

电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨

康重庆, 夏清, 张伯明

(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 负荷预测是电力系统规划、计划、用电、调度等部门的基础工作。讨论了年度负荷预测、月度负荷预测和短期负荷预测的特点、成熟方法, 分析了负荷预测问题的各种解决方案, 并指出未来的主要研究方向。根据国内电力系统负荷预测的实践和国外的经验, 对我国开展电力系统负荷预测工作提出了一些建议。

关键词: 电力系统; 负荷预测; 模型; 参数辨识

中图分类号: TM715

0 引言

科学的预测是正确决策的依据和保证。负荷预测^[1,2]是电力系统领域的一个传统研究问题, 是指从已知的电力系统、经济、社会、气象等情况出发, 通过对历史数据的分析和研究, 探索事物之间的内在联系和发展变化规律, 对负荷发展做出预先估计和推测。负荷预测是电力系统规划、计划、用电、调度等部门的基础工作, 其重要性早已被人们所认识。

对预测方法的探索, 一直是国内外学者关注的一个热点, 多年来提出了许多预测方法。那么, 在现阶段, 预测领域的研究工作究竟应该关注什么? 是否应该套用许多复杂的数学理论? 预测领域还有哪些问题值得探索? 这些问题一直都困扰着我们。本文试图就此讨论年度负荷预测、月度负荷预测和短期负荷预测的特点、成熟方法, 并分析负荷预测问题的各种解决方案, 探讨未来的主要研究方向。根据国内电力系统负荷预测的实践和国外的经验, 对我国开展电力系统负荷预测工作提出一些建议。

1 负荷预测的基本分析

1.1 负荷预测的作用和要求

负荷预测对电力系统许多部门都起着重要的作用。例如, 中长期负荷预测是制定电力系统发展规划^[3]、燃料计划的前提, 短期负荷预测是制定发电计划的基础。

文献^[4,5]量化地分析了负荷预测的误差对电力系统运行所造成的影响。文献^[4]通过 Monte-

Carlo 模拟的手段, 分析了不同负荷预测精度下电力系统的经济性。文献^[5]还给出了已知预测结果的分布方差时系统运行风险的评估结果。这些分析表明, 提高负荷预测的精度是电力系统规划和运行的必然要求。众多的学者不遗余力地进行负荷预测的研究, 其主要出发点大多是以更为先进的理论提高预测的准确性, 为电力系统运行的经济性和安全性提供有力的保证。

1.2 负荷预测的分类

负荷预测的分类是一个有争议的问题。本文为了叙述方便, 按照预测期限的不同, 分为长期预测、中期预测、短期预测、超短期预测, 分别对应年度预测、月度预测、日预测、小时预测。某些地区的预测还包括旬预测、星期预测, 但是不太常见。其中, 根据预测机理的不同, 又将年度预测、月度预测合称为中长期预测, 日预测、小时预测归为短期预测。

从国内外研究情况看, 国外大概是由于其负荷发展变化规律趋于稳定的缘故, 关于中长期预测^[6,7]的研究远远少于短期预测, 国内则基本上两者并重。

就预测内容而言, 首先应该区分总量预测和空间分布预测, 前者是本文的讨论重点, 后者的成熟例子是城市电网负荷密度预测, 由于其预测机理比较独特, 这里不加讨论。同时, 在各个期限中, 负荷预测的内容一般包括负荷(负荷曲线)、电量的预测。

为了更加清楚地分析负荷预测的基本问题, 根据预测机理的不同, 下文将分别针对中长期负荷预测和短期负荷预测进行分析。

首先用表 1 简要而综合地给出各种期限的预测问题的对比情况。限于篇幅, 其中的具体理由和详细叙述不做进一步分析。

表 1 不同期限预测问题的对比
Table 1 Comparison of long/mid/short-term load forecasting problems

| 预测期限 | 预测对象与内容 | 作用 | 预测特点 | 主要影响因素 | 主要的成熟预测方法 |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---|
| 长期预测 (年度) | 某物理量(负荷、电量)的年度统计数据 | 提供电源、电网规划的基础数据,确定年度检修计划、运行方式等 | 数据基本上单调变化(一般是递增的)、无周期性 | 国民经济发展情况、人口、产值单耗、产业结构调整情况、电价政策等 | 自身规律外推法(包括回归分析、动平均、指数平滑、灰色预测等),考虑主要影响因素的各类相关预测法 |
| 中期预测 (月度) | 某物理量(负荷、电量)的月度统计数据 | 安排月度检修计划、运行方式、水库调度计划、电煤计划 | 周期性增长,各个年度的12个月具有相似的规律 | 大用户生产计划、气象条件、产业结构调整情况、电价政策等 | 历史同月数据的外推预测;考虑年度周期性的时间序列预测;考虑主要影响因素的各类相关预测法 |
| 短期预测 (日) | 某日内每个时刻(例如24,48或96点)的负荷,日电量 | 安排日开停机计划和发电计划 | 在年、月、星期、日不同期限上均具有明显的周期性 | 星期类型,气象因素(温度、湿度、降雨等)、电价 | 同类型日预测;考虑各种周期性的时间序列预测;神经网络预测;考虑气象因素的预测方法 |
| 超短期预测 (小时) | 当前时刻往后若干时段的负荷 | 用于实时安全分析、实时经济调度、AGC | 与前几日同时段的瞬时变化规律比较类似 | 一般较少考虑,暑期时可以考虑以及时温度变化 | 考虑前几日同时段瞬时变化规律的外推预测,如线性外推、指数平滑等 |

注:表中“电量”包括各种口径的数值,例如发电量、全社会用电量、网供电量等;“负荷”既包括最大/最小/平均负荷以及峰谷差,也包括发电负荷、全社会用电负荷、网供负荷等各种口径的数值。

2 年度负荷预测

2.1 概述

年度预测以年为预测时段,以年度用电需求指标(如年度电量、年度电力等)作为预测内容。年度预测是制定电力系统发展计划的基础,也是规划工作的重要组成部分,其目的是为合理安排电源和电网的建设进度提供宏观决策的依据,使电力建设满足国民经济增长和人民生活水平提高的需要。

除专家调查法、产值单耗法、弹性系数法、年最大负荷利用小时数等传统而简单实用的预测方法外,年度预测主要应用一些通用的序列预测方法。同时,这些通用的序列预测方法也是月度预测、短期预测的基础,因此,这里进行简单讨论。

2.2 序列预测的一般性表述

序列预测方法的基本思想如图 1 所示。

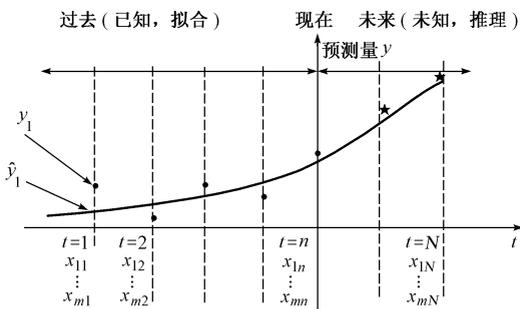


图 1 序列预测方法的图示

Fig. 1 Illustration of sequential forecasting models

设预测模型的抽象表达形式为:

$$y = f(\mathbf{S}, \mathbf{X}, t)$$

式中: \mathbf{X} 为 m 种相关因素组成的向量,记为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$; t 为时间序号; y 为待预测量; \mathbf{S} 为

