引用格式:蔡田田,陈军健,胡明,等.基于状态迭代的配用电业务计算资源需求预测与动态均衡方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(4):81-91.
Citation: CAI Tiantian, CHEN Junjian, HU Ming, et al. Computing resource demand forecasting and dynamic equilibrium method for distribution and consumption tasks based on state iteration[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(4):81-91.

基于状态迭代的配用电业务计算资源需求预测与动态均衡方法

蔡田田[1],陈军健[1],胡　明[2],李晓华[2],蔡泽祥[2]
(1.南方电网数字电网研究院,广东 广州 510670;2.华南理工大学电力学院,广东 广州 510700)

摘　要:当前,海量接入的配网侧分布式对象导致配用电终端所承载的业务呈现时间尺度的多样性与需求差异大等复杂特征,导致计算需求随机波动的复杂均衡问题。传统终端受限于固化的应用场景与相对确定的资源配置,仅能通过"以量换质"的方案来被动适应,无法从根源解决配用电终端计算资源供需不平衡这一持久性矛盾。对此,提出基于状态迭代的配用电业务计算资源需求预测与动态均衡方法。先对分析配用电业务场景属性及其业务特征,建立业务计算资源需求模型;再采用传统马尔可夫模型,预测其短期有效性;然后,利用状态一阶差分方程训练数据并跟踪状态波动情况,通过历史状态和预测状态进行状态迭代,避免长期预测的趋同性;最后,根据周期业务与非周期业务不同的时间尺度特性建立动态均衡模型,通过错峰平移与差异化调节达到计算资源需求不平衡度的最优配置。研究结果表明:基于一阶差分与状态迭代的改进马尔可夫模型兼具传统模型的短期准确性与数据波动的长期可跟踪性;业务动态均衡模型能有效降低计算资源需求的不平衡度,具备良好的资源不平衡度偏移应对能力。

关　键　词:配用电业务;计算资源;状态迭代;需求预测;动态均衡
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.04.008　　**中图分类号**:TM734　　**文章编号**:1673-9140(2025)04-0081-11

Method of demand forecasting and dynamic equilibrium of computing resources for grid distribution and consumption tasks based on state iteration

CAI Tiantian[1], CHEN Junjian[1], HU Ming[2], LI Xiaohua[2], CAI Zexiang[2]
(1.Digital Grid Research Institute, China Southen Power Grid, Guangzhou 510670, China;
2.School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510700, China)

Abstract: Distributed objects on the distribution side of the network are currently massively assessed so that the tasks carried by the grid distribution and consumption terminal present the characteristics of multiple time scales and large differences in demand, which leads to the complex equilibrium problem of random fluctuation in the computing resource demand. Traditional terminals are limited by the fixed application scenarios and relatively certain resource allocation, and the terminals can only adapt passively through the "quantity for quality" method, which is unable to solve the persistent contradiction of imbalance between the supply and demand of computing resources in terminals from the root. Therefore, a method of demand forecasting and dynamic equilibrium of computing resources for grid distribution and consumption tasks based on state iteration is proposed. Firstly, the task computing resource demand model is established based on the analysis of scenario attributes and characteristics of grid distribution and consumption tasks. Secondly, the short-term effectiveness forecasting is predicted by the traditional Markov model. Then, the first-order difference equations of the state are used to train the data and track the state fluctuation. The historical state and the forecasted state are used for state iteration to avoid the convergence of long-term forecasting. Finally, a dynamic

收稿日期:2024-09-16;**修回日期**:2024-12-27
基金项目:南方电网公司科技项目(670000KK52220001);国家重点研发计划(2023YFB4204400)
通信作者:李晓华(1975—),女,博士,教授,主要从事高压直流输电、电力物联网等方面的研究;E-mail:eplxh@scut.edu.cn

equilibrium model is established according to the time-scale features of cyclical and non-cyclical tasks. The optimal configuration of the imbalance in computing resource requirements is achieved by shifting staggered peaks and adjusting differentiation. The results have shown that the improved Markov model based on first-order difference and state iteration has the short-term accuracy of the traditional model and the long-term traceability of data fluctuations. The dynamic equilibrium model can effectively reduce the imbalance of resource demand for computing resources and show good ability to cope with resource imbalance deviation.

Key words: grid distribution and consumption task; computing resource; state iteration; demand forecasting; dynamic equilibrium

在电力系统新能源浪潮与数字化浪潮的双浪潮叠加背景下，分布式新能源与智能化设备广泛接入配电网[1-3]。配用电终端作为承载此类对象海量接入的信息化、自动化、智能化服务的关键节点之一，已广泛应用于配电网态势感知、运行运营优化、能源风险控制等源-网-荷-储智慧联动场景的服务中[4]。与此同时，海量对象的涌入也令终端所承载的业务呈现时间尺度多样性与需求差异大等复杂特征[5-6]。一方面，这些面向对象设计的配用电业务存在差异明显的参数表征，在计算资源需求上表现出了极大的波动性[7]和不确定性[8-9]，增加了跟踪预测的复杂度[10]；另一方面，这些业务所带来的新增计算资源需求将加剧终端资源的供需矛盾[11-14]，令资源供需难以维持均衡[15-16]。传统配用电终端基于确定性准则和固定性边界的配置要求，其仅能通过“以量换质”来被动适应来实现均衡，无法从根源上解决终端计算资源供需不均衡这一持久性矛盾。得益于容器、微服务等技术的接入，配用电终端逐渐向自适应、软件定义等方面演变，这使资源不再必须根据特定边界与固定场景来进行刚性配置，而是建立在业务需求与资源供给的柔性配置上。基于这些背景，为重构新型电力系统下配用电终端的业务处理框架，亟待根据配用电终端承载业务的属性特征，建设有序性与可预见性的业务预测与均衡方案，实现新型电力系统配网的自动化发展[17-19]。

传统计算资源需求预测主要面向历史数据。文献[20]建立了云虚拟机资源热点分类机制，为负载预测与动态调度提供了迁移对象与目标。文献[21]提出了基于云虚拟机历史数据预测方法，该方法还可将高负载物理节点业务迁移至低负载物理节点。文献[22]提出了对多时间尺度业务拆解融合下的时序特征进行了分析，进而实现长期资源负载预测。文献[23]提出了基于容器历史数据与神经网络大模型的后续预测方法，该方法对实现动态预测与资源调度颇具参考价值。但随着海量分布式新能源的接入，兼顾历史数据挖掘与预测数据再利用的方法成为提高需求预测准度的研究热点之一。

目前，对计算资源需求均衡的研究主要着力于业务特性的分析与建模上。在业务特性分析方面：文献[24]探讨了基于业务特性来动态分配处理单元的可行性；文献[25]基于业务时间特征提出了改变传统先来先服务的队列式调度的均衡方案；文献[26-27]从业务特性耦合角度进行簇划分，提出了一种基于亲和性的业务调度算法。这些研究对业务特征的辨识均有所欠缺，导致其均衡方案均未体现差异化处理过程。在业务特性建模方面：文献[28]基于周期性与相似性对业务序列进行了需求建模；文献[29]对智能配电台区的业务进行了计算资源需求的评估与建模；文献[30]根据业务特性与逻辑组成构建了资源评估后的调配方案。虽然这些研究均对业务进行了需求建模，但其解决方案仍停留在被动评估层面，缺少主动层面的策略应对。

