第 50 卷 第 1 期：42-54 高电压技术 Vol.50, No.1: 42-54
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230766

考虑灵活资源及模数驱动方法的电力系统调度方法综述

张大海[1]，孙 锴[1]，史一茹[1]，李立新[2]，李亚平[2]，员韫韵[1]
（1. 北京交通大学电气工程学院，北京 100044；2. 中国电力科学研究院有限公司，南京 210003）

摘 要：可再生能源及负荷种类的增多给电力系统运行带来更大不确定性，也给电力系统经济调度带来挑战。深入分析总结灵活资源特性并对不确定性的准确建模是评估电力系统灵活性和实现经济调度的基础。基于模型或数据驱动的调度建模方法面临诸多挑战，将模型与数据驱动方式相结合，并充分发挥二者优势是电力系统优化调度的发展方向。该文从灵活资源分类及特性、系统灵活性评估方法及优化调度的模型与数据驱动建模 3 个方面进行了归纳整理。首先，从电网侧、供应侧及需求侧 3 个方面介绍了系统中的灵活资源，并总结了其调节特性。其次，介绍了权重分配、数理统计及包络区间 3 种常用电力系统灵活性评价指标，并总结了不同方法的适用性。然后，总结了模型驱动或数据驱动的应用现状及其各自优缺点，并对模型数据交互驱动的研究现状进行了概述。最后，对考虑灵活资源的电力系统调度方案研究进行了展望。

关键词：灵活资源；评价指标；模型驱动；数据驱动；优化调度

Overview of Power System Dispatching Methods Considering Flexible Resources and Model-data Driven

ZHANG Dahai[1], SUN Kai[1], SHI Yiru[1], LI Lixin[2], LI Yaping[2], YUN Yunyun[1]
(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The increase in renewable energy and load types brings greater uncertainty to the operation of the power system, as well as challenges to the economic dispatch of the power system. Deeply analyzing and summarizing the characteristics of flexible resources and accurately modeling uncertainty are the basis for evaluating the flexibility of power systems and achieving economic dispatch. Model or data-driven based scheduling modeling methods face many challenges, and combining model and data-driven approaches and fully leveraging their advantages is the development direction of power system optimization scheduling. We summarize and organize from following three aspects: flexible resource classification and characteristics, system flexibility evaluation methods, and optimization scheduling models and data-driven modeling. Firstly, the flexible resources in the system were introduced from three aspects: grid side, supply side, and demand side, and their regulation characteristics were summarized. Secondly, three commonly used power system flexibility evaluation indicators, namely, weight allocation, mathematical statistics and envelope interval, were introduced, and the applicability of different methods was summarized. Then, current research status of flexible resource allocation driven by model driven, data driven, and model-data interac-tion driven was summarized. Finally, the prospects in research of power system flexibility are put forward.

Key words: flexible resources; evaluation index; model driven; data driven; optimized scheduling

0 引言

目前，我国电力系统的发展主要以“双碳”目标为导向[1-3]，推动了一系列可再生能源发电及应用技术的大力发展，使其发电总量及装机容量逐年增加。预计到 2030 年，全球新能源装机容量占比将达约 70%，电量占比将达约 50%，且有望于 2050 年实现 60%新能源装机总量的占比。但由于可再生能源发电的随机性，可再生能源的大力推广在有效缓解传统能源发电压力的同时，也给电力系统带来更大的不确定性。系统净负荷曲线方面，可再生能源

基金资助项目：国家重点研发计划(2022YFB2403400)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB2403400).

渗透率越高的系统中，净负荷波动更剧烈，给经济调度带来困难[4]。因此，为保证系统供需平衡，实现电力系统安全、稳定、经济运行，需充分考虑并有效利用系统中的灵活性资源[5-6]。

电力系统灵活性最早是由北美电力可靠性委员会(North American Electric Reliability Council, NERC)和国际能源署(International Energy Agency, IEA)提出[7-8]。NERC 认为灵活性是利用系统资源满足负荷变化的能力，侧重于系统运行；IEA 则认为灵活性是电力系统对可预见与不可预见的变化和事件的反应能力，侧重于系统本身。

目前，针对灵活资源的研究主要集中于灵活资源的定义和灵活性的评价指标[9-11]，而有关灵活资源性质、灵活资源分类和相应的调度优化的研究成果则相对较少。文献[12]将灵活性资源分为灵活性需求和灵活性供应 2 类，其主要侧重于源荷侧灵活资源的研究；文献[13]将灵活资源分为需求型、储能型和空间性 3 类，侧重于资源的物理性质；文献[14]将灵活资源按照不同的响应时间对其进行分类。目前，灵活资源分类研究中，对于考虑网络传输中包含的灵活资源研究较少[15-16]。此外，灵活资源在电力系统中的调度方式也由传统的模型驱动的调度方式逐渐转变为数据驱动或模数交互驱动方式的研究。

综合以上，为全面综述灵活资源特性及其在经济调度领域的应用，论述了灵活资源及模数驱动调度模型的研究现状。第 1 章从供应侧、需求侧及电网侧 3 个方面对灵活资源的调节特性进行了分析介绍。第 2 章介绍了基于灵活资源的 3 种常用系统灵活性评价指标。而灵活性评价指标通常可作为系统态势感知工具，调度模型通常也是两阶段优化问题。基于以上讨论，第 3 章主要介绍了基于模型、数据及模数交互驱动的经济调度模型的构建及求解方法。最后，对未来研究方向进行了展望。

1　灵活资源的分类及特性

将电力系统中存在的灵活资源分为供应侧资源、需求侧资源及电网侧资源 3 种类型，3 种类型之间的关系如图 1 所示。其中，电网侧灵活资源主要反映系统传输网络的可用资源[17]，属于网络型资源。

供应侧与需求侧主要是以节点形式接入输电或配电系统，属于节点型资源。不同灵活资源具备不同特性，表 1 介绍了电网侧、供应侧和需求侧 3 类灵活资源的特性。

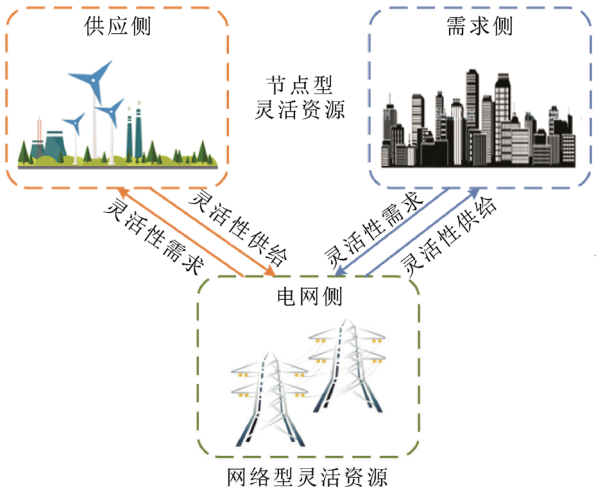


图 1　不同类型灵活资源间的联系

Fig.1　Connection between different types of flexible resources

表 1　灵活资源特性

Table 1　Flexible resource characteristics

灵活资源	特性	含义
电网侧	时间性	灵活性取决于一定时间尺度
	无方向性	灵活性只体现在传输容量的变化
	固定性	灵活性不随需求侧或供应侧灵活资源的变化而变化
供应侧	时间性	如分布式电源的间歇性出力
	空间性	灵活资源受到接入位置、接入条件不同而产生的资源空间分布不同
	方向性	在运行中存在需要向上调节或向下调节功率大小的情况
	双向转化性	灵活性供给和需求通过技术或管理手段在特定条件下可实现相互转化
需求侧	时间性	灵活性在不同时间尺度下所对应的需求不同
	空间性	灵活资源种类多且空间分布广
	调节方式多样性	不同类型灵活资源对应不同控制方式

需要指出的是，表 1 中展示的是灵活资源中包含的共性，而如供应侧的新能源发电以及需求侧的负荷等部分还包含时序特性，电动汽车等资源还具有双向调节特性，在此不一一列举。

