满足能耗约束下，最小化时延

$$\underset{\mathbf{x},\gamma,\kappa}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^{m}\left[x_i t_i^L + (1-x_i)t_i^E\right] \tag{7}$$

$$\text{subject to: } x_i\varepsilon_i^L \le \alpha_i E_{max}^i \quad \forall i=1,\cdots,m. \tag{8}$$

$$(1-x_i)\varepsilon_i^E \le \alpha_i E_{max}^i \quad \forall i=1,\cdots,m. \tag{9}$$

$$\gamma_i \in \mathcal{A}(u_i) \quad \forall i=1,\cdots,m. \tag{10}$$

$$\sum_{i\in o_{\gamma_i}} \kappa_i^{\gamma_i} \le 1. \tag{11}$$

论文给出的公式如上，x_i为0-1变量，代表计算卸载的决策，决定任务是在本地执行还是边缘端执行

约束条件(8)，约束本地计算的耗能要小于电池余量

约束条件(9)，约束传输边缘计算任务的耗能要小于电池余量

约束条件(10)，约束执行计算任务的边缘节点是提供服务的节点

约束条件(11)，约束所有计算资源的分配不能超过该节点的计算资源总和

满足计算任务时延需求前提下，最小化能耗

变量解释

$X_{m,i}$代表第m个计算任务的第i个子任务，$FT_{m,i}$表示本地执行完成的结束时间

$T_{m,i,k}$是第m个计算任务的第i个子任务在第k个核心的耗时，其耗能为$E_{m,i,k}$

$RT_{m,i}$为第m个计算任务的第i个子任务的就绪时间

$FT_{m,i}^{\text{send}}$，$FT_{m,i}^{exe}$，$FT_{m,i}^{rcv}$分别代表边缘计算时，发送数据，执行任务，接受数据结束时的时间

耗能为传输和接受时的耗电，用$E_{m,i}^c$表示

优化目标及约束条件如下

$$\min \quad \sum_m \sum_i \left(\sum_k l_{m,i,k} \cdot E_{m,i,k} + l_{m,i,0} \cdot E_{m,i}^c\right)$$

$$\text{subject to} \quad T_m \le T_m^{max}, \quad for\ \forall m$$

T_m的计算过程如下，对子任务$X_{m,i}$来说，如果其在本地执行，其就绪时间为前置任务完成的时间

$$RT_{m,i} = \max_{X_{m,j}\in pred(X_{m,i})} max\{FT_{m,j}, FT_{m,j}^{rcv}\},$$

子任务$X_{m,i}$的运行时间为，$AT_{m,i,k}$为处理器空闲的时间

$$ST_{m,i,k} = max\{RT_{m,i}, AT_{m,i,k}\},$$

所以子任务$X_{m,i}$的结束时间为

$$FT_{m,i,k} = ST_{m,i,k} + T_{m,i,k}.$$

在云端执行时，同理可得其结束时间如下

$$RT_{m,i}^{send} = \max_{X_{m,j} \in pred(X_{m,i})} FT_{m,j}.$$

$$ST_{m,i}^{send} = max\{RT_{m,i}^{send}, AT_{m,i}^{send}\},$$

$$FT_{m,i}^{send} = ST_{m,i}^{send} + T_{m,i}^{send}.$$

$$RT_{m,i}^{exe} = max\{FT_{m,i}^{send}, \max_{X_{m,j} \in pred(X_{m,i})} FT_{m,j}^{exe}\}.$$

$$ST_{m,i}^{exe} = RT_{m,i}^{exe},$$

$$FT_{m,i}^{exe} = ST_{m,i}^{exe} + T_{m,i}^{exe}.$$

所以最终T_m为

$$T_m = \max_{X_{m,i} \in exit\ tasks} max\{FT_{m,i}, FT_{m,i}^{rcv}\}.$$

$l_{m,i,k}$用于表示对任务的指派

$$l_{m,i,k} = \begin{cases} 1, & \text{if task } X_{m,i} \text{ is assigned to core } k; \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

因为一个任务只能分配给一个核，所以有约束

$$\sum_{k=0}^{K} l_{m,i,k} = 1.$$

对于子任务的先后顺序要求，设定0-1变量$o_{i,j}$

$$o_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if task } j \text{ is scheduled before task } i; \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

并建立如下约束保证前置任务的完成

$$AT_{m,i,k} \geq l_{m,i,k} \cdot l_{n,j,k} \cdot o_{i,j} \cdot FT_{n,j}. \ for \, \forall X_{m,i}, X_{n,j}$$

$$AT_{m,i}^{send} \geq l_{m,i,0} \cdot l_{n,j,0} \cdot o_{i,j} \cdot FT_{n,j}^{send}. \ for \, \forall X_{m,i}, X_{n,j}$$

权衡能耗和时延

优化目标及约束条件如下

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_1 : \min_{\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p}} \ & t_{\text{comp}}^N (\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p}) + \eta \cdot E_{\text{tr}} (\mathbf{p}) & (5) \\ \text{s.t.} \ & \sigma_j \in \{1, \cdots, N\}, \sigma_i \neq \sigma_j, j \neq i, \forall i, j & (6) \\ & 0 \leq p_i \leq p_{\max}, i = 1, \cdots, N. & (7) \end{aligned}$$

σ代表计算卸载的决策，p代表不同任务的发送功率，d表示任务的数据量，c表示任务的工作负载

传送速率的公式可以由下式获得

$$R(p_i) = \omega \log_2 \left(1 + \frac{g_0 (L_0 / L)^{\theta} p_i}{N_0 \omega} \right), \qquad (1)$$

则数据传输完成的时间为

$$t_{\text{ready}}^j (\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p}) = \sum_{k \leq j} \frac{d_{\sigma_k}}{R(p_{\sigma_k})}, j = 1, \cdots, N, \qquad (2)$$

数据处理的时间为

$$t_{\text{comp}}^j (\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p}) = \begin{cases} t_{\text{ready}}^j (\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p}) + d_{\sigma_j} c_{\sigma_j} f_{\text{ser}}^{-1}, & j = 1 \\ \max\{t_{\text{ready}}^j (\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p}), t_{\text{comp}}^{j-1} (\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p})\} & \\ \qquad + d_{\sigma_j} c_{\sigma_j} f_{\text{ser}}^{-1}, & j > 1, \end{cases} \qquad (3)$$

其能耗为

$$E_{\text{tr}} (\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N} p_i \cdot \frac{d_i}{R(p_i)} = \sum_{j=1}^{N} p_{\sigma_j} \cdot \frac{d_{\sigma_j}}{R(p_{\sigma_j})}. \qquad (4)$$