

# 边缘计算架构下考虑电力业务特性的 缓存配置方法

陈柏旭, 李晓华, 蔡泽祥, 胡明, 梁旭冉, 阳斌

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510030)

**摘要:**随着新型电力系统向高比例可再生能源接入与多元互动化方向演进,边缘计算作为支撑电力系统智能化升级的核心技术,正面临着设备规模化接入与电力业务的复杂化的严峻挑战。针对传统静态资源配置模式难以适配电力业务动态性、异构性特征的问题,以缓存资源对电力业务执行的弹性作用为切入点,提出了一种考虑电力业务特性的缓存资源配置方法。以业务时延、资源利用率最优为配置目标,系统地分析电力业务特性对资源配置的影响机制,构建了业务特性驱动的约束条件体系,并基于权重分析法对该资源配置问题进行求解。通过建立并对比不同的配置方案下的资源和业务评价指标,充分证明了提出的方法的可行性和优越性。

**关键词:**边缘计算;电力业务特性;弹性需求;缓存配置

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26470

## Cache Configuration Method Considering Power Service Characteristics in Edge Computing Architecture

CHEN Baixu, LI Xiaohua, CAI Zexiang, HU Ming, LIANG Xuran, YANG Bin

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology,  
Guangzhou 510030, Guangdong, China)

**Abstract:** As the new power system evolves towards a high proportion of renewable energy access and multiple interactions, edge computing, as the core technology to support the intelligent upgrade of power system, is facing severe challenges of large-scale equipment access and complexity of power business. Aiming at the problem that the traditional static resource allocation model is difficult to adapt to the dynamic and heterogeneous characteristics of power services, the elastic effect of cache resources on the execution of power services was taken as the entry point, and a cache resource allocation method was proposed considering the characteristics of power services. Aiming at the optimization of service delay and resource utilization, the influence mechanism of power service characteristics on resource allocation was analyzed systematically, a constraint condition system driven by service characteristics was constructed, and the resource allocation problem was solved based on weight analysis method. By establishing and comparing the resource and business evaluation indicators under different configuration schemes, the feasibility and superiority of the proposed method were fully proved.

**Key words:** edge computing; power service characteristics; elastic demand; cache configuration

随着电力市场化进程和新能源技术的发展,现代电力系统正面临着数据采用海量、设备接入多元化和业务需求复杂化等问题,对高效调度和市场化调节的需求越来越突出<sup>[1-2]</sup>。传统信息架构在处理多维度、实时性强的电力业务时,往

往无法提供足够的灵活性和响应速度,导致资源配置效率低下和业务执行滞后<sup>[3]</sup>。为了应对这些挑战,建立能够同时支撑电力调度和市场化调节的信息流架构显得尤为必要。

在云技术和边缘计算的推动下,新型信息流

**基金项目:**广东省基础与应用基础研究基金(2024B1515250001);广东省自然科学基金(2025A1515010058);

国家自然科学基金(52477098)

**作者简介:**陈柏旭(2001—),男,硕士,主要研究方向为电力物联网及边缘计算终端,Email:bx229@qq.com

**通讯作者:**李晓华(1975—),女,博士,教授,主要研究方向为高压直流输电、电力物联网等,Email:epkh@scut.edu.cn

架构逐渐成型<sup>[4-5]</sup>。利用边缘计算的分布式特性和云计算的强大处理能力,可以将能源调度决策带来的电力功能实现逐渐从统一调度中心下沉到云管边端体系中,并基于去中心化的计算架构满足日益增长的业务执行需求。业务的实现需要运算能力、存储体系、网络带宽等资源的支撑,文献[6]就系统性地分析了边缘架构体系下算力、通信资源对 MEC 性能的影响。但缓存资源作为最具弹性和灵活性的要素<sup>[7]</sup>,目前缺乏对其细致的配置考虑,容易导致业务执行的滞后。而通过在不同节点上配置合适的缓存资源,可以有效地减少数据传输的延迟,并优化资源的利用效率<sup>[8]</sup>。

缓存资源的配置问题,是在规划部署阶段基于确定的缓存策略,分析可能缓存的内容,依据具体的实现目标确定缓存容量的大小<sup>[9]</sup>,从而实现系统的性能最优。在规划阶段中通常使用简单的内容缓存策略来简化配置问题,主要有基于用户偏好和流行度的缓存策略。文献[10]提出了一种基于用户偏好的缓存策略,通过分析用户的历史访问信息,更准确地把握缓存的内容,从而提高缓存命中率,减少等待时间。文献[11]则采用业务流行度来描述缓存内容,通过分析内容的访问频率和流行趋势,确保热门内容优先缓存,以便快速响应用户请求。

在确定缓存内容后,依据不同的目标会采用不同的缓存规划方法。文献[12]描述如何进行成本效益高的缓存部署,强调在有限预算下最大化缓存利用率。文献[13]基于网络的拓扑特征,提出缓存容量配置方案,以提升数据传输效率。文献[14]从能耗的角度对缓存进行规划,实现更节能的网络运营。文献[15]从缓存命中率的角度描述了缓存的配置需求,基于对用户访问模式的分析,建立最大化缓存命中率的缓存配置方案。

在针对缓存资源配置的研究中,大多偏重于不同的场景。文献[16]在用户网络的场景下提出了一种边缘缓存协同技术,通过非协作博弈模型实现不同节点间的缓存资源均衡,满足不同用户的体验。文献[17]则对车联网场景中的预缓存配置进行优化,通过采用内容切分的方式,基于纵向缓存协作的规则实现车辆请求内容的预缓存配置,重点考虑车辆移动性的影响。文献[18]针对无人机下的移动边缘计算场景,对可控移动拓扑下的边缘计算缓存配置问题进行了优化。

