

考虑带宽和电力费用的数据中心工作流负载分配 优化模型研究

张文翰¹,周海浪²,尤培培³,高赐威¹,李炎林³,盛明娅²

(1. 东南大学 电气工程学院,南京 210010;2. 国网重庆市电力公司 营销服务中心,重庆 400010;3. 国网能源研究院有限公司,北京 102200)

摘要:针对数据中心处理工作流负载时产生的运行费用问题,首先,分析并建立了考虑带宽和电力费用的工作流负载分配模型优化数据中心运营商支付的经济成本。然后,针对优化模型的特点,设计了启发式算法求解最小运行费用和工作流子任务在各个数据中心的分配方案。最后,采用真实的工作流负载拓扑和参数设置进行算例分析,对比3种不同类型的工作流负载拓扑和常见的两种工作流负载分配方法,结果验证了综合考虑带宽流量费用和电力费用模型对降低数据中心总运行费用的作用。

关键词:数据中心;工作流分配;带宽流量费用;启发式算法

Research on the data center workflow load allocation optimization model considering bandwidth and electricity costs

ZHANG Wenhan¹, ZHOU Hailang², YOU Peipei³, GAO Ciwei¹, LI Yanlin³, SHENG Mingya²

(1. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210010, China; 2. Marketing Service Center, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400010, China; 3. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: In response to the issue of operational costs generated when processing workflow loads in data centers, a workflow load allocation model considering bandwidth and power costs is first analyzed and established to optimize the economic costs paid by data center operators. Then, based on the characteristics of the optimization model, a heuristic algorithm is designed to solve the minimum operating cost and the allocation scheme of workflow subtasks in various data centers. Finally, a real workflow load topology and parameter settings are used for case analysis to compare three different types of workflow load topologies and two common workflow load allocation methods. The results verify the role of the comprehensive consideration of bandwidth traffic cost and power cost model in reducing the total operating cost of the data center.

Key words: data center; workflow scheduling; bandwidth fee; heuristic algorithm

0 引言

2021年5月,国家发展改革委、国家能源局等联合印发了《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》,明确提出要布局全国算力网络国家枢纽节点,启动实施“东数西算”工程,构建国家算力网络体系。而当不同节点的数据中心形成网络,无论是东数西算的政策导向,还是数据中心运营商自身的业务部署需要,合理分配不同地理位置节点的数据发送,降低数据中心运行费用成为一个值得研究的问题。

工作流就是工作流程的计算模型,即是将工作

流程中的工作如何前后组织在一起的逻辑和规则在计算机中以恰当的模式进行表示并对其实施计算^[1]。当工作流在不同地理位置的各个子任务间进行数据交互时,可能产生高昂的流量带宽费用。例如亚马逊AWS的官方公开统计结果,任务的流量带宽费用在实际应用中占到用户总资费的30%左右^[2]。

信息领域针对数据中心处理数据负载时的计算资费已有相关的模型和优化策略研究,主要针对降低传输数据负荷量进行优化。文献[3]尝试利用强化学习的方法获得工作流作业在云平台上的部署方案,得到了平衡服务质量和开销二者的部署策略。文献[4—5]则是针对Spark作业和Hadoop的MapReduce作业的特点,分别对基于Spark和Hadoop框架云平台的跨数据中心作业进行优化,降低了作业在

跨数据中心的数据传输量。事实上,和数据中心间传输数据时在不同地理位置带宽流量单价相似,不同地理位置的电力费用也不尽相同。文献[6]建立数据中心功率模型研究了数据中心的负荷调节潜力,并对负荷调节潜力关于工作负载处理延迟界限的灵敏度进行了分析;文献[7]将数据网与电力网协同运行,建立电力系统日前经济调度模型最小化系统总成本,主要考虑了发电机组的运行成本和数据中心的负荷控制成本;文献[8]将单个数据中心和电动汽车进行综合管理并参与系统调频,建立了一个双层电能管理模型来实时跟踪调频信号并进行调频市场决策,所建的模型对于数据中心和电动汽车的拥有者都具有经济效益。基于上述研究,数据中心与电力系统间具有良好的互动效果,因而响应东数西算的政策精神,将数据中心处理数据负载消耗的电力费用纳入数据中心的总运行费用考虑,综合带宽流量费用和电力费用进行合理优化,数据中心可以降低自身经济成本,优化任务分配。

