

基于无感调节技术的负荷模型和调节潜力评估

徐昕¹ 陈英俊¹ 王灵坚² 钱烨²

1 国网义乌市供电公司, 浙江省义乌市, 322000;

2 江苏创新源节能工程有限公司, 江苏省无锡市, 214028;

摘要: 新型电力系统面临调控资源不足的问题。在严峻供需形势下, 限电风险逐步增大。针对这一问题, 本文提出了一种基于无感调节技术的负荷模型, 并明确了无感负荷的定义, 即从挖掘负荷侧资源, 提升电网调节能力角度出发, 短时能够参与电力供需精细化调节, 且对工业生产、商业活动、居民生活等不会产生明显感知和影响的负荷。本文首先划分居民、商业、工业、公共机构、新型基础设施等五大用电场景, 基于统计综合法和模糊聚类法建立多场景无感负荷模型, 用于分析无感负荷调节潜力, 测算理论无感负荷; 其次, 基于用户参与意愿评估对理论无感负荷进行修正; 最后, 通过义乌市试点验证无感负荷的调节潜力并对用户参与意愿进行分析。研究表明: 以义乌市为试点, 义乌市夏季最大负荷达到 10189.6 万千瓦, 考虑同时率的夏季无感负荷为 931 万千瓦, 可削减约 9% 的负荷高峰, 其中工业用户无感负荷占比最高; 经过用户参与意愿修正后的无感负荷减少约 40%, 表明实际调节需兼顾技术可行性与用户参与意愿。该研究可为新型电力系统规划提供依据。

关键词: 无感负荷; 需求侧管理; 无感; 电力规划; 调节潜力; 负荷特性

DOI: 10.69979/3060-8767.25.08.028

引言

新型电力系统正面临调控资源不足的问题^[1-4]。需求侧响应可以通过经济激励政策, 引导用户调整用电方式, 转移部分电力负荷到电网低谷时段, 确保电网电力平衡^[5-8]。在灵活电源相对受限的情况下, 无感负荷资源作为需求侧资源, 其灵活调节作用将成为保障新型电力系统电力可靠、稳定和低成本供应的关键手段。因此, 亟需开展无感负荷的调节潜力评估。目前业内对于“无感负荷”并无明确的定义, 本文将其定义为: 从挖掘需求侧资源, 提升电网调节能力角度出发, 短时能够参与电力供需精细化调节, 且对工业生产、商业活动、居民生活等不会产生明显感知和影响的负荷。

尽管目前对“无感负荷”尚未形成统一定义, 但针对空调、照明、柔性工业负荷等潜在需求侧资源的可调节潜力评估研究已逐步展开, 主要分为数据驱动、模型驱动和综合指标。文献^[9]对于智能电表的历史测量数据, 并采用 K-means 算法对测量数据进行分类处理, 从而实现对不同用电模式下空调负荷可控潜力的准确评估。文献^[10]结合 K-means 和 SOM 算法进行二次聚类, 利用 BP 神经网络反向修正, 提出了考虑负荷特性和可调节潜力的综合聚类方法。文献^[11]忽略了内墙和外墙间的温度差异, 即认为内墙和外墙温度相等, 并综合考虑能量在环

境与建筑物之间的传递过程, 建立了空调系统的二阶 ETP 模型。文献^[12]进一步假设室内温度和固体物质温度相等, 则可以得到一阶 ETP 模型。文献^[13]基于冷(热)负荷建立了定频空调负荷模型, 类比传统机组提供的备用性能, 分析了定频空调负荷群参与需求响应的潜力。文献^[14]基于模糊子集方法, 提出了一种考虑用户满意度的温控负荷需求响应指标, 为温控负荷参与调峰工作提供参考。文献^[15]考虑用户侧主体的各方面性能, 提出了工业负荷参与电网调控的潜力评估与效果评估的综合指标体系, 量化工业负荷参与调控时电网的调控效果和效益。

虽然无感负荷潜力评估的相关研究已经逐步开展, 但是由于大量具备灵活性的用电类型无感调节机理尚不明确, 广域无感负荷规模和趋势难以量化评估。本文首先划分工业用户、商业用户、居民用户、公共机构、新型基础设施共 5 类应用场景, 基于统计综合法和模糊聚类法分析场景负荷特性和负荷结构, 建立多场景无感负荷模型, 评估无感负荷可调节空间, 为测算理论无感负荷提供参考; 其次, 基于用户参与意愿调研, 对理论无感负荷进行修正; 最后, 通过义乌市试点验证无感负荷的调节潜力并对用户参与意愿进行分析。