1.1　电网侧

电网侧资源的表现形式是网络线路的传输可用性[17]，其研究多是在系统优化运行模型中添加表征网络传输灵活性的约束，主要包括线路可用传输容量、线路开关及互联电网等。

1）线路可用传输容量

线路可用传输容量 M_{line} 是指线路允许的最大传输容量 $P_{\text{line}}^{\max}$ 和实际传输容量 P_{line} 的差值与 $P_{\text{line}}^{\max}$

的比值[18]，其计算方式为：

$$M_{\text{line}}=\left(P_{\text{line}}^{\max}-P_{\text{line}}\right)/P_{\text{line}}^{\max} \tag{1}$$

式(1)体现的是线路对于负荷波动的向上调整灵活性。该表示方式较为简单，未考虑系统运行的不确定性。为此，文献[17]提出了网络可用输电容量的概念，用于表征考虑当前在流量和因系统运行不确定预留裕度后的网络剩余可用输电容量：

$$M_{\text{line}}=C_{\text{MT}}-C_{\text{RT}}-C_{\text{BM}}-C_{\text{UT}} \tag{2}$$

式中：C_{MT}表示线路最大输电能力；C_{RT}表示保障系统安全稳定运行的预留输电容量；C_{BM}表示容量效益裕度；C_{UT}表示当前已用传输容量。

式(2)主要采用可靠性评估与基于概率模型的计算方式，其计算过程相对复杂，一般是只以关键断面或者互联电网联络线为计算对象。

2）线路开关

线路开关[19]主要是通过改变电网拓扑结构转换灵活资源的流向，从而产生灵活性资源。主要分为手动开关、自动开关和智能软开关 3 类。相比传统开关，智能软开关(soft open point, SOP)[20]具有开、关和过渡 3 种状态，可以实现馈线间有功功率传输的实时连续控制，并提供相应无功支撑。通过以 SOP 为典型的灵活互联装置对配电网一次系统进行灵活控制成为未来智能配电网运行优化的必然趋势。SOP 的应用形式主要包含双端馈线柔性互联场景、多端柔性互联场景、跨电压等级柔性互联场景、交直流混合互联场景、柔性变电站场景等。

3）互联电网

互联电网[21-22]是指不同区域间电力系统通过联络线连接的电力网络，且各区域间可以通过联络线实现资源的交换。因此，不同区域间的电力系统可以互相作为彼此的灵活资源供应源。

通常，由联络线提供的灵活资源容量较大，但相应投资会越高。因此，互联电网的灵活性发展受经济性影响较大，断面受限也是另一制约因素。

电网侧灵活资源参与调度时，需要确定调度区域联络线的管辖范围。此外，以我国甘肃地区为例，该地区具备明显的“小电网大电源”特性，断面受限较为严重。若提高联络线的传输电量减少弃风弃光，会导致应对新能源出力波动的预留容量裕度减少。因此，新能源波动造成了电网间联络线的传输容量越限，断面控制困难。

综合以上，电网侧灵活资源应用于调度过程时的功率调节特性可建模为：

$$-M_{\text{line}}z_{\text{line}}\le P_{\text{line}}\le M_{\text{line}}z_{\text{line}} \tag{3}$$

式中：$z_{\text{line}}\in\{0,1\}$表示线路开关状态，0 表示线路断开，1 表示线路连接。对于互联电网，M_{line}应选择式(2)的计算方式。

1.2 供应侧

1.2.1 供应侧灵活资源

供应侧包含的灵活资源种类繁多且主要集中在输电系统。以传统电源、新能源发电、储能设备为例进行介绍[23-24]。

1）传统电源

传统发电电源一般是指火电、水电、核能发电 3 种类型，该部分资源的稳定性强、可靠性高、可控性强，是灵活资源的重要组成成分。3 种类型电源的特性如表 2 所示。

具备调峰能力的火电机组，其最小技术出力可达到 50%额定容量以下。丰水期的水电调峰容量一般认为可达到 100%装机容量，枯水期保证出力一般只有 25%~30%的装机容量[25]。不具备快速调节能力的火电厂与核电相似，两者都可以提供大量灵活性资源，但受到经济性限制较大，降低了其灵活性能[26]。相比之下，水电站调节速度快且经济性好，但其容量普遍较低，且受季节或气象因素影响较大。

2）新能源

以风光为代表的新能源发电方式是目前热门的研究话题[27-29]，其主要是通过逆变器接口实现能量转换后接入电网，属于半可控性灵活资源。但该类型的能源不具备调频特性，难以实现独立供电，若没有主网的电压和频率的支撑，该类型电源会导致系统发生功率失衡或系统振荡等事故[30-31]。

目前，新能源发电正由规模较小、就地消纳转向大规模、远距离输送方向发展。而随着新能源发电的大规模并网，从根本上改变了系统的潮流方向与分布，同时也使该部分能源变得更加可控、可用、可观测和可预测，进而间接提升了系统灵活性。

以容纳新能源最大不确定性的两阶段调度模型的目标函数通式可表述为：

表 2 常规电源特性

Table 2 Characteristics of conventional power supply

类型	启动时间	调整能力	容量	经济性
火电	较长	较差	大	较差
核电	较长	较差	大	较差
水电	短	较好	较小	较高

$$\begin{cases}\min\limits_{P_{\mathrm{G}},W_{\mathrm{NE}}} E(\phi(P_{\mathrm{G}},W_{\mathrm{NE}}))\\ \max\limits_{P_{\mathrm{G}}^{*},W_{\mathrm{NE}}^{*},u} \varphi(u_{\mathrm{NE}}^{\mathrm{up}}-u_{\mathrm{NE}}^{\mathrm{dn}})\end{cases} \tag{4}$$

式中：P_{G}和W_{NE}分别为传统机组和新能源机组的发电功率，P_{G}^{*}、W_{NE}^{*}分别为传统电源和新能源发电功率第1阶段的最优解；E为成本函数ϕ的期望；$u_{\mathrm{NE}}^{\mathrm{up}}$和$u_{\mathrm{NE}}^{\mathrm{dn}}$分别为新能源发电不确定性$u$的上、下界；贡献因子$\varphi$的选取也是一个可行的研究方向。

此外，在不同时间尺度下，新能源发电对于系统的频率调节、系统爬坡能力、系统调峰能力等方面也会产生消极的影响[32-33]。因此，新能源发电在带来灵活性资源的同时也产生一定的灵活性需求。

3）储能

目前，较为普遍的储能方式主要是蓄电池储能、抽水蓄能和压缩空气储能等几种类别[34-36]。储能本身具有较高的可控性，爬坡速率较快(如蓄电池储能)，能够实现控制策略的快速响应，具备削峰填谷、平滑负荷、调频等功能。储能装置的充电与放电状态可视为下调与上调灵活资源。

储能单元可通过集中控制系统参与电力市场，不但能够直接为系统提供有功功率，也可以与新能源发电或微电网等资源结合，以提高新能源发电和电网可靠性。然而，储能单元的安全性、造价和高损耗性是制约储能技术发展的主要原因。

综合以上，供应侧资源功率调节特性除功率限制因素外可统一建模为：

$$P_{\mathrm{G}}^{\min}\le P_{\mathrm{G}}\le P_{\mathrm{G}}^{\max} \tag{5}$$

$$\begin{cases}F^{\mathrm{up}}=\min(r^{\mathrm{up}}\tau,P_{\mathrm{G}}^{\max}-P_{\mathrm{G}})\\ F^{\mathrm{dn}}=\min(r^{\mathrm{dn}}\tau,P_{\mathrm{G}}-P_{\mathrm{G}}^{\min})\end{cases} \tag{6}$$

式中：式(5)表示出力限值；式(6)表示爬坡约束；$P_{\mathrm{G}}^{\max}$、$P_{\mathrm{G}}^{\min}$分别为机组出力上、下限；τ为时间尺度；F^{up}、F^{dn}分别为机组上调、下调资源；r^{up}、r^{dn}分别为上、下爬坡速率。其中，储能装置还包括充放电效率及储能容量等因素，需具体问题具体分析。

1.2.2　节能减排调度技术

为响应国家“双碳”政策，越来越多的学者从经济调度转向考虑环境效益的节能减排经济调度技术的研究。

节能减排发电调度模式是以节能环保为目标，优先调用清洁能源，按能耗与污染物排放水平升序调用能源，以最大限度减小能耗和污染物排放[37]。而具有碳补集技术的发电厂可以通过对CO_2补集、运输和封存等减小其排放量。因此，含碳补集技术电厂的调度理论通常包含CO_2排放及补集成本。