本文首先建立数据中心带宽流量费用和电力费用计算模型,然后基于 workflow 模型,采用启发式算法优化多数据中心的数据负载分配,达到降低数据中心运营商总运行费用的效果。本文采用真实的互联网 workflow 拓扑进行数据中心 workflow 负载分配模型的算例分析,并于考虑单一要素的总费用进行对比,结果表明本文提出的模型能够综合降低数据中心运营商的运行成本。

1 处理 workflow 负载费用说明

由于地域、物价等因素,数据中心运营商从不同地理位置进行跨数据中心数据传输时,产生流量带宽单价成本并不相同。当前市场中流量带宽费用由某一数据中心发出数据的量决定。同理,不同地理位置数据中心也面临着不同的单位电力费用。数据中心运营商面临的电力费用来源于数据中心处理数据消耗的电能。由此可以见得,若仅仅按照跨地区数据传输量最小进行优化,并不能实际反映数据中心的最小运行费用,综合带宽流量费用和电力费用的地域差异进行优化,更能降低数据中心运营商的经济成本。

图1为一个 workflow 负载分配在两个数据中心的示例说明。图1(a)为该 workflow 负载数据传输的拓扑结构,假设数据中心1发出单位数据的流量带宽费用为1,处理单位数据消耗的电力费用为1,而数据中心2发出单位数据的流量带宽费用为3,处理单位数据消耗的电力费用为2。

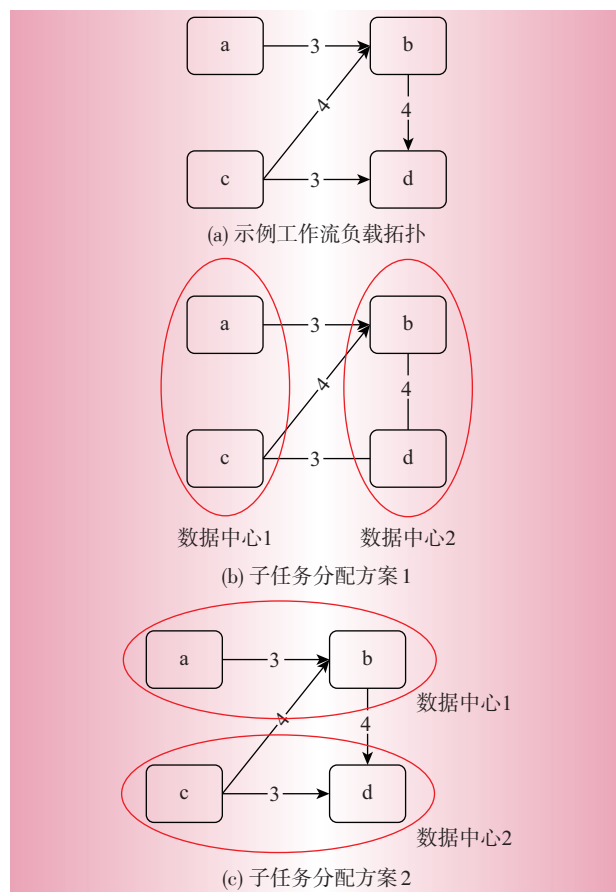


图1 4子任务 workflow 分配方案

Fig. 1 Four subtask workflow allocation scheme

图1(b)和(c)为该 workflow 拓扑分配在数据中心上的两种方案:方案1将子任务 a、c 分配到数据中心1, b、d 分配到数据中心2,跨数据中心传输数据量为9,由此产生的流量带宽费用为10,电力费用为18,合计为28,子任务在数据中心内部的数据传输不产生流量带宽费用;方案2将子任务 a、b 分配到数据中心1, c、d 分配到数据中心2,跨数据中心传输数据量为8,由此产生的流量带宽费用为16,电力费用为21,合计为28。可以见得,由于数据中心1和2带宽流量费用和电力费用的单价不同,两种方案数据中心运营商付出的总运行费用也不同,并且虽然方案2跨数据中心传输的数据量更少,但付出的经济成本反而更多。

综上所述,当对数据中心处理的工作流负载采用不同的分配方案,将会产生较大的运行费用差异,因此在满足数据中心处理工作流负载需求的条件下,建立合适的模型采用合理的方法优化数据中心负载分配,可以降低数据中心运营商的经济成本。

2 工作流负载分配模型

2.1 数据中心电力费用模型

数据中心运营商支付的电力费用来源于数据

中心处理 workflow 负载的数据所消耗的能耗,因此首先要得到数据中心的用电功率模型。

假设某公司有 N 个地理分散的数据中心,每个数据中心内所有服务器是同质的,即服务器的性能、额定功率等均相同。一般来说,数据中心 i 在 t 时段的总功率为

$$p_{i,t} = p_{i,t}^{\text{IT}} + p_{i,t}^{\text{cool}} + p_i^{\text{others}} \quad (1)$$

