

民用建筑电气负荷计算研究

李 鹏^{1,2}, 肖 辉², 邵 颀³, 赵 恒⁴

(1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200063;

2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804; 3. 上海华建工程建设咨询有限公司, 上海 200041;

4. 上海硕物天成信息科技有限公司, 上海 200052)

摘要: 当前民用建筑电气负荷计算以需要系数法为代表, 通过规范规定的需要系数、分散系数和同时系数等关键参数开展负荷计算。近些年来, 人们发现这种方法在民用建筑供电配电设计中存在不合理之处, 具体表现为变压器选择偏保守。鉴于当前民用建筑能耗系统已产生了大量能耗数据, 这些数据可以反过来用在新建建筑的负荷计算上。提出了一种新的负荷计算模型, 该模型利用已有建筑能耗大数据, 并用聚类算法整理后用于新建建筑负荷计算。基于这一思想设计了完整的数据归类和负荷计算流程, 并通过具体项目验证了这一模型。在验证项目中, 新的负荷计算模型得到的变压器配置比传统方法节省了 37.5% 的容量。该计算方法还有益于能耗数据的区块链应用。

关键词: 民用建筑; 负荷计算; 大数据; K-means 聚类

Research on electrical load calculation of civil building

LI Peng^{1,2}, XIAO Hui², SHAO Ting³, ZHAO Heng⁴

(1. China Construction Eighth Engineering Division. Co., Ltd., Shanghai 201206, China; 2. Department of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Hua jian Architecture, Engineering & Consulting Co., Ltd., Shanghai 200041, China; 4. Shanghai Shuowu Tiancheng Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200052, China)

Abstract: The current civil building electrical load calculation is represented by the demand coefficient method, and the load calculation is carried out through key parameters such as the demand factor, dispersion factor, and coincidence factor specified in the specification. In recent years, this method has been unreasonable in the power supply and distribution design of civil buildings, which is embodied in the conservative selection of transformers. Given that the current civil building energy consumption system has generated a large amount of energy consumption data, these data can be used in turn to calculate the load of new buildings. This paper proposes a new load calculation model, which uses the existing building energy consumption big data, and uses the clustering algorithm to calculate the load of new buildings. Based on this idea, this paper designs a complete data classification and load calculation process, and verifies the model through specific projects. In the verification project, the transformer configuration obtained by the new load calculation model saves 37.5% of the capacity compared with the traditional method. The calculation method is also beneficial for blockchain applications of energy consumption data.

Key words: civil building; load calculation; big data; K-means clustering

0 引言

负荷计算和变压器选择是建筑供配电设计的核心工作内容之一。当前建筑电气负荷计算方法基于统计学原理,采用需要系数、分散系数和同时系数等各类参数,通过统计末端容量数据倒推计算变压器容量^[1]。工业领域电气设备种类、数量和工序都非常确定,采用这些方法取得了很好的效果。

多年来,电气工程师围绕负荷计算开展了很多研究和讨论。文献[2]介绍了我国常用的负荷计算方法,对比了需要系数和同时系数的使用关系,列举了国际上这些计算方法的使用情况。文献[3]讨论了我国民用建筑负荷计算的注意事项,指出了建筑电气设计中容易出错的地方。文献[4]介绍了工业建筑中负荷计算采用需要系数法的计算过程,可见需要系数法在工业电气计算中作用巨大。文献[5]研究了负荷计算的需要系数法与二项式法,对比了二者的应用条件与问题所在,并补充了新的计算方法以提高准确度。文献[6]简单介绍了需要系数法的使用过程,并提出了一些具体问题和注意事项,便于电气工程师参考。文献[7]结合我国现行规范^[8],对用途广泛的《工业与民用供配电设计手册》中需要系数法进行了详细分析^[9],提出了需要系数法计算的几个关键问题。近些年来出现了一些新的计算方法:文献[10-11]介绍了新二项式法;文献[12]介绍了新需要系数法;文献[13]介绍了综合系数法。这些方法在原有方法基础上提高了公式的简洁程度,但没有改变计算原理。从以上文献可以看出,民用建筑负荷计算方法存在较多不合理之处,而在原有设计方法基础上的改进效果提升并不明显。

