

双引擎下的量子电子算力网络资源调度优化方法

程启月, 陆军

(量子科技长三角产业创新中心, 江苏苏州 215100)

摘要: 给出一种双引擎下的量子电子算力网络资源调度优化方法。针对混合算力网络资源, 给出“混合控制”条件下的双引擎标签和“混合算力”条件下的双引擎标识等引导机制和认证技术; 给出不确定条件下的基于“混合度量”情况下的双引擎调度机制, 以及构建混合算力的相对熵模型和综合集成求全局最优解算法。基于双引擎下的量子电子算力网络资源全局优化度量调度机制和算法, 对量子电子混合算力网络的研究具有前瞻性和科学性。设计开发与分配装置原型系统相适应的软件系统, 实现从软件上将一个物理系统转变成为一个处理器, 完成混合算力网络对算力任务适配的全局优化调度, 该方法创新提出了量子电子算力网络资源调度理论与工程化技术路径。

关键词: 混合算力网络; 网络资源; 算力调度; 全局最优解

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2025009

Method of Optimize Scheduling Under Double Engines about Quantum/Electron Computing Power Networks Resource

CHENG Qiyue, LU Jun

Yangtze Rive Delta Industrial Innovation Center of Quantum and Information Technology, Suzhou 215100, China

Abstract: This paper presented an optimization method for resource scheduling in quantum/electron computing power networks under a dual-engine paradigm. To address the challenges associated with heterogeneous computing resources, guiding mechanisms and authentication technologies were introduced, included dual-engine labels under the "hybrid control" condition and dual-engine identification guidance under the 'hybrid computing power' condition. Additionally, it proposed a dual-engine scheduling mechanism based on "hybrid metrics" under uncertain conditions, and a global optimal solution algorithm for heterogeneous computing power based on the comprehensive integration model using relative entropy. The research on quantum/electron heterogeneous computing power networks, based on a dual-engine global optimization metric scheduling mechanism and algorithm for quantum/electron computing network resources, demonstrates both foresight and scientific rigor. A software system compatible with the design and development of allocation device prototype systems was implemented, which realized the transformation of a physical system into a processor at the software level, and completed the global optimization scheduling of the target task in the hybrid computing network. This method formulated a theory and innovates a new technical of engineering path for resource scheduling in quantum/electron computing power networks.

Keywords: hybrid computing power network, network resource, computing power scheduling, global optimum solution

0 引言

量子电子算力网络资源全局优化调度(配置)是在不确定条件下和多约束条件下的求全局最优解问题。现

有算力网络资源体系由算力网络资源层、算力网络控制层、算力网络服务层以及算力网络编排管理层等多个层级构成, 具有复杂的混合算力网络系统。受算力资源、算力类型、算力编号、算力地址等多种不确定性因素影响, 具

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2025-01-20

基金项目: 中国工程院行业院重大项目(No. 2022-HYZD-01); 科技创新载体计划项目(No. SZS2022416)

Foundation Items: Major Project of Industry Institute of China Academy of Engineering (No.2022-HYZD-01), Science and Technology Innovation Carrier Plan Project (No.SZS2022416)

有群、边、端的物理架构，这些都会制约混合算力网络资源调度的全局优化，所以，它是一个混合算力资源配置求全局最优解新的问题，本问题研究具有前瞻性和科学性。

当前，针对量子电子算力网络优化调度问题，有的研究关注目标匹配度单一指标，仅在目标匹配度方面给定约束条件^[1]。有的研究关注硬件建设方面，如在节点、路由、链路等方面建立起调度机制，以机制约束作为分配条件，但是，这样就会制约实现混合算力节点的自我学习能力^[2]。有的研究关注基于算力注册请求或算力服务进行算力预测、算力配额的AI系统相关技术，但是采用的仍是经典AI理论、算法，没有基于量子计算机制进行算力预测和求全局最优解^[3]。有的研究关注基于场景信息获得应用与算力网络融合模型输出与任务适配，采用至少一种算力网络资源的计费方法及规则^[4]。有的研究针对虚拟机服务请求的云数据中心资源分配方法，采用的是经典规划理论优化算法，没有基于量子计算机制求全局最优解^[5]。

