

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.04.012

含主动负荷的综合电力负荷建模研究综述与展望

鞠平¹,郭德正¹,曹路²,金宇清¹,汪震³,陈谦¹,吴浩³

(1.河海大学能源与电气学院,江苏南京 211100;
2.国家电网公司华东分部,上海 200120; 3.浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027)

摘要: 总结当前电力负荷建模的研究进展,根据负荷建模所面临的新形势,提出含主动负荷的广义综合电力负荷建模问题的研究框架,并详细论述研究方案,重点解决主动负荷模型结构的准确性与简洁性相协调、主动负荷模型参数的时变性与鲁棒性相协调这2个关键难题,为建立准确描述主动负荷电气特性的广义综合电力负荷模型指明一条可行的技术路线。
关键词: 电力系统; 电力负荷; 负荷建模; 主动负荷; 统计综合法; 总体测辨法; 综述
中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)04-0367-10

Review and prospect of modeling on generalized synthesis electric load containing active loads

JU Ping¹, GUO Dezheng¹, CAO Lu², JIN Yuqing¹, WANG Zhen³, CHEN Qian¹, WU Hao³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. East China Grid Corporation, Shanghai 200120, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This study reviewed the current research progress of load modeling and pointed out the new circumstances faced by the load modeling. Then, this study put forward a research framework for the generalized synthesis electric load modeling containing active loads and discussed the research scheme in detail. The proposed research framework focuses on solving two key scientific problems, one of which is the coordination of the accuracy and conciseness for the model structure of active loads, and another is the coordination of the time variation and robustness for the parameters of load model. Thus, this study indicates a feasible technical route for building an accurate generalized synthesis electric load model considering the electrical characteristics of active loads.
Key words: power system; electric load; load modeling; active loads; statistical synthesis method; overall identification method; review

大电网运行控制策略的制定主要依赖于仿真计算,而仿真计算的精度取决于所用模型。大电网由发电、输电和负荷组成,负荷模型不准将使整体仿真计算结果冒进或保守。冒进会显著降低电网预防风险的能力而导致停电,危及电网乃至公共安全;保守则难以准确计算电网功率输送极限而导致电力输送受限^[1]。因此,负荷建模研究是电力系统运行与控制中的基础性问题,既具有重要的理论意义,又具有显著的实用价值。本文首先总结负荷建模的研究现状,包括模型结构、参数确定以及工程应用等方面的进展;然后分析近年来负荷构成的新变化,以及负荷建模的新需求和新机遇,指出近年来电力负荷逐渐表现出的“主动性”是未来负荷建模的重点和难点;最后,对含主动负荷的综合负荷建模工作进行展望,提出研究框架和具体的研究方案。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51837004);国家电网有限公司总部科技项目:含高比例电力电子化设备的负荷建模技术及应用研究(XTB17201900064);高等学校学科创新引智计划(B14022)
作者简介: 鞠平(1962—),男,教授,博士,主要从事新能源电力系统建模与控制研究。E-mail: pju@hhu.edu.cn
引用本文: 鞠平,郭德正,曹路,等. 含主动负荷的综合电力负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):367-376.
JU Ping, GUO Dezheng, CAO Lu, et al. Review and prospect of modeling on generalized synthesis electric load containing active loads [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020,48(4):367-376.

1 电力负荷建模研究现状

1.1 负荷模型结构

在负荷模型的结构方面,主要有静态模型、经典负荷模型和综合负荷模型^[1-3],以及一些非机理模型^[2-3]。静态模型结构如图1(a)所示,由恒定阻抗(Z)、恒定电流(I)和恒定功率(P)负荷成分并联组成,也称为ZIP模型。ZIP模型描述电压或频率缓慢变化时的负荷特性,模型为代数方程。经典负荷模型结构如图1(b)所示,简称为CLM(classic load model),它由感应电动机(M)和ZIP并联组成。CLM描述电压或频率较快变化时的负荷特性,模型由微分方程和代数方程组成。CLM一般采用电动机(M)并联恒定阻抗(Z)的模型结构,其中感应电动机的定子阻抗应包含感应电动机自身的定子阻抗与配电网的等效阻抗。综合负荷模型结构如图1(c)所示,简称为SLM(synthesis load model),它由ZIP、M、补偿电容器(C)、配电网等效阻抗(R_D+jX_D)和同步发电机(G)组成。SLM描述电压或频率较快变化、直接计及配电网和小电源(采用同步发电机的电源,并非指分布式发电)影响时的负荷特性,模型由微分方程和代数方程组成。图1中的 $\dot{U}$ 是实际110 kV母线的电压, $P+jQ$ 是110 kV母线上的功率,图1(c)中 $\dot{U}_L$ 是虚拟负荷母线的电压, P_L+jQ_L 是虚拟负荷母线上的功率。

