

政府与社会资本合作模式下的综合能源系统服务模式优选方法

曹斯明¹, 吴怡¹, 曹凯¹, 陈猛¹, 周苏洋², 邹风华²

(1. 国网江苏省电力有限公司 扬州供电分公司, 江苏 扬州 225000; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:随着能源互联网技术的发展,开展综合能源服务成为电力企业适应能源体制改革的重要途径。基于我国现行的政府与社会资本合作模式,从工程投资建设角度,总结并提出了适用于综合能源系统的服务模式。通过深入分析综合能源项目在不同服务模式下的运营环节和运作方式,提出了综合能源系统服务模式的选择方法,并建立了基于改进模糊综合评价法的服务模式评价体系,从而对服务模式初选结果进行再优选。通过实际案例分析验证了所提优选方法的合理性和准确性,为综合能源服务建设和项目管理评估的完善提供了又一种有效方法。

关键词:综合能源系统;服务模式;政府与社会资本合作模式;模糊综合评价;项目评估;项目管理

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102014

0 引言

随着新一轮能源革命的不断深入,综合能源系统成为我国能源电力系统转型的重要发展方向,建设多能互补的综合能源系统、开展多元化的综合能源服务是提高能源综合利用效率、推进国家电网“三型两网”建设的重要途径^[1]。国家电网公司发布的《推进综合能源服务业务发展2019—2020年行动计划》中也明确提出了重点开展综合能效服务、供冷/热/电多能服务等综合能源服务业务。

目前,国内外对综合能源系统的物理结构^[2]、建模方法^[3]、优化算法^[4]、工程示范情况^[5-6]已进行了较为深入的研究,也对综合能源服务领域的发展现状、业务分类、商业模式进行了初步的研究^[7]。从配售电业务的角度,国外能源公司的商业运营模式主要包括配售电一体化模式、供销合作社模式、能源综合服务模式、售电折扣模式等7种模式;国内以南方电网综合能源公司为典型,从工程投资建设角度,将商业运营模式分为建设-运营-移交BOT(Build-Operate-Transfer)模式、建设-拥有-运营-移交BOOT(Build-Own-Operate-Transfer)模式、合同能源管理EMC(Energy Management Contract)模式、政府与社会资本合作PPP(Public-Private Partnership)模式等6种模式^[7]。而根据我国财政部印发的《政府和社会资本合作模式操作指南》中的定义,PPP模式包括了BOT和建设-拥有-运营BOO(Build-Own-Operate)等模式。并且随着中国经济发展进入新常态,公众对能源基础设施和服务的需求不断提高,政

府财政压力巨大,地方债务形式严峻,亟需通过PPP模式调动社会资本参与能源基础设施和服务建设^[8]。我国电力建设与供应的非竞争性和非排他性,使得其具有公共产品的特征,2017年国家能源局发布的《微电网管理办法》征求意见稿中也明确提出,鼓励地方政府和社会资本合作,以特许经营等方式开展微电网项目的建设和运营。目前,国内外对PPP模式在电力项目应用的研究较少^[9-10],已有研究仅从国内外已开展的综合能源具体业务出发,对各类业务进行概念性的阐述和归纳。同时综合能源服务处于初期起步阶段,江苏省电力公司和浙江省电力公司等国内著名电力企业为适应客户多元化用能需求,正大力打造综合能源服务相关平台,亟需开展综合能源系统服务模式及相关数据分析和挖掘研究。但目前国内外尚未提出统一的综合能源系统服务模式定义,对于具体的综合能源项目在识别和筹备阶段采用何种特定的服务模式以及该模式下各参与主体所需要承担的风险缺乏筛选、识别和评估手段,并未建立适用于综合能源系统服务模式选择和评估的理论体系。

为此,本文在国内外相关研究的基础上,针对新兴综合能源服务领域,从工程投资建设角度,基于我国现行的PPP模式,对综合能源系统服务模式的定义进行了总结,创新性地提出了适用于综合能源系统的服务模式及其选择方法,深入分析了综合能源项目在不同服务模式下的运营环节和运作方式;建立了基于改进模糊综合评价法的服务模式评价体系,从而对服务模式初选结果进行再优选;通过实际案例分析验证了优选方法的合理性和准确性,为综合能源服务进一步开展和完善提供了借鉴和参考。

收稿日期:2020-06-04;修回日期:2020-12-14

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019089)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(J2019089)

1 综合能源系统服务模式

1.1 综合能源服务的基本概念

目前综合能源服务在国内外尚无统一定义,主流观点是综合能源服务包括2个层次^[7]:一是指涵盖电力、天然气、冷、蒸汽和热水等多种能源的综合能源;二是指包含工程规划建设、投融资选择、咨询服务、运营维护等服务的综合服务。综合能源层次概念图见附录A图A1,综合服务层次概念图见附录A图A2。

综合能源服务涉及能源供应、能源传输、终端能源使用等多个方面,涵盖能源基础设施建设服务、能源销售业务、分布式能源服务、节能减排服务、需求响应服务和金融衍生服务等不同类型的能源业务。

1.2 PPP模式下的综合能源系统服务模式

基于国家能源局发布的《微电网管理办法》征求意见稿,鼓励地方政府和社会资本合作,以特许经营等方式开展微电网项目的建设和运营。本节将从工程投资建设角度,在我国现行的PPP模式下,对综合能源系统服务模式进行分类和总结。

1.2.1 PPP模式分类

PPP本身是一个非常宽泛的概念,由于世界各国的政治、经济发展水平不同,对于PPP术语的理解不尽相同,联合国培训研究院、欧盟委员会、美国PPP国家委员会、世界银行等组织,从广义和狭义的角度,给出了不同的定义和分类^[11]。我国发展改革委发布的发改投资[2014]2724号文件中指出,我国官方统一采用的PPP中文翻译为“政府与社会资本合作”^[12]。本文所涉及的PPP的概念,可理解为广义的PPP,指公共部门和私人部门为提供公共产品或服务而建立的合作关系,该合作关系涉及项目全生命周期内的各个环节,包括设计、投融资、建设、运营、维护和移交等环节。