本文给出一种双引擎下的量子电子算力网络资源调度优化方法，是在“双引擎”引导规则下，实现量子计算机群、电子计算机群的混合网络资源动态全局优化调度分配；围绕算力网络资源在“混合控制”条件下的双引擎标签和“混合算力”条件下的双引擎标识认证，在“双引擎”调度机制下，基于“混合度量”的双引擎度量给出混合算力网络资源调度全局优化配置的理论、方法与技术路径^[6]；设计一种算力网络资源分配装置、一种混合算力网络资源全局优化调度分配设备以及一种计算机可读的存储介质，嵌入量子根服务器中或混合算力服务器集群中，以软件系统替代物理装置，起到用软件替代硬件的作用。

1 问题描述及技术路径

量子电子算力网络中有大量算力节点，如，量子计算机服务器（QPU）、电子计算机服务器（GOU/CPU）、超算中心、计算机群等。在混合算力调度过程中存在以下问题。

问题1：混合算力网络中任意算力节点的状态事件存在两种类型——群组控制节点和非群组控制节点，如何对这些算力节点进行有效的统一控制，为后续算力配置、算力交易提供支持？

问题2：算力网络节点特征属性进行认证前的标识编码存在两种情况——量子算力节点标识和电子算力节点标识，如何对这些算力节点进行科学标识编码，为后续节点入网认证、算力服务提供支撑？

问题3：混合算力网络中资源全局优化调度（配置）算法存在两种情况——量子算力节点优化调度算法和电子算力节点优化调度算法，如何区分算力节点和服务节点的算力需求，体现出量子算法优越性，为后续算力调度的技术实现提供保障？

算网融合一体化必须实现混合算力节点调度（配置）全局优化，国内还没有解决“双引擎”条件下算网融合和量子电子混合算力优化调度所涉及的上述3个问题。

本文给出一种双引擎下的量子电子算力网络资源调度优化方法，其特征主要包括以下几点。

一是，基于量子电子算力网络节点的特殊性，针对混合算力网络资源在“混合控制”条件下任意算力节点的状态事件，给出量子电子双引擎标签；针对“混合算力”条件下算力网络节点特征属性，给出混合算力网络资源双引擎标识认证方法；针对“混合度量”情况，给出经典运筹非线性优化全局调度算法和量子智能学习全局调度算法的双引擎调度配置方法。

二是，不确定性条件下，混合网络资源求全局最优调度方案的问题是非线性求解问题，矩阵算法难以实现对于无限大的 N 阶求解，针对多层次、多维度算力节点，随机动态活动网络集群（或簇群）复杂系统的不确定性，给出基于相对熵的全局优化调度模型，进行全局求解优化配置。

三是，现有技术对随机活动网络配置是基于某些重点技术指标需求实现局部最优的，并且很少有针对量子电子混合网络资源全局调度求最优解的算法，本文给出求混合算力网络资源调度全局最优解的算法。

四是，在多个约束条件下，面对复杂活动网络集群（量子、电子计算机集群），混合算力网络资源全局调度随动装置等关键技术未攻破，设计一种双引擎下的量子电子算力网络资源调度随动控制装置原型系统，为混合算力网络资源全局优化调度系统研制提供技术支持。

2 引导机制及原理

基于双引擎下的量子电子算力网络资源全局优化调度问题，是在量子电子算力网络资源的“混合控制”条件下，从算力网络资源部署的拓扑结构出发，首先对混合算力网络进行“分层”“分块”“对点”设计。“分层”设计，目的是对全局分配调度过程节点状态分类设置标签；“分块”设计，目的是对量子、电子算力节点进行不同属性设置标识；“对点”设计，目的是分别对量子、电子算力节点融合信息熵非线性优化全局调度算法，或基

于量子智能学习的混合算力调度优化算法。也就是说，在双引擎条件下的量子电子算力网络资源调度（分配）的引导机制，既要给出算力节点群组控制判断的标签设置，也要给出算力节点特征属性判断的标识认证，还得给出融合了相对熵的非线性优化全局调度引擎和量子智能学习全局调度引擎的调度算法。混合算力网络资源的“分层”“分块”“对点”调度均是在双引擎的引导机制下设计和技术实现的（如图1所示）。

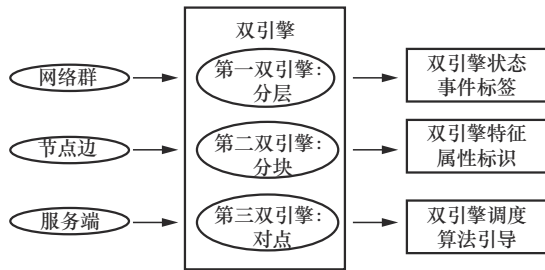


图1 双引擎量子电子算力网络资源全局优化调度引导机制原理

2.1 算力网络状态事件的双引擎状态标签引导机制

对量子电子算力网络资源，首先，区别不同的“分层”级，这一设计对应网络资源的群、边、端中的“边”，给出任意节点 a_i 群组控制的判断，即对于任意算力节点 a_i 的状态事件存在两种： $\psi = \{\psi_1, \psi_2\}$ 。