1 多场景无感负荷模型

无感负荷按应用场景分主要包括工业用户、商业用

户、居民用户、公共机构、新型基础设施共 5 类，按设备层面分，主要包括空调、照明、热水器、充电桩、轨道交通、数据基站、电梯、冷库以及 9 类细分生产工艺工业，感知影响主要考虑温度调节感知小、亮度调节感知小、速度调节感知小、生产调整影响小。由于无感负荷场景差异大，关联负荷设备多，因此考虑按照场景类型来研究无感负荷的调节潜力。场景负荷综合模型框架如图 1 所示。在电力大数据基础上，以统计综合法^[16]确定各场景的负荷结构，以模糊聚类法^[17]确定各场景的负荷特性，综合得到场景负荷综合模型，包括不同时段、不同生产周期下负荷整体的无感调节特性。

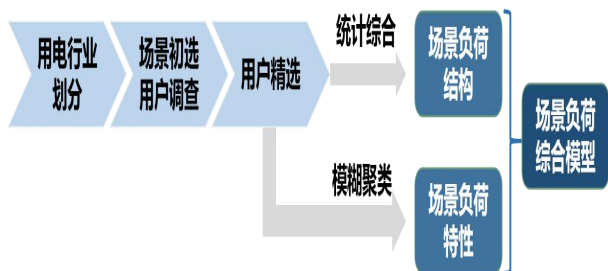
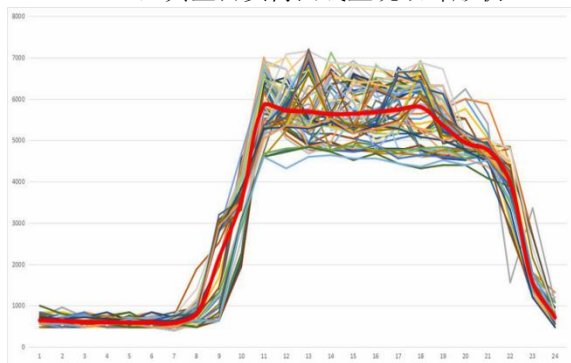


图 1 场景负荷综合模型框架

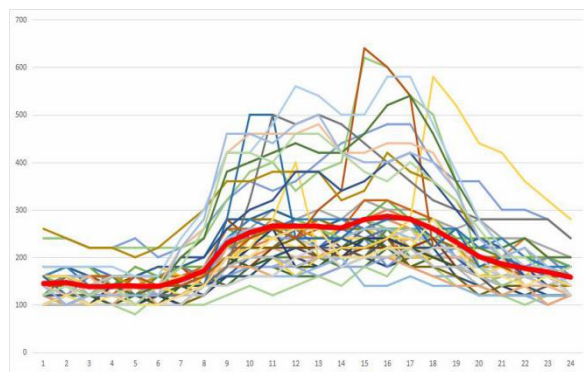
1.1 商业用户无感负荷模型

1.1.1 负荷特性

商业用户主要包含商业楼宇和办公楼。商业楼宇主要以大型商场为公共主体，辅以其他功能区域组合而成。商业楼宇主要用能高峰时段为 9:00-21:00 左右，其负荷规律随商业楼宇公共区域工作时间变化而变化，全年用能高峰主要集中在 6 月到 9 月，周末由于营业时间普遍加长，其用能高峰时段一般会延长至 22:00 以后。办公楼宇通常实行一班工作制，设备运行高峰时段约是 8:00-20:00，典型日负荷曲线呈现双峰形状。



(a) 商业类



(b) 办公类

图 2 商业用户夏季典型日负荷特性曲线聚合

1.1.2 负荷结构和无感负荷调节潜力

商场等商业楼宇主要负荷来自空调系统、照明系统、动力系统等。其中，空调负荷占比在夏季可达到 50% 以上，照明负荷较为稳定，占比通常为 20% 左右，动力负荷主要来自电梯、水泵等，负荷占比约为 15% 左右，冷库制冷负荷大约在 10% 左右。

办公类日负荷分布构成如图 3 所示，主要负荷来自于空调系统、照明系统、办公设备、动力系统等。空调系统负荷占比大约在 45%，由于办公建筑需要高质量的办公照明，所以照明系统负荷占比较高，接近 35%。

