引用格式:殷柯奕,季天瑶,张超,等.基于信号时频域分析的有功平衡服务产品体系设计[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):290-304.
Citation: YIN Keyi, JI Tianyao, ZHANG Chao, et al. Active power balance service product system design based on signal time-frequency domain analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):290-304.

基于信号时频域分析的有功平衡服务产品体系设计

殷柯奕[1],季天瑶[1],张　超[2],邹　鹏[2],何希然[1],荆朝霞[1],崔校瑞[3],李　瑞[3]

(1.华南理工大学电力学院,广东 广州 510641;2.国网山西省电力公司,山西 太原 030021;
3.国网山西省电力公司电力科学研究院,山西 太原 030001)

摘　要:在能源互联网背景下,传统有功平衡调节产品难以满足新型电力系统对可靠性、灵活性及低碳性的要求。为解决国内调节产品设置单一且难以应对发电波动性增加的问题,提出了平衡需求的概念,并基于信号时频域分析方法设计有功平衡服务产品体系。该方法先通过K-shape聚类识别典型日平衡需求,结合集合经验模态分解对调节信号进行多级划分,再通过时频域分析进行产品标准化设计。以调频和备用产品为例,进行定量分析,验证了该方法的有效性。结果表明,该产品体系设计方法有助于实现资源的最优配置,降低市场成本。为各区域电力系统进行调节能力的层级划分,确定产品数目及响应时间要求,设计符合地区实际情况的有功平衡服务产品体系提供指导。

关　键　词:辅助服务;有功平衡;产品体系;信号分解
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.029　　**中图分类号**:TM73　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0290-15

Active power balance service product system design based on signal time-frequency domain analysis

YIN Keyi[1], JI Tianyao[1], ZHANG Chao[2], ZOU Peng[2], HE Xiran[1],
JING Zhaoxia[1], CUI Xiaorui[3], LI Rui[3]

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

Abstract: In the context of the energy internet, traditional active power balance regulation products fail to meet the reliability, flexibility, and low-carbon demands of new power systems. To address the problems that domestic regulation products are single in configuration and ill-equipped to handle the increasing volatility of generation, the concept of balance demand is introduced, and an active power balance service product system based on signal time-frequency domain analysis is proposed. The method uses K-shape clustering to identify typical daily balance demands, applies ensemble empirical mode decomposition (EEMD) for multi-level decomposition of regulation signals, and standardizes product design through time-frequency domain analysis. Quantitative analysis is conducted using frequency regulation and reserve products as examples to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The results show that this product system design approach facilitates optimal allocation of regulation resources and reduces market costs. Guidance is provided for the hierarchical classification of regulation capacity in regional power systems, the

收稿日期:2025-01-04;**修回日期**:2025-03-28
基金项目:国网山西省电力公司科技项目(52053023000A)
通信作者:荆朝霞(1975—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事电力市场、综合能源系统优化等方面的研究;E-mail:zxjing@scut.edu.cn

determination of product numbers and response time requirements, and the design of active power balance service product systems tailored to regional conditions.

Key words: ancillary service; active power balance; product system; signal decomposition

保证电力系统的有功功率实时平衡对于频率稳定至关重要。在电力市场环境下，对电力系统的调控主要通过不同类型的产品实现。其中，与有功功率平衡相关的产品通常被划分为电能量和辅助服务两大类。电能量市场主要针对规定的时间尺度（即交易时段）内的电能量进行交易，其最小时间尺度一般为 1 h、0.5 h 或更短。辅助服务则旨在解决电能量市场无法覆盖的系统安全稳定问题。有功平衡辅助服务（以下简称平衡服务）是在电能量市场的基础上，促进电力系统在不同时空尺度上的有功功率平衡。不同电能量市场产品定义和交易体系下，平衡服务的具体分类会有不同[1]，但一般为解决以下 3 类问题：交易时段功率平衡，即保证每个交易时段内电能量的供给和需求平衡；交易时段内的调节，即保证每个交易时段内在更小时间尺度（如分钟、秒、毫秒）上功率平衡；空间功率平衡，即保证系统内每个节点在每个时段功率平衡。本文将以上 3 类问题简称为电能量平衡、功率调制和阻塞。

在基于安全约束机组组合和经济调度出清，采用日前＋实时双结算系统的集中式电力市场（后简称为集中式电力市场）中，有功平衡服务一般分为调频和备用两大类。调频与惯量服务主要解决有功平衡的第二类问题，即电能量交易时段内更小时间尺度的平衡问题；备用服务主要解决第一类问题，即有功功率预测的偏差。实际市场中，不同服务的作用并无严格的界限，并会有所交叉。如果调频服务需要预留容量，一些市场将调频也归为备用的一种。集中式电力市场中，出清模型已经考虑了电网约束，故不需要额外的服务解决阻塞问题。

在以英国、欧盟为代表的基于分区电能交易、中长期市场＋平衡市场的分散式电力市场（后简称为“分散式电力市场”）中，有功平衡服务通常统称为平衡服务（balancing services，BS）。比如，欧洲统一电力市场中[2-4]，平衡服务包括频率维持、频率恢复和替代备用；英国电力市场中[5-6]，平衡服务包括强制频率响应和固定频率响应等。分散式电力市场中，电能量交易中未考虑全部的电网约束，故平衡服务解决的问题除了电能量平衡和功率调制，还包括阻塞问题。

新型电力系统下，波动性、间歇性可再生能源发电的比例增高，系统有功平衡的需求增大，难度增大[7]。一方面，需要激励更多的资源提供灵活的有功功率平衡服务；另一方面，需要优化有功功率平衡的产品体系，以更好匹配新的需求特性和各种新型主体特性[8]。

美国 FERC 要求 ISO/TSO 对辅助服务特别是调频服务进行重新设计，以更好地考虑储能的快速响应特性[9]，其中美国 PJM 设计了考虑调节里程和调节性能的调频服务交易机制，并将调频信号区分为传统调频信号 RegA 和动态调频信号 RegD 两大类；英国考虑响应时间、持续时间和响应方式等，先后推出十余种不同的调频辅助服务产品[5-6]；欧洲统一电力市场建设过程中，设计了若干标准平衡服务，同时鼓励各国探索适合各自情况的辅助服务产品及采购机制，并且要求定期审查和更新标准化产品，以适应系统需求的变化[10]。

中国电力市场中，调频和备用都归为有功平衡服务，相关产品体系的研究也受到了较多关注。文献[11-12]从全国辅助服务市场体系角度提出了顶层架构建议，文献[13-14]根据响应时间对备用进行了分类，文献[15]基于传统备用分类[16]结构，提出了整合供需两侧的备用分类新思路。

产品体系设计是电力市场机制设计中最基础的内容[17]。新型电力系统下，电力供需双方的技术和经济特性发生了巨大变化，迫切需要重构电力市场的产品体系。然而，关于新产品设计和分类方法的研究较少，主要原因是成熟市场的路径依赖性，使得重构现有体系难度较大。

中国电力市场正在建设中，现货市场和中长期市场是主要建设内容，而调频、备用等辅助服务市场尚处于初期阶段。相对而言，中国可以更容易地引入适合新电力系统特性的辅助服务产品体系，这是我国电力市场建设的优势。然而，目前相关研究多为定性分析，缺乏定量的分类方法。

如果将不同有功平衡产品的功率曲线看作不同种类的信号，则可以将有功平衡产品体系的设计

看作一种信号分解问题。信号分解方法在电力领域有较多的应用，多数在谐波检测[18-19]和功率预测[20]、频率控制[21]等领域。在电力市场领域，目前较多用于辅助服务需求确定[22-23]，文献[23]应用数学形态学算法对电网净负荷预测误差样本进行多时间尺度分解，进行备用需求的确定。基于信号分解方法进行电力产品体系方面的定量研究，尚未看到系统的研究。文献[24]基于小波变换将调频产品分为传统调频产品和快速调频产品，可以认为是基于信号分解理论进行调频产品设计的初步探索。本文首先提出平衡需求的概念，并提出基于信号时频域分析的有功平衡服务产品体系设计方法，然后基于该方法，分别以调频、备用产品为例进行定量的分析设计。本文的主要贡献在于有功平衡服务产品体系设计方法的提出，如果要应用到具体市场设计中，需要根据其资源禀赋、电源结构和系统要求进行更加深入的、细致的设计。

1 平衡需求相关概念及影响因素

1.1 平衡需求的概念

电力系统需要保证每个时间和空间点上电力功率供需的平衡，以保证频率、电压在规定的范围内。功率平衡包括有功平衡和无功平衡，本文主要讨论前者。本文提出有功功率平衡需求（简称平衡需求）的概念，具体如下。

