

## 电力系统短期负荷预测方法研究综述

王惠中<sup>1,2</sup>, 周佳<sup>1,2</sup>, 刘轲<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 通过对国内外现状的研究, 简述了短期负荷预测的特点和影响预测精度的各种因素, 阐述了电力系统短期负荷预测的智能方法, 分析比较了各种方法的优缺点。研究表明组合优选方法是电力系统短期负荷预测的发展趋势。

关键词: 负荷预测; 神经网络; 数据挖掘; 支持向量机; 组合优选

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2015.01.001

[中图分类号] TM714 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2015)01-0001-03

Summary of Research on the Short-term Load  
Forecasting Method of the Electric Power SystemWANG Hui-zhong<sup>1,2</sup>, ZHOU Jia<sup>1,2</sup>, LIU Ke<sup>1,2</sup>(1. College of Electrical and Information Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;  
2. Gansu Key Laboratory for Advanced Control of Industrial Processes, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** Through the study of the status quo at home and abroad, this paper outlines the characteristics of short-term load forecasting and factors affecting the prediction precision, systematically expounds the intelligent methods of short-term load forecasting in the electric power system, and analyzes and compares the advantages and disadvantages of various methods. The result of the study has shown that combination optimization is the development trend for short-term load forecasting in the electric power system.

**Keywords:** load forecasting; neural network; data mining; support vector machine (SVM); combination optimization

## 0 引言

随着全球经济的迅猛发展, 从垄断经营模式走向竞争关系的电力行业, 尤其是智能电网的发展, 对电力系统各部门都提出了更高的要求。电力部门只有对负荷预测相关的数据进行全面详细的研究, 制定高效、经济的发电计划, 合理安排机组出力, 才能为用户持续提供安全、可靠的电能, 满足各用户的需求, 保证电力系统安全稳定运行, 并可以减少发电成本, 提高经济效益。

电力系统负荷预测就是要考虑电力系统的运行特性、系统规模、国家宏观调控、自然条件等因素的影响, 研究历史负荷数据的变化规律, 找出负荷与各影响因素之间的关系, 以此来预测未来负荷。通常按照预测时间的长短可将负荷预测分为以下四类: 长期、中期、短期和超短期。长期的负荷预测主要用来预测未来若干年的负荷情况, 一般用于电网的规划、改建工作等; 中期的负荷预测指预测未来数月至一年的负荷, 主要用于水库的运行调度、机组的维修及燃料的使用计划等; 短期负荷预测比较常用, 主要是对次日至一周负荷进行的预测, 常用于水火电的优化组合以及对经济潮流的控制等; 超短期负荷预测近年来研究的也比较多, 它主要指对未来一小时的负荷预测, 通常用于电能质量的控制、在线运行的安全监视、预防和应急控制等。由此可知, 中长期负荷预测是制定电力系统发展规划的前提, 而基于日负荷曲线的短期负荷预测则是制定日前发电计划的基础<sup>[1]</sup>。

近年来, 随着用电领域的不断拓宽, 用电户数的不断激增, 因

而只有进行高精度的负荷预测, 按照预测数据进行合理的电力划分, 才能确保社会的稳步、经济、和谐发展。电力系统经济运行的关键因素之一就是电力需求的预测, 准确的负荷预测对电力部门而言, 具有很大的节能潜力。对于大电网来说, 从短期负荷预测得到的信息, 不仅可以合理调度发电容量, 而且可以在安全范围内使该系统经济地安排各机组的启停, 保持必要的旋转备用容量的成本为最小, 从而使发电成本降到最低, 确保电网安全、稳定、可靠、优质和经济的运行。基于电网负荷预测的重要意义, 近年来, 人们对它的重视程度也在不断加大。