上述一般是通过罚函数法改进目标函数，达到节能减排的目的。除此之外，如碳排放交易、不同机组间发电置换等技术也被广泛应用于节能减排调度研究中。此外，在保证电网安全的前提下，充分考虑不同技术特性，合理利用提高蒸汽初参数、二次再热、管道系统优化等节能减排技术，也是促进电网良性发展的重要手段[37]。

1.3　需求侧

1.3.1　需求侧灵活资源类型

需求侧灵活资源包含种类较多，电解铝及铁合金等高载能负荷可以通过调整工业生产过程来改变用电计划。该类调节方式只影响其产量，而不影响产品质量。因此，高载能负荷具备可离散(如电解铝负荷，为减小设备损耗，每次负荷调节前后需要设置一定的时间间隔，可通过功率约束、爬坡约束及运行状态时限约束进行建模)与可连续调节(如铁合金负荷，相对于其额定容量来说可忽略爬坡过程，且无运行状态切换间隔限制，可通过功率约束及爬坡约束进行建模)的特性。

民用负荷中，电动汽车是以低碳为目标而产生的一种新型交通工具，能够有效实现节能减排，可以作为充电负荷或者是储能单元，具有电源型与需求型灵活资源的双重特性[38]，其建模方式与储能单元类似。电动汽车作为分布式储能单元可以通过电动汽车聚合商实现与微电网、可再生能源等资源的灵活组合应用[38]。但电动汽车属于半可控型资源，只能通过价格或激励等需求响应方式实现间接控制，其在响应时间、资源质量等方面都有待提高。

无论是高载能负荷或者民用负荷，在参与电力市场时，可以统一定义为可转移与可中断负荷2种类型。因此，需求侧资源功率调节特性可表示为：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{load}}^{\mathrm{new}}=P_{\mathrm{load}}^{\mathrm{old}}+\sum\limits_{t'}p_{\mathrm{load}}(t',t)-\sum\limits_{t'}p_{\mathrm{load}}(t,t')\\ P_{\mathrm{load}}^{'}=P_{\mathrm{load}}^{\mathrm{new}}-P_{\mathrm{load}}^{\mathrm{DR}}\end{cases} \tag{7}$$

式中：$P_{\mathrm{load}}^{\mathrm{new}}$、$P_{\mathrm{load}}^{\mathrm{old}}$分别为转移前后的负荷功率；$p_{\mathrm{load}}(t',t)$分别为从$t$时刻转移至$t'$时刻的负荷功率；$P_{\mathrm{load}}^{'}$表示中断后的负荷功率；$P_{\mathrm{load}}^{\mathrm{DR}}$为中断负荷量。

1.3.2　需求侧灵活资源管理

除新能源外，需求侧灵活资源及其调度管理也主要集中在配网侧，从管理者角度来说，对于需求

侧灵活资源的管理或者调节方式主要可以分为主动式负荷管理和被动式负荷响应 2 种类型。

1）负荷管理

负荷管理[39-40]是指在不影响负荷的正常工作前提下，通过降压减载或对可中断负荷施行分批短时轮控。其措施主要包括经济措施、技术措施和行政措施等方式[41-42]。

2）负荷响应

负荷响应[43-44]是指按照不同时间尺度通过价格或者激励方式使负荷用户自愿参与，从而改变其原有的用电计划，达到缓解供电压力或者消纳新能源发电等目的的行为。负荷响应措施主要包括不同需求响应方式，其主要是价格型与激励型 2 种，2 种方式及类型如表 3 所示。

负荷管理无需征求负荷用户意见，这会影响负荷用电体验。因此，目前对负荷侧资源的调度研究也大多通过负荷响应的利益引导方式实现。经济调度中，一般将响应负荷的补偿费用计入目标函数：

$$\begin{cases}\phi_1=\sum_t\sum_{t'}(\sigma_1+\sigma_2\dfrac{|t-t'|}{T_{\max}})p_{\text{load}}(t,t')\\ \phi_2=\sum_t(P_{\text{load},t}^{\text{DR}}\alpha_{\text{load},t}^{\text{DR}})\end{cases}\tag{8}$$

式中：ϕ_1、ϕ_2 与 σ_1、σ_2 分别为可转移与可中断负荷补偿费用与用户舒适度补偿费用；$T_{\max}$ 为最大转移间隔；$\alpha_{\text{load},t}^{\text{DR}}$ 为中断负荷补偿电价。

此外，对于不同的利益主体，能够在保障电网安全稳定运行的前提下，通过调度手段实现多利益主体的公平、合理且经济地参与电力市场调节，通过电价引导、需求侧管理等多种手段，实现新能源消纳和最大化效益，对于主网或配网来说都是一种新的挑战。

1.4 供应侧与需求侧灵活资源总结

对灵活性资源不仅要从可调节资源的不同来源进行分类，还需要全面梳理不同物理角度、不同出力特性灵活性资源的响应能力及调节能力。文献[45]从时间、技术及经济 3 个方面论述了供应侧与需求侧灵活资源特性。在此基础上，总结各类资源调节特性如表 4 所示。

通常，高载能负荷与电网签订协议来接受调控，因受到价格激励，其市场参与积极性较高。而电动汽车等民用负荷受用户自身影响大，随机性强，且负荷功率量小，空间位置分布相对分散，调控难度大。因此，高载能负荷可由电网调度中心直接下发调控指令，而民用负荷一般通过聚合商将调度指令下发至用户。此外，新能源发电与民用负荷主要依赖预测水平，其随机性较强。因此，在调度过程中，实现新能源发电与民用负荷的预测与随机性建模精度，是提高系统运营经济性的主要手段。

2 系统灵活性评价指标

灵活资源种类繁多，特性各异，对灵活资源的统一量化，是实现其在电力系统调度中有效应用的

表 3 需求响应的类型

Table 3 Types of demand response

需求响应类型	需求响应方式
价格型	分时电价
	实时电价
	尖峰电价
激励型	直接控制负荷
	可中断负荷
	需求侧定价

表 4 供应侧与需求侧灵活资源特性总结

Table 4 Summary of flexible resource characteristics on the supply and demand sides

灵活资源			时间维度			技术维度		成本维度	
			0 min	15 min	1 h	调节速率/(%·min^{-1})	调节范围	调节成本/(元·kWh^{-1})	单位容量建设成本/(元·kW^{-1})
供应侧	发电机组	快速调节燃气机组	√	√		6~10	接近 100%	0.55~0.8	400~2500
		联合循环燃气机组		√	√	2~3	60%~70%	0.152~0.455	300~3200
		燃煤机组			√	0.2~1.5	40%~50%	0.25~0.45	200~3000
		燃油机组	√	√		3	50%~70%	1.1~1.5	400~3500
		可调水电站	√	√	√	20	接近 100%	0.28~0.35	1500~7000
	储能	蓄电池储能	√			数秒内达到额定功率	接近 100%	2.04	200~4000
		压缩空气储能		√		1~10 min 达到额定功率	接近 100%	1.85	500~3600
		抽水蓄能			√	10 s~10 min 达到额定功率	接近 100%	0.5~0.8	700~8000
需求侧		激励型需求响应	√	√	√	几乎瞬时	<10%	0.2~1.6	—
		价格型需求响应		√	√	几乎瞬时	<40%	0~0.3	—

重要手段。考虑灵活资源发电计划的制定流程一般如图 2 所示。

对系统灵活性的度量可以实现系统可容纳最大不确定性的评估。系统灵活性的判定是以充分考虑灵活资源调节特性与系统运行约束为前提，确保评价指标的适用性。其在提高系统经济性或指导电力系统未来规划方面都具有较高的实用价值。