目前,我国尚缺乏从立法层面出发,结合我国国情,对现行的PPP模式进行官方的、完整的分类和总结,国内普遍认可的PPP分类法为三级分类法^[11-12],如附录A图A3所示。

PPP三级分类法将PPP模式分为外包(outsourcing)类、特许经营(concession)类和私有化(divestiture)类三大类。其中外包类又分为模块式外包和整体式外包,模块式外包中含有管理外包MC(Management Contract)和服务外包SC(Service Contract);整体式外包中含有委托运营O&M(Operation & Maintenance)和设计-建造-运营DBO(Design-Build-Operate)。特许经营类可细分为BOT、转让-运营-移交TOT(Transfer-Operate-Transfer)、设计-建设-融资-运营DBFO(Design-Build-Finance-Operate)等模式,而私有化类可再细分为完全私有化和部分私有

化2种。

1.2.2 综合能源系统服务模式

根据财政部政府和社会资本合作中心于2016年上线推出的全国PPP综合信息平台的统计数据^[13],截至2020年1月末,全国PPP综合信息平台入库并公开的能源领域项目总计为129个,总投资额为675.01亿元,其中涉及能源基础设施建设服务、分布式能源服务、节能减排服务等综合能源服务的项目共计17个,各项目所采用的服务模式主要有BOT、改建-运营-移交ROT(Rehabilitate-Operate-Transfer)、TOT、BOO等模式。本文所提综合能源系统服务模式的概念指的是在我国现行PPP模式下,适用于综合能源系统项目的服务模式,针对的是综合能源服务概念的综合服务层次。

结合国内目前的综合能源领域工程现状^[7],常见的综合能源系统服务模式可归类为8种,包括MC、O&M、租赁-运营-移交LOT(Lease-Operate-Transfer)、BOT、建设-转让BT(Build-Transfer)、TOT、ROT和BOO模式,常见综合能源系统服务模式的分类图见附录A图A4。

(1)模式1:MC模式。

MC模式是指由政府授权,私人部门或项目公司负责提供存量公共资产的运营管理、维护和用户服务等服务的模式,资产所有权属于政府,社会资本通过政府支付管理费的方式实现收益。

(2)模式2:O&M模式。

O&M模式与MC模式类似,但项目公司只负责资产的运营维护,不负责用户服务,通过委托运营费实现收益。

(3)模式3:LOT模式。

LOT模式同时适用于存量和新建项目,项目公司负责资产的运营、维护和用户服务,从广义上隶属于MC模式。

(4)模式4:BOT模式。

BOT模式是指由项目公司负责新建项目的设计、建设、运营、维护和用户服务,合同期满后项目资产移交政府的模式。

(5)模式5:BT模式。

BT模式实际上是BOT模式的演变,区别在于BT模式下,项目公司不承担运营维护的职责和风险,项目建设完成后直接移交政府,适用于政府资金紧张的情况。

(6)模式6:TOT模式。

TOT模式是指项目公司负责存量资产的运营、维护及用户服务,项目公司对该资产的所有权由政府有偿转让所得,合同期满后资产移交政府的模式。

(7)模式7:ROT模式。

ROT模式基于TOT模式,资产的扩建也交由项

目公司负责。

(8)模式8:BOO模式。

BOO模式实际上是BOT模式的演变,区别是BOO模式下,资产所有权归私人部门或项目公司所有,并且不涉及项目的期满移交问题。

各服务模式在产权归属、投资方选择、经营维护方选择和风险承担方面的特征如表1所示。

表1 常见综合能源系统服务模式的特征

Table 1 Characteristics of common service mode for integrated energy system

服务模式	产权归属	投资方	经营维护方	风险承担
MC / LOT	政府	政府	私人部门	政府
O&M	政府	政府	私人部门	政府
BOT	政府或私人部门	私人部门	私人部门	私人部门
BT	政府	私人部门	私人部门	私人部门
TOT	政府	私人部门	私人部门	私人部门
ROT	政府	私人部门	私人部门	私人部门
BOO	私人部门	私人部门	私人部门	私人部门

由表1可知,这几种模式的相同之处在于项目的经营维护职责均由私人部门或者电力企业承担,不同之处主要体现在产权归属、投资和风险承担方面。各模式的优势与不足之处比较如表2所示。

表2 综合能源系统服务模式的优势与不足

Table 2 Advantages and disadvantages of service modes for integrated energy system

服务模式	优势	不足
MC / LOT	引进私人部门的专业服务,减轻政府运营压力,降低私人部门建设融资风险	政府建设融资成本高
O&M	有利于提高项目运营维护效率,不涉及用户服务,节约成本	运营维护职责外包毁约的风险成本较高
BOT / BOO	减轻政府融资和外债压力,降低政府风险,通过财政优惠降低私人部门成本	私人部门融资成本高、投资周期长、收益不确定性大
BT	缓解政府资金紧缺状况,加快建设步伐,拓宽私人部门投资渠道,降低私人部门市场竞争压力,提供私人部门持续发展的机会	容易造成地方政府盲目举债,加大政府财政压力,私人部门未参与运营,项目收益性和可靠性较低
TOT	不包含项目建设环节,免去建设风险,降低项目运转周期和融资复杂性,盘活政府存量项目	融资过程中的资产转让、资产评估等环节较为耗时,政府需加强项目监管力度
ROT	引入私人部门的先进技术,改造政府老旧设施项目,提高项目盈利性	对资产评估环节准确性要求较高,私人部门需承担较高建设风险

由表2可知,由于所涉及的项目运作方式和运营环节不同,不同的服务模式具备不同的优势。其中BT模式容易造成地方政府盲目举债,并且私人部门或电力企业并未参与运营环节,项目收益性和可靠性较低,所以尽管BT模式在国内依旧存在,但近年来BT模式出现在电力项目筹备应用中的次数已越来越少。

同时,由于我国PPP模式的分类仍处于不断演变的过程中,模式相关的政策文件存在出台时间和内容上的不连续性,财政部下发的《政府和社会资本合作模式操作指南》也仅采用列举法提出适合我国国情的PPP模式。因此,本节根据的是已施行并公布的综合能源实际工程,基于PPP模式,列举了常见的综合能源系统服务模式分类,并对具体模式的定义进行了阐释。

