

## 摘要

随着气电两用设备和蓄电池在家庭中的广泛引入,天然气和电力的耦合程度加深,家庭综合能源系统具备更大的优化空间。但是家庭综合需求响应中可再生能源出力、环境温度、用户需求等各种不确定性因素,给家庭综合能源系统的储能优化配置和运行带来挑战。为了提高家庭综合能源系统运行的经济性和低碳性,本文对家庭综合能源系统的储能容量配置、运行优化展开研究,主要研究内容如下:

第一,提出了基于区间优化的家庭综合能源系统配置与运行框架。论述家庭综合需求响应的概念、原理和资源,对家庭综合需求响应中能源之间的互济原理加以分析。探究不确定性对综合需求响应的影响,并且采用区间优化方法求解不确定性问题,构建了考虑蓄电池的家庭综合能源系统配置与运行框架。

第二,在光伏出力和用户需求不确定性的背景下,通过区间优化方法对家庭综合能源系统的储能设备进行容量的优化配置。优化目标为年运行成本和投资成本之和,决策变量为蓄电池的容量和气电两用设备总能耗中的耗电与耗气比例。对家庭综合能源系统的蓄电池容量进行优化配置,得到最优蓄电池容量以及气电两用设备总能耗中的用电比例。以本文所提供的实验参数进行仿真分析,结果表明,在蓄电池容量为 12kWh 时,家庭年运行成本和投资成本之和最低,家庭用户经济效益最高。

第三,对已经配置好蓄电池容量的家庭综合能源系统进行优化调度,控制负荷的开关状态和使用的能源种类。使用区间优化方法应对系统中可再生能源出力、环境温度、用户需求等不确定性变量,通过区间序关系和区间可能度将不确定性模型转换为确定性模型。同时,考虑用户的容忍度,进一步挖掘综合需求响应的潜力。最终,使用遗传算法来求解确定性模型。仿真结果验证了所提出的区间优化方法能有效应对系统的不确定性,在满足用户需求的基础上,相比采用确定性优化方法的家庭综合能源系统,节省能源费用 14.7%;在采取区间优化方法的情况下,含蓄电池的家庭综合能源系统相比无蓄电池的家庭综合能源系统可节省能源费用 9%。

**关键词:** 家庭综合需求响应; 蓄电池; 区间优化; 不确定性

## Abstract

With the widespread introduction of gas-electricity equipment and batteries in households, the coupling degree of natural gas and electricity is deepened, and the household integrated energy system has more space for optimization. However, various uncertain factors such as renewable energy output, ambient temperature, and user demand in the household integrated demand response bring challenges to the optimal allocation and operation of the household integrated energy system. In order to improve the economy and low-carbon operation of the household integrated energy system, this paper mainly studies the energy storage capacity allocation and operation optimization of the household integrated energy system.

Firstly, the allocation and operation framework of household integrated energy system based on interval optimization are proposed. This paper discusses the concepts, principles, and resources of household integrated demand response, and analyzes the principle of mutual aid between energy resources in household integrated demand response. The influence of uncertainty on integrated demand response was explored, and the interval optimization method was used to solve the uncertainty problem, and the framework of the allocation and operation of the household integrated energy system considering batteries was constructed.

Secondly, under the background of photovoltaic output and user demand uncertainty, the interval optimization method is used to optimize the capacity allocation of energy storage equipment in the household integrated energy system. The optimization objective is the sum of annual operating cost and investment cost, and the decision variables are the capacity of battery and the ratio of power and gas consumption in the total energy consumption of gas-electricity equipment. Optimize the battery capacity of the household integrated energy system to obtain the optimal battery capacity and the proportion of power consumption in the total energy consumption of the gas-electricity equipment. The simulation results show that when the battery capacity is 12kWh, the sum of annual operating cost and investment cost of household is the lowest, and the economic benefit of household users is the highest.

Thirdly, optimize the household integrated energy system that has been configured with battery capacity to control the switching state of load and the type of energy used. Interval optimization method is used to deal with the uncertain variables such as

renewable energy output, ambient temperature, and user demand in the system, and the uncertain model is transformed into a deterministic model through interval order relation and interval possibility degree. At the same time, the potential for integrated demand response is further explored by considering the tolerance users. Finally, genetic algorithm is used to solve the deterministic model. The simulation results verify that the proposed interval optimization method can effectively deal with the uncertainty of the system, and on the basis of satisfying the needs of users, the energy cost can be saved by 14.7% compared with the household energy system using the deterministic optimization method. Under the condition of interval optimization, the energy cost of the household integrated energy system with batteries can be reduced by 9% compared with the household integrated energy system without batteries.

**Keywords: Household integrated demand response; Battery; Interval optimization; Uncertainty**

# 目录

摘要.....	I
<b>Abstract .....</b>	<b>II</b>
<b>第 1 章 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 课题背景和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 家庭综合能源系统的研究现状 .....	2
1.2.2 家庭综合需求响应的研究现状 .....	4
1.2.3 应对家庭综合需求响应中不确定性问题的研究现状.....	5
1.2.4 容忍度的研究现状 .....	6
1.2.5 蓄电池容量配置的研究现状 .....	6
1.3 论文的选题依据与研究内容 .....	7
1.3.1 本文选题依据 .....	7
1.3.2 本文研究内容 .....	8
1.3.3 本文特色与创新 .....	9
<b>第 2 章 考虑蓄电池的家庭综合需求响应机理与框架.....</b>	<b>11</b>
2.1 综合需求响应的概念和原理 .....	11
2.2 家庭综合能源系统的综合需求响应资源及其互济原理 .....	11
2.2.1 家庭综合能源系统的综合需求响应资源 .....	11
2.2.2 家庭综合能源系统的互济原理 .....	12
2.3 区间优化问题的一般表现形式 .....	14
2.4 不确定性对家庭综合需求响应优化的影响及其处理方法 .....	15
2.5 蓄电池容量配置对综合需求响应的影响 .....	16
2.6 考虑蓄电池的家庭综合需求响应区间优化框架 .....	17
2.7 本章小结 .....	18
<b>第 3 章 基于区间优化的家庭综合能源系统蓄电池容量配置.....</b>	<b>19</b>
3.1 引言 .....	19
3.2 基于区间优化的家庭综合能源系统蓄电池容量配置优化模型 .....	20
3.2.1 目标函数 .....	21
3.2.2 约束条件 .....	22
3.3 区间优化模型的确定性转换 .....	24
3.3.1 区间序关系简介 .....	24
3.3.2 目标函数与约束条件的转换 .....	26
3.4 模型求解 .....	26
3.5 算例分析 .....	27
3.5.1 基本参数设置 .....	27
3.5.2 优化结果分析 .....	28
3.5.3 区间优化方法的有效性 .....	30

3.6 本章小结 .....	32
第 4 章 基于区间优化的家庭综合能源系统经济调度策略.....	33
4.1 引言 .....	33
4.2 家庭综合能源系统区间优化模型的构建 .....	34
4.2.1 目标函数 .....	34
4.2.2 蓄电池的运行约束 .....	35
4.2.3 热水器的运行约束 .....	36
4.2.4 空调的运行约束 .....	37
4.2.5 洗衣机的运行约束 .....	37
4.2.6 厨具的运行约束 .....	38
4.3 模型求解 .....	38
4.4 算例分析 .....	40
4.4.1 基本参数设置 .....	40
4.4.2 算例说明 .....	42
4.4.3 结果分析 .....	43
4.5 本章小结 .....	48
第 5 章 总结与展望.....	49
5.1 总结 .....	49
5.2 展望 .....	50
参考文献.....	51
致谢.....	57
攻读硕士学位期间取得的科研成果与参与的科研项目.....	58

# 第 1 章 绪论

## 1.1 课题背景和意义

在发展中国家和发达国家中，家庭能源消耗占社会能源消耗的 20%到 30%<sup>[1]</sup>，如何降低家庭能耗成为能源领域的一个重点研究方向。家庭用户主要使用电能和天然气，在传统的家庭能源系统中，这两种能源在家庭中分立优化，不利于提高能源的综合利用率<sup>[2]</sup>。而电力电子技术和信息管理技术的蓬勃发展，给广大家庭用户创造了替代用能、多能互补的条件与机会。因此，家庭用户可使用内部集成的能源转换设备和储能设备，充分利用安装在本地的光伏能源、风电能源以及接入的天然气能源。将电能、可再生能源以及天然气等能源利用设备与控制系统连接起来，这一类系统被叫做家庭综合能源系统<sup>[3]</sup>。家庭综合能源系统中包含天然气、电力两类异质能源，天然气和电力这两类能源可以通过气电两用设备灵活切换<sup>[4]</sup>。目前，在市场上流行的主要气电两用设备，包括热水器和厨具，这一类设备为家庭综合需求响应优化提供了有利的研究基础。通过对家庭负荷调度研究发现，目前大部分家庭都是专注于单一电能的需求响应<sup>[5]</sup>，传统的电力需求响应采用的方式主要为负荷削减和负荷转移。综合需求响应在对负荷进行转移或削减的基础上，还可以改变用能类型，在满足家庭用户舒适度的前提下，可以更好的节省家庭能源费用，减少环境污染排放。

不确定性是家庭综合能源系统的重要特征，对家庭综合能源系统参与综合需求响应提出了挑战。不确定性的来源主要分为以下几种：第一种为可再生能源出力，可再生能源出力受自然气候、地形因素的影响，存在很大的不确定性。第二种为自然环境因素，如环境温度、自然水温。自然环境因素本身不确定性较大，预测造成的误差和客观环境更加增强了该类因素的波动性。第三种为用户需求，用户的消费行为主观性强，且居家人数的不同也会带来差异。这些固有的不确定性，对系统的可靠经济运行造成负面影响。储能设备不仅可从需求侧的资源配置入手给家庭综合能源系统的不确定性提供一种解决方案，还能显著提升家庭用户参与综合需求响应的积极性。考虑不确定性的情况下，深入研究家庭综合能源系统的储能容量优化配置和运行策略，对于提升系统经济性和可靠性有着关键意义。