针对配用电终端在计算资源需求随机波动的情况下难以根本解决供需不平衡的持久性问题，本文提出基于状态迭代的配用电业务计算资源需求预测与动态均衡方法。先分析配用电业务场景属性与参数需求，建立业务计算资源需求模型；再根据区段划分状态，构建基于一阶差分的改进马尔可夫模型；然后，通过历史状态和预测状态的迭代更新，实现后续状态的精准跟踪；最后，根据周期业务与非周期业务的不同时间尺度特性建立动态均衡模型，通过差异化调节降低计算资源需求不平衡度。

1 配用电业务特性分析及计算资源需求模型

作为系统信息化、自动化、智能化升级改造的有效载体，对配用电业务特性进行分析与计算资源需求建模是后续预测与均衡的关键。对配用电业务场景属性、业务特征及需求建模这3方面进行关键要素分析，其过程如图1所示。

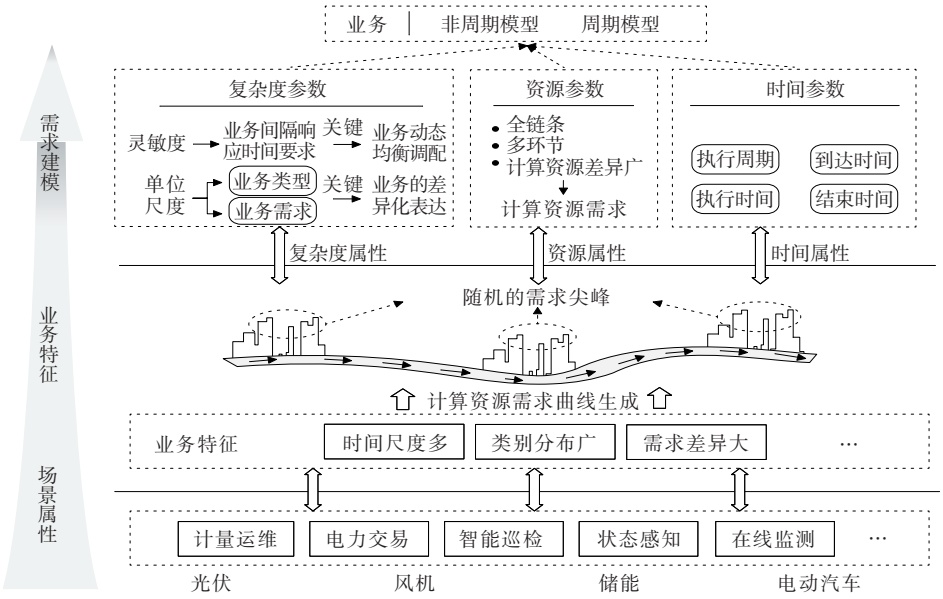

图 1　配用电业务计算资源需求及其特性分析过程

Figure 1　Flow chart of computing resource demand and feature analysis of grid distribution and consumption tasks

1.1　配用电业务场景属性分析

配网侧为用户所提供的电能生产、交易、运输、消费、存储等全环节的信息化、自动化、智能化的服务统称为配用电业务。该业务通过多源采样数据的逻辑组合构成[31]，其涉及的应用程序较多。随着能源战略转型和物联网技术的发展，海量分布式新能源如光伏、风机、储能及电动汽车等大量接入配电网[32]。在异构多源业务数据爆发式增长的同时，配用电业务在所覆盖场景内也呈现出体量大、种类多的特征。目前，典型配用电业务在电量信息全链条利用环节中可分为采集、监控、分析、故障与计量等类别，其所包含的典型配用电业务见表 1。

表 1　典型配用电业务

Table 1　Typical grid distribution and consumption tasks

业务类别	配用电业务
采集	模拟量采集、开关量采集等
监控	状态监测、电能质量监测等
分析	拓扑分析、状态估计、安全稳定分析等
故障	故障有效隔离、非故障区域恢复等
计量	线损分析、集中抄表等

1.2　配用电业务特征分析

从配用电业务的场景属性分析可知，其海量数据的感知应用以面向对象设计为原则。这一设计使得其配用电业务具有种类繁多的计算资源需求，各业务在数据处理时的资源消耗与内存占用情况也不尽相同。综合来看，配用电业务表现出时间尺度多、类别分布广、需求差异大等新特征。因此，配用电业务的整体计算资源需求具有随机性与波动性。其中，时间尺度多与类别分布广这 2 类特征对计算资源需求的随机性有显著影响，其使得各时段业务的分布具有不可预知性，为业务计算资源需求的预测带来挑战；需求差异大这个特征对计算资源需求波动性有显著影响，导致不同时段的资源需求差异明显，其使得业务计算资源需求难以实现动态均衡。为主动应对该问题，亟待从配用电业务特征的角度出发，构造多维度、细颗粒度的计算资源需求模型。

1.3　配用电业务计算资源需求模型

配用电业务的模型表征包含计算资源需求、执行周期等，通常其可近似为周期阶跃函数[33]。基于该种表征方式，本文进一步从时间维度和需求维度出发，将配用电业务划分为周期类业务与非周期类业务模型 2 类，结合分布式新能源主导下配电网对数据波动处理的短时效性需求，分别从毫秒级、秒级角度出发，对其进行研究与分析。

1）周期类业务模型。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{ms}} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{\alpha_1=0}^{N} P_{\mathrm{E},i}^{\mathrm{cal}}\begin{bmatrix}\varepsilon(t-\alpha_1 T_i)- \\ \varepsilon(t-\alpha_1 T_i-\tau_i)\end{bmatrix} \\ P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s}} = \sum_{j=1}^{J}\sum_{\alpha_2}^{N} P_{\mathrm{E},j}^{\mathrm{cal}}\begin{bmatrix}\varepsilon(t-\alpha_2 T_j)- \\ \varepsilon(t-\alpha_2 T_j-\tau_j)\end{bmatrix} \end{cases} \tag{1}$$

式中，t 为时间；$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{ms}}$、$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s}}$ 分别为毫秒级、秒级周期业务的总计算资源需求；I、J 分别为毫秒级、秒级周期业务数；α_1、α_2 分别为毫秒级周期业务 i、秒级周期业务 j 在时间区段内的总阶跃数量；N 为阶跃总数

量；$P_{\mathrm{E},i}^{\mathrm{cal}}$、$P_{\mathrm{E},j}^{\mathrm{cal}}$分别为毫秒级周期业务$i$、秒级周期业务$j$的计算资源需求[34]；$T_i$、$T_j$分别为毫秒级周期业务$i$、秒级周期业务$j$的执行周期；$\tau_i$、$\tau_j$分别为毫秒级、秒级周期业务$i$、$j$的执行时间；$\varepsilon(\cdot)$为阶跃函数。

2）非周期业务模型。

针对非周期业务模型，采用到达时间t_{ar}、执行时间τ_k与结束时间t_{ddl}来进行建模，即

$$A_k = f\left(t_{\mathrm{ar}}, \tau_k, t_{\mathrm{ddl}}, A_k^{\mathrm{cal}}\right) \tag{2}$$