2 服务模式的选择

根据第1节提出的常见综合能源系统服务模式,对于一个尚未实施的、已规划好的综合能源项目,如何选择最适合该项目的服务模式,目前在国内尚无详细的研究^[14],本节将从新建项目和存量项目的角度,对综合能源项目进行归类,对服务模式进行识别,并给出综合能源项目服务模式的初步选择方法。

2.1 服务模式识别

国家发改委发布的发改投资[2016]2231号文件^[14]中指出,可从PPP项目是否已建设或存在的角度,将PPP项目分为新建项目和存量项目。对于新建项目,建议优先采用BOT、BOOT、BOO、设计-建设-融资-运营-移交DBFOT(Design-Build-Finance-Operate-Transfer)等模式;对于存量项目,建议优先采用ROT模式。但也鼓励根据项目特点和地方实际情况,灵活运用各种模式。

依据以上准则,对常见的综合能源项目进行服务模式的识别,识别结果如表3所示。

表3 综合能源项目服务模式识别结果

Table 3 Recognition results of service mode for integrated energy projects

综合能源项目类型	服务模式识别结果
新建项目	BOT、BT、BOO、LOT
存量项目	MC、O&M、TOT、ROT

由表3可知,对于新建综合能源项目,可优先选择BOT、BT、BOO、LOT模式;对于存量综合能源项目,可优先考虑MC、O&M、TOT、ROT模式。

2.2 服务模式初步选择

不同的服务模式所采用的运作方式不同,所涉及的项目全生命周期环节不同,需要权衡项目自身特点、项目风险和收益、政府财政能力、产权归属等多种因素,现有的方法较为复杂^[15]。为了在综合能源项目筹备阶段能够方便、快捷地筛选出考虑项目运作方式、适合项目自身特点的服务模式类别,本节将根据财政部PPP研究中心给出的PPP运作模式进行详解^[16]。基于上文初步识别得到的服务模式结果,给出了综合能源系统服务模式的初步选择方法,具体流程如图1所示。

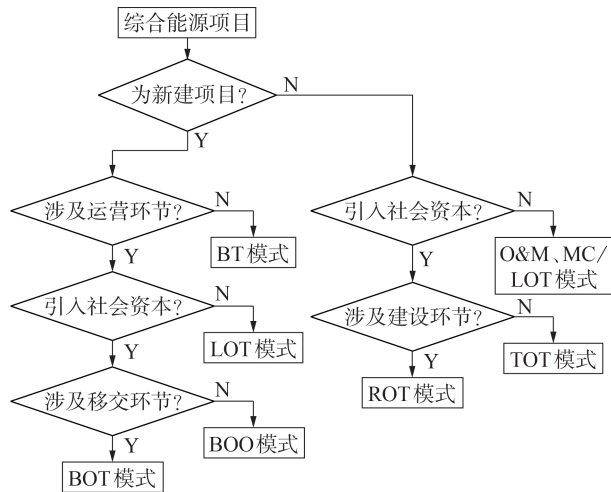


图1 综合能源系统服务模式选择流程图

Fig.1 Flowchart of service mode selection for integrated energy system

对于一个具体的综合能源项目,首先判断其是否为新建项目,若是则判断项目运作过程是否会涉及运营环节,若不涉及则建议采用BT模式,若涉及则进一步判断是否引入社会资本参与项目建设,若不引入则建议采用LOT模式,若引入则判断项目合作期满是否移交,若移交则建议采用BOT模式,若不移交则建议采用BOO模式。当综合能源项目为存量项目时,判断是否引入社会资本,若不引入则建议采用O&M模式或MC/LOT模式,若引入则进一步判断项目运作过程是否涉及建设环节,若涉及建设环节则建议采用ROT模式,若不涉及则建议采用TOT模式。

3 基于模糊综合评价的服务模式评价

基于第2节提出的服务模式选择方法,对于一个具体的综合能源项目,服务模式的初步选择结果可能不唯一。由图1可知,当运作环节相同时,某存量项目的服务模式可以选择O&M或MC/LOT模式;当运作环节可选,即某新建项目既可以采用涉及期满移交过程的BOT模式,也可以采用不涉及移交过程的BOO模式时,导致服务模式初步选择存在多个结果。而当项目信息充足、环节清晰,服务模式的初选结果唯一时,仍需要对该项目在初步优选的服务模式下的经济性和风险性等因素进行进一步的评估。针对以上情况,本节将提出基于改进模糊综合评价法的服务模式评价方法,从项目本身性质和项目风险的角度对综合能源系统服务模式进行评价,所得评价结果或评价得分可为服务模式的最终确定提供可行性理论支持。

对综合能源系统服务模式的评价涉及项目收益率、政策变化、市场竞争、环境保护等多种不确定性因素或指标,使得评价目标具有模糊性。现有的研

究常采用场景分析^[17]、盲信息评价^[18]等理论解决模糊性问题,但存在场景过多或求解复杂的困难。

本文采用的改进模糊综合评价法通过模糊数学建模,建立由定量和定性综合评价指标构成的模糊指标集合,其中包括2个一级指标以及细分的10个二级指标和28个三级指标,具体评价指标见表4。

表4 综合能源系统服务模式评价指标

Table 4 Evaluation indicators of service mode for integrated energy system

一级指标	二级指标	三级指标
项目性质 u1 (定量指标)	经营性 u11	财务内部收益率 u111 静态投资回收期与合作期长度的比值 u112
		环保性 u12
	政治风险 u21	节能系数 u121 立项、审批 u211 政府信用 u212 政府干预 u213
		市场需求程度 u221 市场竞争 u222 融资可行性 u223 通货膨胀 u224
项目风险 u2 (定性指标)	建设风险 u23	设计风险 u231 技术性风险 u232 完工风险 u233 施工安全 u234
	运营风险 u24	收入低于预期 u241 运营成本超支 u242 组织协调风险 u243 国家运维服务标准改变 u244
	移交风险 u25	第三方延误或违约 u251 政府付费风险 u252 工程质量要求 u253
	合同管理风险 u26	项目公司违约 u261 运维单位违约 u262 政府部门违约 u263
	法律风险 u27	税收政策变化 u271 行业规则变化 u272
	不可抗力风险 u28	自然灾害 u281 战争动乱 u282