式中: $p_{i,t}^{\text{IT}}$ 为数据中心 i 在 t 时段的 IT 设备功率; $p_{i,t}^{\text{cool}}$ 为数据中心 i 在 t 时段的制冷系统功率; p_i^{others} 为数据中心 i 的其他系统功率。

2.1.1 IT 设备功率

IT 设备功率 $p_{i,t}^{\text{IT}}$ 包含服务器功率 $p_{i,t}^{\text{server}}$ 和网络设备功率 p_i^{network} 。

(1) 服务器功率

单台服务器的功率可以表示为 CPU 利用率的线性函数

$$p^{\text{server}} = p^{\text{idle}} + u(p^{\text{peak}} - p^{\text{idle}}) \quad (2)$$

式中: p^{idle} 和 p^{peak} 分别为活跃服务器在空闲状态和满载状态下的功率; u 为活跃服务器的 CPU 利用率。

设数据中心 i 在 t 时段开启了 $m_{i,x,t}$ 台服务器处理 workflow 负载任务 x , 服务器的平均 CPU 利用率可计算为

$$u_{i,x,t} = \frac{b_{i,x,t}}{(u_{i,x} \Delta t) m_{i,x,t}} \quad (3)$$

式中: $b_{i,x,t}$ 为数据中心 i 在 t 时段需要处理的 workflow 负载 x 的任务数据量; $u_{i,x}$ 为数据中心 i 内的服务器处理 workflow 负载 x 的数据处理速率; Δt 为一个时段的长度。

根据式(2),数据中心 i 在 t 时段的服务器功率为

$$p_{i,t}^{\text{server}} = \sum_{j=1}^J m_{i,j,t} \left(p_i^{\text{idle}} + u_{i,j,t} (p_i^{\text{peak}} - p_i^{\text{idle}}) \right) \quad (4)$$

$$= \sum_{j=1}^J m_{i,j,t} \left(p_i^{\text{idle}} + \frac{b_{i,j,t}}{(u_{i,j} \Delta t) m_{i,j,t}} (p_i^{\text{peak}} - p_i^{\text{idle}}) \right)$$

式中: p_i^{idle} 和 p_i^{peak} 分别为数据中心 i 内服务器在空闲和满载状态下的功率。

(2) 网络设备功率

数据中心网络设备的动态范围很小,因此数据中心 i 的网络设备功率 p_i^{network} 可视为固定值。

2.1.2 制冷系统功率

数据中心 i 在 t 时段的制冷系统功率为

$$p_{i,t}^{\text{cool}} = \frac{Q_{i,t}^{\text{cool}}}{c_i^{\text{COP}}} \quad (5)$$

式中: $p_{i,t}^{\text{cool}}$ 为数据中心 i 的制冷系统在 t 时段的冷功率; c_i^{COP} 为数据中心 i 的制冷系统能效比。

2.1.3 其他系统功率

数据中心内新风、消防、照明等其他系统功率

所占比例较少,通常视为固定值。

2.1.4 电力费用

数据中心 i 的能耗为其用电功率与处理 workflow 负载的时间积分,因而而付出的电力费用如下

$$C_i^{\text{ele}} = \int p_{i,t} E_{\text{ele},i} \Delta t_i \quad (6)$$

式中: C_i^{ele} 为数据中心 i 的电力费用; $E_{\text{ele},i}$ 为数据中心 i 消耗电能的电费单价。

2.2 数据中心流量带宽费用模型

数据中心运营商支付的流量带宽费用来源于处理 workflow 负载时,负载子任务在不同数据中心间进行数据传输产生的数据流量。

假设数据中心要处理的工作流负载包含的子任务数目为 T , 每个子任务按顺序被命名为 task_x , 其中 $x \in T$ 。在负载中的一些子任务存在上下游关系,彼此间会有数据的传输,这里定义 task_x 发往 task_y 的数据传输量为 D_{xy} , 其中 $x, y \in T$ 。

