

地区电网负荷预测的灰色 Verhulst 与系统动力学组合模型

李杰¹, 王秀丽¹, 邵成成¹, 王志成¹, 张航¹, 陈雨甜¹, 王帅²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 102209, 北京)

摘要: 为解决传统地区电网负荷预测中单一模型预测误差较大的风险和无法充分利用历史数据的缺陷,提出一种地区电网负荷预测的线性组合模型——灰色 Verhulst 与系统动力学组合模型。以社会用电量历史数据为原始数据,先后建立灰微分方程和白化微分方程并进行求解,得到基于灰色 Verhulst 模型的负荷预测时间序列,该模型适用于负荷按照 S 形曲线增长或负荷增长处于饱和阶段的预测;综合考虑经济、人口、能源替代和再电气化等对社会用电量的影响,建立负荷预测的经济子系统、人口子系统、能源替代和再电气化子系统、电力消费子系统,得到基于系统动力学的负荷预测模型,该模型适用于结构复杂、原始信息丰富、子系统之间联系紧密的负荷预测。在不增加复杂性的基础上,通过最小方差准则对单一模型进行线性组合,建立地区电网负荷预测的组合模型。采用枣庄市所有地块进行算例分析,结果表明:在充分利用了负荷历史数据后,71%的地块的预测精度较单一模型的有所提高;在采用最小方差准则对单一模型进行线性组合后,29%的地块产生较大预测误差的风险较单一模型的有所降低。

关键词: 地区电网负荷预测;灰色 Verhulst 模型;系统动力学模型;最小方差准则;线性组合模型

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202101009 **文章编号:** 0253-987X(2021)01-0068-10



OSID 码

Grey Verhulst and System Dynamics Combined Model for Regional Power Grid Load Forecasting

LI Jie¹, WANG Xiuli¹, SHAO Chengcheng¹, WANG Zhicheng¹, ZHANG Hang¹,
CHEN Yutian¹, WANG Shuai²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Economic and Technical Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: To solve the risk of large forecast errors of a single model and the inability to make full use of historical data in the traditional regional power grid load forecasting, this paper proposes a linear combination model of regional power grid load forecasting, i. e. combination model of grey Verhulst and system dynamics. Taking the historical data of social electricity consumption as the original data, the grey differential equation and the whitening differential equation are successively established and solved to obtain the load forecast time series based on the grey Verhulst model, which is adopted to predict the load growth in accordance with the S-shaped curve or the load growth in saturation stage. Comprehensively considering the impacts of

收稿日期: 2020-06-02。 作者简介: 李杰(1996—),男,硕士生;王秀丽(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家电网有限公司总部科技部项目(未来电网形态及其演进路线)。

网络出版时间: 2020-09-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200915.1353.003.html>

economy, population, energy substitution and re-electrification on social electricity consumption, the economic subsystem, population subsystem, energy substitution and re-electrification subsystem and power consumption subsystem of load forecasting are established, then a load forecasting model based on system dynamics is obtained, which is suitable for load forecasting with complex structure, rich original information and close connection among the subsystems. Without increasing complexity, single model is linearly combined following the minimum variance criterion to establish a combined model for regional power grid load forecasting. All areas in Zaozhuang city are employed to analyze the calculation examples. The results show that after making full use of the historical load data, the prediction accuracy of 71% of the areas is higher than that of a single model; after considering the minimum variance criterion to linearly combine the single model, 29% of the areas encounter lower risk of large prediction errors than a single model.

Keywords: regional power grid load forecasting; grey Verhulst model; system dynamics model; minimum variance criterion; linear combination model

在国内经济中高速增长的背景下,电力消费需求迅速上升,不同地区社会发展水平的差异将会导致电力消费的不同。负荷预测是电网优化调度和规划建设的关键工作,是地区电网规划、运行、调度和运营的重要前提和基础,对于提高电网运行的稳定性和经济性、降低输电线路建设成本和实现电力供需平衡具有重要意义^[1]。地区电网负荷预测是工作人员根据电网的实际运行状态,结合当地的政治、经济、人口、气候等各种随机因素的影响,首先对与社会用电量相关的历史数据进行处理和分析,然后寻求电力负荷及其影响因素之间的内在联系,最后建立地区电网负荷预测的模型,根据建立的模型得到未来某一阶段的负荷预测数据,并且对地区的负荷变化趋势进行分析和判断。

电力系统负荷预测方法主要有回归分析法、时间序列分析法、人工神经网络法和指数平滑法等。文献[2]对电力系统负荷预测研究作了综述,并对发展方向进行了探讨;文献[3]对回归分析法在负荷预测中的应用进行了介绍,该方法通过分析负荷的历史数据,建立回归模型,利用回归模型对负荷进行预测,由于回归模型受到影响因素的不确定性影响,所以预测精度往往不尽人意;文献[4]将时间序列分析法和卡尔曼滤波算法组合应用到短期负荷预测,得到了精度较高的预测结果;文献[5-6]对人工神经网络在中长期负荷预测中的应用进行了介绍。

综上所述,目前的负荷预测方法主要有以下不足:首先,模型参数是根据历史数据来确定的,不能考虑地区未来的发展状况;其次,未能充分考虑影响社会用电量的多方面因素;最后,非参数模型的物理