式中，A_k为非周期业务k的特征；A_k^{cal}为非周期业务k的计算资源需求。

在周期业务与非周期业务这2种模型的基础上，构造综合计算资源需求曲线及平均计算资源需求函数，即

$$\begin{cases} S_{\mathrm{cal}} = P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{ms}} + P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s}} + \sum_{k=1}^{K} A_k^{\mathrm{cal}} \\ S_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ave}} = \dfrac{\int_t S_{\mathrm{cal}} \mathrm{d}t}{t} \end{cases} \tag{3}$$

式中，S_{cal}为综合计算资源需求；K为非周期业务的总数；$S_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ave}}$为平均计算资源需求。

为将连续波动的计算资源需求转化为相对稳定的离散状态量，根据其与平均计算资源需求构建等时间标准差序列，即

$$\begin{cases} \eta_{\mathrm{ba}} = \sqrt{\sum_{\Delta t \to 2\Delta t} \left(S_{\mathrm{cal}} - S_{\mathrm{cal}}^{\mathrm{ave}}\right)^2} \\ M_{\mathrm{cond}} = \begin{cases} 1, \eta_{\mathrm{ba}} < \eta_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{thre}} \\ 2, \eta_{\mathrm{ba}} \geqslant \eta_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{thre}} \end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

式中，η_{ba}为Δt时段内计算资源需求与平均计算资源需求的标准差；$\eta_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{thre}}$为划分下降与上升区段的阈值；$M_{\mathrm{cond}}$为状态变量（当$M_{\mathrm{cond}}=1$时，计算资源需求不平衡度尚可接受；当$M_{\mathrm{cond}}=2$时，计算资源需求不平衡情况较为严重）。

2 配用电业务计算资源需求预测模型

配用电业务的特征性和差异性造成了其执行周期上的差异，使得计算需求的不平衡度集中于业务高并发期，即公共周期时段。故从统计角度出发，可依据配用电业务的计算资源需求，构建具有季节性和随机性特征的状态序列。配用电业务计算资源需求的跟踪预测是后续针对目标区段实现均衡调整的关键之一。本文在传统马尔可夫模型基础上，提出基于一阶差分及序列迭代更新的改进马尔可夫模型。

2.1 传统马尔可夫预测模型

马尔可夫预测模型是一种预测未来事件发生概率的方法。该模型根据事件的当前状态预测将来其各个阶段的状态。在每一步中，系统根据状态转移的概率分布来进行状态间的相互迁移。

设某一系统状态序列Y为

$$Y = \{y_1, y_2, \cdots, y_n\} \tag{5}$$

式中，y_i为序列Y中的第i个数据所表征的状态；n为序列Y中总的数据量。

根据预测状态仅与前一次状态相关的原则，得状态转移矩阵$\boldsymbol{P}^1$，即

$$\boldsymbol{P}^1 = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中，p_{ij}为第i个数据所表征状态向第j个数据所表征状态的转移概率。

对下一状态概率分布向量$\boldsymbol{x}_{n+1}$进行预测，即

$$\boldsymbol{x}_{n+1} = \boldsymbol{x}_n \boldsymbol{P}^1 \tag{7}$$

据此，可得下一阶段状态的预测情况。根据传统马尔可夫预测模型，对于后续的预测情况均采用k步状态转移矩阵进行描述，即

$$\boldsymbol{x}_{n+k} = \boldsymbol{x}_n \boldsymbol{P}^k = \boldsymbol{x}_1 \boldsymbol{P}^{n+k} \tag{8}$$

传统马尔可夫模型具有一定的局限性，无法适应状态变化速率突变、数值波动剧烈的情况。同时，该模型仅利用历史状态，可能导致其预测的后效性不佳；传统马尔可夫模型中的状态数值会多次经历同一状态区间，这将导致模型进入平稳分布而无法进行有效预测，即出现后续预测数据的趋同性过强的问题。

2.2 基于一阶差分及序列迭代更新的改进马尔可夫模型

本文构造基于一阶差分及序列迭代更新的改进马尔可夫模型。该模型既可以消除离散状态之间的绝对差异，减少误差累积；还可以保证对预测数据的持续跟踪，降低后效性趋同性。其流程如图2所示。在图2中，$\eta_{\mathrm{ba}}(y_i)$为状态y_i的需求，$i=1, 2, \cdots, n$；$\Delta\eta_{\mathrm{ba}}(y_i)$为状态$y_i$的需求的一阶差分，$i=1, 2, \cdots, n$。

从图2中可以看出，为消除数据波动，避免序列预测极端发展，该算法先对配用电业务计算资源需求状态序列进行一阶差分处理；再采用该处理后的序列，构造一步状态转移矩阵；最后，将逐步预测状

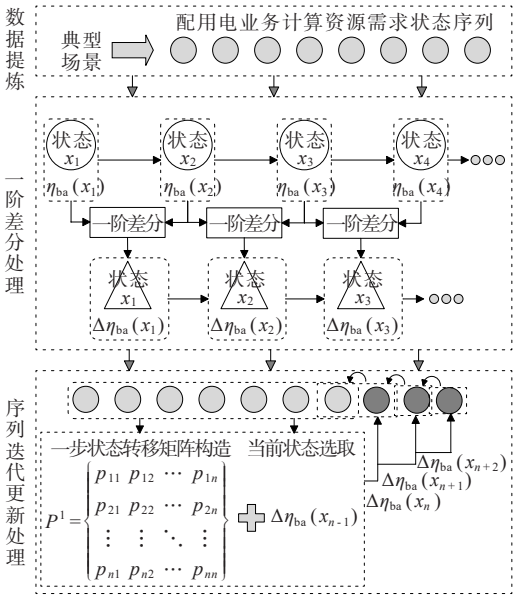

图 2　基于一阶差分及序列迭代更新的改进马尔可夫预测流程

Figure 2　Improved Markov forecasting flowchart based on first-order difference and iterative sequence updating

态加入原状态序列实现动态预测。其详细步骤可分为3步。

1）构建配用电业务计算资源需求标准差序列，根据一阶差分处理建立状态序列 $\Delta\eta_{ba}(Y)$，即

$$\Delta\eta_{ba}(Y)\leftarrow\left\{\Delta\eta_{ba}(y_1),\Delta\eta_{ba}(y_2),\cdots,\Delta\eta_{ba}(y_n)\right\} \tag{9}$$

参考式(6)，并根据式(9)状态序列构造一步状态转移矩阵 $\boldsymbol{P}^1$。

2）为便于后续状态转移矩阵的计算，将当前不平衡状态 $\Delta\eta_{ba}(y_n)$ 用矩阵 $\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_n)$ 描述，$\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_n)$ 为一个 1×2 布尔矩阵，即

$$\begin{cases}\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_n)=(1,0),M_{cond}(\Delta\eta_{ba}(y_n))=1\\ \Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_n)=(0,1),M_{cond}(\Delta\eta_{ba}(y_n))=2\end{cases} \tag{10}$$

式中，$\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_n)=(1,0)$、$\Delta\eta_{ba}(y_n)=(0,1)$ 分别为当前状态为资源需求不平衡下降区段与上升区段。

根据当前状态及一步状态转移矩阵计算下一阶段状态预测值，即

$$\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_{n+1})\leftarrow\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_n)\boldsymbol{P}^1 \tag{11}$$