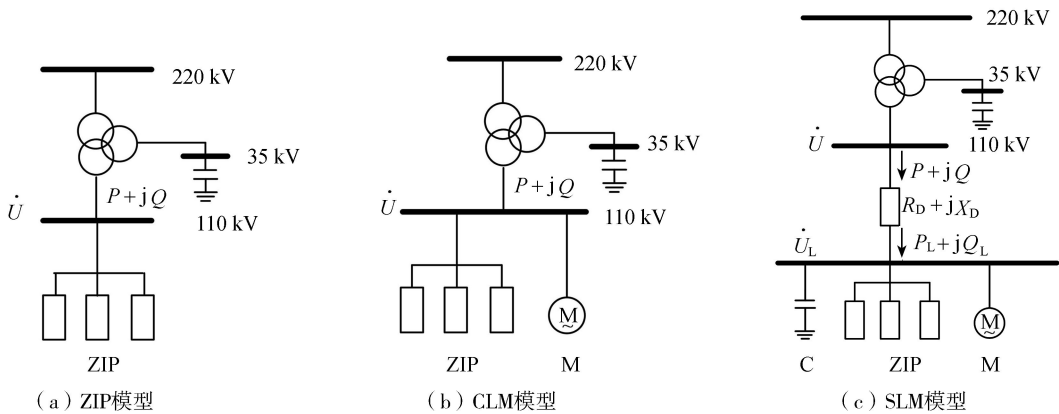


图1 不同负荷模型的结构示意图

Fig.1 Structures of different load models

上述3种模型主要适用于常规负荷、常规情况,对于特殊负荷、特殊情况,有学者提出了其他的负荷模型结构,其大多数属于非机理的输入-输出模型,比如人工神经网络模型、动静综合模型、离散动态模型等。人工神经网络模型通常没有物理意义,由一组按权值互连的处理单元组成,通过使用一系列输入和输出模式对其进行训练,进而与观察到的系统行为进行匹配,从而得到确定负荷模型的连接权重的最终值^[4]。国外使用的美国WECC改进负荷模型与SLM具有相似的结构,主要差别在于等效感应电动机的数量。SLM模型中仅有1台等效感应电动机,而WECC改进模型中可有多台参数不同的感应电动机,其本意是表征类型各异的电动机,但带来的问题是参数过多、难以唯一辨识。文献[5]提出一种风电机组简化模型与传统负荷并联的广义负荷模型结构,但该模型采用的配电网结构较为简单。文献[6]提出一种“Π型综合负荷模型”,在SLM的基础上,用实际变压器模拟配电网影响,并用Π型电路等效,该模型在自描述能力、泛化能力等性能上有一定程度的提高,在反映电网调压、维持负荷母线电压稳定的能力及在不同电压水平下对负荷动态行为的拟合能力等方面具有显著的优势。目前,我国电网推荐使用的负荷模型结构是SLM。

1.2 负荷模型参数

在负荷模型参数的确定方法上,目前主要有统计综合法、总体测辨法和故障仿真法^[2,7-8]。统计综合法根据负荷统计数据进行综合来获得负荷参数,其流程如图2(a)所示,基本步骤包括:(a)将用户的电器分类,并确定各种类型电器的平均特性;(b)进行负荷调查,统计出各类电器所占的比重;(c)按照电压等级由低到高逐级综合,最终得到总体的负荷模型。总体测辨法根据实测数据进行辨识来获得负荷参数,其流程如图2(b)所示,基本步骤包括:(a)从现场采集测量数据^[9-10],并对数据进行滤噪等预处理;(b)选择负荷模型的结构与方程;(c)根据现场采集的数据辨识出负荷模型中的参数^[11-12];(d)根据多组数据重复(a)~(c)步

获得多组参数后,进行参数综合。故障仿真法则是利用电网中发生大扰动时的动态数据,通过故障仿真进行负荷模型校核与修正,其流程如图 2(c)所示,基本步骤包括:(a)确定除负荷模型外的其他模型参数;(b)采用当前负荷模型参数,仿真实际系统事故;(c)将仿真输出曲线与实际曲线进行对比,分析误差;(d)如果输出误差较大,通过参数灵敏度分析,对重点参数进行适当修正;(e)重复(c)(d)2 个步骤,直到仿真输出能够拟合实际曲线。

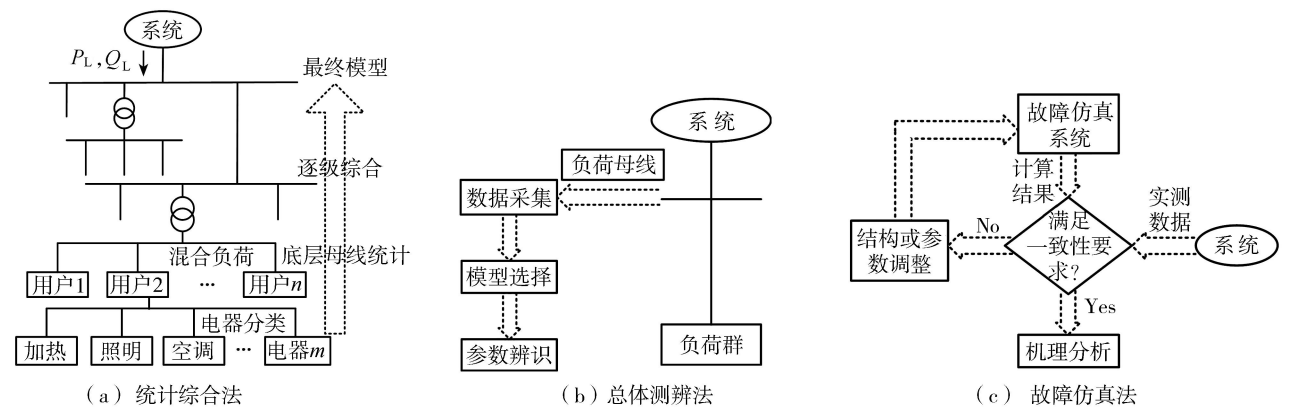


图 2 不同建模方法流程示意图

Fig. 2 Flow diagrams of different modeling methods

总体测辨法和故障仿真法目前主要依靠优化算法实现参数辨识,优化的目标是实测的动态响应与模型输出之间的误差。为适应负荷模型的非线性并避免寻优结果陷入局部最优,各种现代优化算法替代了基于线性系统理论发展起来的最小二乘法^[2]、卡尔曼滤波法^[2],以及如步长加速法^[13]、拟牛顿法^[14]等梯度类优化方法。目前,遗传算法、粒子群算法、克隆选择算法^[15]、人工神经网络^[11]等现代优化方法应用较多。