应对不确定性优化问题有以下几种常用的方法：随机优化方法、鲁棒优化方法和区间优化方法。随机优化是从海量的历史数据中提取出不确定性的特征，以获得精准的概率分布函数<sup>[6]</sup>。由于众多家庭用户的需求和周围的环境变化不尽相同，获取可靠的概率分布函数是十分不容易的，随机优化方法的应用比较困难。

鲁棒优化往往考虑的是最劣场景下的储能容量规划与调度策略，其优化结果通常较为保守<sup>[7]</sup>。相对于随机优化，区间优化<sup>[8]</sup>只要求获取不确定性参数的上下界，而且优化结果具有较好的鲁棒性，在应对不确定性优化问题方面有良好的表现力。因此，本文采取区间优化方法对家庭综合能源系统的储能规划与负荷优化调度展开深入研究。

容忍度能用来评价家庭用户对用能设备运行状态违背舒适度约束的态度，也可以被称为满意度<sup>[9]</sup>。现阶段的一些学者将容忍度与区间优化方法结合，来挖掘家庭综合能源系统优化调度的潜力。影响身体舒适度的原因有许多，比如环境温度、空气湿度、个人的体质强度、衣物穿着厚度。其中最主要的因素是温度，包括室内温度和热水温度。人体对温度的感受具有一定的模糊性，因此，并不需要严格维持温度在某一特定值，让温度保持在一个让人体舒适的范围即可<sup>[10]</sup>。偶尔短时间的突破这个范围，家庭用户也是可以接受的。设置容忍度可以提升家庭负荷调度的优化空间，同时可能取得一定的经济效益，家庭用户可以根据容忍度值的大小来权衡经济成本和舒适度。在中国，供暖和加热是家庭能源消费的最大部分，占总能源消耗百分之五十以上。在欧洲和美国，供暖和加热分别占住宅建筑能源消耗的百分之八十和百分之六十左右<sup>[11]</sup>。从中可以看出，与温度相关的容忍度研究在家庭综合能源系统的节能方面具有很大的潜力。

综上所述，多种不确定性因素影响家庭综合能源系统的储能设备容量规划和负荷优化调度。所以本文重点研究的内容为：在满足家庭居民需求和维持系统稳定运行的基础上，探索家庭综合能源系统的储能设备容量规划与负荷优化调度，并在负荷优化调度中，进一步结合容忍度，挖掘综合需求响应的潜力。

## 1.2 国内外研究现状

国内外的专家们越来越关注对现有能源利用方式的改进，主要是大力推动多种能源的综合利用，提高总能源中可再生能源的占比。随着能源转换设备、储能设备在智能家居的市场上逐渐推广，需求侧通过这类设备综合利用电力和天然气能源。因此，家庭综合能源系统的储能规划与负荷调度是能源领域的一个重点研究方向，在家庭综合能源系统的储能规划与负荷优化调度的过程中，充分考虑系统的各类不确定性因素、综合需求响应、用户容忍度，可以为实际工程中的智慧家庭能源体系建设提供参考价值。

### 1.2.1 家庭综合能源系统的研究现状

国内外的研究机构对家庭能源系统的储能规划与优化调度取得了一系列的

相关科研成果。通常，家庭能源系统进行储能规划和优化调度时，会使用如下四种资源：1) 从公用电网购买的市电；2) 安装在家庭本地的光伏发电系统和风力发电系统；3) 家庭用户购买的储能设备，比如蓄电池、电动汽车等；4) 可调度设备<sup>[12]</sup>。大部分的学者会将第一种和第四种资源纳入其研究对象中，部分学者也会考虑第二种和第三种资源。在优化调度层面，家庭可调度设备的调节原则主要依据能源市场价格和用户行为，来调节设备的使用时间段、开关状态与功率大小。文献[13]提出了一种基于需求响应的家庭能源管理策略，该策略调度电器运行，将在用电高峰时段运行的可平移负荷转移到非高峰时段运行，从而使用电高峰需求最小化，保证电力负荷曲线平稳和降低日常能耗。文献[14]调节家庭中四种可控高能耗设备（供暖设备、空调、电热水器、电动汽车）的运行时间和功率，协同光伏发电系统和储能设备来降低高峰需求和用户的电费支出。在家庭储能规划层面，储能设备是家庭综合能源系统的关键部分，通过储能设备能够应对可再生能源出力的波动性，维持系统运行的平稳性。文献[15]提出了一种混合整数线性规划的模型，来确定电池储能系统的规模，并研究在不同确定性级别下储能容量配置大小对负荷运行的影响。但上述研究中的家庭能源系统都未考虑天然气。

天然气网络接入家庭，可以通过热电联产将天然气能源转换为热能和电能。热电联产给天然气的高效利用提供了条件，家庭用户使用能源的方式也更加多样便捷。因此，有很多学者在多能源背景下进行储能系统规划和负荷调度时，考虑了热电联产等装置，将其纳入家庭综合能源管理系统的范畴内。文献[16]将热电联产、插电式混合动力汽车、太阳能电池板和储热系统以及通用家庭电器作为家庭能源系统的组件，考虑了电力和天然气之间的相互作用，以用户的能源成本作为优化目标，将不同家庭负荷的运行建模为约束条件，实验结果表明了该方法的良好性能。文献[17]针对中国西北地区的多个家庭进行优化设计和技术经济分析，并通过对含热电联产的家庭调查，形成了以年总成本最小为目标的混合整数线性规划模型，根据实验结果，含热电联产的家庭的系统配置和能源成本是最经济的，意味着灵活的混合能源输出设备具有很大的潜力。文献[18]针对英国某家庭能源系统进行热电联产的可行性分析，在收集所有长期和短期的能耗数据后，对设备的尺寸进行确定，结果表明，采用热电联产的家庭与分别供电、供热的家庭相比，总成本下降了 39.07%，验证了热电联产在家庭能源系统应用的经济性。文献[19]研究了集成储能和光伏阵列以及热电联产的家庭能源系统规划与运行，利用一种新颖的系统规划和运行策略同步优化方法，满足住宅用户对能源使用的需求，为含热电联产家庭的规划与运行提供了一个有效数值框架。文献[20]中的家庭整合各种能源，在增加调度灵活性的同时建立了一个可处理的鲁棒性框架，实验结果验证了调度策略的鲁棒性。上述的研究成果都表明家庭综合能源系统中加入热电

联产装置可有效提升调度的灵活性和降低能源成本。但热电联产装置的占地面积和安装成本都比气电两用设备高，在一定程度上限制了热电联产装置在家庭的普及。配有热电联产装置的家庭较少，导致上述研究成果难以大面积推广。本文使用的能源转换设备为气电两用设备，能够自由切换使用天然气能源和电力能源，而热电联产装置将天然气转换为电力和热能，两者具有不同的设备特性。因此，以上基于热电联产的研究成果，不能应用于含气电两用设备的家庭综合能源系统。

## 1.2.2 家庭综合需求响应的研究现状

随着用户需求侧能源转换设备和储能设备的不断普及，家庭中电力与天然气的耦合程度得到加深。电力需求响应逐步衍生发展为综合需求响应。相较于需求响应，综合需求响应综合了用能种类转换和时间转移，可以使用户自由使用多种能源。并且，在用电高峰时段，可以使用其他能源代替电能，这样使用户的供能得到保证，不会影响用户的体验舒适度，也在一定程度减轻电网供给压力。

国内外有许多学者对电力层面的家庭需求响应进行研究。文献[21]中的家庭含有分布式能源、储能单元、可控家庭负荷，通过一种混合整数线性规划方法，建立需求响应模型来减少能源费用。文献[22]的家庭通过需求响应增加用电的灵活性，结果表明需求响应对节能和促进消费者参与用电决策具有积极影响。需求响应能有效匹配家庭用户的供需，通过控制各类可控设备的使用时间或者使用功率来降低能源费用。改变设备的用电时段和使用状态会导致用户舒适度在一定程度上的下降，因此可控设备的响应潜力具有提升的空间。

在家庭综合需求响应方面，世界各国都开始对家庭能源系统领域的综合需求响应开展研究。文献[23]中，家庭能源系统中包括热电联产系统，引入热电发电机提高热电联产混合系统的功率输出，通过实验验证含混合能源系统的综合需求响应模型的可靠性与经济性。文献[24]中的住宅集成了微型热电联产装置，并设计相关综合需求响应方案进行实验对比分析，结果表明，含微型热电联产装置的住宅与仅使用电能的住宅相比，能源利用率上升，并且对气候变化的敏感性降低，消费者更容易接受调度方案。文献[25]表明综合需求响应是促进可再生能源消费和提高家庭能源系统能源利用效率的重要方法，在电热一体化能源系统为背景下，考虑用户对舒适性的要求，构建典型的综合需求响应模型。基于该模型，不仅对多能源用户用能进行优化，而且对其需求侧的储能系统容量配置优化，实现对储能系统的优化配置，最大限度的提升能源的综合利用率。最后仿真结果显示，该模型能指导用户在各种能源市场价格下合理利用各类能源，在提高舒适度的前提下，极大降低了能源的成本开支。以上相关对家庭综合需求响应的调研中，能源转换是通过热电联产装置来实现。很少有考虑通过气电两用设备来实现气电互济，

开展对家庭综合需求响应的相关研究。

经过上述分析,综合需求响应对比于传统的电力需求响应,可以在能源转换、替换层面参与需求响应。用户的供能安全性得到了提升,并且用能舒适度也不会下降。气电两用设备在智能家居市场逐渐普及,可以将其作为主要的能源转换设备参与综合需求响应。因为热电联产与气电两用设备的能源转换的原理并不相同,使得热电联产的有关研究并不能合理的匹配含气电两用设备的家庭综合需求响应优化,对含气电两用设备的家庭综合需求响应还可以进一步研究。