目前的灵活资源指标的研究较多，文献[12]以灵活性不足比例作为系统灵活性的评价指标；文献[18]通过净负荷最大允许波动率和净负荷波动率来描述系统的灵活性适应能力；文献[46]介绍了系统爬坡资源不足的期望值(insufficient ramping resource expectation, IRRE)和技术不确定性灵活性指数技术经济不确定性灵活性指数(technical uncertainty scenarios flexibility index-technical economic uncertainty scenarios flexibility index, TUSFI-TEUSFI)2 种灵活性评价指标的基本原理。目前，对于灵活性的评价指标尚未形成系统性的灵活性评价指标体系。

事实上，灵活性评价指标的主要目的是对灵活性资源在调用过程中的量化，其计算结果体现灵活资源的可用程度。目前较为普遍认可的评价方法主要有权重分配方法、数理统计方法和包络区间方法 3 种类型。

2.1　权重分配方法

权重分配方法是指以系统灵活性资源分析结果为基础，通过不同资源的量化指标形成表示系统整体灵活性的量化方法。文献[47]以最大容量、最大功率及爬坡率为基础对单个发电机的灵活性进行了量化，计算方式为：

$$X=\sum_i\left(\frac{P_{\mathrm{G}}^{\max}(i)}{\sum_i P_{\mathrm{G}}^{\max}(i)}x(i)\right) \tag{9}$$

式中：X 表示系统的灵活性评估结果；$x(i)$表示发电机 i 的灵活性标准化结果，计算方式为：

$$x(i)=\frac{(P_{\mathrm{G}}^{\max}(i)-P_{\mathrm{G}}^{\min}(i))/2+(R_{\mathrm{G}}(i)\Delta t)/2}{P_{\mathrm{G}}^{\max}(i)} \tag{10}$$

式中：$\frac{1}{2}R_{\mathrm{G}}(i)$ 表示发电机每小时的上调和下调速率均值；Δt 表示时间间隔。

式(9)实际是将每个发电机计算结果进行加权求和来作为系统灵活性评价结果，权重因子为每个发电机的容量占比。式(9)所描述的权重分配方式也可作为式(5)中贡献因子选取的一种可行方案。例如，贡献因子可以与可再生能源机组容量或电力市场价格成比例进行选择。

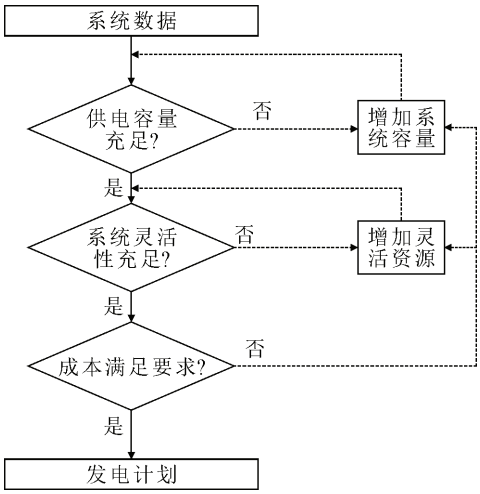


图 2　发电计划制定流程

Fig.2　Generation planning process

此外，TUSFI-TEUSFI 指标[6]是以系统节点为单位，通过计算注入节点的自由功率(蒙特卡洛模拟得到的支路潮流和节点注入功率)与成本限制功率(受系统结构、受成本限制的节点注入分量、受成本限制的支路余量等) 2 个指标，进而将其量化为成本函数。该函数实际上也属于权重分配方法的一种。TUSFI-TEUSFI 指标主要用于电力系统规划任务。

2.2　数理统计方法

数理统计方法主要是以如期望、概率等灵活资源的统计计算结果为基础形成的评价体系。系统爬坡资源不足期望值(insufficient ramping resource expectation，IRRE)属于一种概率性指标计算方法。IRRE 首先将灵活性资源分为向上和向下调节的灵活性资源，然后利用 Kaplan-Meier 法估计的累积密度函数得出可用灵活性概率分布，最后通过临界点，找到不同时间尺度、不同方向和不同灵活性资源下的 IRRE 值。在此基础上，文献[48]以负荷损失为度量标准，在 IRRE 基础上提出了一种新型灵活性评价方法。计算流程如图 3 所示。

图 3 所示方法主要是基于净负荷曲线的变化，根据不同时间尺度计算系统可用灵活资源，进而得到 IRRE 的计算结果。

文献[49]首先对灵活资源按照边际成本进行排序，确定净负荷增长的递减序列，然后对每个发电单元可用灵活性进行量化，计算方式为：

$$X_{t^{\mathrm{NLDC}},\tau,r}^{z_1}=z_{1,t^{\mathrm{NLDC}},r}\min(R_r(\tau)\tau,C_r-P_{t^{\mathrm{NLDC}},r}) \tag{11}$$

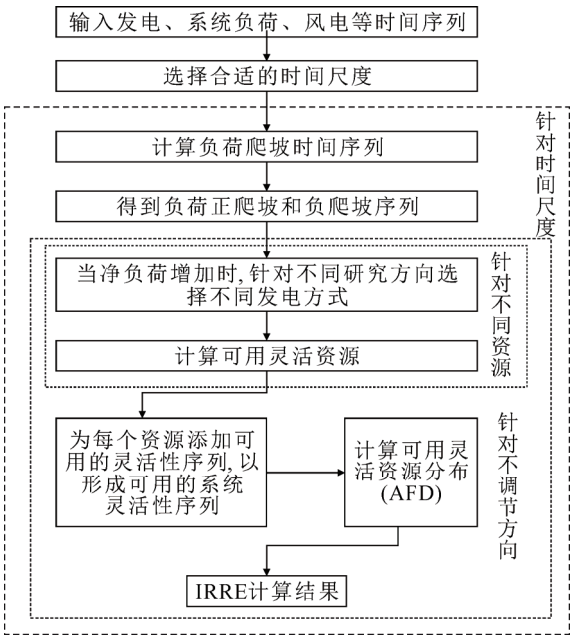


图 3 IRRE 计算流程

Fig.3 IRRE calculation process

$$X_{t^{\mathrm{NLDC}},\tau,r}^{z_0}=\min(R_r(\tau)(\tau-T_{\mathrm{st},r}),C_r)(1-z_{1,t^{\mathrm{NLDC}},r}) \quad (12)$$

式中：t^{NLDC} 表示净负荷持续时间曲线(net load duration curve, NLDC)的时间索引；r 表示灵活资源索引；z_0、z_1 分别表示灵活资源的在线和离线状态；R_r 表示爬坡率；C_r 表示额定容量；$T_{\mathrm{st},r}$ 表示开机时间。式(11)、(12)表示在线和离线灵活资源的可用水平，求和可得到系统可用灵活资源序列。

此外，文献[50-51]为解决大规模可再生能源并网的电带来的影响，以灵活性不足概率、灵活性裕度期望、灵活性不足期望为基础，介绍了不同时间尺度下的加权灵活性指标。

2.3 包络区间方法

包络区间方法主要是以区间形式对系统可用灵活资源进行度量的一种评价方式。

文献[52]以时间尺度、动作特性、不确定性和成本 4 个方面衡量系统灵活性。在确定时间尺度、成本阈值和调度目标的参数变化范围(反映决策者的风险水平)后，灵活性指标计算方式可表示为：

$$X=\begin{cases}1, & [u^{\mathrm{dn}},u^{\mathrm{up}}]\subseteq[u^{\mathrm{dn}*},u^{\mathrm{up}*}]\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \quad (13)$$

式中：u^{up}、u^{dn} 分别表示系统中不确定性来源的上下限。与式(4)不同的是，此处不确定性不仅限于新能源机组出力的不确定性，也可包含负荷等的不确定性。$u^{\mathrm{up}*}$、$u^{\mathrm{dn}*}$分别表示系统所能承受的最大不确定性变量 u 的上、下界。X=0 时表示系统无法满足目标变量的变化范围，X=1 时表示变量的最大变化幅度大于目标变量。

文献[53]通过包络线的形式表示可用灵活资源。基于可再生能源预测误差在不同时间间隔下的误差分布，考虑不同决策周期和不同时间步长内，灵活资源的潜在动态过程，形成能够描述固定决策周期内系统灵活性的包络区间。该方式适用于线性时不变系统，即实时决策过程，对于电力系统规划方面的应用受限。

