贵　州　大　学

2023 届硕士研究生学位论文

综合能源系统分布鲁棒优化调度研究

2023 年 06 月

摘要

当前， 全球能源转型处于加速推进时期， 促进可再生能源发展是推动能源转型升级的重要途径。综合能源系统因其能源梯级利用和多能耦合互补优势， 在能源领域得到了广泛应用。然而， 随着可再生能源的大规模接入和各类负荷的持续增长，综合能源系统内源、荷不确定性不断变大， 这将对系统的安全稳定运行产生影响。同时， 由于日前预测精度不足以及日内系统扰动问题， 日前调度计划无法在日内保障系统经济可靠运行。针对上述问题， 本文提出了一种多时间尺度的综合能源系统分布鲁棒滚动优化调度方法，有效应对多时间尺度不确定性因素的影响，改善系统运行的鲁棒性和经济性。 论文主要的研究任务及结论如下：

(1)分析综合能源系统各机组运行特性，以提高能源转换、利用效率为目的，建立本文综合能源系统基本架构及对应数学模型。

(2)在综合能源系统日前优化调度阶段，本文基于非精确 Dirichlet 模型，建立综合能源系统分布鲁棒优化调度模型， 提高了系统在源、荷不确定性条件下的运行稳定性和经济性。在此基础上， 考虑系统运行场景相似性和多元变量相关性特征，利用场景分析和 Cholesky 分解方法，获得调度场景下变量相互独立的样本矩阵。然后，计及综合需求响应建立综合能源系统分布鲁棒日前优化调度模型，采用强对偶理论和 C&CG 方法完成模型转换和求解，得到日前优化调度计划。

(3)在综合能源系统日内优化调度阶段， 本文采用模型预测控制方法， 建立日内滚动优化模型， 提高了日内调度计划的可靠性和跟踪性。该模型以最小化日前计划调整量为目标，可以根据系统日内实际运行情况及时调整日前调度计划。

(4)通过仿真对比分析，验证了本文所提多时间尺度综合能源系统分布鲁棒滚动优化调度方法的有效性， 在多时间尺度不确定性条件下， 所得日前调度计划兼顾系统运行鲁棒性和经济性， 日内调度计划能够保证系统在日内安全稳定运行的同时，对日前调度计划具备良好的跟踪性能。

关键词：综合能源系统；Cholesky 分解方法； 非精确 Dirichlet 模型；分布鲁棒优化；综合需求响应；模型预测控制

ABSTRACT

At present, global energy transformation is in the period of accelerating promotion, and promoting renewable energy development is an important way to promote energy transformation and upgrading. Integrated energy system has been widely used in the energy field because of its advantages of energy gradient utilization and multi-energy coupling and complementation. However, with the continuous growth of renewable energy access scale and various loads, the source and load uncertainty within the integrated energy system keeps increasing, which affects the safe and stable operation of the system. At the same time, the day-ahead scheduling plan cannot guarantee the economic and reliable operation of the system during the day due to the lack of day-ahead prediction accuracy and intra-day system disturbance. To address the above problems, this paper proposes a multi-time scale distributionally robust rolling optimal scheduling method of the integrated energy system, which can effectively cope with the effects of multi-timescale uncertainties and improve the robustness and economy of system operation. The main research tasks and conclusions of the paper areas follows:

(1) Analyze the operating characteristics of each unit of the integrated energy system, in order to improve energy conversion and utilization efficiency, establish the basic structure and corresponding mathematical model of the integrated energy system in this paper.

(2) In the day-ahead optimal scheduling stage of the integrated energy system, this paper establishes the integrated energy system distributionally robust optimization scheduling model based on the imprecise Dirichlet model, which improves the operational stability and economy of the system under the source and load uncertainty conditions. On this basis, considering the periodicity of the operating scenario and the correlation characteristics of multivariate variables, the scenario analysis and Cholesky decomposition method are used to obtain the sample matrix with independengt variables of the scheduling scenario. Then, this paper establishs the integrated energy system distributionally robust day-ahead optimal scheduling model taking into account the integrated demand response, and uses the strong duality theory and C&CG method to complete the model transformation and solution, and thus obtains the day-ahead optimal scheduling plan.

(3) In the intra-day optimal scheduling stage of the integrated energy system, this paper adopts a model predictive control method and establishes an intra-day rolling

optimization model to improve the reliability and traceability of the intra-day dispatching schedule. The model aims at minimizing the amount of day-ahead schedule adjustment, and adjusts the day-ahead scheduling planin a timely manner according to the actual intra-day operation of the system.

(4) Through simulation and comparison analysis, the effectiveness of the multi-time scale integrated energy system distributionally robust rolling optimal scheduling scheme proposed in this paper is verified. Under the conditions of multi-timescale uncertainty, the resulting day-ahead scheduling plan balances the robustness and economy of system operation, while the intra-day scheduling plan can ensure safe and stable intra-day operation of the system, and at the same time, it has good tracking performance for the day-ahead scheduling plan.

Keywords: Integrated energy system, Cholesky decomposition method, imprecise Dirichlet model, distributionally robust optimization model, integrated demand respond, model predictive control

目录

摘要.....I
ABSTRACT.....II
第一章 绪论.....1
1.1 研究背景与意义.....1
1.2 国内外研究现状.....2
1.2.1 综合能源系统研究现状.....2
1.2.2 不确定性优化调度研究现状.....3
1.2.3 多时间尺度滚动优化调度研究现状.....6
1.2.4 综合需求响应研究现状.....7
1.3 本文主要研究内容及章节安排.....8
第二章 综合能源系统架构及设备模型.....10
2.1 综合能源系统架构.....10
2.1.1 综合能源系统基本架构.....10
2.1.2 IES 机组运行特性.....11
2.2 综合能源系统相关设备数学模型.....15
2.2.1 独立型设备模型.....15
2.2.2 耦合型设备模型.....16
2.3 本章小结.....18
第三章 考虑多元随机变量相关性的多场景综合能源系统分布鲁棒优化调度....19
3.1 分布鲁棒优化理论.....19
3.1.1 不确定性问题.....19
3.1.2 分布鲁棒优化模型.....20
3.2 场景化分析方法.....25
3.2.1 K-means 聚类方法 26
3.3 多元随机变量相关性分解方法.....27
3.3.1 多元随机变量相关性矩阵.....27
3.3.2 Cholesky 分解方法 28
3.4 考虑多元随机变量相关性的多场景综合能源系统分布鲁棒优化调度模型
..... 29
3.4.1 目标函数.....29

3.4.2 约束条件.....30
3.4.3 模型转换与求解.....32
3.4.4 优化调度流程.....36
3.5 算例仿真与分析.....37
3.5.1 算例参数设置.....37
3.5.2 算例仿真分析.....38
3.6 本章小结.....46
第四章 多时间尺度综合能源系统分布鲁棒滚动优化调度.....47
4.1 综合需求响应.....47
4.1.1 电负荷需求响应.....47
4.1.2 热、冷负荷需求响应.....48
4.2 模型预测控制理论.....49
4.2.1 预测模型.....50
4.1.2 滚动优化环节.....51
4.1.3 反馈校正环节.....52
4.3 多时间尺度综合能源系统分布鲁棒滚动优化调度模型.....53
4.3.1 目标函数.....53
4.3.2 约束条件.....54
4.3.3 滚动优化调度流程.....55
4.4 算例仿真与分析.....56
4.4.1 算例参数设置.....56
4.4.2 算例仿真分析.....56
4.5 本章小结.....62
第五章 结论与展望.....63
5.1 研究工作总结.....63
5.2 后续工作展望.....64
致谢.....65
参考文献.....66
附录.....74
原创性声明.....75

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着工业化、城镇化进程的不断推进，传统能源资源约束趋紧的问题日益凸显。同时， 传统能源的大量使用导致全球气候形势日益严峻， 加速推进能源低碳转型发展成为解决能源危机和气候问题的有效途径。促进风能、太阳能等可再生能源的快速发展，是减少温室气体排放、促进能源转型的重要途径。综合能源系统(integrated energy system, IES)因其多能互补、能源梯级利用等优势，成为推动能源领域低碳转型的有效方案[1, 2]。

当前， 全球能源转型处于加速推进时期[3]，促进可再生能源发展是顺应时代发展、推动能源转型升级的迫切需要。为应对能源与环境危机， 各国政府相继提出了构建高比例乃至 100%可再生能源电力系统的目标[4]。根据国家能源局 2022 年全国电力统计数据，截至 12 月底，我国累计风电装机容量约 3.7 亿千瓦，同比增长 11.2%；太阳能发电装机容量约 3.9 亿千瓦，同比增长 28.1%。然而，风力、光伏等可再生能源发电具有明显的随机性及间歇性特征， 随着可再生能源的大规模接入， 电力系统中的不确定性显著增加， 进而影响综合能源系统的安全可靠运行。在推进能源转型的进程中， 合理的优化调度策略是实现能源系统稳定高效运行的保障， 根据调度周期可以将其区分为中长期、短期以及实时调度[2]，根据调度方法可将其区分为确定性优化、随机优化及鲁棒优化等。如何在合适的调度时间尺度下， 构建考虑不确定性的系统优化调度模型，成为保障综合能源系统安全稳定运行的重要议题。

另外，保证能源的清洁高效利用是破解资源环境约束、促进低碳发展的必然要求。在能源领域低碳转型进程中， 世界各国纷纷制定气候战略， 承诺于 2050 年实现 CO_2 净零排放，中国积极参与应对气候变化全球治理，力争实现“2030 年碳达峰， 2060 年碳中和”目标[1]。综合能源系统能够推动多能系统紧密耦合， 降低传统燃料消耗量，实现各类能源的高效利用[5]，在能源领域低碳转型进程中得到了广泛应用。 综合能源系统中电、热、气等各类能源在传输、转化、存储过程中蕴含着丰富的灵活性资源， 具有保障系统可靠运行的能力[6]，不同能源系统优势互补、源-网-荷-储协调发展能够最大限度地提升能源系统的运行效益[7]。因此，在推进能源系统低碳发展进程中，为了提高各类能源利用效率， 兼顾能源系统运

行的经济和环境目标，亟需对综合能源系统优化调度进行深入研究。

综上所述，综合能源系统在促进可再生能源就地消纳的同时， 还有利于提高能源利用效率，减轻能源资源趋紧压力， 从多角度实现能源低碳转型。但是， 风力、光伏发电设备的大规模并网和各类负荷的持续增长增加了综合能源系统的源、荷不确定性， 传统的确定性优化调度方法已经显现出明显的局限性。因此，本文对综合能源系统分布鲁棒优化调度方法展开研究， 建立多时间尺度的综合能源分布鲁棒优化调度模型， 能够降低源、荷不确定性以及日前预测误差、日内扰动给系统安全可靠运行带来的影响，对提高系统能源利用效率、促进能源低碳转型发展具有重要的理论意义和工程实践价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 综合能源系统研究现状

综合能源系统作为能源互联网的物理基础，是涵盖多种能源“源-网-荷-储”各环节的能源系统典型形态，从能源利用角度分析， 综合能源系统通过能的梯级利用和能的互补互济，满足能量的高效清洁、经济可靠供应[8]。

20 世纪 70 年代， 能源危机和二次能源革命， 促使冷热电三联供系统作为综合能系统的早期雏形在美国受到重视。1998 年，欧盟科技框架中初步提出了综合能源系统的构想，并寻求传统能源和可再生能源的协同优化， 标志着综合能源系统概念的诞生[9]。

然而， 在发展过程中， 传统天然气冷热电三联供系统暴露出热电比双向调整困难、气源紧张及气价昂贵的问题。因此， 促进可再生能源的开发利用和电、热能源的融合互补，提高耦合设备利用效率和系统综合效益， 成为综合能源系统建模、规划、运行和优化的焦点。

2005 年， 美国提出综合能源系统发展计划， 并开展了用户侧冷、热、电负荷需求响应(Demand Response, DR)管理； 2008 年，德国启动 E-Energy 研究计划，集成通信系统和能源系统， 依托电力市场互动机制， 运用需求响应、智能调度技术，消纳高比例可再生能源； 日本在 2008 年建立智能工业园区示范工程， 将电、气、热、冷等多种能源系统有机结合， 进行多能协调调度满足能源高效利用要求；当前， 丹麦在清洁能源领域处于世界领先地位， 为了消纳可再生能源， 丹麦重点研究将不同能源系统进行整合，充分开发各种能源资源；英国政府和企业长期致

力于建立安全、可持续发展的能源系统， 分别在国家层面和社区层面建立了电气集成系统和分布式综合能源系统[8, 9]； 目前， 我国正处于从化石能源为主体向新能源为主体转型的历史过渡时期， 在“碳中和、碳达峰”的目标导向下， 中国将综合能源系统建设写入“十三五”规划， 在“十三五”期间批准了 23 个多能互补集成优化示范工程、首批 28 个新能源微电网示范项目等，综合能源的多种形态进入先行先试阶段， 能源发展“十四五”规划强调继续推动综合能源系统有序发展[8]。