1.3 负荷建模实践

在负荷建模的工程应用方面,由于以往统计综合法主要依靠人工调查,效率极低且覆盖面小,因此实际的工程应用相当有限。此外,传统统计综合法只能掌握负荷的额定容量,而不能掌握不同时刻负荷的实际功率,在应对负荷模型的时变性上存在明显的局限^[16]。目前,主要依靠总体测辨法建立“分时分类”的负荷模型,对于电网中众多的负荷节点,常规的建模方式是首先根据负荷节点的日负荷曲线对其进行分类^[17-18],然后在每一类负荷节点中选取典型节点进行参数测辨,再将典型节点的实测参数推广应用于同类负荷节点,最后通过一定的数据积累获得分类分时的负荷模型参数^[8]。总体测辨法不需要掌握节点下负荷的具体构成,其建立的是负荷节点的整体外特性模型;但受建模数据来源所限,总体测辨法只能在电网发生扰动的时刻进行参数辨识,因此其在应对负荷时变性方面灵活性不够。此外,负荷随时间变化的特性最终会反映在负荷模型的参数上,包括各负荷构成的比例和各负荷构成的参数。目前为应对负荷的时变性,采取的办法通常是先对负荷在不同时刻的动态响应进行聚类^[18],然后采取多曲线拟合参数辨识的方法获得适用于多个时刻的负荷模型参数。但受建模数据来源所限,无论是针对单一时刻的总体测辨法,还是针对多时刻多曲线拟合的总体测辨法,都只能得到电网发生扰动时刻的负荷模型参数,因此在应对负荷时变性方面灵活性不够。故障仿真法主要用于模型的校核。由于目前的负荷建模工作主要是立足于输电网在 220 kV 节点上通过总体测辨法建立负荷的整体外特性模型,其只需要有负荷节点在电网扰动下的动态响应数据即可开展建模工作,因而广域测量系统(WAMS)和故障信息系统(FRMS)的数据最为常用^[19]。EMS 中的日负荷数据通常用来进行负荷节点分类。目前建立的各种负荷建模系统普遍基于 WAMS 或 FRMS,部分负荷建模系统已作为一个功能模块嵌入了 D5000 系统。

总的来说,现有的负荷建模研究已经取得了大量的成果,尤其是 SLM 负荷模型结构及总体测辨法的推广应用对提高电网仿真精度已经发挥了重要的作用。

2 电力负荷建模的研究需求

2.1 负荷构成的新变化

近年来,负荷发生了一系列变化,主要表现在:(a)负荷复杂性提高。越来越多的用电设备采用电力电

子技术接入电网。比如,照明负荷中 LED 灯日益增多,工业和民用电机拖动设备采用变频器接入电网越来越多^[20-21],使负荷特性发生明显变化而且更加复杂。(b) 负荷波动性提高。出于能源与环保的需求,分布式电源与储能接入电网是大势所趋^[22-23],这改变了原有负荷单纯汲取功率的特点,而是既可以汲取也可以倒供,也就是说功率流由单向变为双向。与此同时,电动汽车的普及也将很大程度上改变负荷的时空分布特性^[24-25]。这些新的负荷成分将大幅度提高负荷的波动性。(c) 负荷可控性提高。负荷的主动控制能力,一方面是由于其自身具有越来越强的控制能力,另一方面是电力系统对负荷的调控能力越来越强,比如不少电网建设快速精准的负控系统^[26-27]。(d) 负荷敏感性提高。近年来随着社会用电行为的变化以及极端气候条件的出现,负荷也出现了异常增长。比如,上海、苏州等城市中心电网的空调负荷占比高达 40% 以上,2017 年苏州夏季的最大负荷功率与预计相差了 100 万 kW。也就是说,负荷对气候的敏感性有了显著提高。上述变化导致负荷建模比以往难上加难。

近年来,出现了“主动负荷”和“柔性负荷”概念,目前虽然还没有统一的定义,但在以往的文献中两者含义实际上是类似的,一般是指用电量可以在指定区间内变化或在不同时段间转移的负荷,包含具备需求弹性的可调节负荷或可转移负荷、具备双向调节能力的电动汽车、储能、蓄能以及分布式电源、微网等。以往的研究基本上都是针对准稳态调度的功率特性层面,而本文主要针对秒级动态分析的电气特性层面,从这个角度来看:所谓“被动”是指负荷功率仅随着电网电压和频率的变化而变化($S(U,f)$);所谓“主动”是指负荷功率不仅随着电压和频率的变化而变化,而且通过控制 C 而自主变化($S(U,f,C)$)。这里的控制 C 分为 2 种:一种是内部控制,比如电力电子并网设备的低电压保护,导致负荷特性可能是 U 和 f 的分段函数;另一种是外部控制,比如分布式光伏和空调等气候敏感负荷受光照和温度等外部因素的影响,导致负荷模型参数成为慢变的受控变量。

2.2 负荷建模的新需求

受端电网的直流落点增多、容量增大,而且大城市电网由于逐步迁移火电站而面临空心化局面。一系列直流事故仿真结果与实际情况不符,更加凸显了负荷模型的重要影响。由于受端电网内部结构紧密,功角稳定已经不是主要问题,而直流故障导致的暂态电压稳定和频率稳定问题成为关注的焦点。不同负荷模型直接影响仿真结果中直流换相失败的范围、连续换相失败的次数,对电网安全稳定分析和决策产生很大影响。以前负荷模型注重于与功角稳定相关的有功与电压特性,而暂态电压稳定对负荷的无功特性比较敏感^[28],频率稳定对负荷的频率特性比较敏感^[29]。所以,负荷模型的无功特性和频率特性需要得到重点研究。

2.3 负荷建模的新机遇

随着计算机和测量技术的迅速发展,计算机的容量和速度不断提高,负荷相关的数据日益丰富甚至可以说进入负荷大数据时期^[30],这包括能量管理系统(EMS)、调度管理系统(OMS)、生产管理系统(PMS)、配电管理系统(DMS)、用电信息采集系统(AMI)、广域测量系统(WAMS)^[9-10]、地理信息系统(GIS)、气象预报系统(WFS)等。与此同时,人工智能技术(AI)突飞猛进、如火如荼,而负荷建模的复杂性和负荷大数据非常适合于 AI 技术^[31-32]。