先设定由多级决策评语构成的模糊评语集合,根据模糊集合理论^[19]建立模糊一致判断矩阵,并通过解析法^[20]求取各指标权重,再构建改进隶属度函数计算评价指标对决策评语的隶属度,最后通过合成模糊综合评价结果矩阵输出服务模式的评价得分。模糊一致判断矩阵的详细构建方法见附录B。

(1)模糊评语集和定量指标等级划分。

评语集的划分方式有多种,本文依据财政部政府和社会资本合作中心给出的物有所值VFM(Value For Money)价值理论^[13],采用“有利”、“较有利”、“一般”、“较不利”和“不利”5种模糊评价等级对综合能源项目可行性进行划分,若项目A最终评

价等级为“有利”,则表明项目A在采用当前服务模式进行项目建设是有利的。并设置了相对应的评价得分和风险等级,模糊评语集如表5所示。

表5 模糊评语集

Table 5 Fuzzy comment set

评价等级	评价得分/分	风险等级	评价等级	评价得分/分	风险等级
不利	[0,20)	高	较有利	[60,80)	低
较不利	[20,40)	较高	有利	[80,100]	较低
一般	[40,60)	一般			

同时,本文根据财政部综合信息平台公示的实际能源项目数据^[13],选取的定量评价指标包括财务内部收益率、静态投资回收期与合作期长度的比值、节能系数这3种,但不仅限于此。根据具体综合能源项目所能获取的相关数据,可合理增加定量评价指标。定量指标与模糊评价等级的划分原则见表6。

表6 定量指标的评价等级划分原则

Table 6 Partition criterion of evaluation scale on quantitative index

评价等级	财务内部收益率	静态投资回收期与合作期长度的比值	节能系数
不利	<2%	>1	<1%
较不利	[2%,4%)	[0.8,1]	[1%,5%)
一般	[4%,6%)	[0.6,0.8)	[5%,10%)
较有利	[6%,10%]	[0.4,0.6)	[10%,20%]
有利	>10%	<0.4	>20%

(2) 评价指标权重确定。

对于定性指标,本文采用附录B式(B2)所示方法求得定性指标的主观权重,省去了传统评价分析方法如层次分析法求权过程中一致性检验的复杂、耗时过程^[19]。

对于定量指标,本文采用结合熵值定权法的主客观组合定权法。对于有 n 个指标 m 个评价对象的矩阵 $D=(d_{ij})_{n \times m}$ ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$),其中 d_{ij} 为第 j 个评价对象用第 i 个指标评价得到的评价值得,则第 i 个指标的熵值 S_i 计算公式如下:

$$\begin{cases} S_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m s_{ij} \ln s_{ij} \\ s_{ij} = t_{ij} / \sum_{j=1}^m t_{ij} \\ t_{ij} = \frac{\max_j d_{ij} - d_{ij}}{\max_j d_{ij} - \min_j d_{ij}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, t_{ij} 和 s_{ij} 为熵值计算的中间变量。

设 δ_i 为第 i 个指标的客观权重, w_i 为第 i 个指标的主观权重, w'_i 为第 i 个指标的组合权重,则有:

$$\begin{cases} w'_i = \frac{w_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n w_i \delta_i} \\ \delta_i = \frac{1 - S_i}{n - \sum_{i=1}^n S_i} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 评价指标的隶属度函数。

对综合能源系统服务模式进行评价时,评价指标与评语集的模糊对应关系可通过隶属度函数表示,常见的隶属度函数包括三角形函数、梯形函数和正太分布函数等。本文采用附录B式(B3)—(B5)所示的岭型隶属度函数对定量指标与评价集的模糊关系进行刻画。

定性指标对模糊评语集的隶属度采用专家投票的方式确定,设评语等级为 $C_j=[c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m]$ ($j=1,2,\dots,m$),则第 i 个定性指标对应评语等级 C_j 的隶属度函数为 L_i 为:

$$L_i = [l_{i1} \ l_{i2} \ \dots \ l_{im}] \quad (3)$$

$$l_{ij} = \frac{N_{ij}^i}{N_{\text{sum}}} \quad (4)$$

其中, l_{ij} 为第 i 个定性指标对第 j 个评语等级的隶属度; N_{ij}^i 为第 i 个定性指标选择等级 r_j 的人数; N_{sum} 为参与评价的总人数。

最后,采用加权平均模型计算模糊综合评价向量 T ,计算公式如下:

$$T = WL = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n] \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1m} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, W 为指标权重合成向量; L 为隶属度合成向量。

4 算例分析

根据财政部综合信息平台公示的能源领域项目数据^[13],选取了以下4个综合能源服务领域项目:项目1,江苏某江水源热泵区域供冷供热系统项目;项目2,江苏某城区供热配套管网工程项目;项目3,浙江某工业园热电联产项目;项目4,山东某太阳能集中发电项目。并对其进行服务模式选择和综合评价,项目原始数据见附录C表C1。

4.1 服务模式选择

基于财政部综合信息平台公示的项目数据^[12],项目1中,项目公司负责江水源热泵系统的投资、建设、运营并收取相应的供冷供热费用,期满移交政府或政府指定单位管理。根据图1所示的服务模式优选流程,项目1属于新建项目,并引入社会资本和移交环节,建议采用BOT模式。项目2中,项目公司利

用存量建设用地建设热力站、蒸汽管网、热力管道等配套设施,涉及征地、投资、工程建设、存量资产移交等一系列配套工作。根据图 1 所示的服务模式优选流程,项目 2 属于存量项目,并引入社会资本和建设环节,建议采用 ROT 模式。项目 3 中,项目公司负责融资、建设和项目设施的运营维护,合作期满移交政府或政府指定单位管理。根据图 1 所示的服务模式优选流程,项目 3 属于新建项目,建议采用 BOT 模式。项目 4 中,项目公司负责投融资、建设、运营维护等工作,资产所有权归社会资本方所有,不涉及移交环节。根据图 1 所示的服务模式优选流程,项目 4 属于新建项目,建议采用 BOO 模式。