这些子任务分配在数据中心运营商的 N ($N > 1$) 不同地理位置的数据中心上进行处理。每个数据中心分配的子任务数为 R_i , 其中 $i \in N$ 。因为工作流子任务总数为 T , 所以得到

$$\sum_{i=1}^N R_i = T \quad (7)$$

同时,定义 bool 类型变量 $L_{x,i}^{\text{oc}}$, 用于判断子任务 task_x 是否被分配到了数据中心 i 上, 值为 1 表示“是”, 反之表示没有分配在该数据中心。对于任意两个数据中心 i 和 j 来说, 可以通过异或操作判断是否为同一个数据中心

$$i \oplus j = \begin{cases} 0 & i \text{ 与 } j \text{ 是一个数据中心} \\ 1 & i \text{ 与 } j \text{ 不是一个数据中心} \end{cases} \quad (8)$$

workflow 负载的各个子任务的数据在数据中心内进行数据传输时不会产生流量带宽费用。故当子任务 x, y 已被分配到数据中心, 可得由子任务 task_i 到 task_j 的带宽流量费用为

$$C_{xy}^{\text{flow}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N L_{x,i}^{\text{oc}} L_{y,j}^{\text{oc}} D_{xy} E_{\text{flow},i} (i \oplus j) \quad (9)$$

式中: C_{xy}^{flow} 为子任务 task_i 向 task_j 发送数据而产生的流量带宽费用; $E_{\text{flow},i}$ 为数据中心 i 发出数据的流量带宽单价, 其单位是元/GB。

由此, 得到 workflow 负载整体的跨数据中心的流量传输带宽费用为 C^{flow} 公式为

$$C^{\text{flow}} = \sum_{x=1}^T \sum_{y=1}^T L_{xy}^{\text{flow}} \quad (10)$$

2.3 数据中心运行费用模型

数据中心运营商处理 workflow 负载时产生的总运行费用为流量带宽费用与电力费用之和, 如下所示

$$C^{\text{IDC}} = \sum_i^N C_i^{\text{ele}} + C^{\text{flow}} \quad (11)$$

最终,本文的目标是降低数据中心运营商处理工作流作业整体的运行费用,也就是得到 $\min C^{\text{IDC}}$ 。

3 模型求解及算法

3.1 优化模型

3.1.1 优化目标

本文的优化目的在于将工作流负载进行合理的任务分配,降低数据中心运营商由此产生的运行费用。

计算优化目标数据中心总运行费用的流程如下:

步骤1:将工作负载各子任务分配到各个数据中心,得到分配信息列表,通过 $L_{x,i}^{\text{oc}}$ 变量判断子任务 x 是否分配到数据中心 i 上;

步骤2:求和分配到数据中心 i 到数据中心 j 所有的工作流子任务发送的数据量 D ,按数据中心 i 的带宽单价计算带宽流量费用;

步骤3:根据数据量 D 计算数据中心 i 到数据中心 j 子任务的功率,并根据处理时间计算能耗和电力费用;

步骤4:遍历求和所有数据中心 i 到数据中心 j 的情况,使用异或操作 $i \oplus j$ 判断子任务向外发送还是在数据中心 i 内部发送数据,仅有向外发送的数据按数据中心 i 的带宽单价计算带宽流量费用。但所有的子任务只要在数据中心 i 处理,均会产生电力费用,与向数据中心内外发送数据无关;

步骤5:求和得到数据中心处理工作流负载的总运行费用。

每个数据中心能够处理的工作流子任务数量可以视为一个组,设发送数据的数据中心的编号为 i ,接收的数据中心编号为 j ,则由 i 向 j 边的权值为

$$C_{ij}^{\text{IDC}} = \sum_x^T \sum_y^T C_{xy}^{\text{flow}} L_{x,i}^{\text{oc}} L_{y,j}^{\text{oc}} (D_{xy} E_{\text{flow},i} + P_{i,x} E_{\text{ele},i} t_x) \quad (12)$$

式中: t_x 为数据中心 i 处理工作流子任务 x 的时间。

由于每个数据中心组的带宽流量单价和电力费用单价都是确定的,可以得到数据中心整个数据中心网络处理工作流负载时的最小权值合计为

$$\min C^{\text{IDC}} = \min \sum_i^N \sum_j^N C_{ij}^{\text{IDC}} \quad (13)$$

本文的目的就是得到让这个值最小的那种工作流子任务分配方案。由于工作流负载一般数据量较大,因而时间容忍度较高,当考虑额外的负载优化时,具有一定的优化空间,可以兼顾考虑。