状态1 (ψ_1): 节点 a_i 是群组控制节点。

状态2 (ψ_2): 节点 a_i 不是群组控制节点。

设置状态集 $\psi = \{\psi_1, \psi_2\}$ 下的双引擎状态标签：根据算力网络节点状态事件，设置双引擎状态标签。对应节点 a_i 是群组控制节点及节点 a_i 不是群组控制节点， a_i 是群组控制节点对应标签消息标准 $\{Y\}$ ， a_i 不是群组控制节点对应标签消息标准 $\{N\}$ ，之后根据该标签消息标准确定各个节点设置双引擎状态标签。

2.2 算力资源网络节点的双引擎特征标识引导机制

对量子电子算力网络资源，在区分层级的基础上区别不同的“分块”，这一设计对应网络资源的群、边、端中的“端”，给出任意节点 a_i 特征属性判断，即对任意节点 a_i 的节点特征属性存在两种： $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2\}$ 。

属性1 (φ_1): 节点 a_i 是量子计算机节点。

属性2 (φ_2): 节点 a_i 是电子计算机节点。

设置属性集 $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2\}$ 下的双引擎特征标识。

根据算力网络节点特征属性，设置特征属性的双引擎特征标识。对应量子计算机及电子计算机接口标识编码消息标准，量子计算机节点特征属性对应标识编码消

息标准 $\{QID\}$ ，电子计算机节点特征属性对应标识编码消息标准 $\{IID\}$ 。显然，标识编码消息标准集是向量集，其分量包含了算力节点的其他属性编码消息标准，这里不再赘述。

2.3 算力资源优化算法的双引擎度量调度机制

基于量子电子算力网络资源算力节点不同“标识”，设计不同的优化调度算法，在双引擎调度引导机制下对全网算力节点标识认证，即当算力节点标识为 $\{QID\}$ 时，算力节点参与量子智能学习全局调度；当算力节点标识为 $\{IID\}$ 时，算力节点参与信息熵非线性优化全局调度。全局调度机制融合了经典非线性优化全局调度算法引擎和量子智能学习全局调度算法引擎。

根据上述节点状态标签引导机制、特征标识引导机制和混合算力节点度量调度引导机制，给出混合算力网络各个节点的双引擎标签设置、双引擎标识编码消息标准设置、双引擎调度功能设置，确定双引擎全局分配调度过程算力节点引导机制流程（如图2所示）。