### 1.2.3 应对家庭综合需求响应中不确定性问题的研究现状

家庭综合能源系统中天然气和电力的耦合程度不断加深,但天然气和电能的深度耦合以及可再生能源的间歇性和波动性会显著影响系统原有的运行状态,使得家庭综合需求响应中的蓄电池容量优化配置和负荷优化调度更为复杂。蓄电池容量优化配置和负荷优化调度过程中,会面临不确定性影响,如用户在生活习惯和行为偏好上会有差异。另外,由于光伏出力和风机出力的间歇性使预测数值存在偏差。若不考虑这些不确定性影响,所得到的规划和调度方案并非最优。现阶段的研究中,常采用随机优化、鲁棒优化和区间优化应对不确定性优化问题。

随机优化需要考虑不确定性因素的概率分布,以此建立随机优化模型并进行求解。文献[26]研究智能家庭中可延时家庭设备和多种能源的调度问题,家庭包括光伏阵列、柴油发电机和作为储能装置的插入式电动汽车。建立家庭设备和光伏发电系统的不确定性模型,使其成为一个混合整数非线性规划的随机优化问题,通过采用随机模型预测控制、遗传算法和线性规划相结合的方法来解决调度优化问题,实验结果表明所提出的方法在解决智能家庭调度问题的优越性。文献[27]建立两阶段随机规划模型,同时考虑经济和环境目标,求解考虑不确定性分布式能源系统的优化模型。基于上海某案例研究的一组不确定性参数对能源系统进行仿真实验,结果表明该方法能显著降低系统年总成本,并且应对不确定性有良好的效果。文献[28]在光伏出力不确定性的情形下,协调控制光伏组件和储能单元,使用随机动态规划算法优化充电和放电曲线,目标为最大限度的降低满足日常家庭负荷需求的总体成本,实验结果分析表明,该方法可以为降低用户成本做出贡献。但是对于每一个家庭而言,其用户需求与可再生能源出力都不尽相同,随机优化所需要的分布函数难以获得,不便推广。

鲁棒优化是对最劣或者最差的场景进行分析求解,不需要考虑准确的概率分布函数。文献[29]针对光伏发电系统带来的不确定性问题,提出了一种智能家庭负荷调度的鲁棒优化模型,定义了一个自适应参数 $\Gamma$ 来控制最终最优解的鲁棒性水平,所提出的鲁棒优化方法能够产生不同鲁棒水平的负荷计划。文献[30]针对

日前和实时能源市场中的智能家居能源管理提出了一种鲁棒优化模型,该模型研究了能源价格和光伏功率出力的不确定性,在考虑用户舒适度的情况得出最优解,结果表明该方法可以确保决策者在能源管理方面有盈利空间。鲁棒优化具有较大的稳定性,但得到的优化结果过于保守。

区间优化方法近年来在家庭能源系统领域愈发受到关注。文献[31]给出了一个区间优化方法处理含不确定性的家庭负荷调度问题,主要考虑的不确定性变量为热水温度和室内温度,不确定性变量可以用区间数表示,实验结果显示,该方法可以灵活满足各种家庭居民需求,同时能稳健的应对不确定性。另外,在家庭综合能源系统负荷优化调度方面,用户的满意程度对调度方案也有不可忽视的影响。文献[32]中构建了多种类的电力负荷模型和多种类的热力负荷模型,将能源费用最优作为目标函数,构建了计及温度和用能舒适性的整数规划模型,最后以典型日的数据来进行实验,验证方法的有效性。文献[4]给出的区间优化方法在应对环境和需求不确定性问题的基础上,研究了不同容忍程度的经济影响。在处理不确定性的方法中,由于区间优化并不要求掌握不确定量的实际概率函数,而仅要求得到其边界值大小,因此具有建模简便、结果鲁棒性较好和计算量适度的优势。因此,区间优化方法受到研究者的重点关注。目前对含蓄电池的家庭综合能源系统的综合需求响应区间优化方法鲜有研究。

#### 1.2.4 容忍度的研究现状

容忍度也可以被叫做用户满意度,能够衡量家庭用户对舒适度约束违背的容忍程度。文献[33]让用户在预定义的预算下获得最大的满意度,通过基于用户满意的方法管理需求侧负荷,仿真实验表明,所提方法能实现用户满意度和成本满意度的最大化。文献[34]在考虑用户用电满意度的基础上,建立了多目标优化模型。文献[35]利用机会约束设计,给出一个家庭负荷优化调度方案。该方法建立了不同的置信水平与时变温度约束范围,来表征用户对约束违反和舒适性的选择。经算例仿真结果显示,所建立的模型可以在不确定性变量影响下,为家庭用户创造一个良好的鲁棒性方案。文献[36]提出了一种多智能体控制系统,用于住宅与微电网系统的能量与舒适度协调管理,将用户的容忍度转换为成本,与系统能源费用组成目标函数,该能源系统管理方案兼顾经济性和舒适性。上述与容忍度的相关成果都是纯电需求响应方面,没有涉及综合需求响应。在气电两用设备逐渐普及的背景下,结合容忍度探究综合需求响应的优化潜力,仍然需要深入探索。

#### 1.2.5 蓄电池容量配置的研究现状

蓄电池的安装提升了家庭用户的购售电的自由度,但其投资成本和运维成本

不可忽视。过大或过小的蓄电池容量会影响系统的经济性，导致用户安装蓄电池的积极性不高。文献[37]在满足家庭用电需求的前提下，为实现家庭经济最大化的目标，提出一种基于电池储能系统和光伏阵列发电的智能家庭优化设计/控制框架，在考虑电池储能系统成本、计算效率和家庭用电的差异的情况下，优化电池尺寸和能源管理策略。文献[38]通过对电池储能系统和光伏发电系统的优化应用，提供了一个有效的家庭能量管理系统。在所给出的家庭能源管理系统中，充放电状态、容量和功率被认为是决策变量，使用随机混合整数非线性规划来确定电池储能系统的最优运行策略和规模，最后的仿真结果表明，该系统能显著降低年度电费。上述文献都通过对家庭内部的电池储能系统进行容量规划，来降低能源支出成本，取得了一系列有价值的研究成果。遗憾的是，以上储能系统的容量规划中，都没有考虑天然气能源，难以应用于接入了天然气能源的家庭综合能源系统研究中。

接入天然气的能源系统蓄电池容量配置亦有相关研究，文献[39]针对含热电联产装置的微型电网，把运行的经济效益作为出发点构建了蓄电池容量优化模型，并采用了蓄电池最小容量的定量分析方法，最后求解模型，确定了最优蓄电池容量配置。文献[40]对当前混合能源微网系统储能设备容量确定方法加以了分类和总结，从混合能源微网系统连续供电视角，开展相关蓄电池容量优化方案选择的研究。文献[41]在集成多种储能系统的家庭微电网中，以家庭用户的能源费用最优为目标，在维持系统安全稳定的基础上，建立蓄电池容量优化模型。以上蓄电池的容量配置中，未涉及含气电两用设备的家庭综合能源系统。将蓄电池加入家庭综合能源系统，并结合纯用电设备和气电两用设备获得更高的经济效益还未被探究。因此，需要更加深入的探索此情况下的蓄电池容量配置。

## 1.3 论文的选题依据与研究内容

### 1.3.1 本文选题依据

基于上文的研究与分析，目前大部分家庭主要考虑需求响应，会在一定程度上影响用户的用能舒适度和无法体现多能源并存的优势，需求侧响应潜力有进一步提升空间。有学者通过热电联产装置研究家庭综合需求响应，但热电联产装置相较于气电两用设备而言，具有占地面积过大、安装成本昂贵等劣势。随着气电两用设备以及蓄电池在家庭综合能源系统的广泛应用，将气电两用设备应用于家庭综合需求响应是当今的研究热点。蓄电池是重要的需求侧资源之一，给家庭用户带来了更高的购售电自由度。在现阶段的研究中，同时涉及气电两用设备和蓄

电池的家庭综合需求响应的有关研究较少，有待深入探究。

蓄电池的容量大小直接关系到家庭的投资运行费用，是家庭综合能源系统能否获得更大收益的关键因素。但在蓄电池的容量配置中，家庭综合能源系统固有的光伏出力和用户需求不确定性因素给蓄电池容量配置带来挑战。与此同时，家庭综合能源系统对负荷进行优化调度时，也需考虑系统固有的不确定性因素的影响，否则得出的优化方案并非真正意义上的最优调度方案，在一定程度上影响家庭用户的用能舒适度。所以，在充分考虑不确定性变量的情形下，通过对家庭综合能源系统的储能容量规划与负荷优化调度深入研究，对于提升系统的安全性、经济性有着积极的意义。

在应对不确定性优化问题上，基于前文的分析，随机优化需要不确定性变量精准的概率分布函数，这通常是难以获得的；鲁棒优化的求解结果过于保守，只考虑最劣情况下的优化解。区间优化方法只需要获取不确定性变量的边界值，数据获取较为容易，且求解出来的结果鲁棒性强。区间优化方法能够处理不确定性优化问题，并且在负荷优化调度中，区间优化可进一步结合用户容忍度，挖掘家庭综合需求响应优化潜力。

### 1.3.2 本文研究内容

从图 1-1 可知，本文分为五个章节，每个章节具体的研究内容如下：

第一章主要对本文研究课题所涉及到的背景和意义进行论述，分别对家庭综合能源系统、家庭综合需求响应以及应对家庭综合需求响应中不确定性问题的方法、容忍度、蓄电池容量配置进行了国内外研究现状调研，分析了现阶段研究中的优点与不足，引出本文主要研究问题。

第二章针对含蓄电池家庭综合需求响应机理与框架展开了介绍。先对综合需求响应的概念和基本原理加以阐述，其次，介绍了家庭综合能源系统的综合需求响应资源，并分析其互济原理。然后，阐述不确定性是家庭综合需求响应优化的重大挑战，提出解决不确定性优化问题的区间优化方法，并深入分析了蓄电池对综合需求相应的影响。最后，提出基于区间优化的家庭储能配置与运行框架。

第三章提出了家庭综合能源系统蓄电池容量优化配置模型。首先分析了系统的不确定性变量，采用区间优化方法中区间序关系对不确定性进行处理。构造了基于区间优化的家庭综合能源系统蓄电池容量优化配置模型，优化目标函数为系统的年投资与运行成本，决策变量为蓄电池的容量和气电两用设备总能耗中的耗电与耗气比例。最后使用遗传算法对转换之后的确定性模型求解，得出最佳的蓄电池容量。