综合能源系统含有电、热、气等多种能源形式， 对各类异质能源子系统进行协调规划、优化运行可以提高系统运行灵活性和供能可靠性。目前，国内外学者对综合能源系统的运行特性以及优化调度进行了大量研究：在综合能源系统建模方面， 针对单一供能系统相关设备的建模已经较为成熟， 所以目前综合能源系统建模多基于单一供能系统的统一模型框架进行有效集成， 同时不断丰富可再生能源相关的新型设备模型[10]。与电力系统相比， 综合能源系统通过增设耦合元件、储热罐、蓄冷罐等储能设备，提高能源之间的转换、协调能力[11]，文献[5, 12-14]考虑多元负荷的综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)，作为综合能源系统优化调度的重要手段，提高系统的灵活协调能力。在优化调度研究方面， 文献[14]提出一种低碳综合能源系统两阶段优化调度策略， 但在日前调度过程中以日前预测数据进行确定性调度，所得日前调度计划难以保障实际存在多重不确定性的综合能源系统安全稳定运行。文献[15]建立了基于 IGDT-MPC 的双层综合能源优化调度模型，考虑综合能源系统多重不确定性，保证系统多时间尺度下的能量平衡，但其默认多重不确定因素之间相互独立，模型准确度受到影响。

综上所述， 随着传统能源资源约束趋紧、气候问题日益凸显， 单一供能系统无法满足能源高效利用的要求，综合能源系统能够有效提高可再生能源利用效率，增强能源协调互补能力。但是，目前综合能源系统优化调度研究中采用的调度策略难以适应多重不确定性运行实际， 计及系统多重不确定性的优化调度研究对多元随机变量之间的相关性考虑不够全面，所得模型的可靠性和精确度有待提高。

1.2.2 不确定性优化调度研究现状

可再生能源发电作为能源系统低碳运行的重要动力[16]，在实现能源领域低碳转型的目标导向下， 高比例可再生能源发电接入综合能源系统， 电、热、气等

多类能源深度融合发展。然而， 可再生能源发电在促进能源转型的同时， 也给综合能源系统带来了强随机性和强波动性， 随着综合能源系统中可再生能源占有率和各类负荷规模的持续增长， 系统源、荷不确定性不断增强。对可再生能源出力和各类负荷需求的预测无法实现绝对无差， 传统的确定性调度方法不再有效， 考虑不确定性的决策方法在能源系统优化调度中受到关注和应用。文献[17]考虑微电网源、荷预测误差以及系统不确定性， 建立多时间尺度鲁棒滚动优化模型， 实现微电网经济调度。 文献[18]考虑了风电、光伏大规模并网导致的出力不确定性和难预测性， 制定更可靠的水电发电计划。 文献[12]计及光伏出力及综合需求响应不确定性， 构建园区综合能源系统优化运行模型。 文献[19]考虑光伏出力以及负荷功率不确定性， 建立微电网经济调度模型， 提高了微电网抵御市场电价波动风险的能力。

目前， 国内外学者对系统不确定性优化方法进行了大量的研究， 其中， 鲁棒优化(robust optimization, RO) 和随机优化(stochastic optimization, SO) 是 2 种最为常用的不确定性管理方法[2]，研究依照概率场景或不确定性集合表征系统的不确定量，建立相应调度模型进而得出系统优化调度成本。

随机优化需要根据历史数据或相关文献提前假定不确定性变量的概率分布情况，并从中抽取典型场景，以各场景成本的加权平均值最小为决策目标[20-24]。文献[18]基于随机规划理论，建立随机期望值调峰模型进行短期联合优化调度，有效地减小新能源不确定性的影响， 提升水力发电计划的可靠性， 降低调度风险。文献[20]假设光伏和负荷预测误差服从正态分布， 根据误差概率分布通过随机抽样产生相应样本，并进行场景缩减， 以此建立多目标综合能源供给系统运行模型。鲁棒优化方法通过鲁棒不确定性集合表征系统中不确定性因素的波动范围， 寻求不确定集合中最恶劣场景的优化决策方案[25-28]，由于鲁棒优化模型不需要随机变量准确的概率分布信息，只需要不确定性参数的边界值等较少信息[29]，同时求解规模相对较小， 近年来被广泛用于优化调度中。文献[30]提出了无功优化与交直流混合配电网重构协同的两阶段鲁棒优化模型， 并利用锥松弛、线性化技术将模型近似为线性化模型进行求解。文献[31]考虑风电出力的随机性以及机组实际运行禁止区间，建立两阶段鲁棒优化调度模型对电力系统机组组合方案进行求解。

然而， 随机优化是在不确定场景下进行定量分析的调度过程，应用必须假定不确定量服从某种确定性分布[32]，但是系统实际运行情况下不确定性因素的概

率分布函数复杂且难以准确获得， 继而影响随机优化结果的准确度。鲁棒优化仅需以不确定性集合描述不确定性变量的波动范围，继而建立鲁棒优化模型并求解得到系统在波动范围内最恶劣运行条件下的最佳决策方案。鲁棒优化方法所得调度结果能够保证系统在所有运行条件下的安全、可靠运行， 但是该结果存在不可避免的强保守性问题。

因此， 为了更好地处理系统中不确定性因素对调度方案灵活性、可靠性以及经济性带来的问题，结合上述两种方法优势并进行改进的分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)逐渐得到关注。分布鲁棒优化方法基于随机变量的均值和方差信息， 类似于鲁棒优化在最恶劣条件下决策的思想， 在不确定变量的最恶劣概率分布下进行优化调度[33]。在解决传统随机优化建模不准确难题的同时，降低了传统鲁棒优化的保守性。

目前主要形成了基于概率信息[34]和基于矩信息[35]2 种类型的分布鲁棒优化方法，并且该优化方法已广泛应用于电力系统的优化调度[36-38]、机组组合[39-41]、拓展规划[42,43]等领域。但是， 在综合能源系统领域中考虑不确定性的优化调度方法仍然普遍考虑使用鲁棒优化或随机优化， 分布鲁棒优化方法应用较少， 导致当前综合能源系统的不确定性优化调度策略难以同时保障系统运行可靠性和经济性。所以， 分析分布鲁棒优化方法在系统优化调度中的应用特点， 研究分布鲁棒优化调度在综合能源系统中的应用，对降低综合能源系统源、荷不确定性影响，促进系统经济稳定运行， 具有重要意义。 文献[44]计及可再生能源的出力不确定性， 考虑弃风、切负荷成本和需求响应能力， 建立分布鲁棒模型确定系统机组组合情况，验证了分布鲁棒优化方法在不确定性条件下的调度有效性。文献[37]基于 Wasserstein 距离构建随机变量的概率分布模糊集， 建立了虚拟电厂的分布鲁棒优化模型，但是该模型构造复杂且求解过程较为繁琐。文献[42]基于不确定性因素的矩信息构建分布鲁棒优化模糊集， 利用需求响应资源缓解系统不确定性影响，提出电力系统源网荷协调分布鲁棒拓展规划模型， 但是该方法对历史数据的完整度要求较高， 模型适应性较低。 文献[40]针对线路故障的不确定性问题， 基于非精确 Dirichilet 模型构造了以概率分布区间为表现形式的模糊集，进而建立了两阶段分布鲁棒机组组合模型，该模型对数据要求较低且求解简便。但上述文献的研究对象为单一电力系统，所得模型难以适应目前能源系统多能耦合、互济互联现状。

综上所述，综合能源系统源、荷不确定性不断增强， 传统的确定性调度方法不再有效， 考虑系统不确定性的优化调度方法成为学者的关注热点。但是， 当前广泛使用的随机优化和鲁棒优化方法存在建模不准确或调度策略存在强保守性问题。分布鲁棒优化方法能够有效应对上述问题， 但目前基于分布鲁棒的综合能源系统优化调度研究相对较少。所以，亟需进行综合能源系统分布鲁棒优化调度研究， 提高综合能源系统优化调度策略的鲁棒性和经济性，同时， 深入研究分布鲁棒模糊集的构造方法，对提高模型适用范围、降低模型求解难度具有重要意义。

1.2.3 多时间尺度滚动优化调度研究现状

近年来， 国内外学者对可再生能源出力预测进行了大量的研究， 当前不确定性预测技术虽然已经有较高的预测精度，但极端天气场景仍然难以精确预测[45]。同时， 可再生能源出力、负荷需求的预测误差随着时间尺度的缩短而减小， 所以在现有的不确定性变量预测条件下， 为了降低系统不确定性及预测误差的影响，多时间尺度优化方法被广泛应用于系统调度决策过程。文献[17]基于模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 模型建立多时间尺度滚动鲁棒优化经济调度模型， 日前采用鲁棒优化模型进行微电网经济调度， 日内考虑源、荷预测误差进行滚动优化并完成反馈校正。文献[46]考虑源、荷不确定性进行了日前电能交易风险调度， 日内基于日前计划协调优化调节成本以及调度偏差， 提出了多虚拟电厂日前随机博弈与实时变时间尺度协同优化方法。文献[47]日前采用多场景随机优化模型， 应对光伏出力不确定性影响， 日内考虑供需双侧优化机组出力、储能特性和需求响应环节，保证系统高效稳定运行。

多时间尺度优化调度方法最初应用于电力系统， 近年来也逐步运用于综合能源系统的优化调度。文献[48]建立了日前- 日内-实时三阶段的多时间尺度优化模型，提升不同时间维度的负荷与新能源出力预测误差下系统调度策略的灵活性和稳定性。文献[49]基于模型预测控制方法， 建立了两阶段多时间尺度优化调整模型，在滚动优化阶段以运行成本和启停罚金最小为目标， 动态调整阶段以滚动优化阶段计划为基准进行设备运行状态调整， 以应对源、荷不确定性变化， 经济可靠地满足系统用能需求。文献[50]提出了考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度策略， 日前模型提升系统运行灵活性， 日内计划平抑综合能源在不同时间尺度上的功率波动。

上述文献所提多时间尺度优化调度方法能够有效降低系统日前预测误差和日内系统扰动的影响。但是上述文献的日前调度决策基于确定性方法、鲁棒优化或随机优化方法， 导致日前调度计划难以平衡系统运行的可靠性和经济性， 进而影响调度计划的整体效果。所以， 在各调度阶段制定更合理的调度计划，成为降低系统不确定性及预测误差影响、保障系统经济稳定运行性能的有效手段。

1.2.4 综合需求响应研究现状

可再生能源发电过程中不可避免的间歇性、波动性，影响电力系统的安全稳定运行， 增加电力系统调度难度。为了有效利用可再生能源并且保证电力系统运行可靠性， 电力系统调度最直接的方式是采用储能系统平抑功率波动， 但是该方法成本较高、建设周期较长， 利用负荷侧需求响应(demand respond, DR)对系统进行反向调节是更经济有效的功率调节手段[51]。文献[52]建立了用户调度优先级评价指标， 为不同优先级的用户制定对应优惠政策， 进而提出了由需求响应引导的储能规划配置策略。 文献[53]将用户负荷分为易转移、易节约和刚性负荷， 建立了基于分类负荷对实时电价的响应模型， 并依此建立微网优化运行模型， 增加微网收益的同时降低用户平均购电成本。

综合需求响应(integrated demand respond, IDR)作为传统电负荷需求响应在综合能源系统中的拓展，不仅利用价格和激励响应机制引导用户调整用能需求，降低负荷波动， 而且通过多能互补、协同优化降低系统运行成本。 文献[54]充分考虑电、热负荷的需求响应对综合能源系统经济调度的影响， 建立了需求侧响应的区域综合能源系统低碳经济调度模型， 有助于扩大风电消纳空间、平滑负荷曲线实现削峰填谷作用。文献[48]日前基于随机规划方法， 提出关注电、热、气等多元负荷需求与阶梯式碳排放费用机制， 建立了多时间尺度优化模型， 促进综合能源系统运行灵活性。 文献[55]考虑用户侧电、热、气、冷负荷的可调度性， 提出一种参数自适应式阶梯型需求响应激励机制的园区综合能源系统优化调度方法。

基于上述分析， 负荷侧需求响应能够有效平抑系统功率波动， 提高系统运行经济性。在综合能源系统中引入综合需求响应环节， 能够基于系统多能互补优势，进一步降低系统运行成本。所以， 充分考虑综合负荷需求的可调度能力制定调度策略， 对提高系统运行的灵活性和经济性具有重要意义。

1.3 本文主要研究内容及章节安排

本文以综合能源系统为研究对象， 针对高比例风电、光伏接入系统存在波动性、随机性以及系统源、荷变量数据难以准确预测的研究背景，考虑源、荷不确定性以及日前预测误差、日内系扰动对综合能源系统安全稳定运行造成的影响，提出了一种日前采用分布鲁棒优化方法，日内基于 MPC 模型的多时间尺度综合能源系统分布鲁棒滚动优化调度方法。