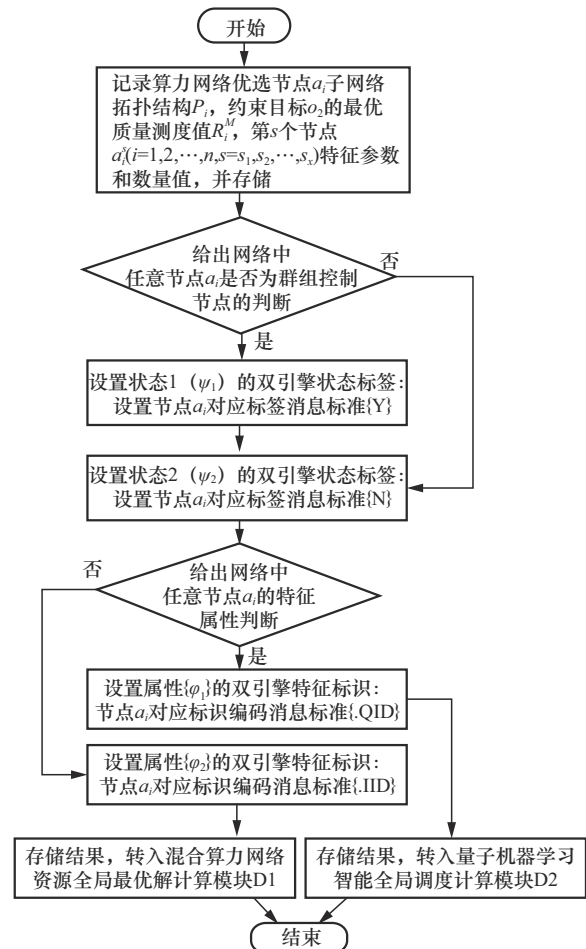


图2 双引擎量子电子混合算力网络资源全局优化调度引导机制流程

3 数学建模与仿真流程

3.1 建立基于加权相对熵的算力网络资源全局调度优化模型

为了满足对于算力网络对应的拓扑结构的全局调度优化,不妨选择如下6个约束条件, o_j 分别是:算力网络信息流通时效性(o_1)、算力节点控制质量准确性(o_2)、服务器负载均衡一致性(o_3)、网络链路负载均衡稳定性(o_4)、网络资源物理特质可靠性(o_5)、网络安全防护手段有效度(o_6)等。围绕网络资源优选节点 $a_i(i=1,2,\dots,n)$ 所在最优路径对应的子网拓扑结构 $P_i(i=1,2,\dots,n)$,分别对网络算力优选节点策略 $A_{\{i,j\}}$ 中的所有算力优选节点 a_i 给出策略评判值 $x_{ij}(i=1,2,\dots,n,j=1,2,\dots,m)$,得到对应的评判矩阵 $(x_{ij})_{i \times j}$ 。如,算力网络资源评判矩阵 $\{x_{ij}\}_{6 \times n}^T$,对应的测度值 $x_{ij}(i=1,2,\dots,n,j=1,2,\dots,6)$ 的算法;针对约束目标 $o_j(j=1,2,\dots,m)$,确定 $W=\{w_j,j=1,2,\dots,m\}$ 为权重集合,即,第 j 个约束目标集中对应 o_j 的重要性程度为 $w_j(j=1,2,\dots,m)$,其中 $\forall j$,且满足 $\sum w_j=1$;对网络资源优选节点 $a_i(i=1,2,\dots,n)$ 集合 $A_{\{i,j\}}$ 在约束目标 $o_j(j=1,2,\dots,m)$ 下的网络资源优选节点 a_i 综合集成偏好向量记为 \mathbf{X}_g ,对非线性规划问题(P)求解

$$(P) \begin{cases} \min: Q(\mathbf{X}_g) = \sum_{j=1}^m w_j \sum_{i=1}^n \left[\log x_{gi} - \log \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \right] x_{gi} \\ \text{s.t.}: \sum_{i=1}^n x_{gi} = 1, x_{gi} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

令

$$b_{ij} = f \left(\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \right) \quad (2)$$

非线性规划问题(P)解为

$$x_{gi}^* = \prod_{j=1}^m (b_{ij})^{w_j} / \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (b_{ij})^{w_j}, i=1,\dots,n \quad (3)$$

可以证明:点 $\mathbf{X}_g^* = \{x_{g1}^*, x_{g2}^*, \dots, x_{gn}^*\}^T$ 是P的局部最优解,亦是P的全局最优解(证明略)[7]。

3.2 基于加权相对熵的算力网络资源全局优化仿真流程

根据上述定理给出的基于加权相对熵的算力网络资源全局调度(配置)优化算法,得到基于加权相对熵算力网络资源全局最优解的计算步骤如下。

步骤1:记录算力节点 $\{a_i\}(i=1,2,\dots,n)$ 策略A的评判矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$ 。

基于约束目标 $o_j(j=1,2,\dots,m)$,根据算力优选节点 $a_i(i=1,2,\dots,n)$ 策略测度值 $x_{ij}(i=1,2,\dots,n,j=1,2,\dots,m)$ 确定的数学方法,输入网络资源评判矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$ 。

步骤2:对 x_{ij} 关于 i 归一化处理,计算规范化矩阵 $\mathbf{B} = (b_{ij})_{n \times m}$,其中, $b_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}(i=1,2,\dots,n,j=1,2,\dots,m)$ 。

步骤3:计算约束目标 $o_j(j=1,2,\dots,m)$ 的权重 $w_j(j=1,2,\dots,m)$ (权重 w_j 由结构熵权法[8]得到)。

步骤4:求算力网络节点 $\{a_i\}(i=1,2,\dots,n)$ 策略集 $A_{\{i,j\}}$ 的全局最优解。

$$\text{计算偏好向量 } \mathbf{X}_g^* = \{x_{g1}^*, x_{g2}^*, \dots, x_{gn}^*\}^T$$

$$\text{其中, } x_{gi}^* = \prod_{j=1}^m (b_{ij})^{w_j} / \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (b_{ij})^{w_j}, i=1,\dots,n$$

步骤5:条件判断。

判断1:求网络资源满足单目标对应约束条件算力网络信息流通时效性(o_1)的全局最优解。

对算力节点 $\{a_i\}(i=1,2,\dots,n)$ 对应策略集 $A_{\{i,j\}}$ 的满足约束条件算力网络信息流通时效性(o_1)的全局最优配置节点集,转入步骤9,否则,转步骤13。