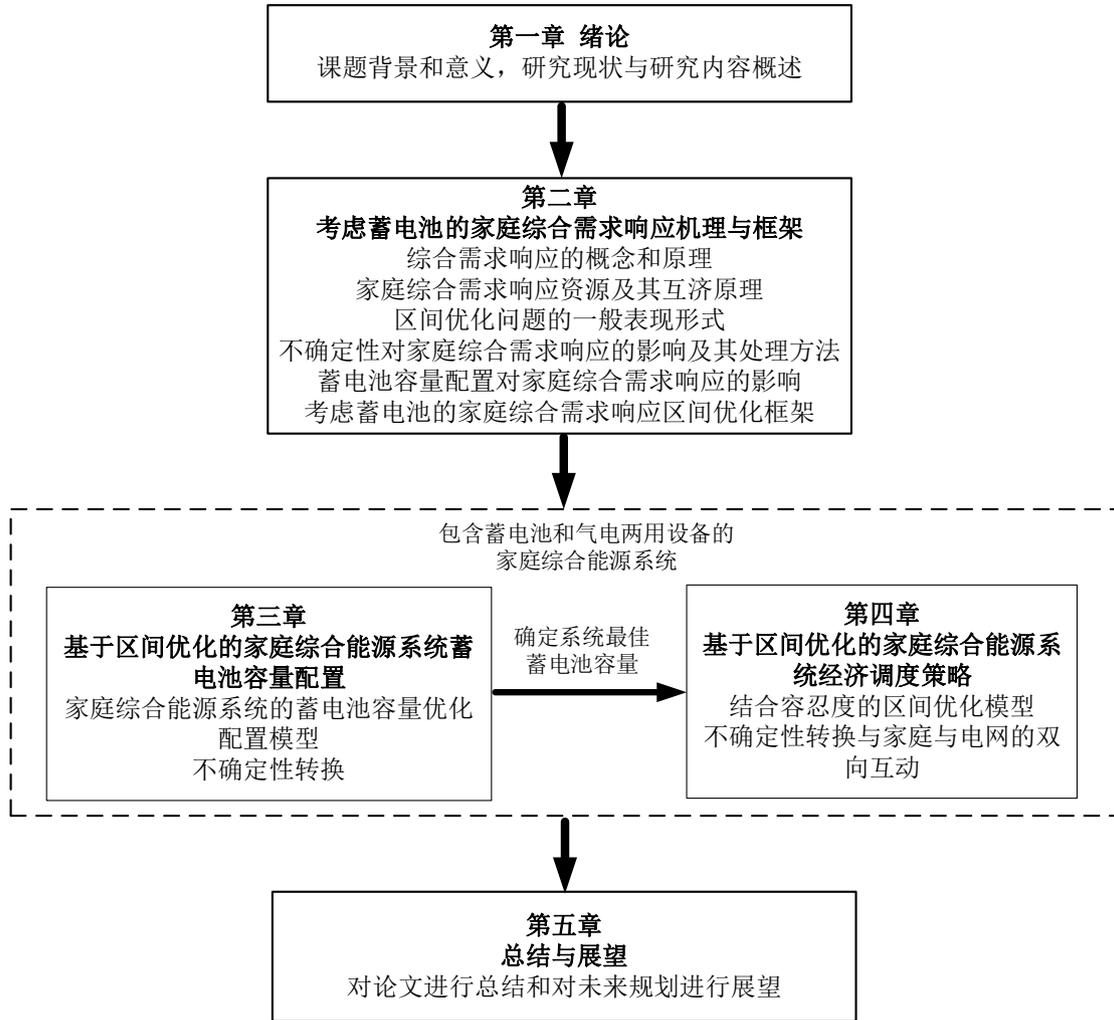


图 1-1 论文的组织结构

第四章节给出了家庭综合能源系统的优化调度模型，并对各类负荷进行分类。将家庭综合能源系统的不确定性变量用区间数描述，建立了区间约束模型和区间优化目标模型。通过区间序关系以及区间可能度将含区间数的不确定性模型转换成确定性模型。在此过程中，探究了区间优化方法结合容忍度对综合需求响应的影响。并通过第三章的蓄电池容量优化结果，分析了蓄电池设备加深综合需求响应优化深度的相关内容。

第五章节对本论文的研究重点进行总结，结合本文所研究的问题，进一步提出未来研究的规划与展望。

### 1.3.3 本文特色与创新

本文的主要创新如下：

第一，将蓄电池设备和气电两用设备纳入家庭能源管理范畴，以系统年投资成本与运行成本为优化目标，在系统存在不确定性因素的情形下，对蓄电池容量

进行规划，得出最佳蓄电池容量大小。探讨了蓄电池设备和气电两用设备这两种设备与家庭综合需求响应的内在联系，提供了一种新颖的家庭综合需求响应途径。

第二，根据家庭综合能源系统的不确定性与用户的容忍度，构建了融合容忍度的家庭综合能源系统区间优化模型，并研究了区间优化与容忍度对综合需求响应的价值，以进一步的减少家庭能源费用。

## 第 2 章 考虑蓄电池的家庭综合需求响应机理与框架

### 2.1 综合需求响应的概念和原理

需求响应是电力需求侧管理的一种重要手段<sup>[42]</sup>。需求响应指的是家庭居民可以通过电力公司提供的电价信息或者通过奖励机制改变原本的用电情况<sup>[43]</sup>，进而实现系统的安全经济调度。但是，对家庭用户的可控负荷进行优化调度时，需求响应的节能效果有限。随着能源互联网和智能电网技术的发展<sup>[44]</sup>，家庭负荷参与需求响应有了更多的互动模式，用户可利用的资源也扩展为气、电、热等多种类型<sup>[45]</sup>，需求响应衍生发展为综合需求响应。综合需求响应根据综合能源系统内部的用电、用热、用冷等负荷需求，以及动态的实时能源价格信息，实现多能互补<sup>[46]</sup>，并对系统内各类设备实施优化控制和规划设计，从而充分发挥需求侧柔性负荷的需求响应潜力，为用户提供一个可靠、经济、安全的调度方案。

与传统的电力需求响应相比，综合需求响应是根据能源市场价格来更改用户的用能计划，可以更加准确实现对多种能源的协调利用<sup>[47]</sup>。具体来说，一方面能源的替换可以保障用户的用能体验，使得用能满意度与舒适度不下降；另一方面，综合利用多种能源，不仅挖掘了柔性负荷的响应潜力和用户与电网的互动潜力，而且增强了系统的可靠性和经济性。

### 2.2 家庭综合能源系统的综合需求响应资源及其互济原理

#### 2.2.1 家庭综合能源系统的综合需求响应资源

随着综合能源系统以及多能耦合相应技术的快速发展<sup>[48]</sup>，需求侧部署的分布式发电设备、储能设备愈发普遍，使得需求侧具备了供能与存储<sup>[49]</sup>的能力。此外，家庭能源系统内部的负荷类型多样化以及可供选择的能源种类增加<sup>[50]</sup>，扩大了需求侧的优化调度空间。因此，多种类型的需求侧资源可以提升家庭综合需求响应的弹性。

家庭的主要能源来源是从公共事业网络接入的电能和天然气能源<sup>[51]</sup>，安装在家庭内部的分布式能源主要有光伏发电系统<sup>[52]</sup>。光伏发电系统技术发展成熟度较高、安装成本较低、能量来源广泛、绿色，成为家庭普遍使用的分布式能源<sup>[53]</sup>。此外，家庭储能设备<sup>[54]</sup>也可作为供给能源为家庭供能，储能设备技术发展逐渐成熟，安装成本逐年下降<sup>[55]</sup>。在灵活、有效的管理下，储能设备的工作状况能够针对负荷需求、可再生能源出力与电价做出策略调整，达到系统稳定与用户利

益最优化<sup>[56]</sup>。对于需求侧来说，蓄电池资源既可以发挥可调设备的作用，又可以作为储能设备提供灵活的电能转移<sup>[57]</sup>，帮助用户降低能源费用。

用户侧智能设备的种类越来越丰富，对于家庭设备来说，一般可以根据是否可以被灵活调度分为可控设备和不可控设备<sup>[58]</sup>。不可控设备通常与用户行为习惯紧密联系，其运行模式的调整势必会影响用户的舒适度<sup>[9]</sup>。故该类设备不参与智能系统的调度。不可控设备主要为：电灯、个人电脑、电视机等<sup>[59]</sup>，需要注意的是，虽然不可控设备不受智能系统的调度，但由于可再生能源设备、储能设备对家庭各设备统筹兼顾的特点，其能耗信息仍需被智能系统所考虑。可控设备是指可以响应能源市场价格或依据用户的用能需求做出相应运行调整的设备。如空调、热水器、洗碗机等。可控设备可区分为可中断设备、不可中断设备<sup>[60]</sup>。可中断设备的运行过程中短时中断不会对用户体验和设备自身产生较大影响，例如热水器、空调等。不可中断设备一旦开启，必须达到规定的运行时间才可以停机，不能被中断，这种设备一般为洗衣机、厨具、洗碗机等<sup>[61]</sup>。显然，可控设备的存在使得家庭在需求响应方面有巨大的优化空间。

近年来，天然气凭借其绿色环保的特点成为家庭综合需求响应的重要能源。天然气在家庭中的广泛使用，使得多能源设备进入家庭，例如热电联产装置<sup>[18]</sup>等以天然气为能源的设备。然而，这类设备缺点较为显著，包括使用噪声较大、安装占地面积较大等。而气电两用设备不需要进行气和电之间的转换，能源模式切换灵活，占用空间小，逐渐在智能家居市场普及。在实施综合需求响应的过程中，热电联产设备的气电互济原理不同于气电两用设备，热电联产装置将天然气转换成电能和热能，而气电两用设备是直接切换能源种类，灵活使用天然气和电力。图 2-1 展示了含气电两用设备的家庭综合需求响应框架，从该框架可以看出，公共事业公司供给了电能和天然气能源，光伏发电系统和蓄电池设备作为能源供给的补充设备，为系统提供电力支持。预测系统所包含的数据取自其它专门系统，主要提供光伏出力功率、环境温度以及用户需求等信息。家庭综合能源控制中心根据多种能源价格、预测系统所提供的数据、以及设备的运行状态对系统做出决策，控制各类设备的运行。