2.4 不同方法的适用性分析

系统灵活性主要是通过相应调控手段，充分利用系统内资源，在保证经济运营的基础上适应不确定的未来负荷和风/光出力的波动。

权重分配方法主要基于灵活资源的机理特性，其优点是灵活性指标不受系统运行决策的影响，而只与系统内部发电单元的参数相关。由于其主要考虑系统内部原参数，并未考虑系统资源带来的随机性。因此，该类方法可应用于电力系统规划，而不适用于短期如日前、日内与实时的经济调度。

数理统计方法基于数据分析，通过相应数学指标衡量灵活性，以加权指标形式给出确定性指标值。因此，调度模型通常可以转换为标准的两阶段鲁棒优化问题，便于求解。但该方法对于指标选取的合理性要求较高，适用于短期尺度的调度。

包络区间也是通过选取合理指标对系统灵活性进行衡量，但该方法是基于净负荷曲线，得到资源的不确定性区间。区间的大小可以体现决策者的风险水平。因此，这类评价方式也可以作为确定时间尺度下灵活性短缺的态势感知工具。

此外，在灵活性评价指标方面，模型方式比数据驱动方式更加准确。数据驱动方式依赖数据集质量，且结果并不稳定，将其作为灵活性判别器时可能会造成灵活性充足与否的误判，造成后续结果的不正确。因此，目前对采取数据驱动的灵活性评估方案研究较少。

3 模型数据驱动灵活资源优化调度

系统的灵活性评估主要是为了判断下一调度区间(如未来 4 h)内，在给定系统当前状态和在线机组的爬坡能力的情况下，系统是否有能力适应不确定的未来负荷和风/光出力的波动。因此，若在确定的风险水平下，系统灵活性不足，则需要充分调动灵活资源，从而尽可能减少弃风/光或切负荷量。

现如今，不确定性来源增多，为不确定性建模增加了困难。此外，随着电网量测系统的完善以及可再生能源的发展，积累了海量的系统运行数据，出现了较多基于数据驱动的优化调度方法。本章针对考虑灵活资源的模型驱动、数据驱动及模型数据交互驱动方式下的调度方法进行综述。

3.1　模型驱动灵活资源优化调度

所谓模型驱动，主要是依靠数理统计等数学知识实现研究对象的模型构建，进而得到资源配置结果的方法。其中，处理带有随机变量的随机优化(stochastic programming, SP)和考虑不确定范围的鲁棒优化(robust optimization, RO)是 2 种普遍采用的不确定建模方法。

文献[12]考虑灵活性需求和灵活性供应并分别建模，对含有高比例可再生能源并网的配电网建立运行和规划的双层优化模型，并采用粒子群优化算法求解模型；文献[13，54]分析了高敏感型负荷的特性，文献[13]以需求、储能、空间 3 种类型对灵活资源进行分类并建模，从而建立优化调度模型；文献[18]分析了含高渗透率分布式电源配网的灵活性需求及灵活性资源，介绍了配电网容量灵活充裕度、配网分布式电源接纳灵活适应性，以保证系统经济性及净负荷波动率最小为目标函数建立调度模型；在此基础上，文献[55]从灵活性需求、资源、平衡机理、对系统影响及评价方法等方面对含高比例可再生能源电力系统灵活性规划进行了介绍。

目前，模型驱动的灵活资源配置方法的研究主要集中于减小新能源发电并网带来的影响以及如何最大化利用新能源发电等方面。因此，目前的研究主要还是聚焦于不确定的准确表示方法。然而，当系统包含复杂随机性因素时，不确定性的建模存在困难，传统模型驱动方式在针对该问题时的准确性有所下降。

此外，在面对大规模电网时，系统变量会随着节点数的增多而呈指数性增长趋势，这对于模型驱动来说是沉重的计算负担。因此，针对这一问题，有学者将数据驱动方式引入电力系统。

3.2　数据驱动的灵活资源优化调度

以神经网络为代表的机器学习数据驱动方式基于海量数据分析提取数据中蕴含的统计信息等，以改善模型驱动计算速度慢或对高维复杂问题建模求解不适用等方面的缺陷。

传统的不确定性管理方式如随机规划(stochastic programming, SP)通常需要设定随机变量的概率分布，但是假定的概率分布模型无法准确刻画实际不确定性因素的复杂变化规律。鲁棒优化(robust optimization, RO)采用不确定性集合描述不确定性因素的变化范围，考虑最差场景下的最优解，使得调度结果较为保守。为了改进不确定管理方式现存的缺陷，基于数据驱动方式的优化调度模型研究越来越多。

文献[56]通过运行数据集建立了基于人工神经网络的电-气耦合系统的快速经济调度方案；文献[57]通过深度神经网络的分层学习实现了区域间的经济调度。上述文献通过数据驱动实现复杂计算，部分对于数据驱动算法的应用较为简单直接，难以保证其结果的可行性，一般需通过约束松弛等方式保证得到可行解。

此外，有较多文献也将强化学习引入调度领域。文献[58-61]将电力系统作为运行环境，通过设计智能体及奖励函数等，模拟电力系统运行环境，进而能够独立于模型得到决策结果。强化学习方式的优势是可以将研究系统作为智能体，通过指定奖励函数、状态空间、动作空间及相应价值函数训练代理网络，得到独立于模型的决策结果。

然而，无论是人工神经网络算法，还是深度学习算法等，都是通过“黑箱思想”建立模型，完全依赖于数据，得到的结果甚至难以满足可行性要求。因此，单纯的基于数据的方法已被逐渐淘汰。而强化学习算法能够满足解的可行性，其研究热点主要集中于通过对智能体及奖励函数等方面的设计，实现不同功能。但单纯的数据驱动方式的问题解都难以保证解的最优性。因此，有学者针对这一问题提出了模型与数据混合驱动的思想。

3.3　模型数据交互驱动的灵活资源优化调度

模型驱动方法所建立的模型相对明确，具有广泛的研究基础和较强的可解释性。数据驱动方法对于非线性问题的拟合能力较强，计算速度较快。总结模型与数据驱动方法的各自特性及其优缺点，如表 5 所示。

由表 5 可知，模型驱动与数据驱动方式在一定情况下的相互结合，可以实现优势互补。因此，近年来有许多研究聚焦于模型数据交互驱动的调度模型研究。目前较为流行的是串行、并行和嵌入引导 3 类交互驱动方式[62]。

1）串联模式

串联模式结构如图 4 所示，其中 $\boldsymbol{Y}$ 表示输入数据；f 与 g 分别表示模型驱动与数据驱动输出。

在串联模式中，模型驱动方法可为数据驱动方法筛选关键特性，有助于减少数据驱动方法的输入特性维数。数据驱动的方法亦可作为模型驱动方法的处理修正步骤。通过选择合适的模型驱动方法，可以提高模型的精度、时间效率和灵活性。

基于串联交互思想，文献[63]提出可解释机理的经济学模型，基于数据回归的思想建立多主体联合优化模型，逆向求解各主体的价值估计值；最后结合上述 2 种结果，对未知合约成交价格进行预测，以此来提高方法预测性能和经济学解释力。文献[64]采用系统频响模型与基于极限学习机的学习模型相结合的方法，在系统频响模型中保留基本的物理因果关系，利用极限学习机对系统频响模型进行拟合和误差修正。而后续的减载预测模型由极限学习机通过从样本中挖掘映射关系来构建。

2）并联模式

并联模式结构如图 5 所示。并联模式的主要特征为将数据驱动与模型驱动方法结果综合处理后作为最终的输出结果，处理方法有直接叠加、因子相乘、加权求和等。在调度实际场景中，可通过比较或使用加权计算来帮助最终决策。文献[65]采用数据驱动模型取代电力电子元件中的微分方程组，模型驱动求解代数方程与非电力电子元件方程，并求和得到时域仿真计算结果。

3）嵌入引导模式

嵌入引导模式结构如图 6 所示。嵌入引导模式[66]中，数据驱动方法作为复杂元素替换或模型参数校准的内部模块嵌入到模型驱动方法中，这种方法适用于加速系统的仿真过程或提高模型驱动方法对实际的适应性，提高了效率和灵活性，但是精度会有所下降。文献[67]将热力学模型中难以测量的参数通过神经网络进行预测，并结合物理知识构建了建筑热力学模型；文献[68-69]同样结合物理信息与数据驱动算法实现不同问题的研究。针对调度问题，文献[70-72]通过数据驱动方式对模型驱动方式中设计的概率问题进行表示，简化了问题求解过程。