判断2:求网络资源满足单目标对应约束条件算力节点控制质量准确性(o_2)的全局最优解。

对算力节点 $\{a_i\}(i=1,2,\dots,n)$ 对应策略集 $A_{\{i,j\}}$ 的满足约束条件算力节点控制质量准确性(o_2)的全局最优配置节点集,转入步骤10,否则,转步骤13。

判断3:求网络资源满足单目标对应约束条件服务器负载均衡一致性(o_3)的全局最优解。

对算力节点 $\{a_i\}(i=1,2,\dots,n)$ 对应策略集 $A_{\{i,j\}}$ 的满足约束条件服务器负载均衡一致性(o_3)的全局最优配置节点集,转入步骤11,否则,转步骤15。

判断4:求网络资源满足单目标对应约束条件网络链路负载均衡稳定性(o_4)的全局最优解。

对算力节点 $\{a_i\}(i=1,2,\dots,n)$ 对应策略集 $A_{\{i,j\}}$ 的满足约束条件网络链路负载均衡稳定性(o_4)的全局最优配置节点集,转入步骤12,否则,转步骤15。

判断5:求网络资源满足单目标对应约束条件网络综

合物理材质稳定性 (o_3) 的全局最优配置节点集, 转入步骤 13, 否则, 转步骤 15。

步骤 6: 求网络资源满足单目标对应约束条件网络安全防护手段有效度 (o_6) 的全局最优配置节点集, 转入步骤 14, 否则, 转步骤 15。

步骤 7: 求算力资源满足所有约束条件的全局最优解。

对算力节点 $\{a_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 对应策略集 $A_{\{ij\}}$ 的满足所有约束条件的全局最优配置节点集。

步骤 8: 记录并存储网络算力节点 $\{a_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 策略集 A 中的算力网络资源全局最优解值 $\mathbf{X}_g^* = \{x_{g1}^*, x_{g2}^*, \dots, x_{gn}^*\}^T$, 得到全局最优配置节点对应的最优解向量 $\{x_{g1}^*, x_{g2}^*, \dots, x_{gn}^*\}$, 对应的节点集即为算力网络资源全局最优配置节点集。

步骤 9: 转入算力网络信息流时效测度计算模块。

步骤 10: 转入算力节点控制质量测度计算模块。

步骤 11: 转入服务器负载均衡一致性计算模块。

步骤 12: 转入网络链路负载均衡稳定性计算模块。

步骤 13: 转入网络综合物理材质稳定性计算模块。

步骤 14: 转入网络安全防护手段有效度计算模块。

步骤 15: 求算力网络资源全局最优算力节点。

对 $(x_{g1}^*, x_{g2}^*, \dots, x_{gn}^*)$ 大小进行重新排序得到新的排序向量 $(x_{g1}^{*1}, x_{g2}^{*2}, \dots, x_{gn}^{*n})$, 最优解集 $(x_{g1}^{*1}, x_{g2}^{*2}, \dots, x_{gn}^{*n})$ 对应的排序就是算力网络资源全局最优配置对应的节点策略集 $B = \{a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*\}^T$, 取 $a^* = \max\{a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*\}^T$ 即为算力网络资源全局最优解对应的节点。

步骤 16: 结束。

3.3 网络资源负载均衡一致性测度计算方法和流程

以指标“网络资源负载均衡一致性”计算为例, 给出其指标测度的计算方法和基本流程。

网络资源负载均衡一致性与服务器负载均衡一致性和网络链路负载均衡稳定性有关。优选节点 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的子网 P_i 对应约束目标服务器负载均衡一致性 (o_3)、网络链路负载均衡稳定性 (o_4) 的测度值分别记为 $a_i^{(3)}$ 、 $a_i^{(4)}$ 。计算步骤分别如下。

步骤 1: 根据待优化节点 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 对应子网拓扑结 P_i , 第 $s (s = s_1, s_2, \dots, s_x)$ 个节点 a_i^s 确定对应约束目标的测度值, 记为 $a_i^{(3)s}$, 并存储。