为了解决这些问题,各国科研工作者已经开始将大数据思维和人工智能方法引入相关领域。文献[14]提供了一种BIM工具使用的计算插件,用于计算建筑电气负荷指标以及相应的建设成本。该插件根据规范规定统计末端回路设备数目以便选择规范中参数,极大地提高了计算效

率。文献[15]从城市电网中期负荷预测出发,通过计算皮尔逊相关系数,从大数据中提取相似数据构建预测模型,采用多种机器学习算法对比,得到了很好的预测模型。文献[16]采用人工神经网络(ANN)进行了长期负荷预测,将10个因素作为ANN输入,得出了与现状基本一致的结果。文献[17]提出了一种等效负荷计算方法,在传统的需要系数法、二项式法等设计方法基础上,提高了计算准确度和效率,具备一定的大数据思维。文献[18]通过人工智能算法改进了住宅建筑需要系数法的计算,该文献在大量用户数据基础上,将住宅建筑根据季节进行划分,采用核密度估计方法提出了统计学意义上的需要系数新定义,证实了现在采用的需要系数取值偏大。文献[19]提出了一种考虑分时电价的情况下电动汽车充电负荷的计算方法,该方法通过采用智能算法,在为电动汽车完成充电的基础上,兼顾了电价波动,取得了很好的效果。文献[20]通过大数据预测建筑室内温度,从而计算用电负荷,采用近因效应对温度建模,取得了良好的效果。文献[21]提出了一种高效的算法,基于K-means等聚类算法统计了电力负荷,得到了高质量的负荷聚类曲线。文献[22]采用支持向量机和随机森林算法预测电力用户的负荷需求,为供电公司提供能耗数据。文献[23]通过人工神经网络研究了智能电网的预测模型,可以作为负荷预测的基础。文献[24]提出了一种电力负荷计算方法,通过对各类负荷用户的行业划分,得到相似性高的负荷数据,再通过算法分类计算,可取得准确的计算结果。

从文献可以看出,目前已有很多科研工作者正在考虑通过大数据和人工智能思路解决电力负荷计算问题。然而,这些研究或在讨论某一具体数据,或在输电端开展讨论,均未在一般意义上对建筑负荷计算展开研究,而这正是建筑物设备选择的重点所在。

1 负荷计算模型

当前世界各国供配电系统采用的负荷计算方

法以需要系数法为代表，这些方法在各国法规中表述基本一致。通过讨论当前负荷计算方法有利于发现问题，提出更为可行的新方法。

1.1 需要系数法讨论

当前世界各国民用建筑负荷计算方法有很多，比如美国消防协会（National Fire Protection Association, NFPA）采用需要系数法与同时系数法相结合的方法；在中国，法规规定的负荷计算方法包括单位指标法、需要系数法、二项式法和利用系数法等。其中，单位指标法适用于方案设计阶段，其余方法适用于初步设计和施工图设计阶段，需要系数法是民用建筑最常用的负荷计算方法，这里以此为例展开讨论。

需要系数法是从配电末端往变压器端逐一计算，获得变压器安装容量的过程。根据规范规定，配电等级共有3个级别，即变压器低压出线、楼层配电箱和末端配电箱，最终由末端配电箱配出末端回路给用电设备。需要系数法的计算步骤如下：

1) 确定末端回路负荷。电气工程师梳理所有末端回路，确定设备类型，比如照明负荷、插座负荷和电动机负荷等，每类负荷根据设备数量对应不同的需要系数。这些需要系数可在本国规范或手册中查到。

2) 确定末端配电箱负荷。由末端回路构成的末端配电箱有安装容量和运行容量之分。安装容量是指实际安装的设备容量之和，运行容量是指实际容量乘以需要系数之后的容量。

3) 确定楼层配电箱容量。由末端配电箱构成的楼层配电箱有安装容量和运行容量之分。安装容量是指所有末端配电箱运行容量之和；运行容量是指安装容量乘以分散系数。分散系数可查阅国际规范IEC 61439-1-2011，该规范也被各国引进，其中我国引进版本为GB 7251.1-2013。