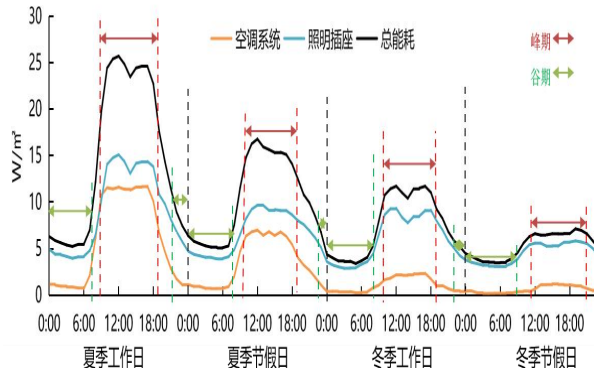


图 3 办公类日负荷分布构成

根据云平台接入的义乌市部分商业楼宇空调（样本约 3.56 万台）的数据显示，7 月 12 日商业楼宇空调负荷高峰出现在白天 10 点至 17 点，持续时间长，与上班的工作时间高度一致。义乌市商业楼宇空调温度设置比例如图 4 所示，80% 的商业空调制冷负荷设定值在 26℃ 以下，平均设定温度为 22.5℃，经济运行方式较差。按照升高 1℃ 降低 7% 负荷的调节原理，设定温度从现状的 22.5℃ 调节至 26℃，可腾出 24.5% 的调节空间。



图 4 义乌市商业楼宇空调温度设置比例

另外根据调研建筑实际情况,在不影响楼宇正常运转的情况下,可暂停 30%~50%部分电梯的使用,减少三层以下电梯使用率。考虑到商业楼宇对照明条件要求较高,照明减少程度一般不高于 30%。

1.2 居民用户无感负荷模型

1.2.1 负荷特性

居民用户典型日负荷曲线呈现典型的双峰形状,最大负荷出现在 21:00 左右,凌晨 3:00~6:00 左右负荷最低。居民典型日负荷曲线图 5 所示。

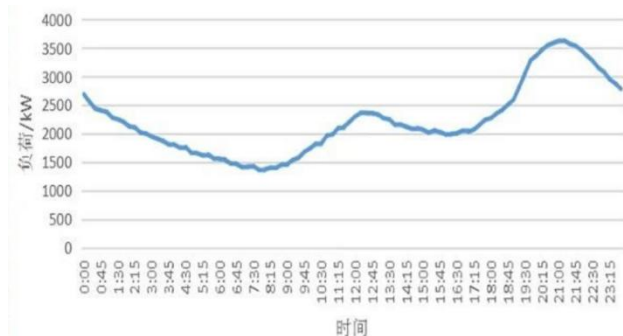


图 5 居民典型日负荷特性曲线

1.2.2 负荷结构和无感负荷调节潜力

居民负荷主要包括空调、热水器、照明等负荷,义乌市夏冬两季居民空调负荷均较大,夏冬两季用电高峰期间,居民空调用电负荷占比均较高,约占高峰期负荷的 40%~50%,热水负荷约占居民 18%~22%的能耗。

根据第三方家电云平台接入的义乌市部分家用空调(样本约 291.5 万台)的数据显示,7 月 12 日居民空

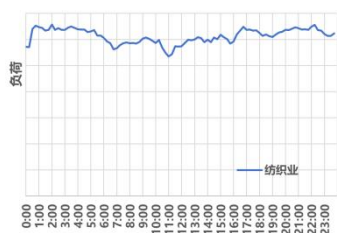
调负荷高峰出现在晚上 21:00~23:00,白天小高峰出现在 12:00~14:00,持续时间相对较短,与居民的生活习惯一致。70%的居民空调制冷温度设定值在 26°C 以下,平均设定温度为 23.5°C,温度设定存在不经济的行为。如果将设定温度从 23.5°C 调节至 26°C,可腾出 17.5%的调节空间。该比例适用于温湿度恒定工况,实际调节需结合气象数据动态修正。另外,根据调研,居民电热水器一般有快热、慢热、保温三种模式,若由快热降档为慢热,或有慢热降档为保温,可调负荷为调节前后档位对应功率之差,此种模式热水器可调节空间为 30%~70%。

1.3 工业用户无感负荷模型

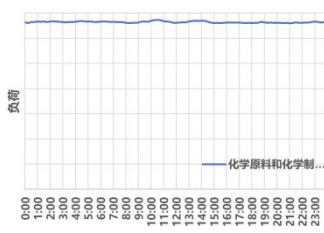
义乌市工业用地以制造业为主。行业负荷特性、生产内容与生产结构等有较大差别,本次遵循“大潜力行业优先”的原则,选取义乌市夏季用电量排名靠前 15 的行业(占比 85%)进行潜力的分析和测算。按生产工艺分为 9 类。

1.3.1 负荷特性

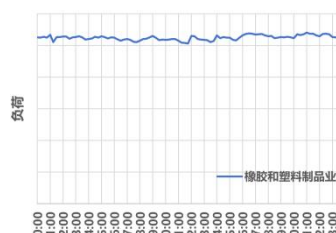
纺织、化工制造、塑料橡胶、化学化纤、造纸、黑色金属冶炼及压延加工等 6 类企业均属无间断连续工作型企业,且未采取错峰避峰措施。这 6 类企业的夏季典型日负荷特性曲线如图 6 所示,负荷特性曲线较为平稳,无明显的早高峰、午高峰和尖峰,日负荷率、峰谷差率变化较平稳