式中，$\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_{n+1})$ 为下一阶段状态。

3）经过状态转移预测计算后的 $\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y^{n+1})$ 是非布尔矩阵，同样根据式(10)将其转化为 1×2 的布尔矩阵。将预测后的状态更新至原状态序列，并根据更新后的一步状态转移矩阵 $\boldsymbol{P}^1$ 形成配用电业务计算资源需求状态的迭代预测。

$$\Delta\eta_{ba}(y_{n+k})=\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_{n+k-1})\boldsymbol{P}^1 \tag{12}$$

式中，$\Delta\eta_{ba}(y_{n+k})$ 为第 k 次预测的状态；$\Delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ba}(y_{n+k-1})$ 为第 $k-1$ 次预测状态的布尔矩阵。

再对后续预测的状态往复增添至该一步状态转移矩阵以实现状态序列的迭代更新；最后，结合传统马尔可夫链短期步数预测优势，对预测序列进行预测。

3　配用电业务计算资源需求动态均衡模型

计算资源需求不平衡区段的跟踪为均衡调整提供目标区间，本文从计算需求的资源角度出发，通过目标区段业务统一均衡调度来确保业务计算需求与终端资源供给的匹配：一方面，根据周期业务的互相配合建立基于错峰平移的周期类业务动态均衡模型；另一方面，构建满足非周期业务实时性的不平衡度最小的非周期业务动态均衡模型。这2类模型均以计算资源需求的不平衡度作为目标优化函数，并以计算时长作为约束。其中，计算时长为计算需求优化的判断节点，为业务转移调整提供可行边界；在此基础上，从资源状态与最优调度的角度实现计算资源的整体优化，进而更新时间的持续迭代。

3.1　周期业务动态均衡模型

根据周期业务执行周期的特点，建立基于错峰平移原则的动态均衡模型：先对配用电业务计算资源需求进行排序，并定义综合计算资源需求最低的第1个时刻点；然后，依次对最大计算资源需求的配用电业务进行错峰调整，并根据调整后的计算资源需求更新其新的最低的第2个时刻点；最后，重复错峰调整步骤，在满足计算资源需求不平衡度最小的条件下结束。该算法流程如图3所示。

其详细步骤如下：

1）定义资源需求不平衡上升区段中综合计算资源需求最低的首个时刻点 $t_{low}^{s_1}$。并对配用电业务按计算资源需求由大至小进行排序 $P_{E,j}^{cal,i}$ 为排序后第 i 个数值，则定义为该序列 $P_{E,j}^{rank}=\left\{P_{E,j}^{cal,1},P_{E,j}^{cal,2},\cdots,P_{E,j}^{cal,n}\right\}$。

2）对1）中最大计算资源需求的配用电业务 $P_{E,j}^{cal_max}$ 进行第1次错峰平移。当移动到 $t_{low}^{s_1}$ 小于该业务的执行周期时，有

$$P_{E,cal}^{s_1}=\sum_{j=1}^{J}\sum_{\alpha_2=0}^{N}P_{E,j}^{cal,1}\begin{bmatrix}\varepsilon(t-t_{low}^{s_1}-\alpha_2T_j)-\\ -\varepsilon\begin{pmatrix}t-t_{low}^{s_1}-\\ \alpha_2T_j-\tau_j\end{pmatrix}\end{bmatrix} \tag{13}$$

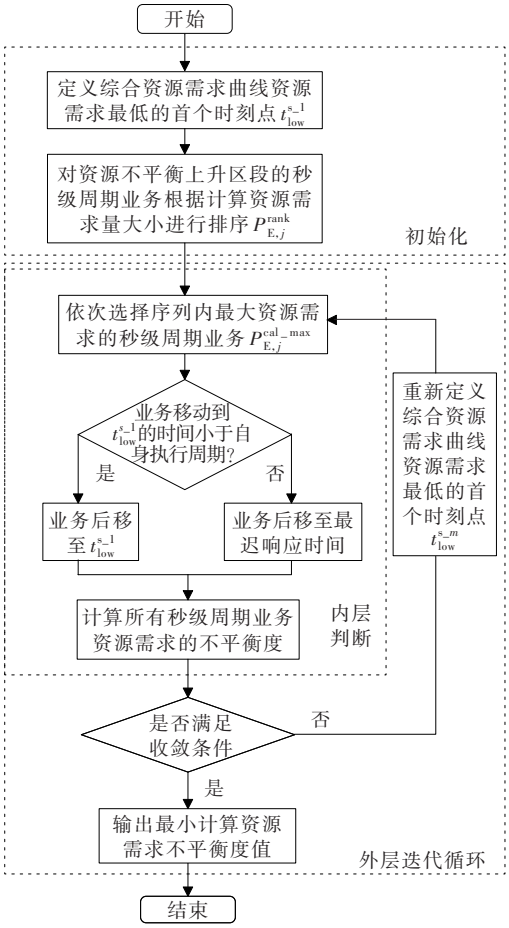

图 3 周期业务动态均衡算法流程

Figure 3 Flow chart of dynamic equilibrium algorithm in cyclical task

式中，$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s_1}}$ 为首次错峰平移后的综合计算资源需求。

当最大计算资源需求的配电业务 $P_{\mathrm{E},j}^{\mathrm{cal},1}$ 移动到该业务执行周期时，以该业务执行周期作为错峰平移的目标点，即

$$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s_1}}=\sum_{j=1}^{J}\sum_{\alpha_2=0}^{N}P_{\mathrm{E},j}^{\mathrm{cal},1}\left\{\begin{array}{l}\varepsilon\left[\begin{array}{l}t-t_{M=2}-\\(T_j-\tau_j)-\alpha_2T_j\end{array}\right]-\\\varepsilon\left[\begin{array}{l}t-t_{M=2}-(T_j-\tau_j)-\\\alpha_2T_j-\tau_j\end{array}\right]\end{array}\right\} \tag{14}$$

式中，$t_{M=2}$ 为待调整区段的起始时刻点。

3）重新定义综合资源需求最低的首个时刻点，可得最低时刻点序列 $t_{\mathrm{low}}^{\mathrm{s_}m}$；根据最低时刻点序列 $t_{\mathrm{low}}^{\mathrm{s_}m}$ 重复步骤 2）实现迭代优化，优化目标与相关约束分别为

$$\min\eta_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{s}}=\sum_{t=1}^{T}\omega_t^{\mathrm{s}}\left(P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s_}m}-P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s_ave}}\right)^2 \tag{15}$$

$$\mathrm{s.t.}\left\{\begin{array}{l}C_1:\ \max(P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s_}m})\leqslant C_{\mathrm{cal}}\\C_2:\ t_{\mathrm{low}}^{\mathrm{s_}m}=\left\{\begin{array}{l}t_{\mathrm{low}}^{\mathrm{s_}m},\ t_{\mathrm{low}}^{\mathrm{s_}m}\leqslant\alpha_2T_j\\T_j-\tau_j,\ t_{\mathrm{low}}^{\mathrm{s_}m}>\alpha_2T_j\end{array}\right.\end{array}\right. \tag{16}$$

