

ICS 国际标准分类号

CCS 江苏省标准文献分类号

团 体 标 准

T/JES XXX-XXXX

面向新型电力系统需求侧管理的负荷调 节潜力评估模型技术要求

Technical requirements for load regulation potential assessment model for
demand-side management of new power systems

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

江苏省电工技术学会 发布

目 次

目 次	I
前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4. 总体要求	2
6 负荷调控潜力评估要素	2
6.1 工业用户典型负荷调控要素	2
6.2 商业用户典型负荷调控要素	4
6.3 居民用户典型负荷调控要素	5
6.4 新兴用户典型负荷调控要素	6
7 负荷调节潜力评估指标	6
7.2 可中断指标	6
7.3 可转移潜力指标	6
7.4 生产潜力指标	6
7.5 检修潜力特征指标	7
7.6 轮休潜力特征指标	7
8 负荷调节潜力评估方法	7
8.1 工业用户评估方法	7
8.2 商业用户评估方法	7
8.3 居民用户评估方法	7
8.4 新兴用户评估方法	8
附录 C（资料性） 负荷可调节潜力综合评估方法	9

面向新型电力系统需求侧管理的调节潜力评估模型技术要求

1 范围

本标准规定了用于新型电力系统仿真计算的负荷调节潜力评估数学模型建立方法。

本标准适用于电网企业调度运行部门的需求侧调节潜力评估与需求响应项目规划，电力需求侧中工业企业、商业、居民等用电主体及其涵盖的用电设施参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 33982-2017 分布式电源并网继电保护技术规范

GB/T 33590.2-2017 智能电网调度控制系统技术规范 第2部分：术语

GB/T 30149-2019 电网通用模型描述规范

GB/Z 42722-2023 工业领域电力需求侧管理实施指南

GB/T 15148-2024 电力负荷管理系统技术规范

GB/T 44134-2024 电力系统配置电化学储能电站规划导则

DL/T 1170-2012 电力调度工作流程描述规范

DL/T 1330-2014 电力需求侧管理项目效果评估导则

DL/T 1759-2017 电力负荷聚合服务商需求响应系统技术规范

DL/T 2473.10-2022 可调节负荷并网运行与控制技术规范 第10部分：仿真计算模型与参数实测

DL/T 2648-2023 精准切负荷安全稳定控制系统技术规范

DL/T 2671-2023 电力系统仿真用电源聚合等值和建模导则

DL/T 2672-2023 电力系统仿真用负荷模型建模技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可调节负荷 adjustable load

电力系统中具备技术条件并参与电网调度的负荷资源，可以是满足准入条件的大用户，也可以是聚合后的主体。通过车联网平台（电动汽车）、智慧能源服务平台（营销）、第三方独立主体（虚拟电厂）聚合平台、大用户模式接入负荷调控系统，具备按照电网调度指令或既定控制策略参与调节的能力。

[来源：DL/T2473.1-2022，3.1]

3.2

负荷建模 load modeling

确定描述负荷特性的数学方程及其参数，称为负荷建模。

[来源：Q/GDW11537-2016，3.6]

3.3

负荷模型 load model

用于描述负荷特性的数学方程，称为负荷模型。

[来源：Q/GDW11537-2016，3.5d]

3.4

可调节负荷模型 adjustable load model

用于表征电力用户可调节负荷特性的数学方程。

3.5

需求响应 demand response

针对需求响应参与容量、激励标准、负荷控制方式等信息，需求响应服务管理者等需求响应业务组织方与其他各参与方达成的有法律效力的约定。

[来源：DL/T 1759-2017，3.4]

3.6

备用容量 reserve capacity

系统在正常或突发故障情况下，可调度的备用电力容量，通常包括热备用、冷备用等。

3.7

平均绝对偏差 mean absolute deviation

依据模型参数的仿真结果与实测结果每点之差的绝对值的算术平均值。

[来源：DL/T 2473.10-2022，3.9]