该预测模型的参数向量,设总共有 k 个参数, $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_k]^T$,例如,对于不考虑相关因素的线性预测模型 $y = a + bt$,有 $\mathbf{S} = [a, b]^T$ 。

设已知在历史时段 $t (1 \leq t \leq n)$,相关因素的取值为 $\mathbf{X}_t = [x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{mt}]^T$,待预测量的取值为 y_t 。需要根据其历史发展规律,对未来时段 $n+1 \leq t \leq N$ 做预测(推理)。由于进行相关预测,这里不仅需要知道 m 种相关因素在历史时段 $1 \leq t \leq n$ 的取值,而且也要已知其在未来时段 $n+1 \leq t \leq N$ 的取值,一般可以从电力系统以外的其他部门获取(例如,从统计部门获得经济数据,从气象部门获取气象信息)。那么,预测的重点是,根据所有历史时段的 \mathbf{X}_t 和 y_t ,通过某种途径对模型的参数向量 \mathbf{S} 进行估计。

在得到估计值 $\hat{\mathbf{S}} = [\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_k]^T$ 后,拟合(历史时段)或预测(未来时段)公式为:

$$\hat{y}_t = f(\hat{\mathbf{S}}, \mathbf{X}_t, t) \quad t = 1, 2, \dots, n, \dots, N$$

其中,历史时段的拟合残差为:

$$v_t = y_t - \hat{y}_t = y_t - f(\hat{\mathbf{S}}, \mathbf{X}_t, t) \quad t = 1, 2, \dots, n$$

预测中通常以历史各时段拟合残差的平方和

$$Q = \sum_{t=1}^n v_t^2 \text{ 最小为目标,这就是最小二乘估计。}$$

2.3 年度预测方法的建议

根据一些研究结果,本文建议如下:

a. 年度预测的历史数据以5年~10年为宜。太多太远的历史数据,其规律对预测几乎没有参考价值;太少的历史数据,将导致预测方法无法判断历史的发展规律。

b. 如果单独从自身规律预测的角度进行比较,由于年度预测经常具有单调性特点,我国学者邓聚龙教授所提出的灰色预测是预测效果较为稳定的方

法;此外,基于各种数学曲线的回归分析模型也是值得推荐的。

c. 如果可以引入相关因素,那么,传统的弹性系数法可作为有效的方法,因为它对国民经济发展的把握最为准确。

d. 相比较而言,年度预测由于数据序列较少,不太适合应用人工神经网络(ANN)这种需要大样本量训练的预测方法。

3 月度负荷预测

3.1 概述

月度预测以月为预测时段,以月度用电需求指标(如月度电量、月度电力等)作为预测内容。月度预测是电力计划部门、用电营销部门的重要工作,其目的是为了合理地安排电力系统的中期运行计划,降低运行成本,提高供电可靠性。

直接借鉴年度预测的有关方法,按照各月的历史负荷数据构成的时间序列进行预测,是一种基本思路。但是,通过分析发现,由于数据的多样性和变化规律的复杂性,月度预测有着不同于年度预测的特点。在借鉴年度预测有关方法的同时,应该针对月度物理量的特殊变化规律,构造特殊的预测方法。

3.2 月度预测的特点分析^[8]

设以年份作为 X 轴、月份作为 Y 轴构成时间平面,月度物理量作为 Z 轴,则月度量的整体变化规律可用空间中分布的点表示,如图 2 所示。

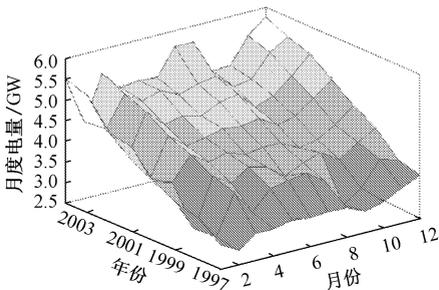


图 2 月度负荷数据变化规律示例
Fig. 2 Illustration of monthly load data

实际上,图 2 体现了月度负荷数据的空间网状的变化规律。若以 D_{ym} 表示第 y 年第 m 月的月度负荷数据(可以是电量类数据,如月度发电量、月度用电量等;或者负荷类数据,如月度最高负荷、月度最低负荷等),则可以引入如下 2 种序列的定义。

定义 1 月度量的年度发展序列:连接历年(假定 $y=1,2,\dots,Y$)某特定月份(假定为第 m 月)的物理量空间分布点,就形成了月度量的纵向发展序列: $\{D_{1m}, D_{2m}, \dots, D_{Ym}\}$ 。称此序列为月度量的年度发展序列。

定义 2 月度量的月度发展序列:连接某特定年份(假定为第 y 年)中各月(假定 $m=1,2,\dots,12$)的物理量空间分布点,就形成了月度量的横向发展序列: $\{D_{y1}, D_{y2}, \dots, D_{y12}\}$ 。称此序列为月度量的月度发展序列。

实际上,月度量的年度发展序列点之间的间隔是 1 年,体现了该月度量在国民经济发展水平不断提高的背景下的发展变化规律;而月度量的月度发展序列点之间的间隔是 1 个月,体现了该月度量由于季节不同的变化情况。

月度量的年度发展序列和月度发展序列构成了其空间网状的发展关系,各月度量处于此空间内网状纵横发展趋势的交叉点上。因此,预测建模时必须兼顾纵横两种发展趋势。

3.3 现有月度量预测方法的剖析

在将月度量的变化规律分为上述 2 种序列的情况下,目前所见到的月度量预测的方法(大多是借鉴基本的时间序列预测方法)也可大致分为 2 类,一类是纯粹按照月度量的年度发展序列构成的预测方法^[8,9],另一类是利用月度量的月度发展序列构成的预测方法^[10~12]。

3.3.1 按照年度发展序列构成的预测方法

这类预测方法的基本思想是,以月度量的年度发展序列 $\{D_{1m}, D_{2m}, \dots, D_{Ym}\}$ 直接构成原始序列进行预测。一般地,该序列是单调序列,因此常用各种回归曲线进行预测,如线性回归模型、指数回归模型、抛物线回归模型等^[8]。在此基础上,也可以应用灰色预测^[9]等其他预测方法。

这类预测方法的优点非常突出,对于某月的预测,它使用历史上各年该月的数据构成原始的发展序列,因此数据的提取非常简单,预测模型的选择余地也很大,可以采用非常成熟的预测方法。

同时,这类预测方法的缺点也显而易见,那就是对最新数据的利用程度不够。例如,假定目前是 2004 年 4 月底,已经获取 1998 年 1 月到 2004 年 3 月各月的电量数据,设想用这些数据对 2004 年 4 月进行预测,则利用这类预测方法,所使用的原始数据只有 1998 年~2003 年这 6 年中第 4 月的历史数据,而即使是 2004 年 1 月~3 月这些最新的数据,也是可能对 2004 年 4 月影响最大的数据,这类预测方法都无法借鉴和采用。