### 2.2.2 家庭综合能源系统的互济原理

在家庭能源系统的综合需求响应中，对需求侧资源实施科学的优化分配和调整，才能有效提升可再生能源的总消纳量与能源的综合使用率。使用清洁能源可以降低碳排放，同时能有效降低用户能源费用。通常来说，以满足家庭用户的用能舒适度、维持系统稳定可靠运行、构建绿色新能源体系为目的的家庭综合能源

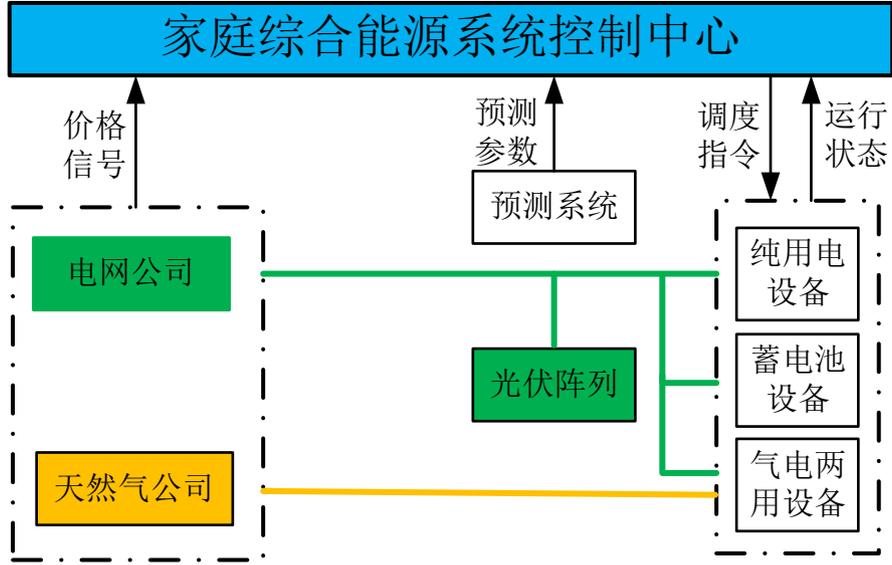


图 2-1 家庭综合需求响应框架图

系统规划与调度时，会同时考虑多个优化目标<sup>[62]</sup>。例如，最小化系统的运行成本（包括系统投资成本和系统的调度成本）、最大化家庭用户舒适度和可再生能源的消纳率、最小化家庭系统的碳排放量等<sup>[20]</sup>。此外，在追求多目标优化的情况下，家庭综合能源系统的规划与调度需要保证其运行符合多种约束，例如系统的功率平衡约束、系统最大功率输入约束、家庭各设备的运行约束等。故可将优化模型概括为如式(2-1)所示：

$$\begin{cases} \min_k f(\mathbf{K}, \mathbf{J}) \\ \text{s.t. } H_i(\mathbf{K}, \mathbf{J}) = D_i \\ C_i^{\min} \leq C_i \leq C_i^{\max} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中：优化的目标函数为  $f(\mathbf{K}, \mathbf{J})$ ，其中  $\mathbf{K}$  是家庭综合需求响应中可调度设备的决策变量矩阵； $\mathbf{J}$  作为不确定性变量的集合，本文将使用区间数形式描述不确定性变量，可具体描述为  $\mathbf{J} = \{T^l, d^l, P^l \dots\}$ ， $T^l$ 、 $d^l$ 、 $P^l$  所表示的不确定性区间变量分别是温度、用户需求、功率； $H_i(\mathbf{K}, \mathbf{J}) = D_i$  为等式约束，如热水器、空调等各类设备模型的运行约束； $C_i^{\min} \leq C_i \leq C_i^{\max}$  为不等式约束，其中  $C_i$  代表受到约束的变量，例如热水温度、电池电量等。

本文研究的家庭综合能源系统在天然气的使用方面采用了体积更小、能源选择更灵活的气电两用设备，实现天然气能源和电力能源的互济。在家庭能源系统综合需求响应的过程中，互济的理论基础在于，首先，在产热和烹饪方面，天然气和电力两类能源是可以相互补充和替代的，且不会影响用户体验；其次，水和空气具有良好的储热特性，热量不呈现跳崖式流失，因此家庭内与此相关的设备

具有一定的平移属性。而人体对温度的感受具有模糊性，用户对一定程度内的温度突破舒适区间是可以忍受的，故用户容忍度可以加大可控设备的平移深度。此外，厨具、洗衣机本身便具有平移性质，能响应能源市场价格变动做出调整。

### 2.3 区间优化问题的一般表现形式

第 2.2 小节讨论了家庭用户侧相关综合需求响应资源，家庭能源系统丰富的能源种类和灵活的气电互济方式扩展综合需求响应空间的同时，也增加了系统的储能容量配置、运行优化的复杂度和不确定性。对含不确定性系统的优化，可利用优化方法来建模与求解。在应对不确定性的多种优化方法中，区间优化方法受到了着重关注，它能够把不确定性变量描述为区间数。区间数<sup>[63]</sup>可以被描述为如下式所示：

$$A^I = [A^L, A^R] = \{x \mid A^L \leq x \leq A^R\} \quad (2-2)$$

式中： $A^I$  是区间数； $A^L$ 、 $A^R$  表示区间变量的下限值和上限值。但如果  $A^L = A^R$ ，则  $A^I$  表示某个具体实数。区间数也能表现为如下形式：

$$A^I = \langle A^C, A^W \rangle = \{x \mid A^C - A^W \leq x \leq A^C + A^W\} \quad (2-3)$$

式中： $A^C$  表示中点值； $A^W$  表示半径值。区间数有独有的运算规则<sup>[64]</sup>， $A^C$  以及  $A^W$  能够描述区间的优劣程度，其计算如式(2-4)、式(2-5)：

$$A^C = \frac{A^L + A^R}{2} \quad (2-4)$$

$$A^W = \frac{A^R - A^L}{2} \quad (2-5)$$

通过区间数来描述系统的不确定性变量，其优化问题的通用表达式如式(2-6)所示：

$$\min_{\mathbf{Z}} f(\mathbf{Z}, \mathbf{U}) \quad (2-6)$$

其约束如下式所示：

$$\begin{cases} g_j(\mathbf{Z}, \mathbf{U}) \geq b_j^I = [b_j^L, b_j^R], j \in M, \mathbf{Z} \in \Omega^n \\ \mathbf{U} \in \mathbf{U}^I = [\mathbf{U}^L, \mathbf{U}^R], U_j \in U_j^I = [U_j^L, U_j^R], j \in Q \end{cases} \quad (2-7)$$

式中： $\mathbf{Z}$  为决策变量； $\mathbf{U}$  为不确定性参数矩阵；上标  $I$  表示该变量为区间数；上标  $L$ 、 $R$  表示区间变量的下界和上界； $b_j^I$  表示第  $j$  个约束的区间。

## 2.4 不确定性对家庭综合需求响应优化的影响及其处理方法

在家庭综合需求响应的规划和调度问题中,不确定性是不能忽视的重要因素。不确定性因素的主要来源有:负荷模型建立的不确定性、负荷参数测量的不确定性、数据传输误差的不确定性、环境变量预测的不确定性、用户需求预测的不确定性。充分考虑上述不确定性因素影响,能更好贴合实际工程需求。

对家庭负荷构建模型时,若考虑影响该模型运行的全部要素,会使该模型十分复杂甚至无法构建。一般而言,只考虑影响模型的主要因素,构造的模型与实际模型会有所偏差<sup>[65]</sup>。负荷参数测量的不确定性主要是指通过测量仪器读取各类负荷的运行状态或者功率等数据的过程中,因为仪器本身的限制,读取出来的数据有所偏差。随着仪器制造水平的进步,这种偏差会越来越小。数据传输的误差是由数据的丢失或者传输速度的延时所引起的,一般发生在控制中心向负荷设备发送调度指令或者负荷设备和其它系统上传自身数据的过程中。环境变量的预测数据,通常来源专业的预测系统<sup>[24]</sup>,这类数据有可再生能源出力功率、环境温度等。可再生能源出力和环境温度受到光照、风速、地形的影响,存在的较大的不确定性。此外,预测的变量还有用户的用能需求,需求预测与用户的行为息息相关。由于不同的用户的生活习惯具有差异性和随机性,其不确定性也较强。目前,此类不确定性因素严重制约着家庭综合需求响应中规划与调度的精确性。

由上可知,不确定性的来源不同,对系统的规划和调度的影响也不相同,但都会使家庭综合需求响应的执行效果与最优效果有一定的距离,并且可能会降低用户的用能舒适度。更严重的,还可能导致负荷设备违背运行约束,降低系统运行的安全性和可靠性。因此,在具有复杂不确定性情况的背景下,一个合理、经济的家庭综合能源系统规划与调度方案,能有效推进综合需求响应项目的实施,为广大的家庭用户谋得利益,也为电网的稳定运行做出贡献。目前在应对不确定性的研究方法中,大致可以分为以下几类:鲁棒优化方法、区间优化方法、随机优化方法等。

区间优化方法相较于随机优化方法不需要获取海量的家庭能源系统的相关数据,只需要数值分布的上、下边界,且求解结果具有良好的鲁棒性。因此,本文对不确定性参数的处理均采用区间优化方法。

图 2-2 显示了区间优化问题求解不确定优化问题的一般流程,区间优化模型中,不确定性参数使用区间数来描述,目标函数与约束条件都含有区间数,通用表达形式可见公式(2-6)和(2-7)。决策变量即公式(2-6)中的  $Z$ ,也受到不确定性参数的影响。利用理论推导把含区间数的不确定性优化模型,通过区间优化方法转换为确定性优化模型。而转换后的确定性模型求解问题,可使用启发式算法解决。