定义：平衡需求是在特定空间和时间范围内，为确保电力系统安全运行和满足电能质量要求，在电能量市场交易结果基础上提供的功率调节量。

平衡需求反映了实际供需与市场交易结果之间的差异，其大小和特性与电能量市场的定义密切相关。从定义看，平衡需求主要取决于3个方面的因素：电能量市场交易结果、电能量交易供需双方的实际功率水平、电力系统安全运行和电能质量要求。

1.2 平衡需求的影响因素及构成

前面将平衡需求分为了3种类型：电能量平衡、功率调制和阻塞，这里对影响平衡需求的因素进行进一步的分析和讨论。

1）关闸时间。

关闸（gate closure）时间是电能量市场报价截止时间，在不同市场中规定不同。例如，在英国分散式市场中，关闸时间为实际运行时段的前1 h，市场主体需要在此之前提交该时段的合同电量（contract notification，CN），市场主体实际用电量与提交的合同电量之差为不平衡量，即本文定义的第一类平衡需求——电能量平衡需求。在PJM集中式电力市场中，关闸时间通常为实时市场报价截止时间，平衡需求则基于实时市场交易结果进行调节。关闸时间越早，市场的不确定性越高，平衡需求越大；关闸时间越晚，市场主体有更多调整时间，平衡需求越小。合理的结算机制可以激励市场主体提前保持平衡，从而减少平衡需求。

2）交易时段。

交易时段是电能量市场中最小的时间单位，通常为1 h或30 min，部分市场已缩短为5 min。交易时段越长，平衡需求越大；越短，平衡需求越小。新型电力系统中，缩短交易时段可增加市场主体的平衡责任，提升电能量平衡需求，降低功率调制需求。

3）交易空间粒度。

交易空间粒度主要影响第三类平衡需求，即阻塞管理需求。如前所述，在集中式电力市场中，电能量交易已满足阻塞管理要求；而在分散式市场中，需要平衡服务来解决区域内的阻塞问题。关闸时间、交易时段和空间粒度的差异会影响平衡需求，通常情况下，关闸时间越近、交易时段越短、空间粒度越小，电能量交易的平衡责任就越大，从而减少系统的总体平衡需求。这也是新型电力系统下电力市场产品设计的一个发展趋势。

4）频率偏差控制要求。

频率波动是有功功率不平衡的重要影响因素，频率偏差控制的要求会影响平衡需求，特别是功率调制需求。频率偏差控制标准越严格，平衡需求越高。然而，考虑经济成本时，频率标准不应过高，应在标准带来的益处与成本之间平衡。

5）可靠性标准。

电力系统的可靠性与供给能力和供需不确定性密切相关。较高的可靠性标准会增加平衡需求；而在特殊情况下，如果允许更长时间的停电，或放宽停电标准，将减少电能量平衡需求，需要综合考虑停电损失和平衡成本来确定。

1.3 平衡需求的确定

1.3.1 2种平衡需求确定方法

实际电力市场中，平衡需求可通过两种方式确

定：一是在市场运行后，根据电力系统和市场的数据分析得到；二是在市场运行前，由市场主体申报得到。本文采用第一种方法，即根据系统和市场实际数据估算各类平衡服务的需求，进行电力市场产品体系的设计。

1.3.2　基于系统数据的平衡需求确定方法

如前所述，本文将平衡需求分为电能量平衡、功率调制和阻塞管理3类。其中，功率调制包括不同时间尺度的功率调节，包括传统概念上的转动惯量、一次调频和二次调频等。后续分析中，为简化分析，不考虑阻塞管理需求，在功率调制需求中，暂不考虑转动惯量需求。

假设 T 为电能量交易的最小时段尺度（如 1 h），t 为频率偏差控制的最小时间尺度（如 10 ms），用 T_i 表示第 i 个电能量交易时段，t_k 表示第 k 个频率偏差控制时段。在时段 t_k，实际的功率偏差 δ_k^{t} 与允许的最大功率偏差 P_δ^{m} 之间的差，就是该时段的平衡需求，即

$$P_k^{\mathrm{D,t}} = \delta_k^{\mathrm{t}} - P_\delta^{\mathrm{m}} \tag{1}$$

假设 t_k 处于交易时段 T_i 内，下面以 t_k 为例，对 δ_k^{t} 进行分析。假设所有电源在时段 T_i 的总交易功率为 $P_i^{\mathrm{E,T}}$，所有用户在时段 T_i 的总交易功率也为 $P_i^{\mathrm{E,T}}$。所有电源在时段 t_k 的预测总功率为 $P_k^{\mathrm{G,t}}$，在 T_i 时段的预测平均功率为 $P_i^{\mathrm{G,T}}$；所有用户在时段 t_k 的预测总负荷为 $P_k^{\mathrm{L,t}}$，在时段 T_i 的预测平均负荷为 $P_i^{\mathrm{L,T}}$，则时段 t_k 的实际功率偏差为

$$\delta_k^{\mathrm{t}} = \left(P_k^{\mathrm{L,t}} - P_i^{\mathrm{E,T}}\right) - \left(P_k^{\mathrm{G,t}} - P_i^{\mathrm{E,T}}\right) = P_k^{\mathrm{L,t}} - P_k^{\mathrm{G,t}} \tag{2}$$

假设发电和用户在电能量市场交易时均按最佳预测确定交易量，则平衡需求由两部分组成：时段 T_i 平均功率的预测误差；时段 T_i 内每个时段 t_k 的偏差。

可以把时段 t_k 的总发电和总负荷分别计算为

$$P_k^{\mathrm{G,t}} = P_i^{\mathrm{E,T}} + \delta_i^{\mathrm{G,T}} + \delta_k^{\mathrm{G,t}} \tag{3}$$

$$P_k^{\mathrm{L,t}} = P_i^{\mathrm{E,T}} + \delta_i^{\mathrm{L,T}} + \delta_k^{\mathrm{L,t}} \tag{4}$$

其中，$\delta_i^{\mathrm{G,T}}$、$\delta_i^{\mathrm{L,T}}$ 分别为预测的发电和负荷在时段 T_i 的平均功率偏差。

$$\delta_i^{\mathrm{G,T}} = P_i^{\mathrm{G,T}} - P_i^{\mathrm{E,T}} \tag{5}$$

$$\delta_i^{\mathrm{L,T}} = P_i^{\mathrm{L,T}} - P_i^{\mathrm{E,T}} \tag{6}$$

$\delta_k^{\mathrm{G,t}}$ 和 $\delta_k^{\mathrm{L,t}}$ 为发电侧和用户侧预测的在时段 T_i 平均功率偏差基础上的 t_k 时段功率偏差。根据式(3)～(6)，可以得到 $\delta_k^{\mathrm{G,t}}$、$\delta_k^{\mathrm{L,t}}$ 的表达式分别为

$$\delta_k^{\mathrm{G,t}} = P_k^{\mathrm{G,t}} - P_i^{\mathrm{E,T}} - \delta_i^{\mathrm{G,T}} = P_k^{\mathrm{G,t}} - P_i^{\mathrm{G,T}} \tag{7}$$

$$\delta_k^{\mathrm{L,t}} = P_k^{\mathrm{L,t}} - P_i^{\mathrm{E,T}} - \delta_i^{\mathrm{L,T}} = P_k^{\mathrm{L,t}} - P_i^{\mathrm{L,T}} \tag{8}$$

图1给出了功率偏差计算的示意图。实际电力系统中，频率偏差控制的最小时段非常短，为毫秒级，因此一个交易时段 T_i 内会有很多个时段 t。为方便理解和简化图形，假设一个时段 T_i 内有6个 t 时段，并假设发电侧在时段 T_i 的平均功率偏差和每个时段 t_k 的功率波动均为零，即发电在每个时段 t 的出力均与时段 T_i 的平均功率相同。这样总的平衡需求就等于负荷侧的总功率偏差。总功率偏差减去最大允许功率偏差，即可得到总平衡需求，而最大允许功率偏差根据所在电力系统的频率质量控制要求确定。

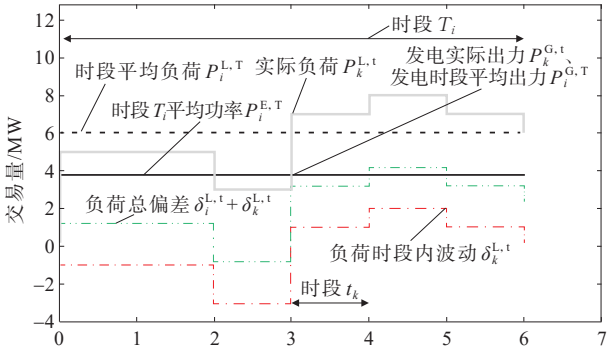

图1　功率偏差计算示意图

Figure 1　Power deviation calculation

2　平衡服务产品体系设计基本思路

2.1　市场环境下的平衡服务产品体系

文1确定的是在电能量交易结果的基础上的总平衡需求，可通过不同时间尺度的平衡服务来满足。以[T/t]来定义平衡服务，其中 t 为该平衡服务的时间尺度，T 为上一级平衡服务的时间尺度。例如，[60 min/5 min]表示将按60 min平衡的电能产品“调制”到按5 min平衡的产品，[5 min/10 s]表示将按5 min平衡的电能产品“调制”到按10 s平衡的产品。因此，若要实现小时级的平衡到秒级的平衡，通过5种产品组合来满足：