串行与并行模式的原理和计算方式都相对简单。而嵌入引导模式由于考虑了物理系统的先验知识，将计算负担或复杂建模等过程通过数据驱动算法实现，提高了模型的可信程度。

表 5 模型驱动与数据驱动优缺点对比

Table 5 Comparison of advantages and disadvantages between model driven and data driven

驱动方式	优点	缺点
模型驱动	模型明确，研究基础广泛，可解释性强，实现过程较简单，模型易应用	高维问题适应性差，复杂数据处理困难，计算速度受限，评估体系不统一
数据驱动	非线性拟合能力，自学习能力强，影响因素考虑全面，实时响应能力，对模型依赖度低	需大量运行数据，需模拟不安全场景，存在准确率上限，模型结果不稳定，可解释性差

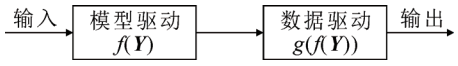


图 4 串联模式结构

Fig.4 Structure of serial approach

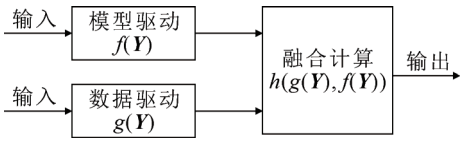


图 5 并联模式结构

Fig.5 Structure of parallel approach

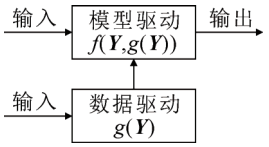


图 6 嵌入引导模式结构

Fig.6 Structure of embedded approach

4）物理信息融合的数据驱动算法

除上述 3 种交互方式外，有学者提出图神经网络(graph neural network，GNN)[73]与物理信息神经网络(physics informed neural network，PINN)[74-75]。该类型网络可以通过其本身特殊结构体现物理模型的知识。GNN 与 PINN 网络结构如图 7 所示。

图 7(a)中，下标 k 与 n 分别表示系统中节点与边的数。GNN 通过节点特征矩阵 $\boldsymbol{N}$ 与边的特征矩阵 $\boldsymbol{B}$ 来表示系统确定的物理拓扑及拓扑信息。即，将系统节点和线路传输信息用图中节点与支路进行表示，减小对数据质量依赖的同时，使网络自动包含了模型信息，提高了结果的可靠性。

图 7(b)中，a 与 m 表示方程可行域内的采样点；s 表示方程的解；网络末端表示粘性 Burgers 偏微分方程(其中，v 表示介质粘度)；Loss 表示神经网络及

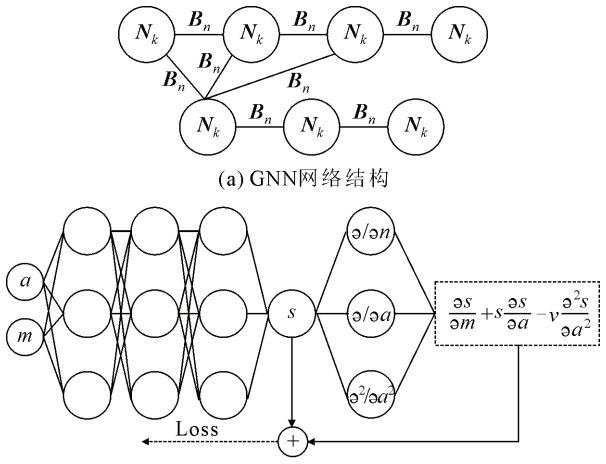


图 7　GNN 与 PINN 网络结构图

Fig.7　Net structure of GNN and PINN

微分方程的误差。PINN 最初是结合参数化神经网络求解包含偏微分方程，将其应用到调度领域时，是通过将物理模型作为损失函数的一部分加入到 PINN 中，求解结果自然满足模型的实际物理约束。如文献[69]基于 PINN 方式构造了基于物理信息动作网络的暂态稳定预防控制，使网络学习物理模型信息。

目前，无论是基于数据驱动的鲁棒优化方案还是随机优化方案，数据驱动的作用都是被应用于不确定性的建模和分布参数的拟合，这在一定程度上提升了 2 种方法的精度。这类改进方式类似嵌入式交互驱动，将数据驱动结果应用于模型驱动方法。可见，关于模型数据交互驱动的优化调度模型的研究主要集中在嵌入引导模式，且基于灵活资源的交互驱动调度方案研究还相对较少。此外，GNN 与 PINN 在电力系统调度方面的应用研究也可能是未来的一个热点方向。

4　研究展望

目前虽然系统灵活性定义及评价指标还未形成明确体系，但随着电力系统的发展，灵活性方面的研究也更加严谨和科学。对于考虑系统灵活性方面的研究，可以从以下几个方面展开：

1）现今的灵活资源配置方式大多以模型驱动方式产生的机理模型展开，数据驱动大多应用在不确定性建模等方面，如 SP 的概率分布或期望及 RO 的不确定集合的拟合，模型与数据驱动的结合类似串行交互模式，未有效发挥两者优势。

目前，分布式 RO 是考虑不确定性因素的电力系统调度的主要研究领域。而在模型与数据驱动的交互方式方面，并行方式的结果的权重值选取在一定程度上依赖于决策者的先验知识，增加了模型的主观性。而串行方式的构造较为简单，对于模型驱动与数据驱动的建模精度要求较高。应用时可聚焦于嵌入引导交互方式的研究。因此，后续研究可在准确刻画复杂不确定性建模的基础上，结合模数驱动的嵌入式交互调度模型展开研究。

2）现存的研究多是考虑需求侧与供应侧 2 方面的灵活资源，对于电网侧的网络传输灵活性的研究较少，且大多集中于研究节点的灵活性，对网络传输灵活性的考虑不够深入。

此外，如新能源大发的甘肃地区存在较为严重的断面受限问题，如何平衡新能源发电量及线路预留安全裕度也是亟待解决的问题。而从市场参与者利益博弈的角度出发，考虑互联网络阻塞及传输断面，实现多利益主体的资源优化配置也需大力发展电网传输灵活性资源调度方案。

3）随着电网的发展规划，灵活资源种类及数量都随之增多。可以预见的是，调度模型中考虑的灵活资源越多，可调度资源越多，电力系统灵活性越高。然而，众多灵活资源调节特性各异，这使得构建的调度模型过于复杂，传统的如 CPLEX 等商业求解器可能无法直接求解。因此，灵活性资源配置中需要考虑数据需求及计算代价等方面的影响。同时，发展高效的求解算法或结合智能优化算法进行求解对推动电力市场良性发展也具有切实意义。

参考文献　References

[1] 孙永辉，孟雲帆，葛磊蛟，等. 人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2239-2252.
SUN Yonghui, MENG Yunfan, GE Leijiao, et al. Application and prospect of microgrid operation optimization enabled by artificial intelligence[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2239-2252.

[2] 单文亮，刘　静，徐宪东，等. 基于可调鲁棒优化的工业园区供能系统自发电灵活性评估[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1402-1411.
SHAN Wenliang, LIU Jing, XU Xiandong, et al. Evaluation of the electricity flexibility of energy supply system in industrial park using adjustable robust optimization framework[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1402-1411.

[3] 徐子涵. 基于改进 CS 算法的主动配电网多种灵活资源协同规划[D]. 北京：华北电力大学，2021.
XU Zihan. Collaborative planning of multiple flexible resources in active distribution network based on improved CS algorithm[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2021.

[4] 陈锦鹏，胡志坚，陈嘉滨，等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3094-3104.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of

integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3104.

[5] 牛焕娜，钱 立，杨 璐，等. 计及灵活性辅助服务费用的配电网灵活型资源优化配置[J]. 电力自动化设备，2021，41(10)：52-59.
NIU Huanna, QIAN Li, YANG Lu, et al. Optimal allocation of flexible resources in distribution network considering cost of flexible auxiliary services[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 52-59.