3.1.2 约束条件

每一个数据中心上分配的子任务数目要等于判断后归属该数据中心的 task 总数,所以得约束条件

$$\sum_i^N (R_i - \sum_x^T L_{x,i}^{\text{oc}})^2 = 0 \quad (14)$$

分配至数据中心的工作流负载任务应全部处理完成,如下式所示

$$m_{i,x,t} = \frac{b_{i,x,t}}{u_{i,x,t} \Delta t} \quad (15)$$

依据能量守恒定律,结合建筑的等效热参数模型,制冷系统冷功率与外界环境参数、IT设备功率、其他系统功率要满足一定的关系

$$C_i \frac{dT_{i,t}^{\text{in}}}{dt} = \frac{T_{i,t}^{\text{out}} - T_{i,t}^{\text{in}}}{R_i} + p_{i,t}^{\text{IT}} + p_{i,t}^{\text{others}} - Q_{i,t}^{\text{cool}} \quad (16)$$

式中: $T_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $T_{i,t}^{\text{out}}$ 分别为数据中心 i 在 t 时段的室内、室外温度; R_i 和 C_i 分别为数据中心 i 的等效热阻、热容。

3.2 算法设计

本文采用 stoer-wagner 算法求解图最小割的方法,设计一个类似启发式算法求解数据中心总运行费用的最小值。根据 stoer-wagner 算法的思路,在对图分割后,在图中相邻的两个点,要么位于割的一侧,要么位于两侧。于是在跨数据中心分配工作流负载子任务时,对于工作流负载拓扑而言,相邻的两个子任务或是位于同一个数据中心,或是分配在不同的数据中心。

为了得到数据中心运营商处理跨数据中心工作流负载运行费用的优化分配方案,本文借鉴 stoer-wagner 算法的思想,提出了启发式的算法来求解问题,提出的启发式算法流程如图2所示。

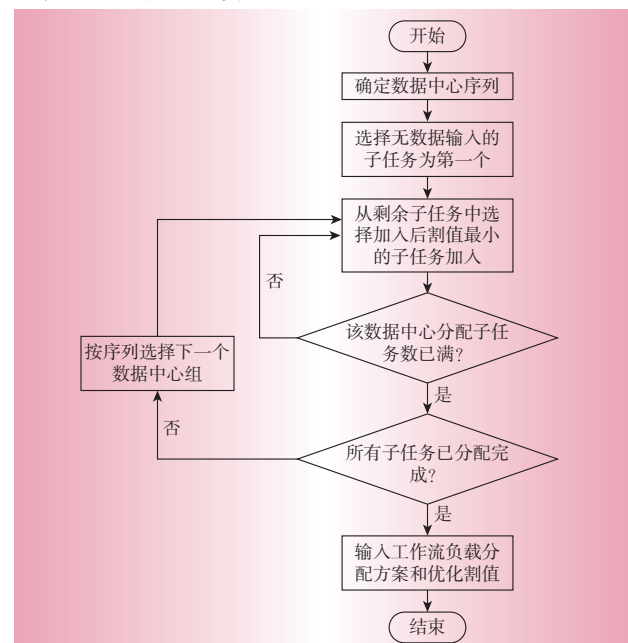


图2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow

设计算法首先在求解数据中心处理 workflow 负载的最小运行费用分配时,采用贪心的启发式思想。首先确定一个选择数据中心的顺序序列,用于决定运营商分配 workflow 子任务的顺序。然后,从 workflow 子任务中选择一个不接收数据的子任务作为第一个加入第一个数据中心组,随后将其从 workflow 负载拓扑中去掉。接下来,再从剩下的子任务中选择一个子任务加入第一个数据中心组中,此时数据中心将会产生向外发送数据中心的流量带宽费用和处理子任务数据的电力费用。比较挑选一个使得数据中心间的割也就是运营商产生的运行费用最小的子任务,加入第一个数据中心,并将其从剩下的 workflow 负载拓扑中去掉。重复上述的过程直到第一个数据中心组达到可分配子任务的计划数量,随后按序列选择下一个数据中心,重复上述的选择过程。直到所有的数据中心组都按数量分配完成了子任务,此时就得到了当前序列下数据中心处理 workflow 负载的子任务分配方案,这个方案也就是该情况下的一个贪心极小值。

由于各个数据中心发送数据的流量带宽单价不同,workflow 负载分配到各个数据中心的子任务数量也不同,因此在每个确定的数据中心序列下都会得到一种 workflow 子任务的分配方案和优化运行费用。为得到数据中心运营商支付运行费用的最低方案,还需要对所有数据中心的排列序列按设计算法计算出优化运行费用,并比较得到最终的 workflow 负载分配方案和最小割值。