意义不明确,当预测偏差较大时,从模型本身进行分析和调整的难度较大。

有鉴于此,本文将研究地区电网负荷预测并提出一种组合模型来提高预测精度。灰色 Verhulst 模型是用于研究自然界生物 S 形增长的模型,最终种群数量将趋于饱和状态。灰色系统预测具有预测所需的原始信息较少、计算过程简单、预测结果可检验的优势,所以广泛应用于负荷预测^[7]。系统动力学模型通过建立电力消费的子系统来模拟负荷发展趋势,考虑影响负荷变化的主要子系统,通过仿真软件可以得到负荷预测的数据。本文将灰色 Verhulst 模型和系统动力学模型得到的负荷预测数据按照线性组合方法耦合到最终的负荷预测结果中,组合模型的预测结果既能拟合历史负荷数据,又能考虑电力消费及其子系统的变化趋势。通过最小方差准则得到单一模型的权系数,使得组合模型预测值的方差不大于任意单一模型的,尽可能地提高组合模型的预测精度。

1 灰色 Verhulst 模型

1.1 Verhulst 模型简介

Pierre François Verhulst 在 1838—1847 年期间研究人口变化时,命名了一种常见的 S 形曲线,即 Logistic 函数

$$P(t) = \frac{L'}{1 + e^{-k(t-t_0)}} \quad (1)$$

式中: P 是人口数量; L' 是曲线的最大值; k 是曲线的增长率; t_0 是初始时刻。Pierre François Verhulst 在人口增长的指数模型 $dP(t)/dt = kP(t)$ 中

加入一个自然资源限制人口发展项,使得人口增长率 k 随着人口数量 $P(t)$ 的增加呈现线性下降,即 $k = A_1 - A_2 X(t)$,从而得到 Verhulst 模型^[8]

$$\frac{dP(t)}{dt} = A_1 P(t) - A_2 P^2(t) \quad (2)$$

式(2)为一阶自治微分方程,通过分离变量法可以得到解析解

$$P(t) = \frac{A_1 A_2^{-1}}{1 + (A_1 A_2^{-1} P_0^{-1} - 1)e^{-A_1(t-t_0)}} \quad (3)$$

式中 P_0 为初始值。为了直观地观察人口数量随时间的变化,从几何角度出发,使用 MATLAB 绘制式(3)(式中参数取值如下: $A_1 = 1, A_2 = 3, t_0 = 0, P_0 = 0.1$)的方向场,得到几何解如图1所示。

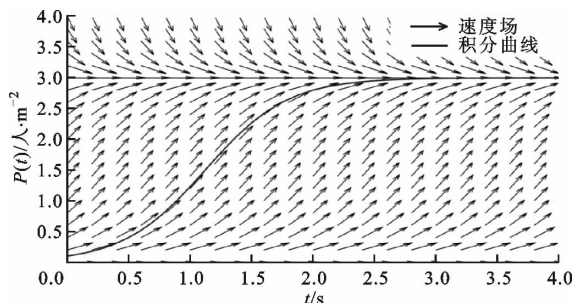


图1 Verhulst 模型的积分曲线

1.2 灰色 Verhulst 模型的建立

灰色系统理论弥补了经典统计分析方法的不足,以部分信息已知、部分信息未知的小样本,贫信息,不确定性系统为研究对象,弥补了采用数理统计方法进行分析时的缺点,对样本数量和样本规律性没有特殊要求,不会出现量化结果与定性分析结果不相符合的情况^[8]。

灰色 Verhulst 模型建模要求原始数据必须等时间间距,处理思路是首先对原始数据进行累加,弱化原始时间序列数据的随机因素,然后建立生成数的微分方程^[9]。

设已知序列为 $x^0(1), x^0(2), \dots, x^0(n)$, 做一次累加生成新序列 $x^1(1), x^1(2), \dots, x^1(n)$, 其中

$$x^1(k) = \sum_{i=1}^k x^0(i), k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

由序列 $x^1(k), k = 1, 2, \dots, n$ 生成紧邻均值生成序列

$$\left. \begin{aligned} z^1(k) &= \alpha x^1(k) + (1 - \alpha)x^1(k-1) \\ k &= 2, 3, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $0 \leq \alpha \leq 1$, 通常可取 $\alpha = 0.5$ 。建立灰微分方程 $x^0(k) + \alpha z^1(k) = b(z^1(k))^2, k = 2, 3, \dots, n$ (6)

相应的 Verhulst 模型的白化微分方程为

$$\frac{dx^1(t)}{dt} + \alpha x^1(t) = b(x^1(t))^2 \quad (7)$$

灰微分方程用来得到参数 a, b , 进而将其代入白化微分方程中得到时间响应 $x^1(t)$, 将式(6)整理为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} -z^1(2) & (z^1(2))^2 \\ -z^1(3) & (z^1(3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^1(n) & (z^1(n))^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^0(2) \\ x^0(3) \\ \vdots \\ x^0(n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(8)写为

$$A\mathbf{x} = \boldsymbol{\eta} \quad (9)$$

一般情况下, $\text{rank}(A) \neq \text{rank}(A, \boldsymbol{\eta})$, 式(9)为不相容方程组, 所以只能求得最小二乘解, 定义 $\hat{\mathbf{x}}$ 为式(9)的最小二乘解。此时式(9)变为

$$A^T A \hat{\mathbf{x}} = A^T \boldsymbol{\eta} \quad (10)$$

最小二乘解为 $\hat{\mathbf{x}} = [a \ b]^T = (A^T A)^{-1} A^T \boldsymbol{\eta}$, 将其代入白化微分方程, 得到

$$\frac{dx^1}{dt} + \hat{a}x^1(t) = \hat{b}(x^1(t))^2 \quad (11)$$

求解式(11)得到离散的时间响应序列

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}^1(k+1) &= \frac{\hat{a}x^0(1)}{\hat{b}x^0(1) + (\hat{a} - \hat{b}x^0(1))e^{\hat{a}k}} \\ k &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式(12)做一次累减还原得到灰色 Verhulst 模型原始序列的预测序列

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}^0(k+1) &= \hat{x}^1(k+1) - \hat{x}^1(k) \\ k &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