本文所提方法在日前阶段考虑系统运行场景的相似性，基于 K-means 方法进行场景化分析，同时考虑各不确定性变量间的相关性，基于 Cholesky 方法完成多元随机变量相关性分解，然后引入综合需求响应环节，并基于非精确 Dirichlet 模型进行综合能源系统日前分布鲁棒优化调度，以保证综合能源系统在日前阶段的经济稳定运行；在日内阶段，采用 MPC 模型滚动修正日前调度计划，应对日前预测误差以及日内扰动造成的调度偏差问题，结合日前调度模型完整构建出本文所提多时间尺度综合能源系统分布鲁棒滚动优化调度模型。该模型所得日前调度计划兼顾系统运行经济性和鲁棒性， 日内调度计划具有良好的跟踪性能，能够有效应对日前预测误差和日内扰动的影响， 同时保障系统运行经济效益。本文主要研究内容及结构组成如图 1-1 所示，各章节主要内容安排如下：

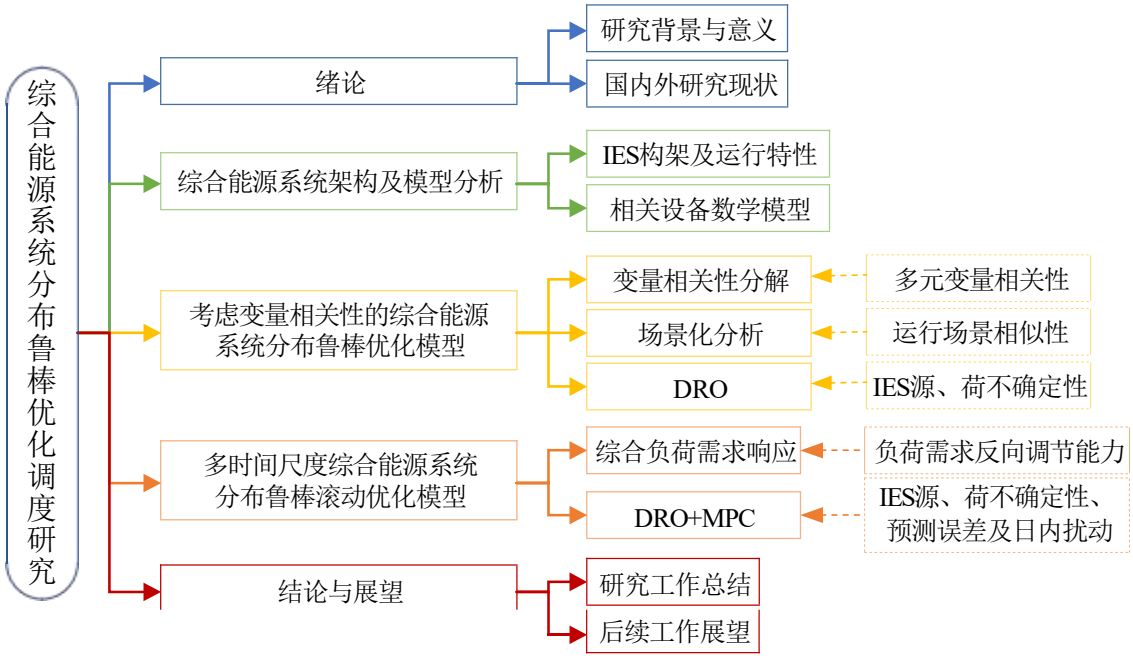


图 1-1 文章内容与章节安排

第一章为绪论章节，首先基于研究背景探索研究意义， 引出本文研究内容，其次， 介绍了国内外综合能源系统、不确定性优化调度、综合需求响应以及多时

间尺度滚动优化调度研究现状并进行总结， 最后， 阐述本文主要研究内容并对本文章节安排情况进行说明。

第二章为综合能源系统架构及模型分析章节，对综合能源系统的基本架构和机组运行方式进行介绍， 同时详细阐述了综合能源系统中的风力、光伏发电设备、燃气轮机、余热锅炉、电锅炉等相关设备运行原理及特点，构建了相应设备数学模型，为后文建立优化调度模型奠定理论基础。

第三章针对综合能源系统中的源、荷不确定性给系统安全稳定运行带来的影响，分析了基于非精确 Dirichlet 模型的分布鲁棒优化模型的建模方法与优势。同时，考虑综合能源系统多元随机变量相关性以及系统运行场景相似性，对综合能源系统的风力、光伏出力和综合负荷需求参数进行相关性分解和场景化分析， 并由此建立了综合能源系统分布鲁棒优化调度模型。最后，通过算例仿真与分析，验证了本章对所提调度方法的经济性和有效性。

第四章在第三章的基础上考虑综合需求响应，建立了计及综合需求响应的日前分布鲁棒优化调度模型。上述日前调度模型与日内 MPC 滚动优化模型结合，构成了本文多时间尺度综合能源系统分布鲁棒滚动优化调度模型。接着， 通过算例仿真与分析， 验证综合负荷需求的可调节能力及需求响应经济性，进一步对滚动优化调度模型进行效果分析，论证了所提调度模型的鲁棒性和可行性。

第五章为结论与展望， 一方面对本文的研究内容及成果进行归纳总结， 说明本文所提方法的可行性及有效性，另一方面对本课题下一步研究方向和内容做出进一步展望。

第二章 综合能源系统架构及设备模型

2.1 综合能源系统架构

2.1.1 综合能源系统基本架构

综合能源系统含有电、热、气等多种能源形式，对各类异质能源子系统进行协调规划、优化运行可以提高系统运行灵活性和供能可靠性，同时能够解决单个能源系统独立运行时可再生能源利用效率不高，导致系统运行成本高、污染严重的问题。综合能源系统中各供能单元和各种能源转换单元之间具有灵活性和耦合性，分析系统各单元的运行特性，实现多种能源的高效利用并满足系统各类负荷需求是当前综合能源系统优化调度的研究重点。

本文构建的综合能源系统基本架构及能量交互情况如图 2-1 所示，系统消耗电能及天然气能源，满足电、热、冷 3 类负荷需求，同时使用蓄电池、蓄冷罐以及储热罐实现电、热、冷能源的能量储存及释放，提高系统调度灵活性以及供能可靠性。本文系统电负荷需求由风力、光伏发电设备、大电网、燃气轮机以及蓄电池协同供应；由余热锅炉、燃气锅炉以及储热罐共同满足热负荷需求；冷负荷需求由吸收式制冷机、电制冷机以及蓄冷罐协同供给。

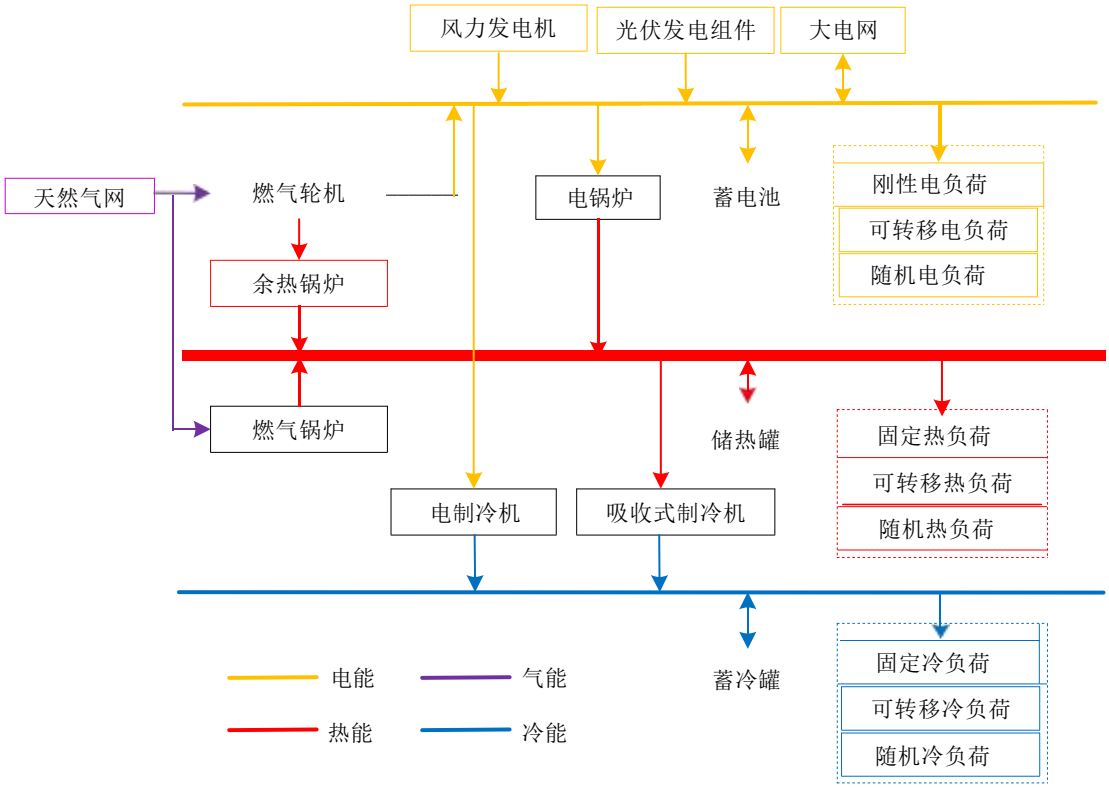


图 2-1 综合能源系统基本架构图

2.1.2 IES 机组运行特性

2.1.2.1 可再生能源发电机组

基于加速构建新型电力系统，推进能源转型的背景，可再生能源大量并网，保障了综合能源系统清洁低碳运行， 但可再生能源发电的间歇性、波动性给电力系统带来明显的发电不确定性，影响系统安全稳定运行。

本文综合能源系统中考虑风电、光伏接入电力系统，风力发电机组主要由风力发电机、风轮以及塔架组成， 发电机将机械能转化为电能，风轮装置是风力发电的关键环节， 风能驱动风轮叶片旋转， 保证足够转速， 进而促进能量转换。风力发电机组输出功率大小主要与风轮装置的转动情况有关，风速-功率曲线通常是一条近似“S”形的曲线；光伏发电系统主要由光伏组件、汇流器、逆变器、控制器和储能系统组成， 光伏组件利用光伏效应将太阳能转换为直流电，再经过逆变器、控制器获得与电网同频的交流电， 完成并网发电过程，光照强度是决定光伏发电机组发电功率的主要影响因素。从实际工程中风电、光伏的发电运行数据来看， 风力、光伏出力在不同时段的差异性较大， 时变特点明显[56]，所以在综合能源系统优化调度研究中， 考虑可再生能源出力不确定性影响十分必要。

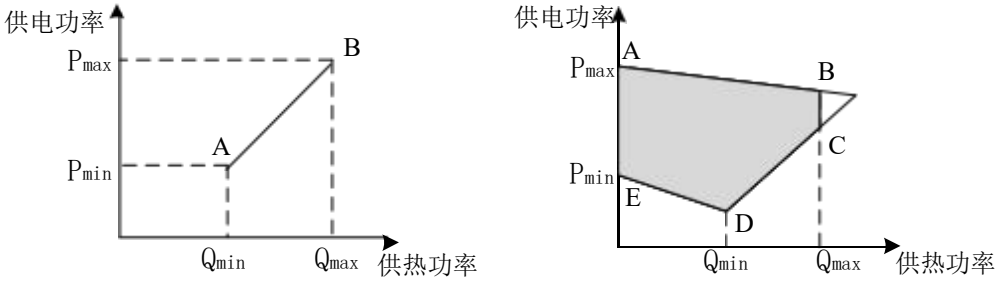
2.1.2.2 能源耦合型机组

同时， 本文综合能源系统利用各类耦合机组的协同运行， 实现了多种能源的协调优化调度，其中，热电联产(combined heat and power,CHP) 机组由燃气轮机（gas turbine, GT）及余热锅炉组成，作为耦合设备实现气、电、热能源的耦合及转换利用，燃气锅炉燃烧天然气产生热能，吸收式制冷机完成热、冷能源转换，本文综合能源系统采用的耦合设备及能源转换情况如表 2-1 所示。

表 2-1 耦合设备及能源转换情况表

耦合设备		输入能源	输出能源	能源耦合情况
CHP 机组	燃气轮机	天然气	电	气- 电-热
（热电联供）	余热锅炉	燃气轮机余热	热	
燃气锅炉		天然气	热	气-热
电锅炉		电	热	电-热
吸收式制冷机		热	冷	热-冷
电制冷机		电	冷	电-冷

CHP 机组是综合能源系统实现电能、天然气能源和热能耦合转化的主要设备，其能量转换效率较高且运行成本相对常规电厂更低[57]。CHP 机组在消耗天然气供应电负荷的同时， 利用余热满足热负荷需求， 根据不同的运行方式可以将其区分为背压式机组和抽汽凝汽式机组，两类机组运行区间如图 2-2 所示。