4) 确定变压器容量。变压器低压出线到很多楼层配电箱、电动机配电箱等，有安装容量和

运行容量之分。变压器计算容量是指所有楼层配电箱运行容量之和乘以同时系数；同时系数也可在本国规范或手册中查到。

需要系数法在民用建筑的负荷计算中存在不合理之处，科研工作人员提出的质疑理由主要有如下几点：

1) 人工统计存在效率问题。需要系数法的理论基础是概率统计，在概率统计理论上得到的各类系数是通过人工统计得到的，这必然受到样本数量、类型的限制。每隔多年，这些系数需要重新核定一遍；而这些核定工作实际上并未开展，各版手册和规范中，各类系数往往仍然沿用30年前的数据。各类系数也很少反映近些年来新出现的建筑空间划分。

2) 规范参数存在选择区间问题。采用需要系数法计算变压器负荷，各国规范和手册中提供的设计系数采用区间系数的方式。比如电热设备需要系数取值0.3~0.5，没有经验的电气工程师不确定应该就高还是就低选择系数。

3) 未考虑类型和地域的差异。需要系数法提供的各类系数以负荷类型为基础，未体现民用建筑类型和地域的差异性，因此导致地区和建筑类型方面的误差。比如，位于热带地区和寒带地区同样的办公建筑，虽然设备配置相似，但用户使用习惯却存在很大差异，因此不可能得到相同的负荷计算结果。

需要系数法既无法保证准确度，又无法涵盖各种场合，电气工程师只能凭借经验开展设计，为了避免电气设备故障，只能采取保守设计，这导致了变压器设计容量偏大。而且，一个无法提供准确计算数据的方法，很难称之为科学方法。

1.2 基于大数据的负荷计算模型

近20年来，中国各地区新建了大量民用建筑，建筑类型丰富，能耗统计规范，并产生了大量有益的数据。以往这些数据除了自身建筑能耗统计外，并没有产生更多附加效益。根据JGJT 229-2010《民用建筑绿色设计规范》规定，我国建筑物能耗系统还进行了分类分项统计，其中

分项统计是指照明、空调和电力负荷应分项统计。具体做法中，所有变压器低压出线回路均按照照明、空调和电力负荷设计，而后分别计量能耗；其中，电力负荷又包括很多种类，比如水泵、电梯、信息中心和电动汽车等均得到了分项统计。世界其他地区能耗系统也有类似规定。

根据概率论思维，相同地区、相同使用功能的建筑物单位面积能耗具有一定统计规律。具体而言，相应能耗数据符合以下数理统计特征：

1) 相同地区、相同使用功能的建筑物单位面积能耗呈正态分布。

2) 相同使用功能的建筑物可以进一步划分档次，比如办公楼可能有高、中、低不同档次，经过分档操作，每档数据仍呈正态分布，但方差值明显减小。

3) 如果某地区或建筑类型数据量不足，应用概率论置信区间理论增加置信系数，可以避免新建项目负荷计算的设备故障风险。

根据以上原则，相同地区、相同使用功能的新建建筑单位面积能耗也具有相同数理统计规律。因此，可将已有建筑物能耗数据作为新建建筑物负荷计算的依据。

在以上设想下，建立民用建筑负荷计算模型，利用已有建筑能耗大数据，获得新建建筑计算负荷。采用该负荷计算模型，新建建筑负荷计算工作转换为已有建筑物能耗统计工作，而已有建筑能耗统计为了实现新建建筑负荷计算而进行数据分析。

2 计算模型构建

根据前文基于大数据的负荷计算模型讨论计算流程，为民用建筑负荷计算提供具体指导。

2.1 总体计算步骤

总体而言，民用建筑负荷计算应具备设计输入与设计输出，具体如图1所示。

民用建筑负荷计算设计输入包括以下四个方面。

1) 建筑能耗数据库。该数据库为经过整理的已有建筑能耗数据。

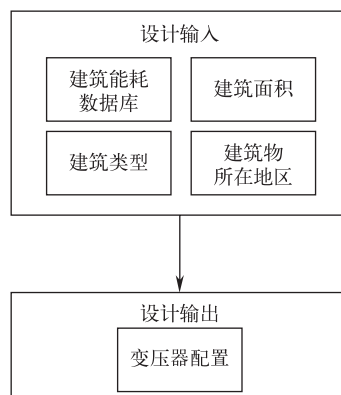


图1 负荷计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of load calculation

2) 建筑面积。为新建建筑物的报规建筑面积。

3) 建筑类型。建筑类型的统计可参照GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》附录A，共列举了31种民用建筑类型，如办公、学校、医院、商场、酒店、会展和住宅等。