3.8

4. 总体要求

4.1 需求侧可调潜力评估模型应具有准确性、简明性、通用性。并同时具有单体用户评估与多用户聚合可调潜力评估能力。

4.2 准确性即要求潜力评估模型能够准确地反映出异构分布式资源的可调节潜力。

4.3 简明性即要求潜力评估模型的数学表达公式简明，具有较强可读性。

4.4 通用性即要求特定电力用户类型的潜力评估模型在此电力用户类型中能普遍适用。

4.5 在依照上述模型进行可调潜力评估时，需求侧用户的调控计划应确保人身安全、电网安全和终端设备安全，满足 GB/T 31464 要求。

4.6 在仿真平台上对行业典型电力用户负荷可调潜力进行试验评估之前，应以需求响应项目实测数据为根据，对比仿真平台的相关试验结果，两者平均绝对误差宜小于 5%。

4.7 模型的仿真步长不宜大于 1h。

6 负荷调控潜力评估要素

6.1 工业用户典型负荷调控要素

6.1.1 工业电力用户的可调潜力由用电设备中的可调设备提供，首先明确工业用户单体用电设备的负荷特性，提取工业用户不同行业用电负荷特性及其主要可调设备类型。

6.1.2 工业电力用户的主要可调负荷构成要素如表 1 所示。

表 1 工业用户可调潜力主要构成要素

行业类别	主要可调设备	
金属冶炼	钢铁 ^a	电加热设备、冲压设备、还原设备
	工业硅	电加热设备
	铁合金	电加热设备、还原设备
	电解铝	电解设备
非金属矿物加工	水泥	冲压设备
	陶瓷	电加热设备、冲压设备
	玻璃	电加热设备、空气压缩设备、切割设备
设备制造	通用及专用设备制造	冲压设备、切割设备
	汽车制造	水循环设备、通风设备、空气压缩设备
	其他运输设备制造	电加热设备、水循环设备、通风设备、空气压缩设备

纺织业	纺织业	牵引设备、电加热设备
注 1: 多晶硅生产结晶过程受负荷波动影响较大, 在其生产过程中采取调节并, 不作考虑。		
注 2: 工业化工生产过程复杂, 且安全要求较高, 不影响正常生产情况下可调负荷占比极小, 不作考虑。		
^a 钢铁行业仅考虑电气化钢铁生产企业, 煤基高炉钢铁生产企业用电负荷可调能力较低, 不作考虑。		

6.1.2.1 工业电力用户的主要可调负荷可以大致概括为两种, 生产负荷、非生产负荷

6.1.2.2 工业生产负荷可依据负荷特性概括为两种: 加热负荷、机械负荷

- a) 加热负荷: 工业用户生产过程中用于将电能转化热能以满足工业用户生产需求的电力负荷, 如电弧炉中的电加热负荷、还原设备中的气体加热设备等。此类负荷往往具有灵活的温控特性, 其用电负荷与释放热量成正相关。同时, 由于电解槽设备与电加热设备类似的负荷功率上调下调特性, 电解槽设备负荷也可归类为加热负荷。
- b) 机械负荷: 工业用户生产过程中用于刚性材料塑形、模具成型切割、牵引等将电能转化为机械能以满足工业用户生产需求的电力负荷。此类负荷转移调控能力较强。

6.1.2.3 工业非生产负荷可分为压缩负荷、循环负荷与照明负荷三种。

- a) 压缩负荷: 用于压缩存储气体原材料的负荷。此类负荷受生产调度消耗原材料的速率影响。
- b) 循环负荷: 用于维持工业用户生产所需水循环、空气循环等需求的电力负荷。
- c) 照明负荷: 用于维持工业用户生产照明需求的电力负荷。

6.1.3 工业用户的加热负荷、机械负荷、压缩负荷、循环负荷的调节潜力基本评估模型建模要求如下所示:

6.1.3.1 加热负荷调控要素

a) 工业生产加热负荷的调控应遵循不同电加热设备的生产启停特性, 依照不同生产设备的冷启动时长与关停时长, 可将加热负荷设备的运行规划为三个阶段: 启动爬坡阶段、负荷稳定阶段与停机冷却阶段。

b) 启动爬坡阶段与停机冷却阶段负荷特性固定, 调控潜力较小, 而负荷稳定阶段时, 可依据不同工业行业的生产温度需求上调或下调其加热负荷。

c) 在此前提下, 加热负荷的调控不宜过度影响工业生产质量与生产效率, 调控后工业企业生产任务完成时间宜小于正常运行情况下生产任务完成时间的 130%, 工业生产加热负荷的调节潜力评估模型宜以电加热设备的温度—负荷函数为基准, 依据不同工业行业生产温度的需求设定调控潜力上限。