1)背压式CHP机组运行区间　　2)抽汽凝汽式CHP机组运行区间

图 2-2 CHP 机组运行区间

背压式CHP 机组供电功率和供热功率之间呈现单一线性关系，其工作特性表现为“以热定电”，即以热量平衡为背压式CHP 机组输出功率的决定条件， 供电功率依供热缺额而定， 电力系统发生功率缺额时， 无法通过CHP 机组补足， 只能通过增加发电设备或电网购电达到电力功率平衡；抽汽凝汽式CHP 机组供电功率和供热功率的耦合关系由图 2-2(2)中灰色多边形ABCDE 表示， 可以看到供电功率的调节区间随供热功率的增加而减小， 最大供热功率时， 供电功率调节范围达到最小。抽汽凝汽式CHP 机组运行特性通常选用“以电定热”工作原理， 即以电功率平衡为抽汽凝汽式CHP 机组输出功率的决定条件，供热功率随供电功率变化，供热系统出现热能缺额时，需要储热罐或燃气锅炉补足热量缺额。

电力系统为了系统的安全可靠运行， 要求时刻满足功率供需平衡， 并且， 电能传输效率高， 但难以大量存储； 而供热系统由于热惯性、传热效率低且具有时延性质， 所以热能供需平衡的实时性要求不高， 且热能易储存。在实际综合能源供能系统中， CHP 机组能够实现发电供热过程中的能源梯级利用，促进能源高效利用， 但是其电热耦合特性导致CHP 机组调度灵活性较差， 所以燃气锅炉、电锅炉等热电解耦手段、储能设备及需求响应技术的引入， 对提高综合能源系统优化调度灵活性具有十分重要的作用。

燃气锅炉(Gas Boiler, GB)作为气-热能量转换设备，利用天然气燃烧释放的热能将流体工质加热到一定温度， 产生带压蒸汽或热水满足供热需求。燃气锅炉的运行系统分为烟风系统和水系统，对应供热需求，改变燃气比例阀门开度即可达到燃气锅炉机组出力控制效果，燃气锅炉机组出力控制原理如图 2-3 所示。

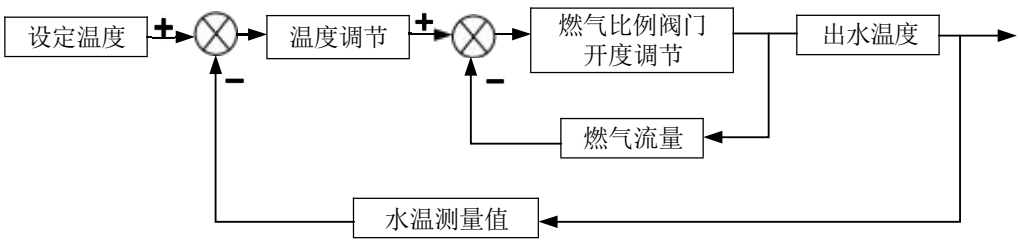


图 2-3 燃气锅炉机组出力控制原理图

电锅炉是电-热耦合设备，以电能为动力，通过电阻或电磁感应原理产生热量，利用锅炉换热将水或其他热载体加热至一定温度， 进而输出热能满足热负荷需求。电锅炉的应用能够实现电负荷需求低谷时段电力的有效利用， 将难以大量储存的电能转化为热能， 实现能源耦合转化， 提高综合能源系统的能源利用效率。

吸收式制冷机为热-冷耦合设备， 主要由吸收器、发生器、冷凝器、蒸发器等装置构成， 低沸点制冷剂通过热源加热产生制冷蒸汽， 之后高沸点的吸收剂吸收低压制冷蒸汽完成制冷循环， 制冷机和吸收剂组成工质对， 在状态变化的过程中完成吸热、放热过程，吸收式制冷机循环运行特性如图 2-4 所示。

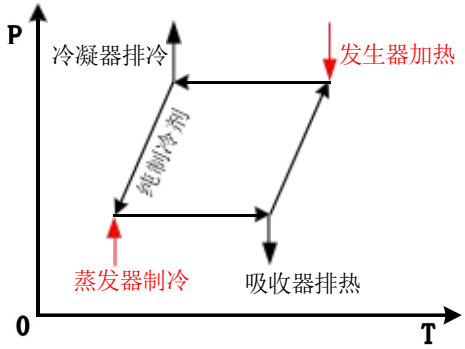


图 2-4 吸收式制冷机循环运行特性图

电制冷机能够实现电-冷能源耦合， 主要由压缩机、膨胀阀、蒸发器和冷凝器组成，利用逆卡诺循环原理，在压缩机输入电能使能量由蒸发器传递至冷凝器，制冷机在低温低压、等温等压与高温高压状态转换的过程中， 完成制冷循环过程。

2.1.2.3 能量存储设备

储能设备在综合能源系统中的应用可以与系统中的能量转化装置配合摆脱 CHP 机组“以热定电”的耦合约束， 提升系统运行的灵活性。同时， 储能系统可以减小可再生能源的出力不确定性影响， 提高系统供能可靠性， 并配合分时电价和分时气价平滑负荷， 增加系统的可调节能力[58-60]。根据本文综合能源系统能源形式，储能设备对应考虑蓄电池、储热罐和蓄冷罐。

蓄电池运行特性曲线如图 2-5 所示，其运行过程有两种不同的电性能特性，分别为放电特性和充电特性， 在充电过程前期进行大电流充电， 充电速率、电压

上升较快， 充电终期小电流充电， 保持较高恒压； 放电过程保持大电流放电， 电压下降迅速，放电特性曲线短而平缓。

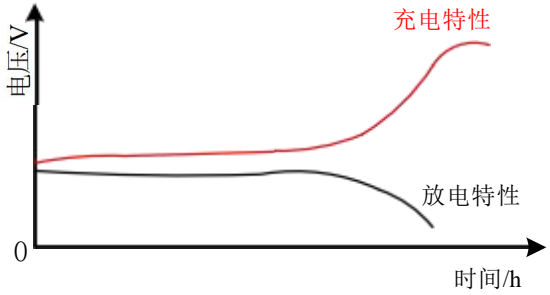
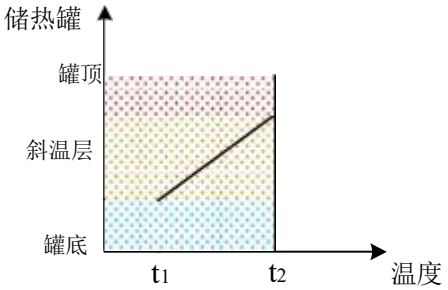
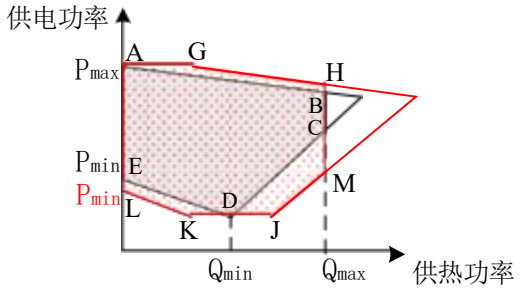


图 2-5 蓄电池运行特性曲线图

储热罐控制罐内水温变化达到热量存储目的， 冷、热水根据密度不同在罐内自然分区， 热水密度较小， 位于罐内上半部分， 冷水则聚于罐体下半部分， 中间部分由于冷热水分界面存在温差， 形成一个有一定厚度的温度梯度过渡的斜温层，储热罐内水温分布情况如图 2-6(1)所示。在热负荷需求低谷时期供热过剩， 由储热罐对过剩热能进行消耗， 下层水管排出冷水， 上层水管存入热水并保温； 在热需求高峰时段，储热罐释放热水向热网供热。随着储热罐的加入， CHP 机组“以热定电”的耦合约束得以缓解， 加入储热罐后CHP 机组的运行区间如图 2-6(2)所示，该情况下给定供热功率Q_{max} 时， 运行区间相较于未配置储热罐时的多边形 ABCDE 扩大为红色多边形 AGHMJKL，提高了给定热负荷条件下的调峰能力以及系统优化调度的灵活性。



1)储热罐内水温分布情况示意图



2)带储热罐CHP机组运行区间

图 2-6 储热罐运行特性图

蓄冷罐能够以水或冰的形势将制冷机利用非峰值电力及天然气资源的制冷量存储起来， 根据冷负荷需求情况以经济性更佳的方式进行冷能释放。蓄冷罐储冷介质分为水蓄冷、冰蓄冷、共晶盐蓄冷以及气体水合物蓄冷，其中， 水蓄冷和冰蓄冷方式使用更广泛，水蓄冷罐利用$4^0C\sim7^0C$ 低温水进行冷能存储， 冰蓄冷罐以制冰机作为制冷设备， 保温槽体作为蓄冷设备， 利用冰的相变潜热完成蓄冷。

观察冷负荷需求曲线可以总结出一天中冷能需求持续高峰时间很短， 蓄冷设备的配置可以节省制冷机组投资并保障制冷机组运行平稳性。

2.2 综合能源系统相关设备数学模型

2.2.1 独立型设备模型

2.2.1.1 风力发电机组

风力发电相较传统发电方式建设周期更短、环境效益更好，有助于实现能源可持续发展和环境保护目标， 所以在加速推进能源转型的进程中，分析风力发电机理及其通用数学模型是进行系统优化调度的必要条件[61, 62]。

风力发电机组输出的功率大小主要与风速驱动的风轮装置的转动情况有关，风速满足风机允许运行条件时， 风力发电机组为正常运行状态； 实际风速小于风机切入风速， 或大于切出风速时， 风力发电机组处于停机状态。风力发电机组发电功率与风速之间的关系如式(2-1)所示：

$$P_{wt,t}^{out}=\begin{cases}0, v_t \le v_{in} \\ P_r \dfrac{v_t - v_{in}}{v_r - v_{in}}, v_{in} < v_t < v_r \\ P_r, v_r < v_t < v_{out} \\ 0, v_{out} > v_t\end{cases} \tag{2-1}$$

式中：$P_{wt,t}^{out}$ 和 P_r 分别为风力发电机组 t 时刻的实际输出功率和额定功率； v_t 、v_{in} 、v_r 和 v_{out} 分别为 t 时刻实际风速、切入风速、额定风速和切出风速。

2.2.1.2 光伏发电组件

大力发展可再生能源已经成为应对全球气候问题的重要举措，其中， 太阳能光伏发电显现出强劲的发展势头， 我国光伏发电相关产业的发展尤为显著， 产业规模多年保持世界第一[63]。

光伏电池是光伏发电系统的最小单元， 一定数量的光伏电池封装组成光伏组件。 在实际运行过程中，云层移动、相对湿度、风速等外界条件以及灰层遮挡、电池板老化等长期因素都会影响光伏发电系统的输出功率， 导致光伏出力具有明显的不规律周期性和波动性[56, 64] 。由于本研究重点考虑大规模光伏并网带来的不确定性， 提高光伏发电组件的能源利用效率， 所以本文仅考虑光照强度和环境温度对光伏发电组件输出功率的影响， 建立光伏发电组件输出功率的数学模型如式(2-2)、式(2-3)所示， 该输出功率是关于光照强度和温度的非线性函数：

$$P_{pv,t}^{out} = \frac{P_{stc} \cdot I_t[1+k(T_t - T_{stc})]}{I_{stc}} \tag{2-2}$$

$$T_t = T_{env,t} + \frac{30 I_t}{1000} \tag{2-3}$$

式中： $P_{pv,t}^{out}$为t 时刻光伏发电组件实际输出功率，P_{stc}为标准测试条件下光伏面板的最大输出功率； I_t、I_{stc} 分别为t 时刻实际光照强度和标准测试条件下额定光照强度； T_t和$T_{env,t}$ 分别为t 时刻光伏面板的实际温度和环境温度；T_{stc} 为标准测试条件下光伏面板的额定温度，通常取 25^oC；k 为功率温度系数。

2.2.1.3 储能设备

可再生能源的大量并网导致电力系统出力具有较强的不确定性，储能设备作为综合能源系统中的重要环节， 可以提高负荷可调度能力以及系统能源利用效率，实现与可再生能源发电机组的互补使用。本文储能单元考虑使用蓄电池、储热罐和蓄冷罐存储系统电能、热能和冷能， 在满足各类能源需求的前提下， 获得更具经济性和环保性的综合能源系统优化调度计划。

由于各储能设备在优化调度阶段所考虑的运行方式相似，所以本文以通用数学模型对各类储能设备进行统一描述。假设单位时段内储能系统的充放能功率恒定，储能设备的通用模型如式(2-4)所示：

$$S_{m,t} = S_{m,t-1}(1-s_m) + (\eta_m^{char} P_{m,t}^{char} - \frac{P_{m,t}^{dis}}{\eta_m^{dis}})\Delta t \tag{2-4}$$

