# 基于模糊贴近度理论的负荷密度指标求取新方法

符 杨[1]，朱 兰[2]，曹家麟[2]

(1. 上海大学机电工程与自动化学院，上海市 200072；2. 上海电力学院电力与自动化工程学院，上海市 200090)

**摘要：** 现有负荷密度指标的求取方法通常采用经验法或简单类比法，难以满足精度要求。文中引入模糊贴近度理论分类求取负荷密度指标，采用加权海明贴近度算式计算不同等级标准样本及待测区对低水平样本的贴近度，获得负荷密度指标体系划分阈值，并给出待测区参考负荷密度指标值。实例表明，该方法构建合理，概念清晰，计算简便，实用性较强。

**关键词：** 负荷预测；负荷密度指标；贴近度

**中图分类号：** TM715；TP18

## 0 引言

电力中长期负荷预测是电力系统规划工作的基础，其目的是合理安排电源和电网建设进度，满足国民经济增长和人民生活水平提高的需要。目前常用的中长期负荷预测方法主要有负荷密度(指标)法、趋势外推法、回归分析法、电力弹性系数法、神经网络法、灰色分析法、系统动力学法等[1-7]。负荷密度指标法是一种预测区域远景负荷的实用方法，其关键技术和难点是区域负荷密度指标的准确选取。以往确定负荷密度指标的方法大多是通过经验或简单类比获得。本文尝试采用一种新的求取方法，即基于大量调研的数据，引入模糊贴近度理论[8-12]求取负荷密度指标，量化影响负荷密度指标的因素，使预测结果更为准确。在模糊贴近度求解模型的构建中，对每个影响因素只构造一个隶属函数，简化了计算，并可获得参考指标的量化结果。

## 1 模糊贴近度理论介绍[13-17]

### 1.1 模糊贴近度的定义

贴近度用来反映两模糊集的接近程度。

**定义** 设论域 $U$，直积 $U\times U$ 上关于 $U$ 上2个模糊子集 $A$ 和 $B$ 的映射 $n(A,B)\rightarrow[0,1]$ 满足以下3个条件，则称 $n(A,B)$ 为 $A$ 与 $B$ 的贴近度：① $n(A,A)=1$，$n(\varnothing,U)=0$；② $n(A,B)=n(B,A)$；③ $A\subseteq B\subseteq C\Rightarrow n(A,C)\leqslant n(A,B)\wedge n(B,C)$。

### 1.2 常见贴近度求取公式

1)用距离法定义贴近度：

$$n(A,B)=1-cd^{a}(A,B)$$

式中：$c$ 和 $a$ 是2个适当选择的参数；$d(A,B)=\left(\sum\left|A(U_k)-B(U_k)\right|^{p}\right)^{1/p}$，称为闵可夫斯基距离，$p\geqslant1$。当 $p=1$ 时，$d(A,B)$ 称为海明距离；$p=2$ 时，$d(A,B)$ 称为欧氏距离。

2)最小最大贴近度：

$$n(A,B)=\frac{\sum_{k=1}^{n}\min(\mu_A(u_k),\mu_B(u_k))}{\sum_{k=1}^{n}\max(\mu_A(u_k),\mu_B(u_k))}$$

3)最小平均贴近度：

$$n(A,B)=\frac{2\sum_{k=1}^{n}\min(\mu_A(u_k),\mu_B(u_k))}{\sum_{k=1}^{n}\mu_A(u_k)+\sum_{k=1}^{n}\mu_B(u_k)}$$

4)加权贴近度[18]：

$$n(A,B)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}W(x_i)\mid\mu_A(x_i)-\mu_B(x_i)\mid$$