1）[60 min/5 min] + [5 min/10 s] + [10 s/1 s]；

2）[60 min/5 min] + [5 min/4 s] + [4 s/1 s]；

3）[60 min/15 min] + [15min/4 s] + [4 s/1 s]；

4)[60 min/1 min]+[1 min/1 s]。

上述讨论关注的是从电能量交易时段到最小频率控制时段的平衡需求。实际上,在新型电力系统下,参考传统电力系统中电力电量平衡的概念,可将平衡服务的时间尺度扩展到更长时间尺度(如年),从而形成从年到秒甚至毫秒的平衡产品体系。市场中的各类交易主体,包括发电侧主体和用户侧主体,可以选择不同的电能量交易最小时间尺度,并承担比电能量时间尺度更小时间尺度内的平衡责任。例如,如果某发电主体选择月作为电能量交易的最小时间尺度(只申报每月的总电量),则需承担[月/日]、[日/时]、[时/分]、[分/秒]4种平衡服务的成本;如果某用户主体选择"时"作为交易时间尺度,则需承担[时/分]、[分/秒]2种平衡服务的成本。要计算每个市场主体在每个平衡时间尺度上的平衡责任,市场主体还需申报与波动幅度相关的参数,具体如何设置这些参数是平衡产品设计中的关键问题,本文不做深入讨论。

2.2 平衡产品体系的设计

本文提出以平衡需求为输入,产品体系设计为输出的基于信号分解的有功服务产品体系设计的研究思路,总体框架如图2所示。需要设计的变量包括产品的数目,以及每类产品的一些具体参数,如响应时间、持续时间等。基本步骤如下:

1)根据所在电力市场的具体情况,利用历史数据确定每个最小频率控制时段的平衡需求,作为输入,并用K-shape等方法对不同场景的平衡需求进行聚类;

2)根据现有调节资源的情况,对其进行分类,确定每类资源的技术经济参数,如最快响应时间、调节速率、最大持续时间、单位成本等;

3)设定平衡产品设计的基本要求及目标,如最小产品数、最大产品数等基本要求,市场总成本最小化、社会福利最大化等设计目标;

4)基于步骤3)中的基本要求,利用时频域分解等信号处理技术对平衡需求进行分解,将其分解为若干时频域的信号,信号数需要大于最小产品数;

5)基于步骤4)的分解结果和步骤3)的目标,优化确定平衡产品体系设计,确定产品数量及每个产品的参数,如响应时间、持续时间等。考虑到产品数目和参数受技术经济约束,可以采用枚举法进行优化:给出若干可行的设计方案,对每个方案计算各个目标值,通过加权或其他的多属性决策方法确定最优设计方案。如果考虑调节成本,在计算各类调节资源的调节成本时,应基于社会典型成本计算。

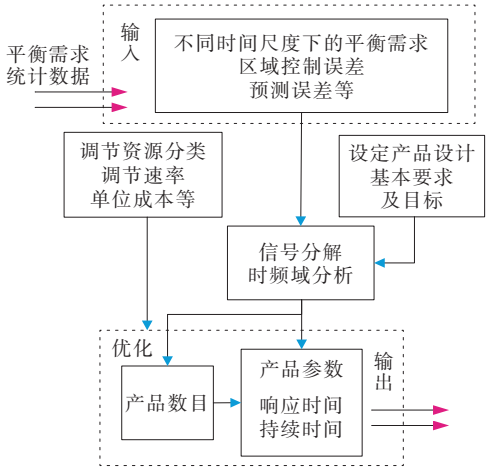

图2 有功平衡产品体系设计总体框架

Figure 2 General framework for design of active power balance product system

本文提出的平衡服务产品体系优化设计方法,可用于整体的、所有平衡产品的系统化设计,也可应用于具体某一类平衡产品的设计。例如:在不考虑输电阻塞的情况下,调频产品主要应对实时运行时负荷与实时电能量市场出清形成的发电计划偏差,主要输入为区域控制偏差(area control error, ACE);备用产品主要应对预测误差,主要输入为不同时间尺度的预测误差。

以备用产品体系设计为例。电力系统中的运行备用分为负荷备用与事故备用,由于事故备用一般为固定值,故在进行多级备用产品体系设计时主要研究对象为负荷备用。将负荷功率减去新能源功率得到的差值视作净负荷功率,实际调度时净负荷功率的实际值与净负荷功率预测值的偏差,是系统实际所需要调用资源满足的负荷备用[25-26],即输入的平衡需求信号。

平衡产品体系设计涉及内容繁多,是一个复杂的系统工程,要达到实际市场应用的程度,仍需进一步细化。本节主要对方法中步骤1)、4)、5)进行讨论,具体如图3所示。这3个步骤分别采用K-shape聚类、集合经验模态分解和信号波动时频域分析方法,其具体描述见文3、4。

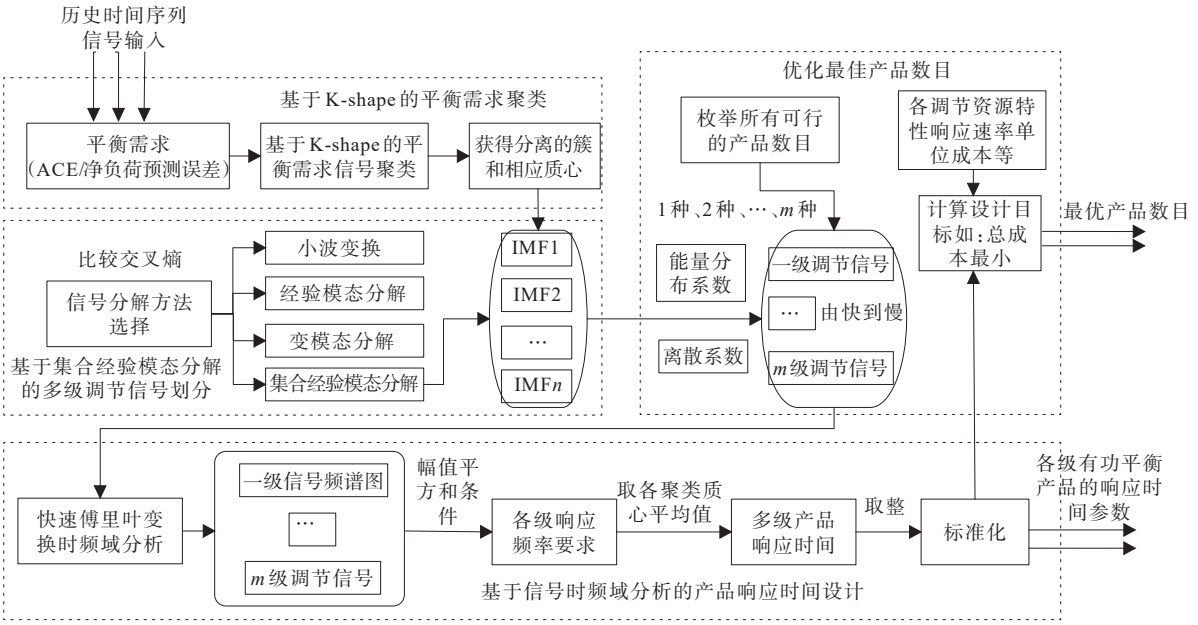

图 3　基于信号时频域分析的有功平衡服务产品体系设计流程

Figure 3　Design process of active power balance service product system based on signal time－frequency domain analysis

2.3　市场运营阶段的平衡产品报价及出清

市场实际运营时，报价、出清及结算的基本流程如下。

1）市场设计已经确定电能量产品的时间尺度、反映电能量波动的参数、平衡产品类型及相关交易、定价和成本分摊机制。例如，电能量产品可选择年、月、日、时和 5 min 等时间尺度；电能量波动参数包括平均波动功率和方差、最大持续波动能量和方差；平衡服务的类型包括[年/月]、[月/日]、[日/时]、[时/5分]、[5分/4秒]、[4秒/10毫秒]；