经典的启发式算法主要包括以下几种：遗传算法、粒子群算法以及差分进化算法等。而遗传算法在解决复杂的组合优化问题时，相对于某些常见的优化算法，往往可以较快的得到较好的优化结果。因此本文中的确定性模型使用遗传算法求解，得出优化结果。

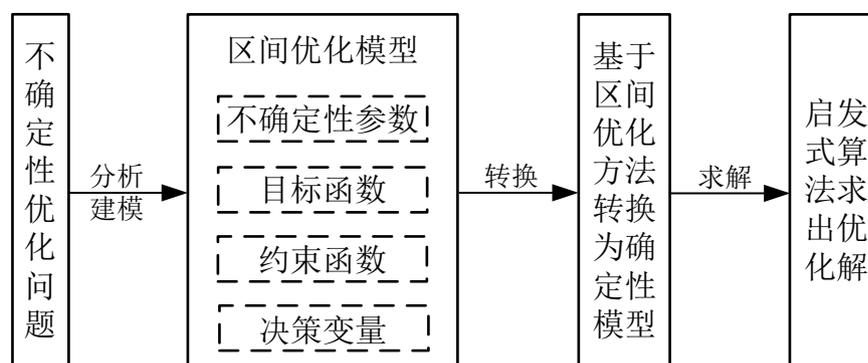


图 2-2 区间优化问题求解流程

## 2.5 蓄电池容量配置对综合需求响应的影响

蓄电池是家庭需求侧主要的需求响应资源，其容量规划是综合需求响应重要的研究方向之一。在家庭综合需求响应中，蓄电池能提升综合需求响应的潜力<sup>[66]</sup>，具体表现为：蓄电池可以在能源市场价格较低时将电能存储起来，在能源市场价格较高时将电能释放，从而在其中赚取一定的利润，提高综合需求响应的优化效果。同时，当面临家庭综合能源系统电压急剧升高或急剧降低时，蓄电池能够进行功率缓冲，以平衡电压变化<sup>[67]</sup>，乃至进行部分谐波治理功能，由此大大改善了系统的供电品质，带来更高的用户满意度，扩大了综合需求响应优化范围。在家庭综合能源系统中，光伏发电系统和风力发电系统的系统出力存在很大的间歇性变化和波动，能够利用蓄电池平抑波动的功能，给负荷创造较平稳的输出功率，从而利用综合需求响应协同控制可再生能源系统、电池储能系统和家庭中的各类负荷，达到平稳波动、稳定输出、提高就地利用率的目的，拓展家庭综合需求响应中的优化思路。

蓄电池容量的优化配置是决定家庭能源系统成本的重要因素之一，不合理的优化配置会使得家庭综合能源系统的经济性和可靠性无法体现，导致综合需求响应的优化深度与效果降低，因此，合理的蓄电池容量优化配置对综合需求响应的推广实施至关重要，但不确定性对蓄电池容量优化配置提出重大挑战。区间优化方法<sup>[68]</sup>在家庭综合能源系统的规划中应用广泛，它能根据用户侧的能源需求、家庭可用资源及其技术特性，构建优化模型，得到的结果符合决策者的主观偏好，

且具有容量配置的趋优性和鲁棒性的优点。所以，本文研究以家庭能源系统的经济性为目标，并利用区间优化方法来应对蓄电池容量优化配置中的不确定性因素。

另外，从环境保护、功率密度、充放电效率、占地面积、购买价格以及使用寿命<sup>[69]</sup>等角度考虑，锂离子蓄电池被作为储能设备广泛使用，所以本文采用锂离子蓄电池为研究对象。

## 2.6 考虑蓄电池的家庭综合需求响应区间优化框架

从上述章节可知，不确定性因素是家庭综合需求响应的一个重大挑战。气电两用设备是综合需求响应中的关键设备，它能实现气电的互济。蓄电池是特殊的家庭负荷，既可以作为家庭可控负荷接受调度，又可以作为供给能源提供能源。蓄电池容量优化配置和家庭负荷优化调度都需考虑不确定性，若容量优化配置中的不确定性没有被考虑到，会使实际工程中的优化结果不准确，需要继续修正<sup>[70]</sup>。家庭负荷优化调度若没考虑不确定性，难以得到一个令用户满意舒适的调度方案。家庭能源系统的储能容量配置和负荷运行优化都需考虑不确定性，才能为实际综合需求响应工程提供有价值的决策信息。

从图 2-3 的考虑蓄电池的家庭综合需求响应区间优化框架中可以看出，家

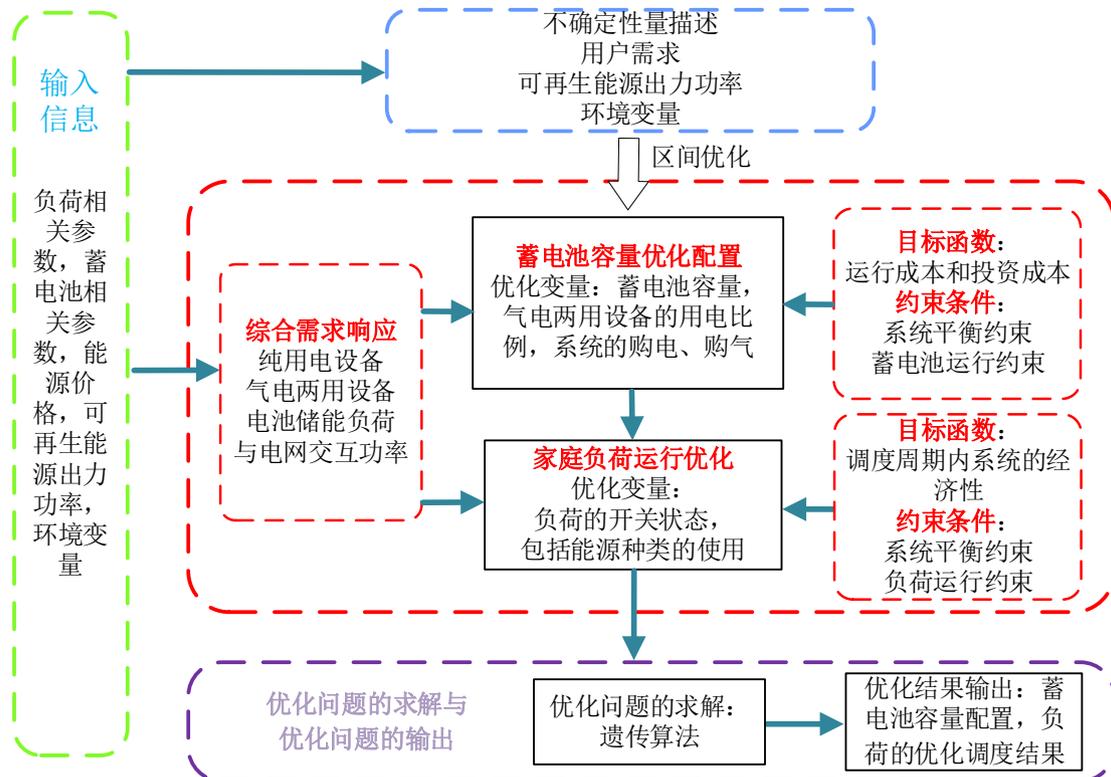


图 2-3 考虑蓄电池的家庭综合需求响应区间优化框架

庭需求侧的综合需求响应资源包括纯用电设备、气电两用设备和电池储能设备。输入信息中的不确定性变量为用户需求、可再生能源出力功率、环境变量，可使用区间数形式表示。蓄电池容量优化配置和家庭负荷运行都含有区间变量，给综合需求响应优化问题的求解带来了难度。蓄电池容量优化配置以年运行成本和投资成本为优化目标，以满足系统功率平衡和蓄电池运行约束，并利用区间优化方法来解决不确定性优化问题，得出最佳的蓄电池容量，供家庭负荷运行优化使用。家庭负荷运行优化以调度周期内运行费用为优化目标，满足系统平衡和负荷运行约束，同样通过区间优化方法应对不确定性，转换为确定性优化问题，然后通过遗传算法求解出负荷的优化调度结果。

## 2.7 本章小结

在本章节中，首先阐述了综合需求响应的概念和原理，接着进一步论述家庭综合能源系统需求侧的相关资源以及能源之间的互济原理。然后分析了不确定性的几种主要来源及其对家庭综合需求响应的影响。与此同时，给出了应对不确定性优化问题的求解方法与求解流程。其次，分析了蓄电池容量配置对综合需求响应的影响。最后，提出了考虑蓄电池的家庭综合需求响应区间优化框架。

## 第3章 基于区间优化的家庭综合能源系统蓄电池容量配置

### 3.1 引言

家庭综合能源系统的主要能源包括电能与天然气,随着气电两用设备引入家庭综合能源系统,能实现天然气与电能的灵活切换,给综合需求响应优化提供了便利的条件。蓄电池作为一种重要的需求响应资源,能提高综合需求响应的优化潜力,增强家庭综合能源系统运行的可靠性。然而,相对较高的安装成本阻碍了蓄电池在居民家庭中的推广与应用。因此,为用户提供一个合理经济的蓄电池容量配置方案是家庭综合能源系统领域的重要研究课题之一。

目前已有许多研究者在家庭层面的蓄电池容量优化配置方面取得了较多的研究成果。文献<sup>[71]</sup>针对一个考虑多种可控设备组成的典型智能家庭,提出一种两阶段优化模型的框架,用于智能家庭的电池容量规划,在实现用户总舒适度指数最大化的同时,解决了蓄电池的最优选型问题。文献<sup>[72]</sup>对南澳大利亚一个含屋顶光伏系统的住宅系统,在不同的电网零售电价下,根据住宅系统中的负荷能耗数据以及光伏系统的出力功率,决策出了电池的最佳容量。上述文献对家庭能源系统配置蓄电池容量都取得良好的实验结果,但是没有考虑到在实际应用场景中用户需求 and 光伏出力的不确定性,降低了家庭能源系统蓄电池优化模型的实用性。文献<sup>[73]</sup>中的家庭存在光伏系统出力功率与季节性负荷需求的不确定性,在分时电价的场景下研究家庭能源系统的电池容量配置问题,提出了一种混合非线性规划框架的容量配置方法,通过六个案例来分析光伏出力和负荷需求的不确定性对蓄电池容量的影响。文献<sup>[74]</sup>在考虑不确定性的情况下建立了随机优化模型和鲁棒优化模型,来确定蓄电池的最佳容量,通过在克罗地亚某家庭的负荷数据对所提出的模型进行了分析,得出蓄电池的容量。上述针对考虑不确定性情况的蓄电池容量优化配置研究中,仅考虑使用单一电能的家庭,对含多种能源的家庭综合能源系统蓄电池容量优化配置鲜有研究。