4 算例分析

4.1 参数设置

本文以阿里云的数据中心为研究对象,以阿里云公司在杭州、张北、乌兰察布的3个数据中心网络进行算例分析,并假设各个数据中心同质。设置的数据中心各参数如表1所示。

表1 数据中心参数

Table 1 Data center parameters

参数	说明	取值
M_i	服务器总数量	10 000
p_i^{idle}	活跃服务器的空闲功率/kW	0.1
p_i^{peak}	活跃服务器的峰值功率/kW	0.2
$T_{i,0}^{in}$	初始室内温度/℃	21
T_i^{min}	室内温度下限/℃	16
T_i^{max}	室内温度上限/℃	26
R_i	等效热阻/(℃·MW ⁻¹)	4
C_i	等效热容/(MWh·℃ ⁻¹)	0.25
p_i^{other}	其他系统功率/MW	0.5
C_i^{COP}	制冷系统能效比	2

算例中各个数据中心处理 workflow 负载的电力费用单价来源于真实数据,分别为:0.684 2、0.657 6、0.430 3 元/kWh,带宽流量费用单价取 0.24、0.25、0.26 元/GB,由于 workflow 的特性,优化结果要保证各个数据中心均分配到一定的工作流子任务。

4.2 不同 workflow 负载拓扑结果

算例采用实际领域中常用的科学 workflow 负载拓扑结构进行计算,使用开源项目 Pegasus 公布的真实 workflow 负载分类和结构,包括 LIGO, Egipenomics, CyberShake 等。这些 workflow 负载拓扑被广泛应用在测量 workflow 调度算法的性能上,图3为真实 workflow 负载拓扑结构示例。

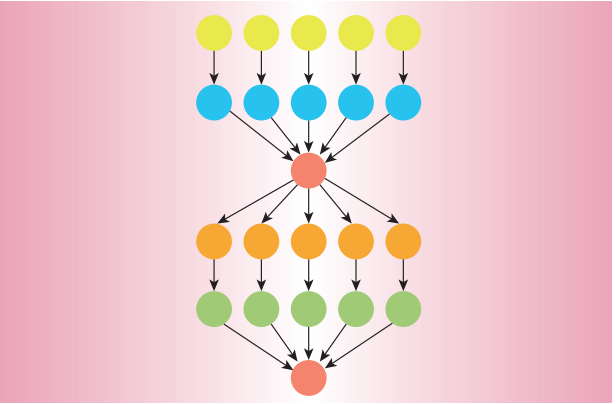


图3 真实 workflow 负载拓扑结构示例

Fig. 3 Example of real workflow topology structure

各种 workflow 负载拓扑即运行费用优化计算结果如表2所示,其中电力费用除去了数据中心的固定能耗带来的费用,这是由于这些能耗并非由处理 workflow 负载所产生。

表2 不同类型 workflow 优化计算结果

Table 2 Optimization calculation results for different types of workflows

workflow 拓扑	任务数目	边数目	总任务传输量/GB	跨数据中心传输量/GB	带宽流量费用/元	总运行费用/元
LIGO	22	25	85.94	25.76	6.42	13.24
Egipenomics	24	27	89.94	18.91	5.04	10.26
CyberShake	20	32	141.81	41.39	10.47	21.02

由表2可知,不同的 workflow 负载拓扑均可采用本文设计的启发式算法进行优化计算,并得到对于 workflow 子任务在各个数据中心的分配方案。通过对3种 workflow 负载拓扑的优化结果可以看出,优化各个子任务在数据中心间的分配,可以相当的减小跨数据中心数据传输量,从而降低数据中心运营商支付的带宽流量费用。并且在各种 workflow 负载拓扑总任务传输量相近在同一数量级时,带宽流量费用或电力费用在数据运营商优化后的总运行费用