3.3.2 按照月度发展序列构成的预测方法

利用月度量的月度发展序列构成的预测方法,实际上是利用了月度量在各年中变化规律的周期性,如图 3 所示。

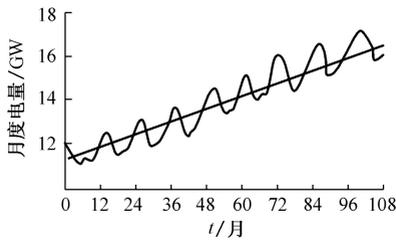


图3 月度负荷数据的周期性示例
Fig.3 Periodicity of monthly load data

根据利用周期性程度的不同,又可以分为2种子类型:隐含利用周期性的预测方法和直接利用周期性的预测方法。这类预测方法的优点是,充分利用了最新的月度数据,使得这些最新的变化规律对未来的预测影响明显地体现出来。

a. 隐含利用12月周期性的预测方法。由于月度量在各年中变化规律的周期性与短期负荷预测(日负荷曲线预测)的特点相似,因此可以采用类似于短期负荷预测的方法,包括自回归-动平均(ARMA)模型、ANN方法^[10],等。

b. 直接利用12月周期性的预测方法。这类预测方法的基本思想是,将月度量看成一个连续变化的时间序列,其总变动可分解为长期趋势变动项、季节性变动项和随机扰动项。如此可以将复杂的曲线分解为几种典型模式,分别进行预测,然后叠加。

对于长期趋势变动项,由于它反映了月度量随时间变化的基本趋势,可以直接用某种曲线进行拟合,例如直线、二次曲线、指数曲线等模型。对于季节性变动项,则分析其每个月的变化规律进行外推。

但应指出,上述序列预测方法只适合于平稳发展的序列,对于不稳定序列或周期性序列其预测精度较低。

3.4 月度预测方法的建议

根据一些研究结果,本文建议如下:

a. 类似于年度预测的分析,月度预测的历史数据也以5年~10年的各月数据的集合为宜。

b. 在按照年度发展序列构成的预测方法中,如果历史数据比较符合单调性特点,那么可首先使用灰色预测、回归分析等方法;如果历史数据有一定的波动,则不太适合按照年度发展序列进行预测。

c. 在按照月度发展序列构成的预测方法中,根据12月的周期性,可优先考虑ARMA模型。

d. 月度预测中,春节对1月份和2月份电量的影响非常突出,应该采取特殊的措施进行处理。

4 短期负荷预测

4.1 概述

短期负荷预测是负荷预测的重要组成部分,它

主要用于预报未来几小时、1天至几天的电力负荷,对于调度部门的机组最优组合、经济调度、最优潮流而言,尤其是对现在与将来的电力市场有着重要的意义。负荷预测精度越高,越有利于提高发电设备的利用率和经济调度的有效性。

短期负荷预测的研究已有很长历史,国内外的许多专家、学者在预测理论和方法方面做了大量的研究工作,取得了很多卓有成效的进展。由于负荷的随机因素太多,非线性极强,而有些传统方法理论依据尚存在局限性等问题,因此,新理论和新技术的发展一直推动着短期负荷预测的不断发展,新的预测方法层出不穷。

短期负荷预测的最大特点是其具有明显的周期性,包括:①不同日之间24h整体变化规律的相似性;②不同星期、同一星期类型日的相似性;③工作日/休息日各自的相似性;④不同年度的重大节假日负荷曲线的相似性。

在具备上述周期性的同时,短期负荷的另外一个特点是其明显受到各种环境因素的影响,如季节更替、天气因素突然变化、设备事故和检修、重大文体活动等,这使得负荷时间序列的变化出现非平稳的随机过程。

现有的各类短期负荷预测方法已经在许多文献中进行了广泛深入的研究,文献[13,14]对此进行了系统的总结,将短期、超短期预测方法分类做了比较。限于篇幅,这里仅简要讨论其中最为重要的2类短期预测方法:时间序列预测法和ANN预测法。

4.2 时间序列预测法^[1,2]

时间序列模型是被认为最经典、最系统、最被广泛采用的一类短期负荷预测方法。常用的时间序列分析模型有以下几种:自回归(AR)模型、动平均(MA)模型、ARMA模型、累积式自回归-动平均(ARIMA)模型。

4.2.1 AR模型

在短期负荷预测研究中,引起负荷变化的因素很多,不可能把影响负荷的因素都一一归入模型。从各级调度部门可获得的是过去历史的负荷记录,易于得出某一时刻的负荷与它过去相关时刻的负荷有关。AR模型中的基本概念为:因变量是待测的负荷,而自变量则是负荷自身的过去值。

AR的过程为:现在值 y_t 可由过去值的加权值的有限线性组合及一个干扰量 a_t 来表示。于是, p 阶AR模型 $M_{AR}(p)$ 的数学表达式为:

$$y_t = \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \cdots + \varphi_p y_{t-p} + a_t$$

式中: p 称为模型的阶;常数系数 $\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_p$ 为模型的参数;干扰量 a_t 为白噪声序列在 t 时刻的值。

预测负荷与它过去时刻的负荷有关,故称为

AR 模型。

4.2.2 MA 模型

在 AR 模型中,理论上干扰的影响是在无限长的时间内存在的,即一个初始时刻的干扰将会影响到未来无限长时间内的负荷值。假设干扰的影响在时间序列中只表现在有限的几个连续时间间隔内,然后就完全消失,获得派生模型,即为 MA 模型。

如初始时刻的干扰仅在前 q 步内有影响,则 q 阶 MA 模型 $M_{MA}(q)$ 的数学表达式为:

$$y_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q}$$

式中: q 称为模型的阶;常数系数 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为模型参数。

4.2.3 ARMA 模型

ARMA 模型是 AR 模型和 MA 模型的结合,其数学表达式为:

$$y_t = \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q}$$

由于许多实际的随机时间序列常常同时具有模型 $M_{AR}(p)$ 和 $M_{MA}(q)$ 的特性,如分别令 $p=0, q=0$, 得到的 $M_{ARMA}(0, q)$ 就是 $M_{MA}(q)$, $M_{ARMA}(p, 0)$ 就是 $M_{AR}(p)$, 这 3 种模型之间有着密切的联系。

4.2.4 ARIMA 模型

前述模型应用的前提条件都是以时间序列为平稳随机序列依据,这些模型对于时间的起点是不做任何规定的,即表示无论抽出时间序列哪一段,其平均值是不变的。但实际上,负荷时间序列的变化常常是非平稳的随机过程。ARIMA 能适用于非平稳随机时间序列的模型,并将非平稳随机过程中的平稳随机变化负荷包含在模型中。

4.3 ANN 方法

目前,ANN 理论用于短期负荷预测的研究很多,其突出优点是对大量非结构性、非精确性规律具有自适应功能,具有信息记忆、自主学习、知识推理和优化计算的特点。ANN 具有很强的自学习和复杂的非线性函数拟合能力,很适合于电力负荷预测问题,是在国际上得到认可的实用预测方法之一。