对比其他场景,由于电力系统有较高的实时

性要求,与之相对的电力业务执行的要求也高,业务特性在边缘计算中的影响较为突出。文献[19]对不同的电力业务进行了定性分类,文献[20]则针对电力系统的监控业务从多个方面展开了详细的介绍,都为业务特性的建模提供了一定的思路。目前对电力业务特性的描述大多从通信和计算展开<sup>[21]</sup>,在缓存配置上,还需要做出一定的匹配调整。

从已有的研究可以看出,目前针对电力边缘计算架构下相关的配置问题研究,基本沿用以兼容性为主的配置方法。但在电力业务特性显著场景下,这种思路难以满足更复杂的需求。基于以上问题,本文针对电力边缘计算体系,系统性地分析了缓存资源配置问题,基于对电力业务特性的整体分析,结合不同业务类型实际需求特征的演化趋势,归纳并描述了这些特性对缓存资源配置需求的约束。以实现最大化资源利用率和最小化业务执行时延为目标,提出了一种适用于电力系统的边缘计算架构下的缓存资源配置方法。

## 1 缓存资源配置的需求和挑战

本节首先介绍缓存资源如何发挥其弹性作用实现资源体系对业务执行的高效支撑,结合缓存资源在业务执行时的作用分析配置过程中的挑战。

### 1.1 资源配置的实现目标 and 能力需求

传统的垂直信息流架构下,电力业务通常是分离执行的,所需资源单独配置,在业务交互性更强的场景下难以应对不断变化的负荷需求。而在电力边缘计算下的资源共享体系中,依托合理的缓存配置方案,可以更为灵活地应对不同的需求。

从传统信息架构到边缘计算架构,为实现多节点业务协同,需要实现多节点的资源共享。在这期间,缓存资源发挥了关键的弹性支撑作用,以满足系统的弹性需求,其示意如图1所示。

### 1.2 电力业务特性对缓存资源提出的挑战

随着终端设备的差异性越发显著,所请求业务的时间特性和空间分布特性越发突出,对资源配置的影响也越发显著。

在时间维度上,不同时间尺度的业务对缓存资源的容量配置提出了不同的要求。短时间尺度的业务需要更大的缓存容量,以便快速处理和

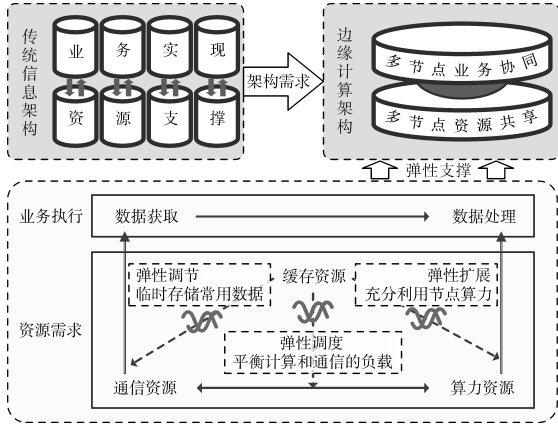


图1 缓存资源的弹性支撑能力

Fig.1 The elastic support ability of cache resources

调用需要的数据。同时,由于电力业务实时性要求较高,需要在极短时间响应和处理,其中的时延敏感业务,又需要考虑更充足的缓存资源,确保业务的优先处理和及时响应。

在空间维度上,电力业务数据源的多样性也对缓存资源的需求有直接的影响。面对数据量的大小和请求频率的差异,应用不同的缓存策略会影响所需资源的规模。而且,业务的不同数据来源还会带来节点的关联性问题,不同的数据传输路径和距离,都会影响缓存资源的占用情况。

因此,在缓存资源配置过程中必须充分考虑不同维度上业务的特性,实现业务的高效执行。

### 1.3 考虑业务特性的缓存资源配置规则

电力业务的时间特性包括请求频率、时间尺度和实时性,空间特性包括数据量和数据来源。为了分析业务特性在缓存资源配置中的影响,对不同功能的业务依据不同的业务特性进行定性分类,进而确定对不同类型电力业务的缓存配置方法。部分业务的特性举例说明如表1所示。

表1 电力业务类型划分

Tab.1 The division of power business types

实现功能	时间尺度	实时性	数据量/频率	关联性
快速响应	短	敏感	波动/突发	本地
协同调控	长	—	平稳/周期	协作
短时控制	短	敏感	平稳/突发	协作
长期计量	长	—	平稳/周期	本地
定期反馈	短	敏感	平稳/周期	协作
信息交互	长	—	波动/周期	协作
实时管理	短	容忍	平稳/周期	协作

结合电力业务的特性差异,电力边缘节点的缓存资源配置考虑以下配置规则:

1)缓存资源释放策略。电力业务在完成后会释放占用的资源,为了考虑业务在资源回收确

定性上的差异带来的影响,依据数据量和请求频率将业务划分为规律性和随机性,并对不同类型业务设置不同规模的缓存资源和不同效率的资源释放策略,从而实现对不同业务的基础缓存需求评估。

2)实时性条件和优先级策略。基于电力业务之间的实时性差异,综合考虑业务的执行时延和重要性,将业务划分为长、短时间尺度,其中短时间尺度又细分为时延容忍、敏感型,再进一步确定业务的优先级以展开其队列和调度规划,从而基于优先级考虑不同业务需要配置的资源量,实现配置方案对电力业务的复杂性和多样性的更好适应。