2）每个市场根据选定的时间尺度进行电能量交易，并申报在相应时间尺度内反映电能量波动情况的参数。

3）市场运营机构根据电能量交易结果、系统安全运行要求及历史交易和运行数据，确定每类平衡服务的需求；

4）市场运行机构根据报价、需求及交易机制，进行各类平衡服务的市场出清，确定平衡服务供给者每类平衡服务的中标量；

5）根据出清结果，平衡服务定价机制和成本分摊机制，确定每个市场主体获得的平衡服务费，以及应该缴纳的平衡服务成本。

3　多级调节信号的确定方法

3.1　基于 K-Shape 的平衡需求聚类

本文基于 K-shape 算法[27-28]对日平衡需求信号曲线进行聚类分析。相比常用的 K-means 聚类算法，K-shape 算法对于时间序列数据聚类更有针对性，其考虑时间序列的尺度不变性和平移不变性，能更好地处理具有不同幅度和相位差的时间序列数据。在电力系统领域，K-shape 方法常在负荷预测与需求侧管理时被用于聚类[29-30]，帮助识别不同的负荷模式或需求特征，以便为特定时段的电力调度或储能管理提供参考。

K-shape 基于与 K-means 类似的迭代细化过程，通过这个迭代过程，K-shape 最小距离平方和，并设法产生均匀且分离良好的簇。给定一组 d 日的历史误差信号时间序列 $X=\{\vec{x}_1,\vec{x}_2,\cdots,\vec{x}_d\}$，簇数 $k<d$，目标是将 X 划分为 k 个成对不相交的簇 $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_k\}$，使得簇内误差平方和（sum of squared errors within cluster，SSE）最小，即

$$P^*=\arg\min_{P}\sum_{j=1}^{k}\sum_{\vec{x}_i\in p_k}\mathrm{dist}(\vec{x}_i,\vec{c}_k)^2 \tag{9}$$

式中，$\vec{c}_k$ 为分区 $p_k\in P$ 的质心。

在每次迭代中，K-shape 执行 2 个步骤：

1）分配。通过将每个时间序列与所有计算的质心进行比较，并分配给最接近质心的聚类来更新簇；

2）更新。更新聚类质心以反映前一步中聚类隶属度的变化。

重复步骤 1）、2），直到聚类成分没有变化或达到允许的最大迭代次数。簇数 k 采用肘部法则确

定[31]。通过K-shape算法，本节可将数据量较多的时段平衡需求时间序列聚类成若干个簇，并得到其对应的质心，即典型时段平衡需求。

3.2 信号分解方法选择

在众多信号分解算法中，小波变换、经验模态分解、变模态分解和集合经验模态分解的计算较为精炼高效，在处理非线性和非平稳信号方面显示出优越性，能够自适应地分解信号而无需预设基函数，适合在平衡需求信号特征难以定性的情况下进行有功平衡服务产品设计。

本节通过计算各分解方法下相邻分量间的交叉熵（cross-entropy，CE）来衡量分解后相邻两分量之间的差异性，从而选择合适的平衡需求波动的分解方法。如果2个分量相同，交叉熵为零，相反，相邻分量交叉熵越大，说明两者之间关联程度越小，此时，能够有效区分不同资源提供服务时的目标定位，避免出现“资源抢占”的现象。本文将信号分解结果的分量归一化，定义相邻分量间的交叉熵为

$$H(P,Q)=-\sum_{x}P(x)\log(Q(x)) \tag{10}$$

式中，$P(x)$、$Q(x)$为信号分解后的2个相邻分量。

通过比较，本文认为选择集合经验模态分解（ensemble empirical mode decomposition，EEMD）[32-33]技术作为平衡需求的分解技术更利于精细化有功平衡服务交易产品。因此，本节主要利用EEMD方法对平衡需求进行分频处理。在此之前，EEMD在电力系统领域常被应用于故障诊断与负荷预测[34]。与小波变换容易导致虚假谐波的问题相比，EEMD方法具有突出的优势，其最大特点在于能够以自适应的方式提取信号的各分量及其变化趋势。

经验模态分解（empirical mode decomposition，EMD）是一种利用信号的局部极值点和本征模态函数（intrinsic mode function，IMF）分解信号的自适应信号处理方法。EEMD方法则在EMD基础上，通过逐步加入不同幅值的高斯白噪声，然后对各个IMF分量求平均，得到最终的分解信号。EEMD的步骤如下所示：

1）创建一个添加噪声的原始集合，即

$$x^i(t)=x(t)+\varepsilon^i(t),i\in\{1,2,\cdots,I\} \tag{11}$$

式中，$x(t)$为原始信号；$\varepsilon(t)$为独立高斯白噪声；I为添加噪声的试验次数；$x^i(t)$为第i次试验后的噪声信号。

2）对于每一个噪声信号$x^i(t)$，应用EMD得到分解后的M个IMF和残差为

$$x^i(t)=\sum_{m=1}^{M}c_m^i+r^i \tag{12}$$

式中，c_m^i为第i次试验中的第m个IMF分量；r^i为第i次试验中的残差。

3）对所有试验取平均值，以重构原始时间序列，即

$$x(t)=\frac{1}{I}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}c_m^i+r^i\right)+\varepsilon_I \tag{13}$$

其中，误差$\varepsilon_I=\varepsilon/\sqrt{I}$。

3.3 信号特征分析

平衡需求信号是一维离散信号，采用EEMD方法可以将其分解为多个IMF分量和一个剩余分量。每个IMF分量的波动幅度和能量量级各不相同。通常，平衡需求围绕信号均值上下波动，其偏差幅度对电网的安全稳定运行具有一定影响。

基于这一规律，本文定义了能量分布系数和离散系数，以衡量IMF分量的能量量级和波动程度。将二者进行归一化加权求和，将加权结果相近的信号分量划分为一组。

能量分布系数E_m定义为IMF分量幅值平方和占原始信号幅值平方和的比例，即

$$E_m=\frac{\sum_{n=1}^{N}c_m(n)^2}{\sum_{n=1}^{N}x(n)^2} \tag{14}$$

式中，$c_m(n)$为第m个IMF分量在采样点n处的幅值；N为信号的采样点数量。

离散系数v_m定义为平衡需求信号标准差σ_m与平均值$\bar{c}_m$的比值：

$$v_m=\sigma_m/\bar{c}_m \tag{15}$$

$$\bar{c}_m=\frac{\sum_{n=1}^{N}c_m(n)}{N} \tag{16}$$

$$\sigma_m=\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(c_m(n)-\bar{c}_m)^2}{N}} \tag{17}$$

加权公式为

$$W=aE_m^*+bv_m^* \tag{18}$$

式中，a、b为加权系数（本文分别取1 000和-10）；上标*表示归一化值。

4 基于信号时频域分析的平衡服务产品体系设计

4.1 有功平衡服务产品设计基本思路

如图2、3所示，本文将平衡产品体系的设计

建模为一个优化问题。实际设计中，可以根据设计目标、系统特性等选择合适的优化方法。这里为简化分析，说明方法的基本原理，假设优化的决策变量为产品数目，采用简化的枚举法求解，具体步骤如下：

1）枚举所有可行产品数目；

2）对每种数目，计算目标函数值（如总成本）；

3）找出总成本最小的产品数，优化结束。

对于步骤 2），假设以总成本最小为设计目标，则包括以下步骤：①对某个产品数，根据能量分布系数和离散系数分组，获得多级调节信号（如对产品数 3，得到快、中、慢 3 组信号）；②根据调节资源的调节速率、单位成本等，确定每种产品的调节资源以及总成本；③将各产品的成本相加，得到总成本。

在由平衡需求分解得到由快到慢的多级调节信号之后，需要确定各级有功平衡服务产品对应的响应时间，可通过时频域变换进行。由于在正弦信号值中，上升时间（即响应时间）为总时段的 1/4，故响应时间所对应的频率应为响应时间 4 倍的倒数[22]，则利用快速傅里叶变换（fast Fourier transform，FFT）可以方便地根据响应时间的不同对系统有功平衡服务进行分级设计。

本文利用 FFT 分别对多级调节信号进行从时域到频域的转换，获得其频谱图的分布，并通过分级的累计比例系数寻找满足要求的频率点，从而进行产品设计。

4.2　基于 DFT 时频域分析的响应时间设计流程

平衡需求 $x(t)$ 是由离散时间测量数据计算而成，故采用离散傅立叶变换（discrete Fourier transform，DFT）。FFT 与 DFT 本质相近，是一种计算 DFT 的高效算法。DFT 定义为

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\cdot \mathrm{e}^{\frac{-i\cdot 2\pi\cdot k\cdot n}{N}} \tag{19}$$

式中，$X(k)$ 为频域信号的第 k 个频率分量；$x(n)$ 为时间域信号的第 n 个样本；N 为信号的总样本数。

调节资源需要在各级响应时间到达前完全提供中标量，以有效应对分解后的各级调节信号即电力平衡需求。为计算响应时间，本文引入累积比例系数 λ。在频域中，频率越高，响应时间越短，故响应速度要求沿 x 轴正方向变高。在总平衡需求不变的情况下，将各级响应时间设置在频率 ω_λ 位置，意味着位于该点之前的功率需求都慢于该频率，均可得到响应。因此，需使得在该点之前的功率幅值累积尽可能高。本文计算傅里叶变换结果在各频率处的总幅值，并从低频到高频依次累加幅值，寻找满足累积比例系数 λ 要求的频率点，即

$$\sum_{0}^{\omega_\lambda}A(\omega)\geqslant\lambda\sum_{0}^{\infty}A(\omega) \tag{20}$$