目前预测模型大多采用前馈 NN 模型,使用的训练方法为 BP 算法及其各种变种或改进方法,其预测模型结构(网络的层数和神经元的个数)的选取则大多凭借经验。研究的重点大多在于如何构成预测样本、如何构成输入层数据等。

4.4 短期预测方法的建议

根据一些研究结果,本文建议如下:

a. 非节假日的日预测的样本数据,以 30 d~90 d 为宜,尽量反映季节更迭的特点。节假日预测应该参照上年度的相应曲线。

b. 在负荷变化规律比较平稳时,基于同类型日分析的预测方法是简单有效的,且可以切实反映预

测问题的物理本质,无须太大的计算量。其他还包括 ARIMA 模型等。

c. 在负荷变化受到气象等因素的影响比较明显时,ANN 预测方法可以作为首选。

d. 建立预测模型时,如果有必要,可以考虑对于工作日、休息日采用不同的预测思路。

5 各类负荷预测的共性问题分析

5.1 负荷预测中数学的应用

预测中需要使用许多数学知识,见表 2。

表 2 负荷预测中使用的数学
Table 2 Applications of mathematics in forecasting

| 内容 | 举例 |
|----------|-------------------------|
| 数学建模 | 年月日的不同模型 |
| 优化方法 | 非线性规划(无约束、有约束)、遗传算法 |
| 概率论与数理统计 | 概率分布、假设检验 |
| 参数辨识 | 最小二乘法(线性、非线性)、不良数据检测与辨识 |
| 数据处理 | 区间映射、平滑技术 |
| 模式识别 | 模式匹配、聚类分析 |
| 其他技术 | 神经网络、灰色系统、专家系统 |

5.2 预测新方法的探索

在已经具有许多预测方法的情况下,众多学者仍然坚持不懈,不断探索新的预测方法。

在中长期预测中,除传统的序列预测方法之外,模糊理论^[15,16]、专家系统^[17]等方法均被应用。而在短期负荷预测中,应用最广泛、研究最多的是 NN,文献[18]对此进行了很好的总结。除此以外,卡尔曼滤波^[19]、聚类分析^[20]均有成功应用。在新方法的探索中,我国学者热情很高,分别采用了小波分析^[21]、人工智能中的事例推理^[22]、模糊集理论^[23]、混沌分形理论^[24~27]、数据挖掘^[28]等进行预测的尝试,取得了一些效果。

5.3 预测中“近大远小”原则的贯彻

预测中“近大远小”原则的含义是:物理量未来的变化趋势更多地取决于历史时段中近期的发展规律,远期的历史数据与未来发展趋势的相关性较弱。在常规预测中,实际上采用了“各时段拟合残差同等对待”的做法。

在考虑“近大远小”原则的情况下,其处理思路应该是:区别对待各时段的拟合残差,近期的发展规律应该得到更好的拟合,远期历史数据的拟合程度可以稍低。

在中长期预测中,“近大远小”原则是比较容易实现的,所采用的方法主要是加权参数估计^[29],其优点是可以更好地体现负荷预测的惯性规律。但是,短期预测中,由于突出强调和体现负荷发展的周期性,使得“近大远小”原则不容易得到贯彻,这方面

还需要进一步研究。

5.4 参数估计

对于中长期、短期负荷预测问题,一般要通过客观数据的调研,寻找适当的数学模型,然后按照一定的参数估计方法求解其中的若干个待定参数。这里,最常用的是最小二乘估计^[29]。

鉴于最小二乘估计的某些不足,又提出了许多新的参数估计方法,包括加权最小二乘估计^[29]及其各种改进方法^[30,31]、岭估计^[32]等。

实践证明,不同的参数估计方法,其效果可能差别较大。选择适当的参数估计方法,可以避免一些不合理结果,提高预测精度。这方面的分析比较和估计策略的选择,还需要深入研究。

5.5 预测中原始数据的处理

采样得到的历史负荷实际数据,常常含有异常值,或者说,历史负荷数据可能会有丢失或不准确的情况。这里包括2种原因:

- a. 由于人为因素引起的异常数据,例如数据通道通信错误、数据丢失;数据整理错误;
- b. 数据是真实的,但是数据还是有异常,其原因是突发事件或某些特殊原因导致出现了非规律性的变化。

这些统计数据被称之为异常数据。异常数据的存在给正常数据带来较大的干扰,影响预测体系的预测精度,异常数据过大甚至会误导预测体系的预测结果,因此必须排除由于异常数据的存在带来的不良影响。排除异常数据的影响可以通过以下途径来达到:

- a. 修正法:适用于不常见的突发事件,例如拉闸限电,应该对拉掉的负荷做出估计,并给予直接修正,以恢复其在自然发展状况下用电需求的“本来面目”。
- b. 解析分析法:利用同样星期类型、相邻日等各种曲线的相似性,对某些表现出特殊异常的点进行修正。
- c. 不良数据辨识的直接辨识:应用电力系统状态估计中不良数据检测与辨识理论,但是要求大样本量,辨识结果存在漏检或误检的可能。

正确地识别不良数据、补足所缺损的数据非常重要,这个工作在中长期预测^[33]和短期预测^[34]中都有一些探索,文献^[35]对此做了总结与对比。但总体来看,目前的研究还达不到实用的程度,需要进一步研究。

6 对负荷预测问题研究方向的建议

负荷预测作为古老的研究课题,随着新形势的不断变化,特别是在电力市场条件下,理论研究和实

际工程应用应该重视以下问题。

6.1 重视负荷成因分析

应重视电力负荷本身内在变化规律的研究。某些电力系统负荷预测的论文,把负荷数据当成一堆(一系列)“纯粹”的数据看待,使用纯粹的数学方法,这就失去了电力系统的特色。事实上,预测问题是经济、社会发展、地质灾害、水文、气象、产量等领域的共性问题,使用共性的方法预测不是不可以,但可能存在很多问题。

为了避免这种不足,要求研究人员应从电力系统的角度,重视负荷发展的内在规律分析。这需要更多的、细致的探索和研究。亦即,在负荷预测工作中,从负荷构成的物理机理入手,研究其变化规律。不但不同的电量、负荷指标其成因有较大差异,而且即使是同一指标,在不同口径上的统计方法、管理模式的差异,也将导致成因的明显差别。

以地方小水电的影响为例。在我国大部分地区,地方小水电由于其数量众多、单机容量偏小、分散面广等客观原因,无法将其纳入统一调度范围。由此导致的结果是,电网调度部门只是关心网供负荷的数据,这对其安排统一调度机组的发电计划至关重要。可是,真正具有规律性的是全社会用电负荷,它与温度因素等密切相关;同时,地方小水电靠天吃饭,有了降雨,就可以发电上网,没有来水就不发电。这种实际情况对网供负荷具有重大影响。对电网调度部门而言,如果不参考小水电的变化情况、单纯依靠网供负荷自身的发展趋势进行预测,则势必带来较大误差。

如何建立比较符合实际情况的负荷成因分析与预测模型?能够在什么程度上提出关于预测机理的新见解?这些问题还没有令人满意的解决方案。

6.2 确定性预测/区间预测/概率性预测

传统的预测结果一般都是确定性的。常规的负荷预测只是给出一个确定的数值,其缺点是无法确定预测结果可能的波动范围。实际上,由于预测问题的超前性,实现概率性的预测更符合客观需求,例如应用于风险分析、可靠性评估等。