3)应对跨节点协调的缓存资源分层规划。分层规划机制是结合电力业务本地、协同需求,通过对缓存空间进行分层划分以实现资源隔离,避免业务动态特性导致的缓存配给受到干扰。根据业务数据来源差异将总缓存资源分为本地、协同缓存,依据节点位置和请求业务类型可以调整协同缓存占比,实现缓存分层管理。

## 2 满足电力业务特性约束的缓存配置方法

基于考虑电力业务特性的资源配置规则实现,本节提出了资源利用率最大化、业务时延最小化的双目标优化,建立满足业务特性需求的缓存资源配置方法。

### 2.1 基于资源利用率及业务时延的目标函数

电力边缘计算网络进行缓存资源配置,是为了使不同信息场景下的综合资源利用率 $U$ 最高,并且边缘节点对不同特性电力业务的平均延时 $T$ 最低。

1)综合资源利用率 $U$ 。在不同的信息需求场景下,资源的合理配置能够最大化资源的利用率。对规律性和随机性的定义业务的实际资源需求为 $C_j(T_j)$ ,并将节点 $j$ 的资源 $S_j^c$ 运行周期分为数个时间段 $T_{0,k}$ ,每个时间段的资源投入比例 $\eta_{0,k}$ 不同,具体由不同的缓存策略决定。结合不同时间段的平均资源量,综合缓存资源利用率如下式所示:

$$U = \frac{1}{M} \sum_M \sum_{T_{0,k}} \frac{C_j(T_{0,k})}{\eta_{0,k} S_j^c} \quad (1)$$

式中: $M$ 为节点数量。

2)边缘节点下不同业务的平均延时 $T$ 。由于业务的时间尺度差异,需要对不同的业务 $R_i$ 的延时进行标准化处理。在考虑缓存资源的影响后,业务延时由执行时间 $T_{ij}^{ex}$ 、传输时间 $T_{ij}^{tr}$ 和缓存时间 $T_{ij}^{ca}$ 构成,基于业务的最大要求时延 $t_{op,i}$ 可以计算获得业务的标准平均延时 $T$ ,如下式所示:

$$T = \frac{1}{M} \sum_M \left( \frac{1}{r_j} \sum_{i \in R_i} \frac{T_{ij}^{ex} + T_{ij}^{tr} + T_{ij}^{ca}}{t_{op,i}} \right) \quad (2)$$

式中: $r_j$ 为业务集合 $R_j$ 中的业务数量。

对于业务的计算时延 $T_{ij}^{ex}$ ,依据需要的算力 $l_i$ 和边缘节点总算力 $S_j^H$ 、该业务的请求概率 $P_{ij}$ 进行计算,如下式所示:

$$T_{ij}^{ex} = \frac{l_i}{P_{ij} \times S_j^H} \quad (3)$$

终端将业务 $i$ 请求卸载到边缘节点 $j$ 上执行的过程中,业务的传输时间 $T_{ij}^{tr}$ 包括业务卸载的传输时延 $t_{i,e \rightarrow j}$ 和结果传回的反馈时延 $t_{i,j \rightarrow e}$ ,由于结果数据量较小<sup>[22]</sup>,忽略反馈时延,传输时延根据数据大小 $d_i$ 和节点 $j$ 的数据卸载速率 $v_j$ 计算获得,具体如下式所示:

$$T_{ij}^{tr} = t_{i,e \rightarrow j} + t_{i,j \rightarrow e} = \frac{d_i}{v_j} \quad (4)$$

在配置缓存资源后,业务 $i$ 获得的缓存时间 $T_{ij}^{ca}$ ,可以结合业务的缓存命中率 $H_{ij}$ 计算获得,如下式所示:

$$T_{ij}^{ca} = \frac{d_i}{[S_j^C - \sum_{i \in R_i} (H_{ij} \times d_i)] \times P_{ij}} \quad (5)$$

在配置合理的缓存资源时,大部分业务执行需求可以从缓存中获取,减少了数据传输需求,

基于此业务的传输时延 $t_{i,e \rightarrow j}$ 计算如下式所示:

$$T_{ij}^{tr} = (1 - H_{ij}) \times \frac{d_i}{v_j} \quad (6)$$

## 2.2 业务实现及资源效用下的约束条件分析

在满足电力业务特性约束的缓存资源配置方法中,以业务执行的基本需求、不同业务时间特性需求、数据来源差异带来的协同缓存需求为约束条件。

### 2.2.1 业务的基本需求约束

该约束是为了保障业务的基本运行需求,下面结合边缘节点 $j$ 下的电力业务 $i$ 的请求率 $P_{ij}$ 具体量化该需求。目前已有研究证明<sup>[23]</sup>,Zipf分布在描述信息资源时所呈现出的分布规律,与不同