综上所述,面对负荷设备电力电子化的趋势,相关研究并未及时跟上,现有的 SLM 负荷模型已不能很好适应负荷设备电力电子化的趋势,亟需修正。而现有的负荷参数获取方法难以适应负荷时变性的问题也阻碍了负荷模型准确性和实用化的进一步提升,亟待改进。针对含主动负荷的综合负荷,基于负荷大数据、借助 AI 技术,建立新的综合负荷模型,尤其是无功特性和频率特性模型,是一个亟待解决的问题。

3 主动负荷建模的研究展望

3.1 主动负荷建模研究的难点

随着主动负荷成分的接入,如果在现有综合负荷模型中不断增加相应的元件模型(比如光伏发电、变频空调、电动汽车、储能等等),将会导致负荷模型过于复杂,而大电网仿真计算需要既能够反映综合负荷物理本质、又能够适应简洁低阶需要的模型。如何获得准确性与简洁性相协调的主动负荷模型结构、保证主动负荷模型定性正确,是主动负荷建模的一个难点。

此外,由于实际主动负荷的构成和功率随时随地都在变化,如果采用同一套模型参数以不变应万变显然违背实际,但如果采用成千上万套参数又将给大电网仿真计算带来很大困难。如何获得时变性与鲁棒性相

协调的主动负荷模型参数、保证主动负荷模型定量准确,是主动负荷建模的另一个难点。

3.2 主动负荷建模的总体框架

为解决上述主动负荷建模研究的 2 个难点,并实现建立含主动负荷的综合负荷模型的目标,本文提出了如图 3 所示的研究框架。在该研究框架下,首先对主动负荷进行机理研究,建立其详细模型并研究模型降阶方案;然后,研究含主动负荷的综合负荷模型的结构,需要注意与目前广泛使用的 SLM 模型的衔接;最后,在充分利用负荷大数据和相关 AI 技术的基础上,综合利用在线统计综合法和在线总体测辨法获得主动负荷模型的参数。

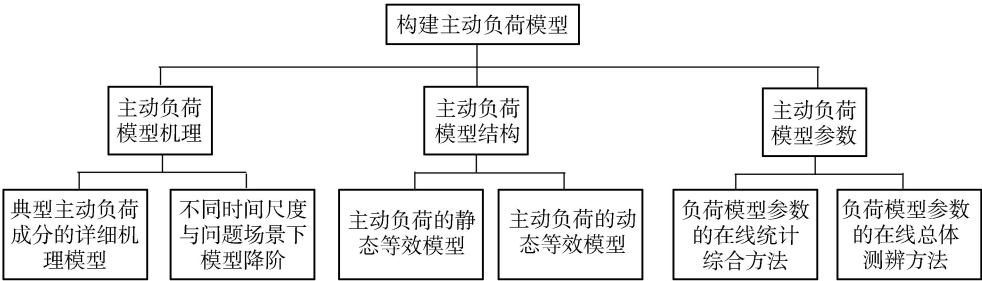


图 3 含主动负荷的综合负荷建模研究框架

Fig.3 Modeling framework of synthesis load containing active loads

3.3 主动负荷建模的研究内容

3.3.1 主动负荷模型的机理研究

通过对主动负荷成分的机理分析及模型降阶研究,一方面可以在众多新型主动负荷中有针对性地挑选出典型的建模对象,另一方面可深入了解不同时间尺度与应用场景二维角度下的建模需求。针对主动负荷成分的研究步骤如下:

首先,对大量通过电力电子接口接入的负荷设备类型进行机理分析梳理,在此基础上按照特性、容量、电压等级等指标进行初步的归并。

其次,针对上述归并后的建模对象,选取典型的设备,再依据其工作原理,构建典型的详细模型。详细模型是一种混合模型,既包含电力电子元件,也包含电动机等旋转机械元件。对典型设备详细模型进行电磁时间尺度下的数字仿真,从而得到不同端口电压/频率扰动下的功率响应曲线。

最后,在大量仿真及实验数据的基础上,对主动负荷的特性进行研究与归纳。根据不同时间尺度和应用场景的需求组合,在保留主要机理过程的前提下对典型负荷进行降阶处理。

3.3.2 主动负荷等效模型的结构研究

鉴于实际负荷总是由主动负荷与被动负荷混合构成,主动负荷模型结构可参考目前广泛应用的 SLM。但明显不同的是新型模型结构中如何考虑主动负荷的主动性,如何考虑分布式新能源、储能等新元件。根据典型负荷设备的机理分析,虽然在主动负荷的总体机理结构中具体的用电设备多种多样,但仍可分为两大类:电机类设备(具有明显的机电惯性与动态过程)和静止类设备(无机电惯性,如开关电源、灯具等)。

考虑主动负荷成分以后,可以将主动负荷的静态部分与传统负荷的静态部分进行聚合,形成等效静态负荷。初始状态下的静态负荷模型合并为幂函数模型,可降低静态模型的复杂程度。此处所述的“主动负荷的静态部分”是指那些在工作原理上虽然包含内部控制,但是在电气外特性上依然可以用传统的静态负荷模型来表示的用电设备。这类“主动负荷中的静态部分”就可以与传统负荷的静态部分进行聚合。将主动负荷的动态部分与传统负荷的动态部分进行聚合,形成等效动态负荷。而各种机电旋转设备用统一异步电机模型表示,可表达同步机、异步机与发电机、电动机的各种组合,同样降低了动态模型的复杂程度。最终,总体的等效模型可表示为图 4 所示的结构,可称之为广义综合负荷模型(GSLM)。图中 G 代表等效分布式光伏电源。另外,考