在传统的电力系统规划中,要求给出电力负荷发展的高、中、低水平,实际上就是进行敏感性分析、风险分析的需要,从某种意义上讲,这也是一种概率预测结果。此外,某些传统的预测方法中,从概率论中置信区间分析的角度,可以给出一个喇叭型伸展的带状区域,使得未来数据的预测有一个大致的变化范围。这些都是概率性预测的雏形。概率性的预测已经体现在国外的某些负荷预测^[36]的方法中,但其实际应用效果还有待检验和完善,特别是各种预测结果的概率分布函数是很难解决的问题。

6.3 探索预测策略的新思路

想方设法地应用某种新的数学方法、特别是时髦的人工智能理论等来进行预测,这种纯粹为了应用某理论而套上去的预测方法,不是不可以研究,但需要由实践检验其预测效果,才能评价某种新的数学方法的应用前景。例如,就国内外目前的论文情况看,NN几乎是“万能”的,哪个地方都可以用,这种研究思路值得商榷。这就要求研究工作者不能仅仅停留在“对某个已有预测方法的改进”和“新的数学方法的应用”这种理论层面上,而应该着重于发现已有预测方法存在的薄弱环节或缺陷,在预测策略方法上力求新思路、新突破。例如,从单一预测模型走向综合预测(组合预测),普遍被认为是一种预测策略的进步^[37]。那么,还有没有类似的这种策略性的升华?

6.4 相关因素的考虑

电力系统的预测问题并不仅仅局限于电力系统内部,它实际上要受到许多外界因素的影响。因此,如何在预测中引入一些主要的相关因素来提高预测精度,是值得深入研究的问题。

在中长期预测中,GDP、总人口等是常见的影响因素^[38],所使用的方法主要是多元相关分析。此外还可以考虑季节性温度的影响^[39]。

短期预测中,常见的影响是温度^[40~42],中央气象台推出的电力需求气象指数预报就是一个很好的例子。在缺少温度等相关因素时,文献^[43]甚至提出自主的气温预测方法,进而应用于负荷预测。此外,湿度、风力、天气类型^[44]、工作日/休息日及节假日类型^[45]等因素都被纳入考虑范围,所使用的方法主要有NN^[40]、ARMAX^[42]、模糊预测^[44,45]等。有些论文探索规范化处理相关因素的方法^[46]。

在电力系统目前的研究中,预测方法应与实际相结合,尤其注重气候条件、电价弹性、市场环境、负荷构成等对预测具有重要影响的因素的细致研究。考虑到电力系统是一个多因素共同作用的系统,与相关因素分析相配合,可以尝试对历史数据进行数据挖掘,从中找出影响预测精度的主要相关因素(或者称为主导因素),这是一个有价值的发展方向。

同时,还要着力挖掘新的相关因素,例如,当日温度对当日负荷的影响只是一个方面,由于温度具有累积效应,连续多日高温和某日单独高温对该日的负荷影响程度大不相同,因此,可以尝试引入能够体现温度累积效应的指标,构成相关预测模型。

6.5 组合预测

鉴于单一预测方法的一些弊端,探索组合预测已经成为学者们的共识。这里有2种思路:

第1种是直接从预测机理的角度将单一预测模

型进行组合,这种技术在短期预测中比较常见,例如NN与小波分析的结合^[47]、NN与专家系统的结合^[48]、自组织理论与ARMA的结合^[49]等。

第2种是单一模型预测结果直接加权组合。其主要出发点是,不同方法的预测结果一般都有差异,应设法在这些预测结果的基础上综合判断,给每个预测模型赋予不同权重,由此得到一个预测效果更好的综合模型。这方面的研究目前主要是针对中长期预测^[50~53],当然也有针对短期预测的尝试^[54]。

但是,就预测机理而言,组合预测的权重确定仍然是一个未能很好解决的问题。例如,一般认为组合预测的权重应该非负,而文献^[55]则尝试了权重取负值的问题。这个问题需要进一步探讨。

6.6 研究自适应与自学习的预测策略

各种预测方法如何根据其所应用的地区或者最新的实际数据,进行模型参数的自动调整,达到更好的预测效果,这就提出了自适应与自学习的预测问题。好的预测方法应根据预测的偏差不断调整模型的结构与参数,这实际上构成了一个闭环反馈。

目前所提出的各种自适应短期负荷预测方法主要有NN方法^[56]、模糊系统方法^[57,58]等。文献^[59]就目前所提出的各种自适应短期负荷预测方法进行了总结与对比。

自适应预测是电力系统发展的基本要求,需要予以关注。

6.7 预测模型的预评估

负荷发展的历史规律性如何,在某种程度上决定并限制了预测所能达到的最佳效果。因此,不能针对任何数据都盲目提出无限制、高精度的预测要求。由此产生了预测模型的预评估问题,其目标是:在预测量未发生之前,衡量(估算)某个模型用于某种环境的预测后所能达到的预测精度。由于预测精度同时取决于预测模型的好坏和历史数据的规律性,因此,可以采用“虚拟预测”的策略进行探索,根据若干误差特性分析指标和拟合精度分析指标,作为预测评价的依据。

在这方面,文献^[60,61]提出了一种基于内蕴误差评价的电力系统短期负荷预报方法。该方法建立在对负荷规律性和预报方法有效性全面评估的基础上,使预报和误差评价融于一体。在分析历史变化规律的基础上,该方法可以在预报前估计预报误差的上下限。这个思路很值得继续加以深入研究。

6.8 自动运行与滚动预测的软件

国内外都已经开发了若干种实用化的预测软件。新形势对预测软件提出许多新要求,主要表现在自动运行^[62]与滚动预测^[63]上。这是指在正常情况下预测系统无需人工干预,可以连续不断地根据

最新所获取的数据进行周期性的滚动预测,只有当预测误差较大、需要人工处理时,才由预测人员进行调整。实现前述的自适应预测方法,是解决自动运行与滚动预测的前提和关键。

7 对我国电力负荷预测工作的建议

借鉴国外经验,根据我国电力市场的发展状况,下面对我国开展电力负荷预测工作提出一些建议。

7.1 预测软件的规范、升级、标准化

为了适应电力系统的发展,国外的预测软件在不断改进和升级。文献[64]报道了北美地区广为使用的 ANNSTLF 软件。在美国 EPRI 的支持下,该软件从 1992 年开发,到 1998 年升级到第 3 代,用户数(电力公司)达 35 个。

我国目前见诸文献报道的预测软件也是五花八门,探索适合电力市场的预测软件的规范,是当务之急。区分中长期负荷预测与短期负荷预测,分别提出软件的功能规范和预测精度要求、考核标准等,对提高我国各地的预测水平具有重要意义。

7.2 电力系统内预测机构的整合

目前我国电力系统中,规划/计划/用电营销/调度等部门均有预测需求,各自设立专门的预测人员,但是信息共享不够,工作内容往往有交叠,不利于提高总体的工作效率。因此,整合预测工作人员,组建跨部门的预测机构,是一个行之有效的途径。据报道,我国福建省电力部门已经组建了负荷预测管理中心^[65],试图将电力系统各部门的预测职能集合在一起,这种思路值得推广。