中占比接近。

4.3 各个数据中心能耗对比

观察3种工作流负载下,3个数据中心的能耗占比,如图4所示,分析电力价格对工作流负荷分配的作用。

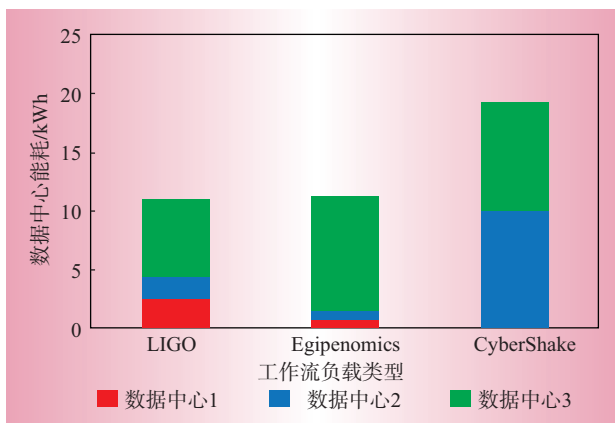


图4 数据中心能耗占比

Fig. 4 Proportion of energy consumption in data centers

3个数据中心中,数据中心3的能耗占比均较高,而数据中心1占比很少,这是由于考虑电力费用后,数据中心3的电力单价最低,而数据中心1的电力单价最高,算法更倾向于将更多的工作流数据分配到电价较低的数据中心。由于工作流带宽费用差距较小,电价的引导作用更加明显,而电价较低的地区,如本文的乌兰察布,新能源占比较大,数据中心运行商在降低自身运行费用的同时,也能助力电网消纳新能源,降低碳排放。

4.4 不同分配方法费用对比

为验证本文所提模型与算法对优化数据中心处理工作流负载产生的运行费用的效果,本节使用了两种在现实的云计算等场景中涉及工作流负载分配时常见采用的分配方法,与本文所提的同时考虑带宽流量费用与电力费用的模型算法进行对比。3种方案按如下设置为:方法1:顺序分配,即存在许多工作流负载并未设置合理的子任务分配方案,仅仅按照子任务设置的前后顺序分配到各个数据中心进行处理;方法2:最小带宽流量费用分配,即仅仅考虑优化处理工作流负载时产生的跨数据中心带宽流量费用,不考虑电力费用,按得到的结果分配;方法3:本文所提方法,即同时考虑带宽流量费用和电力费用工作流负载分配。3种方法的总运行费用计算结果如图5所示。

观察图5可以看出,无论那种工作流负载拓扑,本文提出的方法3所优化的子任务分配方案所产生的总运行费用均为最低,相比常见的方法1顺序分配平均降低28.0%,最高降低37.8%,比仅仅优化带宽流量费用的方法2也平均降低5.6%,最高降低

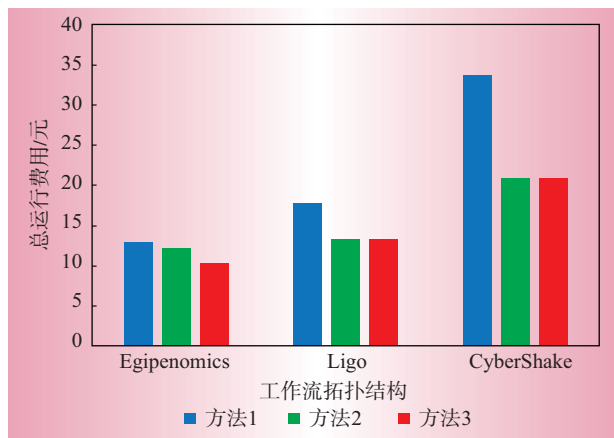


图5 3种工作流分配方法计算结果

Fig. 5 Calculation results of three workflow allocation methods

16.1%。可知综合带宽流量费用和电力费用进行工作流负载分配的优化方法能更好的降低数据中心的总运行费用。总的来说,工作流内部数据中传输总量越多,方法3相比方法一下降比例就越高,因为更多的数据提供了更多的优化空间。

而方法3相比方法2,总运行费用下降的比例相对较小。这是由于在该数量级的数据传输量下,数据中心处理工作流负载产生的带宽流量费用和电力费用相对接近,仅优化带宽流量费用能够下降的最大比例,与同时优化带宽费用和电力费用能够下降的比例能够持平,但是方法3依然能够保持总运行费用的最优,保证数据中心运营商采用运行费用更低的工作流负载分配方案。

4.5 工作流数据传输量对运行费用的影响

选取 Egipenomics 工作流对所处理工作流负载的数据传输总量对总运行费用的影响进行分析,将工作流的数据传输量按一定倍数线性增长,得到总允许费用结果如图6所示。