电力业务的请求频率所呈现出的不均衡分布特征类似,因此采用Zipf分布对不同电力业务的请求概率进行描述。定义单位周期 $T_0$ 内业务 $i$ 请求的流行度 $L_{ij}$ ,同类业务中基于流行度计算业务的请求概率如下式所示:

$$P_{ij} = \frac{1/L_{ij}^\alpha}{\sum_k (1/L_{kj}^\alpha)} \quad (7)$$

由于规律性和随机性的业务的资源释放策略差异,不同类型业务的流行度需要分开考虑。结合不同的规律性业务和随机性业务的资源需求 $s_{r,i,reg,f}$ 和 $s_{r,i,ran,f}$ ,业务整体的基本需求约束如下式所示:

$$S_j^C \geq \sum s_{r,i,reg,f} + \sum s_{r,i,ran,f} \quad (8)$$

### 2.2.2 业务的时间特性需求约束

业务的时间特性的影响主要体现在排队等待执行的过程,结合不同类型业务的实时性及其优先级策略,可以划分不同的缓存队列,进而实现对缓存资源的配置。

不同的时间特性 $k$ 设定不同的缓存优先级,其中 $k = 0,1,2$ 分别对应长时间尺度、时延敏感型和时延容忍型。依据不同时间特性的相对重要性矩阵 $(\mathbf{FI}_{kj})_{n \times n}$ ,获得不同时间特性的优先级 $\beta_k$ ,如下式所示:

$$\beta_k = \frac{(\prod_{j=1}^n \mathbf{FI}_{kj})^{n-1}}{\sum_{x=1}^3 (\prod_{j=1}^n \mathbf{FI}_{xj})^{n-1}} \quad (9)$$

基于业务的优先级,结合业务的请求分布,分析业务在缓存中的等待时间。不同时间特性的业务分别用 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 的泊松分布表示<sup>[24]</sup>,并放入不同的缓存队列,采用M/M/1排队模型计算队列长度 $QL_k$ 和业务平均等待时间 $Wt_k$ ,结合不同时间特性的业务优先级,对等待时间进行调整,如下式所示:

$$\begin{cases} QL_k = \frac{\lambda_k^2}{n_{T_{v,k}}(n_{T_{v,k}} - \lambda_k)} \\ Wt_k = \frac{QL_k}{\lambda_k} \\ Wt'_k = Wt_k \times \frac{1}{\beta_k} \end{cases} \quad (10)$$

根据业务请求的资源需求和等待时间,计算获得周期 $T_0$ 内边缘节点 $j$ 的缓存资源需求,即该节点下电力业务的时间特性需求约束具体如下式所示:

$$S_j^c \geq \frac{1}{T_0} \sum_k [Wt'_k \times \sum_i (s_{r,i}^c \times n_{ij})] \quad (11)$$

### 2.2.3 数据来源差异带来的协同缓存需求约束

由于数据的来源存在差异,业务在本地执行和协同执行过程中存在不同的资源需求。将总缓存资源分为本地预置缓存和协同预置缓存,通过调整协同缓存的占比,可以满足不同场景下的业务需求。

协作缓存机制将边缘节点中的缓存容量分为  $s_{j,1}^c$  和  $s_{j,2}^c$ 。边缘节点  $i$  下协作执行业务对缓存的总需求为  $x_{j,1}$ ,结合协作业务接入因子  $\alpha_{j,1}$ ,对  $s_{j,1}^c$  和  $s_{j,2}^c$  的缓存分配方案计算如下式所示<sup>[25]</sup>:

$$s_{j,1}^c / s_{j,2}^c = \frac{x_{j,1} \alpha_{j,1}}{S_j^c \times \ln(x_{j,1} \alpha_{j,1} / 2) - x_{j,1} \alpha_{j,1}} \quad (12)$$

协作缓存的设置要满足节点  $j$  与邻居节点协作完成相同的业务,并支撑其本地业务执行,因此该比例需要结合协作、本地业务的平均完成时延  $T_{re,j,1}$  和  $T_{re,j,2}$  进行分析。基于边缘节点  $j$  所有邻居节点可能接收到的业务  $R_{j,all}$ ,计算该节点与邻居节点的业务请求相似度  $XR_i$ ,进而比对协作缓存比例设置的合理性,即数据来源差异带来的协同缓存需求约束如下式所示:

$$\begin{cases} XR_i = \frac{|R_j \cap R_{j,all}|}{|R_j \cup R_{j,all}|} \\ \frac{s_{j,1}^c}{S_j^c} T_{re,j,1} + \frac{s_{j,2}^c}{S_j^c} T_{re,j,2} \leq XR_i T_{re,j,1} + (1 - XR_i) T_{re,j,2} \end{cases} \quad (13)$$

### 2.3 缓存配置模型

以资源、业务双目标优化为导向,在确保满足业务特性约束的前提下,对多节点缓存规划配置模型的描述如下式所示:

$$\begin{cases} P_1: \max U \\ P_2: \min T \\ \text{s.t. } C_1: S_j^c \geq \sum s_{r,i,reg,f} + \sum s_{r,i,ran,f} \\ C_2: S_j^c \geq \frac{1}{T_0} \sum_k [Wt'_k \times \sum_i (s_{r,i}^c \times n_{ij})] \\ C_3: \frac{s_{j,1}^c / s_{j,2}^c}{XR_i} \leq 1 - \mu_{j,s} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $P_1$  表示电力边缘计算中的综合利用率最高,  $P_2$  表示业务综合时延最小,  $C_1$  表示配置方案满足业务执行的基本需求,  $C_2$  表示满足不同电力业务时间特性需求约束,  $C_3$  表示满足不同电力业务空间特性需求约束。该配置问题的求解是一

个多目标问题,对资源利用率和平均业务延时采用权重分析法求解。

### 2.4 面向缓存配置方案的多维度评价指标

在具体的缓存资源配置方案下,需要评估该配置方法的优越性和可靠性。考虑到电力业务的场景多样性,建立的评价指标包括资源安全裕度、资源利用率、业务综合平均时延、缓存平均机会成本和缓存平均动态价值。