7.3 组建权威的预测管理机构

单一的软件开发方的作用毕竟是有限的。欧洲所建立的智能预测系统^[66](IFS—intelligent forecasting systems)则着眼于众多学者、科研机构、企业用户的联合。IFS 尝试建立一个遍及欧洲甚至全球性的以智能预测为主题的工作网络,应用于电力系统及其他系统。在此网络中,大学、研究中心、工业界相互协作,及时交流信息、探讨预测方法。

本文建议在我国组建权威的预测管理机构。由于电力市场中预测内容的扩展,该机构不应局限于负荷预测,而是一个广义的预测机构,工作内容包括电力市场中所提出的一些新的预测问题。参考 IFS 的做法^[66],提出如下建议。

预测机构的主要目标与职责是:

- a. 负责起草预测的有关标准和考核评价办法;
- b. 负责建立标准化的预测比较题目,见 7.4 节;
- c. 实现标准的预测演示程序;
- d. 以 Internet 为媒介,在研究机构和工业界之

间建立一个高效的信息交互渠道;

- e. 对世界范围内最新的预测研究动向及时地进行总结与交流,在网上及时公布;

- f. 及时报道最新的预测产品、工具和其他方面的研究进展;

- g. 促进最新预测技术从大学、研究机构向工业界转化和使用;

- h. 组织培训高级预测人员。

预测机构应提供如下服务:

- a. 建立一个预测专用的 Web 服务器,供参与者浏览信息;

- b. 建立一个预测专用的 ftp 服务器,供参与者上载、下载各种电子出版物;

- c. 提供现有的预测产品的功能描述、使用方法及其应用介绍;

- d. 提供预测相关的学术会议、展览会、工作组、出版物的总览,供参与者查询和使用;

- e. 在网上寻求预测项目的合作;

- f. 建立基于 Internet 的预测新闻版,供所有参与者随时提问、寻求联系。

7.4 建立用于测试预测效果的标准题库

EUNITE network 于 2001 年 8 月 1 日宣布举行一次全球性的网上竞赛^[67],比赛内容是:组织者公布了斯洛伐克东部电力公司 1997 年到 1998 年每 30 min 的负荷数据及每天的温度、节假日类型等数据,要求参赛者根据这些数据,以及 1999 年 1 月各日的气象数据,预测出 1999 年 1 月 31 天的每日最大负荷。要求参赛者必须于 2001 年 11 月 20 日前向比赛网站提交预测结果,随后评价这些结果,并公布成绩,还举行了专门的工作组会议进行研讨。这个比赛得到众多的关注与参与,预测结果最好的是台湾大学计算机系的 Chih-Jen LIN,所采用的方法是支持向量机(SVM)。在 2002 年 4 月 19 日进行了其他领域类似的比赛^[67]。

借鉴国外的这些经验,建议由预测管理机构牵头,负责建立一组预测效果的考核标准和考核题库,其作用是:

- a. 对现有主要方法进行比较和推荐;

- b. 对各开发方的预测软件进行统一的测评和比较,向各地区推荐较好的预测软件;

- c. 对新提出的预测方法进行预测效果的检验,要求预测结果可以重现;

- d. 全面评价预测的研究动向和应用效果,包括:在外界扰动情况下各种预测方法的鲁棒性评价;各种预测方法的准确性评价;各种预测方法的有效性评价;为完成预测而采取的数据准备与处理措施评价;预测系统的在线能力与性能评价。

关于负荷预测的标准例题的选择和建立,本文提出以下原则:

a. 必须符合我国现阶段电力系统改革的趋势,即选择3种级别的预测样本,分别对应典型大区、典型省份、典型地区(城市)。

b. 所选择的预测样本应该具有较为完整的历史资料,包括电力系统有关资料、气象资料、国民经济资料等。

c. 负荷构成具有多样性,例如大工业用户、典型商业用户、居民用户等负荷的比例要比较均衡,不能严重失衡。

建立标准例题的具体方法,应该专门研究。

8 结语

本文初步探索了电力系统负荷预测问题的特点、内容和方法,分析了年度、月度和短期预测的基本方法。在学术方面,根据目前的研究现状,指出了预测问题将来的研究方向;在实践方面,借鉴国外的一些经验,对我国预测工作提出了一些建议。本文的探讨是初步的,设想是粗略的,希望本文能为广大预测人员提供一些参考。

本文是笔者应邀为中国电力企业联合会举办的“电力负荷预测与管理”高级研修班的讲稿上形成的,并与华北电力大学牛东晓教授进行了有益的探讨。后来在《电力系统自动化》杂志社向全国负荷预测专家发起的“电力负荷预测”研究领域专项咨询中,汇集了近20位专家的意见经润色、修改而成。特此向中国电力企业联合会、《电力系统自动化》及全国负荷预测专家致谢。

参考文献

- 刘晨晖(Liu Chenhui). 电力系统负荷预报理论与方法(Theory and Methodology of Power System Load Forecasting). 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社(Harbin: Press of Harbin Institute of Technology), 1987
- 牛东晓,曹树华,赵磊,等(Niu Dongxiao, Cao Shuhua, Zhao Lei, et al). 电力负荷预测技术及其应用(Power Load Forecasting Technology and Its Application). 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998
- 王锡凡(Wang Xifan). 电力系统优化规划(Optimal Planning of Power Systems). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1990
- Ranaweera D K, Karady G G, Farmer R G. Economic Impact Analysis of Load Forecasting. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1388~1392
- Douglas A P, Breipohl A M, Lee F N, et al. Risk Due to Load Forecast Uncertainty in Short Term Power System Planning. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1493~1499