综上,本章节针对含多种能源的家庭综合能源系统,在用户需求和光伏出力等不确定性因素影响下,对家庭综合能源系统的蓄电池容量进行优化配置。选取区间优化方法来应对用户需求和光伏出力等不确定性问题,相较于随机方法,区间优化方法不需要精准的概率分布函数,只需参数的上下边界,并且所求结果鲁棒性较好。通过区间优化方法建立区间优化模型并求解得到合理经济的蓄电池容量,可以给家庭综合能源系统优化调度奠定良好的基础,有利于降低用户的能源费用。

### 3.2 基于区间优化的家庭综合能源系统蓄电池容量配置优化模型

家庭综合能源系统的典型构成如图 3-1 家庭负荷可以使用从公共网络购买的电能和天然气，也可以使用家庭内部的蓄电池和太阳能。气电两用设备如热水器和厨具，可以根据能源市场的价格信号灵活地切换使用的能源种类。家庭综合能源系统通常规模比较小，内部储能设备基本上为锂离子蓄电池。对图 3-1 所示的家庭综合能源系统中的蓄电池容量进行优化配置，以投资运行经济最优为目标，构建基于区间优化的家庭综合能源系统蓄电池容量优化模型。

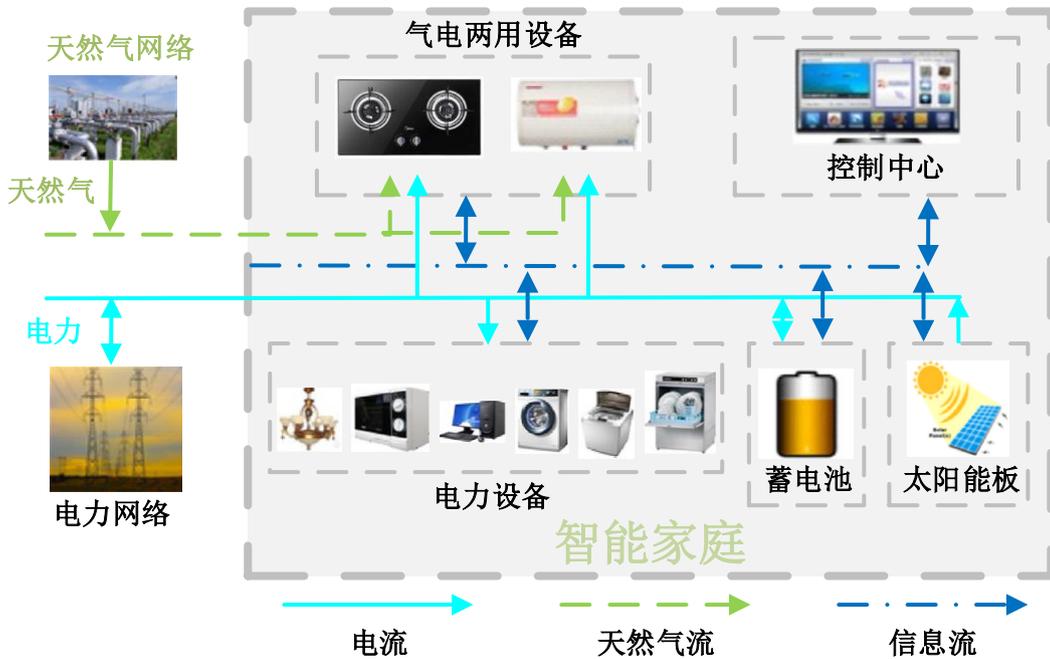


图 3-1 家庭综合能源系统典型结构示意图

为了实现系统的安全可靠运行，要确保系统内部电力能源、天然气能源的供应和消耗达到一个平衡的状态。因此在进行蓄电池的容量规划时，要考虑系统内负荷运行和功率平衡的等式约束和不等式约束。受到预测方法与技术、自然条件以及用户的自身行为的影响，家庭设备用能能耗和光伏出力存在不确定性。家庭综合能源系统中的负荷可以按照能源种类使用的区别分为纯用电设备和气电两用设备，两类设备的能源消耗均为不确定性变量。纯用电设备的能源消耗只包括电力，气电两用设备的能源消耗包括天然气和电力。用户需求由这两类设备的能源消耗所构成，其中，气电两用设备消耗的电力和天然气所占比例会随时间和能源市场价格变化而变化，两者能源消耗的比例由变量  $\eta(t)$  决定。

将纯用电设备能耗使用区间数表示如下：

$$P_{CE}^I(t) = [P_{CE}^L(t), P_{CE}^R(t)] \quad (3-1)$$

式中： $P_{CE}^l(t)$  为第  $t$  个调度时段纯用电设备能耗的区间； $P_{CE}^L(t)$ 、 $P_{CE}^R(t)$  分别表示在  $t$  个调度时段纯用电设备能耗区间的下限值和上限值。

气电两用设备的总能耗使用区间数表示如下：

$$P_{CG}^l(t) = [P_{CG}^L(t), P_{CG}^R(t)] \quad (3-2)$$

式中： $P_{CG}^l(t)$  为第  $t$  个调度时段气电两用设备的能耗区间， $P_{CG}^L(t)$ 、 $P_{CG}^R(t)$  分别为气电两用设备在第  $t$  个调度时段能耗区间的下限值和上限值。气电两用设备总能耗中电力能耗使用区间数表示为：

$$P_E^l(t) = \eta(t)P_{CG}^l(t) = [P_E^L(t), P_E^R(t)] \quad (3-3)$$

式中： $P_E^l(t)$  为第  $t$  个调度时段气电两用设备总能耗中电力能耗区间值； $P_E^L(t)$ 、 $P_E^R(t)$  为第  $t$  个调度时段电力能耗区间的下限值和上限值； $\eta(t)$  为第  $t$  个调度时段的用电比例系数。与之相应的气电两用设备总能耗中天然气能耗区间表示如下：

$$P_G^l(t) = (1 - \eta(t))P_{CG}^l(t) = [P_G^L(t), P_G^R(t)] \quad (3-4)$$

式中： $P_G^l(t)$  为第  $t$  个调度时段气电两用设备总能耗中的天然气能耗区间， $P_G^L(t)$ 、 $P_G^R(t)$  为第  $t$  个调度时段天然气能耗区间的下限值和上限值。

家庭综合能源系统的总能源消耗  $P_C^l(t)$  为：

$$P_C^l(t) = P_{CE}^l(t) + P_{CG}^l(t) = P_{CE}^l(t) + P_E^l(t) + P_G^l(t) \quad (3-5)$$

将系统的光伏出力的不确定性变量使用区间形式表示，光伏出力的预测值可表示为：

$$P_{PV}^l(t) = [P_{PV}^L(t), P_{PV}^R(t)] \quad (3-6)$$

式中： $P_{PV}^l(t)$ 、 $P_{PV}^L(t)$ 、 $P_{PV}^R(t)$  为第  $t$  个调度时段光伏出力预测值的区间、光伏出力预测值区间的下限值和光伏出力预测值区间的上限值。在光伏出力功率和用电能耗不确定性的影响下，系统内在确定性条件下的电功率平衡不再适用，为确保系统的实时功率平衡，其家庭综合能源系统与电网的交互功率也会在一定范围内变化。因此，将交互的功率用区间变量表示：

$$P_{grid}^l(t) = [P_{grid}^L(t), P_{grid}^R(t)] \quad (3-7)$$

式中： $P_{grid}^l(t)$  表示家庭综合能源系统和电网的交互功率区间； $P_{grid}^L(t)$ 、 $P_{grid}^R(t)$  为第  $t$  个调度时段交互功率区间的下限值和上限值。

### 3.2.1 目标函数

本文以蓄电池投资成本年值以及家庭综合能源系统年运行成本之和的最小化来反映家庭综合能源系统中蓄电池规划的经济性。目标函数可分为两部分，第

一部分为蓄电池的投资成本年值，是蓄电池安装和购买的费用；第二部分为年运行成本，是家庭综合能源系统在一年中所有设备的能源支出成本。优化目标函数如下式所示：

$$\min C = C^y + C^i \quad (3-8)$$

式中： $C^i$  为蓄电池投资的等年值费用； $C^y$  为家庭综合能源系统的年运行成本，需要说明的是，年运行成本由日运行成本构成，按照各个季节的气温特征，把全年划分为过渡季、夏季和冬季三种季节<sup>[43]</sup>，并选择其中的典型日实施优化。 $C^y$  具体如下式所示：

$$C^y = \sum_{n=1}^3 C_n d_n \quad (3-9)$$

式中： $n$  取值 1、2、3 依次代表过渡季典型日、夏季典型日和冬季典型日； $C_n$  为每种典型日的日运行费用； $d_n$  表示每种典型日在一年中对应的天数。 $C_n$  的具体表示如下：

$$C_n = \sum_{t=1}^{24} (\lambda_e(t) P_{grid}^I(t) + \lambda_g(t)(1-\eta(t)) P_{CG}^I(t)) \quad (3-10)$$

典型日的调度步长为 1 小时， $\lambda_e(t)$  为在第  $t$  个调度时段的电力价格，电力价格会随调度时段变化而变化； $\lambda_g(t)$  为在第  $t$  个调度时段的天然气价格，天然气的价格与大多数国家的定价策略一致，不会随调度时段变化而变化。

蓄电池投资的等年值费用  $C^i$  具体表示如下式所示：

$$C^i = AC_a \frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \quad (3-11)$$