## 2 求取负荷密度指标的步骤

采用负荷密度指标法进行负荷预测时，负荷的精细分类可增强预测的准确性。本文首先将负荷类型按性质细化为10类：工业用地；住宅用地；行政办公用地；商业用地；文化娱乐用地；研发用地；教育、医疗、体育等公共设施用地；市政设施用地；仓储物流用地；绿化、广场及道路用地。通过搜集大量数据统计类比，得出每一类性质负荷密度指标的跨度均小于100 W/m$^2$，因此针对每一类性质用地按负荷密度指标的大小，可将样本细分为低、较低、中、较高、高5类，以满足模型辨别精度要求。把低和高作为负荷密度指标水平的2种极端情况。通过调研整理分析，分类确定影响负荷密度指标的主要因素。

收稿日期：2007-03-19；修回日期：2007-06-12。

上海市重点攻关项目(052312003)；上海优秀青年教师科研专项基金资助项目(Z2006-12)；上海市重点学科建设项目(P1301)。

在建立模糊隶属函数时,不采用每个影响因素针对不同标准样本建立隶属函数的做法,而是转化为仅针对某种水平样本建立隶属函数的模型。前者计算量大,且只能做到分类,后者不仅简化了计算,通过模糊贴近度计算确定密度指标等级划分阈值之后,还可利用线性插值得出待测区负荷密度指标参考值,量化结果。由于贴近度计算结果需体现单调性,选择低水平或高水平 2 种极端情况作为基准较为适宜,而各标准样本中低水平样本的数据来源较之高水平样本更稳定,故本文最终采用对每个影响因素针对低水平样本建立隶属函数。

具体模型描述如下:对 $n$ 个影响因素表征的低水平样本可以构建一个隶属度为 1 的模糊子集:

$$A_{\mathrm{low}} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} + \cdots + \frac{1}{F_n}$$

式中:$F_i$ 表示第 $i$ 个影响因素;1 表示相应于第 $i$ 个影响因素对低水平样本的隶属度。

某待测区域由它的 $n$ 个影响因素所表征的负荷密度指标水平对低水平样本的隶属度必定落在区间[0,1]内,可构成如下形式的模糊子集:

$$X = \frac{u_1}{F_1} + \frac{u_2}{F_2} + \cdots \frac{u_n}{F_n}$$

式中:$u_i$ 满足 $1 \geqslant u_i \geqslant 0$;$i=1,2,\cdots,n$。

由此可见,评价某区域的负荷密度指标水平问题归根结底是考查其对低水平样本的隶属度问题,进而转化为反映它所对应的模糊子集 $X$ 与低水平样本所对应的模糊子集 $A_{\mathrm{low}}$ 之间的模糊性问题[18]。

采用模糊贴近度理论确定某类性质用地负荷密度指标的流程见图 1。

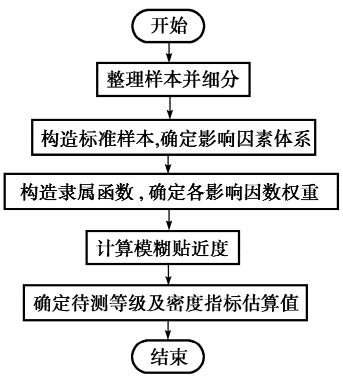


**图 1 模糊贴近度理论确定负荷密度指标的流程**
**Fig. 1 Flow chart of load density determination implemented with fuzzy closeness theory**

# 3 应用及示例

本文以上海商业负荷(负荷细分的第 4 类)密度指标求取为例,说明模糊贴近度理论求取负荷密度指标的过程。调研整理部分参考样本(大厦)负荷密度指标见表 1。

**表 1 部分参考样本(大厦)负荷密度指标**
**Table 1 Reference load densities of partial building**

| 序号 | 商厦名称 | 密度指标/(W·m$^{-2}$) |
|---|---|---|
| 1 | 上海徐家汇商城股份有限公司 | 112 |
| 2 | 新世界股份有限公司 | 104 |
| 3 | 上海太平洋百货有限公司淮海分公司 | 95 |
| 4 | 上海城隍庙第一购物中心 | 90 |
| 5 | 东方商厦有限公司 | 87 |
| 6 | 上海二百永新有限公司 | 77 |
| 7 | 上海环龙商场 | 57 |
| 8 | 上海文化商厦 | 56 |
| 9 | 上海松江商城 | 33 |
| 10 | 上海市第一食品商店 | 32 |