1) 多节点资源安全裕度  $U_s$  和资源利用率  $U_R$ 。对多节点缓存资源配置方案进行评估时,资源安全裕度反映了系统面临高负载时的稳定性和可靠性,而资源利用率则衡量了缓存实际运行的使用效率。面对不同的业务场景,  $U_s$  用不同节点的资源峰值计算,具体如下式所示:

$$U_s = \frac{1}{M} \sum \left\{ 1 - \frac{\max [C_j(T_j)]}{S_j^c} \right\} \quad (15)$$

2) 业务的平均综合时延  $T_A$ 。评估业务综合平均时延是为了反映各节点在处理业务请求时的效率,描述缓存资源对服务质量的提高,具体如式(2)所示,此处不再赘述。

3) 缓存平均机会成本  $C_0$ 。缓存资源的机会成本是指为部分优先级更高的业务分配资源时,放弃或降低其他业务的收益。不同节点中由于业务的优先级不同,可能出现的竞争业务  $R_{j,HP}$ ,缓存平均机会成本  $C_0$  定义为:执行  $R_{j,HP}$  的场景下的业务收益之和  $E_{r_{j,HP}}$  减去其他业务在没有  $R_{j,HP}$  参与竞争的情况下的期望收益之和  $E_{r_{j,LP}}$ ,具体如下式所示:

$$\begin{cases} C_0 = \sum_M \sum_{r_{j,HP} \in R_{j,HP}} \sum_{r_{j,LP} \in R_{j,LP}} (E_{r_{j,HP}} - E_{r_{j,LP}}) \\ E_{r_{j,i}} = \omega_i \frac{s_{r,i}^c}{s_{r,i,f}^c} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\omega_i$  为业务对应的优先级收益系数。

4) 缓存平均动态价值  $V_D$ 。评估缓存平均动态价值主要关注在不同时间段  $T_{0,k}$  中的业务  $R_{T_{0,k}}$  对缓存的使用效益及反映单位周期  $T_0$  内对系统整体性能的贡献。业务  $R_{T_{0,k}}$  在时间段内的执行的时间越长,该内容在当前时间段内的流行度就越高,该业务的缓存价值就主要取决于其流行度;而当执行的时间越短时,影响缓存价值的主要因素就是业务的缓存代价。基于以上分析,综合不同节点和不同的时间段,缓存的平均动态价值可以表示为

$$\begin{cases} V_D = \sum_M \sum_{T_0} \sum_{R_{r,c}} [(1 - \frac{1}{e^{r_{r,c}^c}}) \times V_L + \frac{1}{e^{r_{r,c}^c}} \times V_P] \\ t_{k,i}^{op} = \varepsilon_i \frac{T_{0,k,i}}{T_{0,k}} \\ V_L = P_{ij}(L_{ij}) \times S_j^C \\ V_P = s_{r,i}^C \end{cases} \quad (17)$$

### 3 仿真分析

为了评估提出的配置方法的优越性和可靠性,对其展开仿真和验证。某电力区域下包括五个边缘节点,每个边缘节点接收终端请求的业务包含能量管理、状态检测、数据分析、运行控制及继电保护。仿真参数设置参考文献[26-28],具体的业务设置如表2所示,节点参数设置如表3所示,节点接收业务的参数设置如表4所示。

表2 业务参数设置

Tab.2 Business parameter setting

业务类型	算力资源需求/	数据量/	缓存需求/
	Mcycle	Mbit	Mbit
能量管理业务	[158.4, 466.8]	[9.56, 26.26]	[16.02, 34.02]
状态监测业务	[221.4, 387.6]	[4.41, 6.93]	[13.86, 29.68]
数据分析业务	[194.4, 482.4]	[4.25, 10.18]	[17.31, 45.24]
运行控制业务	[167.4, 380.4]	[4, 7.63]	[20.44, 27.1]
继电保护业务	[71.28, 197.64]	[1.55, 2.93]	[6.1, 14.32]

表3 节点参数设置

Tab.3 Node parameter setting

节点	算力资源/GHz	运力资源/MBps
1	[9, 11]	[90, 110]
2	[6.5, 8.5]	[70, 90]
3	[9, 11]	[90, 110]
4	[6.5, 8.5]	[70, 90]
5	[11, 13]	[110, 130]

表4 向节点请求不同类型业务的终端数量

Tab.4 The number of terminals requesting the service

节点	类型1	类型2	类型3	类型4	类型5
1	[4, 15]	[5, 15]	[5, 12]	[4, 12]	[3, 6]
2	[4, 27]	[6, 10]	[5, 9]	[5, 8]	[4, 6]
3	[5, 12]	[4, 12]	[4, 13]	[4, 11]	[4, 6]
4	[4, 10]	[6, 15]	[6, 11]	[6, 11]	[4, 6]
5	[4, 20]	[4, 22]	[4, 17]	[5, 17]	[4, 6]

选取不同节点配置等量资源、不考虑电力业务特性下不同节点单独配置资源两种其他方案,与本文提出的方案进行对比。基于相同的缓存资源成本,选择对比在终端请求分布差异和节点资源需求变化下本文提出方案的可行性。

由于资源成本与节点工作负载密切相关,业务拥挤而产生的开销又并不随拥挤程度发生明显变化,因此在保持缓存资源成本一致时需要结合比例拥塞模型。在不同的配置方案和规则下,相同场景中的比例拥塞系数 $\chi_{ap}$ 不同,故总资源量与总成本满足下式:

$$O = \sum (\chi_{ap,i} \times S_i^c) \quad (18)$$

对于该区域下的边缘节点在不同场景下接收到的终端请求,可以划分为状态a~状态f六种状态,即极为集中、集中、较为集中、较为均匀、均匀和非常均匀,对这六种状态选取典型场景如图2所示。其中,偏集中的终端分布场景主要对应关键设施集中供电、高科技园区和智能制造等现实需求,而偏均匀的终端分布场景则对应住宅社区供电、分布式能源利用、商业综合体供电等现实需求。