步骤 2: 记录并存储第 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个子网, 第 $s (s = s_1, \dots, s_x)$ 个节点服务器负载均衡不确定性对应的指标, 包含服务器响应时间的不确定性、服务器扩展应用的不确定性、服务器缓存容积的不确定性和安全手段防护的不确定性及其相应的指标属性。如, 最快响应时间 $x_{i1}^{(3)s}$ 和最快响应时间标准值 $y_{i1}^{(3)s}$; 扩展应用数目 $x_{i2}^{(3)s}$ 和扩展应用数目标准值 $y_{i2}^{(3)s}$; 存储库缓存容积值 $x_{i3}^{(3)s}$ 和存储库缓存容积标准值 $y_{i3}^{(3)s}$; 加密标准安全手段使用数值 $x_{i4}^{(3)s}$ 和加密标准安全手段使用标准值 $y_{i4}^{(3)s}$ 等。

步骤 3: 记录并存储第 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个子网, 第 $s (s = s_1, \dots, s_x)$ 个节点网络链路负载均衡不确定性, 包含链路智能带宽控制不确定性、链路健康及时诊断不确定性及其相应的指标属性, 如, 链路智能带宽控制数量 $x_{i1}^{(4)s}$ 和链路智能带宽控制标准值 $y_{i1}^{(4)s}$; 链路健康诊断时长 $x_{i2}^{(4)s}$ 和链路健康诊断最佳时间标准值 $y_{i2}^{(4)s}$ 等。

步骤 4: 记录并存储服务器负载均衡优化度 $a_i^{(3)}$, 网络链路负载均衡稳定度 $a_i^{(4)}$; 分别记录对应加权熵的权重系数值 $\alpha_i^{(3)}$ 、 $\beta_i^{(4)}$ 。

步骤 5: 计算第 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个子网, 第 $s (s = s_1, \dots, s_x)$ 个节点以下测度。

最快响应时间相对熵记作 $x_{i1}^{(3)}$, 即

$$x_{i1}^{(3)} = \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| -\frac{x_{i1}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i1}^{(3)s}} \ln \frac{\frac{x_{i1}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i1}^{(3)s}}}{\frac{y_{i1}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{i1}^{(3)s}}} \right| \quad (4)$$

扩展应用相对熵记作 $x_{i2}^{(3)}$, 即

$$x_{i2}^{(3)} = \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| -\frac{x_{i2}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i2}^{(3)s}} \ln \frac{\frac{x_{i2}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i2}^{(3)s}}}{\frac{y_{i2}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{i2}^{(3)s}}} \right| \quad (5)$$

缓存容积相对熵记作 $x_{i3}^{(3)}$, 即

$$x_{i3}^{(3)} = \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| -\frac{x_{i3}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i3}^{(3)s}} \ln \frac{\frac{x_{i3}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i3}^{(3)s}}}{\frac{y_{i3}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{i3}^{(3)s}}} \right| \quad (6)$$

安全手段相对熵记作 $x_{i4}^{(3)}$, 即

$$x_{i4}^{(3)} = \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| \frac{x_{i4}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i4}^{(3)s}} \ln \frac{\frac{x_{i4}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i4}^{(3)s}}}{\frac{y_{i4}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{i4}^{(3)s}}} \right| \quad (7)$$

步骤 6: 计算第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个子网, 第 s ($s = s_1, \dots, s_x$) 个节点以下测度。

链路智能带宽控制相对熵记作 $x_{i1}^{(4)}$, 即

$$x_{i1}^{(4)} = \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| \frac{x_{i1}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i1}^{(4)s}} \ln \frac{\frac{x_{i1}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i1}^{(4)s}}}{\frac{y_{i1}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{i1}^{(4)s}}} \right| \quad (8)$$

则链路健康及时诊断的相对熵记作 $x_{i2}^{(4)}$, 即

$$x_{i2}^{(4)} = \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| \frac{x_{i2}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i2}^{(4)s}} \ln \frac{\frac{x_{i2}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{i2}^{(4)s}}}{\frac{y_{i2}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{i2}^{(4)s}}} \right| \quad (9)$$

步骤 7: 判断以下情况。

情况 1: 计算服务器负载均衡优化度 $a_i^{(3)}$, 转入步骤 8。

情况 2: 计算链路负载均衡优化度 $a_i^{(4)}$, 转入步骤 9。

情况 3: 计算网络资源负载均衡优化度 $a_i^{(3)}$, 转入步骤 10。

步骤 8: 计算服务器负载均衡加权相对熵 $E_i^{(3)}$, 服务器负载均衡优化度 $a_i^{(3)}$ 测量值。

$$E_i^{(3)} = \sum_{l=1}^4 a_l^{(3)} \left\{ \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| \frac{x_{il}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{il}^{(3)s}} \ln \frac{\frac{x_{il}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{il}^{(3)s}}}{\frac{y_{il}^{(3)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{il}^{(3)s}}} \right| \right\} \quad (10)$$