灰色 Verhulst 模型实际上是一种以数找数的方法, 从系统的一个或几个离散的数列中找出系统的变化关系, 是一种试图建立系统连续变化的模型, 主要反映事物自身产生、发展和饱和的过程, 是对 S 型饱和和负荷曲线的预测^[10-11]。

2 系统动力学模型

2.1 系统动力学简介

系统动力学是美国麻省理工斯隆商学院的 J. W. Forrester 在 1950 年综合了系统理论、控制论、伺服机械学、信息论、决策理论以及计算机模拟所发展出来的, 对系统的研究可以划分为以下 2 步。

(1) 根据相关理论将系统 S 划分为 n 个相互关联的子系统 S_i 。

(2) 对子系统 S_i 进行建模。子系统由基本回路和反馈回路组成, 变量主要包含流、存量、率量、辅助变量。

系统动力学对问题的理解, 是基于系统行为与

内在机制间的相互紧密的依赖关系,透过数学模型的建立与操弄的过程而获得的。系统动力学逐步发掘出产生变化形态的因果关系,称之为结构。结构是指一组环环相扣的行动或决策规则所构成的网络。

2.2 系统动力学模型的建立

本文基于相关文献的研究,选取电力消费影响因子如下:国内生产总值(GDP)、人口数量、人口结构、三产用电、生活用电、再电气化进程、能源替代效应等。对电力消费影响因子采用平稳性检验、协整检验、因果检验^[12]。通过电力消费影响因子的聚类分析,可以将地区电网负荷预测系统分为 4 个子系统:经济子系统、人口子系统、能源替代与再电气化子系统、电力消费子系统,图 2 展示了各个子系统之间的拓扑结构关系。

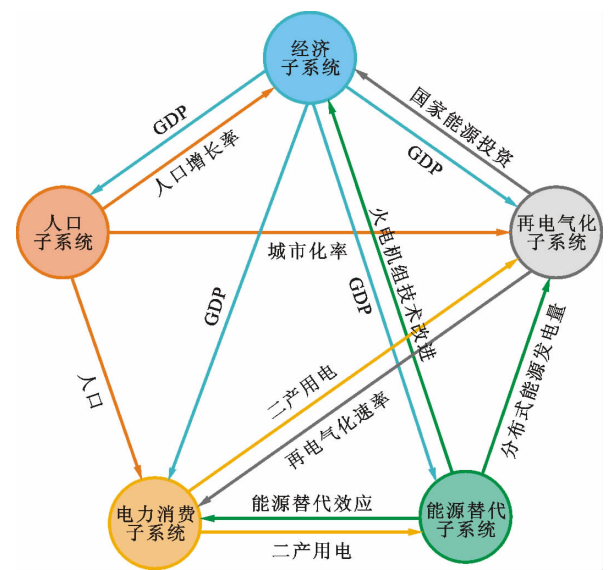


图 2 系统拓扑结构

(1)经济子系统。经济子系统通过有技术进步的索洛增长模型^[13]推导得到。本文首页 OSID 码中的开放数据附录 A 详细介绍了索洛增长模型。

经济子系统方程设计为

$$\left. \begin{aligned} \Delta I &= (I_R - A_D)A \\ \Delta E &= \Delta LL_R \\ \Delta W &= \text{SMOOTH}(W_G, 4)(\ln W_B)/L_R \\ \Delta T_R &= \text{DELAY3}(T^{0.0739}, T') \\ \Delta G_i &= \Delta I + \Delta E + \Delta W + G_i \Delta T_R \\ \Delta G &= G + \sum_{i=1}^3 \Delta G_i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: ΔI 为投资增量; I_R 为投资率; A_D 为资产折旧率; A 为资产; ΔE 为就业增量; ΔL 为劳动人口增量; L_R 为劳动增长率; ΔW 为工资增长量; SMOOTH 和 DELAY3 为仿真软件 Vensim PLE 中的函数;详

细定义见本文首页 OSID 码中的开放数据附录 B; W_G 为工资增长率; W_B 为工资初始值; ΔT_R 为技术增长率; T 为技术初始值; T' 为设置的负荷预测时间长度(a); ΔG_i 为第 i 产业国内生产总值增量; ΔG 为国内生产总值增量; G 为经济体初始国内生产总值。

(2)人口子系统。以外生人口增长模型^[14]为基础,模拟人口数量和结构的变化对 GDP 和电力消费的影响。人口数量和城市化进程影响到各产劳动人口,从而使人口子系统与经济子系统产生联系,人口数量影响到生活用电,从而使人口子系统与电力消费子系统产生联系。

人口子系统通过带有自然资源限制的指数增长模型推导得到。Logistic 人口增长模型是对总人口 P 建立的非线性动力学模型 $\frac{dP}{dt} = nP \left(1 - \frac{P}{A}\right)$,式中, n 为人口的自然增长率, A 为环境资源允许的稳定人口数。人口随时间变化的方程为 $P = \frac{AP_0}{P_0 + (A - P_0)e^{-nt}}$ 。模型从总体上反映了人口的自然出生和环境资源限制导致的死亡。人口的自然增长率由索洛增长模型决定,即外生的。人口机械增长率是指地区在一定时期内由于人口迁入和迁出而引起的人口数量变化,人口机械增长一般表现为经济落后地区向经济发达地区迁移,通过将 GDP 除以人口总数得到人均 GDP 影响因子,进而影响该地区的人口机械增长率。生活用电将受到人口和 GDP 的影响,本文将在电力消费子系统中做详细说明。