6.1.3.2 机械负荷调控要素

a) 工业生产机械负荷启停迅速, 不具有较长启动爬坡时间与关停时间, 负荷冲击性较强。

b) 机械负荷的生产受到的影响, 与生产密集程度成正相关, 因此在生产任务稀疏时, 机械负荷将具有时间转移能力。

c) 在此前提下, 机械负荷的调控不应影响工业企业生产效率, 调控后工业企业生产任务完成时间应等于正常运行情况下生产任务的完成时间, 工业生产机械负荷的调节潜力评估模型应以经典的流水车间调度模型为基准, 依据不同工业行业生产任务需求与单体机械设备与前后生产设备的工序衔接特性明确负荷可转移调控时段。

6.1.3.3 压缩负荷调控要素

a) 工业中的压缩负荷运行特性固定, 影响其负荷的主要设备为压缩机、储气罐, 受到气体原材料存储需求与使用需求的影响, 与工业生产步骤中的气体产消紧密相关。

b) 在此前提下, 压缩负荷的调控宜以不影响工业用户的生产计划为目标, 确保工业用户生产计划不受到压缩负荷转移的影响。

c) 工业生产压缩负荷的调节潜力评估模型宜以工业用户生产调度安排为基准，依据不同工业行业气体原料产消步骤衔接特性与储气罐容量压力特性，将压缩负荷与气体生产消耗设备负荷同时转移，以明确可转移调控时段。

6.1.3.4 循环负荷调控要素

a) 工业中的循环负荷通过冷却塔、水泵、换热器、处理等设备协同工作，实现冷却水循环利用和热量有效转移，与工业生产步骤中的电加热负荷紧密相关。

b) 在此前提下，循环负荷的削减调控不宜过多影响工业用户的能量效率，调控后工业企业的能量效率宜小于正常运行情况下企业能量效率的 110%。

c) 工业生产循环负荷的调节潜力评估模型宜以工业用户生产调度安排为基准，依据不同工业行业电加热负荷步骤调度安排、气水循环需求和能量效率，将循环负荷与气体生产消耗设备负荷同时转移，以明确可削减调控时段。

6.1.3.5 照明负荷调控要素

a) 工业中照明负荷占比通常较小，与生产步骤的调度安排无关。

b) 在此前提下，循环负荷的削减调控不宜过多影响工厂园区的照明需求，调控后工业企业的人员操作与监控设备照明宜等于正常运行情况下工业企业的人员操作与监控设备照明。

c) 工业生产照明负荷的调节潜力评估模型宜以工业企业人员操作与监控设备照明为基准，依据不同时段工业企业人员操作与生产状况监控设备的照明需求，明确可削减调控时段。

6.2 商业用户典型负荷调控要素

6.2.1 商业电力用户的主要用电设备类型较为统一明确，但不同行业的用电特性与用电需求不同，造成其可调负荷占比不同。首先明确商业电力用户单体用电设备的负荷特性，提取商业电力用户不同行业用电负荷特性及其主要可调设备类型。

6.2.2 商业楼宇电力用户的主要可调负荷构成要素如表 2 所示。

表 2 商业楼宇用户可调潜力主要构成要素

行业类别		主要可调设备
商业楼宇用户	酒店	中央空调系统、分散式空调设备、冷库系统、照明设备
	办公楼	
	医院	
	学校	
	商场	
注 1：商业用户用电负荷类型较为统一，可调设备调控能力固定		

6.2.2.1 酒店电力用户能耗强度高、可调潜力大，用电负荷主要来源于照明、空调系统、厨房冷库等系统。酒店电力用户的负荷调控不宜影响酒店住户的温度舒适度，照明需求舒适度，同时宜满足酒店厨房冷藏温度需求等基本运行需求。

6.2.2.2 办公楼电力用户涵盖机关、企业、事业单位行政管理人员，业务技术人员等办公的业务用房，工作设备运行高峰时段固定，具有一定的可调控潜力，主要负荷来自于空调系统、照明系统、办公设备等。办公楼电力用户的负荷调控，在工作日宜满足人员办公温度与高质量照明需求，在休息日宜留有不少于 30% 的电力需求备用能力。