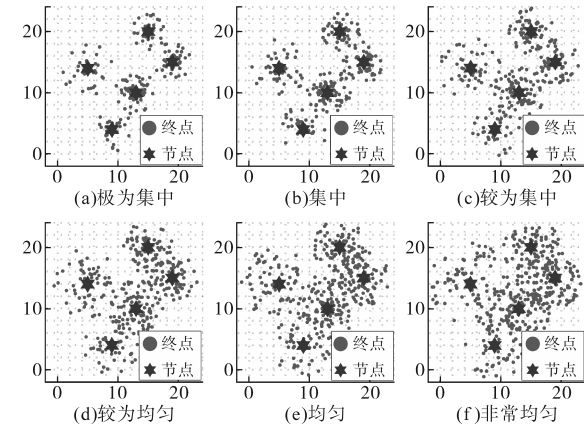


图2 节点接收到的终端请求典型场景

Fig.2 Typical scenario of terminal requests received

对不同业务请求场景下的三种资源配置方案进行求解,再分别计算不同方案在该区域下的资源安全裕度、资源利用率、业务综合平均时延、缓存平均机会成本和缓存平均动态价值。

图3为不同方案下的资源安全裕度对比。本文提出的优化方案得益于对电力业务特性的充分考虑,在不同场景下的安全裕度始终维持在合适的范围内;集中方案由于缺乏对多特性接入的考虑,当分布逐渐均匀时,安全裕度会快速下降;而对于等量配置方案,终端分布的均匀化一定程度上实现了节点间资源的共享,安全裕量略有上升。相较于集中配置和等量配置,本文提出方案在资源安全裕度上,分别增长49.27%和56.88%,在不同的场景中都优于其他的配置方案。综上所述,本文方案实现了对资源的安全使用,确保

了系统在不同负载情况下的稳定运行。

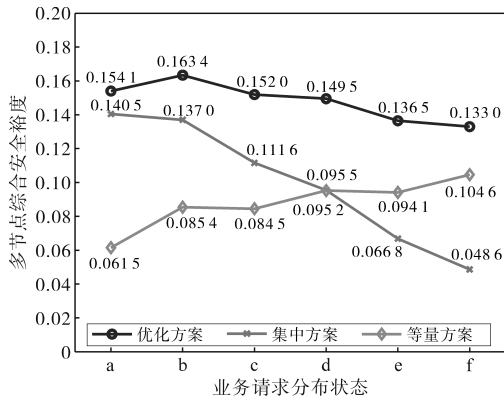


图3 不同方案的多节点综合裕度

Fig.3 Multi-node integrated margin

图4为不同方案下的资源利用率对比。在终端分布不同的场景下,基于业务特性需求的考虑,本文方案能充分发挥资源的效用,保持较高的资源利用率;在偏集中的场景下,集中方案的资源对就近业务实现专向供应,利用率相较于等量方案较高;而偏均匀的场景中,虽然集中方案由于长时间的高负载利用率略有上升,但电力业务特性更突出时,等量方案相对更加均衡,利用率反而略高。但对于不同的场景,本文优化方案在资源利用率上都高于集中方案和等量方案,分别高出19.26%和20.36%,说明本文优化方案能够更准确地分配缓存资源,提高整体系统效率。

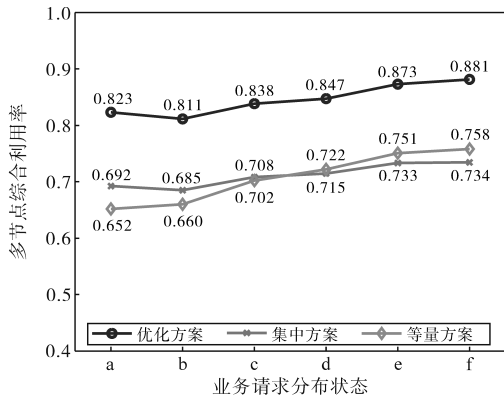


图4 不同方案的多节点综合利用率

Fig.4 Comprehensive utilization of multiple nodes

图5为不同方案下的业务综合平均时延。依托于本文依据电力业务特性划分不同的业务类型,本文提出的优化方案中资源对不同类型业务的执行能够实现良好的综合平均时延,且随着终端分布越来越均匀,资源的共享共用进一步凸出本文方案的优势;而集中方案不可避免地出现节点过载或节点闲置的现象,业务平均执行时延因此在一定范围内波动;等量方案难以同时应对多

节点高负载的需求,导致时延较高,随着业务请求趋于均衡,平均时延也只能在一定程度上减小。对比不同方案下的该指标,本文优化方案较集中和等量方案分别有效减小了11%和17.02%,实现对各种终端请求分布下的资源管理需求的良好应对,从而有效降低业务执行时延。