人口子系统方程设计为

$$\left. \begin{aligned} M_{GR} &= \text{INTEG}(P/G, I_{av}) \\ N_{GR} &= \text{SMOOTH}(N_{ini}, T') \\ U_{GR} &= e^{0.17G}/(P_2 + P_3) \\ P &= P_{ini} + \text{INTEG}(M_{GR} + N_{GR} + U_{GR}) \\ E_L &= \ln(\text{DELAY1}(T_{av}, 30)) + \ln(P/G) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: M_{GR} 为人口机械增长率; INTEG 和 DELAY1 为仿真软件 Vensim PLE 中的函数,详细定义见本文首页 OSID 码中的开放数据附录 B; I_{av} 为人均 GDP 影响因子; N_{GR} 为人口自然增长率; N_{ini} 为人口自然增长率初值; U_{GR} 为城市化率; P_2 、 P_3 分别为第二产业、第三产业劳动人口数量; P_{ini} 为当前时间人口数量初始值; E_L 为生活用电; T_{av} 为年平均气温。

(3)能源替代和再电气化子系统。文献[15-16]分别对我国再电气化进程和能源替代效应作了相关介绍。能源替代和再电气化子系统主要模拟发电侧

新能源接入和用电侧电能广泛使用,通过分布式能源发电量与电力消费子系统联系。能源替代和再电气化子系统方程设计为

$$\begin{aligned} E_{\text{RE}} &= E_{\text{PO}} + \ln(P_{\text{V}} + H_{\text{Y}} + W_{\text{P}}) \\ E_{\text{CL}} &= \text{INTEG}(E_{\text{RE}} + E_{\text{CED}}) \\ E_{\text{FE}} &= \text{INTEG}(E_{\text{UL}} + E_{\text{FED}}) \\ E_{\text{RN}} &= (E_{\text{CL}} + E_{\text{FE}})^{\text{e}-4} \end{aligned}$$

(16)

式中: E_{RE} 为能源替代效应; E_{PO} 为能源政策影响力; P_{V} 、 H_{Y} 、 W_{P} 分别为光伏、水电、风力发电量增长率; E_{CL} 为清洁能源发电量; E_{FE} 为化石能源发电量; E_{RN} 为再电气化速率。

(4)电力消费子系统。电力消费子系统主要模拟三产用电、生活用电、分布式能源发电量对最终电力消费的影响。计量经济学是以数理统计为基础,运用大量数据资料,建立数学模型定量分析经济变量相关关系的学科。本文首页 OSID 码中的开放数据附录 C 对其中用到的理论技术进行了说明,使用计量经济学方法分析 GDP、电力消费、资产、劳动人口之间的协整关系和因果关系。

本小节将研究电力消费和经济增长之间的协整关系,并通过因果检验分析电力消费是否会引起经济增长、衰退,亦或是二者都有。基于本文首页 OS-ID 码中的开放数据附录 C 的方法,对 GDP、电力消费、资产、劳动人口数据的协整关系进行检验,JJ 协整检验结果如表 1 所示。结果表明,在 5%显著性水平上最少存在一组协整关系。

表 1 采用 JJ 协整检验的结果

协整数量	特征值	最大特征值	5%显著性水平下的临界值	概率
0	0.837 866	81.269 69	47.856 13	0.000 0
至多 1 个	0.446 400	28.509 10	29.797 07	0.069 8
至多 2 个	0.296 526	11.361 02	15.494 71	0.190 2
至多 3 个	0.039 245	1.1610 30	3.841 466	0.281 3

协整检验后还需要判断变量间的因果关系及方向。首先对时间序列变量进行平稳性检验,对 GDP、电力消费、资产、劳动人口进行单位根检验,结果表明这些序列是一阶单整的。基于本文首页 OSID 码中的开放数据附录 B 中的方法,对 GDP(G')、电力消费(E)、资产(A)、劳动人口(L)间的因果关系进行检验,Granger 因果检验结果如表 2 所示,结果表明,电力消费和 GDP、资产在 10%置信度水平上存在双边 Granger 因果关系,但不存在从 GDP 到电

力消费的因果关系。

表 2 采用 Granger 因果检验的结果

原假设	F 统计量	概率
$\ln G'$ 不是 $\ln L$ 的 Granger 原因	3.127 74	0.062 1
$\ln G'$ 不是 $\ln A$ 的 Granger 原因	2.579 37	0.0967
$\ln G'$ 不是 $\ln E$ 的 Granger 原因	1.382 67	0.270 2
$\ln L$ 不是 $\ln G'$ 的 Granger 原因	0.082 20	0.921 3
$\ln L$ 不是 $\ln A$ 的 Granger 原因	0.310 12	0.736 3
$\ln L$ 不是 $\ln E$ 的 Granger 原因	0.230 80	0.795 6
$\ln A$ 不是 $\ln G'$ 的 Granger 原因	1.162 26	0.329 8
$\ln A$ 不是 $\ln L$ 的 Granger 原因	0.443 68	0.646 8
$\ln A$ 不是 $\ln E$ 的 Granger 原因	2.129 84	0.140 8
$\ln E$ 不是 $\ln G'$ 的 Granger 原因	2.703 66	0.087 3
$\ln E$ 不是 $\ln L$ 的 Granger 原因	0.077 79	0.925 4
$\ln E$ 不是 $\ln A$ 的 Granger 原因	4.154 29	0.028 2

由于影响电力消费的因素太多,如果把所有因素都考虑进系统动力学模型,那么不仅会使模型变得复杂,而且精度也可能会随着远离当前年而降低,所以本小节利用相关性检验的方法找出主要的影响因素,由检验结果得到电力消费方程^[17],检验结果如表 3 所示。