4.2 指标权值计算

以项目 1 为例,根据表 C1 的数据,首先计算定量指标分级权重。

(1) 定量指标权重计算。

根据附录 B 表 B1 所示的数量标度准则,构建三级定量指标财务内部收益率 u_{111} 、静态投资回收期与合作期长度的比值 u_{112} 的模糊互补判断矩阵 U_{11} 为:

$$U_{11} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式 (B2) 可得三级定量指标主观权重 w_{11} 为:

$$w_{11} = [0.45 \quad 0.55] \quad (7)$$

由式 (2) 可得三级指定定量标组合权重 w'_{11} 为:

$$w'_{11} = [0.4569 \quad 0.5431] \quad (8)$$

同理可得二级定量指标经营性 u_{11} 和环保性 u_{12} 的权重 $w_1 = [0.625 \quad 0.375]$ 。

(2) 定性指标权重计算。

以二级定性指标融资风险 u_{22} 为例,其包含三级定性指标市场需求程度 u_{221} 、市场竞争 u_{222} 、融资可行性 u_{223} 和通货膨胀 u_{224} 。首先构建三级定性指标的模糊互补判断矩阵 U_{22} 为:

$$U_{22} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.3 & 0.7 \\ 0.5 & 0.7 & 0.5 & 0.8 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式 (B2) 可得三级定性指标主观权重 w_{22} 为:

$$w_{22} = [0.2833 \quad 0.2417 \quad 0.1833 \quad 0.2917] \quad (10)$$

同理可计算二级定性指标权重,依此类推,可得服务模式评价指标权重如表 7 所示。

4.3 指标隶属度计算

(1) 定量指标隶属度计算。

以项目 1 为例,根据附录 B 式 (B3) — (B5) 可得三级定量指标 u_{111} 、 u_{112} 对评语等级的隶属度 L_{11} 为:

$$L_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0949 & 1 & 0.9045 \\ 0 & 0 & 0.3955 & 1 & 0.6045 \end{bmatrix} \quad (11)$$

表 7 服务模式评价指标及其权重

Table 7 Evaluation indicators and their weights of service mode

一级指标	二级指标	三级指标
$u_1(0.6)$	$u_{11}(0.625)$	$u_{111}(0.4569)$
		$u_{112}(0.5431)$
	$u_{12}(0.375)$	$u_{121}(1)$
		$u_{211}(0.4)$
	$u_{21}(0.1125)$	$u_{212}(0.3)$
		$u_{213}(0.3)$
		$u_{221}(0.2833)$
		$u_{222}(0.2417)$
	$u_{22}(0.1482)$	$u_{223}(0.1833)$
		$u_{224}(0.2917)$
$u_2(0.4)$	$u_{23}(0.1464)$	$u_{231}(0.275)$
		$u_{232}(0.275)$
		$u_{233}(0.225)$
		$u_{234}(0.225)$
	$u_{24}(0.1464)$	$u_{241}(0.2917)$
		$u_{242}(0.2917)$
		$u_{243}(0.2333)$
		$u_{244}(0.1833)$
	$u_{25}(0.1393)$	$u_{251}(0.333)$
		$u_{252}(0.3)$
		$u_{253}(0.367)$
	$u_{26}(0.1196)$	$u_{261}(0.333)$
		$u_{262}(0.35)$
		$u_{263}(0.317)$
	$u_{27}(0.1054)$	$u_{271}(0.55)$
		$u_{272}(0.45)$
	$u_{28}(0.0822)$	$u_{281}(0.6)$
		$u_{282}(0.4)$

同理可得三级定量指标 u_{121} 的隶属度 L_{12} 为:

$$L_{12} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1] \quad (12)$$

(2) 定性指标隶属度计算。

定性指标对模糊评语集的隶属度采用专家投票的方式确定,以三级定性指标 u_{221} 、 u_{222} 、 u_{223} 、 u_{224} 为例,由式 (4) 可得三级定性指标隶属度 L_{22} 为:

$$L_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1333 & 0.5333 & 0.3333 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5333 & 0.4667 \\ 0 & 0.5333 & 0.4667 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

同理可计算得到其他定性指标隶属度。

4.4 模糊综合评价结果计算

由上述计算结果 L_{22} 、 w_{22} , 根据式 (5) 可得二级指标融资风险 u_{22} 的模糊评价向量 $T_{22} = w_{22} L_{22}$, 并对 T_{22} 进行归一化得 T'_{22} 。

同理可计算其他剩余二级指标评价向量,组合得到一级指标项目风险 u_2 的模糊评价矩阵 T'_2 为:

$$T'_2 = [T'_{21} \quad T'_{22} \quad T'_{23} \quad T'_{24} \quad T'_{25} \quad T'_{26} \quad T'_{27} \quad T'_{28}]^{-1} \quad (14)$$

由表 7 可知二级定性指标权重 w_2 为:

$$w_2 = [0.1125 \quad 0.1482 \quad 0.1464 \quad 0.1464 \quad 0.1393 \quad 0.1196 \quad 0.1054 \quad 0.0822] \quad (15)$$

则一级指标 u_2 的模糊评价矩阵 $T_2 = w_2 T'_2$, 并对 T_2 进行归一化, 得到项目风险指标 u_2 的一级模糊评价矩阵 Y_2 为:

$$Y_2 = [0.0393 \ 0.0789 \ 0.1270 \ 0.2731 \ 0.4817] \quad (16)$$

同理可得项目性质指标 u_1 的一级模糊评价矩阵 Y_1 为:

$$Y_1 = [0 \ 0 \ 0.1701 \ 0.4487 \ 0.3812] \quad (17)$$

由表7可知一级指标权重 w_0 , 则项目1的最终模糊综合评价结果矩阵为:

$$Y = w_0 \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = [0.6 \ 0.4] \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

项目1的最终模糊综合评价得分为:

$$P_1 = [20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100] Y^T \approx 83.165 \text{ 分} \quad (19)$$