其中, $a_l^{(3)}$ 为对应 $x_{il}^{(3)}$ ($l = 1, 2, 3, 4$) 的权重系数。

$$a_i^{(3)} = 1 - E_i^{(3)} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

步骤 9: 计算链路负载均衡加权相对熵 $E_i^{(4)}$, 网络链路负载均衡优化度 $a_i^{(4)}$ 测量值。

$$E_i^{(4)} = \sum_{l=1}^2 \beta_l^{(4)} \left\{ \sum_{s=s_1}^{s=s_x} \left| \frac{x_{il}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{il}^{(4)s}} \ln \frac{\frac{x_{il}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} x_{il}^{(4)s}}}{\frac{y_{il}^{(4)s}}{\sum_{s=s_1}^{s=s_x} y_{il}^{(4)s}}} \right| \right\} \quad (11)$$

其中, $\beta_l^{(4)}$ 为对应熵 $x_{il}^{(4)}$ ($l = 1, 2$) 的权重系数; $a_i^{(4)} = 1 - E_i^{(4)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

步骤 10: 求约束目标 (o_3) n 个优化节点 a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 所在对应子网拓扑结构 P_i 服务器负载均衡一致性 (o_3) 测度最优解向量 $a_i^{(3)} \triangleq x_{3i}$, 结束, 转步骤 12; 否则, 继续。

步骤 11: 求约束目标 (o_4) n 个优化节点 a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 所在对应子网拓扑结构 P_i 网络链路负载均衡稳定性 (o_4) 测度最优解向量 $a_i^{(4)} \triangleq x_{4i}$, 结束, 转步骤 13; 否则, 继续。

步骤 12: 计算节点 a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的单目标全局网络资源负载均衡一致性最优解: $X^{(k)*} = \max \{a_i^{(k)}\}$ ($k = 3, 4$); 单目标网络资源负载均衡一致性局部最优解记为 $X^{(k)*}$ ($k = 3, 4$)。

步骤 13: 转入混合算力节点最优解计算基本流程模块。

4 原型系统及装置设计

本文设计一种双引擎混合算力网络资源全局优化调度装置原型系统, 包括以下模块。

网络资源双引擎识别模块 (O)。该模块将量子电子算力节点统一在一个网络拓扑中, 实现全网统一标签、标识。

动态数据控制管理模块 (S)。该模块通常包括用户层、应用服务器层和数据层等。

优选节点参数记录模块 (A)。该模块包括记录算力网络中优选节点的相关信息, 包括算力网络资源的群、边、端构成的拓扑结构中节点跨度, 相邻节点, 对应子网、优选节点集等, 当网络变化时, 更新变化的节点参数。

约束目标参数解析模块 (B)。该模块解析被优选的节点所在网络的初始态数据、中间运算数据、分析过程数据、分项运算数据; 解析被选优的节点所在网络的约束条件以及对应的权重系数。

优选节点计算预判模块 (C)。该模块包括给出优选的各约束条件对应的解析算法, 区分是单目标约束条件还是多目标约束条件。

求解全局最优计算模块 (D)。该模块包括针对全局优选节点 6 种约束目标的对应公式、算法和模型等, 区分是单目标约束还是多目标约束, 按照择优算力网络资源全局最优解的约束条件, 采用相对应的计算公式、算法和模型。

优选节点结果存储模块 (E)。该模块包括统计各个优选节点对应网络单项指标的分项计算值和综合计算值,同时转入动态数据管理模块数据层。

优选节点显示调度模块 (F)。该模块包括过程显示、结果显示。

系统的设计思想是运用基于加权相对熵综合集成模型求解全局最优的算法,编制软件系统操纵算力网络资源分配调度节点,实现从软件上将一个物理系统转变成一个处理器,使得软硬件无缝连接,实现算力节点在全局优化的条件下,进行重新分配调度;将“系统”嵌入量子电子算力网络的根服务器。最终达成目标:基于量子电子算力网络资源在网同步控制节点调度、同步分配算力资源(如图3所示)。