4) 建筑物所在地区。参照《工业与民用供配电设计手册》（第四版）第17.6.3条思路，建筑物所在地区应具体到地市级单位。

民用建筑负荷计算设计输出为变压器配置，即变压器容量和数量选择。

2.2 能耗数据库建立流程

建立能耗数据库，即已有建筑物能耗统计，其主要任务在于得到便于新建建筑负荷计算的数据分类。具体流程如图2所示。

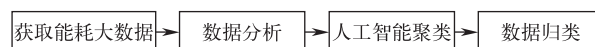


图2 能耗数据库建立示意图

Fig. 2 Schematic diagram of establishing energy consumption database

能耗数据库建立流程包括三个步骤：

1) 获取能耗大数据。这个步骤是直接获取现有各类、各地区建筑物能耗系统统计的所有数据。这些数据可根据地区、建筑类型分类，也可根据照明、空调和电力分项数据分类。

2) 数据分析。这个步骤的任务在于生成单位能耗数据，具体方法是将每条能耗数据除以建筑面积，提供的数据包括分项能耗单位数据和建

筑类型能耗单位数据。

3) 人工智能聚类。采用人工智能聚类算法,将各类数据整理成 k 个档次。一方面便于业主根据新建建筑的实际用途确定负荷配置;另一方面能减小数理统计的偏差。具体人工智能聚类方法流程如图3所示。

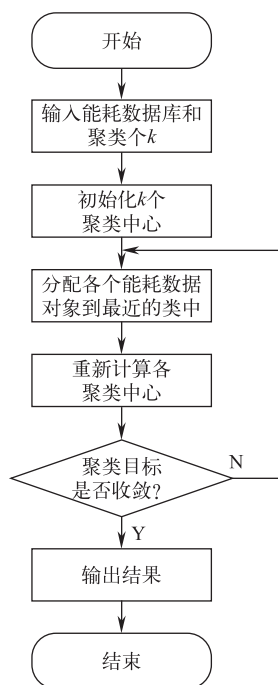


图3 聚类算法流程图

Fig. 3 Flow chart of clustering algorithm

4) 数据归类。生成经过人工智能聚类的数据,包括 k 类分项能耗单位数据和 k 类建筑类型能耗单位数据。经过归类的数据形成了民用建筑能耗数据库。

人工智能聚类算法有很多种,这里采用取得普遍应用的K-means算法。图3中,获得数据库后,首先输入聚类数量 k 。比如, $k=3$ 意味着提供的数据包括高档、中档和低档三种聚类数据,以供业主选择。数据初始化后分配能耗数据对象,重新计算聚类中心;如果目标函数已收敛,则输出结果;如果未收敛,则重新分配聚类中心直至收敛。

2.3 负荷计算流程

拥有了建筑能耗数据库,便可用于新建建筑的负荷计算,计算示意图如图4所示。



图4 负荷计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of load calculation

新建建筑的负荷计算包括三个步骤:

1) 匹配建筑能耗数据库。具体包括匹配地区信息和建筑类型信息。

2) 负荷计算。首先通过匹配的数据库,找到建筑分项能耗信息,乘以新建建筑的面积,即可得到照明、空调和电力分项能耗数据;其次三者求和并经过换算得到总负荷 S_e ;然后找到计算建筑类型数据,乘以新建建筑的建筑面积,再经过换算可得到总负荷 S_m ;最后对比 S_e 与 S_m ,取大者为该新建建筑的总能耗 S_0 。

3) 确定变压器。变压器的配置应不小于总能耗 S_0 ,还应根据能耗数据库大小考虑置信系数 a ,计算公式为

$$a = \frac{\bar{x} + z \frac{S}{\sqrt{n}}}{\bar{x}} \quad (1)$$

式中, $\bar{x}$ 为经过聚类的样本均值; z 为置信度临界值,当置信度取95%时, $z=1.96$; S 为第 k 个聚类的样本标准差; n 为第 k 个聚类的样本量。

3 实施案例

在已有计算流程和数据统计的基础上,通过具体项目的计算,可直观展示该流程的负荷计算过程。

3.1 案例介绍

某办公建筑位于上海市浦东新区,建筑面积约8 000 m²,采用1台800 kV·A变压器供电,单位负荷指标约100 V·A/m²。经过长期运行能耗统计,发现该办公建筑变压器负载率为30%~40%,即使用电高峰时也没有突破50%,远低于规范规定的85%负载率。