表 3 电力消费与其影响因素的相关性

电力消费	影响因素	相关度
第一产业	一产 GDP	0.82
	年降水量	-0.75
第二产业	二产 GDP	0.99
	上年二产用电	0.99
第三产业	三产 GDP	1.00
	上年三产用电	1.00
	年平均气温	0.72
生活用电	GDP	0.99
	上年生活用电	1.00
	人口	0.59
分布式能源	能源替代效应	0.56
	再电气化速率	0.74

由表 3 的检验结果可得

$$\begin{aligned} E_{\text{D}} &= 0.34 \ln E_{\text{RE}} + 0.51 \ln E_{\text{RN}} - 0.23 \ln E_{\text{UL}} + 2.41 \\ E_1 &= 0.34 \ln G_1 - 0.46 \ln R + 4.32 \\ E_2 &= 0.92 \ln E'_2 + 0.79 \ln G_2 + 4.26 \\ E_3 &= 0.84 \ln E'_3 + 0.69 \ln G_3 + 0.75 \ln T_{\text{av}} \\ E_4 &= 0.67 \ln E'_4 + 0.54 \ln G + 0.73 \ln P - 0.82 \ln T_{\text{av}} \end{aligned}$$

(17)

式中: E_D 为分布式能源发电量; E_{RE} 为能源替代效应; E_{RN} 为再电气化速率; E_{UL} 为化石能源利用率。 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 分别为第一产业用电量、第二产业用电量、第三产业用电量和生活用电量; E'_2 、 E'_3 、 E'_4 分别为第二产业、第三产业、生活用电上年用电量; G_1 、 G_2 、 G_3 分别为经济体第一产业、第二产业、第三产业初始国内生产总值; R 为降水量。

3 组合模型

3.1 组合模型的设计

将系统动力学模型的方程和灰色 Verhulst 模型的方程代入仿真软件 Vensim PLE 中,分别得到两种预测方法的结果 E'_1 和 E'_2 ,预测残差分别为 r_1 和 r_2 。组合预测方法通过求单一模型预测值的加权算术平均而得到组合模型的预测值,本文提出的组合模型同时采用系统动力学和灰色 Verhulst 模型进行预测,然后对两种预测结果采用最小方差准则进行线性组合,得到组合模型的预测值 E_{comb} 。预测总残差为 r ,取单一模型的权系数分别为 w_1 和 w_2 ,满足 $0 < r_1 < 1$, $0 < r_2 < 1$, $r_1 + r_2 = 1$ 。组合模型预测值为

$$E_{comb} = w_1 E'_1 + w_2 E'_2 \quad (18)$$

组合模型残差为

$$r = w_1 r_1 + w_2 r_2 \quad (19)$$

残差的方差为

$$\begin{aligned} \text{var}(r) = & w_1^2 \text{var}(r_1) + w_2^2 \text{var}(r_2) + \\ & 2w_1 w_2 \text{cov}(r_1, r_2) \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $\text{cov}(r_1, r_2)$ 为残差 r_1 和 r_2 的协方差。 $\text{var}(r)$ 对 w_1 求极小值,得到

$$w_1 = \frac{\text{var}(r_2) - \text{cov}(r_1, r_2)}{\text{var}(r_1) + \text{var}(r_2) - 2\text{cov}(r_1, r_2)} \quad (21)$$

显然可取单一模型之间的协方差为 0,且有 $w_1 + w_2 = 1$,则组合模型的权系数分别为

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= \frac{\text{var}(r_2)}{\text{var}(r_1) + \text{var}(r_2)} \\ w_2 &= \frac{\text{var}(r_1)}{\text{var}(r_1) + \text{var}(r_2)} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

将组合模型方程带入仿真软件 Vensim PLE 中,可以得到三产用电、生活用电和不同地块负荷的预测结果,组合模型如图 3 所示。

3.2 组合模型的使用

处理负荷历史数据得到累加新序列和紧邻均值生成序列,求解灰微分方程得到最小二乘参数,将其代入到白化微分方程中,求解得到负荷预测的离散

时间响应序列,进行一阶累减还原得到灰色 Verhulst 模型的预测值。处理经济子系统和人口子系统时,将索洛增长模型和 Logistic 人口增长模型得到的方程代入系统动力学模型中,处理电力消费子系统时,对电力消费及其影响因素进行平稳性检验、协整检验和因果检验,通过 EViews 软件得到电力消费方程并代入到系统动力学模型中。用最小方差准则得到单一模型的权系数,得到组合模型的电力消费方程,使用仿真软件 Vensim PLE 得到各产用电、单一模型预测值和组合模型预测值。基于组合模型的地区电网负荷预测的流程如图 4 所示。

4 算例分析

4.1 应用组合模型的枣庄市所有地块的负荷预测

以枣庄市 2003—2013 年各区(市)社会用电量为负荷历史数据,采用组合模型进行各地块负荷预测,得到 2014—2018 年所有地块在不同预测方法下的预测结果和各个产业用电量数据,分别如表 4 和本文首页 OSID 码中的开放数据附录 D 所示。模型 1 为灰色 Verhulst 模型,模型 2 为系统动力学模型,文中组合模型需要的所有数据均来源于枣庄市统计局。

4.2 模型预测精度的比较

单一灰色 Verhulst 模型和单一系统动力学模型能够提供不同的有用信息,组合模型能够综合利用这些信息,更充分地利用原始数据,从而提高预测精度。因为在组合模型设计时采用最小方差准则来确定灰色 Verhulst 模型和系统动力学模型的权系数,所以组合模型残差的方差不大于任一单一模型残差的方差,并且组合模型预测值的残差介于灰色 Verhulst 模型和系统动力学模型预测值的残差之间,能够减少单一模型带来较大预测残差的风险,不同模型的预测精度比较结果如表 5 所示。