式（15）、（16）中，$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s_}m}$ 为第 m 次错峰平移后区段中的综合计算资源需求；$t_{\mathrm{low}}^{\mathrm{s_}m}$ 为配电业务每次错峰平移的目标最低时刻点序列；$\eta_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{s}}$ 为综合计算资源需求与平均计算资源需求差的平方和；ω_t^{s} 为每一计算资源需求值的时间占比；$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{s_ave}}$ 为区段内业务的平均计算资源需求；C_{cal} 为资源供给量。

约束 C_1 表示错峰平移调整后的综合计算资源需求最大值不得超过资源供给量 C_{cal}；约束 C_2 表示错峰平移需保证业务在每个执行周期内均有采样。

3.2 非周期业务动态均衡模型

本文提出的周期业务动态均衡模型可有效降低计算资源需求不平衡度。但受限于非周期业务的突发性，需要对非周期业务执行时段内的周期业务进行区分时间尺度的差异化调节。

根据非周期业务突发性与实时性需求，建立区分周期业务时间尺度的差异化动态均衡模型：先定义非周期业务时段内不同时间尺度的周期业务队列；再根据短执行周期业务的时间间隔短的特征，部分后移其目标时段，其后移时间为 $\Delta T_{\mathrm{d}}^{\mathrm{bm}}$；然后，根据长执行周期的时间间隔长的特征，整体后移其目标时段，其后移时间为 $\Delta T_{\mathrm{l}}^{\mathrm{bm}}$；最后，以计算资源需求不平衡度最小为目标，对周期业务模型进行迭代优化求解。

在非周期业务时段内，短执行周期业务的部分后移与长执行周期业务的全部后移均可使该时段内周期业务的最末阶跃采样波形后移，即

$$\left\{\begin{array}{l}\Delta P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d}(A)}=P_{\mathrm{E},p}^{\mathrm{cal}}\left[\begin{array}{l}\varepsilon\left(t-\alpha_3T_p-\Delta T_d^{\mathrm{bm}}\right)-\\\varepsilon\left(t-\alpha_3T_p-\Delta T_d^{\mathrm{bm}}-\tau_p\right)\end{array}\right]\\\Delta P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{l}(A)}=P_{\mathrm{E},q}^{\mathrm{cal}}\left[\begin{array}{l}\varepsilon\left(t-\alpha_4T_q-\Delta T_l^{\mathrm{bm}}\right)-\\\varepsilon\left(t-\alpha_4T_q-\Delta T_l^{\mathrm{bm}}-\tau_q\right)\end{array}\right]\end{array}\right. \tag{17}$$

式中，$\Delta P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d}(A)}$、$\Delta P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{l}(A)}$ 分别为调整后的短执行周期业务与长执行周期业务；$P_{\mathrm{E},p}^{\mathrm{cal}}$、$P_{\mathrm{E},q}^{\mathrm{cal}}$ 分别为短响应周期业务 p 与长响应周期业务 q 的计算资源需求；α_3、T_p、τ_p 分别为短执行周期业务 p 的阶跃数、执行周期与执行时间；α_4、T_q、τ_q 分别为长执行周期业务 q 的阶跃数、执行周期与执行时间。

同样地，以最小化计算资源需求不平衡度为优化目标，其目标函数为

$$\begin{cases} \min \eta_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{d_l}} = \sum_{t=1}^{T} \omega_t^{\mathrm{d_l}} \left(P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d_l}} - P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d_l_ave}} \right)^2 \\ A_{\mathrm{cal}} = A_k^{\mathrm{cal}} \left[\varepsilon(t - t_{\mathrm{ar}}) - \varepsilon(t - t_{\mathrm{ar}} - \tau_k) \right] \\ P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d_l}} = \Delta P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d}(A)} + \Delta P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{l}(A)} + A_{\mathrm{cal}} + \\ \qquad \sum_{d=1}^{D} P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d}(\neg A)} + \sum_{l=1}^{L} P_{\mathrm{E,cal}}^{l(\neg A)} \end{cases} \tag{18}$$

相关约束分别为：

$$C_3\text{: } \max\left(P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d_l}} \right) \leqslant C_{\mathrm{cal}} \tag{19}$$

$$C_4\text{:} \begin{cases} \Delta T_{\mathrm{d}}^{\mathrm{bm}} \leqslant \tau_p \\ \Delta T_{\mathrm{l}}^{\mathrm{bm}} \leqslant \tau_q \end{cases} \tag{20}$$

$$C_5\text{:} \begin{cases} \Delta T_{\mathrm{d}}^{\mathrm{bm}} + \alpha_3 T_p \leqslant t_2^{\mathrm{end}} - \tau_p \\ \Delta T_{\mathrm{l}}^{\mathrm{bm}} + \alpha_4 T_q \leqslant t_2^{\mathrm{end}} - \tau_q \end{cases} \tag{21}$$

式(18)～(21)中，$\eta_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{d_l}}$为非周期业务时段内综合计算资源需求与平均计算资源需求差的平方和；A_{cal}为非周期业务的计算资源需求；$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d_l}}$为非周期业务动态均衡模型调整后区段内总计算资源需求曲线；$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d}(\neg A)}$与$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{l}(\neg A)}$分别为短执行周期与长执行周期未调整部分的计算资源需求；$\omega_t^{\mathrm{d_l}}$为每一计算资源需求值的时间占比；$P_{\mathrm{E,cal}}^{\mathrm{d_l_ave}}$为区段的平均计算资源需求。

约束C_3表示调整后的总计算资源需求最大值不得超过资源供给量C_{cal}；约束C_4表示后移时间不超过周期业务的执行周期；约束C_5表示周期业务躲过非周期业务不能跨越当前区段最后时刻点t_2^{end}。

4　算例分析

本文所提配用电业务计算资源需求预测与动态均衡方法基于单配用电终端构建，以实际业务配置及可响应场景变化的TLY2213终端为例，旨在为具有数据共性和各异需求的多种配用电终端提供从内部机制出发的详细算例，进而为全局多终端组成的“云边协同”提供底层能力框架。

4.1　典型场景构造

为验证本文所提方法的有效性和实用性，针对涵盖多场景、多设备，可搭载采集、监控、分析、计量、故障等业务的配用电终端TLY2213展开研究，对其所承载的典型配用电业务展开算例分析。TLY2213配电终端架构示意如图4所示，其毫秒级与秒级的业务参数分别见表2、3。

感知层负责配用电终端管辖场景下数据的收集与后续接入对象的识别；硬件层组织异构单元，向业务执行提供计算等基础算力资源；操作系统层以容器为核心媒介，为资源输送及数据处理提供可靠运行环境；应用层基于微服务架构，根据数据特征需求开放配用电业务处理。