[6] 刘 沆，赵海彭，文 明，等. 考虑负荷灵活分配的综合能源系统站-网-荷协同规划方法[J]. 高电压技术，2023，49(1)：118-127.
LIU Hang, ZHAO Haipeng, WEN Ming, et al. Station-grid-load collaborative planning method for integrated energy system considering flexible distribution of load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 118-127.

[7] 牛嘉琪. 计及灵活资源与需求响应的电-气-热-水综合能源系统日前优化[D]. 重庆：重庆理工大学，2022.
NIU Jiaqi. Day-ahead optimization of electric-gas hot-water integrated energy system with flexible resources and demand response[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Technology, 2022.

[8] 宋泽溟，冯 华，陈晓刚，等. 基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2318-2328.
SONG Zehao, FENG Hua, CHEN Xiaogang, et al. Low-carbon scheduling strategy of distributed energy resources based on node carbon intensity for distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2318-2328.

[9] 唐文虎，申悦晴，钱 瞳，等. 双碳目标下城市楼宇群能源系统灵活性量化分析与调控技术研究现状与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3423-3436.
TANG Wenhu, SHEN Yueqing, QIAN Tong, et al. Research review and prospects of quantitative analysis and regulation technique for flexible resources in urban energy system embedded with building clusters under dual carbon target[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3423-3436.

[10] 丁 一，加鹤萍，宋永华，等. 考虑风电与灵活资源互动的智能电网可靠性分析方法评述[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1517-1526.
DING Yi, JIA Heping, SONG Yonghua, et al. Review of reliability evaluation methods for the smart grid considering the interaction between wind power and flexible demand resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1517-1526.

[11] 俞拙非，刘 菲，刘瑞环，等. 面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J]. 中国电力，2022，55(4)：132-144.
YU Zhuofei, LIU Fei, LIU Ruihuan, et al. Resilience-oriented optimization of source-grid-load flexible resources in distribution systems: review and prospect[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 132-144.

[12] 任智君，郭红霞，杨 苹，等. 含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置[J]. 太阳能学报，2021，42(9)：33-38.
REN Zhijun, GUO Hongxia, YANG Ping, et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 33-38.

[13] 吴兆伟. 含高敏感负荷与灵活资源的主动配电网综合优化调度研究[D]. 长沙：湖南大学，2020.
WU Zhaowei. Research on comprehensive optimal dispatching of active distribution network with high sensitive load and flexible resources[D]. Changsha, China: Hunan University, 2020.

[14] 黄启航，马 雪，白左霞，等. 面向灵活资源配置的电力系统超短期优化调度[J]. 中国电力，2019，52(6)：104-110，120.
HUANG Qihang, MA Xue, BAI Zuoxia, et al. Ultra-short-term optimal scheduling of power system orienting to flexible resources configuration[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 104-110, 120.

[15] 张志彬. 需求侧灵活资源参与电网调频控制的模式与策略[D]. 青岛：青岛大学，2019.
ZHANG Zhibin. Mode and strategy for demand side flexible resources to participate in grid frequency modulation control[D]. Qingdao, China: Qingdao University, 2019.

[16] 孙 泽. 浙江电网用户侧灵活资源调度的风险评价研究[D]. 北京：华北电力大学，2019.
SUN Ze. Research on risk evaluation of flexible resource scheduling on user side of Zhejiang power grid[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.

[17] 马英浩，刘 琛，谢开贵，等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(14)：5429-5440.
MA Yinghao, LIU Chen, XIE Kaigui, et al. Review on network transmission flexibility of power system and its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5429-5440.

[18] 王洪坤，王守相，潘志新，等. 含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J]. 电力系统自动化，2018，42(15)：86-93.
WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 86-93.

[19] TOHIDI Y, HESAMZADEH M R, BALDICK R, et al. Transmission network switching for reducing market power cost in generation sector: a Nash-equilibrium approach[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 146: 71-79.

[20] 王成山，季 节，冀浩然，等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化，2022，46(4)：1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.

[21] 吕 凯. 随机环境下互联电网的源网荷协同调度优化研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2021.
LÜ Kai. Dispatch optimization of the inter-regional power grid under the uncertain environment considering the coordination of source-grid-load side[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2021.

[22] 李 灿. 促进风电消纳的直流跨区互联电网分层优化调度研究[D]. 长沙：湖南大学，2021.
LI Can. Research on hierarchical optimal scheduling of inter-regional power system with UHVDC for wind power accommodation[D]. Changsha, China: Hunan University, 2021.

[23] 韩为超，刘俊勇，向 月，等. 基于目标机会约束规划的储能容量优化配置模型[J]. 电力建设，2017，38(4)：71-78.
HAN Weichao, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. An optimal allocation model of energy storage capacity based on goal-chance constrained programming[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(4): 71-78.

[24] 鲁宗相，黄 瀚，单葆国，等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化，2017，41(9)：12-18.
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.

[25] 李海波，鲁宗相，乔 颖. 源荷储一体化的广义灵活电源双层统筹规划[J]. 电力系统自动化，2017，41(21)：46-54，104.
LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying. Bi-level optimal planning of generation-load-storage integrated generalized flexibility resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 46-54, 104.

[26] 赵 芳，杜兆斌. 敏感负荷对含新能源配网规划的影响[J]. 电力工程技术，2018，37(5)：56-63.
ZHAO Fang, DU Zhaobin. Impact analysis of voltage sensitive load on planning of distribution network with new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 56-63.

[27] 王 珂，姚建国，姚良忠，等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化，2014，38(20)：127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research

on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.

[28] 朱建全，李　颖，谭　伟. 基于特性融合的电力负荷建模[J]. 电网技术，2015，39(5)：1358-1364.
ZHU Jianquan, LI Ying, TAN Wei. Characteristic fusion based on electric load modeling[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1358-1364.

[29] 杨　燕，文福拴，李　力，等. 计及风险控制策略的电力系统可用输电容量决策[J]. 电力系统自动化，2012，36(4)：50-55.
YANG Yan, WEN Fushuan, LI Li, et al. Design of a photovoltaic grid and power quality compound control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 50-55.

[30] GUPTA C P, MILANOVIC J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 711-718.

[31] KANWAR N, GUPTA N, NIAZI K R, et al. Improved meta-heuristic techniques for simultaneous capacitor and DG allocation in radial distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 653-664.

[32] 李海波，鲁宗相，乔　颖，等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术，2015，39(6)：1672-1678.
LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678.

[33] 张　宁，卢　静，代红才. 源网荷储协调发展下我国电力系统灵活性资源展望[J]. 中国电力企业管理，2020(16)：44-47.
ZHANG Ning, LU Jing, DAI Hongcai. Prospects for flexible resources of China's power system under the coordinated development of source network, load and storage[J]. China Power Enterprise Management, 2020(16): 44-47

[34] 陆　昊. 新型电力系统中储能配置优化及综合价值测度研究[D]. 北京：华北电力大学，2021.
LU Hao. Research on energy storage plan optimization and comprehensive value measurement in the new power system[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2021.

[35] 武　震. 分布式储能系统关键技术研究[D]. 天津：天津大学，2014.
WU Zhen. Studies on key technologies of distributed energy storage system[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2014.

[36] 陈启鑫，房曦晨，郭鸿业，等. 储能参与电力市场机制：现状与展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：14-28.
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Participation mechanism of energy storage in electricity market: status quo and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 14-28.

[37] 李　强，潘　毅. 智能电网调度技术[M]. 北京：中国电力出版社，2017：138-171.
LI Qiang, PAN Yi. Dispatch technology in smart grid[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2017: 138-171.

[38] CHEN H H, FANG X, ZHANG R F, et al. Available transfer capability evaluation in a deregulated electricity market considering correlated wind power[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(1): 53-61.

[39] 刘鑫蕊，罗雨晴，侯　敏，等. 阶梯式碳交易的城市多能系统能量互补优化调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2275-2285.
LIU Xinrui, LUO Yuqing, HOU Min, et al. Energy complementation optimal scheduling strategy of urban multi-energy system with stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2275-2285.

[40] HERRMANN M, HOFMANN L. Enhancement of a control concept for parallel HVDC link operation to increase flexibility for offshore wind park grid connections[C]//Proceedings of 2021 12th International Renewable Energy Congress. Hammamet, Tunisia: IEEE, 2021: 1-8.