4.3 不同模型的适用性

系统动力学能够直观地描述系统,并且模型的参数物理意义明确,所以可以用于研究结构、功能和行为之间呈现辩证统一关系的复杂系统^[18]。系统动力学模型具有非线性、高阶次、多变量的特点,能够充分地影响社会用电量的因素考虑在内,为中长期负荷预测提供了系统性和动态性更强、因果反馈关系更明确的解决思路,适用于结构复杂、原始信息丰富、各个子系统之间联系紧密的负荷预测。灰色 Verhulst 模型是一种不严格的系统方法,它避免了对系统结构进行分析的环节,直接通过对原始数

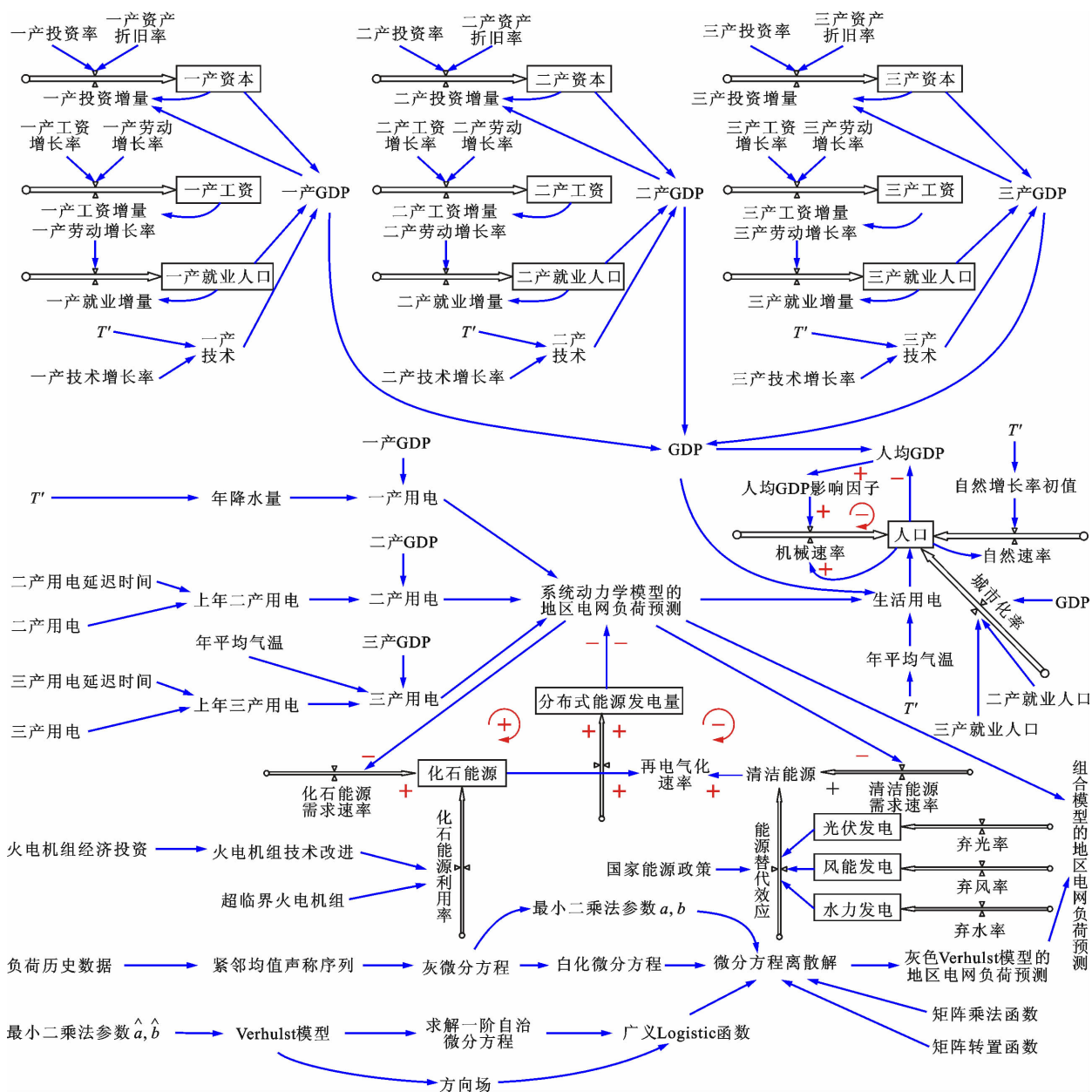


图3 地区电网负荷预测的组合模型

据的累加构建负荷的饱和和增长模型,预测所需的原始信息较少、计算过程简单,适用于原始数据缺乏、负荷按照S形曲线变化的饱和负荷的预测。组合模型可以综合利用单一模型的所有信息,采用最小方差准则的方法确定权系数,使得预测曲线更加平滑,预测误差介于各单一模型误差之间,减少了使用单一模型带来较大预测误差的风险,适用于原始信息丰富的饱和负荷的预测。

枣庄市面积 $4\,564\text{ km}^2$,下辖5个市辖区,代管1个县级市,人口422.56万,2017年地区社会用电量为 $1\,352\,071 \times 10^4\text{ kW} \cdot \text{h}$,第一产业用电量为 $21\,905 \times 10^4\text{ kW} \cdot \text{h}$,第二产业用电量为 $936\,760 \times$

$10^4\text{ kW} \cdot \text{h}$,第三产业用电量为 $184\,435 \times 10^4\text{ kW} \cdot \text{h}$,全市社会用电量以第二产业为主。