式中： 下标 m 表示能量类型， BESS 为蓄电池，HST 为储热罐，CST 为蓄冷罐；$S_{m,t}$ 为t 时刻储能设备的剩余容量； s_m为m 类储能设备的能量自损系数； η_m^{char}、η_m^{dis} 分别为储能设备充、放能效率； P_{mt}^{char}、$P_{m,t}^{dis}$ 分别为t 时刻储能充、放能功率。

2.2.2 耦合型设备模型

2.2.2.1 燃气轮机

燃气轮机主要由压气机、燃烧室和燃气透平三个部分组成，其工作流程首先在压气机中压缩产生增压空气，再将压缩后的空气传输至燃烧室与燃料充分燃烧加热， 由此获得高温高压气体到燃气透平中快速膨胀做功，推动燃气透平带动压气机和外负荷转子高速旋转， 燃气透平所发机械能一部分用于带动压气机， 另一部分驱动发电机工作， 产生电能。在燃气轮机中， 燃料燃烧的化学能转变为机械

能，并驱动发电机发电的过程不断循环， 实现燃气轮机的持续供电。

与传统化石能源发电相比，燃气轮机发电所用燃料具有更清洁的燃烧特性，发电过程的燃烧产物对环境污染更小， 并且燃气轮机工作寿命长、启停速度快、负荷适应性强、运行灵活。所以，虽然燃气轮机的初始投资成本较高， 但因其整体运行性能较好，燃气轮机发电技术成为提高电网运行质量的有力手段之一。燃气轮机热电效率和单位成本主要由容量大小决定，燃气轮机发电功率与天然气消耗量之间的关系如式(2-5)和(2-6)所示：

$$P_{GT,t} = \eta_{GT} G_{GT,t} / m / \Delta t \tag{2-5}$$

$$G_{GT,t} = V_{GT,t} L_{CH_4} \tag{2-6}$$

式中： $P_{GT,t}$ 为燃气轮机t 时刻的发电功率；η_{GT} 为燃气轮机的发电效率； $G_{GT,t}$ 为 t 时刻燃气轮机中天然气燃烧产生的热能；m 为热值与电功率的换算值；$V_{GT,t}$ 为天然气消耗量； L_{CH_4} 为天然气的燃烧热值。

2.2.2.2 余热锅炉

燃气轮机在发电过程中会排出的高温气体， 利用余热锅炉对燃气轮机发电余热进行回收利用，供给热负荷所需要的热能的同时， 实现能源的梯级利用， 提高能源利用效率。余热锅炉的热回收功率如式(2-7)所示：

$$Q_{WHB,t} = \eta_{WHB} (V_{GT,t} L_{CH_4} - m P_{GT,t} \Delta t) \tag{2-7}$$

式中： $Q_{WHB,t}$ 为t 时刻余热锅炉回收的热能；η_{WHB} 为余热锅炉的热回收效率。

2.2.2.3 燃气锅炉

燃气锅炉通过天然气燃烧释放的热量，加热锅炉内热水使其汽化， 形成带压蒸汽形成热动力。燃气锅炉的供热效率是锅炉对燃料所释放的热量有效利用的性能指标， 锅炉的供热大小与锅炉供热效率和天然气燃烧热能有关，锅炉热能输出量与天然气消耗量关系如式(2-8)和(2-9)所示：

$$Q_{GB,t} = \eta_{GB} G_{GB,t} \tag{2-8}$$

$$G_{GB,t} = V_{GB,t} L_{CH_4} \tag{2-9}$$

式中： $Q_{GB,t}$ 为t 时刻燃气锅炉的供热量；$G_{GB,t}$ 为t 时刻燃气锅炉中天然气燃烧产生的热能； η_{GB} 为燃气锅炉的供热效率； $V_{GB,t}$ 为燃气锅炉的耗气量。

2.2.2.4 电锅炉

电锅炉的应用能够将难以大量储存的电能转化为热能，实现电-热能源的耦

合转化， 解耦 CHP 机组“以热定电”的耦合约束。根据电锅炉的工作原理，建立其设备模型如式(2-10)所示：

$$Q_{EB,t} = m.\eta_{EB}P_{EB,t}\Delta t \tag{2-10}$$

式中： $Q_{EB,t}$ 为t 时刻电锅炉的供热量；$P_{EB,t}$ 为t 时刻电锅炉的耗电功率；η_{EB} 为电锅炉的电热转换效率。

2.2.2.5 吸收式制冷机

吸收式制冷机是综合能源系统实现能源梯级利用的重要设备， 其工作原理是利用系统热能，在热能低沸点工质的蒸发过程制冷， 由高沸点工质吸收制冷剂， 依靠吸收式制冷工质对完成制冷循环， 输出冷能供给冷负荷。 吸收式制冷机的制冷效率也称为循环的热力系数 COP，定义为制冷机所得制冷量与系统热源供给热量之比，根据吸收式制冷机工作原理建立其数学模型如式(2-11)所示：

$$Q_{CAC,t} = Q_{AC,t}.\eta_{AC} \tag{2-11}$$

式中： $Q_{CAC,t}$ 为t 时刻吸收式制冷机输出的供冷能量；$Q_{AC,t}$ 为t 时刻吸收式制冷机的吸收热能；η_{AC} 为吸收式制冷机的制冷效率。

2.2.2.6 电制冷机

电制冷机是将电能转换为冷能的典型设备， 制冷效率较高，其提供的冷能主要取决于能效比， 制冷系数作为电制冷机的重要指标， 反应单位耗电量制得的冷能，制冷性能系数越大， 则表示制冷机的能源利用效率越高。电制冷机的输出功率如式(2-12)所示：

$$Q_{EC,t} = m.\eta_{EC}P_{EC,t}\Delta t \tag{2-12}$$

式中： $Q_{EC,t}$ 为t 时刻电制冷机输出的供冷能量；$P_{EC,t}$ 为t 时刻电制冷机的耗电功率；η_{EC} 为电制冷机的制冷效率。

2.3 本章小结

本章介绍了综合能源系统的基本架构，并将系统内机组按其运行特性区分为独立型设备及耦合型设备， 其中， 独立型设备包含可再生能源发电机组以及储能设备，耦合型机组包含CHP 机组、燃气锅炉和电锅炉等。基于上述分类，本章内容依次对各机组设备运行特性进行介绍， 并建立各设备对应的数学模型， 为后文建立优化调度模型奠定理论基础。

第三章 考虑多元随机变量相关性的多场景综合能源系统分布鲁棒优化调度

3.1 分布鲁棒优化理论

3.1.1 不确定性问题

在全球能源领域低碳转型进程中， 提高能源利用效率、促进能源可持续发展成为能源领域的关注重点， 风力、光伏等分布式发电机组并网以及综合能源系统利用多能耦合特性实现能源的梯级利用，都为能源低碳高效利用做出重要贡献。然而， 由于新能源发电固有的随机性、间歇性以及系统各类能源负荷需求的波动性等多种因素， 综合能源系统运行存在多重不确定性， 传统的确定性调度方法不再适用当前系统运行实际， 充分考虑可再生能源发电以及负荷需求不确定性的优化调度是保障系统安全高效、低碳经济运行的关键。

传统的确定性调度方法通常以日前预测的可再生能源发电功率以及负荷需求数据为基础， 认为预测数据为无误差的理想数据， 基于该预测数据进行系统优化调度，其调度模型如式(3-1)：

$$\begin{cases}\min f(x) \\ s.t.\ h(x) < 0\end{cases} \tag{3-1}$$

式中： x为调度模型的决策向量， $f(x)$为目标函数， $h(x)$为约束条件函数。

上述模型以日前预测数据作为其确定性参数， 建立的目标函数以及约束条件。但是， 在实际工程中， 综合能源系统复杂性较强， 难以实现日前的无误差精确预测，在优化调度过程中， 利用日前预测数据进行确定性优化容易导致所得调度计划无法保证实际情况下的系统安全稳定运行。 因此， 在多重不确定性条件下，为了保证综合能源系统安全可靠运行、提高可再生能源消纳效率， 进行综合能源系统不确定性优化调度研究具有重要意义。

研究人员考虑综合能源系统实际运行过程中的多重不确定性因素， 将不确定性参数中加入确定性调度模型，建立不确定性调度模型如式(3-2)所示：

$$\begin{cases}\min f(x,\xi) \\ s.t.\ h(x,\xi) < 0\ ,\forall \xi = U\end{cases} \tag{3-2}$$

式中： ξ为表征系统不确定的随机变量，$f(x,\xi)$为考虑系统不确定因素的优化调度目标函数， U为随机变量可行域。

考虑不确定性的优化调度模型通常分为模糊优化模型[65]、随机优化模型[66]、鲁棒优化模型[67]及分布鲁棒优化模型[38]。由于模糊优化模型中表征系统不确定性的模糊隶属度函数的确定只能依赖人为主观因素， 尚未形成客观方法， 所以在综合能源系统中应用较少。目前对综合能源系统不确定性优化调度的现有研究模型主要基于随机优化、鲁棒优化及分布鲁棒优化方法。

随机优化基于概率论方法， 假定随机变量的概率分布情况对随机变量的不确定性进行表述， 基于概率信息拟合随机变量实际值。例如：风机出力与风速有关，通常认为双参数威布尔分布曲线能够较好地拟合风速分布情况， 冷、热、电负荷需求则服从正态分布， 随机优化方法则基于以上变量的概率分布情况拟合变量的实际数据，将随机问题转化为线性问题进行求解，其数学模型如式(3-3)所示：

$$\begin{cases}\min f(x,\xi) \\ s.t.\ g_i(x,\xi) < 0, i = 1,2,.....,p\end{cases} \tag{3-3}$$

式中： $f(x,\xi)$ 为优化调度目标函数， $g_i(x,\xi)$ 为第 i 个场景的约束条件函数。

鲁棒优化利用随机变量的波动区间确定不确定参数的上下界， 在鲁棒不确定集中求解系统“最恶劣运行条件”下的最优调度计划， 其数学模型如式(3-4)所示：

$$\begin{cases}\min\limits_{x}\left\{\max\limits_{\xi\in U} f(x,\xi)\right\} \\ s.t.\ g_j(x,\xi)\le 0, j = 1,2,\ldots\ldots,p\end{cases} \tag{3-4}$$

式中： $f(x,\xi)$ 为优化调度目标函数，$g_j(x,\xi)$ 为第 j 个约束条件函数，U 为鲁棒不确定集合，表征变量波动区间的边界。

然而， 随机变量的概率分布情况无法精确获得， 导致建立的随机优化模型不够精确， 影响调度结果。鲁棒优化模型虽然不需要准确的概率信息， 根据随机变量的边界情况即可建立鲁棒不确定集合， 但是该方法需要保证决策可以免疫不确定集内的任何扰动，导致所得调度计划过度保守，影响系统运行的经济性。基于上述原因， 结合随机优化和鲁棒优化优点， 缓解优化调度鲁棒性和经济性矛盾的分布鲁棒优化方法在综合能源系统优化调度中发展迅速。

3.1.2 分布鲁棒优化模型

3.1.2.1 分布鲁棒模糊集概述

分布鲁棒优化以鲁棒优化为基础， 将随机变量的概率信息引入模糊集， 基于随机变量真实概率分布的所有可能分布情况构建分布鲁棒模糊集， 基于该模糊集

完成系统优化调度， 既有鲁棒优化求解迅速、抗干扰能力强的优点， 又利用概率分布信息保证了调度结果的经济性，平衡了调度计划的鲁棒性和经济性。

目前分布鲁棒模糊集的建立方式如图 3-1 所示， 主要可以基于随机变量的概率信息或基于矩信息建立分布鲁棒不确定性模糊集。基于概率信息的模糊集又可以细分为基于分布之间的距离建立模糊集，例如： 以 Kullback-Leibler(KL)散度[68]或Wasserstein 距离[37]描述变量分布之间的距离，或者基于变量的概率密度函数建立模糊集， 通常基于已有的历史样本得到包含所有可能分布的置信带；基于矩信息的分布鲁棒优化依据变量历史数据， 获取一阶矩和二阶矩信息并建立模糊集。