(a) 纺织



(b) 化工制造



(c) 塑料橡胶

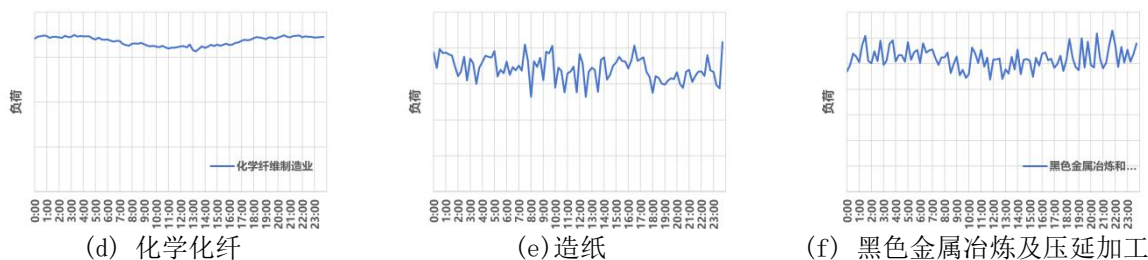


图 6 6 类企业夏季典型日负荷特性曲线

金属制品业、设备制造业属非连续工作型企业，不需要 24 小时连续运转，且根据分时电价采取错峰和避峰措施来节省用电成本，将生产用电进行了调整，用电高峰阶段由白天调整到午夜低谷电价时段。电气机械和器材制造业、通用设备制造业、专用设备制造业生产工艺相近且负荷特性曲线非常相似，归为设备制造业大类，以专用设备制造为典型例子。非金属矿物制品业属连续

工作型企业，但响应分时电价政策，将高耗电生产环节从高电价时段调整到了低电价时段。这 3 类企业的夏季典型日负荷特性曲线如图 7 所示，负荷变化较大，其中设备制造业呈现出较明显的峰谷特点：晚上 19:00~次日 7:00 是负荷的低谷时段，白天因员工午休也会出现一个用电低谷；白天 8:00~11:00 和 13:00~17:00 是用电的高峰时段。

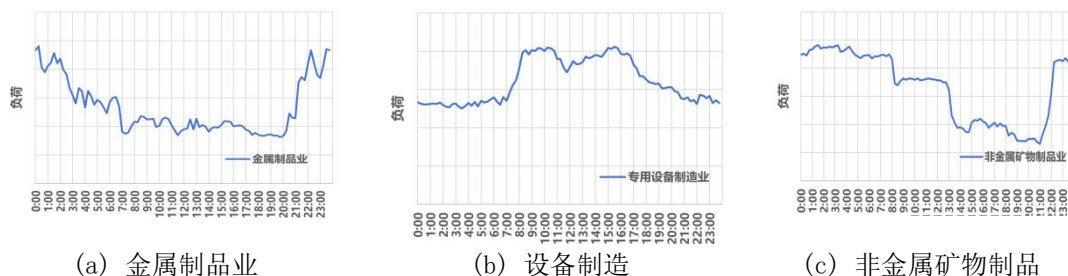


图 7 3 类企业夏季典型日负荷特性曲线

1.3.2 负荷结构和无感负荷调节潜力

制造业属于流水线式作业，其无感调节空间主要是时间换时间、空间换时间两种，时间换时间指的是短时降低生产线负载、降低辅助生产环节负荷，后通过短时延长工作时长保障生产计划，空间换时间指的是依靠仓储空间压减前、后段工艺等。主要集中在储料、处废等前后段流程和调温、调速等中间流程以及行车等辅助工

艺。各生产工艺工业的主要负荷环节和无感负荷可调空间如表 1 所示，其中，非金属矿物制品、塑料橡胶、纺织无感调节空间最大，这是自动化技术的普及使得调节对生产影响减少，以及仓存压减较好控制。黑色金属冶炼及压延加工、金属制品无感调节空间最小，这是因为其生产设备调节要求高，时间要求严格，仅可控制辅助设备，辅助设备占总负荷比例较少。

表 1 典型工业主要负荷环节和无感负荷可调空间

工业用户分类	主要负荷分布环节	无感负荷调节手段	可调节环节	可调节环节负荷占总负荷比例(%)	无感负荷占可调节环节比例(%)
纺织	细纱、织布、染色	自动化技术	全段	100	10~20
金属制品	加热	错峰调剂	辅助设备	≤20	10
设备制造	锻造、锻铆、焊接	错峰调剂	全段	100	15
化工制造	主线、固废处理	仓存压减	固废	10	60
塑料橡胶	注塑成型	自动化技术	后处理	49	50
化学化纤	后处理	自动化技术	后处理	60	10
非金属矿物制品业	立窑煅烧、入磨	仓存压减	入磨	50	100
造纸	磨浆、造纸、碎浆	自动化技术	全段	100	10~15