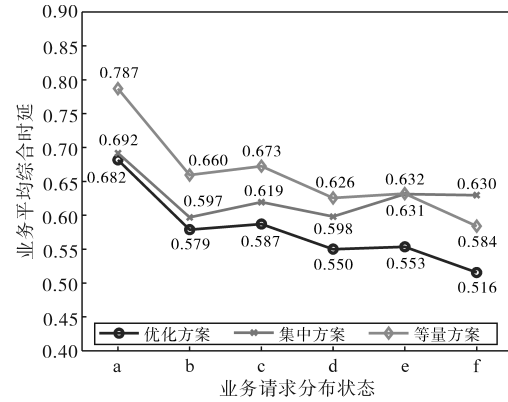


图5 不同方案的业务平均综合时延

Fig.5 Average integrated delay of services

图6为不同方案下的缓存平均动态价值。由于不同设备的广泛接入和差时使用,资源的使用效益在时间上有明显的波动性,在考虑业务特性下本文优化方案相较于其他方案能够灵活适应不同时间下的需求,保持高水平的缓存动态价值,且在请求分布均匀时能够进一步发挥资源共享共用的优势;集中配置方案的动态价值类似于其业务平均时延,在一定范围内波动;而等量配置方案由于各节点的资源利用率趋于均衡,平均动态价值会显著增加。在该指标下,本文优化方案相对集中和等量方案分别提升12.48%和12.21%,高缓存平均动态价值表明,在本文方案下,更多的请求可以直接从缓存中获取数据,提升用户体验和系统响应速度。

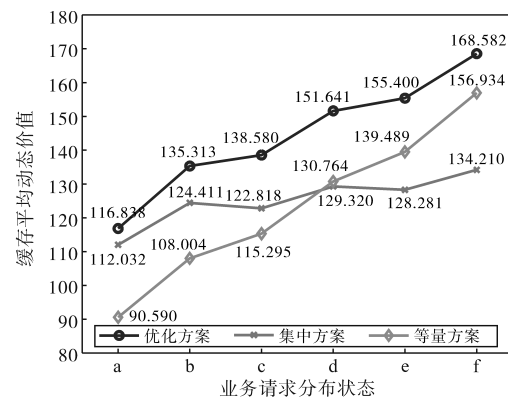


图6 不同方案的缓存平均动态价值

Fig.6 Average dynamic value of cache

图7为不同方案下的缓存平均机会成本。基

于业务特性的差异,本文方案考虑业务在优先级下有序执行,从而有效地降低缓存机会成本,且随着终端分布的均匀化,多节点之间的交互性加强能更精准地分配资源,进一步降低缓存机会成本;在终端分布均匀化的场景下,集中方案难以适应业务之间的交互请求,平均机会成本越来越高;而等量方案一定程度上减少了节点之间的资源争用和冲突,系统的机会成本相应降低。本文优化方案相较于集中方案和等量方案,在缓存平均机会成本上,有效降低了46.64%和12.21%,在考虑电力业务特性的情况下,本文方案带来的资源配置精准性减少了资源闲置和浪费,有效实现了各节点在处理终端请求时的均衡性。

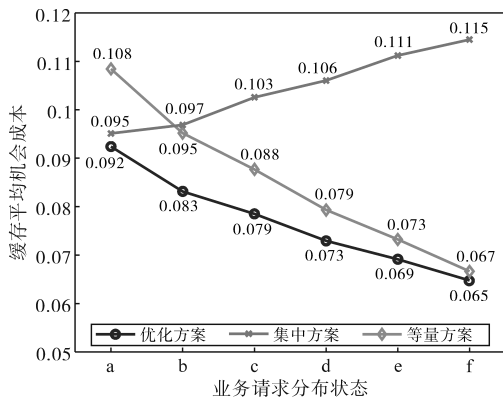


图7 不同方案的缓存平均机会成本

Fig.7 Average opportunity cost of caching

## 4 结论

本文针对电力边缘计算架构下的缓存资源配置问题,充分考虑电力业务特性在配置过程中带来的影响,结合业务多样性需求建立满足业务时间特性和空间特性的问题约束,在业务需求更突出的场景下构建了更合理的缓存配置,以实现信息数据的跨时段交互,优化系统响应时间,提高整体业务处理能力。

对比常规配置方法,仿真结果充分验证了本文提出方法在提高电力边缘计算网络对电力业务响应的可行性、必要性和优越性,同时不同场景出现的差异也符合理论预期。面对不同的场景在资源和业务方面的需求,本文优化方案体现出了明显的优势,充分说明了其在资源分配精准性、负载均衡优化、高效缓存管理及综合性能提升方面的高效。在这样的配置策略下,为实际运行中实时调整缓存分配、动态扩展与收缩、跨区域协调等缓存资源的弹性调整提供了有效的变