## 3.1 构造评价指标及标准样本

一般来说,某类地块负荷密度指标大小主要由地块位置(离市中心的距离)、占地面积、建筑面积、建筑结构与使用性质、区域经济发展水平、未来的发展规划等因素决定。商业建筑由于所处的地理环境、居民的生活消费水平、功能与建筑结构、规模与销售定位(形式、对象、商品等)的不同,其负荷指标不尽相同,用电负荷主要是一些照明与恒温设备,一旦建成,负荷增长有限。

通过对大量商业样本的整理分析,确定以下 3 个因素作为商业负荷密度指标的主要影响因素:①商场定位 $F_1$;②地理位置 $F_2$;③结构因素 $F_3$(包括商场建筑面积折算系数 $S_q$、营业面积比例 $S_c$、建筑耗能系数 $E_c$ 的综合处理系数)。

根据样本的密度指标范围,将样本分为5 类,取每类样本的评价因素几何平均值构造 5 级标准样本指标集,见表 2。

**表 2 5 级标准样本指标集**
**Table 2 Five standard index sets**

| 等级 | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | 参考密度指标/(W·m$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|
| Ⅰ级 | 80 | 85 | 2.324 480 | >100 |
| Ⅱ级 | 70 | 75 | 2.160 570 | 75~100 |
| Ⅲ级 | 55 | 65 | 1.859 526 | 50~75 |
| Ⅳ级 | 50 | 40 | 1.759 035 | 25~50 |
| Ⅴ级 | 45 | 30 | 1.578 109 | 0~25 |

表 2 中,$F_1$,$F_2$,$F_3$ 的定性指标向定量指标转化采用两级比例方法[19],转换方式见图 2。

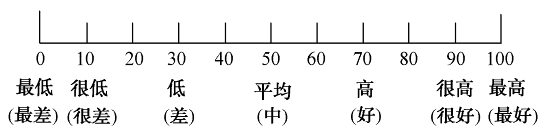


**图 2 定性指标向定量指标转化图**
**Fig. 2 Number of membership functions and linguistic interpretation**

结构因素 $F_3$ 的构造公式为：

$$F_3=\frac{S_{\text{q-max}}-S_{\text{q}}}{S_{\text{q-max}}}+\frac{S_{\text{c}}}{S_{\text{c-max}}}+\frac{E_{\text{c}}}{E_{\text{c-max}}}$$

式中：$S_{\text{q-max}}$ 为最大建筑面积折算系数；$S_{\text{c-max}}$ 为最大营业面积比；$E_{\text{c-max}}$ 为最大建筑耗能系数。

设待测区域为未知商业建筑 $X$（为验证算法，这里 $X$ 取上海二百永新有限公司数据），$X$ 的原始数据见表 3，影响因素 $F_1$，$F_2$，$F_3$ 处理后的量化数据分别为 70，70，1.915。

**表 3 X 的原始数据**
**Table 3 Original data of X**

| 影响因素 | 定位 | 位置 | 建筑面积/m$^2$ | 营业面积/m$^2$ | 建筑综合耗能 |
|---|---|---|---|---|---|
| 原始数据 | 高 | 好 | 32 400 | 10 000 | 中 |

## 3.2 构造隶属函数

常用模糊集隶属函数一般有 3 种形式：偏小型模糊分布；偏大型模糊分布；中间型模糊分布。本文针对每一个因素构造一个对低水平样本（Ⅴ级）的隶属函数[18]，故应采用偏小型模糊分布。它根据所选函数的不同常采用以下分布：①降半矩阵模型分布；②降半 Γ 分布；③降半正态分布；④降半 Cauchy 分布；⑤降半梯形分布；⑥降岭形分布；⑦$k$ 次抛物线分布。本文为使最终模糊识别的结果能反映出不同商场特征的微小差异，并根据商业建筑负荷密度指标及影响因素的特点按抛物线分布模型构造隶属函数[18]：

$$\mu_{\text{F}i}=\begin{cases}1 & x\leqslant\alpha_i\\(K_ix+C_i)^{N_i} & \alpha_i<x<\beta_i\\0 & x\geqslant\beta_i\end{cases}$$