同理可计算得到项目2—4的模糊综合评价得分。各项目服务模式优选和评价结果如表8所示。

表8 服务模式优选和评价结果

Table 8 Results of optimal selection and evaluation for service mode

项目	模式优选结果	模糊综合评价得分/分	与VFM得分偏差/%
1	BOT	83.165	3.96
2	ROT	83.309	4.73
3	BOT	80.725	0.47
4	BOO	82.179	2.74

根据4.1节中服务模式选择分析结果, 各项目服务模式的初选结果和表C1中的实际模式保持一致。由表8可知, 各项目在初选服务模式下的模糊综合评价得分均在80分以上, 与财政部信息平台给出的简易VFM定性得分偏差在5%以内, 表明各项目采用优选后的服务模式进行项目建设是“较有利”或“有利”的。结合模式初选结果和项目在初选模式下的评价得分, 各项目的最终优选服务模式与初选结果一致。通过算例验证了服务模式选择和评价方法的可行性和准确性。

5 结论

能源互联网时代下, 向综合能源服务商转变、积极开展综合能源服务成为以电网企业为代表的能源企业适应电力体制改革的迫切需要。本文针对新兴综合能源服务领域, 总结了综合能源系统服务模式的研究现状, 提出了适用于综合能源系统的服务模式及其优选方法, 得到的结论如下:

(1) 所提服务模式优选方法从工程投资建设的角度, 基于我国现行的PPP模式, 解决了具体综合能源项目如何选取特定服务模式的问题;

(2) 所提方法深入分析了综合能源项目在不同服务模式下的运营环节和运作方式, 使得项目管理/建设方在综合能源项目筹备阶段能够方便、快

捷地筛选出适合项目实际需求和自身特点的服务模式类别;

(3) 构建了基于改进模糊综合评价法的服务模式评价指标体系, 对服务模式初选结果进行再优选, 解决了不同服务模式下如何对项目主体所需要承担的风险进行识别和评估的问题, 并通过工程实际案例分析和验证了服务模式优选方法的合理性, 以期对相关项目建设和信息平台开发提供参考和借鉴。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐箴, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7194-7205, 7446.
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205, 7446.
- [2] BARATI F, SEIFI H, SEPASIAN M S, et al. Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for largescale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2527-2537.
- [3] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 171-178.
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.
- [4] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. Energy flow optimization in multicarrier systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(5): 1067-1077.
- [5] 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.
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287.
- [6] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [7] 封红丽. 国内外综合能源服务发展现状及商业模式研究[J]. 电器工业, 2017(6): 34-42.
FENG Hongli. Research on the development status and business model of integrated energy service in china and abroad[J]. China Electrical Equipment Industry, 2017(6): 34-42.
- [8] 周正祥, 张秀芳, 张平. 新常态下PPP模式应用存在的问题及对策[J]. 中国软科学, 2015(9): 82-95.
ZHOU Zhengxiang, ZHANG Xiufang, ZHANG Ping. The existing problems in the application of PPP mode under the new economic normality and their solution[J]. China Soft Science, 2015(9): 82-95.
- [9] 巩玺. 电力建设企业PPP项目的风险识别和应对措施研究[J]. 工程经济, 2016, 26(2): 75-80.
GONG Xi. Research on the risk identification and solutions for the power construction enterprise PPP projects[J]. Engineering Economy, 2016, 26(2): 75-80.
- [10] ATMO G, DUFFIELD C. Improving investment sustainability for PPP power projects in emerging economies: value for mo-

- ney framework[J]. Built Environment Project and Asset Management, 2014, 4(4): 335-351.
- [11] 王灏. PPP的定义和分类研究[J]. 都市轨道交通, 2004(5): 23-27.
WANG Hao. A study on the definition and classification of PPP[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2004(5): 23-27.
- [12] 杨伟东. PPP项目法律实务[M]. 北京: 人民法院出版社, 2017: 86-87.
- [13] 财政部政府和社会资本合作中心. 全国PPP综合信息平台项目库[EB/OL]. (2016-02-29)[2020-05-08]. <https://www.cpppc.org/8082/inforpublic/homepage.html#/projectPublic>.
- [14] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 传统基础设施领域实施政府和社会资本合作项目工作导则[EB/OL]. (2016-10-24)[2020-05-08]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/gdzctz/tzfg/201610/t20161027_1197622.html.
- [15] 张彦春, 王孟钧, 翟松, 等. PPP项目运作方式选择研究[J]. 建筑经济, 2017, 38(1): 32-36.
ZHANG Yanchun, WANG Mengjun, ZHAI Song, et al. Research on the operation mode choosing of PPP projects[J]. Construction Economics, 2017, 38(1): 32-36.
- [16] 黄华珍. 完胜PPP: 融资与建设的全域解析[M]. 北京: 法律出版社, 2016: 78-79.
- [17] 张焰. 电网规划中的模糊可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 78-81.
ZHANG Yan. The evaluation method of fuzzy reliability in electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 78-81.
- [18] 高赐威, 程浩忠, 王旭. 盲信息的模糊评价模型在电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 28-33.
GAO Ciwei, CHENG Haozhong, WANG Xu. The application of fuzzy evaluation of blind information in electric network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 28-33.
- [19] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000(2): 80-88.
ZHANG Jijun. Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000(2): 80-88.
- [20] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001(4): 311-314.
XU Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2001(4): 311-314.