## 1 国内外研究现状

电力负荷受社会、经济、自然条件等因素的影响较大, 再加上诸多随机因素, 使得负荷存在复杂的非线性关系; 由于各个地区的负荷总是按照天、周、年周期性变化, 又使其具有了可预测性。因此, 国内外专家学者研究如何利用现有的历史数据, 采用适当的方法来预测未来的负荷值, 并具有比较高的速度和精度。

## 1.1 国外研究现状

自 20 世纪 60 年代初, 世界经济快速发展对电力的需求不断增加, 对电能质量的要求也逐步提高, 这就导致了电力系统的快速发展。负荷预测也就开始向探索、研究和应用方向发展。目前, 国外学者大多采取与神经网络和支持向量机有关的一些方法<sup>[2-5]</sup>。有学者提出先选择相似日负荷作为输入负荷, 而后应用小波分解将负荷分解成低频分量和高频分量, 最后使用单个的神经网络来预测这两个分量未来的负荷。也有学者采用非对称二次损失函数支持向量回归来准确的预测负荷, 有效提高了电力负荷预测模型的准确性。文献[6]提出了一种基于小波变换 (Wavelet Transform, 简称 WT) 和模糊自适应共振理论映射

定稿日期: 2014-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50967001); 甘肃省自然科学基金 1308RJZA117

(Fuzzy Adaptive Resonance Theory Maps, 简称 F-ARTMAP) 网络的新的混合智能算法, 该模型通过广泛的预测比较得以证明。文献[7]利用经验模式分解方法, 将时间序列分成两部分, 分别描述趋势和本地振荡的能量消耗值, 然后用于训练支持向量回归模型。文献[8]提出了一种基于内核机的短期负荷预测方法, 该方法提供了更好的短期负荷预测结果。通过学习国外学者最新的研究成果, 不难发现, 基于神经网络的负荷预测方法已经比较成熟, 开发其它新型的预测方法和算法已成为必然。

## 1.2 国内研究现状

当前, 国内学者为了提高负荷预测的精度和速度, 也研究出了多种方法和算法, 并取得了不错的成果<sup>[9-11]</sup>。韩教授将电压特性作为描述系统状态特征的基本量, 提出了基于加权最小二乘的状态预估模型和算法。也有专家采用遗传算法的全局搜索能力实现了粗糙集理论的属性约简, 通过对模型的输入变量进行优选, 并采用实值遗传算法来自动优化模型参数, 以改进和完善最小二乘支持向量机负荷预测模型和算法。还有学者引入人体舒适度指数, 综合考虑气象因素的影响, 利用相似日的日特征向量和负荷数据建立基于粒子群参数优化的支持向量机(Particle Swarm Optimization Support Vector Machine, 简称 PSO-SVM) 预测模型, 实验证明预测精度较高, 推广能力很强。文献[12]对 SVM 在短期负荷预测的应用中存在的包括数据预处理、核函数构造及选取和参数优化等方面的问题, 做出了分析, 并总结提出了现有的解决方案, 提出了下一步要解决的关键问题。还有学者专门研究了局部地区的电力负荷预测问题<sup>[13]</sup>, 并提出了一种基于自适应聚类分区和支持向量回归的多模型变结构负荷预测新方法, 实验证明该预测方法比传统的神经网络预测方法具有更高的精度和更强的鲁棒性。牛东晓教授利用在处理大数据量、消除冗余信息等方面具有优势的数据挖掘技术来对历史数据进行预处理, 组成具有高度相似气象特征的数据序列, 将此序列作为 SVM 的训练数据, 减少了数据量, 从而提高了预测的速度和精度, 克服支持向量机的缺点<sup>[14]</sup>。

综上所述, 电网短期负荷预测自发展以来, 各专家学者已提出了多种方法, 用于短期负荷预测的传统方法有趋势外推法、回归分析法、时间序列法、灰色预测法、卡尔曼滤波法、专家系统法等。随着逐步建立的现代电力系统管理信息系统, 以及天气预报水平的不断提高, 准确地获得负荷预测所需的各种历史数据不再是难事, 并涌现出了下列现代智能方法: 小波分析法、人工神经网络法、支持向量机法、数据挖掘法、模糊预测法、优选组合法等。这些方法逐步提高了负荷预测的速度和精度。本文就用于短期负荷预测的智能方法进行讨论。