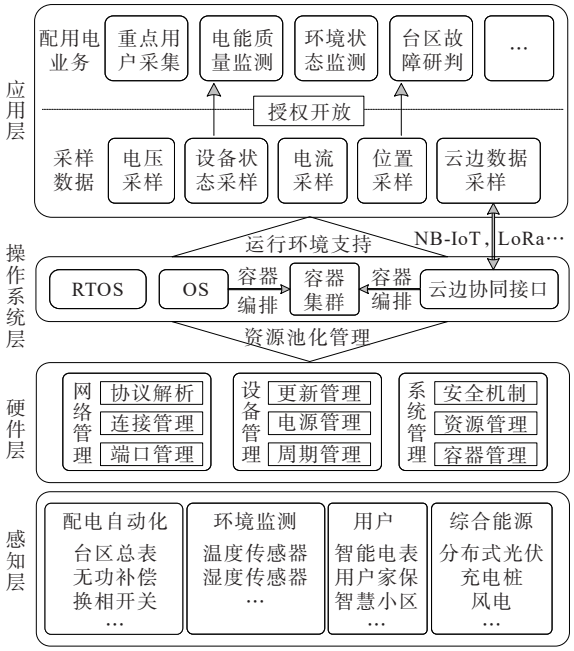

图4　TLY2213配用电终端架构示意

Figure 4　Schematic diagram of TLY2213 grid distribution and consumption terminal architecture

表2　毫秒级周期业务参数

Table 2　Millisecond-cyclical task parameters

毫秒级周期业务	执行时间/ms	执行周期/ms	计算资源需求/MB
模拟量采集	10	50	1
开关量采集	10	50	1
重点用户采集	20	100	1
电能表运行状态监测	50	200	3
电能质量监测	50	200	3
剩余电流动保监测	100	500	2
变压器状态监测	20	600	2
环境状态监测	20	800	2
终端参数查询变更	20	500	2

表3　秒级周期业务参数

Table 3　Second-cyclical task parameters

秒级周期业务	执行时间/s	执行周期/s	计算资源需求/MB
台区事件属性记录	0.20	1.0	1
台区网络拓扑管理	0.20	1.0	1
台区故障研判	0.20	1.0	1
台区能效管理	0.25	2.0	2
台区负荷接入管理	0.50	3.0	2
台区分布式电源接入管理	1.00	5.0	3
终端内嵌芯片检测	1.00	5.0	2
终端数据交互安全加密	2.00	5.0	4

4.2 配用电业务计算资源需求预测结果分析

计算资源需求预测需大量数据进行训练，选取0～300 s作为一阶差分与序列迭代更新的改进马尔可夫预测模型样本，并结合文4.1典型场景构造中的各业务参数，对后续100 s内资源需求状态进行预测，资源需求不平衡状态预测对比如图5所示。

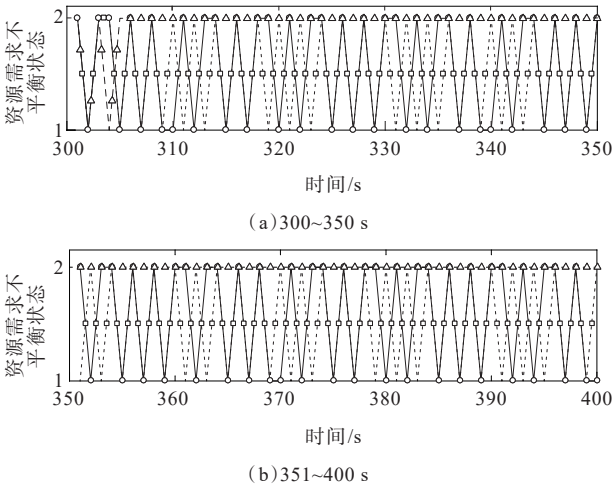

图5 资源需求不平衡状态预测对比

Figure 5 Comparison of imbalanced resource demand forecasting

从图5中可以看出，该改进马尔可夫预测模型的预测状态与实际资源需求的不平衡状态基本一致。该模型短期预测前10步的预测准确率接近100%；长期预测的状态变化也基本符合实际。从图5中还可看出，传统马尔可夫预测模型在5步转移后的状态趋同，其预测的后效性与可行性均不佳。因此，本文所建立的基于一阶差分及序列迭代更新的改进马尔可夫模型兼具传统模型的短期准确性与数据波动的长期可跟踪性。

受限于数据规模，基于一阶差分及序列迭代更新的改进马尔可夫模型在本文算例中的中后期预测精度上存在一定误差。但其可为未来多时间尺度、多颗粒度配用电业务的精细跟踪提供基础，为未来海量对象接入后所造成的计算需求显著波动提供可靠的预测方案，提高配用电终端实时状态跟踪的可靠性。

4.3 周期业务动态均衡模型结果分析

分析文4.2计算资源需求预测波形，对典型资源需求不平衡严重区段315～316 s进行分析。该波形分析指标包括波峰个数、相对峰值差与数据波动趋势：

1）波峰定义为资源需求值超过均值1.5倍之处；

2）相对峰值差定义为调节前、后波峰处资源下降最大值；

3）数据波动趋势定义为资源需求值与均值的接近程度。

在MATLAB数值软件上进行仿真分析，调整后的周期业务动态均衡对比如图6所示，周期类的计算资源需求不平衡度见表4。

从图6中可看出，毫秒级周期业务与综合周期业务调整后的波峰个数分别从6、4降为4、0；三类需求曲线的相对峰值差下降效果显著，其中综合周期

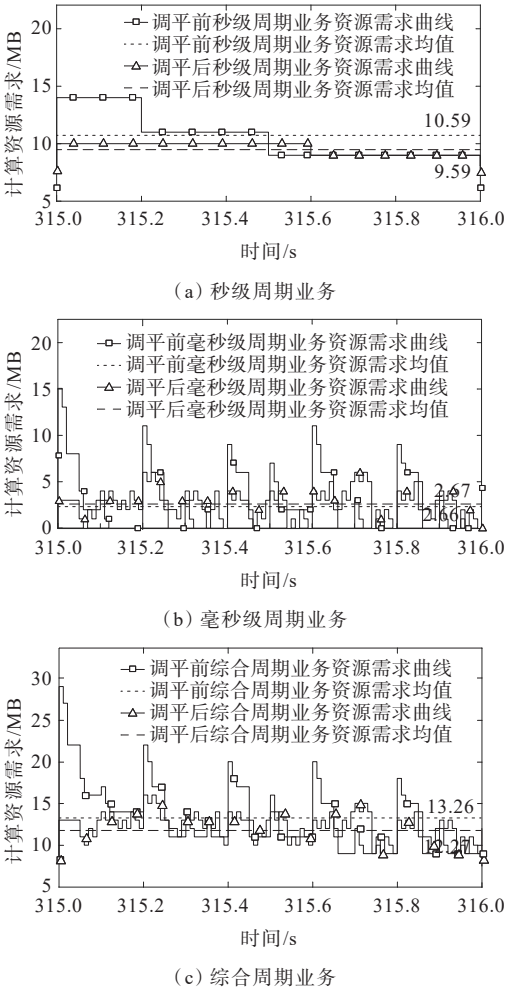

图6 调整后的周期业务动态均衡对比

Figure 6 Comparison of dynamic equilibrium in cyclical task after adjustment

表4 周期类计算资源需求不平衡度

Table 4 Values for computing demand imbalance in cyclical tasks

状态	秒级周期业务	毫秒级周期业务	综合周期业务
动态均衡前	3.641	11.803	17.007
动态均衡后	0.241	2.241	2.420

业务的相对峰值差为 16 MB，证明动态均衡模型的适用性；3 类需求曲线经调节后的数据波动趋势相较未调节前更为平稳，数据落点更集中于需求均值刻线附近。由表 4 可知，秒级周期业务、毫秒级周期业务与综合周期业务的计算资源需求不平衡度均大幅降低。