如果该办公建筑作为新建建筑重新设计,降低变压器配置,可有效减少业主初装费用和建筑运行费用。

3.2 能耗数据库

本设计利用建筑物一年内产生的能耗数据

作为能耗数据库，时间跨度为2021年4月1日—2022年3月31日。该数据库由同地区、同建筑类型的既有建筑产生，虽非通过大量其他建筑物产生，但由于为自身的历史数据，用作新建筑计算时的契合度仍然很高。

笔者获得的能耗数据库为逐时数据，即每小时产生一条能耗数据，该数据恰好可直接作为功率数据。该数据库已根据规范要求，区分了照明、空调和电力数据。每日取最高的1 h数据作为每日最高能耗，并分别取每日总能耗、照明能耗、空调能耗和电力能耗，能耗数据曲线图如图5所示。

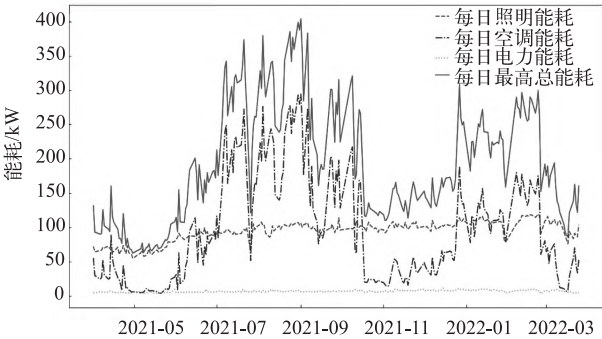


图5 能耗数据曲线图

Fig. 5 Energy consumption data curve

图5中，一年内每日最高总能耗 $P_0=411$ kW，照明能耗 $P_1=119$ kW，空调能耗 $P_2=305$ kW，电力能耗 $P_3=10$ kW。采用人工智能算法聚类，取 $k=3$ ，则输出高、中和低三组共计12条能耗数据。每日能耗数据聚类图如图6所示。

根据图2能耗数据库建立流程，这些数据需除以建筑面积 R 变换为单位能耗，形成的能耗数据库见表1。

表1 能耗数据库单位数据及置信系数

Tab. 1 Unit data and confidence coefficients of energy consumption database

聚类组别	总能耗 P_0/a_0	照明能耗 P_1/a_1	空调能耗 P_2/a_2	电力能耗 P_3/a_3
高	50.6 W /1.016 8	14.9 W /1.016 8	36.8 W /1.027 8	1.4 W /1.024 1
中	37.5 W /1.015 9	14.5 W /1.022 9	23.6 W /1.030 0	1.4 W /1.028 9
低	24.3 W /1.031 6	14.3 W /1.019 8	11.9 W /1.045 7	1.2 W /1.027 8

3.3 负荷计算

如果业主选择高档数据，则该项目选择上表中 $k=1$ 的一行，即 $P_0=50.6$ W， $P_1=14.9$ W， $P_2=36.8$ W， $P_3=1.4$ W。通常经过补偿后的功率因数 $\cos \varphi \approx 0.95$ ，则