## 2 短期负荷预测的智能方法

### 2.1 小波分析法

小波分析是一种建立于时频域的分析方法, 它不论是在时域还是在频域上都具有非常好的局部化性能, 可根据信号的频率自动调节采样密度, 对捕捉和分析弱信号具有优势。小波分析的目的是将一个信号转化成小波变换后的系数, 因此能够便于处理、存储、传输、分析和对原信号进行重建。对于短期负荷预测, 小波变换可将负荷序列分别投影到不同的尺度上, 然后对不同的子序列用相应的模型

进行预测, 最后通过序列重建得到完整的预测结果<sup>[15-16]</sup>。

电力负荷具有随周、月、季节变化的周期性波动的性质。小波分析方法就被用来解决这种大周期中包含有小周期的复杂情况。在对含有周期性的负荷序列进行小波变换时, 先要将各子序列分别投影至不同的尺度上, 各子序列分别代表原始负荷序列中不同的“频域”分量, 使得各子序列也具有明显的周期性。小波分析最大的不足就是未能考虑温度、湿度等气象因素对负荷预测的影响, 而且对小波基的选择也对预测结果有影响。

### 2.2 人工神经网络

人工神经网络是由大量神经元组成的一个非线性网络, 每一个神经元单独的作用很简单, 就是用一个非线性函数将输入映射到输出, 但是通过各个神经元之间的复杂连接, 使得整个神经网络具有了复杂的非线性特性。人工神经网络用于负荷预测的有(Back Propagation, 简称 BP) 网络、(Radical Basis Function, 简称 RBF) 网络等, 还有其与其它方法结合的组合方法<sup>[17]</sup>。如与小波理论结合得到的小波神经网络; 文献[18]提出的自适应模糊推理神经网络; 文献[19]提出的基于总体平均经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, 简称 EEMD)、最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, 简称 LSSVM) 和 BP 神经网络的综合短期负荷预测方法等。

短期负荷容易受到天气、社会经济等因素的影响, 具有严重的随机性和非线性。而人工神经网络的大规模分布式并行处理、高度自组织、自适应以及灵活性等优点正吻合短期负荷预测的这些特点。神经网络对系统的自动描述, 可通过对样本数据的学习来处理; 其并行结构对处理实时性问题上具有很大的优势; 其良好的信息综合处理能力以及高容错性, 对输入信息的各种复杂问题可有效地处理。该方法的不足是神经网络的层数和神经元的个数主要靠人的主观经验确定, 难以科学确定其网络结构, 学习速度慢, 存在局部极小点等问题, 训练过程在一定程度上也缺乏理论依据。

### 2.3 支持向量机

支持向量机方法是建立在统计学理论上的一种预测方法, 它的训练问题本质上是一个经典的二次规划问题, 因此可避免局部最优解, 并有唯一的全局最优解, 且可以利用最优化理论中许多成熟的算法。在解决非线性的问题时, SVM 可以通过非线性映射把非线性样本集映射到高维特征空间, 从而得到线性可分的数据集, 使用核函数来代替高维空间中相应的内积运算。支持向量回归估计(Support Vector Regression, 简称 SVR) 算法通过引入不敏感损失函数和核函数, 被广泛地应用于电力系统负荷预测, 并具有良好的预测性能和推广能力。