滕州市作为全国百强县,人口众多,经济以轻工业、生产加工业、煤炭等相关产业为主,服务业等第三产业发展较为落后,在经济构成中占比不足四成,属于典型的工业化中后期产业结构。滕州市社会用电量的历史数据分析表明:滕州市一直占据枣庄市近半的社会用电量,滕州市历史社会用电量及其相关影响因素等参数稳定,滕州市产业结构成熟,电力消费会逐渐趋于饱和,使用灰色 Verhulst 模型进行负荷预测时,预测曲线更加符合滕州市社会用电量的变化趋势,预测精度相对于系统动力学模型也较

表 4 不同预测模型下的用电量比较

10⁴ kW · h

区域	模型	用电量				
		2014	2015	2016	2017	2018
市中区	模型 1	236 199	212 214	248 214	292 081	299 843
	模型 2	259 870	201 559	224 552	272 029	294 531
	组合模型	245 871	207 997	238 749	284 060	297 726
薛城区	模型 1	146 516	150 596	144 459	153 498	176 569
	模型 2	145 602	142 296	149 284	148 216	190 371
	组合模型	146 212	147 276	146 389	151 385	181 946
峰城区	模型 1	92 892	74 942	82 729	102 049	113 362
	模型 2	96 496	77 344	85 406	83 752	98 002
	组合模型	94 394	75 903	83 817	94 787	107 196
台儿庄区	模型 1	75 761	69 685	78 329	93 610	94 058
	模型 2	74 819	74 208	92 296	96 005	96 362
	组合模型	75 368	71 525	83 882	94 531	94 960
山亭区	模型 1	63 398	62 996	62 609	69 584	71 642
	模型 2	62 064	61 825	62 670	63 223	70 680
	组合模型	62 852	62 528	62 609	67 026	71 272
滕州市	模型 1	540 785	575 848	664 449	675 611	695 359
	模型 2	557 540	659 155	682 559	673 027	716 139
	组合模型	547 718	609 293	671 943	674 319	703 523
高新区	模型 1	27 768	31 429	33 036	36 715	37 302
	模型 2	27 210	29 088	35 955	40 611	41 004
	组合模型	27 556	30 487	34 203	38 289	38 799

表 5 不同预测方法下的预测精度比较

%

区域	模型	预测精度				
		2014	2015	2016	2017	2018
市中区	模型 1	−7.2	−4.4	4.9	10.7	1.6
	模型 2	2.1	−9.2	−5.1	3.1	−0.2
	组合模型	−3.4	−6.3	0.9	7.6	0.8
薛城区	模型 1	−3.9	1.6	1.8	1.7	−1.5
	模型 2	−4.5	−4.0	5.2	−1.8	6.2
	组合模型	−4.1	−0.64	3.2	0.3	1.5
峰城区	模型 1	−7.2	−6.4	−1.1	8.2	4.8
	模型 2	−3.6	−3.4	2.1	−11.2	−9.4
	组合模型	−5.7	−5.2	0.2	0.5	−0.9
台儿庄区	模型 1	−3.5	−9.1	−6.9	1.6	−6.1
	模型 2	−4.7	−3.2	9.7	4.2	−3.8
	组合模型	−4.0	−6.7	−0.3	2.6	−5.2
山亭区	模型 1	4.6	7.6	3.4	6.1	−3.2
	模型 2	2.4	5.6	3.5	−3.6	−4.5
	组合模型	3.7	6.8	3.4	2.2	−3.7
滕州市	模型 1	−3.4	−5.3	6.4	4.2	−3.5
	模型 2	−6.4	8.4	9.3	4.6	−6.3
	组合模型	−5.2	0.2	7.6	4.4	−5.2
高新区	模型 1	4.5	3.4	−3.8	−6.7	−5.3
	模型 2	2.4	−4.3	4.7	3.2	4.1
	组合模型	3.7	0.3	−0.4	−2.7	−1.5

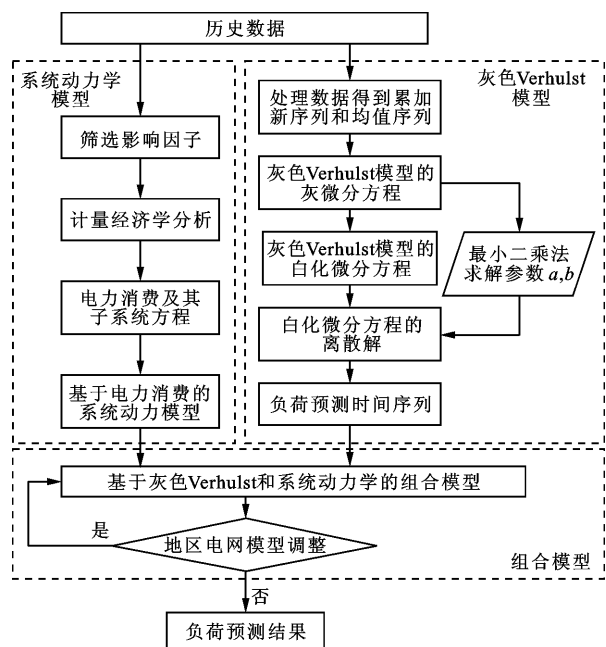


图4 基于组合模型的地区电网负荷预测流程

高,因此灰色 Verhulst 模型更适用于负荷近似按照 S 形曲线变化的地块的饱和负荷预测。

高新区始建于 1988 年,辖内人口仅 15 万,经济主要以高新技术等第三产业为主,经济发展增速较快,社会用电量占枣庄市比重最低,影响电力消费的因素具有较大的波动性,使用系统动力学进行建模分析时,能够综合考虑影响社会用电量的因素,将政策因素、人口流动、产业结构、技术进步等要素考虑在模型内,充分利用高新区的原始信息,紧密联系各个子系统,因此系统动力学更适用于影响社会用电量的因素有较大变动的地区负荷预测。