6.2.2.3 医院用户用电负荷为连续性负荷，不受时段、季节、气候影响。医疗设备全部为一级负荷，禁止作为调节对象。

6.2.2.4 学校用户涵盖教学楼、图书馆、食堂餐厅和学生宿舍等多类型建筑，用电时段较为集中，调节能力较弱，主要负荷来自于照明与插座，空调用电，冷库用电。学校电力用户的负荷调控，宜满足教学楼、图书馆日常温度与高质量照明需求，食堂餐厅照明、冷库存储需求与学生宿舍照明需求与温度需求。

6.2.2.5 商场电力用户负荷规律随商业公共区域工作时间变化而变化，可调控设备一般为空调设备、照明设备、厨房冷库等。可调控主体区域集中于商业综合体的公共区域。商场电力用户的负荷调控，宜满足商业公共区日常温度与高质量照明需求，餐厅冷库存储需求，并在周末与节假日高峰期留有不少于30%的电力需求备用能力。

6.2.3 商业楼宇用户的温控负荷、照明负荷调节潜力基本评估模型建模要求如下。

6.2.3.1 温控负荷调控要素

a) 温控负荷空调负荷的建模是以空调、冷库等负荷运行特性、负荷预测、能效分析、控制方法及响应电网调度指令的组合调控策略进行研究的基础。楼宇温控负荷建模主要包括建立等效负荷模型、气候敏感负荷模型、温控设备各组成部件模型和等效热参数模型。工业中照明负荷占比通常较小，与生产步骤的调度安排无关。

b) 在此前提下，冷库设备的运行调控宜额外考虑备餐时段，防止室内温热空气和冷库空气相互流动，在非备餐时段关停冷库，进行负荷调控。要求调控后冷库设备的温度宜小于正常运行情况下设定的冷库最高温度。

c) 在此前提下，空调设备的运行调控宜额外考虑用户舒适度指标，根据用户群体、环境参数、响应行为，设定智能调控关停冷库，进行负荷调控。要求调控后空调设备的用户舒适度宜等于空调设备正常运行情况下的用户舒适度。

6.2.3.2 照明负荷调控要素

a) 照明负荷的建模基于先进的智能照明系统，通过大数据技术或云平台技术辨识不同空间的照明需求，检测智能灯具的具体电能消耗情况，基于照明需求可柔性调控使照明负荷。

b) 在此前提下，照明设备的运行调控宜考虑不同主体照明需求，根据人群密集度、环境光参数、照明舒适度，设定智能光线调节，进行负荷调控。要求调控后办公、教学、医院等高质量光照需求单位的光照亮度与等于照明设备正常运行情况下的光照亮度。其余照明需求满足 GB/T50034-2024 建筑照明设计标准。

6.3 居民用户典型负荷调控要素

6.3.1 居民电力用户的可调潜力由用电设备中的可调设备提供，首先明确居民用户单体用电设备的负荷特性，提取居民用户不同行业用电负荷特性及其主要可调设备类型。

6.3.2 居民电力用户的主要可调负荷构成要素如表 3 所示。

表 3 居民用户可调潜力主要构成要素

行业类别		主要可调设备
居民用户	南方居民	温控设备、照明设备
	北方居民	

6.3.2.1 居民负荷跟居民生活特性及用电习惯有关，上班因素，负荷较低，中午气温升高，负荷受居做饭和开空调需求影响，负荷较高；晚上居民用电设备负荷率较高，出现晚高峰并逐步下降到凌晨。居民可调负荷宜分析所处地区、用电习惯、居民群体等指标。

6.3.2.2 居民用电负荷调控要素

a) 单体居民负荷涵盖空调负荷、热水器负荷、电冰箱负荷、照明负荷。

b) 在此前提下，居民用电负荷的运行调控宜额外考虑用户舒适度指标，综合考虑泛在电力物联网建设成果（HPLC 智能电表的推广普及应用）以及居民用户对需求响应工作的理解和可接受度，以指标分析法构建居民需求响应调控参与度模型。