基于 SVM 的短期负荷预测比传统方法具有更高的预测精度, 它建立于(Vapnik-Chervonenkis Dimension, 简称 VC) 维理论和结构风险最小化原则的基础上, 对解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题效果比较理想, 且具有拟合精度高、推广能力强和全局最优等特点, 并充分考虑了影响负荷的各种因素。不足之处是要考虑其自选参数和核函数的选择, 一般靠经验确定, 影响预测效果<sup>[20-22]</sup>。因此, 各学者研究提出了很多改进的算法, 如基于线性规划的 SVM、最小二乘支持向量机 LSSVM、加权

支持向量机(Weighted Support Vector Machine, 简称 W-SVM)等。这些方法在一定程度上提高了 SVM 的性能,其中 LS-SVM 是最常用的方法。有学者以历史负荷数据、气象因素等作为输入,提出了一种基于带有扩展记忆的粒子群优化技术(Particle Swarm Optimization Extended Memory, 简称 PSOEM)与支持向量回归(SVR)相结合的预测方法,获得了比较好的结果。文献[23]以广东佛山地区的历史负荷数据作为原始数据,构造了基于支持向量机的短期负荷预测模型,通过与传统 BP 神经网络模型的预测结果比较,发现应用 SVM 模型的预测结果的平均相对误差为 2.26%,比 BP 神经网络法(3.02%)具有更高的精度。

## 2.4 数据挖掘

数据挖掘就是从大量的、不完全的、模糊的数据中,提取出隐藏在其中的、人们事先未知的,而又具有潜在使用价值的信息和知识的过程。数据挖掘一般有四步:问题的定义、数据的收集及预处理、数据挖掘的实施、挖掘结果的解释与评估。整个数据挖掘的过程就是一个不断反馈修正的过程。文献[24]在运用决策树 C4.5 算法建立短期负荷预测模型前,分析了非负荷因素对短期负荷预测的影响,并用数据挖掘方法对数据进行了预处理。

负荷预测需要用历史数据来预测未来的负荷,而当今各类数据信息系统又非常庞大,为了保证电力系统的安全、经济、可靠运行,将数据挖掘技术用于短期负荷预测是非常有必要的。数据挖掘技术对处理庞大的历史数据具有独特的优势,它能消除其中错误和无用的数据,找到隐含在数据中却非常有用的影响短期负荷预测的因素,确定短期负荷的真正变化规律,从而提高预测精度。有学者基于负荷的影响因素,采用日类型模糊分类器,将原始数据进行了分类,再根据预测日的日类型在相应的日类型子数据库中,采用灰色关联度分析法选取样本数据,将样本数据整理输入到 SVM 预测模型中,完成预测,预测模型充分吸取了数据挖掘技术和 SVM 的优点,具有运算速度快、预测精度高等特点<sup>[25]</sup>。

## 2.5 模糊理论法

模糊推理知识在描述和处理不确定性问题方面有显著的优势,结合电力系统所具有的显著的不确定性特征,被广泛应用于电力负荷的数学建模。模糊理论法将已有的历史数据用规则的形式表述出来,并转换成可以在计算机上运行的算法,进而完成各种工作任务。文献[26]在研究局部地区的短期负荷预测中,采用了聚类分析与模糊推理相结合的方法,从而保证了数据分析中的学习能力和不确定性描述能力,取得了较好的效果。

模糊推理应用于负荷预测的原由是其可以利用有限的规则逼近任意的函数,其隶属函数可以更清楚地说明专家的意图,并能处理电力系统中大量不精确的、模糊的问题;模糊方法通常利用调度员的丰富经验,对天气影响和突发事件等难以用数学关系表述的因素进行描述,往往比计算预测方法准确;模糊理论的自适应能力也使其具有较强的自适应性及鲁棒性。但随着对模糊理论的不断研究和应用,也发现了一些缺点:模糊理论的学习能力相对较弱;主观人为因素影响较大。