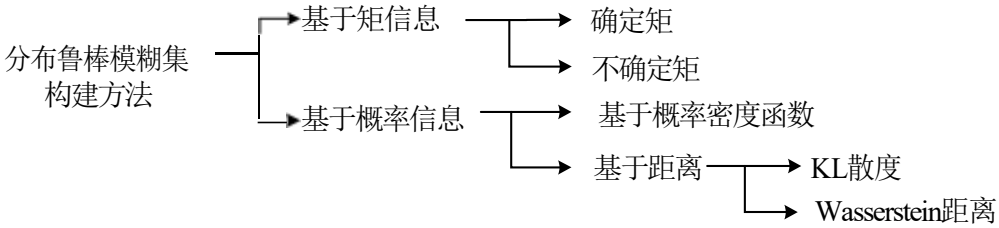


图 3-1 分布鲁棒模糊集构建方法分类

模糊集的建立方式会影响模型的转化形式和决策结果的保守性，基于分布函数的距离构建模糊集考虑了提前假设的概率分布与经验分布之间的偏差， 模型所得调度计划更符合实际运行情况， 但是该类模糊集构造复杂且转化、求解困难[69]。基于矩信息构建的模糊集无需了解随机变量的概率分布函数， 避免了因概率分布函数选取不当造成的偏差，但是该方法对历史数据的完整性和长期性要求较高，历史数据量不足将影响该方法所得决策结果的调度效果。

相比于上述两类方法， 基于概率密度函数构建的分布鲁棒模糊集不需要提前假设概率分布情况并计算与经验分布之间的偏差， 降低了模糊集构造难度， 同时，该方法具有更多的随机变量概率分布信息， 减少了对历史数据的要求， 模型准确度和计算效率都得到了满足。所以，本文采用非精确概率估计思想， 利用非精确狄利克雷模型(Imprecise Dirichlet Model, IDM)建立基于随机变量概率密度函数的分布鲁棒模糊集，进而构建本章分布鲁棒优化调度模型。

3.1.2.2 基于 IDM 的分布鲁棒优化模型

在经典概率论中， 通常以一个精确的数值表示随机事件发生的概率大小， 一般可用式(3-5)表示。在多次实验后， 随机事件 A 发生的频率趋近于一个常数， 该常数被认为是事件 A 发生的概率。然而根据大数定律， 只有实验次数足够多时，事件 A 发生的频率才能近似等于其发生的概率值， 所以， 在实际工程中， 用有限

的历史数据对事件发生的精确概率进行估计显然会引起结果误差。

$$P(A)=\frac{m}{n}=\frac{\text{事件A出现次数}}{\text{实验总次数}} \tag{3-5}$$

$$0<P(A)<1,\ P(\text{⑦})=0$$

基于上述分析， 本文引入非精确概率(Imprecise Probability, IP) 理论， 以覆盖精确概率值的概率区间替代精确概率值， 能够更合理地表示随机事件发生的概率，该理论可用式(3-6)表示，该方法与传统精确概率结果对比情况如图 3-2 所示。

$$P_{im}(A)=[\underline{P}(A),\overline{P}(A)]\subseteq[0,1] \tag{3-6}$$

式中： $P_{im}(A)$ 为概率区间， 表征事件 A 发生的非精确概率； $\underline{P}(A)$ 表示事件 A 发生的概率下限； $\overline{P}(A)$ 为事件 A 发生的概率上限。

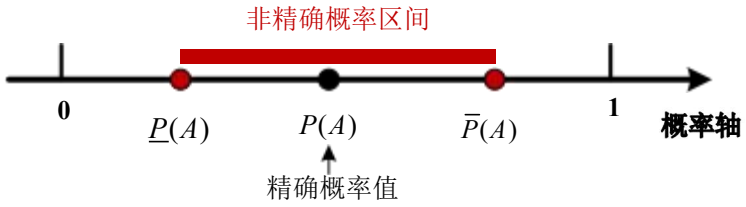


图 3-2 精确概率值与非精确概率区间示意图

该区间满足条件$0<\underline{P}(A)<\overline{P}(A)<1$，在有限数据条件下精确概率值无法获得，但该概率区间值仍然符合工程实际；在历史数据足够多时，概率区间不断缩小，理想情况缩小为精确概率，即$\underline{P}(A)=\overline{P}(A)=P(A)$，所以在有限的历史数据条件下，非精确概率估计方法被广泛应用于推导随机变量置信区间。

精确狄利克雷模型(Precise Dirichlet Model, PDM) 是服从多项式分布的随机变量缺乏先验信息或信息完全未知情况下， 以贝叶斯统计原理为基础的精确概率估计模型。该模型假设随机变量ξ可能发生的情况为n种($n>2$)，以ξ_i表示发生的第i种情况， 则变量的样本空间为$\Omega=\{\xi_1,\xi_2,\ \ldots\ ,\xi_n\}$，每种情况对应发生概率为$\theta_i$，概率满足$\theta_i>0$,且$\sum_{i=1}^{n}\theta_i=1$，认为变量出现概率$\theta=\{\theta_1,\theta_2,\ \ldots\ ,\theta_n\}$完全随机，其对应先验Dirichlet 概率密度函数为：

$$f(\theta)=\Gamma\left(\sum_{i=1}^{n}s\right)\left[\prod_{i=1}^{n}\Gamma\left(s\cdot r_i\right)\right]^{-1}\prod_{i=1}^{n}\theta_i^{s\cdot ri-1} \tag{3-7}$$

式中：$\Gamma(\ )$为Gamma 函数；s为超参数， 取值通常介于[1,2][70]；$r=\{r_1,r_2,\ \ \ ,r_n\}$，r_i为先验参数，表示θ_i的Dirichlet 先验概率均值，满足$r_i>0$,且$\sum_{i=1}^{n}r_i=1$。

在获取M 次历史数据样本的情况下，先验 Dirichlet 概率密度函数经过贝叶斯过程，转化为后验Dirichlet 概率密度函数：

$$f(\theta \mid M)=\Gamma\left(\sum_{i=1}^{n} s+M\right)\left[\prod_{i=1}^{n}\Gamma\left(s \cdot r_i+m_i\right)\right]^{-1}\prod_{i=1}^{n}\theta_i^{s \cdot ri+mi-1} \tag{3-8}$$

式中：$m=\{m_1,m_2,\ ,\cdots m_n\}$为历史样本，$m_i$ 为样本中ξ_i 出现的次数，满足$\sum_{i=1}^{n} m_i=M$。

根据后验Dirichlet 概率密度函数得到对应的后验分布期望如式(3-9)所示：

$$E(\theta|M)=\frac{m_i+r_i}{s+M} \tag{3-9}$$

由式(3-9)可以推导出变量出现ξ_i 情况的后验概率，但是由于式中r_i 为先验参数，该值设置不合理时会影响后续结果，导致概率估计结果失真。

为了改善 PDM 设置先验参数不当造成的概率失真问题，本文基于非精确概率估计思想构建 IDM，基于该模型获得包含随机变量所有可能概率分布情况的概率区间，PDM 及IDM 建模原理如图 3-3 所示：

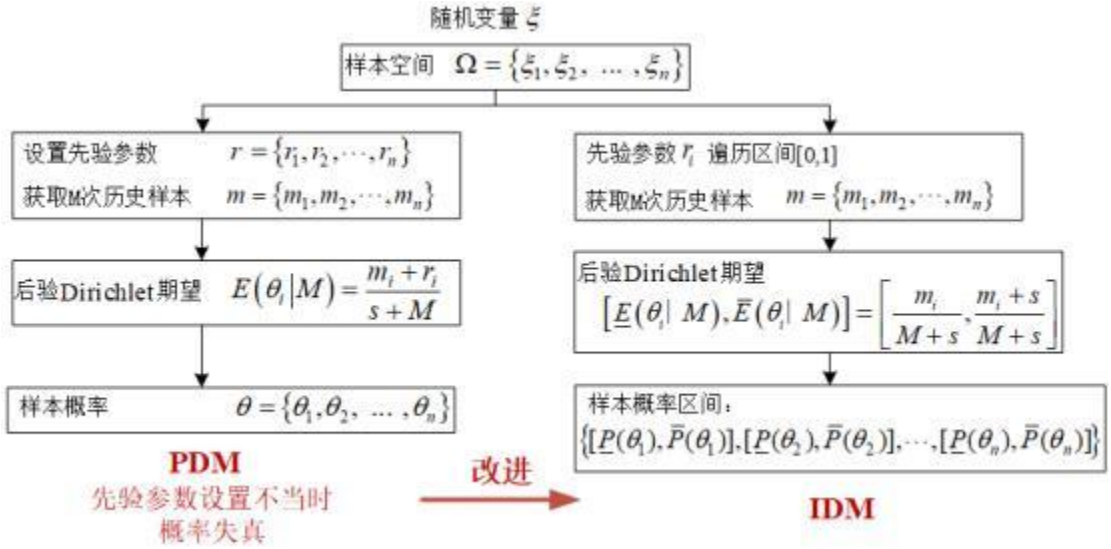


图 3-3 PDM、IDM 建模原理图

IDM 令先验参数r_i 遍历区间[0,1]内所有可能数值，获得包含所有可能的先验概率密度函数集合，该集合如式(3-10)所示：

$$\begin{cases} f(\theta)=\Gamma\left(\sum_{i=1}^{n} s\right)\left[\prod_{i=1}^{n}\Gamma\left(s \cdot r_i\right)\right]^{-1}\prod_{i=1}^{n}\theta_i^{s \cdot ri-1} \\ \forall r_i \in[0,1], \sum_{i=1}^{n} r_i=1 \end{cases} \tag{3-10}$$

与 PDM 同理，该先验概率密度函数集可经过贝叶斯过程转化为式(3-11)所示后验概率密度函数集：

$$\begin{cases} f(\theta \mid M) = \Gamma\left(s + \sum_{i=1}^{n} m_i\right) \left[\prod_{i=1}^{n} \Gamma\left(s \cdot r_i + m_i\right)\right]^{-1} \prod_{i=1}^{n} \theta_i^{s r_i + m_i - 1} \\ \forall r_i = [0,1], \sum_{i=1}^{n} r_i = 1 \end{cases} \tag{3-11}$$

在IDM 中， 利用上述后验概率密度函数集推导变量出现ξ_i状态的概率不再是精确概率值，而是随r_i遍历区间[0,1]变为如式(3-12)所示概率区间：

$$[\underline{P}(\theta_i), \overline{P}(\theta_i)] = \left[\underline{E}(\theta_i \mid M), \overline{E}(\theta_i \mid M)\right] = \left[\frac{m_i}{M+s}, \frac{m_i + s}{M+s}\right], i = 1,2,...,n \tag{3-12}$$

该概率区间包含随机变量所有可能的概率分布，区间大小$\frac{s}{(M+s)}$表征变量以ξ_i状态出现概率的不确定性，当历史数据样本数量M足够多时，该区间大小趋近于 0，即$M \to \infty$时，$\sup\left|\underline{P}(\theta_i) - \overline{P}(\theta_i)\right| \to 0$，概率区间宽度不断缩小无限逼近符合大数定律的精确概率值。

本文分别以风电、光伏以及综合负荷为随机变量， 无需提前假设变量概率分布情况， 根据 IDM 获得包含变量真实累积概率分布并反映各变量不确定性的累积概率区间。在统计学中， 通常以置信区间表征参数真实值有一定概率落在测量值周围的程度， 以此表示测量值的可信程度， 该概率定义为置信水平。根据这一定义， 本文考虑 IDM 所得累积概率区间的可信程度， 得到给定置信水平$1-C$条件下的置信累积概率区间$[\theta_{i*}, \theta_i^*]$。当置信水平为 95%时，该累积概率区间有 95%的可能包含了变量的真实累积概率分布，置信区间可由下式(3-13)获得[39, 71]：

$$\begin{cases} \theta_{i*} = 0,\ \theta_i^* = G^{-1}(1 - \frac{C}{2}), & m_i = 0 \\ \theta_{i*} = H^{-1}(\frac{C}{2}),\ \theta_i^* = G^{-1}(1 - \frac{C}{2}), & 0 < m_i < M \\ \theta_{i*} = H^{-1}(\frac{C}{2}),\ \theta_i^* = 1, & m_i = M \end{cases} \tag{3-13}$$

式中： θ_{i*}、θ_i^*分别为变量出现ξ_i状态的累积概率置信区间上、下限； G为均值为$\frac{m_i}{M+s}$的 Beta 分布$B(m_i, s + M - m_i)$的累积分布函数； H为均值为$\frac{m_i + s}{M+s}$的 Beta 分布$B(m_i + s, M - m_i)$的累积分布函数。

上述过程获得变量的置信累积概率区间， 对应的变量真实值估计范围$[\xi_l, \xi_u]$由文献[72]提出的Devroye-Wise 方法求解，进而建立本文所需分布鲁棒模糊集如

式(3-14)所示：

$$\mathcal{P}=\left\{P=\mathcal{P}_0\left(\left|\xi_l,\xi_u\right|\right)\ \middle|\ P[\xi<\xi_i]=[\theta_{i*},\theta_i^*],\ i=1,2,\ \ldots\ ,n\right\} \tag{3-14}$$

式中：$P_0\left(\left|\xi_l,\xi_u\right|\right)$ 表示真实值估计范围内所有可能的概率密度函数集合；$P[\xi<\xi_i]$ 为变量以小于等于 ξ_i 状态出现的累积概率，该概率需符合区间估计给定的置信水平，即包含于置信累积概率区间 $[\theta_{i*},\theta_i^*]$。