黑色金属冶炼及压延加工	挤压、氧化、熔铸	错峰调剂	辅助设备	较少	10
-------------	----------	------	------	----	----

1.4 公共机构用户无感负荷模型

1.4.1 负荷特性

公共机构主要包括政府、科研院所、学校等公共建筑等，通常实行一班工作制，设备运行高峰时段是 8:00~20:00，典型日负荷曲线呈现双峰形状。典型日负荷曲线如下图所示。

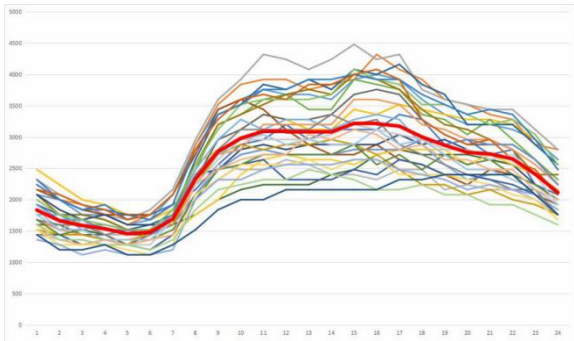


图 8 公共机构类典型日负荷特性曲线聚合

1.4.2 负荷结构和无感负荷调节潜力

公共机构主要负荷来自于空调系统、照明系统、办公设备、动力系统等。空调系统负荷占比大约在 45%，由于办公共机构需要高质量的公共照明，所以照明系统负荷占比较高，接近 35%。公共机构与办公楼宇类似，可腾出 24.5% 的空调调节空间，可暂停 30%~50% 部分电梯的使用，以及减少三层以下电梯使用率等，照明减少程度一般不高于 30%。

1.5 新型基础设施无感负荷模型

1.5.1 负荷特性

新型基础设施包含轨道交通、汽车充电桩、数据中心等，这里以数据中心为例，典型日负荷特性曲线如图 9 所示，用电特性较为平稳，负荷会因算力和环境温度等影响产生小幅度波动。

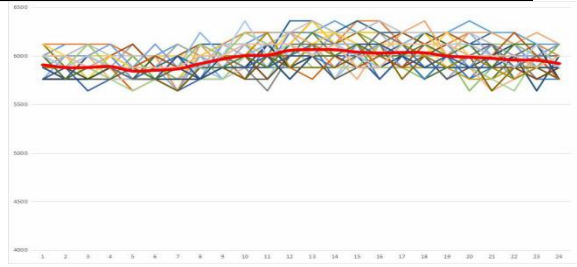


图 9 数据中心典型日负荷特性曲线

1.5.2 负荷结构和无感负荷调节潜力

数据中心耗电量构成如图 10 所示，传统数据中心 IT 设备耗电占一半，且新建数据中心 IT 设备耗电占比增加将近 30%。其次是冷却系统，这可能是因为大量精密设备散热量高且对散热要求较高。数据中心无感负荷调节主要与用户用网需求差异(对延迟的容忍程度)有关，可分为延迟容忍和延迟敏感型。因此，数据中心负荷具备时间调节潜力：通过合理调节延迟容忍型算力需求的处理时间，即通过优化算力需求在时间上的分布。同时数据中心数字化与自动化基础较高，通过业务和计算设备的协同，可进行秒级负荷响应，无需额外硬件购置成本，在电力灵活性调节上具备天然的技术可行性。

2 用户参与意愿调研

考虑到商业、居民、公共机构在参与意愿上主要是空调的体感差异和经济激励，且以体感差异为主，因此本研究这 3 类场景主要考虑空调的体感差异。人体热舒适评估指标采用 PMV (Predicted Mean Vote, 预测平均投票) 和 PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied, 预测不满意百分比)^[18]，定义人体感觉微暖且人群满意度为 20% 下的空调设定温度为无感温度，即 $PMV \leq 1$ 且 $PPD \leq 20$ 对应的空调设定温度。空调设定温度为 26℃ 下，各场景的 PMV、PPD 指标如表 2 所示。因此，确定商业、居民、公共机构空调的无感温度分别为 25℃、26℃ 和 26℃。

表 2 典型场景夏季 PMV/PPD (空调设定温度 26℃，标准大气压)

场所	穿衣习惯	人体活动	评价指标	室内相对湿度/%			
				40	50	60	65
商业楼宇	夏季普通穿着 (短袖+轻薄长裤)	轻度活动	PMV	1.04	1.1	1.15	1.18
			PPD	27.96	30.45	33.05	34.39
办公楼宇/	夏季普通穿着	静态坐姿	PMV	0.19	0.27	0.34	0.38