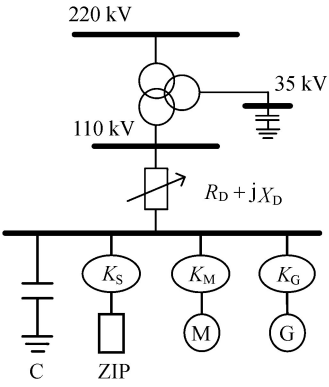


图 4 考虑主动负荷的模型结构

Fig.4 Load model structure considering active loads

考虑到配电网中其他传输、补偿设备的主动控制作用, $R_D + jX_D$ 也可以在一定范围内变化。其中, K 为接口模型 (K_S 、 K_M 、 K_G 分别表示等效静态负荷的接口模型、等效动态负荷的接口模型、等效分布式光伏电源的接口模型)。图 5(a) 给出了电力电子接口设备的原理图, 其中 U 和 f 是电网的电压和频率, P 和 Q 是负荷的有功功率和无功功率; 图 5(b) 给出了等效的接口模型, 其表达主动负荷部分受控于条件 C , 其中 ρ 表示受控于条件 C 的负荷比例, C_0 是条件 C 的稳态值。

3.3.3 主动负荷模型的参数研究

主动负荷模型的参数具有一定的时变性, 为了建立更准确的负荷模型, 需要长期不间断地进行模型参数的监测与修正。随着数据源、通信条件、人工智能等技术的发展, 采用在线的方式进行负荷模型参数的监测修正工作十分必要, 且当前已经具备了实施的条件。数据源方面, 随着电力信息化的推进和智能变电站、智能电表以及泛在电力物联网等一大批信息管理系统的应用, 电力系统积累了大量的历史、实时数据, 为负荷建模提供了数据基础。通信条件方面, 电力部门持之以恒地建设了高质量的通信网络, 可以满足现有的负荷建模数据在线传输的需求, 并且已经开展了相应的数据整合工作, 方便了建模数据的提取。建模方法方面, 以深度学习为代表的人工智能技术取得了突破性的进展, 为新的负荷建模技术提供了技术手段。

主动负荷的在线整体建模流程如图 6 所示。该建模流程首先采用人工智能技术对负荷节点进行分类, 并确定各类负荷节点中的典型电站; 然后, 采用基于人工智能技术的在线统计综合方法获得不同时段负荷成分占比, 进而得到分时段的负荷模型; 接着, 采用在线总体测辨方法, 在有实测电网扰动的时刻, 校核由在线统计综合法得到的该时段负荷模型中的关键参数; 最后, 将经过校核的关键参数推广应用到同类负荷节点不同时段模型中去, 最终得到分类型、分时段的负荷模型数据库。总的来说, 该建模流程在应对负荷时变性上采用的策略是通过时变的负荷成分占比和不变的各负荷成分关键参数来建立负荷的分时段模型。