并据此计算响应时间为

$$T=\frac{2\pi}{\omega_\lambda} \tag{21}$$

式中，ω 为频率；ω_λ 为满足累积比例系数 λ 要求的频率点；$A(\omega)$ 为傅里叶变换结果在频率 ω 处的幅值；$\sum_{0}^{\infty}A(\omega)$ 为平衡需求的在各频率处得总幅值；T 为响应时间。

对不同产品的累积比例系数 λ，一方面，从产品设计出发，各级产品对资源平衡系统偏差的能力要求不同；另一方面，考虑资源运行特性，高质量产品下的服务资源出力一般能够快速变化乃至跃变，而低质量产品的目标资源通常连续、较均匀缓慢地调节，在响应时间内呈现相对不同的调节趋势。因此，可根据实际情况对 λ 进行差异化设计，建议值区间为 [0.60, 0.95]。

5　算例分析

调频服务产品的需求通常以区域控制误差（area control error，ACE）作为衡量指标（但其具体需求需结合系统运行特性，如转动惯量等综合确定），数据来源为南方某省在 2021 年 2 月的实时 ACE 数据，采样时间间隔为 5 s，全天共 172 800 个数据点。以 2021 年 2 月 2 日 ACE 数据为例，进行 EEMD 分解，如图 4 所示。根据 IMF 分量的能量分布和离散系数进行 IMF 分组，每组内 IMF 相加，获得快、中、慢三级调频信号，如图 5 所示。

分别对快速调频信号、中速调频信号和慢速调频信号进行 FFT 频谱分析。累积比例系数分别设置为 0.9、0.8、0.7，得到满足设计要求的频率点分别为 5.33×10^{-2}、2.92×10^{-3}、1.44×10^{-3} Hz，并计算响应时间分别为 4.69、85.62、173.61 s。对其余天数进行与该日相同的波动特征分析，取平均值，为方便在市场实际进行，本文对上述时间进行取整，最终完成多级调频产品设计如表 1 所示。

下面以备用产品体系设计为例进行详细说明。备用服务产品的需求为日前净负荷预测与实际净负荷的偏差（后简称净负荷预测误差），净负荷是指系统总负荷减去可再生能源（如风电、光伏等）的出力后的剩余负荷，数据来源为比利时电网运营商

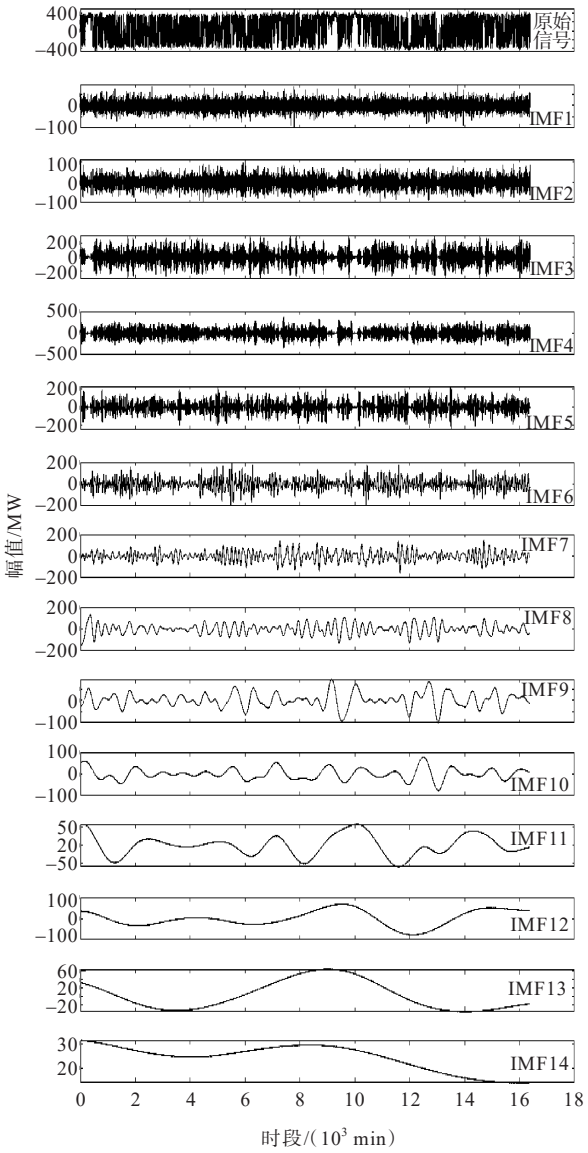

图 4 ACE 信号 EEMD 分解结果

Figure 4 Results of ACE signal decomposition using EEMD

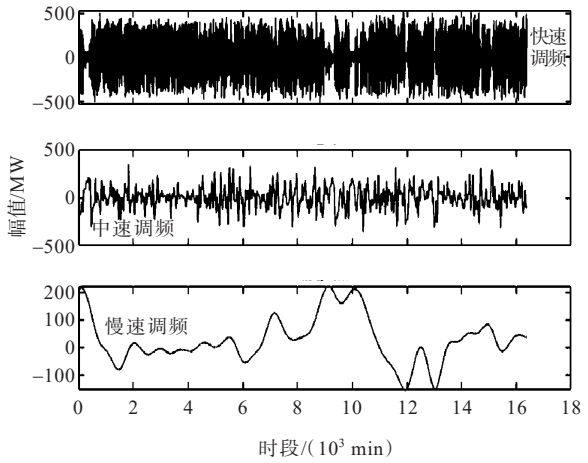

图 5 快、中、慢三级备用信号

Figure 5 Fast, medium, and slow reserve signals

表 1 多级调频产品设计结果

Table 1 Design results for multi-level frequency regulation products

备用分类	响应频率要求/Hz	响应时间/s	
		计算值	设定值
快速调频	7.55×10^{-2}	4.54	5
中速调频	7.74×10^{-3}	79.41	90
慢速调频	1.46×10^{-3}	223.20	240

Eila 在 2023 年全年 365 天的公开数据[34]。负荷和新能源出力的预测数据与实际数据采样时间间隔均为 15 min，全天共 96 个时段。

5.1 平衡需求聚类

通过 K-shape 算法对日净负荷预测误差进行聚类，可将全年净负荷预测误差用归纳为 k 种情况，k 值由肘部法则确定。通过绘制不同 k 值下的聚类结果的评价指标（簇内平方和 SSE）随 k 值变化的曲线图，来寻找“肘部”，即曲线开始减缓的点，其表示在该点之后增加 k 不会显著降低聚类的误差，如图 6 所示。取最佳簇数，当 $k=20$ 时，净负荷预测误差聚类结果如图 7 所示。

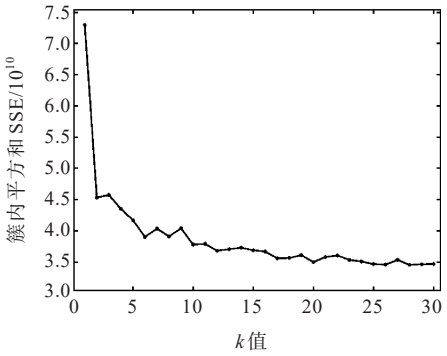

图 6 肘部法则确定最佳 k 值

Figure 6 Elbow method for determining optimal value of k

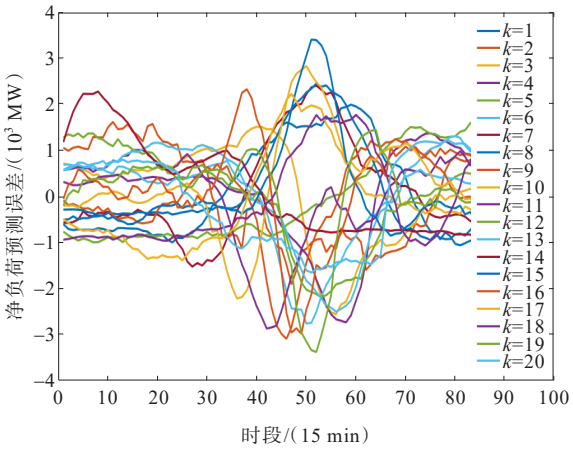

图 7 净负荷预测误差聚类结果

Figure 7 Clustering results of net load forecast errors

5.2　信号分解技术对比

本节就小波变换（wavelet transform，WT）、EMD、变模态分解（variational mode decomposition，VMD）、EEMD技术对原始信号多次分解后得到不同频率的信号进行了比较，包括4种算法的理论与应用背景和分解后的交叉熵对比。4种算法的理论与应用背景如表2所示。