- Barakat E H, Al-rashed S A. Long Range Peak Demand Forecasting Under Conditions of High Growth. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4): 1483~1486
- Kandil M S, El-Debeiky S M, Hasanien N E. Overview and Comparison of Long-term Forecasting Techniques for a Fast Developing Utility: Part I. Electric Power Systems Research, 2001, 58(1): 11~17
- 刘梅(Liu Mei). 用电需求预测的理论及应用[硕士学位论文](Electrical Demand Forecasting Theory and Its Applications, Master Thesis). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 1998
- 赵海青,牛东晓(Zhao Haiqing, Niu Dongxiao). 灰色优选组合预测模型及其应用(The Power Load Forecasting Model Based on the Optimum Grey Selection and Its Application). 保定师范专科学校学报(Journal of Baoding Teachers College), 2002, 15(2): 12~15
- 蒋平,鞠平(Jiang Ping, Ju Ping). 应用人工神经网络进行中期电力负荷预报(Medium-term Electric Load Forecasting Using Artificial Neural Network). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1995, 19(6): 11~17
- 邓志平,陈旭升(Deng Zhiping, Chen Xusheng). 城市民用用电量统计分析及预测(Analysis and Forecast of Monthly Power Consumption for Civil Use in Cities). 哈尔滨理工大学学报(Journal of Harbin Univ Sci & Tech), 1997, 2(6): 63~67
- 于渤,于浩(Yu Bo, Yu Hao). 基于随动思想的月度用电量时间序列预测模型(Follower Thought Based Sequential Forecast Model for Monthly Electricity Consumption). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(7): 42~44
- Alfares H K, Nazeeruddin Mohammad. Electric Load Forecasting: Literature Survey and Classification of Methods. International Journal of Systems Science, 2002, 33(1): 23~34
- Liu K, Subbarayan S, Shoults R R, et al. Comparison of Very Short-term Load Forecasting Techniques. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 877~882
- 孙洪波,徐国禹,秦翼鸿(Sun Hongbo, Xu Guoyu, Qin Jihong). 模糊理论在电力负荷预测中的应用(The Application of Fuzzy Theory to Power Load Forecasting). 重庆大学学报(Journal of Chongqing University), 1994, 17(1): 18~22
- 陈章潮,顾洁(Chen Zhangchao, Gu Jie). 模糊理论在上海浦东新区电力负荷预测中的应用(Application of Improved Fuzzy Model in Long-term Load Forecasting for Pudong New Area of Shanghai). 系统工程理论与实践(Systems Engineering, Theory & Practice), 1995(1): 63~68
- Kandil M S, El-Debeiky S M, Hasanien N E. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 491~496
- Hippert H S, Pedreira C E, Souza R C. Neural Networks for Short-term Load Forecasting: A Review and Evaluation. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 44~55
- Bhattacharya T K, Basu T K. Medium Range Forecasting of Power System Load Using Modified Kalman Filter and Walsh Transform. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1993, 15(2): 109~115
- Sfetsos A. Short-term Load Forecasting with a Hybrid Clustering Algorithm. IEEE Proceedings—Communications, 2003, 150(3): 257~262
- 邵能灵,侯志俭,李涛,等(Tai Nengling, Hou Zhijian, Li

- Tao, et al). 基于小波分析的电力系统短期负荷预测方法(New Principle Based on Wavelet Transform for Power System Short-term Load Forecasting). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2003, 23(1): 45~50
- 22 赵登福, 吴娟, 刘昱, 等(Zhao Dengfu, Wu Juan, Liu Yu, et al). 基于事例推理的短期负荷预测(Case-based Reasoning for Short Term Load Forecasting). 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 2003, 37(6): 608~611
- 23 严华, 吴捷, 马志强, 等(Yan Hua, Wu Jie, Ma Zhiqiang, et al). 模糊集理论在电力系统短期负荷预测中的应用(Applications of Fuzzy Set Theory to Short-term Load Forecasting in Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(11): 67~72
- 24 权先璋, 蒋传文, 张勇传(Quan Xianzhang, Jiang Chuanwen, Zhang Yongchuan). 电力负荷的混沌预测方法(Power Load Forecasting Based on Chaotic Theory). 华中理工大学学报(Journal of Huazhong University of Science and Technology), 2000, 28(7): 92~94
- 25 李天云, 刘自发(Li Tianyun, Liu Zifa). 电力系统负荷的混沌特性及预测(The Chaotic Property of Power Load and Its Forecasting). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(11): 36~40
- 26 梁志珊, 王丽敏, 付大鹏, 等(Liang Zhishan, Wang Limin, Fu Dapeng, et al). 基于Lyapunov指数的电力系统短期负荷预测(Electric Power System Short-term Load Forecasting Using Lyapunov Exponents Technique). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1998, 18(5): 368~371
- 27 唐立春, 李光熹, 熊曼丽(Tang Lichun, Li Guangxi, Xiong Manli). 基于分形的电力系统负荷预测(Power System Load Forecasting Based on the Fractal). 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the EPSA), 1999, 11(4): 21~24, 35
- 28 吴小明, 邱家驹, 张国江, 等(Wu Xiaoming, Qiu Jiayu, Zhang Guojiang, et al). 软计算方法和数据挖掘理论在电力系统负荷预测中的应用(Applications of Soft Computing and Data Mining in Electrical Load Forecasting). 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the EPSA), 2003, 15(1): 1~4, 94
- 29 康重庆, 夏清, 刘梅, 等(Kang Chongqing, Xia Qing, Liu Mei, et al). 应用于负荷预测中的回归分析的特殊问题(Special Issues of Regression Analysis in Load Forecasting). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(10): 38~41
- 30 Mbamalu G A N, El-Hawary M E. Load Forecasting via Suboptimal Seasonal Autoregressive Models and Iteratively Reweighted Least Squares Estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 343~348
- 31 Mastorocostas Paris A, Theocharis J B, Petridis V S. Constrained Orthogonal Least-squares Method for Generating TSK Fuzzy Models: Application to Short-term Load Forecasting. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 118(2): 215~233
- 32 陈慧玉, 孟宪生(Chen Huiyu, Meng Xiansheng). 岭估计在上海居民生活用电预测中的应用(The Practice of Ridge-estimation in the Forecast of Shanghai Residents' Domestic Electricity Consumption). 高校应用数学学报(A辑)(Applied Mathematics A-Journal of Chinese Universities), 1998, 13(4): 421~426
- 33 康重庆, 夏清, 相年德(Kang Chongqing, Xia Qing, Xiang Niande). 灰色系统的参数估计与不良数据辨识(Parameter Estimation and Bad Data Identification of Grey Systems). 清华大学学报(Journal of Tsinghua University), 1997, 37(4): 72~75
- 34 莫维仁, 张伯明, 孙宏斌, 等(Mo Weiren, Zhang Boming, Sun Hongbin, et al). 扩展短期负荷预测方法的应用(Application of Extended Short-term Load Forecasting). 电网技术(Power System Technology), 2003, 27(5): 6~9
- 35 陈亚红, 穆钢, 段方丽(Chen Yahong, Mu Gang, Duan Fangli). 短期电力负荷预报中几种异常数据的处理(Identification and Management to Anomalous Data in Short Term Load Forecasting). 东北电力学院学报(Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering), 2002, 22(2): 1~5
- 36 Charytoniuk W, Chen M S, Kotas P, et al. Demand Forecasting in Power Distribution Systems Using Nonparametric Probability Density Estimation. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1200~1206
- 37 唐小我(Tang Xiaowo). 现代组合预测和组合投资决策方法及应用(Modern Combination Forecasting and Investment Decision Approach and Applications). 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 2003
- 38 董景荣(Dong Jingrong). 基于因素影响的电力消费预测研究(Study of Electricity Consumption Forecasting Based on Influencing Factors). 重庆师范学院学报(Journal of Chongqing Normal University), 2000, 17(2): 1~6
- 39 Barakat E H, Al-Qassim J M, Al Rashed S A. New Model for Peak Demand Forecasting Applied to Highly Complex Load Characteristics of a Fast Developing Area. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1992, 139(2): 136~140
- 40 Karaki S H. Weather Sensitive Short-term Load Forecasting Using Artificial Neural Networks and Time Series. International Journal of Power and Energy Systems, 1999, 19(3): 251~256
- 41 Douglas A P, Breipohl A M, Lee F N, et al. Impacts of Temperature Forecast Uncertainty on Bayesian Load Forecasting. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1507~1513
- 42 Yang Hong-Tzer, Huang Chao-Ming, Huang Ching-Lien. Identification of ARMAX Model for Short Term Load Forecasting: An Evolutionary Programming Approach. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 403~408
- 43 Khotanzad A, Davis M H, Abaye A, et al. An Artificial Neural Network Hourly Temperature Forecaster with Applications in Load Forecasting. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 870~876
- 44 Senjyu T, Higa S, Uezato K. Future Load Curve Shaping Based on Similarity Using Fuzzy Logic Approach. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(4): 375~380
- 45 Srinivasan Dipti, Chang C S, Liew A C. Demand Forecasting Using Fuzzy Neural Computation with Special Emphasis on Weekend and Public Holiday Forecasting. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 1897~1903
- 46 康重庆, 程旭, 夏清, 等(Kang Chongqing, Cheng Xu, Xia Qing, et al). 一种规范化的处理相关因素的短期负荷预测新策略(A New Unified Approach to Short-term Load Forecasting Considering Correlated Factors). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(18): 32~35
- 47 Song Y H, Kim Chang-II, Yu In-Keun. Kohonen Neural Network and Wavelet Transform Based Approach to Short-term Load Forecasting. Electric Power Systems Research, 2002,