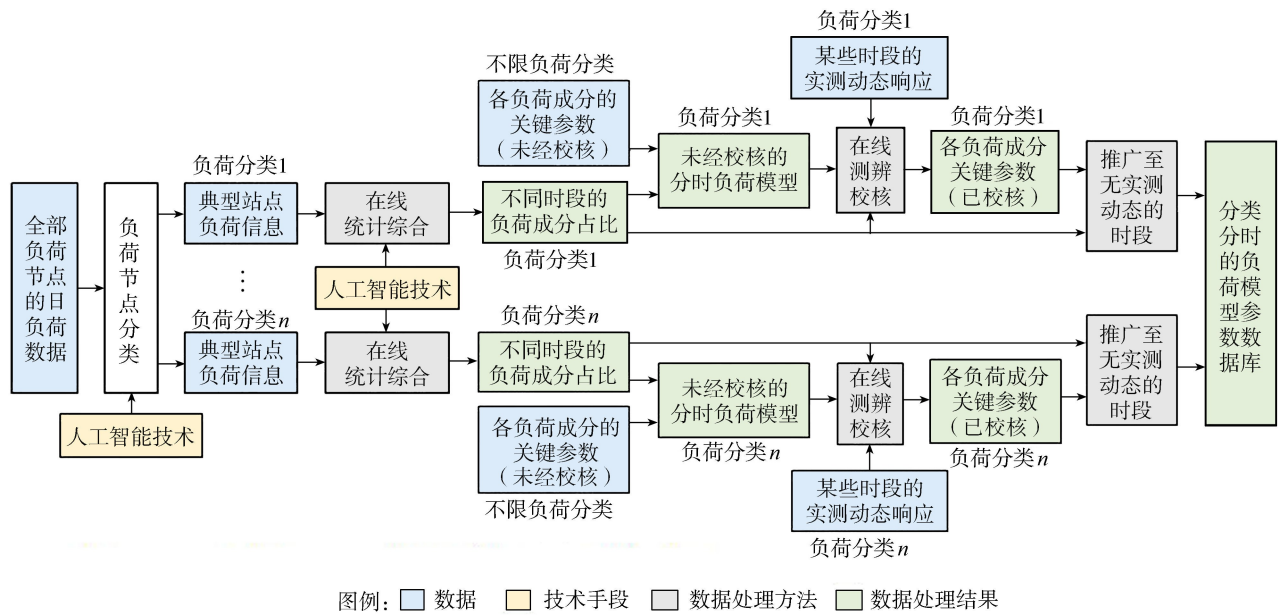


图 5 考虑主动负荷的模型接口

Fig. 5 Model interface considering active loads

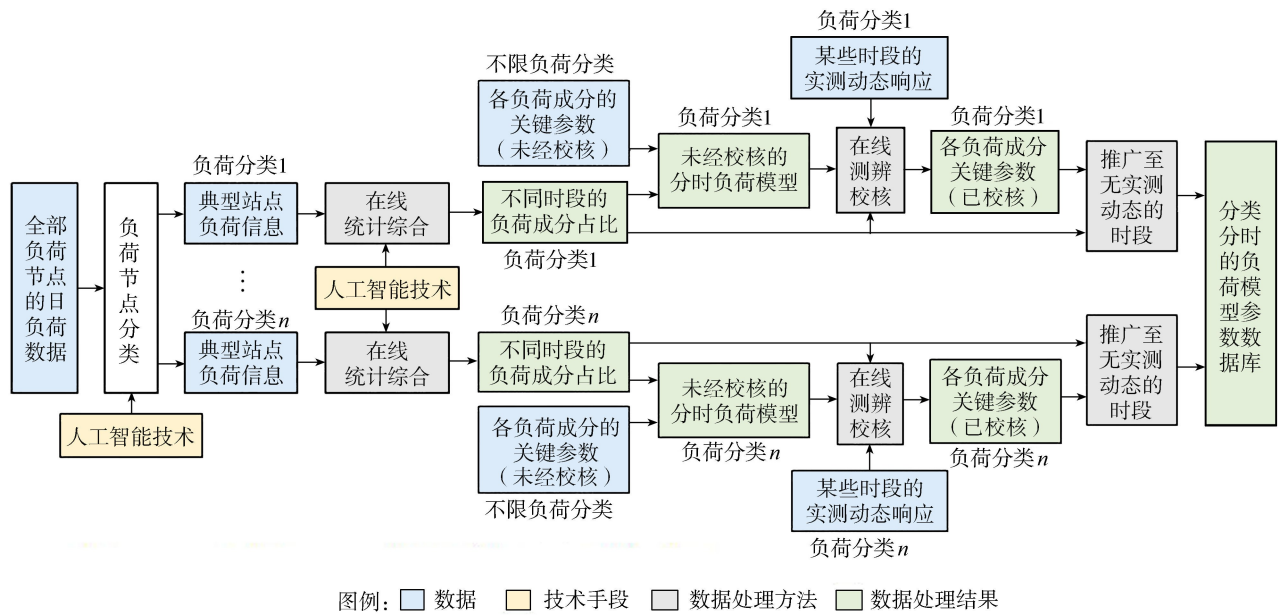


图 6 在线整体建模流程

Fig. 6 Flow chart of on-line holistic modeling

3.3.3.1 基于人工智能技术的负荷节点分类

对于电网中数量众多的负荷节点, 很难对每一个节点都进行统计综合, 也很难对每一个节点都安装测量

装置。目前最可行的方法就是先将所有的负荷节点分类,然后在每一类负荷节点中选择典型节点并获取其模型参数,最后将参数推广至全部同类负荷节点。其中,负荷节点分类的准确性相当重要。在以往的负荷节点分类方法中,通常先人为地将电力负荷划分为工业、农业、商业、城乡居民等若干类,再根据负荷节点的日负荷数据求解各类负荷的比例,最后根据各类负荷占比情况进行负荷节点聚类。这种电力负荷类别的划分具有典型的经验特征,虽有现实背景,但难以完全适应电力负荷的复杂性。分类是人工智能数据处理技术的一个典型应用,且基本不需要对数据进行大规模预处理,可以根据数据自身的特征直接进行分类。引入人工智能技术有望简化负荷节点分类的数据处理工作以提高效率,又可以避免不完善的人为经验对分类过程的负面影响,从而有望提高负荷节点分类的准确性。

基于人工智能技术的负荷节点分类包含负荷构成的特征识别与提取、基于负荷构成特征的负荷站点分类 2 个步骤,分别如图 7(a) 和图 7(b) 所示。此处的负荷构成特征并不是指某个负荷节点下各种负荷成分各占多少比重,而是指由于负荷成分不同而导致负荷节点功率变化特性上的差异。采用机器学习算法识别负荷节点的功率变化特征,确定能够充分表征负荷构成特征的向量维数;最终,从各负荷节点的多条功率曲线中提取出反映功率变化性质的特征向量。根据各节点的负荷构成特征,采用适当的聚类算法对负荷节点进行分类,目标是在确保分类准确性的基础上尽可能减少分类数量。若各节点的负荷构成特征较为复杂,也不排除需要在不同时间段上进行更精细分类的可能性,若如此则负荷节点的分类结果也将是时变的。

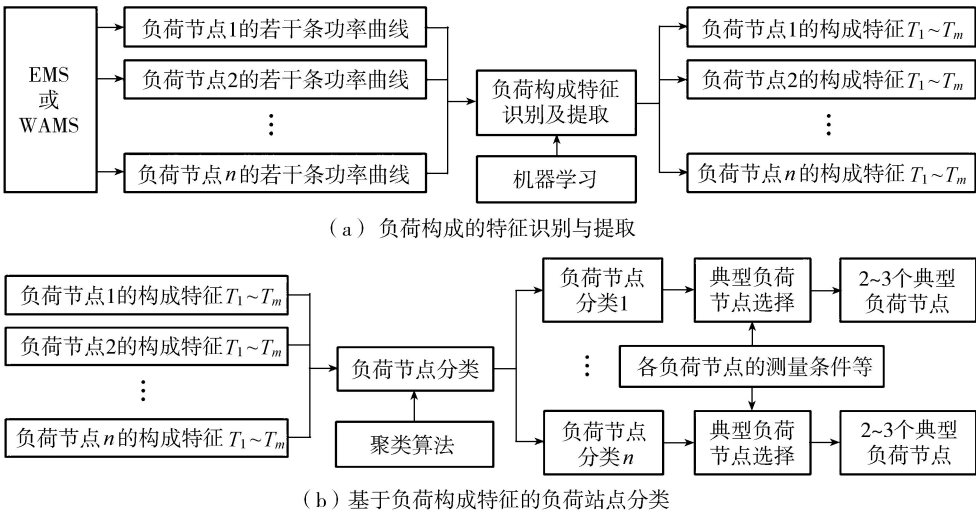


图 7 基于人工智能技术的负荷节点分类流程

Fig. 7 Flow chart of load node classification based on AI technology

3.3.3.2 主动负荷模型参数的在线统计综合方法

主动负荷的 AI 辅助在线统计综合方法如图 8 所示。首先,针对用户负荷进行类型判别,包括设备构成、容量信息、用电习惯等,重点关注电动汽车、空调、储能、分布式光伏等主动负荷。