因此，周期业务动态均衡模型可充分平衡计算资源需求的波峰与波谷，有效降低计算资源需求的不平衡度，从而达到曲线的平稳。

4.4　非周期业务动态均衡模型结果分析

在文 4.3 的典型资源需求不平衡严重区段 315～316 s 中引入非周期业务（台区负荷预测），验证非周期业务动态均衡模型的可行性。台区负荷预测业务的参数见表 5。

表 5　台区负荷预测业务参数

Table 5　Parameters of load forecasting tasks in substation areas

到达时刻/s	执行时间/s	结束时刻/s	资源需求/MB
315.5	0.3	315.8	5.0

为实现短执行周期业务的部分削减与长执行周期业务的全部削减，综合式（11）的约束，对非周期业务时段内有调整需求的周期业务及其后移时间进行分析，非周期业务时段可调整周期业务后移时间范围见表 6。

表 6　非周期业务时段可调整周期业务后移时间范围

Table 6　Range of setback time of adjustable cyclical task during non-cyclical task periods　　s

可调整周期业务	非周期业务时段内周期业务波形后移时间
开关量采集	315.80～315.81
重点用户采集	315.80～315.85
电能表运行状态监测	315.80～315.84
剩余电流动保监测	315.80～315.90

根据表 6，可调整周期业务及相应可后移时间，对含非周期业务时段的动态均衡模型进行仿真分析，非周期业务动态均衡对比如图 7 所示，非周期类计算资源需求不平衡度数值分析见表 7。

从图 7 中可以看出，在 315.5～315.8 s 的非周期业务时段内，调节前后的波峰个数由 5 降为 0；区段相对峰值差为 5 MB，这说明在突发场景下通过本文模型可完全躲过原波峰点；虽调整后的区段后周期业务后移导致计算资源需求比未调整前要高，但在数据波动趋势上，其通过区段内外资源纵向增减保证了资源数值落点更为平稳，满足模型最小化不

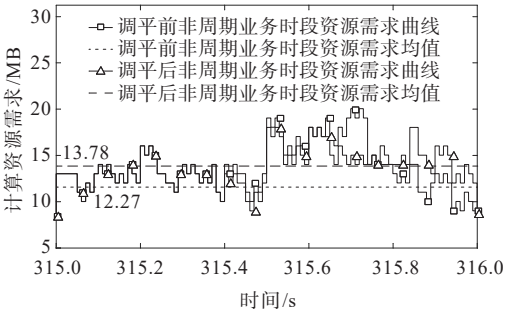

图 7　非周期业务动态均衡对比

Figure 7　Comparison of dynamic equilibrium in non-cyclical task

表 7　计算资源需求不平衡度数值（非周期类）

Table 7　Values for imbalance in computing resource demand (non-cyclical tasks)

状态	负载不平衡度
动态均衡前	7.054
动态均衡后	3.894

平衡度的要求。由表 7 可知，非周期业务动态均衡后资源需求不平衡度从 7.054 降至 3.894。因此，非周期业务动态均衡模型可充分虑周期业务的差异化调节，应对突发场景下计算资源需求不平衡度的偏移，达到平滑曲线的目的。

非周期业务动态均衡模型对于实时性及不平衡度的综合考量进一步说明了其在极端突发场景应对下的潜力。在未来可能存在的大规模停电、网络干扰等背景下，此模型可保证每一突发时段内实时性和不平衡度。这不仅有助于满足极端场景下对于实时性的要求，提高终端适应性；还能最大限度地均衡突发时段的资源压力，确保终端在极端环境下的韧性。

5　结语

本文在配电网侧多元主体、新兴业务的交互背景下，提出一种基于状态迭代的配用电业务计算资源需求预测与动态均衡方法，涵盖了完整的配用电业务特性分析、需求建模、状态预测及动态均衡，主要结论如下：

1）分析了配用电业务的场景属性及典型特征，并形成包含时间维度及需求维度的业务建模方案，为业务计算资源需求模型的构造提供了一套较为普适性的方案；

2）明确了计算资源需求不平衡区段的产生机理及计算资源需求曲线的状态序列特征，建立了基于一阶差分及序列迭代更新的改进马尔可夫模型，

采用了历史数据对计算资源需求波动进行跟踪，实现了准确预测；

3）建立了结合周期业务错峰平移调整及非周期业务差异化调整的动态均衡模型，实现了考虑实时性约束下计算资源需求不平衡度的最优调度。

此外，需要说明的是：在考虑基于计算资源需求预测及均衡调整问题时，应拓宽极端场景下实测数据的解构应用与在线修正，并考虑更多的算力能力指标来全面地描述配用电业务，以提高模型的准确性与适用性，这也是后续的研究方向。

参考文献：

[1] 颜勤，余国翔．光储充建一体站微电网研究综述[J]．电力科学与技术学报，2024，39(1)：1-12.
YAN Qin, YU Guoxiang. Research review on microgrid of integrated photovoltaic-energy storage-charging station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(1):1-12.

[2] 李翔硕，畅广辉，苏盛，等．变电监控系统网络安全威胁指标研究综述与展望[J]．电力科学与技术学报，2024，39(4)：1-10.
LI Xiangshuo, CHANG Guanghui, SU Sheng, et al. Review and prospect on cyber threat indicators of substation monitoring system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(4):1-10.

[3] 尚博文，徐铭铭，张金帅，等．高比例分布式光伏接入背景下配电网电压调控方法研究综述[J]．智慧电力，2024，52(12)：1-11.
SHANG Bowen, XU Mingming, ZHANG Jinshuai, et al. A review of voltage regulation methods for distribution networks in the context of high proportion of distributed photovoltaic integration[J].Smart Power,2024,52(12):1-11.

[4] 倪伟东，武利会，王俊丰．基于自主安全芯片的配网自动化系统网络安全防护及硬件加速[J]．电力科学与技术学报，2020，35(3)：166-172.
NI Weidong, WU Lihui, WANG Junfeng. Cyber security protection and hardware acceleration of distribution automation system based on autonomous security chip [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020,35(3):166-172.

[5] 林志超，钟红梅，韦园清，等．基于容器的配网保护微服务建模与计算资源调度方法[J]．电力科学与技术学报，2022，37(5)：174-180+197.
LIN Zhichao, ZHONG Hongmei, WEI Yuanqing, et al. Container-based microservice modeling and computing resource scheduling method for distribution network protection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(5):174-180+197.

[6] 陈湘元，吴公平，龙卓，等．考虑源荷不确定性及用户侧需求响应的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]．电力科学与技术学报，2024，39(3)：217-227.
CHEN Xiangyuan, WU Gongping, LONG Zhuo, et al. Multi-time scale optimal dispatch of integrated energy systems considering source-load uncertainty and user-side demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(3):217-227.

[7] KUMAR R, AGRAWAL N. Analysis of multi-dimensional Industrial IoT (IIoT) data in Edge – Fog – Cloud based architectural frameworks: a survey on current state and research challenges[J]. Journal of Industrial Information Integration,2023,35:100504.

[8] KUMAR N, VIDYARTHI D P. A novel energy-efficient scheduling model for multi-core systems[J]. Cluster Computing,2021,24(2):643-666.