6.4 新兴用户典型负荷调控要素

6.4.1 新兴电力用户负荷控制逻辑多样，同时具有源侧荷侧特性，首先明确居民用户单体用电设备的负荷特性，提取居民用户不同行业用电负荷特性及其主要可调设备类型。

6.4.2 新兴电力用户的主要可调负荷构成要素如表 4 所示。

表 4 新兴用户可调潜力主要构成要素

行业类别	主要可调设备	
新兴电力用户	电动汽车	私家车、出租车、公交车、其余公务用车
	用户侧储能	储能设备

6.4.2.1 新兴电力用户中，电动汽车与用户侧储能均不适合放电到低于额定容量 20%，进行调控潜力评估时宜考虑储能电池系统寿命衰减、最大充放电容量等指标。

6.4.2.2 分布式储能系统的模型，宜能模拟储能系统的有功功率控制、无功功率控制、低电压过电压保护、低频高频保护等电气控制特性，包含电池组模型、换流器模型以及控制系统模型等。储能系统模型可参照 DL/T 2246.9 规定的模型建立。

6.4.2.3 电动汽车充放电的模型，宜能模拟电动汽车用户容量聚合的充放电功率调节、出行电量消耗、等负荷特性。电动汽车充放电标准可参照 NB/T 11305.2-2023。同时宜考虑用户对电池损耗的敏感度。

7 负荷调节潜力评估指标

7.1 宜根据指标重要性将指标进行分类，方便指标聚合与评估，可依据不同特性划分负荷可中断潜力指标、负荷可转移潜力指标、生产负荷指标、检修潜力特征指标、轮休潜力特征指标、错时潜力特征指标、错峰潜力特征指标。

7.2 可中断指标

可中断指标宜依据可中断容量、可中断时长、可中断速率与中断后恢复速率细分指标划分。

7.2.1 可中断容量宜以用户可中断的部分或全部负荷量表征，为正向指标。

7.2.2 可中断时长宜以用户中断部分或全部负荷持续的时长表征，为正向指标。

7.2.3 可中断速率宜以用户中断部分或全部负荷时，单位时间内减少的负荷量表征，为正向指标。

7.2.4 中断后恢复速率宜以用户中断部分或全部负荷之后，单位时间内增加的负荷量，为正向指标。

7.3 可转移潜力指标

可转移潜力指标宜依据可转移容量、可转移时长、峰时用电占比细分指标划分。

7.3.1 可转移容量是用户在用电高峰期可以转移到其他用电时间段的负荷量，为正向指标。

7.3.2 可转移时长是用户在用电高峰期转移一定负荷量时，能够转移的时间长度。可转移时长越长，调节越灵活，为正向指标。

7.3.3 峰时用电占比是指在用户典型用电曲线中，峰时用电量占全天用电量的比例。值越大，用户用电越集中，转移效果越好，为正向指标。

7.4 生产潜力指标

生产指标宜依据用户单位产值能耗与用电规模划分。

7.4.1 针对工业用户，单位产 6 值能耗指工业综合能耗与工业总产值的比值。该指标越大，用户生产能耗越大，更倾向于使该用户参与负荷调度，为正向指标。

7.4.2 用电规模是电力用户一年的用电量，用户衡量用户的用电规模。该指标值越大，负荷量越大，负荷调度效果越明显，更具有参与负荷调度的价值，为正向指标。

7.5 检修潜力特征指标

7.5.1 检修负荷是指用户在生产设备检修时，仅保留安保负荷所减少的负荷量。检修负荷衡量了用户的检修能力，检修负荷值越大，表明其检修潜力越大，削峰效果越明显，为正向指标。

7.5.2 具有连续供电需求的用户宜通过调整检修时间，达到降低地区峰荷的目的。

7.5.3 检修潜力的特征指标宜考虑检修负荷占比、用户年度检修率和单次检修成本。

7.6 轮休潜力特征指标

7.6.1 轮休潜力是对于有周休安排的客户，彼时用户负荷会有所下降，其休息日特性较为固定，为正向指标。

7.6.2 轮休对电力用户的影响较小，但仍有可能影响生产计划，增加人力支出等多方面的经济成本，宜考虑轮休成本。

8 负荷调节潜力评估方法

8.1 工业用户评估方法

8.1.1 理论评估方法

考虑工业用户整体运行逻辑，分析工业用户用电设备与评估指标关联性，多指标评估工业用户的运行逻辑。具体评估方法见附录 A。

8.1.2 仿真评估方法

根据实际工业用户所有生产设备进行详细或等值建模，依照 6.1 节要求进行工业用户生产线建模。通过软件模拟仿真的方式对多场景下工业用户的用电负荷进行仿真，模拟各时段进行需求响应时，评估工业电力用户在每一时段对需求响应调节任务的响应潜力。