## 2.6 优选组合预测法

在实际应用中,没有哪一种预测技术能够全面客观地对预测对象及其所处的环境进行模拟。负荷预测在系统建模时一般会

受到两方面的限制:一是所建立的模型中不可能包含所有的影响因素,二是各个参数之间的内在关系也比较复杂,通常难以确定。因此也不是说所建立的模型越复杂,参数越多,它的预测精度就越高。因此,预测人员常采用多种预测方法来保证预测的准确性和可靠性,通过对这些预测方法进行分析、比较和选择,选取各种方法的优势,来获得更好的预测模型。

优选组合预测法一般有两种形式<sup>[27-29]</sup>:一种是先分别采用几种预测方法进行预测,得到各自的预测结果后,再选择适当的权重对预测结果进行加权平均;另一种是先对各种预测方法进行分析比较,利用优势互补的原则,选择拟合度最佳,或者标准离差最小的模型,相结合以得到最优的预测模型。优选组合预测法包含多种单一模型的信息,具有最大的信息利用率,以此来达到改善预测结果的目的<sup>[30-32]</sup>。有学者把时间序列法、灰色模型法与人工神经网络法结合起来进行负荷预测,提高了预测的精度;也有专家将粒子群优化算法与支持向量机相结合,得到了预测性能较好的 SVM 负荷预测模型。还有学者提出基于聚类和支持向量机的预测方法,通过(Self-Organizing Map, 简称 SOM)和 C-均值聚类组合算法,构造相似日样本,通过 SVM 模型的逐点训练,得到最终结果,实验证明该方法有效地处理了负荷序列的噪声及非平稳性,是一种很好的短期负荷预测方法。

## 3 结束语

本文综合分析了目前常用的几种短期负荷预测的智能方法,认为优选结合各种预测方法的优点为未来发展的一种趋势。由于影响负荷预测的因素很多,而在建模的过程中又不可能面面俱到,这样无疑会降低预测精度,因此,对今后的负荷预测方法研究提出了以下展望:一是要加强对历史数据的预处理,尽可能的挖掘负荷变化的规律性;二是要不断研究改进负荷预测模型的参数估计方法,找到最优的数学算法,以提高负荷预测的精度和速度;三是在实践中,根据不同地区短期负荷的不同特征及影响因素,灵活选用预测模型,并开发一套成熟、可靠、全面的负荷预测软件,建立基于负荷预测的电力系统调度平台,使其在现代智能电网条件下安全、可靠、经济运行。

### 参考文献:

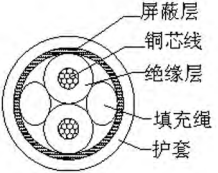
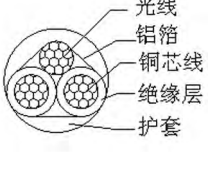
- [1] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] HASSAN S, KHOSRAVI A, JAAFAR J. Improving load forecasting accuracy through combination of best forecasts [C]. IEEE International Conference on Power System Technology, Auckland, New Zealand: 2012.
- [3] SINGH A K, IBRAHEEM I, KHATOON S, et al. Load forecasting techniques and methodologies: A review [C]. International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), Allahabad, India: 2012.
- [4] YING CHEN, LUH P B, CHE GUAN, et al. Short-Term load forecasting: Similar day-based wavelet neural networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2010, 25(1): 322-330.
- [5] STOCKMAN M, EIRAMLI R S, AWAD M, et al. An asymmetrical and quadratic support vector regression loss function for beirut short term load forecast [C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), Seoul, Korea: 2012.
- [6] HAQUE A U, MANDAL P, MENG J, et al. A novel hybrid approach based on wavelet transform and fuzzy ARTMAP network for predicting wind farm power production [C]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Las Vegas, NV, USA: 2012.