[9] 崔鸣石，刘世民，马德民，等．能源互联网下考虑业务可靠性的综合数据网边端协同机制[J]．电测与仪表，2024，61(10)：136-143.
CUI Mingshi, LIU Shimin, MA Demin, et al. Novel information exchange mechanism of integrated data network considering service reliability under energy Internet[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024,61(10):136-143.

[10] 李沛哲，肖振锋，陈仲伟，等．电力终端通信接入网通信技术匹配[J]．电力科学与技术学报，2021，36(3)：125-134.
LI Peizhe, XIAO Zhenfeng, CHEN Zhongwei, et al. Analysis of communication matching technology of power terminal communication access network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021, 36(3):125-134.

[11] CAO K Y,LIU Y F,MENG G J,et al.An overview on edge computing research[J].IEEE Access,2020,8:85714-85728.

[12] 刘向军，周凯，孙毅，等．面向新型电力系统的边缘缓存与计算资源迁移策略[J]．电力系统保护与控制，2023，51(24)：134-142.
LIU Xiangjun,ZHOU Kai,SUN Yi,et al.Edge cache and computing resource migration strategy for new power systems[J].Power System Protection and Control,2023,51 (24):134-142.

[13] SISINNI E, SAIFULLAH A, HAN S, et al. Industrial Internet of Things: challenges, opportunities, and directions[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2018,14(11):4724-4734.

[14] 董朝武，肖智宏，辛培哲，等．新型配电网多元业务与多模通信适配性评估方法[J]．电力建设，2024，45(1)：1-12.
DONG Chaowu, XIAO Zhihong, XIN Peizhe, et al. Evaluation method of multiple service and multi-mode communication adaptability of new distribution networks [J].Electric Power Construction,2024,45(1):1-12.

[15] 李强，张立梅，白牧可．基于多元数据特征和改进随机森林的智能配电网异常数据辨识[J]．科学技术与工程，2023，23(5)：2007-2015.
LI Qiang, ZHANG Limei, BAI Muke. Identification of abnormal data in smart distribution network based on multivariate data features and improved random forest[J].

Science Technology and Engineering,2023,23(5):2007-2015.

[16] 杨凯,陈中,邓旭晖,等.考虑任务迁移的配电网边缘计算节点部署方法[J].电力工程技术,2023,42(2):119-129+160.
YANG Kai, CHEN Zhong, DENG Xuhui, et al. Edge computing node deployment method for distribution network considering task migration[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(2):119-129+160.

[17] MAURYA A K, MEENA A, SINGH D, et al. An energy-efficient scheduling approach for memory-intensive tasks in multi-core systems[J]. International Journal of Information Technology,2022,14(6):2793-2801.

[18] 王鹤,刘子悦,边竞,等.面向高比例分布式能源接入的输配网两阶段风险调度研究[J].电网与清洁能源,2024,40(1):119-129.
WANG He, LIU Ziyue, BIAN Jing, et al. Research on two-stage risk scheduling for transmission and distribution power grids with high proportion of distributed energy access[J]. Power System and Clean Energy,2024,40(1):119-129.

[19] 张凯瑞,明昊,高赐威.基于CPSS视角的需求响应能力评估综述[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):28-46.
ZHANG Kairui, MING Hao, GAO Ciwei. A review of demand response capability assessment based on CPSS perspective[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(1):28-46.

[20] 刘运超,杨宁,崔承刚,等.基于时空信息的区域内光伏电站功率预测[J].科学技术与工程,2023,23(34):14596-14602.
LIU Yunchao, YANG Ning, CUI Chenggang, et al. Power prediction of regional photovoltaic plants based on spatio-temporal information[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(34):14596-14602.

[21] 王浩,罗宇.基于负载预测的虚拟机动态调度算法研究与实现[J].计算机工程与科学,2016,38(10):1974-1979.
WANG Hao, LUO Yu. A virtual machine dynamic scheduling algorithm based on load forecast[J]. Computer Engineering & Science,2016,38(10):1974-1979.

[22] 王艺霏,于雷,滕飞,等.基于长-短时序特征融合的资源负载预测模型[J].计算机应用,2022,42(5):1508-1515.
WANG Yifei, YU Lei, TENG Fei, et al. Resource load prediction model based on long-short time series feature fusion[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(5): 1508-1515.

[23] 马航.基于Kubernetes的容器云平台资源动态调度的研究与实现[D].南昌江西师范大学.
MA Hang. Research and implementation of dynamic scheduling of container cloud platform resources based on Kubernetes[D].Nanchang:Jiangxi Normal University,2019.

[24] MUHURI P K, RAUNIYAR A, NATH R. On arrival scheduling of real-time precedence constrained tasks on multi-processor systems using genetic algorithm[J]. Future Generation Computer Systems,2019,93:702-726.

[25] 于杨,蔡田田,匡晓云,等.通信优化技术在电力终端多线程系统的应用[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):10-19.
YU Yang, CAI Tiantian, KUANG Xiaoyun, et al. Application of communication optimization technology in multithread system of power terminal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(5):10-19.

[26] ABBASI S I, KAMAL S, GOCHOO M, et al. Affinity-based task scheduling on heterogeneous multicore systems using CBS and QBICTM[J]. Applied Sciences, 2021,11(12):5740.

[27] 王永利,马子奔,秦雨萌,等.考虑耦合作用的电网业务组合投资优化[J].中国电力,2024,57(3):197-205.
WANG Yongli, MA Ziben, QIN Yumeng, et al. Optimization of power grid business portfolio investment considering coupling effects[J]. Electric Power,2024,57(3):197-205.

[28] ALAM M, RUFINO J, FERREIRA J, et al. Orchestration of microservices for IoT using docker and edge computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56 (9):118-123.

[29] CEN B W, HU C C, CAI Z X, et al. A configuration method of computing resources for microservice-based edge computing apparatus in smart distribution transformer area[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2022,138:107935.

[30] ZHOU J, CEN B W, CAI Z X, et al. Workload modeling for microservice-based edge computing in power Internet of Things[J].IEEE Access,2021,9:76205-76212.

[31] 陈燕,吴赞红,王博,等.智能配用电业务接入网络支持的关键技术研究[J].计算机科学,2016,43(S1):558-560.
CHEN Yan, WU Zanhong, WANG Bo, et al. Key technology of access network supporting in intelligent power distribution business[J]. Computer Science, 2016, 43(S1):558-560.

[32] 程超鹏.大数据平台下智能配用电业务辅助分析及应用[D].广州:广东工业大学,2021.
CHENG Chaopeng. Auxiliary analysis and application of Intelligent powerdistribution and utilization business under big data platform[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology,2021.

[33] 王皓靖,郭佩乾,时珊珊,等.中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J].电力系统自动化,2025,49(5):13-23.
WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of flexible interconnection technology for multi-station areas in medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(5):13-23.

[34] 郑竣杰,岑伯维,蔡泽祥,等.基于EdgeCloudSim的配电边缘计算终端建模与性能分析[J].电力系统自动化,2022,46(23):51-58.
ZHENG Junjie, CEN Bowei, CAI Zexiang, et al. EdgeCloudSim-based modeling and performance analysis of edge computing terminals in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2022, 46(23):51-58.