作者简介:



曹斯明

曹斯明(1980—), 女, 江苏扬州人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电网营销和综合能源技术应用(**E-mail**: simingcao81@163.com);

吴怡(1986—), 女, 江苏扬州人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为综合能源技术应用(**E-mail**: yiwu_yangzhou@outlook.com);

曹凯(1982—), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 主要研究方向为综合能源技术应用(**E-mail**: kaicao1980@gmail.com)。

(编辑 李玮)

Optimal selection method for service mode of integrated energy system based on PPP model

CAO Siming¹, WU Yi¹, CAO Kai¹, CHEN Meng¹, ZHOU Suyang², ZOU Fenghua²

(1. Yangzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Along with the development of energy internet technology, promoting the integrated energy service has become an essential approach for facilitating the energy system reform for utility companies. Based on the current PPP(Public-Private Partnership) models in China, the service modes suitable for integrated energy system are summarized and proposed from the perspective of project investment and construction. Through the deep analysis of operation links and operation modes for integrated energy projects under different service modes, the selection method of integrated energy service modes is proposed, and the evaluation system of service modes based on the improved fuzzy comprehensive evaluation method is constructed, so as to optimize the preliminary selection results of service modes again. The rationality and accuracy of the proposed optimal selection method are verified based on the actual case, thus promoting another effective method for the construction of integrated energy service and the improvement of project management evaluation.

Key words: integrated energy system; service mode; public-private partnership model; fuzzy comprehensive evaluation; project evaluation; project management

