统智能调度需要一种通过的方法来适应不同的能源介质和应用场景，要以全流程能源系统的理念对能源系统进行设计，要充分挖掘能源运行特征，在智能制造的框架下，将电力智能调度与综合能源系统深度融合，以多源互动数据中心为基础，通过数据管理中台提供统一的数据管理和调用服务，在源网荷储集中监控、调度运行自动巡航、源网荷储协调优化、负荷聚类与用户画像、多时间尺度协同优化、基于能源地图的优化导航等方面进行深入研究和应用实践，促进智慧能源管控的技术发展和融合创新，形成完整全面、实用高效的智慧能源管理体系和技术应用。

致谢

感谢国家重点研发计划（海上多平台互联电力系统的可靠运行关键技术，2018YFB0904800）、国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项（2020YFE0200400）对该研究的支持。

参考文献

- [1] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-123.
- [2] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
- [3] 吴志力, 杨卫红, 原凯, 等. 园区能源联网多能源协同优化配置发展构想[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 99-105.
- [4] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- [5] 李洋, 吴鸣, 周海名, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网

- 技术, 2015, 39(8): 2230-2237.
- [6] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 174-182.
- [7] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [8] 李洋, 吴鸣, 周海名, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2230-2237.
- [9] 曾鸣, 刘英新, 王星, 等. 区域综合能源系统仿真平台研发现状及技术路线初探[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 87-93.
- [10] 顾伟, 陆帅, 姚帅, 等. 综合能源系统混合时间尺度运行优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 203-313.
- [11] 赵曰浩, 彭克, 徐丙垠, 等. 综合能源系统分层分布式协调控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 253-259.
- [12] 郝然, 艾芊, 姜子卿. 区域综合能源系统多主体非完全信息下的双层博弈策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 194-201.
- [13] 郝飞, 郑狄, 陈素君, 等. 企业智慧能源管控系统架构设计与探讨[J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(1): 25-30.
- [14] 郝飞, 沈军, 燕飞, 等. 钢铁企业能源系统流程网络建模方法研究[J]. 冶金自动化, 2018, 42(4): 22-28.
- [15] 周华锋, 胡荣, 李晓霞, 等. 基于态势感知技术的电力系统运行驾驶舱设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 130-137.
- [16] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489.
- [17] 瞿幼苗. 面向智能决策的推理引擎技术[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [18] 车海莺, 刘仲英. 信息系统总体设计中案例推理与规则推理集成方法的研究[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(3): 81-84.
- [19] 郑忠, 黄世鹏, 李曼琛, 等. 钢铁制造流程的物质流和能量流协同优化[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(4): 1-7.
- [20] 郝飞, 陈恩军, 沈军, 等. 钢铁企业能源系统调度运行优化导航技术研究[J]. 冶金自动化, 2020, 44(1): 37-43.

收稿日期:

作者简介:

郝飞 (1980—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 从事综合能源系统的优化分析与系统开发, E-mail: haof@nrec.com.