公共机构	(短袖+轻薄长裤)		PPD	5.78	6.49	7.45	8.02
办公楼宇/ 公共机构	白领衣着 (西装/套装)	静态坐姿	PMV	0.61	0.68	0.76	0.8
			PPD	12.77	14.82	17.1	18.35
居民	夏季普通穿着 (短袖+轻薄长裤)	静态坐姿	PMV	0.19	0.27	0.34	0.38
			PPD	5.78	6.49	7.45	8.02

工业用户参与意愿上主要是经济激励和技术调整便捷性,且行业间差异较大,因此本次参与意愿采用调研的方式。调研采用问卷量表的模糊推理方法,如图10所示。根据该方法量化用户对响应无感负荷30%、60%以及100%的响应意愿,并以平均值作为综合响应意愿。工业用户参与意愿调研覆盖1500家典型工业企业,居民用户调研涵盖8000户家庭,商业用户调研涉及300家商业综合体及写字楼,确保样本具有区域代表性。

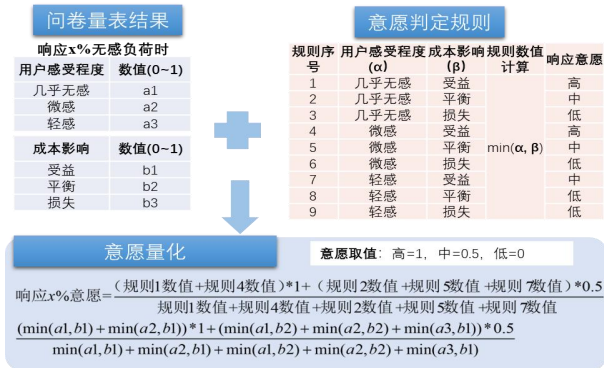


图10 基于问卷量表的模糊意愿量化方法

新型基础设施参与意愿上差异较大,考虑到新型基础设施以集中的大用户为主,且同类设施具有较高的普遍性,因此主要通过典型用户调研的方式开展。

3 算例分析

3.1 无感负荷理论测算

7月11日,义乌市各地气温普遍接近40℃,义乌市负荷曲线如图11所示,13:00义乌市最大负荷达到10189.6万千瓦,负荷高峰时段发生在9:00~17:00,并且夜间20:00~22:00负荷再次出现小高峰,负荷高峰基本覆盖了早峰(7:00~11:00)、腰荷(11:00~17:00)、晚峰(17:00~24:00)3个时段,当日高峰负荷持续时间较长。但纵观全年,高峰负荷累计持续时间较短。迎峰度夏期间,达到或超过最高负荷90%的天数有53天,总持续时间342.93h,其中日最长持续时间12.62h,日最短持续时间0.22h,日平均持续时间6.47h。

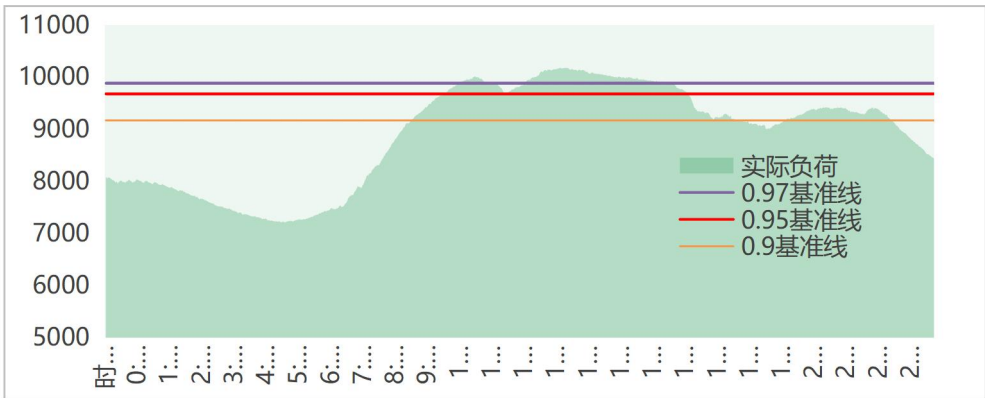


图11 7月11日义乌市负荷曲线

考虑到义乌市高峰负荷当日持续时间长、全年累计时间短的特点,以及夜间光伏出力锐减的电源影响,在无感负荷测算时,分早峰、腰荷、晚峰三个时段测算,以更好的满足不同时段削峰需求。

经过测算,目前义乌市夏季理论无感负荷约1787万千瓦(考虑同时率,最大为1641万千瓦)。其中,工业用户685万千瓦,占比38%;居民用户520万千瓦,占比29%;商业用户270万千瓦,占比15%;公共机构8