时频域分析方法通过在时间和频率2个域中同时分析信号的特性，为传统的时域或频域分析提供了更为细致的信息。这些方法能够处理非线性、非平稳的信号，在电力系统中得到广泛应用，特别是在信号处理、负荷预测、故障检测等领域。

以文5.1获得的日净负荷预测误差的聚类中心数据曲线作为原始信号数据，用4种方法对该信号进行信号分解。

以聚类结果1为例，为了得到时间序列之间相关联程度，计算同一分解方法下，相邻分量间的交叉熵平均值。4种信号分解方法对比如表3所示。

表2　4种算法的理论与应用背景

Table 2　Theoretical and application background of four algorithms

分解方法	基本原理	优点	缺点	应用领域
WT	将信号通过不同频率的小波基函数进行分解，获得多尺度的信号表示	可以有效处理非平稳信号；提供时间－频率局部化的信息	分解的结果可能过于平滑；频率分解受到选择的小波基函数影响	电力系统故障检测：监测电力系统中的瞬时故障（如短路、过载）电力质量分析：分析电压、频率波动等电力负荷预测：基于历史数据对负荷变化进行分析
EMD	通过分解信号为一组本征模态函数（IMF*s*），每个IMF代表信号的一个局部振荡模式	适用于非线性和非平稳信号；具有自适应性	存在模式混叠现象计算复杂，处理长信号时效率较低	电力系统振荡分析：识别和分析电力系统的频率和电压波动电力系统故障诊断：识别由于负荷波动或设备故障导致的系统扰动风电/光伏发电预测：分析可再生能源发电的波动特性
VMD	通过变分法对信号进行分解，将信号分为多个频带，避免了EMD中的模式混叠问题	解决了EMD中的模式混叠问题；更适合复杂信号的分析	需要优化参数（如分解模式数）；对信号的分解依赖于模型的设定	电力负荷预测：利用VMD分解电力负荷信号，预测不同时间尺度上的需求波动电力系统动态分析：分析电力系统在动态条件下的响应电网频率调度：分析和优化电网频率调度策略
EEMD	通过向信号中加入白噪声并多次进行EMD分解，平均去除噪声的影响，避免模式混叠	可以有效去除EMD中的模式混叠问题；稳定性较高；适应性强	对噪声敏感（需确保噪声强度适当）；计算量大，处理复杂数据时较慢	电力系统负荷预测：基于EEMD对电力负荷进行多尺度分析，提高预测精度电网故障检测：通过EEMD分析电力系统信号中的异常波动，帮助检测故障电力质量分析：分析电压波动、频率波动等电力质量问题

表3　4种算法分解后的交叉熵

Table 3　Cross-entropy of adjacent components after decomposition using four algorithms

分解方法	相邻分量间的交叉熵平均值
WT	1 591.7
EMD	2 986.9
VMD	1 077.5
EEMD	3 213.3

由对比可以看出，EEMD的分量间交叉熵平均值最大，代表其相关程度最小，有效避免了信号混叠。选择EEMD技术作为调节信号的分解技术更利于精细化备用交易产品。因此，本文选择采用EEMD的方法对净负荷预测误差信号进行分频。

5.3　波动特征分析及调节产品设计

本算例拟定可行备用产品数目为1、2、3种，以适应比利时地区不同类型的备用资源。在出清阶段，备用资源根据调节速率分别参与多级备用市场。

为更精细化地分析波动，本节采用三次样条函数插值处理聚合后的k个净负荷预测误差数据，获得时间间隔为1 min的样本集，以模拟实际系统采样的时间序列，利用EEMD的方法分解净负荷预测误差信号。以聚类结果1为例，获得10个IMF分量（将IMF10视为余量，归为最后一组），分解结果如图8所示。

根据IMF分量的能量分布和离散系数，进行IMF分组（此处展示产品数目为3的情况），结果如表

4所示。多级备用产品设计结果如表5所示。每组内IMF相加，获得各级净负荷预测误差信号，如图9所示。FFT变换结果及频率点寻找如图10～12所示。

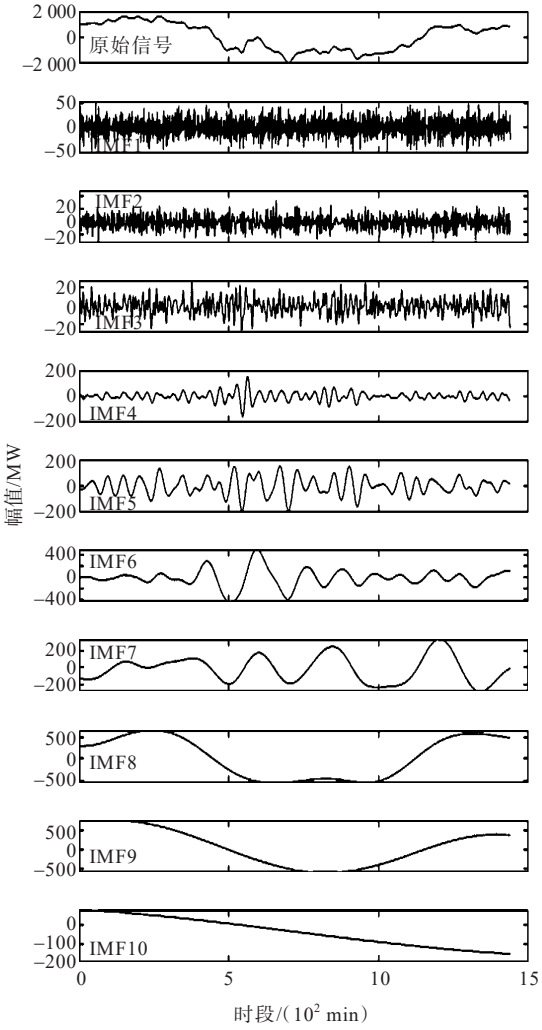

图8 净负荷预测误差EEMD分解结果

Figure 8 Results of net load forecast error decomposition using EEMD

表4 各IMF分量的特性系数与分组

Table 4 Characteristic coefficients and grouping of each IMF component

IMF分量	能量分布系数	离散系数	加权结果	分组
IMF1	1.86×10^{-4}	1.248 0	0.33	
IMF2	1.15×10^{-4}	1.253 5	−0.03	快速备用
IMF3	1.09×10^{-4}	1.260 9	−0.12	
IMF4	8.65×10^{-3}	1.281 9	26.99	
IMF5	4.10×10^{-3}	1.258 8	7.51	中速备用
IMF6	1.33×10^{-2}	1.148 3	48.42	
IMF7	6.27×10^{-2}	0.975 8	264.05	
IMF8	2.16×10^{-1}	0.955 0	928.20	慢速备用
IMF9	2.31×10^{-1}	0.811 4	994.55	
IMF10	6.30×10^{-3}	0.902 7	26.18	

表5 多级备用产品设计结果

Table 5 Design results for multi-level reserve products

备用分类	响应频率要求/Hz	响应时间/min	
		计算值	设定值
快速备用	4.53×10^{-3}	0.92	1
中速备用	2.24×10^{-4}	18.63	20
慢速备用	6.56×10^{-4}	63.54	60