其次,根据测量设备和通信条件,在线收集用户负荷设备群(包括工业负荷专线、楼宇专变等)的功率、电压、频率等在线信息。

随后,根据不同场景下海量的负荷构成和功率实测数据,采用人工智能方法识别负荷功率特征与电气参数之间的对应关系。

最后,根据不同仿真应用场景的需求,由功率数据经过在线统计综合得到所对应的仿真计算模型,并存入相应的参数数据库。

3.3.3.3 主动负荷模型参数的在线总体测辨方法

主动负荷的 AI 辅助在线总体测辨方法如图 9 所示。

首先,在线采集相量测量装置(PMU)、故障录波器等测量设备的录波数据。由于考虑到负荷的主动性,

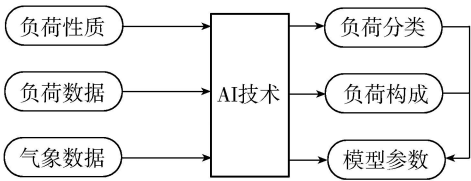


图 8 在线统计综合方法示意图
Fig. 8 Schematic diagram of on-line statistical synthesis method

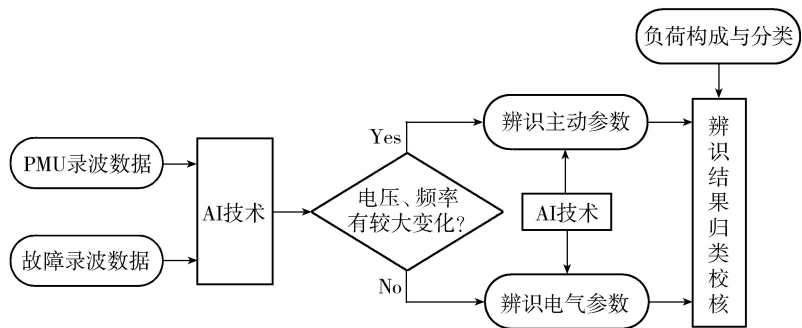


图9 在线总体测辨方法示意图

Fig.9 Schematic diagram of on-line overall identification method

因此在电网电压、频率不发生明显波动的情况下,负荷功率仍会有波动。这些波动数据可以用于负荷模型中与主动性相关的参数辨识,与传统总体测辨法相比,可利用的数据要多得多。

其次,采用人工智能方法对收集的数据进行处理,把可利用的数据进行整理归类。
随后,判断录波数据对应的电压和频率波动范围,如果较小则用于主动性参数辨识,如果较大则用于总体辨识。

最后,根据负荷节点的分类信息,进行参数辨识结果的归纳整理,并与在线统计综合法的结论进行分析综合。

3.4 主动负荷模型的验证

负荷模型有效性的验证宜在实验室环境中进行。首先,在之前针对典型主动负荷设备进行实验室动模实验的基础上,搭建综合负荷系统;其次,按照不同比例的主动负荷,再结合一定比例的传统负荷,进行各种稳态和动态试验;最后,根据实验结果,验证广义综合负荷模型的有效性。

负荷模型适用性的验证应针对实际的电力负荷来开展。首先,在示范区域内按照负荷的分布情况选择测试点,并接入固定或可移动的量测设备;其次,进行专门的稳态和动态试验,或者基于自然扰动下的实测数据,验证主动负荷模型的适用性。

4 结 语

负荷建模研究是电力系统运行与控制中的基础性问题,既具有重要的理论意义,又具有显著的实用价值。本文首先总结当前负荷建模理论研究和工程实践方面的现状,然后梳理近年来负荷成分发生的新变化,并指出负荷建模的新挑战和新机遇。针对用电设备电力电子化趋势下负荷主动性显著提高的特点,提出了含主动负荷的广义综合负荷建模问题的研究框架,对其中具体的研究方案进行研讨,为主动负荷建模研究指明了技术路线。针对负荷的时变性问题,提出了一种综合应用在线统计综合法和总体测辨法的具体解决方案。

参考文献:

[1] 汤涌,张红斌,侯俊贤,等. 考虑配电网络的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38. (TANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. A synthesis load model with distribution network [J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 34-38. (in Chinese))

[2] 鞠平,马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[3] 汤涌. 电力负荷的数学模型与建模技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[4] ARIF A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Load modeling:a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5986-5999.

[5] 潘学萍,冯徐徐,鞠平,等. 含直驱永磁风电场的配电网广义负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 62-68. (PAN Xueping, FENG Xuxu, JU Ping, et al. Generalized load modeling of distribution network integrated with direct-drive permanent-magnet wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 62-68. (in Chinese))

[6] 屈星,李欣然,宋军英,等. 考虑配电网调压的综合负荷模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 759-770. (QU Xing, LI