4万千瓦,占比5%;新型基础设施228万千瓦,占比13%。

无感负荷最大值出现在晚峰,这主要是晚峰时段居民空调上升较快,而该时段商业空调负荷还未完全下降,同时新型基础设施受智慧路灯影响夜间无感负荷有所上升。居民用户无感负荷最大值出现在晚峰,空调占比最高,其次是热水器。商业和公共机构用户无感负荷最大值出现在腰荷,空调占比最高,其次是照明和电梯。

工业无感负荷规模晚峰只考虑 17:00~22:00，工业用户理论无感负荷分布如图 13 所示，最大值出现在早峰时段，设备制造业、非金属矿物质业、纺织服装业、橡胶

塑料业。这 4 类工业用户无感负荷可调节空间均排名靠前，此外也受总负荷以及用户参与意愿影响。

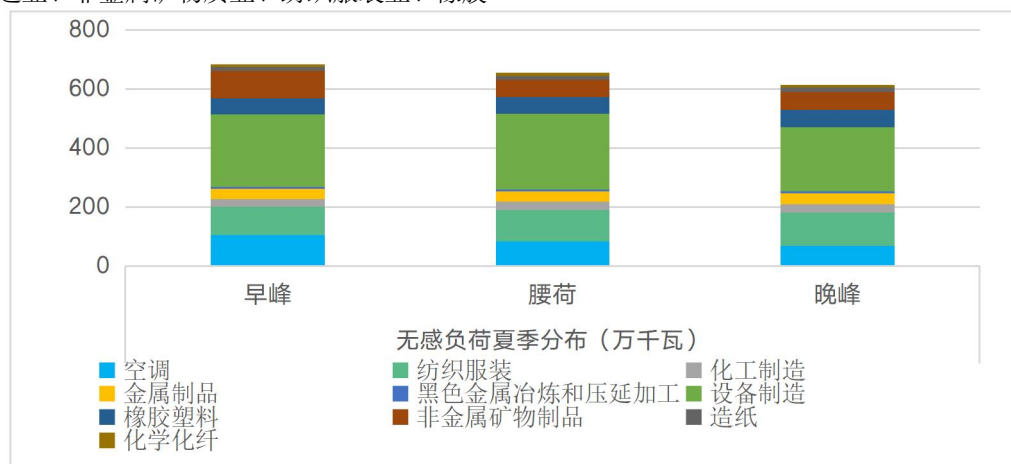


图 13 工业用户理论无感负荷分布

新型基础设施用户理论无感负荷分布如图 14 所示，负荷最大值出现在晚峰时段，其中数据中心和 5G 基站占比最大，主要是因为算力调节基础上，都有闲置的

配套储能设施可以参与无感调节，即短时以配套储能为数据中心或者基站供电，以减少对电网的需求。

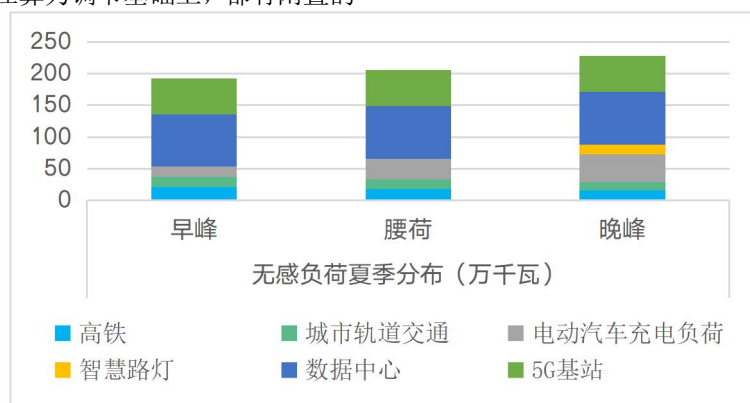


图 14 工业用户理论无感负荷分布

3.2 用户参与意愿分析

理论无感负荷基于用户参与意愿调研分析修正后，降至约 1047 万千瓦（考虑同时率为 931 万千瓦），其中工业用户 429 万千瓦、居民用户 292 万千瓦、商业用户 172 万千瓦、公共机构 51 万千瓦、新型基础设施 103 万千瓦。无感负荷构成比例基本不变，变化范围在 3% 以内。修正后，理论无感负荷减少了约 40%，可见未经修正的无感负荷仍对用户生产生活等产生影响。各场景用户参与意愿分析如下所述：

商业用户电价敏感度不高，空调调温的可接受程度较低，商场由于空间大、人员流动大一般需要维持在 25℃，办公楼由于人员年轻、代谢快，温度高会影响工作效率，只能接受 25℃；技术上，公共区域后台可控程度高，独立办公室可控程度低。