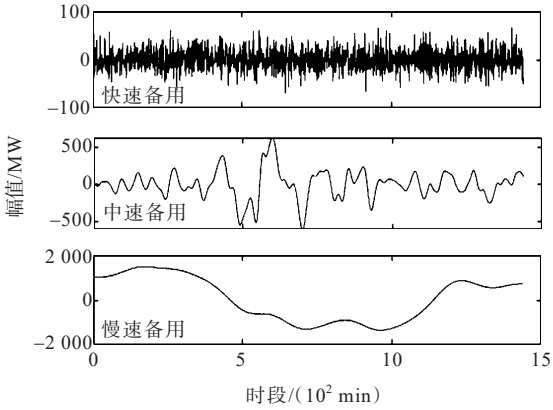

图9 快、中、慢三级备用信号

Figure 9 Fast, medium, and slow reserve signals

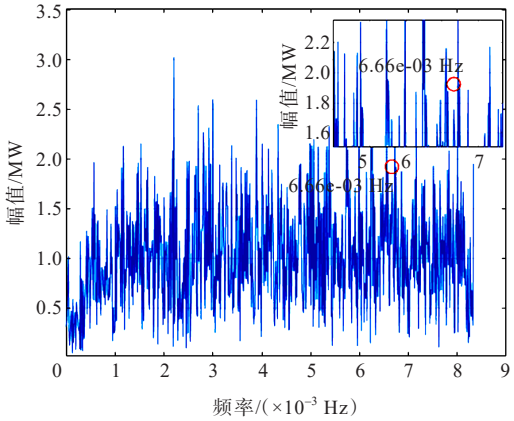

图10 快速备用信号FFT分解结果

Figure 10 FFT decomposition results of fast reserve signal

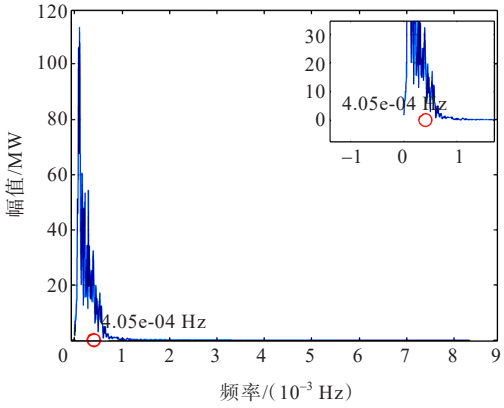

图11 中速备用信号FFT分解结果

Figure 11 FFT decomposition results of medium reserve signal

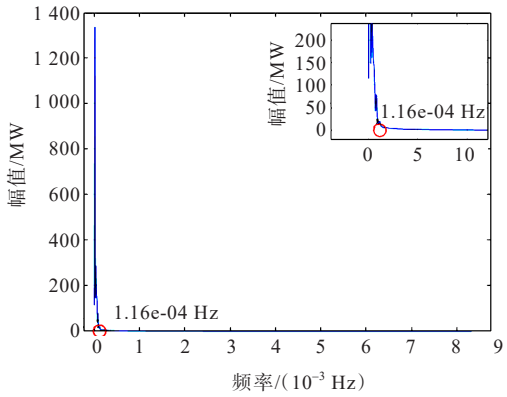

图 12　慢速备用信号 FFT 分解结果

Figure 12　FFT decomposition results of slow reserve signal

5.4　对比分析

备用容量供过于求会产生不必要的运行成本，而备用容量不足则会影响系统的可靠性，如何在二者之间取得平衡至关重要。本节从市场效率和系统可靠性 2 个角度来评估备用需求，选择采用系统总成本和备用短缺率[35]2 个指标来评判方法的优越性。备用短缺率是指在一定时间（本算例下时间尺度为 15 min）内，系统实际可用的备用容量无法满足所需备用容量的概率，可用于衡量系统在面对需求和可再生能源不确定性时，在该产品体系下确定的备用容量的充足程度。

现以 2023 年 1 月 1 日比利时电力系统数据为例，基于改进的高可再生能源渗透率的 38 节点系统[36]在同样置信水平下分别比较各产品数目下备用产品体系划分下的备用容量需求及备用、各项成本以及备用短缺率。

1）传统固定比例方法，以全天最大负荷的百分比作为传统备用（响应时间为 10 min[20]）容量需求。根据历史经验，本算例取固定比例 15%。

2）使用本文方法，将 IMF1～IMF5 合成的净负荷预测误差信号视为快速备用信号、IMF6～IMF10 合成的净负荷预测误差信号视为慢速备用信号，步骤与前述相同，获得两级备用曲线，累计比例系数取 0.8。其响应时间分别为 2、50 min（计算值为 1.79、52.13 min）。分别取其上、下包络线，按 90% 的置信水平确定各级备用需求[36]。

3）根据本文所提方法，获得快速、中速、慢速三级备用曲线，分别取其上、下包络线，按 90% 的置信水平确定各级备用需求。

各级正备用、负备用需求近似关于零轴对称，故本算例以正备用为例，确定其容量需求。3 种情况均考虑事故备用，根据产品时间要求分别将其纳入 3 种体系中的传统备用、快速备用与中速备用这 3 个产品进行交易，取值为最大单机装机容量 1 039 MW。本文采用备用市场与电能量市场联合出清模式，考虑机组出力上下限、爬坡等约束条件[37]，各备用产品体系的容量需求及市场成本对比如表 6 所示。

根据总成本最小的设计目标，本算例获得的优化结果为产品数目 3 种及其对应的 3 个响应时间。由表 6 可知，当备用体系由快、慢两级构成时，相比传统固定比例的方法，在本文方法所设计的备用产品体系下，虽然备用的总需求有所增加，但由于市场环境下不同级别备用产品价格的差异，总备用成本在降低，同时一定程度上减小了备用短缺率、保证了备用可靠性。此外，当依照本文方法更精细地划分多级备用时（此算例为快、中、慢三级），可进一步实现备用成本的减少与备用短缺率的降低。多级备用产品的划分使得各类机组可根据自身调节性能选择对应时间尺度的备用产品，储能等快速调节资源可有针对性地参与快速备用产品交易，传统发电机组则参与中速、慢速备用产品交易。储能在参与快速备用产品交易的同时，也实现了电能量市场的充放电中标，灵活的市场调节避免了频繁的开停机，降低了空载成本、启停成本等其他市场成本，使得电能量市场成本也略有降低，从而实现了系统总成本的减少。

表 6　各备用产品体系的容量需求、市场成本及备用短缺率对比

Table 6　Comparison of capacity requirements, market costs, and reserve shortage rates for each reserve product system

产品体系	备用品种	备用容量需求/MW		备用成本/元	电能量成本/元	系统总成本/元	备用短缺率/%
		各级需求	总需求				
传统固定比例方法	传统备用	1 252.29（+1 039）	2 291.29	1.845×10^{7}	$8.459\,2\times10^{7}$	$1.030\,3\times10^{8}$	1.66
本文方法（分解为两级备用）	快速备用	114.01（+1 039）	2 510.38	$1.497\,3\times10^{7}$	$8.447\,6\times10^{7}$	$9.945\,9\times10^{7}$	1.34
	慢速备用	1 357.37					
本文方法（分解为三级备用）	快速备用	29.24	2 634.03	$1.381\,7\times10^{7}$	$8.399\,8\times10^{7}$	$9.781\,5\times10^{7}$	1.20
	中速备用	188.83（+1 039）					
	慢速备用	1 376.96					

值得注意的是，随着备用分级的逐渐精细化，备用成本并不会持续减少，而是会在达到某个临界值后增加。对此，本文在文5.5对于备用产品数目进行敏感性分析。

5.5 敏感性分析

不同备用产品数目，对应不同的设计结果（各级备用的响应时间要求）。假设其他条件与设计方法均相同，仅改变给定备用产品数目，计算得出各级备用的响应时间要求，其对应系统总成本与造成的备用短缺率也随之变化，如图13所示。

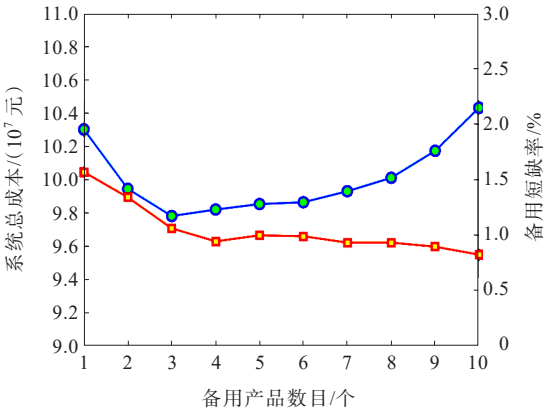

图13 敏感性分析

Figure 13 Sensitivity analysis

由图13可知，系统总成本随着备用产品数目的增加呈先递减后递增的V型曲线状，在备用产品数目为3时最小。其原因在于，一方面，分解后得到的各级备用调节信号既有正值也有负值，而正负备用需求始终为正数，因此各级信号之和会大于原始的净负荷预测误差，适当的分组求和可以部分抵消各个正负分量，而过多的分级会加大绝对值之和，导致备用需求的增加，造成备用预留冗余。另一方面，过于精细的产品划分会增加市场管理复杂度、提高市场主体报量报价的难度，从而导致市场成本增加。此外，备用短缺率大致随备用精细化程度增加而降低，但在3种及以后降低效果不明显，反而以牺牲市场成本为代价。因此，在本算例中，将备用产品划分为三级并进行响应时间等参数设计最为合理。市场设计者可参考本文方法，找到适合本市场的最为经济的备用产品体系。

6 结语

本文首先提出平衡需求的概念与计算方法，进而提出平衡服务产品体系设计基本思路，并提出了一种基于信号时频域分析的有功平衡服务产品体系设计方法。对历史平衡需求信号K-shape聚类的结果进行EEMD分解，并将多个分量分类叠加为多级调节信号，通过快速傅里叶变换进行时频域分析，从而获得各有功平衡服务产品的响应时间。所提方法对有功平衡产品体系的设计提供了科学参考。不同国家地区、季节时段、预测方法等多种因素都会具有不同的平衡需求特性，各电力系统可根据本文所提方法，结合对系统精细程度、充裕性的要求以及参与市场的调节资源特性等方面，选择合适的调节分层数目，进行考虑地区实情的多级有功平衡产品体系设计。

本文所提方法主要聚焦于需求侧特性，在供给侧进行了简化处理，未来可在调节资源的经济特性和物理特性、优化方法、容量需求确定等方面开展进一步的研究。

参考文献：

[1] 何永秀，陈倩，费云志，等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术，2018，42(9): 2915-2922.
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Research on typical auxiliary service market products abroad and its enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2915-2922.