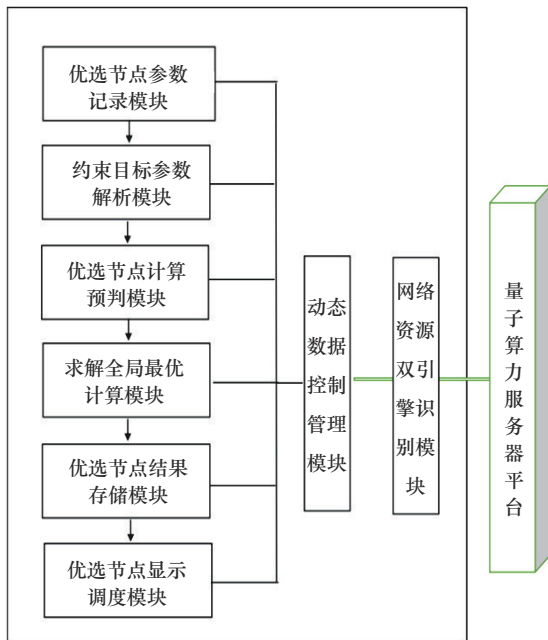


图3 双引擎混合算力网络资源全局优化调度装置结构示意图

5 结束语

本文给出一种基于双引擎的量子电子混合算力网络资源全局优化调度算法,围绕算力网络资源全局优化约束条件,给出双引擎量子电子混合算力网络资源全局优化的引导机制和调度机制;给出量子电子基于双引擎的混合同步控制、同步寻优的用相对熵综合集成模型求解全局最优的算法;根据基于双引擎的量子电子算力网络资源全局优化度量调度机制和算法,设计编制软件系统操纵算力网络分配调度节点,实现从软件上将一个物理系统转变成一个处理器,使得软硬件无缝联接,实现在

双引擎下电子计算机群、量子计算机群的混合网络资源动态全局优化调度分配。

参考文献:

- [1] 量子科技长三角产业创新中心. 一种双引擎下的混合算力网络资源调度优化方法及随动控制装置: 202310398653.9[P]. 2023. Yangtze River Delta Industrial Innovation Center of Quantum and Information Technology. A scheduling optimization method and follow-up control device for hybrid computing power network resources under dual engines: 202310398653.9[P]. 2023.
- [2] 国家电网有限公司信息通信分公司, 中讯邮电咨询设计院有限公司. 一种算力任务调度方法、装置及存储介质: CN115827191A[P]. 2021. Information and Communication Branch of State Grid Corporation, Zhongxun Post and Telecommunications Consulting and Design Institute Co., Ltd.. A computing task scheduling method, device and storage medium: CN115827191A[P]. 2021.
- [3] 中国电信股份有限公司. 一种算力资源分配方法、装置、电子设备及其可读存储介质: CN202211348979.2[P]. 2022. China Telecom Co., Ltd.. A computing power resource allocation method, device, electronic equipment and readable storage medium: CN202211348979.2[P]. 2022.
- [4] 北京百度网讯科技有限公司. 用于人工智能AI的处理方法、装置、电子设备和存储介质: CN112199385A[P]. 2024. Beijing Baidu Netcom Technology Co., Ltd.. Processing method, device, electronic equipment and storage medium for artificial intelligence AI: CN112199385A[P]. 2024.
- [5] 云迅智能科技南京有限公司. 一种应用与算力网络融合方法、系统及电子设备: 202211272409[P]. 2023. Yunxun Intelligent Technology Nanjing Co., Ltd.. A method, system and electronic equipment for integrating application and computing network: 202211272409[P]. 2023.
- [6] 华东师范大学. 一种基于深度强化学习的云数据中心资源分配方法: 202210565633[P]. 2023. East China Normal University. A cloud data center resource allocation method based on deep reinforcement learning: 202210565633 [P]. 2023.
- [7] 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. QIU W H. Management decision and applied entropy[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.
- [8] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1229. CHENG Q Y. Structural entropy weight method for determining the weight of evaluation index[J]. System Engineering Theory and

Practice, 2010, 30(7): 1225-1229.

- [9] 量子科技长三角产业创新中心. 算力网计算与存储最优路径确定方法和监测装置: 202210594750.0[P]. 2023.

Yangtze River Delta Industrial Innovation Center of Quantum and Information Technology. Optimal path determination method and monitoring device for computing and storage of computing power network: 202210594750.0[P]. 2023.

- [10] 量子科技长三角产业创新中心. 一种基于量子智能学习的混合算力调度优化算法及分配装置: 202311020456.X[P]. 2023.

Yangtze River Delta Industrial Innovation Center of Quantum and Information Technology. A hybrid computing power scheduling optimization algorithm and allocation device based on quantum intelligent learning: 202311020456.X[P]. 2023.

[作者简介]



程启月 (1957-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为信息系统建模与仿真、量子计算。



陆军 (1964-), 男, 中国工程院院士, 主要研究方向为综合电子信息系统。