结合式(3-4)鲁棒优化模型及式(3-14)模糊集建立本文两阶段分布鲁棒优化模型如式(3-15)所示，模型利用模糊集对随机变量的概率分布情况进行描述， 考虑变量运行在“最恶劣概率分布情况”下的最优调度：

$$\begin{cases} \min\limits_{x}\left\{\sup\limits_{F(\xi)=\mathcal{P}}\ \min\limits_{y=\Omega(x,\tilde{\xi})} f(y,\tilde{\xi})\right\} \\ s.t.\ \ x=[x_1,x_2,\ldots,x_N] \\ \quad x_i=\{0,1\},\mathrm{i}=1,2,\ldots,\mathrm{N} \\ \quad \mathrm{g}_j(y,\xi)<0, j=1,2,\ldots,p \end{cases} \tag{3-15}$$

式中： 外层 $\min\limits_{x}\{\ \}$ 为模型的第一阶段问题， 决策变量 x 为系统内设备启停及与大电网的交互状态；内层 $\sup\limits_{F(\xi)=\mathcal{P}}\ \min\limits_{y=\Omega(x,\tilde{\xi})} f(y,\tilde{\xi})$ 表示随机变量在模糊集内“最恶劣概率分布情况”下，寻找使目标函数 $f(y,\tilde{\xi})$ 最小的可控机组出力计划 y ； $\Omega(x,\tilde{\xi})$ 表示 $(x,\tilde{\xi})$ 给定时,第二阶段决策变量 y 的可行域； $\mathrm{g}(y,\tilde{\xi})$ 为模型的约束条件。

3.2 场景化分析方法

一方面， 本文考虑综合能源系统中风力、光伏发电以及各类负荷需求的不确定性， 上述不确定性变量在实际工程中通常受天气、季节等影响， 在相似运行场景下变量的概率分布情况具有相似性。另一方面， 本文所提分布鲁棒优化调度方法基于随机变量的历史样本构造各变量的分布鲁棒模糊集，变量的历史样本数量 M 深刻影响模型的求解速度。 所以，本文考虑系统运行场景的相似性，基于场景分析方法完成原始场景聚类， 后续基于典型场景样本构建模糊集， 能够有效降低随机变量的样本维度，提高模型求解效率。

同时，由于分布鲁棒优化方法是基于“最恶劣分布情况”的优化调度模型，场景分析方法能够获得更符合调度场景真实运行情况的不确定变量数据样本，依此建立分布鲁棒模糊集，所得不确定性变量的运行区间更符合调度场景运行实际

情况。在相对乐观的调度场景下， 能够降低调度计划的保守性， 保证系统经济运行；相对恶劣的调度场景下， 可以获得更符合实际运行情况的运行区间， 提高调度计划的鲁棒性， 保证系统安全稳定运行。

3.2.1 K-means 聚类方法

场景分析过程中聚类方法被广泛应用， 该方法可以将没有规律的样本基于划分、层次或模型的思路， 以聚类后的各簇与同类样本距离最小， 与其他类样本距离大为目标， 实现相似样本的聚类。 K-means 聚类方法基于划分聚类思想， 按最小化平方和误差(Sum of Squared Errors, SSE) 原则对原始场景进行聚类[73]，该方法算法简单，收敛速度快，广泛应用于电力系统场景分析过程[74, 75]。

K-means 聚类的本质是基于欧式距离的数据划分算法， 在最小化误差函数的基础上对数据类别进行划分。本文假设历史数据样本包含M 天风力、光伏发电以及电、冷负荷需求功率历史数据， 根据时序分布特征按日进行场景聚类， 即原始场景为M 个，采用K-means 聚类方法分别对各变量完成场景聚类，能够将原始场景根据其时序特征分为K (K<M) 类场景，其基本步骤为：

(1)从各随机变量的原始样本中选择$q(q < K)$ 个样本作为初始聚类中心；

(2)计算各变量每个原始样本到聚类中心的距离，并将原始样本划分至距离最小的聚类中心对应的类别；

(3)再次计算每个类别的聚类中心；

(4)重复步骤(2) 、(3)，直至 SSE 达到迭代中止要求。

(5)组合各变量原始样本的类别划分情况，将原始场景划分为K 类。

所有K 类场景组成本文不确定性联合场景集合，后续需要依据集合中调度场景所属类别的典型场景数据建立分布鲁棒优化调度模型。

场景化分析基于K-means 聚类方法， 根据历史数据样本对相似的可再生能源出力及负荷需求场景进行聚类， 再依据日前预测数据与各典型场景中随机变量的欧式距离，判断调度场景类别， 在该类别典型场景下建立分布鲁棒优化调度模型。引入该方法不再需要基于所有历史场景求解非精确概率估计区间， 能够有效降低数据样本维度， 提高模型求解速度。 同时， 避免了考虑所有历史场景导致随机变量的概率分布情况与调度场景实际分布情况不符，进而造成分布鲁棒优化调度结果鲁棒性不足或保守性过强的问题。

3.3 多元随机变量相关性分解方法

分布鲁棒优化方法需要根据综合能源系统不确定性变量以最恶劣概率分布情况运行时的数据完成模型构建。当我们认为不确定性变量相互独立时， 该“最恶劣情况”可以视为各独立变量的线性叠加， 然而， 由于相邻地区的风、光出力以及气象条件敏感负荷（如冷、热负荷需求） 处于相似气象条件， 各变量之间存在相关性[76]，简单地将各变量的“最恶劣情况”进行线性叠加显然不符合实际情况。例如：综合能源系统中冷、热负荷需求最大的情况通常不会出现在同一时刻，不考虑变量相关性时， 我们默认冷、热负荷相互独立， 认为各变量“最恶劣情况”同时出现，以此建立分布鲁棒优化模型， 该模型所得结果能够满足系统稳定运行要求，但是其保守性太强，系统运行经济性较差。

所以，本文考虑风电、光伏出力和各类负荷需求之间的相关性， 基于 Cholesky 分解方法对上述多元随机变量之间的相关性进行分解， 消除多元变量之间的相关性后获得相互独立的变量样本[77-79]。基于该样本建立分布鲁棒优化模型能够提高决策经济性，所得调度计划更符合工程实际。

3.3.1 多元随机变量相关性矩阵

对综合能源系统完成数据采集工作后， 以系统内风力、光伏设备出力和综合负荷需求历史数据组成系统随机变量样本矩阵， 考虑M 类变量之间的相关性，每一个变量记录N 次历史数据，则样本矩阵为式(3-16)所示的M 根N 阶矩阵X：

$$X=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ & & & \\ P_{M1} & P_{M2} & \cdots & P_{MN} \end{bmatrix} \tag{3-16}$$

式中： P_{ij} 表示第i 个变量的第j 次采样值。

应用矩阵相关系数矩阵定量分析多元随机变量之间的相关性， 则上述随机变量之间的行相关系数矩阵如式(3-17)所示：

$$C_X=\begin{bmatrix} 1 & P_{12} & \cdots & P_{1M} \\ P_{21} & 1 & \cdots & P_{2M} \\ & & & \\ P_{M1} & P_{M2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{3-17}$$

式中： P_{ij} 为相关性系数，表征变量i 与变量j 之间的线性相关程度，满足等式

$\rho_{ij} = \rho_{ji}$，该系数可由式(3-18)求解：

$$\rho_{ij} = \frac{Cov(P_i, P_j)}{\sigma_i \sigma_j} = \frac{Cov(P_j, P_i)}{\sigma_j \sigma_i} = \rho_{ji} \tag{3-18}$$

式中：$Cov(P_i, P_j)$ 为变量i 与变量j 的协方差；σ_i、σ_j 分别为变量i、变量j 的标准差。

3.3.2 Cholesky 分解方法

由于相关性矩阵 C_X 为正定矩阵，则可以根据式(3-19)对其进行Cholesky 分解获得非奇异下三角矩阵D，矩阵中元素可根据式(3-20)求解：

$$C_X = DD^T \tag{3-19}$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 & 0 \\ & & & \\ d_{M1} & d_{M2} & \cdots & d_{MM} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} d_{kk} = \left(\rho_{kk} - \sum_{m=1}^{k-1} d_{km}^{\ 2}\right)^{1/2}, k = 1, 2, \cdots M \\ d_{ik} = \dfrac{\rho_{ik} - \sum_{m=1}^{k-1} d_{im} d_{km}}{d_{kk}}, i = k+1, k+2, \cdots M \end{cases} \tag{3-20}$$

由于式(3-17)中相关性矩阵为对称矩阵， 则正交矩阵B 可根据式(3-21)将具有相关性的多元随机变量样本矩阵X 转换为多元随机变量相互独立的样本矩阵Y：

$$Y = BX \tag{3-21}$$

由于多元随机变量之间相互独立， 所以样本矩阵 Y 的相关性矩阵C_Y 为单位阵， 其与原始样本矩阵X 的相关性矩阵C_X 间关系如式(3-22)所示：

$$C_Y = \rho(Y, Y^T) = \rho(BX, X^T B^T) = B\rho(X, X^T)B^T = BC_X B^T = I \tag{3-22}$$

结合式(3-19)、式(3-22)可得：

$$C_Y = BC_X B^T = BDD^T B^T = (BD)(BD)^T = I \tag{3-23}$$

当$B = D^{-1}$ 时， 式(3-23)成立，即多元随机变量之间具有相关性时， 可以通过式(3-24)，实现变量相关性分解，获得变量相互独立的样本矩阵Y：

$$Y = D^{-1}X \tag{3-24}$$

该矩阵样本满足多元变量之间相互独立的条件， 基于该样本对本文综合能源系统中各变量的“最恶劣情况”进行线性叠加， 构建的分布鲁棒优化调度模型更具有实际意义。

3.4 考虑多元随机变量相关性的多场景综合能源系统分布鲁棒优化调度模型

综合能源系统由于天气、季节等原因， 随机变量在相似运行场景下具有相似的概率分布情况，同时，具有随机性、波动性特征的风电、光伏及综合负荷需求之间存在相关性。基于系统所有原始场景进行优化调度研究时， 模型求解效率较低， 同时， 针对具有相关性的多元随机变量， 基于简单的线性叠加结果进行分布鲁棒优化调度决策，所得调度计划的经济性和准确度受到影响。所以本章考虑综合能源系统运行场景相似性和多元随机变量相关性特征，进行场景聚类和变量相关性分解并根据日前预测数据判断调度场景类别，建立本章分布鲁棒优化调度模型， 实现考虑多元随机变量相关性的多场景综合能源分布鲁棒优化调度。

3.4.1 目标函数

本章基于综合能源系统不确定性变量的日前预测数据和历史运行数据， 建立分布鲁棒优化调度模型，所得调度计划能够满足系统在不确定性因素最恶劣概率分布情况条件下的经济可靠运行。该模型利用系统能源梯级利用、多能耦合特性，以系统综合成本最小为目标， 在日前阶段制定系统可控机组的最优出力计划。

系统综合成本主要包括系统各设备的运维成本、燃料成本以及与大电网的交互成本，则该模型目标函数如式(3-25)所示：

$$\min C = C_{om} + C_{gas} + C_{grid} \tag{3-25}$$

式中：系统设备运维成本C_{om}、燃料成本C_{gas}和电网交互成本C_{grid}分别如式(3-26)、式(3-30)、式(3-31)所示：

(1) 系统设备运维成本C_{om}：

$$C_{om} = C_{om}^{cd} + C_{om}^{re} + C_{om}^{es} \tag{3-26}$$

式中： C_{om}^{cd}、C_{om}^{re}、C_{om}^{es}分别为系统中耦合型设备、 风力、光伏发电设备以及储能设备的运维成本，各成本的组成分别如式(3-27)、式(3-28)、式(3-29)所示：

$$C_{om}^{cd} = \sum_{t=1}^{T}\Big[C_{om}^{GT}P_{GT,t} + C_{om}^{WHB}Q_{WHB,t} + C_{om}^{GB}Q_{GB,t} + C_{om}^{AC}P_{AC,t} + C_{om}^{EB}P_{EB,t} + C_{om}^{EC}P_{EC,t}\Big]\Delta t \tag{3-27}$$

式中： C_{om}^{GT}、C_{om}^{WHB}、C_{om}^{GB}、C_{om}^{AC}、C_{om}^{EB}、C_{om}^{EC}分别表征燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉、吸收式制冷机、电锅炉以及电制冷机的单位运维成本。

$$C_{om}^{re} = \sum_{t=1}^{T}[C_{om}^{WT}P_{wt,t} + C_{om}^{PV}P_{pv,t}]\Delta t \tag{3-28}$$