8.2 商业用户评估方法

8.2.1 理论评估方法

考虑工业用户整体运行逻辑，分析商业用户典型可调设备与评估指标关联性，多指标评估商业用户的运行逻辑。具体评估方法见附录 A。

8.2.2 仿真评估方法

根据商业用户主要可调设备进行详细或等值建模，依照 6.2 节要求对商业用户典型负荷运行时段进行建模，并叠加获得商业用户整体负荷运行模型。通过软件模拟仿真的方式对多时段下商业用户的用电负荷进行仿真，模拟各时段进行需求响应时，评估工业电力用户在每一时段对需求响应调节任务的响应潜力。

8.3 居民用户评估方法

8.3.1 理论评估方法

考虑工业用户整体运行逻辑，分析商业用户典型可调设备与评估指标关联性，多指标评估商业用户的运行逻辑。具体评估方法见附录 A。

8.3.2 仿真评估方法

根据居民用户主要可调设备进行详细或等值建模，依照 6.3 节要求对居民用户典型负荷运行机理进行建模，聚合多个典型居民用户获得区域居民用户整体负荷运行模型，对典型可调设备时段与运行数量进行分析辨识。通过软件模拟仿真的方式对多时段下居民用户用电负荷进行仿真，模拟各时段进行需求响应时，评估居民电力用户在每一时段对需求响应调节任务的响应潜力。

8.4 新兴用户评估方法

8.4.1 理论评估方法

由于电动汽车与储能用户与需求侧电力需求关系紧密，且具有不确定性，不宜采用理论方式对其可调潜力进行评估。

8.4.2 仿真评估方法

根据新兴用户充放电特性进行详细或等值建模，考虑 6.4.3.2 节与 6.4.3.3 节的负荷特性，依照 6.4 节要求对新兴用户负荷柔性运行机理进行建模，宜聚合区域内多个新兴电力用户获得区域新兴电力用户负荷聚合外特性模型，对典型设备接入时段与总可调容量进行分析辨识。通过软件模拟仿真的方式对多时段下新兴用户用电负荷进行仿真，模拟各时段进行需求响应时，评估新兴电力用户在每一时段对需求响应调节任务的响应潜力。

附录 A

(资料性)

负荷可调节潜力综合评估方法

宜采用 CRITIC 法和 VIKOR 法评估用户负荷单一可调节潜力，即可中断、可转移和生产潜力，基于此，采用 SPA-VFS 评估用户负荷综合可调节潜力，形成负荷调度优先级。以可中断潜力为例，说明指标预处理及单一指标评估的流程。

假设可中断潜力各项指标值形成的初始评价矩阵为 $B = (b_{ij})_{n \times m}$ ，其中： $i = 1, 2, \dots, n$ ； $j = 1, 2, \dots, m$ ； n 为用户数， m 为可中断潜力指标下的二级指标数； b_{ij} 表示第 i 个用户第 j 个指标的初始值。针对正逆向指标，采用向量规范法将 B 规范化，得到规范化矩阵 $B' = (b'_{ij})_{n \times m}$ ， b'_{ij} 为第 i 个用户第 j 个指标规范化后的值。

C.1 单一用户负荷可调节潜力

VIKOR 方法是基于 Lp-metric 聚合函数的多属性决策方法，它通过确定正负理想解，利用最大化群体效益和最小化个体损失的折衷思想，比较实际用户指标值与理想解的接近程度，评估用户负荷可调节潜力，步骤如下。