附 录
附录 A

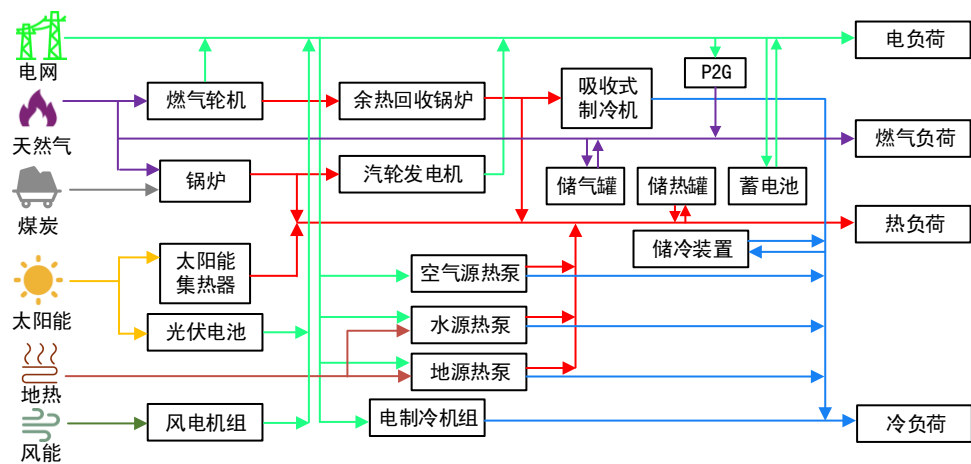


图 A1 综合能源
Fig.A1 Integrated energy

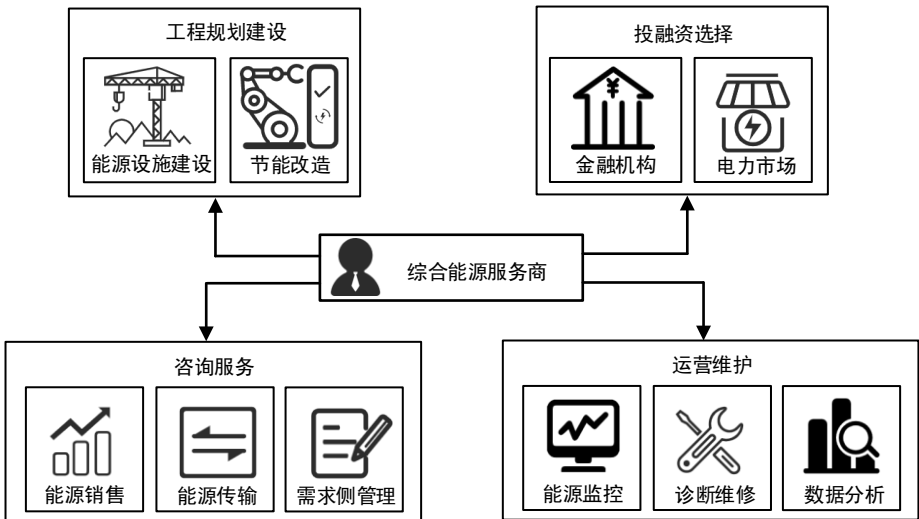


图 A2 综合服务
Fig.A2 Integrated service

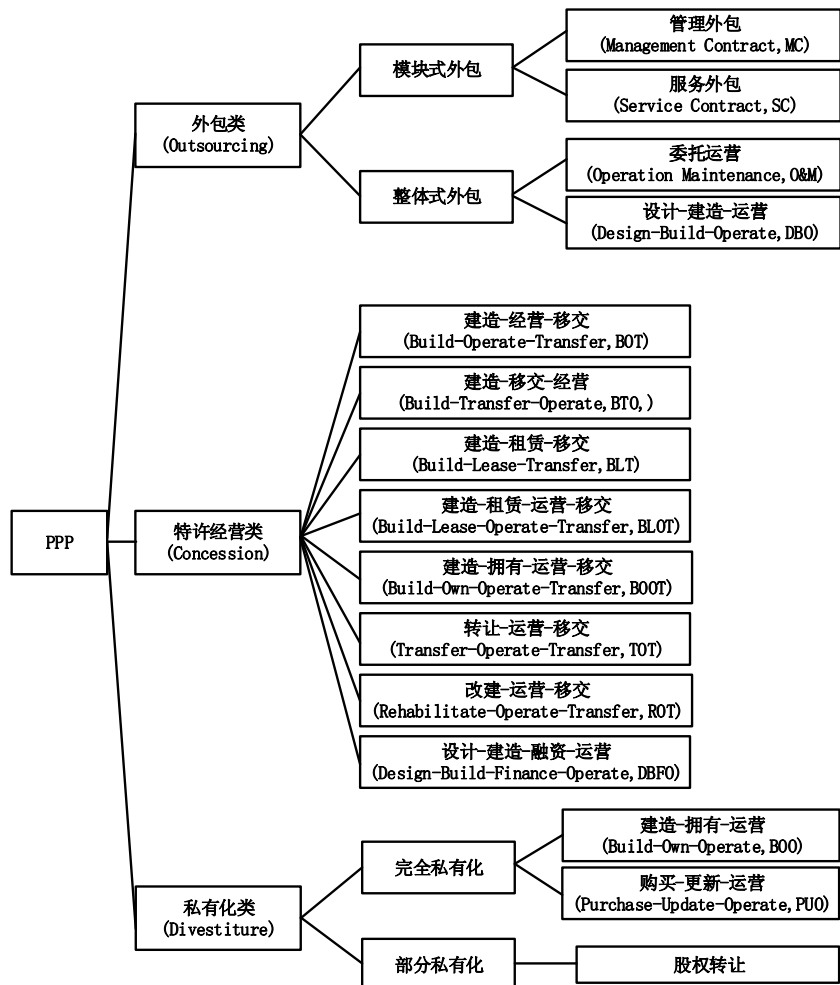


图 A3 PPP 模式分类

Fig.A3 PPP mode classification

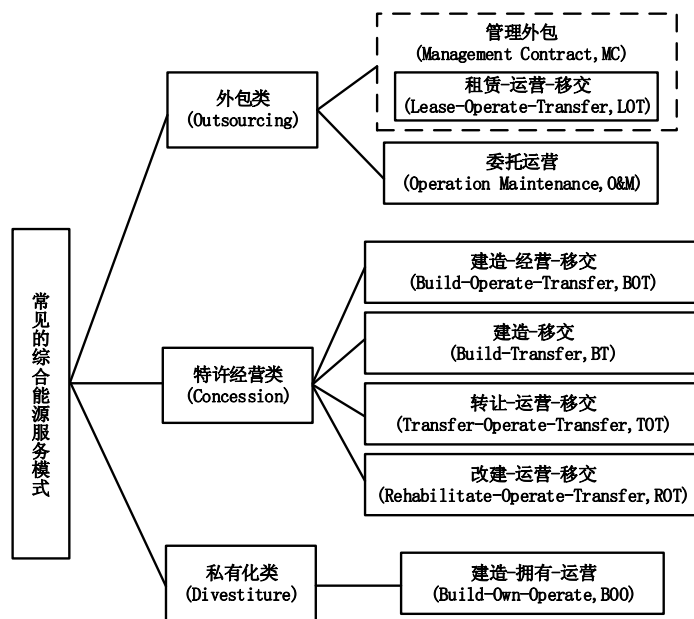


图 A4 常见的综合能源系统服务模式分类

Fig.A4 Common integrated energy service mode classification

附录 B

B.1 模糊一致判断矩阵

设有论域 $P = \{u_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 为指标集，采用 0.1-0.9 数量标度准则来表征指标集元素两两比较重要程度关系，构建模糊互补判断矩阵 $U = (u_{ij})_{n \times n}$ ，其中 u_{ij} 表示指标元素 u_i 和 u_j 的相对重要程度，矩阵 U 中元素满足 $u_{ij} + u_{ji} = 1$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$)。指标元素间的相对重要程度由表 B1 所示的数量标度准则确定。

表 B1 0.1-0.9 数量标度准则
Table B1 0.1-0.9 quantitative scale criterion

标度 u_{ij}	含义	解释
0.5	同等重要	元素 u_i 和元素 u_j 同等重要
0.6	稍微重要	元素 u_i 比元素 u_j 稍微重要
0.7	明显重要	元素 u_i 比元素 u_j 明显重要
0.8	强烈重要	元素 u_i 比元素 u_j 强烈重要
0.9	极端重要	元素 u_i 比元素 u_j 极端重要
若元素 u_i 与元素 u_j 相比所得判断为 u_{ij} ， 0.1/0.2/0.3/0.4 反比较 则元素 u_j 与元素 u_i 相比所得判断为 $u_{ji} = 1 - u_{ij}$		

对互补判断矩阵 U 按行求和，并基于模糊数学理论计算得到模糊一致判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ ，满足如下等式约束：

$$\begin{cases} r_i = \sum_{k=1}^n u_{ik} \\ r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2(n-1)} + 0.5 \end{cases} \quad (B1)$$

其中， r_i 为互补判断矩阵 U 第 i 行按列标准化求和后的中间变量； r_{ij} 表示指标元素 u_i 和 u_j 重要程度的模糊一致判断关系。

由此所得的模糊判断矩阵 R 省去了繁琐、耗时的一致性检验过程，保证了判断矩阵的科学性、合理性。

对所得模糊一致判断矩阵 R 进行行和归一化操作可得矩阵的排序向量，该向量也称为主观权重，即指标集 P 中各元素权重 w_i ：

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}}{\frac{n(n-1)}{2} + \frac{n}{2}} = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (B2)$$

根据互补判断矩阵 U 和模糊一致判断矩阵 R 的数学关系，式 (B2) 的推导表明主观权重 w_i 也可根据判断矩阵 U 直接求解。

B.2 定量指标隶属度函数

指标对应于评价等级“不利”的隶属度函数为：

$$f_0(x) = \begin{cases} 1 & x < x_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_2 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) & x_1 \leq x < x_2 \\ 0 & x \geq x_2 \end{cases} \quad (B3)$$

指标对应于评价等级“较不利”、“一般”、“较有利”的隶属度函数为：

$$f_{1,2,3}(x)=\begin{cases} 0 & x < x_1 \text{或} x \geq x_4 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_2 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) & x_1 \leq x < x_2 \\ 1 & x_2 \leq x < x_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_2 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) & x_3 \leq x < x_4 \end{cases} \quad (\text{B4})$$

指标对应于评价等级“有利”隶属度函数为：

$$f_4(x)=\begin{cases} 0 & x < x_3 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{x_2 - x_1} \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) & x_3 \leq x < x_4 \\ 1 & x \geq x_4 \end{cases} \quad (\text{B5})$$

其中， x 为定量指标数值， x_k ($k=1,2,3,4$) 的取值可根据实际情况，由定量指标评价等级划分准则确定。

附录 C

表 C1 算例数据
Table C1 Example data

项目	实际服务模式	财务内部收益率/%	静态投资回收期/a	合作期长度/a	节能系数/%	VFM 得分/分
1	BOT	9.2	13.3	30	30	80
2	ROT	8.56	12	30	20	87.45
3	BOT	4.54	12.71	30	30	80.35
4	BOO	4.50	6.55	30	50	79.99