- Xinran, SONG Junying, et al. Composite load model considering voltage regulation of distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 759-770. (in Chinese))
- [7] ZHANG Kaiqing, ZHU Hao, GUO Siming. Dependency analysis and improved parameter estimation for dynamic composite load modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3287-3297.
- [8] 谢会玲,鞠平,陈谦,等. 广域电力系统负荷整体建模方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 1-5. (XIE Huiling, JU Ping, CHEN Qian, et al. Electric load modeling for wide area power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 1-5. (in Chinese))
- [9] 程云峰,张欣然,陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153. (CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153. (in Chinese))
- [10] GE Yinyin, FLUECK A J, KIM D, et al. An event-oriented method for online load modeling based on synchrophasor data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 2060-2068.
- [11] 李娟,丁坚勇. 电力系统负荷建模和算法的研究及进展[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2209-2215. (LI Juan, DING Jianyong. Power system load modeling and parameter identification algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2209-2215. (in Chinese))
- [12] 鞠平,张正利,潘学萍,等. 参数可观测性分析及其在电力负荷模型中的应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 32-37. (JU Ping, ZHANG Zhengli, PAN Xueping, et al. Parameter observability analysis and its application to power load model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 32-37. (in Chinese))
- [13] 姜杰,王学斌,殷家敏,等. 基于感应电动机复数简化模型的参数辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 87-92. (JIANG Jie, WANG Xuebin, YIN Jiamin, et al. Research on identification of induction motor based on its simplified complex quantity models[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 87-92. (in Chinese))
- [14] 王建,陈颖,沈沉. 基于逆 Broyden 拟牛顿法的分布式暂态稳定仿真算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 7-12. (WANG Jian, CHEN Ying, SHEN Chen. A distributed dynamic simulation algorithm for power systems based on inverse Broyden quasi Newton method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 7-12. (in Chinese))
- [15] 徐玉琴,李雪冬. 基于改进免疫克隆选择算法的含分布式电源配电网规划方法[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 97-101. (XU Yuqin, LI Xuedong. An improved immune clonal selection algorithm based planning method for distribution network with distributed generators[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 97-101. (in Chinese))
- [16] 陈谦,黄文英,李成,等. 电力负荷建模的在线统计综合法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 8-10. (CHEN Qian, HUANG Wenying, LI Cheng, et al. Component based on-line modeling for electric loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 8-10. (in Chinese))
- [17] 鞠平,陈谦,熊传平,等. 基于日负荷曲线的负荷分类和综合建模[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 6-9. (JU Ping, CHEN Qian, XIONG Chuanping, et al. Load clustering and synthetic modeling based on daily load curves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 6-9. (in Chinese))
- [18] 李培强,李欣然,陈辉华,等. 基于模糊聚类的电力负荷特性的分类与综合[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 73-78. (LI Peiqiang, LI Xinran, CHEN Huihua, et al. The characteristics classification and synthesis of power load based on fuzzy clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 73-78. (in Chinese))
- [19] 鞠平,谢会玲,陈谦. 电力负荷建模研究的发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 1-4. (JU Ping, XIE Huiling, CHEN Qian. Research tendencies of electric load modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 1-4. (in Chinese))
- [20] ZADEH M K, GAVAGSAZ-GHOACHANI R, MARTIN J, et al. Discrete-time modeling, stability analysis, and active stabilization of DC distribution systems with multiple constant power loads[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4888-4898.
- [21] 张琪祁,欧阳帆,郭强,等. 定速和变频家用空调的特性差异及其对电网的影响研究[J]. 华东电力, 2014, 42(10): 2017-2021. (ZHANG Qiqi, OUYANG Fan, GUO Qiang, et al. Load characteristic comparison between inverter and constant-speed air conditioner and their influences on power grid[J]. 华东电力, 2014, 42(10): 2017-2021. (in Chinese))
- [22] 金小明,门锟,李勇,等. 单一综合负荷模型等效负荷群的适用性[J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 96-102. (JIN Xiaoming, MEN Kun, LI Yong, et al. Feasibility of a single composite load model representing composite loads in an area[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(4): 96-102. (in Chinese))
- [23] HU Junjie, YANG Guangya, KOK K, et al. Transactive control: a framework for operating power systems characterized by high

penetration of distributed energy resources[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 451-464.

[24] HU Junjie, YANG Guangya, BINDNER H W, et al. Application of network-constrained transactive control to electric vehicle charging for secure grid operation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 505-515.

[25] YANG Zhile, LI Kang, NIU Qun, et al. A comprehensive study of economic unit commitment of power systems integrating various renewable generations and plug-in electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132: 460-481.

[26] 宋梦,高赐威,苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167. (SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167. (in Chinese))

[27] MCKENNA K, KEANE A. Residential load modeling of price-based demand response for network impact studies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2285-2294.

[28] 于松泰,张树卿,韩英铎,等. 电力系统综合负荷模型简化方案及辨识参数集选取[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 143-148. (YU Songtai, ZHANG Shuqing, HAN Yingduo, et al. Simplification scheme for power system composite load model and selection of identification parameters set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 143-148. (in Chinese))

[29] SONG Jie, PAN Xin, LU Chao, et al. A simulation-based optimization method for hybrid frequency regulation system configuration[J]. Energies, 2017, 10(9): 1302.

[30] 杨甲甲,赵俊华,文福拴,等. 智能电网环境下基于大数据挖掘的居民负荷设备识别与负荷建模[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 11-23. (YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Residential appliance identification and load modeling based on big data mining in smart grid environment[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 11-23. (in Chinese))

[31] 张军阳,王慧丽,郭阳,等. 深度学习相关研究综述[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(7): 1921-1928. (ZHANG Junyang, WANG Huili, GUO Yang, et al. Review of deep learning[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(7): 1921-1928. (in Chinese))

[32] XU Yizheng, MILANOVIĆ J V. Artificial-intelligence-based methodology for load disaggregation at bulk supply point[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 795-803.

(收稿日期:2019-06-26 编辑:高建群)

· 简讯 ·

“六·五”世界环境日

1972年6月5日联合国在瑞典首都斯德哥尔摩召开了联合国人类环境会议,会议通过了《人类环境宣言》,并提出将每年的6月5日定为“世界环境日”。同年10月,第27届联合国大会通过决议接受了该建议。世界环境日(World Environment Day)的确立,反映了世界各国人民对环境问题的认识和态度,表达了人类对美好环境的向往和追求。它是联合国促进全球环境意识、提高政府对环境问题的注意并采取行动的主要媒介之一。联合国环境规划署每年6月5日选择一个成员国举行“世界环境日”纪念活动,发表《环境现状的年度报告书》及表彰“全球500佳”,并根据当年的世界主要环境问题及环境热点,有针对性地制定每年的“世界环境日”主题。

2020年世界环境日的主题为:关爱自然,刻不容缓(Time for Nature)。

(本刊编辑部供稿)