式中： C_{om}^{WT} 、C_{om}^{PV}分别为风机和光伏发电设备的单位运维成本。

$$\begin{aligned} C_{om}^{es} = \sum_{t=1}^{T}[&C_{om,\mathrm{BESS}}^{char}P_{\mathrm{BESS},t}^{char}U_{\mathrm{BESS},t} + C_{om,\mathrm{BESS}}^{dis}P_{\mathrm{BESS},t}^{dis}U_{\mathrm{BESS},t} + C_{om,\mathrm{HST}}^{char}P_{\mathrm{HST},t}^{char}U_{\mathrm{HST},t} \\ &+C_{om,\mathrm{HST}}^{dis}P_{\mathrm{HST},t}^{dis}U_{\mathrm{HST},t} + C_{om,\mathrm{CST}}^{char}P_{\mathrm{CST},t}^{char}U_{\mathrm{CST},t} + C_{om,\mathrm{CST}}^{dis}P_{\mathrm{CST},t}^{dis}U_{\mathrm{CST},t}]\Delta t \end{aligned} \tag{3-29}$$

式中： $C_{om,m}^{char}$、$C_{om,m}^{dis}$ 分别为储能设备的充、放能单位运维成本， 下标 m 表示能量类型， BESS 表示蓄电池， HST 表示储热罐， CST 表示蓄冷罐；$U_{*,t}$ 为t 时刻综合能源系统中各类储能设备充、放电状态变量。

(2) 燃料成本C_{gas}：

本文综合能源系统中， 燃气轮机和燃气锅炉需要消耗天然气完成供电、供热需求，燃料成本根据式(3-30)计算：

$$C_{gas} = \sum_{t=1}^{T}(V_{GT,t} + V_{GB,t})\, c_{gas,t} \tag{3-30}$$

式中： $V_{GT,t}$ 、$V_{GB,t}$ 分别为t 时刻燃气轮机和燃气锅炉耗气量； $c_{gas,t}$ 为t 时刻单位天然气价格。

(3) 电网交互成本C_{grid}：

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^{T}(c_{buy,t}P_{buy,t}U_{grid,t} - c_{sell,t}P_{sell,t}U_{grid,t})\Delta t \tag{3-31}$$

式中： $c_{buy,t}$ 、$c_{sell,t}$ 分别为t 时刻向大电网购、售电电价； $P_{buy,t}$、$P_{sell,t}$ 分别为t 时刻向大电网购、售电功率。$U_{grid,t}$ 为t 时刻综合能源系统向大电网购、售电的状态。

3.4.2 约束条件

本文综合能源系统需要满足的约束条件可以分为能量供需平衡约束和系统运行约束。

3.4.2.1 能量供需平衡约束

本文综合能源系统考虑电力网、热能子网以及冷能子网，电力网络由风、光发电机组、燃气轮机机组发电， 计及与大电网交互及蓄电池充、放电能力满足系统电负荷、电锅炉及电制冷机耗电需求， 实现电力网络功率平衡； 热能子网由余热锅炉、燃气锅炉及电锅炉提供热量， 考虑储热罐充、放热能， 共同满足系统热负荷以及吸收式制冷机供热需求， 实现热能子网能量平衡； 冷能子网由吸收式制

冷机及电制冷机配合蓄冷罐满足冷负荷需求， 实现冷能子网能量平衡。各能量网络供需平衡约束如式(3-32)~式(3-34)所示：

(1)电功率平衡约束：

$$P_{wt,t}^{out} + P_{pv,t}^{out} + P_{GT,t} + P_{BESS,t}^{dis} - P_{BESS,t}^{char} + P_{buy,t} - P_{sell,t} = P_{EC,t} + P_{EB,t} + P_{Le,t} \tag{3-32}$$

式中：$P_{wt,t}^{out}$、$P_{pv,t}^{out}$ 分别为t 时刻风机、光伏发电功率； $P_{Le,t}$为t 时刻电负荷需求功率；$\sim$ 表征该数据存在不确定性，其功率波动范围由对应分布鲁棒模糊集确定。

(2)热能供需平衡约束：

$$Q_{WHB,t} + Q_{GB,t} + Q_{EB,t} + m(P_{HST,t}^{dis} - P_{HST,t}^{char}) = Q_{AC,t} + \tilde{Q}_{Lh,t} \tag{3-33}$$

式中： $\tilde{Q}_{Lh,t}$ 表示t 时刻热能供应需求量。

(3)冷能供需平衡约束：

$$Q_{CAC,t} + Q_{EC,t} + m(P_{CST,t}^{dis} - P_{CST,t}^{char}) = Q_{Lc,t} \tag{3-34}$$

式中： $\tilde{Q}_{Lc,t}$ 表示t 时刻冷能供应需求量。

3.4.2.2 系统运行约束

综合能源系统稳定运行时， 各机组出力和储能设备充、放电过程都需要满足设备自身稳定运行要求， 同时， 与大电网进行功率交互时线路传输功率受传输线类型限制， 故系统运行还需考虑电网交互功率约束。因此， 本文将系统运行约束分为耦合型设备运行约束、储能设备运行约束以及电网交互功率约束：

(1) 耦合型设备运行约束

$$P_{GT}^{min} < P_{GT,t} < P_{GT}^{max} \tag{3-35}$$

$$-P_{GTp}^{min}\Delta t < P_{GT,t} - P_{GT,t-1} < P_{GTp}^{max}\Delta t \tag{3-36}$$

式中： P_{GmTin}、P_{GmTax} 为燃气轮机出力上、下限； P_{GTp}^{max}、P_{GTp}^{min}为$t-1$ 时刻至t 时刻，燃气轮机爬坡功率上、下限。

$$Q_{GB}^{min} < Q_{GB,t} < Q_{GB}^{max} \tag{3-37}$$

式中： Q_{GB}^{min}、Q_{GB}^{max} 为燃气锅炉供热能量上、下限。

$$P_{AC}^{min} < P_{AC,t} < P_{AC}^{max} \tag{3-38}$$

式中： P_{AmCin}、P_{AmCax} 为吸收式制冷机消耗热量的上、下限。

$$Q_{EB}^{min} < Q_{EB,t} < Q_{EB}^{max} \tag{3-39}$$

式中： Q_{EB}^{min}、Q_{EB}^{max} 为电锅炉供热能量上、下限。

$$P_{EC}^{min} < P_{EC,t} < P_{EC}^{max} \tag{3-40}$$

式中： P_{EC}^{min}、P_{EC}^{max} 为电制冷机耗电功率上、下限。

(2)储能设备运行约束

储能设备的储能量需满足式(2-4)约束，且设备充、放能量均需满足限值要求。此外， 本文限制储能设备充、放能不可同时进行，且在调度周期初始时刻和结束时刻的储能设备能量存储量相等：

$$0 < P_{mt}^{char} < U_{m,t} P_{m\,char}^{max} \tag{3-41}$$

$$0 < P_{m,t}^{dis} < (1-U_{m,t}) P_{m\,dis}^{max} \tag{3-42}$$

$$S_m^{min} < S_{m,t} < S_m^{max} \tag{3-43}$$

$$S_{m,0} = S_{m,T} \tag{3-44}$$

式中： $P_{m\,char}^{max}$、$P_{m\,dis}^{max}$ 分别为m类储能设备的能量充、放功率上限；$U_{m,t}$ 表示t 时刻m类储能设备的充、放能状态，该值取 1 时表示储能、取 0 表示放能；S_m^{min}、S_m^{max} 为储能设备的容量上、下限； T为调度周期。

(3)电网交互功率约束

本文认为电力网络与大电网进行功率交互时， 满足传输线功率限制约束， 且电力系统购电和售电过程不能同时进行：

$$0 < P_{buy,t} < U_{grid,t} P_{grid}^{max} \tag{3-45}$$

$$0 < P_{sell,t} < (1-U_{grid,t}) P_{grid}^{max} \tag{3-46}$$

式中： $U_{grid,t}$ 为t 时刻电力网络向大电网购、售电的状态， 取值为 1 时表示向大电网购电，取值为 0 时售电；P_{grid}^{max}为满足传输线功率限制的大电网交互功率上限值。

3.4.3 模型转换与求解

结合本文综合能源系统中各设备的数学模型以及本章模型目标函数以及约束条件，即可按照上文所述方法，建立本章基于 IDM 的考虑多元随机变量相关性的多场景综合能源系统分布鲁棒优化调度模型。该模型在第一阶段进行储能设备以及与大电网交互状态的设置， 第二阶段基于第一阶段结果， 在考虑风、光发电以及综合负荷需求不确定性的条件下，优化各可控机组出力计划，将式(2-4)~式(2-12)所示各设备模型、式(3-32)~式(3-46)所示模型约束条件和本文模型目标函数改写为矩阵形式，则式(3-15)分布鲁棒优化模型可表示为下式(3-47)：

$$\begin{cases} \min\limits_{x} \left\{ \sup\limits_{F(\xi)\in P} \min\limits_{y\in\Omega(x,\xi)} (Cy + C_{om}^{re}\tilde{\xi}) \right\} \\ s.t. \quad Dy > d \quad \rightarrow Y \\ \quad\quad Ky = 0 \quad \rightarrow \lambda \\ \quad\quad Fx + Gy > h \quad \rightarrow v \\ \quad\quad I_n y + R\tilde{\xi} = 0 \quad \rightarrow \pi \end{cases} \tag{3-47}$$

式中： x 、y 分别为本文模型的第一阶段决策变量和第二阶段决策变量， 其具体表达式如式(3-48)、式(3-49)所示； $\tilde{\xi}$ 为系统不确定性变量也是模型第二阶段决策变量；C 、C_{om}^{re} 分别为目标函数中的系数矩阵； K 、I_n 、R 为等式约束系数矩阵；D 、F 、G 为不等式约束的系数矩阵； d 、h 为约束的常数列向量。

$$x = [U_{BESS}, U_{HST}, U_{CST}, U_{grid}]^T \tag{3-48}$$

式中： $U_{\cdot}$ 为调度周期内综合能源系统中各类储能设备充、放电状态和系统向大电网购、售电状态的二进制数值行向量。

$$\begin{aligned} y = [&P_{GT}, Q_{GB}, Q_{AC}, Q_{EB}, Q_{EC}, P_{Bc}^{har}{}_{ESS}, P_{BdEi}^{s}{}_{SS}, \\ &P_{H\,ST}^{char}, P_{HS}^{di}{}_{ST}, P_{CcSh}^{ar}{}_{T}, P_{Cd}^{ls}{}_{ST}, P_{buy,t}, P_{s\,ell,t}]^T \end{aligned} \tag{3-49}$$

针对模型中的不确定性变量， 本文利用文献[39]中转换方法， 将式(3-47)中的分布鲁棒模糊集约束$F(\tilde{\xi})\in P$ 转化为等价经典鲁棒不确定集约束$\tilde{\xi}\in$工，转换过程如图 3-4 所示，转换后的经典鲁棒不确定集如式(3-50)所示。

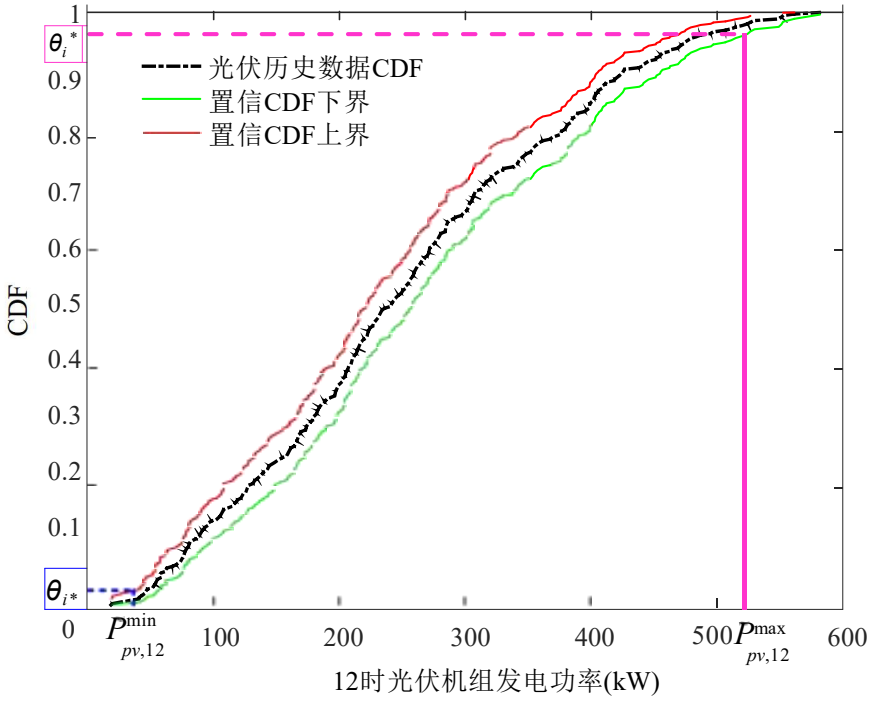


图 3-4 模糊集转换方法

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/186030221201010112