化支持,也为业务需求分析与预测、自动化调度、弹性缓存策略实施等业务的柔性执行提供了可靠的裕量支持。

## 参考文献

- [1] 王臻,刘东,徐重西,等. 新型电力系统多源异构数据融合技术研究现状及展望[J]. 中国电力,2023,56(4):1-15.  
WANG Zhen, LIU Dong, XU Chongyou, et al. Status quo and prospect of multi-source heterogeneous data fusion technology for new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 1-15.
- [2] 黎琦,张涛允. 能源互联网多源数据融合技术研究[J]. 电气传动,2022,52(15):68-73.  
LI Qi, ZHANG Taoyun. Research on multi-source data fusion technology of energy internet[J]. Electric Drive, 2022, 52(15): 68-73.
- [3] HUANG L, BI S Z, ZHANG Y J A. Deep reinforcement learning for online computation offloading in wireless powered mobile-edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19(11): 2581-2593.
- [4] 李世豪,缪巍巍,曾程,等. 面向电力物联的边缘计算框架设计初探[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(12):51-58.  
LI Shihao, MIAO Weiwei, ZENG Zeng, et al. Discussion on the design of edge computing framework based on power internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(12): 51-58.
- [5] 潘志新,翟学锋,王成亮,等. 基于边缘计算的智能配电网多源数据处理与融合技术研究[J]. 电气传动,2021,51(22):74-80.  
PAN Zhixin, ZHAI Xuefeng, WANG Chengliang, et al. Research on multi-source data processing and fusion technology of smart distribution grid based on edge computing[J]. Electric Drive, 2021, 51(22): 74-80.
- [6] HUANG X, ZHANG W, YANG J, et al. Market-based dynamic resource allocation in mobile edge computing systems with multi-server and multi-user[J]. Computer Communications, 2021, 165:43-52.
- [7] 胡泽宇. 基于智能缓存的泛在移动接入理论与方法研究[D]. 北京:北京邮电大学,2023.  
HU Zeyu. Research on ubiquitous mobile access theory and technology based on intelligent caching[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [8] 宋乐乐,罗威,刘畅,等. 面向5G的电力MEC部署探讨[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(4):38-43.  
SONG Lele, LUO Wei, LIU Chang, et al. Discussion on 5G-oriented power MEC deployment[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(4): 38-43.
- [9] 夏元轶,曾程,滕昌志,等. 面向差异化电力物联业务的分层级网络队列调度算法[J]. 电力信息与通信技术,2025,23(7):54-59.  
XIA Yuanyi, ZENG Zeng, TENG Changzhi. Hierarchical network queue scheduling algorithm for differentiated services[J].

- Electric Power Information and Communication Technology, 2025, 23(7): 54-59.
- [10] WANG S, BI J, WU J. Collaborative caching based on hash-routing for information-centric networking[C]//ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2013, 43(4): 535-536.
- [11] GUO S, XIE H, SHI G. Collaborative forwarding and caching in content centric networks[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 41-55.
- [12] ZHAO H, DENG S, ZHANG C, et al. A mobility-aware cross-edge computation offloading framework for partitionable applications[C]//2019 IEEE International Conference on Web Services (ICWS), IEEE, 2019: 193-200.
- [13] GHOREISHI S E, FRIDERIKOS V, KARAMSHUK D, et al. Provisioning cost-effective mobile video caching[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2016: 1-7.
- [14] ROSSI D, ROSSINI G. On sizing CCN content stores by exploiting topological information[C]//INFOCOM Workshops, 2012: 280-285.
- [15] CHOI N, GUAN K, KILPER D C, et al. In-network caching effect on optimal energy consumption in content-centric networking[C]//IEEE ICCL2 Next Generation Network Symposium, Ottawa, Canada, 2012: 2922-2927.
- [16] 顾汇贤, 王海江, 魏贵义. 基于非协作博弈的边缘分布式缓存方案[J]. 软件学报, 2022, 33(11): 4396-4409.  
GU Huixian, WANG Haijiang, WEI Guiyi. Distributed edge caching scheme using non-cooperative game[J]. Journal of Software, 2022, 33(11): 4396-4409.
- [17] 许文彬. 基于车辆边缘网络的内容缓存与预缓存策略研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.  
XU Wenbin. Research on content caching and pre-caching strategy based on vehicle edge networks[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [18] 李伟, 郭艳, 何明, 等. 满意度驱动下无人机移动边缘计算服务缓存和资源分配方法[J]. 航空学报, 2024, 45(19): 249-262.  
LI Wei, GUO Yan, HE Ming, et al. Satisfaction-driven services caching and resource allocation for UAV mobile edge computing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(19): 249-262.
- [19] 李博文. 考虑业务特性的电力通信网路由优化研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.  
LI Bowen. Research on routing optimization of electric power communication network considering service characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [20] 张子仪. 电力物联网分布式云数据中心优化部署与云边资源配置策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.  
ZHANG Ziyi. Distributed cloud data center placement optimization and cloud-edge resource allocation strategies for power internet of things[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [21] 魏向欣. 5G网络切片承载电力系统业务的时延特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2020.  
WEI Xiangxin. Research on time delay characteristics of 5G network slice carrying power communication service[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2020.
- [22] QI L, PENG M, LIU Y, et al. Advanced user association in non-orthogonal multiple access-based fog radio access networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(12): 8408-8421.
- [23] FAYAZBAKHS S K, LIN Y, TOOTOONCHIAN A, et al. Less pain, most of the gain[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 147-158.
- [24] 王素红, 唐煜星, 郭文豪, 等. 考虑优先级的智能电网业务调度与资源分配方案[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 59-70, 79.  
WANG Suhong, TANG Yuxing, GUO Wenhao, et al. Service scheduling and resource allocation scheme of smart grid considering priority[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 59-70, 79.
- [25] 林凯旋. M2M通信海量接入关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
LIN Kaixuan. Research on key technologies of massive access in M2M Communication[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [26] 孙笑科. 边缘计算网络中任务卸载和资源分配优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.  
SUN Xiaoke. Research on task offloading and resource allocation in edge computing networks[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [27] 马宝娟, 孟萨出拉, 韩金侠, 等. 基于差异化业务需求的电力5G虚拟专网组网方案研究[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(10): 68-75.  
MA Baojuan, MENG Sachula, HAN Jinxia, et al. Research on power 5G virtual private network networking scheme based on differentiated business requirements[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(10): 68-75.
- [28] 谭炜豪. 配用电物联网边缘计算终端优化部署及云边协同资源分配策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.  
TAN Weihao. Edge computing terminal deployment optimization and cloud-edge resource collaborative allocation strategies for power distribution and consumption internet of things[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.

收稿日期: 2025-02-21

修改稿日期: 2025-03-17