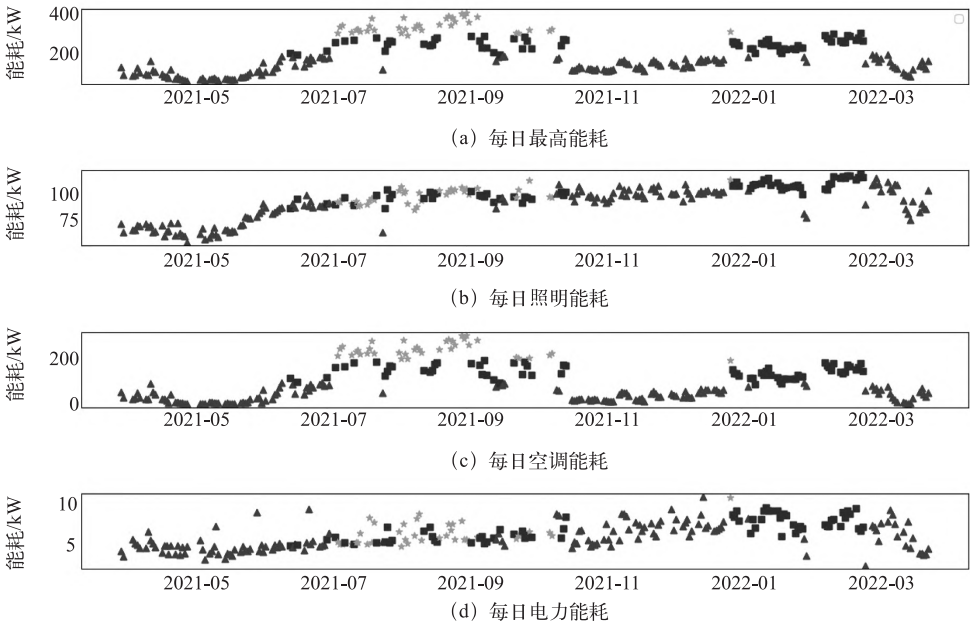


图6 每日能耗数据聚类图

Fig. 6 Daily energy consumption data clustering diagram

$$S_m = P_0 R / \cos \varphi = 426 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad (2)$$

$$S_e = (P_1 + P_2 + P_3) R / \cos \varphi = 447 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad (3)$$

经过对比, 总能耗 $S_0 = S_e = 437 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。经过聚类算法, 变压器配置 S_1 为

$$S_1 = \frac{(a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3) R}{\cos \varphi} = 458 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad (4)$$

根据变压器产品序列, 可选择 $500 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 变压器。

经过该方法的计算, 变压器配置节省了 $(800 - 500) / 800 = 37.5\%$, 有效降低了业主初装费用和运营费用。

3.4 计算讨论

通过应用负荷计算模型, 获得了节省 37.5% 变压器配置的结果, 然而有几项内容需要讨论:

1) 通过本文的计算, 该建筑物单位负荷指标为 $(500 \times 1\,000) / 8\,000 = 62.5 \text{ V} \cdot \text{A} / \text{m}^2$ 。很多工作多年的电气工程师可能会认为该数据作为高档办公楼偏保守, 变压器可能会因严重过载而影响建筑使用。其实这些担心是建立在已有设计经验基础上, 而非统计学基础上的。正是由于建筑供配电系统长期设计保守, 才会使得电气工程师出现这种想法, 如果多关注能耗系统统计数据便不会有此担心了。实际上, 即使出现了特别高的尖峰电流, 变压器也因为具备过载能力而能够解决这个问题。

2) 该设计通过 $500 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 变压器替代了 $800 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 变压器。如果采用该变压器配置开展低压系统设计, 很多电气工程师还可能会担心, 原有的低压负荷经过计算后无法匹配该变压器设计。其实, 这是由于原方法计算的低压出线需要系数选用偏大导致的。为了解决这个问题, 还应该为低压出线展开进一步大数据匹配工作。

3) 本章计算方法与前章所述负荷计算模型相比, 在数据库的选择方面有所差异。本章计算方法采用的数据库并非由既有建筑提供, 是假设该建筑物需要重新设计, 利用了之前产生的数据。如果这个前提假设成立, 那么本文的做法是可行的。相比相同地区、相同建筑类型的数据库

资料, 自身提供的数据规避了建筑内部使用功能的差异, 数据匹配度更高。

4) 本章数据库之所以未采用能耗大数据, 是因为目前尚未开展能耗大数据的统计工作。尽管该数据库是真实存在的, 而且确实有使用场合, 但实际的数据整理工作还需要更多条件, 包括资金条件和技术条件。一方面, 需要收集各类建筑物能耗数据, 即需要初始资金; 另一方面, 如何保证数据提供者的收益和隐私, 如何为数据使用者定价, 需要完善的区块链技术。

4 结束语

本文提出了一种新的民用建筑负荷计算模型, 该模型基于大数据和人工智能技术, 比当前采用的方法准确度更高, 达到了明显节省成本的效果。本文采用传统方法的理论基础, 结合已有大量能耗数据和成熟的聚类算法, 提出了新的计算模型。该模型包括建立能耗数据库和应用数据库计算负荷两部分。得到以下结论:

1) 能耗数据库利用当前已有建筑物产生的大量能耗数据, 经过数据分析、聚类得到了可应用于新建建筑负荷计算的能耗数据库。

2) 采用 K-means 聚类算法处理数据, 通过设定聚类数量区分不同能耗档次, 为待计算建筑物提供更准确的能耗指标。

3) 建筑负荷计算流程包括匹配建筑能耗数据库、负荷计算和确定变压器, 通过匹配归类数据库和负荷计算, 得到变压器配置数据。

4) 利用本文提出的负荷计算模型, 对上海地区某办公建筑开展负荷计算, 得到的变压器配置比传统需要系数法降低了 37.5% 。通过在个案中表现出的节能效果, 本文建议民用建筑负荷计算采用该负荷计算模型。

该计算模型操作简单, 易于计算, 能够为业主节省初装费用和运营费用。该计算模型建立在大数据基础上, 未来我们将专注于如何采用区块链技术为整个产业链提供效益。一旦这项技术得到推广, 将使民用建筑电气设计工作进入大数据时代。

参考文献

- [1] 张白帆. 低压成套开关设备的原理及其控制技术[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [2] 李炳华, 徐学民, 董青. 负荷计算若干问题探讨[J]. 建筑电气, 2020, 39(1): 8-12.
- [3] 贾旭. 浅谈民用建筑电气设计中负荷计算与负荷分级[J]. 砖瓦世界, 2022(3): 157-159.
- [4] 张晟. 浅析工厂电力负荷及其计算[J]. 新疆有色金属, 2022, 45(6): 105-106.
- [5] 李会娟. 计算负荷两种实用计算方法的比较[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2007, 25(3): 55-58.
- [6] 李明霞. 浅析用需要系数法确定计算负荷[J]. 中国设备工程, 2020(24): 242-243.
- [7] 吴宏婷. 民用建筑采用需要系数法计算负荷应注意的问题[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2011(31).
- [8] 民用建筑电气设计标准GB51348—2019[S].
- [9] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用配电设计手册[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [10] 施俊良, 蔡玉杰. 用新二项式法求计算负荷[J]. 建筑电气, 2018, 37(9): 3-8.
- [11] 施俊良, 蔡玉杰. 用新二项式法求计算负荷的偏差[J]. 建筑电气, 2019, 38(9): 44-49.
- [12] 施俊良, 谢耀辉, 魏青秀. 用新需要系数法求计算负荷[J]. 建筑电气, 2014(12): 33-36.
- [13] 施俊良, 蔡玉杰. 用综合系数法求计算负荷[J]. 建筑电气, 2018, 37(1): 8-14.
- [14] FAROOQ J, SHARMA P. A BIM-based detailed electrical load estimation, costing and code checking[J]. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 2018, 8(5): 2088-8708.
- [15] JUNG S M, PARK S, JUNG S W, et al. Monthly electric load forecasting using transfer learning for smart cities[J]. Sustainability, 2020, 12(16): 6364.
- [16] KERMANSHAH B, IWAMIYA H. Up to year 2020 load forecasting using neural nets[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24(9): 789-797.
- [17] 刘重晓. 建筑电气设计中的等效负荷计算分析与探讨[J]. 价值工程, 2021, 40(24): 184-186.
- [18] 周浩, 雍静. 住宅计算负荷估计方法研究[J]. 建筑电气, 2015(1): 3-8.
- [19] 张振夫, 黄小庆, 曹一家, 等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 24-29.
- [20] WANG P, LIU B, HONG T. Electric load forecasting with recency effect: A big data approach[J]. International Journal of Forecasting, 2016, 32(3): 585-597.
- [21] 孙园, 李秋雨, 黄冬梅, 等. 基于粒计算和双尺度相似性的负荷曲线集成聚类算法[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 117-126.
- [22] SHIRZADI N, NIZAMI A, KHAZEN M, et al. Medium-term regional electricity load forecasting through machine learning and deep learning[J]. Designs, 2021, 5(2): 27.
- [23] MOON J, PARK S, RHO S, et al. A comparative analysis of artificial neural network architectures for building energy consumption forecasting[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(9): 1550147719877616.
- [24] 国网湖南省电力有限公司, 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 国家电网有限公司. 电力行业负荷分类计算方法及其跟踪分析方法: CN202011295076. 3[P]. 2021-01-29.

作者简介

李鹏(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 建筑电气、建筑智能化和零碳建筑能源系统。

(收稿日期: 2023-01-26)