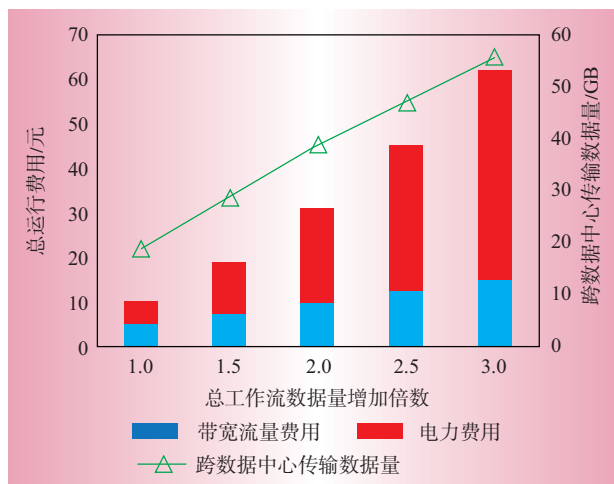


图6 工作流数据量对运行费用的影响

Fig. 6 Impact of workflow data volume on operating costs

可以看到,随着 workflow 总数据量的增长,跨数据中心的传输数据量几乎呈现线性增长,这是由于 workflow 负载的拓扑没有发生变化,算法优化的数据中心子任务分配结果并未发生较大变化。然而,随着数据量增长,总运行费用却增加较快,速度明显高于数据量增加速度。观察图6可以发现,带宽流量费用的增长并不明显,相反,电力费用的增长速度较快。这是由于单个 workflow 的内部数据量增加,使得数据中心不光处理其所需功率增加,处理时间也要增加,两者同时作用使得数据中心的能耗和电力费用增加较快,也造成了总运行费用的增加。

单个 workflow 数据量的增长会大幅增加运行费用,因而数据中心在要考虑优化 workflow 的数据传输结构,或者将其分解成多个小规模 workflow,避免大规模数据的长时间传输。

5 结束语

本文针对数据中心处理 workflow 负载时产生运行费用的经济问题,设计相关模型和求解算法优化数据中心运营商的经济成本。首先说明数据中心处理 workflow 负载的流程和由此产生的资费,基于此,建立数据中心的电力费用模型和带宽流量费用模型并由此得到总的运行费用模型。随后,设计启发式算法求解数据中心总运行费用的优化结果,并设置真实的工作流负载拓扑结构和参数进行算例分析。算例结构说明,针对不同类型的工作流负载拓扑,本文所提的模型均能优化各个工作流子任务在数据中心间的分配。并且,与常见的顺序分配和仅考虑带宽费用的方法相比,综合考虑电力费用与带宽流量费用在降低数据中心总运行费用上有更好的效果。

参考文献:

- [1] 罗伟民,孙钦,周蔚南,等. 计及峰谷分时电价与需求响应的互联网数据中心储能经济性分析[J]. 供用电, 2022, 39(7): 40-45.
LUO Weimin, SUN Qin, ZHOU Weinan, et al. Economic analysis of idc with energy storage system considering peak valley time-of-use price[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 40-45.
- [2] 杜先波,陈国琳,唐一铭,等. 多站融合型数据中心交直流供电模式对比分析[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 84-89.
DU Xianbo, CHEN Guolin, TANG Yiming, et al. A comprehensive comparison between DC and AC power supply modes of data center in multi-station integration[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 84-89.
- [3] ZHOU X, WANG K, JIA W, et al. Reinforcement learning-based adaptive resource management of differentiated services in geo-distributed data centers[C]// International Symposium on Quality of Service (IWQoS), Vilanova I La Geltru, Spain, 2017: 1-6.
- [4] HU Z, LI B, QIN Z, et al. Job scheduling without prior information in big data processing systems [C]// IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Atlanta, GA, USA, 2017: 572-582.
- [5] 庄岭,李叶飞,杨斌,等. 多电压等级直流供电在模块化数据中心的应用[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 79-84.
ZHUANG Ling, LI Yefei, YANG Bin, et al. Applications of multi-voltage grade DC power supply in modular data centers[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 79-84.
- [6] 陈敏,高赐威,陈宋宋,等. 考虑数据中心用电负荷调节潜力的双层经济调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1 301-1 314.
CHEN Min, GAO Ciwei, CHEN Songsong, et al. Bi-level economic dispatch modeling considering the load regulation potential of internet data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1 301-1 314.
- [7] 曹晓峻,高赐威,李德智,等. 数据网络与电力网络混合运行建模及其参与系统经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1 448-1 456.
CAO Xiaojun, GAO Ciwei, LI Dezhi, et al. Mixed operation model of data network and power network and its participation in the economic operation of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1 448-1 456.
- [8] CHEN M, GAO C, SONG M, et al. Internet data centers participating in demand response: a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 117: 109 466.

作者简介:

张文翰(1999),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事数据中心与电网互动等研究;

周海浪(1976),男,重庆万州人,高级工程师,主要从事需求响应、虚拟电厂等研究;

高赐威(1976),男,通信作者,浙江淳安人,博士,教授,主要从事需求响应、电力市场等研究;

(责任编辑 郝 逊)