[41] FALVO M C, CERVONE A. Transmission grid flexibility assessment in electricity market: bulk system indices for the operational planning[C]// Proceedings of the 2nd IET Renewable Power Generation Conference. Beijing, China: IEEE, 2013: 2-45.

[42] 黄宇腾. 负荷形态分析与负荷管理优化研究[D]. 杭州：浙江大学，2013.
HUANG Yuteng. Research on load profile analysis and load management optimization[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2013.

[43] 关舒丰，王　旭，蒋传文，等. 基于可控负荷响应性能差异的虚拟电厂分类聚合方法及辅助服务市场投标策略研究[J]. 电网技术，2022，46(3)：933-943.
GUAN Shufeng, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Classification and aggregation of controllable loads based on different responses and optimal bidding strategy of VPP in ancillary market[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 933-943.

[44] 曾　丹，姚建国，杨胜春，等. 计及价格型负荷响应不确定性的概率潮流计算[J]. 电力系统自动化，2015，39(20)：66-71，97.
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Probabilistic load flow calculation considering price-elasticity load uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 66-71, 97.

[45] 郇政林. 电力系统多元灵活性资源优化运行与规划研究[D]. 北京：华北电力大学，2022.
XUN Zhenglin. Research on optimal operation and planning of multiple flexible resources in power systems[D]. Beijing, China: North China University of Electric Power, 2022.

[46] 肖定垚，王承民，曾平良，等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. 电网技术，2014，38(6)：1569-1576.
XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. A survey on power system flexibility and its evaluations[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1569-1576.

[47] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[C]// Proceedings of 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, Canada: IEEE, 2013: 1-11.

[48] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Evaluation of power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 922-931.

[49] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Assessment of power system flexibility: a high-level approach[C]//Proceedings of 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA: IEEE, 2012: 1-8.

[50] 詹勋淞，管　霖，卓映君，等. 基于形态学分解的大规模风光并网电力系统多时间尺度灵活性评估[J]. 电网技术，2019，43(11)：3890-3898.
ZHAN Xunsong, GUAN Lin, ZHUO Yingjun, et al. Multi-scale flexibility evaluation of large-scale hybrid wind and solar grid-connected power system based on multi-scale morphology[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3890-3898.

[51] 鲁宗相，李海波，乔　颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报，2017，37(1)：9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.

[52] ZHAO J Y, ZHENG T X, LITVINOV E. A unified framework for defining and measuring flexibility in power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 339-347.

[53] NOSAIR H, BOUFFARD F. Flexibility envelopes for power system operational planning[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 800-809.

[54] 赵　亮. 基于高敏感负荷供电可靠性的配电网预防性重构策略研究[D]. 长沙：湖南大学，2020.
ZHAO Liang. Research on preventive reconfiguration strategy of distribution network based on reliability of high sensitive load power supply[D]. Changsha, China: Hunan University, 2020.

[55] 鲁宗相，李海波，乔　颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化，2016，40(13)：147-158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility plan-

ning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.

[56] LIU H Z, SHEN X W, GUO Q L, et al. A data-driven approach towards fast economic dispatch in electricity-gas coupled systems based on artificial neural network[J]. Applied Energy, 2021, 286: 116480.

[57] TANG H, LV K, BAK-JENSEN B, et al. Deep neural network-based hierarchical learning method for dispatch control of multi-regional power grid[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(7): 5063-5079.

[58] 乔 骥，王新迎，张 擎，等. 基于柔性行动器–评判器深度强化学习的电–气综合能源系统优化调度[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：819-832.
QIAO Ji, WANG Xinying, ZHANG Qing, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-gas system with soft actor-critic deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 819-832.

[59] 杨 挺，赵黎媛，刘亚闯，等. 基于深度强化学习的综合能源系统动态经济调度[J]. 电力系统自动化，2021，45(5)：39-47.
YANG Ting, ZHAO Liyuan, LIU Yachuang, et al. Dynamic economic dispatch for integrated energy system based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 39-47.

[60] LI H P, HE H B. Learning to operate distribution networks with safe deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1860-1872.

[61] 刘 威，张东霞，王新迎，等. 基于深度强化学习的电网紧急控制策略研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(1)：109-119.
LIU Wei, ZHANG Dongxia, WANG Xinying, et al. A decision making strategy for generating unit tripping under emergency circumstances based on deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 109-119.

[62] 李 峰，王 琦，胡健雄，等. 数据与知识联合驱动方法研究进展及其在电力系统中应用展望[J]. 中国电机工程学报，2021，41(13)：4377-4389.
LI Feng, WANG Qi, HU Jianxiong, et al. Combined data-driven and knowledge-driven methodology research advances and its applied prospect in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4377-4389.

[63] 李亚鹏，韩 旭，于旭光，等. 模型和数据混合驱动的双边协商电力市场合约价格预测方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(18)：179-189.
LI Yapeng, HAN Xu, YU Xuguang, et al. Hybrid model-driven and data-driven approach to price forecasting in bilateral contract electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 179-189.

[64] WANG Q, LI F, TANG Y, et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4557-4568.

[65] 李永康，刘宝柱，胡俊杰. 基于数据驱动与时域仿真融合的电力系统暂态稳定快速评估[J]. 电网技术，2023，47(11)：4386-4395.
LI Yongkang, LIU Baozhu, HU Junjie. Rapid evaluation of power system transient stability based on fusion of data-driven and time-domain simulation[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4386-4395.

[66] LIU Y B, GAO S Y, QIU G, et al. A physics-informed action network for transient stability preventive control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1771-1774.

[67] GOKHALE G, CLAESSENS B, DEVELDER C. Physics informed neural networks for control oriented thermal modeling of buildings[J]. Applied Energy, 2022, 314: 118852.

[68] 黄天恩，郭庆来，孙宏斌，等. 模型-数据混合驱动的电网安全特征选择和知识发现关键技术与工程应用[J]. 电力系统自动化，2019，43(1)：95-101，208.
HUANG Tianen, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Hybrid model and data driven concepts for power system security feature selection and knowledge discovery: key technologies and engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 95-101, 208.

[69] 李承周，王宁玲，高舒潭，等. 基于信息物理融合的间接空冷机组冷端系统运行优化[J]. 中国电机工程学报，2021，41(5)：1771-1782.
LI Chengzhou, WANG Ningling, GAO Shutan, et al. CPS-based operation optimization study of indirect air-cooling unit cold end system under summer conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1771-1782.

[70] 孙 旭，邱晓燕，张志荣，等. 基于数据驱动的交直流配电网分布鲁棒优化调度[J]. 电网技术，2021，45(12)：4768-4777.
SUN Xu, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Distributed robust optimal dispatching of AC/DC distribution network based on data driven mode[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4768-4777.

[71] LIU L K, HU Z C, DUAN X Y, et al. Data-driven distributionally robust optimization for real-time economic dispatch considering secondary frequency regulation cost[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4172-4184.

[72] SOSSAN F, NAMOR E, CHERKAOUI R, et al. Achieving the dispatchability of distribution feeders through prosumers data driven forecasting and model predictive control of electrochemical storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1762-1777.

[73] Baskararaja G J R, Manickavasagam M R S. Subgraph Matching Using Graph Neural Network[J]. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 2012, 4(4): 274-278.

[74] KARNIADAKIS G E, KEVREKIDIS I G, LU L, et al. Physics-informed machine learning[J]. Nature Reviews Physics, 2021, 3(6): 422-440.

[75] SHI P P, ZENG Z, LIANG T S. Physics-informed ConvNet: learning physical field from a shallow neural network[J]. arXiv preprint arXiv, 2022: 2201.10967.



张大海
1973—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统监控、继电保护与电能质量方面的研究
E-mail: dhzhang1@bjtu.edu.cn

ZHANG Dahai
Ph.D., Professor



孙 锴(通信作者)
1995—，男，博士生
主要从事人工智能在电力系统调度任务中的应用方面的研究
E-mail: 21117014@bjtu.edu.cn

SUN Kai
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期 2023-05-06 修回日期 2023-08-10 编辑 程子丰