式中：$\alpha_i$，$\beta_i$ 分别为第 $i$ 个影响因素的低水平（Ⅴ级）和高水平（Ⅰ级）的标准值；$K_i$，$C_i$，$N_i$ 为第 $i$ 个影响因素的隶属函数待定常数，应满足 $(K_i\alpha_i+C_i)^{N_i}=1$，$(K_i\beta_i+C_i)^{N_i}=0$；$i=1,2,3$。

显然，中水平（Ⅲ级）负荷密度指标的类别刚好隶属中间状态，应有 $\mu_{\text{F}i}(x_{\text{Ⅲ}})=0.5$。

由此确定 $K_i$，$C_i$，$N_i$ 的数值，进而确定隶属函数形式。以影响因素 $F_1$ 为例，$\alpha_i=45$，$\beta_i=80$，相应确定系数 $K_i=-0.028\ 57$，$C_i=2.285\ 7$，$N_i=2.06$，隶属度函数形式为：

$$\mu_{F1}=\begin{cases}1 & x\leqslant 45\\(-0.028\ 57x+2.285\ 7)^{2.06} & 45<x<80\\0 & x\geqslant 80\end{cases}$$

$X$ 各影响因素 $F_1$，$F_2$，$F_3$ 对低水平样本的隶属度分别为 0.075 768，0.410 678，0.415 346。

## 3.3 确定影响因素的权重

由于每个因素影响负荷密度指标大小的程度不相同，需要考虑各影响因素的权重问题。权重系数的确定方法一般有层次分析法和变异系数法等。本文采用变异系数法确定影响因素的权重[20]。

变异系数法认为某个影响因素数值之间的差异性越大，则该指标在综合评价中的作用就越大，其权重也应越大。所以，可以根据各个影响因素数值之间的差异性，利用变异系数这一参数来确定各影响因素的权重。利用变异系数确定评价指标权重向量的步骤如下：

1）计算各个影响因素的变异系数：

$$\delta_i=D\sqrt{F_i}$$

2）计算第 $i$ 个影响因素的权重：

$$W_i=\delta_i\Big(\sum_{t=1}^{m}\delta_t\Big)^{-1}$$

$$D=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(F_{ij}-\overline{F}_i)^2}$$

式中：$\delta_i$ 为第 $i$ 个影响因素的变异系数；$D$ 为第 $i$ 个影响因素数值的均方差；$\overline{F}_i$ 为第 $i$ 个影响因素数值的均值；$W_i$ 为第 $i$ 个影响因素数值的权重，$\sum_{i=1}^{m}W_i=1$。

影响因素 $F_1$，$F_2$，$F_3$ 的权重值（归一化后）分别为 0.343 05，0.423 917，0.233 032。

## 3.4 贴近度计算及结果

不同的贴近度具有不同的性质和算法，本文中待测区域 $X$ 对低水平样本的贴近度与模糊距离的概念较为相符，当模糊集 $A_5(A_{\text{low}})$ 与 $X$ 的距离越小时，它们的贴近度就越大，故本文采用距离贴近度中的海明贴近度进行计算，并考虑各影响因素的不同权重进行了加权处理。$X$ 对低水平样本的贴近度计算公式如下：

$$n(X,A_5)=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}W(x_i)\,|\,\mu_X(x_i)-\mu_{A_5}(x_i)\,|=0.703\ 125$$

此值越小，说明 2 个模糊子集状态越接近。

此外，计算Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级标准样本对低水平样本（Ⅴ级）的贴近度分别为：$n(A_1,A_5)=1$，$n(A_2,A_5)=0.816\ 813$，$n(A_3,A_5)=0.499\ 92$，$n(A_4,A_5)=0.225\ 587$。依据以上数据可划分商业的负荷密度指标范围，见表 4。