市中区经济发展较好,人口众多,产业结构稳定,主要以第二产业、第三产业为主,经济、人口、电力消费等历史数据变化较为平稳,在不增加复杂性的基础上,组合模型能综合利用单一模型的所有信息,得到较单一模型更高的预测精度,适用于参数变化较为平稳的饱和负荷的预测。

5 结 论

本文通过提出一种组合模型来对地区电网负荷进行预测,通过仿真软件 Vensim PLE 对实际算例进行了仿真,对不同模型的适用性进行了分析,得到如下结论。

(1)单一灰色 Verhulst 模型没有直接分析系统结构,而是通过对原始数据的累加得到负荷变化趋势,因为考虑的原始信息较少,所以预测精度可能难以满足实际需求,并且容易达到饱和状态。

(2)单一系统动力学模型通过模拟子系统的变化趋势来预测地区电网负荷,预测结果的总体变化趋势和实际负荷变化趋势一致,但是由于没有直接利用负荷历史数据,系统动力学模型中本身有很多待预测和逐年不断滚动修正的变量,所以预测精度往往有所偏差。

(3)组合模型在不增加复杂性的基础上,综合利用了单一模型的所有数据,丰富了模型信息,通过最小方差准则确定单一模型的权系数,使组合模型预测值残差的方差不大于任一单一模型预测值残差的方差,得到的负荷预测曲线更加平滑,减少了单一模型容易产生较大预测误差的风险,尽可能地提高了预测精度。

参考文献:

- [1] 牛东晓,曹树华,卢建昌. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009: 1-7.
- [2] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.
KANG Chongqing, XIA Qing, ZHANG Boming. Review of power system load forecasting and its development [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.
- [3] 李钜,李敏,刘涤尘. 基于改进回归法的电力负荷预测 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 99-104.
LI Po, LI Min, LIU Dichen. Power load forecasting based on improved regression [J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 99-104.
- [4] 石文清,吴开宇,王东旭,等. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的电力系统短期负荷预测 [J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(9): 9-12, 23.
SHI Wenqing, WU Kaiyu, WANG Dongxu, et al. Eclectic power system short-term load forecasting model based on time series analysis and Kalman filter algorithm [J]. Techniques of Automation and Applications, 2018, 37(9): 9-12, 23.
- [5] 朱继萍,戴君. 基于 BP 网的中长期负荷预测因素优化选择 [J]. 计算机工程, 2008, 34(18): 226-227, 230.
ZHU Jiping, DAI Jun. Optimization selection of correlative factors for medium and long term load forecasting based on BP network [J]. Computer Engineering, 2008, 34(18): 226-227, 230.
- [6] 李春祥,牛东晓,孟丽敏. 基于层次分析法和径向基函数神经网络的中长期负荷预测综合模型 [J]. 电网技术, 2009, 33(2): 99-104.

- LI Chunxiang, NIU Dongxiao, MENG Limin. A comprehensive model for long-and medium-term load forecasting based on analytic hierarchy process and radial basis function neural network [J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 99-104.
- [7] 张伏生, 刘芳, 赵文彬, 等. 灰色 Verhulst 模型在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27(5): 37-39, 81.
- ZHANG Fusheng, LIU Fang, ZHAO Wenbin, et al. Application of grey Verhulst model in middle and long term load forecasting [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 37-39, 81.
- [8] 邓聚龙. 灰色控制系统 [M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1985: 293-302, 343-348.
- [9] 龚赵慧, 林天祥. 基于灰色 Verhulst 和灰色马尔科夫的电力负荷预测组合模型 [J]. 电气技术, 2017(9): 35-39, 45.
- GONG Zhaohui, LIN Tianxiang. The combination model based on grey Verhulst and Markov theory [J]. Electrical Engineering, 2017(9): 35-39, 45.
- [10] 尚芳屹, 杨宗麟, 程浩忠, 等. 改进 Verhulst 模型在饱和负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 64-68.
- SHANG Fangyi, YANG Zonglin, CHENG Haozhong, et al. Application of improved Verhulst model in saturation load forecasting [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(1): 64-68.
- [11] 王翠茹, 孙辰军, 杨静, 等. 改进残差灰色预测模型在负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 86-89.
- WANG Cuiru, SUN Chenjun, YANG Jing, et al. Application of modified residual error gray prediction model in power load forecasting [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(1): 86-89.
- [12] 董军, 吴鸣. 我国居民电力消费影响因素的协整研究 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 185-187, 220.
- DONG Jun, WU Ming. Cointegration study of influencing factor of residential electricity consumption in China [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 185-187, 220.
- [13] NONNEMAN W, VANHOUDT P. A further augmentation of the Solow model and the empirics of economic growth for OECD countries [J]. The Quarterly Journal of Economics, 1996, 111(3): 943-953.
- [14] NERLOVE M, RAUT L K. Chapter 20 Growth models with endogenous population: a general framework [M]// Handbook of Population and Family Economics. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1997: 1117-1174.
- [15] 舒印彪. 加快再电气化进程 促进能源生产和消费革命 [J]. 国家电网, 2018(4): 38-39.
- [16] 郭扬, 李金叶. 我国新能源对化石能源的替代效应研究 [J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 762-770.
- GUO Yang, LI Jinye. The substitution effect on new energy research and fossil energy in China [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(5): 762-770.
- [17] 谭忠富, 张金良, 吴良器, 等. 中长期负荷预测的计量经济学与系统动力学组合模型 [J]. 电网技术, 2011, 35(1): 186-190.
- TAN Zhongfu, ZHANG Jinliang, WU Liangqi, et al. A model integrating econometric approach with system dynamics for long-term load forecasting [J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 186-190.
- [18] 王其藩. 系统动力学 [M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009: 11-35.

(编辑 陶晴)