- 63(3): 169~176
- 48 Srinivasan D, Swee Sien Tan, Chang C S, et al. Parallel Neural Network-fuzzy Expert System Strategy for Short-term Load Forecasting: System Implementation and Performance Evaluation. *IEEE Trans on Power Systems*, 1999, 14(3): 1100~1105
- 49 Yang Hong-Tzer, Huang Chao-Ming. New Short-term Load Forecasting Approach Using Self-organizing Fuzzy ARMAX Models. *IEEE Trans on Power Systems*, 1998, 13(1): 217~225
- 50 谢敬东,唐国庆,徐高飞,等(Xie Jingdong, Tang Guoqing, Xu Gaofei, et al). 组合预测方法在电力负荷预测中的应用(The Application of the Combined Forecasting Method in the Power Load Forecast). *中国电力(Electric Power)*, 1998, 31(6): 3~5
- 51 康重庆,夏清,沈瑜,等(Kang Chongqing, Xia Qing, Shen Yu, et al). 电力系统负荷预测的综合模型(Integrated Model of Power System Load Forecasting). *清华大学学报(Journal of Tsinghua University)*, 1999, 39(1): 8~11
- 52 徐光虎,申刚,顾洁,等(Xu Guanghu, Shen Gang, Gu Jie, et al). 基于自适应进化规划的电力系统负荷预测综合模型(Integrated Model of Power System Load Forecasting Based on Self-adaptive Evolutionary Programming). *电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment)*, 2002, 22(6): 29~32
- 53 Chen G J, Li K K, Chung T S, et al. Application of an Innovative Combined Forecasting Method in Power System Load Forecasting. *Electric Power Systems Research*, 2001, 59(2): 131~137
- 54 程旭,康重庆,夏清,等(Cheng Xu, Kang Chongqing, Xia Qing, et al). 短期负荷预测的综合模型(Integrated Model of Short-term Load Forecasting). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 2000, 24(9): 42~44
- 55 莫维仁,张伯明,孙宏斌,等(Mo Weiren, Zhang Boming, Sun Hongbin, et al). 短期负荷综合预测模型的探讨(Investigation of Integrated Model for Short-term Load Forecasting). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 2004, 28(1): 30~34
- 56 Yoo H, Pimmel R L. Short Term Load Forecasting Using a Self-supervised Adaptive Neural Network. *IEEE Trans on Power Systems*, 1999, 14(2): 779~784
- 57 吴捷,严华(Wu Jie, Yan Hua). 基于自适应最优模糊逻辑系统的短期负荷预测方法(Short-term Load Forecasting Technique Based on Adaptive Optimal Fuzzy Logic System). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 1999, 23(17): 35~37
- 58 谢敬东,唐国庆(Xie Jingdong, Tang Guoqing). 具有自学习功能的电力负荷模糊推理预测(Fuzzy Inference Forecasting of Power Load with Self-learning Function). *东南大学学报(Journal of Southeast University)*, 1998, 28(4): 156~160
- 59 Singh D, Singh S P. Self Organization and Learning Methods in Short Term Electric Load Forecasting: A Review. *Electric Power Components and Systems*, 2002, 30(10): 1075~1089
- 60 穆钢,侯凯元,杨右虹,等(Mu Gang, Hou Kaiyuan, Yang Youhong, et al). 一种内蕴误差评价的负荷预报方法(Load Forecasting Method Based on Intrinsic Error Evaluation). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 2001, 25(22): 37~40
- 61 穆钢,侯凯元,杨右虹,等(Mu Gang, Hou Kaiyuan, Yang Youhong, et al). 负荷预报中负荷规律性评价方法的研究(Studies on Load Regularity Evaluating Method for Load Forecasting). *中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE)*, 2001, 21(10): 96~101
- 62 胡子珩,陈晓平,刘顺桂,等(Hu Ziheng, Chen Xiaoping, Liu Shungui, et al). 深圳电网自动运行的短期负荷预测系统(An Auto-operating Short-term Load Forecasting System for Shenzhen Power Network). *电网技术(Power System Technology)*, 2003, 27(5): 21~25
- 63 罗滇生,姚建刚,何洪英,等(Luo Diansheng, Yao Jiangan, He Hongying, et al). 基于自适应滚动优化的电力负荷多模型组合预测系统的研究与开发(Research and Development of Multi-model Combining Load Forecasting System Based on Self-adaptive Rolling Optimization). *中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE)*, 2003, 23(5): 58~61
- 64 Khotanzad A, Afkhami-Rohani Reza, Maratukulam D. ANNSTLF—Artificial Neural Network Short-term Load Forecaster Generation Three. *IEEE Trans on Power Systems*, 1998, 13(4): 1413~1422
- 65 <http://www.energy-china.com/energy/paper/zetddd/9319.html>. 又见: <http://www.cec.org.cn/news/content.asp?NewsID=20625> 福建省电力市场分析预测中心成立
- 66 <http://www.uni-paderborn.de/~IFS/>
- 67 <http://neuron.tuke.sk/competition/index.php>
- 68 <http://neuron.tuke.sk/competition2/>

康重庆(1969—),男,博士,副教授,研究方向为电力市场、电力系统规划、负荷预测等。E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn

夏清(1957—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力市场、电力系统规划、负荷预测等。

张伯明(1948—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析、能量管理系统等。

REVIEW OF POWER SYSTEM LOAD FORECASTING AND ITS DEVELOPMENT

Kang Chongqing, Xia Qing, Zhang Boming (Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Load forecasting is the foundation of power system planning and operation. By classifying it into yearly, monthly and short-term forecasting, the characteristics and ever presented forecasting models are discussed in this paper. Furthermore, the description and its solution process of these forecasting questions are analyzed. The main issues of future researches on this field are pointed out. Based on these discussions and the experience of other countries, some advice is given on how to promote load forecasting in China.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377016) and Tsinghua University Fundamental Research Fund (No. JC2002018).

Key words: power systems; load forecasting; model; parameter identification