**表 4 商业负荷密度指标范围划分**
**Table 4 Classifications of indication range of business load density**

| 贴近度 | 归属范围 |
|---|---|
| $0<n(X,A_5)\leqslant 0.225\ 587$ | Ⅳ级 |
| $0.225\ 587<n(X,A_5)\leqslant 0.499\ 92$ | Ⅲ级 |
| $0.499\ 92<n(X,A_5)\leqslant 0.816\ 813$ | Ⅱ级 |
| $0.816\ 813<n(X,A_5)\leqslant 1$ | Ⅰ级 |

显然 $X$ 归属密度指标Ⅱ级,通过与标准样本的平均密度指标线性插值,得到 $X$ 的参考密度指标值 79.427 08 W/m$^2$,与调研得知的上海二百永新有限公司的负荷密度指标 77 W/m$^2$ 比较,计算误差约为 3%,在可承受范围之内。

## 参 考 文 献


[1] 谷子,唐巍.中长期负荷预测方法概述.[R/OL].[2005-06-02].http://www.zidonghua.com.cn/. Forum about power resources.
GU Zi, TANG Wei. A review of medium to long term load forecast. [R/OL]. [2005-06-02]. http://www.zidonghua.com.cn/. Forum about power resources.

[2] 韦凌云,吴捷,刘永强.基于系统动力学的电力系统中长期负荷预测.电力系统自动化,2000,24(16):44-47.
WEI Lingyun, WU Jie, LIU Yongqiang. Long-term electric load forecasting based on system dynamics. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(16): 44-47.

[3] 张国江,李继红.基于模糊推理系统的多因素电力负荷预测.电力系统自动化,2002,26(5):49-53.
ZHANG Guojiang, LI Jihong. Multi-factor short-term load forecasting based on fuzzy inference system. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 49-53.

[4] 余贻鑫,张崇见,张弘鹏.空间电力负荷预测小区用地分析:(二)模糊推理在小区用地分析中的应用.电力系统自动化,2001,25(7):28-31.
YU Yixin, ZHANG Chongjian, ZHANG Hongpeng. Small area land-use analysis fuzzy spatial load forecasting: Part two application. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(7): 28-31.

[5] 高洁,孙海斌,唐国庆.基于模糊综合评判的电力负荷预测最优组合预测.系统工程学报,2001,16(2):106-110.
GAO Jie, SUN Haibing, TANG Guoqing. Application of optimal combined forecasting based on fuzzy synthetic evaluation on power load forecast. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(2): 106-110.

[6] 符杨,胡荣,朱兰.城区配电网实用规划方案的研制.上海电力学院学报,2006,22(1):36-38,58.
FU Yang, HU Rong, ZHU Lan. Development of applied urban distribution electric network planning technique. Journal of Shanghai University Electric Power, 2006, 22(1): 36-38, 58.

[7] 胡荣,符杨,罗萍萍.新建住宅区配电网规划实用技术研究.上海电力学院学报,2005,21(4):296-298.
HU Rong, FU Yang, LUO Pingping. Research on the practicable technique of the distribution network plan for newly-built living quarters. Journal of Shanghai University Electric Power, 2005, 21(4): 296-298.

[8] 解兵.电力变压器油纸绝缘模型老化新特征量的研究[D].重庆:重庆大学,2005.
XIE Bing. Research of new characteristic parameters of oil-paper aging used transformers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.

[9] 彭显刚,聂一雄,刘艺.模糊模式识别在绝缘子串绝缘状态检测中的应用.电力系统自动化,2006,30(14):75-79.
PENG Xiangang, NIE Yixiong, LIU Yi. Application of fuzzy pattern recognition in insulation detection of insulator strings. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 75-79.

[10] 曹立军,马吉胜.基于正反向混合推理的故障仿真预测模型.系统仿真学报,2006,18(3):742-746.
CAO Lijun, MA Jisheng. Fault forecast and simulation model of hybrid inference integrated forward and backward inference. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 742-746.