(下转第 39 页)

由于自制的普通 PVC 屏蔽双绞线特性阻抗只有  $50\ \Omega \sim 70\ \Omega$  左右,无法满足要求,所以线束设计中需要采用特殊的屏蔽双绞线,如下是特殊屏蔽线和普通 PVC 屏蔽线的对比情况,如图 4 所示。

观察对比表格中的数据可以发现:特殊屏蔽线和普通 PVC 屏蔽线相比,电线的绝缘层要厚得多( $0.83\ \text{mm}$  对  $0.22\ \text{mm}$ ),整体外径也要大很多( $7.60\ \text{mm}$  对  $4.50\ \text{mm}$ )。同时,对比试验中还发现,带屏蔽层的 CAN 线的特性阻抗比去除屏蔽层的双绞线的特性阻抗要小(见表 4)。

表 4 特殊屏蔽线和普通 PVC 屏蔽线的对比表

线型	特殊的屏蔽双绞线	普通 PVC 屏蔽线
结构		
型号	CB 627 1 x 2 x 0.5 mm <sup>2</sup>	2CX0.5B+0.5Bsn
供应商	SAB BROCKSKES GMBH&CO. KG	KBE
导体	0.5 mm <sup>2</sup>	0.5 mm <sup>2</sup>
绝缘层材料	PE	PVC
绝缘层厚度	0.83 mm	至少 0.22 mm
护套外径	( $7.60 \pm 5\%$ ) mm	( $4.50 \pm 0.20$ ) mm
特性阻抗 (带屏蔽层)	104 $\Omega$ (名义)	50 $\Omega$ (名义)
特性阻抗 (剥掉屏蔽层)	150 $\Omega$ (名义)	100 $\Omega$ (名义)

## 4 结束语

非屏蔽 PVC 双绞线(FLRY-A, FLRY-B)比较软,绞股均匀,特性阻抗在  $120\ \Omega$  上下波动,基本能够满足 HS-CAN 对 ISO11898 特性阻抗的要求。电动车的电磁环境非常复杂,电磁干扰严重。为了满足整车 EMC 要求,HS-CAN 线需采用特殊的屏蔽双绞线,这种屏蔽线在带屏蔽层的特性阻抗约  $104\ \Omega$ ,不带屏蔽层时的特性阻抗约为  $150\ \Omega$ 。

### 参考文献:

- [1] 史久根主编. CAN 现场总线系统设计技术[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 王黎明,夏立,邵英,等. CAN 现场总线系统的设计与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [3] 罗峰,孙泽昌. 汽车 CAN 总线系统原理、设计与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [4] 郭宽明主编. CAN 总线原理与应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [5] ISO 11898-2: Road vehicles-Controller area network (CAN) - Part 2 High-speed medium access unit[S], 2003.
- [6] EIA-364-108 Impedance, Reflection Coefficient, Return Loss, and VSWR Measured in the Time and Frequency Domain Test Procedure for Electrical Connectors, Cable Assemblies or Interconnection Systems[S], July 2000.

【作者简介】陈水华(1970-),男,湖南人,工程师。现任德尔福派克电气系统有限公司产品部经理。李雪晶(1985-),女,内蒙古人,工程师。现任德尔福派克电气系统有限公司产品部工程师。