确定二级指标权重。CRITIC 法计及了指标包含的信息量、同一指标的波动性和不同指标的冲突性，所得的权重更加合理

求各指标的正理想解 b_j^* 和负理想解 b_j^-

$$b_j^* = \max_{1 \leq i \leq n} b'_{ij} \quad (\text{A.1})$$

$$b_j^- = \min_{1 \leq i \leq n} b'_{ij} \quad (\text{A.2})$$

求用户 i 的最大化群体效用值 S_i ，最小化个体损失值 R_i 和各用户折衷收益 Q_i 。

$$S_i = \sum_{j=1}^m \omega_j \frac{b_j^* - b'_{ij}}{b_j^* - b_j^-} \quad (\text{A.3})$$

$$R_i = \max_{1 \leq j \leq m} \omega_j \frac{b_j^* - b'_{ij}}{b_j^* - b_j^-} \quad (\text{A.4})$$

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (\text{A.5})$$

式中： $S^* = \min\{S_i\}$ ； $S^- = \max\{S_i\}$ ； $R^* = \min\{R_i\}$ ； $R^- = \max\{R_i\}$ ； v 为决策机制系数，反映最大群体效用值和个体损失值的博弈权重，取值区间为 $[0,1]$ 。

将 S_i 、 R_i 和 Q_i 分别按从小到大排序，值越小，说明用户在该方面结果越好。设 U_1 、 U_2 是按照 Q_i 值从小到大排序后排名第一、第二的用户。当满足以下两个条件时，可根据折衷收益 Q 值排序， Q 值较小者较优。

将可中断潜力矩阵 $T_{int} = (Ti1)_{n \times 1}$ 、可转移潜力矩阵 $T_{trans} = (Ti2)_{n \times 1}$ 和生产潜力矩阵 $T_{act} = (Ti3)_{n \times 1}$ 合为 $T = (Tij)_{n \times r}$ ，其中 Tij 表示第 i 个用户第 j 个潜力值， n 表示用户数， r 表示一级指标数， $j = 1, 2, \dots, r$ 。

通过矩阵 T 判断最适合用户参与负荷调度的方式，但是各用户三类潜力并不是均衡的，即可中断潜力大并不意味着转移潜力大，所以有必要进行用户负荷可调节潜力综合评估，形成优先级。将用户可调节潜力分为 G 个等级。

矩阵 T 每行与潜力等级组成一个集对，适合根据 SPA 法分析潜力值与各等级的联系度。同时，联系度与隶属度本质相同，联系度有助于隶属度函数的确定。

C.1 综合用户负荷可调节潜力

采用 SPA-VFS 计算用户综合潜力值。负荷可调节潜力综合评估步骤如下。

1) 设第 g 个等级的阈值为 C_g ，第 j 个指标第 g 个等级的阈值为 C_{jg} ，其中， $g = 1, 2, \dots, G$ 。将矩阵 T 转化为值越大越优型矩阵 $T' = (T'_{ij})_{n \times r}$ 。

2) 求 T'_{ij} 与等级 g 之间的单项联系度。用户 i 的第 j 个潜力指标和等级 g 之间的单项联系度为

$$\mu_{ijg} = \begin{cases} 1 - 2 \left| \frac{C_{j,g-1} - T'_{ij}}{C_{j,g-1} - C_{j,g-2}} \right|, & T'_{ij} \in \text{grad}(g-1) \\ 1 - 2 \left| \frac{C_{jg} - T'_{ij}}{C_{jg} - C_{j,g+1}} \right|, & T'_{ij} \in \text{grad}(g+1) \\ 1, & T'_{ij} \in \text{grad}(g) \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

3) 计算用户 i 与等级 g 之间的综合联系度为

$$\mu_{ig} = \sum_{j=1}^r \omega_j \mu_{ijg} \quad (\text{A.7})$$

4) 引入可变模糊集理论，计算用户 i 与等级 g 之间的相对隶属度 δ_{ig} ，为了避免最大隶属度原则造成失真，用特征值 h_i 处理相对隶属度 δ_{ig} ，并排序形成优先级。

$$\delta_{ig} = (1 + \mu_{ig})/2 \quad (\text{A.8})$$

$$h_i = \sum_{g=1}^G C_g \delta_{ig} / \sum_{g=1}^G \delta_{ig} \quad (\text{A.9})$$

首先形成初始评价矩阵并进行向量规范化。进而确定单一潜力指标下各二级指标权重，基于 VIKOR 法计算最大群体效用值、最小个体损失值和折衷收益，并分析得到各用户可中断、可转移和生产潜力值。最后，结合 SPA 和 VFS 评估各用户的综合潜力值并得到优先级。