居民用户存在一定的电价敏感度，且有老年人、儿童的家庭对体感敏感，温度普遍可接受 26℃ 甚至 27℃，但城市年轻用户可接受 25℃ 居多；技术上，居民用户空调、热水器都可以手动调节，且部分新空调用户支持实时自动云调节，无感调节的难度主要是认知较少，响应方式不够便捷。

工业用户空调参与度较高，但生产负荷除了非金属矿物质制品业和金属矿物质制品业的电价敏感度较高外，其余用户电价敏感度相对较低，参与意愿普遍低于 60%，特别是化工制造、化学化纤行业最低；技术上，工业无感负荷由于生产工艺差异大、较为复杂，调控方式以用户自主响应为主，远程调控风险大。

公共机构经济上电价敏感度不高，但环保意识较高，空调普遍能接受 26℃，但电梯和照明因为涉及工作效率，

调节意愿相对较低;技术上空调、照明、电梯都可分路控制,公共区域后台可控程度高,独立办公室可控程度低。

新型基础设施中,高铁和地铁牵引技术对安全性要求高,数据中心和5G基站设备负荷影响计算或传输效率,响应意愿较低。电动汽车充电有一定的电价敏感性,但公共充电站更关注充电效率,随着充电效率的不断提升参与意愿也逐步提升,技术可操作性强;私用充电桩充电时间较为弹性,但可调节技术差。车站参与意愿则较好。

4 结语

本文通过多场景无感负荷建模和用户参与意愿分析,以义乌市为例,量化了夏季无感负荷的理论调节潜力与实际可调空间。研究发现,义乌市夏季最大负荷达到10189.6万千瓦,考虑同时率的夏季无感负荷为931万千瓦,可削减约9%的负荷高峰;工业用户的无感负荷占比最高,而居民和商业用户则受体感舒适度影响较大。用户参与意愿修正后,无感负荷减少约40%,表明实际调节需兼顾技术可行性与用户接受度。本文研究为新型电力系统的需求侧管理提供了重要参考,有助于实现电网的低碳、高效运行。未来研究可进一步结合气象数据和经济激励政策,提升无感负荷预测的精准性和用户响应率。

参考文献

[1]鞠立伟,吕硕硕,李鹏.新型电力系统需求侧灵活性资源时空协同优化与动态均衡机制研究综述[J].电力建设,2024,45(9):142-163.

[2]姜海洋,杜尔顺,金晨,等.高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2101-2115.

[3]Li P,Yu D,Yang M,等.Flexible look-ahead dispatch realized by robust optimization considering CVaR of wind power[J].IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(5):5330-5340.

[4]舒印彪,张正陵,汤涌,等.新型电力系统构建的若干基本问题[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8327-8341.

[5]Cabot C,Villavicencio M. The demand-side flexibility in liberalised power market:A review

of current market design and objectives[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2024,201:114643.

[6]王飞,李美颐,张旭东等.需求响应资源潜力评估方法、应用及展望[J].电力系统自动化,2023,47(21):173-191.

[7]鉴庆之,刘晓明,杨金叶,等.考虑需求响应的电力系统灵活性资源优化配置[J].现代电力,2021,38(3):286-296.

[8]林琳,高雪,甄钊.居民用户的需求响应基线负荷估计[J].电气自动化,2022(001):044.

[9]王蓓蓓,朱峰,嵇文路,等.中央空调降负荷潜力建模及影响因素分析[J].电力系统自动化,2016,40(19):44-52.

[10]孙毅,毛烨华,李泽坤,等.面向电力大数据的用户负荷特性和可调节潜力综合聚类方法[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6259-6271.

[11]Xue S,Che Y,He W,et al.Control strategy of electric heating loads for reducing power shortage in power grid[J].Processes,2019,7(5):273.

[12]周磊,李扬,高赐威.聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(3):5579-5589.

[13]Hui H,Ding Y,Liu W,et al.Operating reserve evaluation of aggregated air conditioners[J].Applied Energy,2017,196:218-228.

[14]杨恺,姚宇,孙可,等.考虑用户满意度的温控负荷能效综合指标模型和调峰策略[J].电力需求侧管理,2022,24(5):36-43.

[15]刘汗清,沈阳武,廖思阳,等.工业负荷参与电网互动的调控性能综合评价方法[J].湖南电力,2023,43(1):35-40.

[16]王琦,张文朝,汤涌,等.统计综合法负荷建模中的调查方法及应用[J].电网技术,2010,34(2):104-108.

[17]杨恺,姚宇,孙可,等.考虑用户满意度的温控负荷能效综合指标模型和调峰策略[J].电力需求侧管理,2022,24(5):36-43.

[18]FANGER P O,IPSEN B M,LANGKILDE G,等.Comfort limits for asymmetric thermal radiation[J].Energy and Buildings,1985,8(3):225-236.