### (上接第 3 页)

- [7] GHELARDONI L, GHIO A, ANGUITA D. Energy load forecasting using empirical mode decomposition and Support Vector Regression[J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2013 4(1):549-556.
- [8] MORI H, KURATA E. An efficient kernel machine technique for short-term load forecasting under smart grid environment[C]. IEEE on Power and Energy Society General Meeting San Diego, CA, USA: 2012.
- [9] 韩力,韩学山,雷鸣,等. 节点负荷预测与发电控制结合的状态预估方法[J]. 电力系统自动化 2009 33(4):16-20.
- [10] 耿艳,韩学山,韩力. 基于最小二乘支持向量机的短期负荷预测[J]. 电网技术 2008 32(18):72-76.
- [11] 陈超,黄国勇,邵宗凯,等. 基于日特征量相似日的 PSO-SVM 短期负荷预测[J]. 中国电力 2013 46(7):91-94.
- [12] 王奔,冷北雪,张喜海,等. 支持向量机在短期负荷预测中的应用概况[J]. 电力系统及其自动化学报 2011 23(4):115-121.
- [13] 谷云东,胡芳芳. 分区支持向量回归及其在负荷预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报 2013 25(3):20-24.
- [14] 牛东晓,谷志红,邢棉,等. 基于数据挖掘的 SVM 短期负荷预测方法研究[J]. 中国电机工程学报 2006 26(18):6-12.
- [15] 李鹏鹏,彭显刚,孟安波,等. 小波贝叶斯神经网络在冲击负荷地区短期负荷预测中的应用[J]. 电力科学与工程 2012 28(11):7-12.
- [16] 卢芸. 短期电力负荷预测关键问题与方法的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学电气工程学院 2007.
- [17] TASRE M B, GHATE V N, BEDEKAR P P. Hourly load forecasting using artificial neural network for a small area[C]. International Conference on Engineering, Science and Management (ICAESM), Nagapattinam, Tamil Nadu, India: 2012.
- [18] KODOGIANNIS V S, PETROUNIAS I. Power load forecasting using adaptive fuzzy inference neural networks[C]. IEEE International Conference on Intelligent Systems( IS), Sofia, Bulgarian: 2012.
- [19] 朱祥和,王子琦,李严,等. 基于 EEMD 的 LS-SVM 和 BP 神经网络混合短期负荷预测[J]. 数学的实践与认识 2012 42(8):151-158.
- [20] 李元诚,刘克文. 面向大规模样本的核心向量回归电力负荷快速预测方法[J]. 中国电机工程学报 2010 30(28):33-38.

- [21] 黄元生,邓佳佳,苑珍珍. 基于 ARMA 误差修正和自适应粒子群优化的 SVM 短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制 2011 39(14):26-32.
- [22] 段其昌,曾勇,黄大伟,等. 基于扩展记忆粒子群-支持向量机回归的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制 2012 40(2):40-44.
- [23] 陈亮宏,罗毅初,龙雪涛. 基于支持向量机的短期负荷预测[J]. 机电工程 2012 41(12):18-20.
- [24] 高琳琳. 基于数据挖掘的短期负荷预测[D]. 南昌:南昌大学信息工程学院自动化系 2012.
- [25] 杜亚松. 基于数据挖掘与支持向量机的微网负荷预测[D]. 保定:华北电力大学电气与电子工程学院 2013.
- [26] 程金增. 基于局部模糊推理的短期电力负荷预测研究[D]. 保定:华北电力大学数理学院 2012.
- [27] 褚金胜,陈宙平. 优选组合预测法在短期负荷预测中的应用[J]. 电气开关 2013 51(2):86-90.
- [28] 曾勃伟,徐知海,吴键. 基于粒子群优化和支持向量机的电力负荷预测[J]. 微电子学与计算机 2011 28(1):147-153.
- [29] 梁建武,陈祖权,谭海龙. 短期负荷预测的聚类组合和支持向量机方法[J]. 电力系统及其自动化学报 2011 23(1):34-38.
- [30] RAZA M Q, BAHARUDIN Z. A review on short term load forecasting using hybrid neural network techniques[C]. IEEE International Conference on Power and Energy, Kota Kinabalu, Malaysia: 2012.
- [31] SHU FAN, HYNDMAN R J. Forecast short-term electricity demand using semi-parametric additive model[C]. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Christchurch, New Zealand: 2010.
- [32] KOO B G, KIM M S, KIM K H, et al. Short-term electric load forecasting using data mining technique[C]. International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), Coimbatore, Tamil Nadu, India: 2013.

【作者简介】王惠中(1962-),男,河南洛阳人,教授,硕士生导师,主要研究方向为自动化仪器仪表、嵌入式开发与应用等。已发表文章 30 余篇。周佳(1987-),女,甘肃武威人,硕士生,主要研究电力系统负荷预测等。