[11] 郭志林,薛明志.Fuzzy 区间数的一种排序方法及综合评判模型.数学的实践与认识,2005,35(7):244-247.
GUO Zhilin, XUE Mingzhi. The ranking method of fuzzy interval numbers. Mathematics in Practice and Theory, 2005, 35(7): 244-247.

[12] 卜广志,张宇文.基于灰色模糊关系的灰色模糊综合评判.系统工程理论与实践,2002(4):141-144.
BU Guangzhi, ZHANG Yuwen. Grey fuzzy comprehensive evaluation based on the theory of grey fuzzy relation. Systems Engineering-Theory Practice, 2002(4): 141-144.

[13] 谢小良.基于模糊综合评判下的决策模型.决策与统计,2005(11):57-58.
XIE Xiaoliang. Decision model based fuzzy synthetical judgment. Statistical and Decision Making, 2005(11): 57-58.

[14] 葛苏林.模糊子集模糊关系模糊映射.北京:北京师范大学出版社,1985.
GE Sulin. Fuzzy subset & fuzzy relation & fuzzy mapping. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985.

[15] 韩立岩,汪培庄.应用模糊数学.北京:首都经济贸易大学出版社,1998.
HAN Liyan, WANG Peizhuang. Application of fuzzy mathematics. Beijing: Capital University of Economics & Business Press, 1998.

[16] 肖位枢.模糊数学基础及应用.北京:航空工业出版社,1992.
XIAO Weishu. Basis of fuzzy mathematics and its application. Beijing: Aviation Industry Press, 1992.

[17] 张振良.应用模糊数学.重庆:重庆大学出版社,1991.
ZHENG Zhenliang. Fuzzy methods. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.

[18] 尹哗,梁川.利用 Hamming 贴近度进行区域水资源可持续发展综合评价.水资源与水工程学报,2006,17(2):31-34.
YIN Ye, LIANG Chuan. Comprehensive evaluation on sustainable development of water resources system using Hamming osculating method. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2006, 17(2): 31-34.

[19] 杨伦标,高英仪.模糊数学原理及应用.广州:华南理工大学出版社,1993.
YANG Lunbiao, GAO Yingyi. Mathematical principle and its application. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1993.

[20] 时光新,姜运轩,陈学山.基于变异系数的地下水环境质量评价模型及应用.地下水,2002,34(3):147-148.
SHI Guangxin, JIANG Yunxuan, CHEN Xueshan. Evaluation model of water environment quality assessment and its application based on coefficient of variability. Ground Water, 2002, 34(3): 147-148.


(下转第 90 页 continued on page 90)

(上接第 49 页　continued from page 49)

符　杨(1968—),男,副教授,从事城市电网规划、电力变压器故障诊断等方面的研究和教学工作。E-mail:paper517@163.com

朱　兰(1978—),女,讲师,从事电力系统分析、电网规划等方面的研究和教学工作。E-mail:zhulant@163.com

曹家麟(1948—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为信息处理及控制、纠错编码技术、视频联合分析与应用及电网规划。

## A New Method to Obtain Load Density According to the Theory of Fuzzy Approach Degree

*FU Yang*[1], *ZHU Lan*[2], *CAO Jialin*[2]

(1. Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** As the existing methods to obtain load density are often based on experience or simple comparison, the results can hardly meet the accuracy requirements. The theory of fuzzy approach degree is introduced to calculate load density, which adopts weighted Hamming approach degree to calculate approach degree between standard samples of different grades, as well as that between low grade samples in the measuring region. Then thresholds of classifying load density can be obtained, and load density of the measuring region can be got as reference. Examples show that the method is practicable, because of the reasonable method, the clear concept, and simple calculations.

This work is supported by Shanghai Key Technologies Research & Development Program (No. 052312003), Shanghai Excellence Young Teach Research Fund (No. Z2006-12) and Shanghai Leading Academic Discipline Project (No. P1301).

**Key words:** load forecasting; load density; approach degree