[2] SCHERER M, ZIMA M, ANDERSSON G. An integrated pan-European ancillary services market for frequency control[J]. Energy Policy, 2013, 62: 292-300.

[3] KAUSHAL A, VAN H. An overview of ancillary services and HVDC systems in European context[J]. Energies, 2019, 12(18): 3481.

[4] ENTSO-E. Frequency containment reserve[EB/OL]. https://www. entsoe. eu/major-projects/network-code-implementation/electricity-balancing/Pages/fcr. aspx, 2024-12-4.

[5] National Grid. List of all balancing services[EB/OL]. https://www.nationalgrideso.com/balancing services/list-all-balancing-services#actab-5,2024-12-4.

[6] Quentin Scrimshire, EXPLAINERS. Enhanced frequency response(EFR) -what you need to know[EB/OL]. https://blog. modo. energy/enhanced-frequency-response-efr-the-genesis-of-the-gb-battery-boom, 2024-05-21.

[7] 滕贤亮，谈超，昌力，等. 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(15): 12-35.
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of active power and frequency control in high proportion new energy power system[J].

Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.

[8] 肖谦，喻芸，荆朝霞．电力市场的目标、结构及中国电力市场建设的关键问题讨论[J]. 全球能源互联网，2020(5): 508-517.
XIAO Qian, YU Yun, JING Zhaoxia. Discussion on the target and structure of electricity market and the key issues in the construction of China's electricity market [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020(5): 508-517.

[9] 张亮亮．基于多智能体一致性理论的智能电网内分布式储能系统自治控制方法[J]. 高压电器，2024, 60(8): 230-237+258.
ZHANG Liangliang. Autonomous control method of distributed energy storage system in smart grid based on multi-agent consistency theory[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 230-237+258.

[10] EU. Establishing a guideline on electricity balancing[EB/OL]. http://data. europa. eu/eli/reg/2017/2195/2022-06-19, 2024-05-22.

[11] 张粒子，陈皓轩，黄弦超，等．电力交易产品细分市场协同机理研究[J]. 中国电机工程学报，2024, 44(16): 6320-6333.
ZHANG Lizi, CHEN Haoxuan, HUANG Xianchao, et al. Research on synergy mechanism of power trading product segmentation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6320-6333.

[12] 孙大雁，史新红，冯树海，等．全国统一电力市场环境下的电力辅助服务市场体系设计[J]. 电力系统自动化，2024, 48(4): 13-24.
SUN Dayan, SHI Xinhong, FENG Shuhai, et al. Design of power auxiliary service market system under the national unified power market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 13-24.

[13] 徐立中，刘建涛，姚剑峰，等．区域电网有功备用的分类管理方法研究[J]. 浙江电力，2021, 40(9): 16-23.
XU Lizhong, LIU Jiantao, YAO Jianfeng, et al. Research on classification management method of active reserve in regional power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(9): 16-23.

[14] 胡宏，陈新仪，王利峰，等．面向新型电力系统的华东电网运行备用体系构建方法[J]. 上海交通大学学报，2021, 55(12): 1640-1649.
HU Hong, CHEN Xinyi, WANG Lifeng, et al. Construction method of East China power grid operation standby system oriented to new power system[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1640-1649.

[15] 李晓萌，张忠，赵华，等．能源互联网背景下电网备用问题探索[J]. 电力建设，2021, 42(5): 57-68.
LI Xiaomeng, ZHANG Zhong, ZHAO Hua, et al. Exploration of power grid standby under the background of energy Internet[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 57-68.

[16] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会．电力系统技术导则：GB/T 38969—2020[S]. 北京：中国标准出版社,2020.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Guide on technology for power system: GB/T 38969—2020[S]. Beijing: Standards Press of China.

[17] ACER. Decision No 10/2024 of the European Union agency for the cooperation of energy regulators[EB/OL]. https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Individual% 20Decisions/ACER_Decision_10-2024_CE_extension_request_FCR_Additional_Properties. pdf, 2024-08-08.

[18] GALLI A W, HEYDT G T, RIBEIRO P F. Exploring the power of wavelet analysis[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1996, 9(4): 37-41.

[19] 窦嘉炜，杨小煜，杨晓忠．基于分数阶小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报，2024, 44(3): 872-880.
DOU Jiawei, YANG Xiaoyu, YANG Xiaozhong. Harmonic detection method of power system based on fractional wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 872-880.

[20] 邹港，赵斌，罗强，等．基于 PCA-VMD-MVO-SVM 的短期光伏输出功率预测方法[J]. 电力科学与技术学报，2024, 39(5): 163-171.
ZOU Gang, ZHAO Bin, LUO Qiang, et al. Prediction method of short-term PV output power based on PCA-VMD-MVO-SVM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 163-171.

[21] 范培潇，胡文平，温裕鑫，等．基于可进化 PID 的含电动汽车孤岛微电网负荷频率控制策略[J]. 全球能源互联网，2023(3): 258-265.
FAN Peixiao, HU Wenping, WEN Yuxin, et al. A load frequency control strategy of island microgrid with V2G based on evolutionary-PID[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023(3): 258-265.

[22] FRUNT J, KLING W L, MYRZIK J M A. Classification of reserve capacity in future power systems[C]//2009 6th International Conference on the European Energy Market. Leuven, Belgium. IEEE, 2009: 1-6.

[23] 卓映君，管霖，陈亦平，等．基于精细化备用需求评估和跨省区备用均衡的大电网优化调度模型[J]. 电网技术，2021, 45(4): 1438-1445.
ZHUO Yingjun, GUAN Lin, CHEN Yiping, et al. Optimal dispatching model of large power grid based on refined reserve demand assessment and inter-provincial

reserve balance[J]. Power System Technology, 2021, 45 (4): 1438-1445.

[24] 张经纬.适应储能参与的南方区域调频市场交易机制和调度模式设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
ZHANG Jingwei. Design of the transaction mechanism and dispatching mode of the frequency regulation market adapted to the participation of energy storage in China southern power grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

[25] FAHIMAN F, DISANO S, ERFANI S M, et al. Data-driven dynamic probabilistic reserve sizing based on dynamic Bayesian belief networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2281-2291.

[26] PARKER K, BAROOAH P. A probabilistic method for reserve sizing in power grids with high renewable penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2473-2480.

[27] PAPARRIZOS J, GRAVANO L. K-shape: efficient and accurate clustering of time series[C]//Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Melbourne Victoria Australia. ACM, 2015: 1855-1870.

[28] PAPARRIZOS J, GRAVANO L. Fast and accurate time-series clustering[J]. ACM Transactions on Database Systems, 2017, 42(2): 1-49.

[29] ZHANG W T, CHENG M, XIANG Q L, et al. Enhancing short-term load forecasting through K-shape clustering and deep learning integration[J]. IEEE Access, 2025, 13: 30817-30832.

[30] WU Z Q, MU Y F, DENG S, et al. Spatial–temporal short-term load forecasting framework via K-shape time series clustering method and graph convolutional networks[J]. Energy Reports, 2022, 8: 8752-8766.

[31] 钟志峰, 李明辉, 张艳. 机器学习中自适应k值的k均值算法改进[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(1): 136-141.
ZHONG Zhifeng, LI Minghui, ZHANG Yan. Improvement of k-means algorithm for adaptive k-value in machine learning[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(1): 136-141.

[32] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.

[33] 刘淞华, 何冰冰, 郎恂, 等. 中值互补集合经验模态分解[J]. 自动化学报, 2023, 49(12): 2544-2556.
LIU Songhua, HE Bingbing, LANG Xun, et al. Empirical mode decomposition of Median complementary set[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(12): 2544-2556.

[34] 吴汉斌, 时珉, 郑焕坤, 等. 基于EEMD-ALOCO-SVM模型的光伏功率短期区间预测[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 64-71.
WU Hanbin, SHI Min, ZHENG Huankun, et al. Short-term interval prediction of photovoltaic power based on EEMD-ALOCO-SVM model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(11): 64-71.

[35] THATTE A A, XIE L. A metric and market construct of inter-temporal flexibility in time-coupled economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3437-3446.

[36] ZHUO Z Y, ZHANG N, YANG J W, et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2597-2608.

[37] 崔校瑞, 邹鹏, 殷柯奕, 等. 备用与现货电能量市场模型衔接机制研究[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 90-97.
CUI Xiaorui, ZOU Peng, YIN Keyi, et al. Research on the connection mechanism of standby and spot electric energy market models[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 90-97.

·第40卷卷终·

·Vol. 40 End·