式中： $A$  表示蓄电池的单位容量安装成本； $C_a$  表示蓄电池的容量； $r$  表示贴现率，蓄电池投资成本的收益依赖贴现率大小的设定； $N$  表示蓄电池的使用寿命。

因此，目标函数式(3-8)可具体表示如式(3-12)所示：

$$\min C = \sum_{n=1}^3 \sum_{t=1}^{24} (\lambda_e(t) P_{grid}^I(t) + \lambda_g(t)(1-\eta(t)) P_{CG}^I(t)) d_n + AC_a \frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \quad (3-12)$$

上式描述了家庭综合能源系统在一年中的总投资成本和运行成本，能源消耗包括了电力和天然气。

## 3.2.2 约束条件

### 3.2.2.1 系统运行约束

系统的运行约束包括电力平衡约束和天然气平衡约束，系统的电力平衡约束是指系统的输入电功率和输出电功率，在任意调度时段都必须保持平衡；系统的天然气平衡约束是指系统向上级气网购买的天然气量与系统的天然气消耗量相同。电力供耗约束的方程如下：

$$P_{grid}^l(t) + P_{pv}^l(t) + (1 - K(t))P_{dch}^{BESS}(t) = \eta(t)P_{CG}^l(t) + P_{CE}^l(t) + K(t)P_{ch}^{BESS}(t) \quad (3-13)$$

式中： $P_{grid}^l(t)$  为在第  $t$  个调度时段家庭与电网交互的电功率，为区间形式的不确定性变量，若为正数，代表家庭向电网购电，若为负数，代表家庭反馈电力给电网； $P_{pv}^l(t)$  为第  $t$  个调度时段的光伏出力功率，为区间形式的不确定性变量； $P_{dch}^{BESS}(t)$ 、 $P_{ch}^{BESS}(t)$  为第  $t$  个调度时段电池的放电功率和充电功率； $K(t)$  为确保蓄电池在第  $t$  个调度时段只为一种状态，充电或者放电，其取值为 0 或者 1，随着蓄电池的充放电状态而变化； $\eta(t)P_{CG}^l(t)$  为在第  $t$  个调度时段气电两用设备的电力功率， $P_{CE}^l(t)$  为在第  $t$  个调度时段纯用电设备的电力功率。此外，家庭与电网的交互功率的区间值大小限制在一定范围内，如式(3-14)：

$$P_{grid}^{\min}(t) \leq P_{grid}^l(t) \leq P_{grid}^{\max}(t) \quad (3-14)$$

式中： $P_{grid}^{\min}(t)$ 、 $P_{grid}^{\max}(t)$  分别为在第  $t$  个调度时段家庭与电网的最小交互功率与最大交互功率。

### 3.3.2.2 蓄电池运行约束

蓄电池充放电的过程中，荷电状态 SOC(state of charge)可以用数学模型<sup>[1]</sup>表示如下：

$$\begin{cases} S_{t+1} = S_t + \frac{K_t \beta^c P_t^{ch} \Delta t}{C_a} \\ S_{t+1} = S_t - \frac{(1 - K_t) P_t^{dch} \Delta t}{\beta^d C_a} \end{cases} \quad (3-15)$$

$$S^{\min} \leq S_t \leq S^{\max} \quad (3-16)$$

$$0 \leq P_t^{ch} \leq P^{ch.\max} \quad (3-17)$$

$$0 \leq P_t^{dch} \leq P^{dch.\max} \quad (3-18)$$

式中： $S_t$  表示在第  $t$  个调度时段起始时刻的蓄电池的 SOC； $K_t$  取值 0、1 确保蓄电池在第  $t$  个调度时段不能同时充电和放电； $\beta^c$ 、 $\beta^d$  是蓄电池的充电效率和放电效率； $P_t^{ch}$ 、 $P_t^{dch}$  是蓄电池在第  $t$  个调度时段的充电功率和放电功率；式(3-16)中的  $S^{\min}$ 、 $S^{\max}$  依次是蓄电池 SOC 的最小值和最大值；式(3-17)、式(3-18)将蓄

电池的充电功率、放电功率控制在合理的范围内，其中， $P^{ch.max}$ 、 $P^{dch.max}$  是蓄电池的最大充电功率和最大放电功率。

### 3.3.2.3 蓄电池容量配置约束

系统的蓄电池容量配置约束是指在系统的优化中，蓄电池的最大配置容量不能大于系统所规定的设备安装容量限制，以符合家庭的物理空间限制，如式(3-19)所示：

$$0 \leq C_a \leq C_a^{max} \quad (3-19)$$

式中： $C_a$ 为家庭蓄电池的总容量， $C_a^{max}$ 为家庭允许的最大蓄电池容量。

家庭综合能源系统的蓄电池容量优化模型考虑了蓄电池配置容量、蓄电池运行特性以及系统的运行特性约束，决策变量为蓄电池的配置容量和气电两用设备总能耗中的耗电与耗气比例。

## 3.3 区间优化模型的确定性转换

基于区间优化的家庭综合能源系统蓄电池容量的优化问题，实际是不确定性优化问题。为了求解这个问题，有学者利用两层嵌套的转换方法，将不确定性优化模型转变为确定性模型<sup>[75]</sup>，确定性模型可以通过启发式算法求解。但这种方法的过程繁琐，且求解家庭综合能源系统的蓄电池容量优化配置时运算量较大。为此，本章节使用过程较简单的区间优化方法，把家庭综合能源系统的不确定优化模型转换成确定性模型，以便问题的求解。

### 3.3.1 区间序关系简介

在基于区间不确定性优化中，区间序关系用于确定某个区间能否优于或劣于另一区间。针对每个区间变量，目标函数的取值都是在一个不确定性区间范围。所以在区间优化过程中，对比各个区间变量下目标函数区间之间的大小，以便寻求到最佳的决策区间变量。家庭综合能源系统蓄电池容量优化配置的目标是使等年值费用最少。关于目标函数值最优问题，本章节通过用户对区间中点值和区间半径的偏好程度，来确定区间数的大小。区间数的中点 $A^C$ 和半径 $A^W$ 都能反映区间的优劣程度，现设 $A^I$ 和 $B^I$ 是最小化问题的两个可行目标值区间，并 $A^C$ 小于且等于 $B^C$ 。如下式所示：

$$A^C \leq B^C \quad (3-20)$$

现将 $A^W$ 和 $B^W$ 分为以下两种情形加以对比讨论：第一种情形， $A^I$ 的中点与

半径都小于  $B^l$ ，并且  $A^l$  的半径同样小于  $B^l$ ，则可以直接得到区间  $A^l$  优于  $B^l$  的结果；第二种情形， $A^l$  的中点值比较小，但比较半径值  $A^w$  与  $B^w$ ， $A^w$  大于  $B^w$ ，在这种情形下，无法比较优劣程度。所以，针对后面那种情形需要家庭用户来选择对 midpoint 与半径的偏好程度。

关于第二种情形，可以定义  $A^r = \{(B, A) | A^c \leq B^c, A^w > B^w\}$ ，其概率  $P(A^r)$  是拒绝  $A^l$  接受  $B^l$  的概率，为  $A^l$  的拒绝度。 $P(A^r)$  公式表示如下：

$$P(A^r) = \begin{cases} 1 & B^c = A^c \\ \frac{(A^r - B^w) - B^c}{(A^r - B^w) - A^c} & A^c \leq B^c \leq A^r - B^w \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-21)$$

由上式(3-21)可以得到， $P(A^r)$  的数值根据  $B^c$  和  $B^w$  的增加而减少。如果  $P(A^r)=1$ ，则表示全部被拒绝；如果  $P(A^r)=0$ ，则  $A^l$  表示全部被接受；如果  $P(A^r) \in (0,1)$ ，则  $P(A^r)$  反映了  $A^l$  被拒绝的程度。

现设立一个临界值  $\xi$ ， $\xi$  反映家庭用户对区间中点和区间半径的偏好程度，并规定当  $P(A^r)$  大于  $\xi$  时接受  $B^l$ ，但是拒绝  $A^l$ ，其区间序关系可表示如下：

- 1) 当  $P(A^r) > \xi$  时， $B^l$  优于  $A^l$ 。
- 2) 当  $P(A^r) < \xi$  时， $A^l$  优于  $B^l$ 。
- 3) 当  $P(A^r) = \xi$  时， $B^l$  等于  $A^l$ 。

根据区间序关系定义可以得到：若  $\xi = 0$ ，表示对于任意  $B^l$ ，只要  $B^w < A^w$ ，则  $B^l$  优于  $A^l$ ， $A^l$  被拒绝，这种情形下家庭用户只关注半径的大小，而不关注中点的大小；若  $\xi = 1$ ，表示对于任意  $B^l$ ，只要  $B^c > A^c$ ，则  $A^l$  优于  $B^l$ ， $A^l$  被接受，此时家庭用户可以只考虑区间中点的大小。总之， $\xi$  设定的数值愈大，家庭用户对中点的偏好程度愈多，对半径的偏好程度愈少。

因此， $A^l$  与  $B^l$  的比较可以转换为  $P(A^r)$  与  $\xi$  的大小比较。可以将区间中点和区间半径的求解公式(2-4)、式(2-5)代入式(3-21)， $P(A^r) < \xi$  可转化为：

$$A^c + (\xi - 1)A^w < B^c + (\xi - 1)B^w \quad (3-22)$$

若式(3-22)正确，则以下 3 种情况成立。

- 1) 若  $A^w > B^w$ ，则  $A^c < B^c$ ， $P(A^r) < \xi$ ， $A^l$  优于  $B^l$ 。
- 2) 若  $A^w < B^w$ ，且  $A^c < B^c$ ，归属于第一种情况， $A^l$  优于  $B^l$ 。
- 3) 若  $A^w < B^w$ ，且  $A^c > B^c$ ，从式(3-22)可得出  $P(B^r) > \xi$ ，拒绝  $B^l$ ， $A^l$  优于  $B^l$ 。

基于以上的分析，式(3-22)可以用来作为充分必要条件，来判断区间  $A^l$  和  $B^l$  的优劣程度。

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/487155141052006031>