

# 全国大学生数学建模竞赛论文模板

## 摘要

摘要

对于问题一,

对于问题二,

对于问题三,

对于问题四,

最后,

关键字: 关键词 关键词 关键词 关键词 关键词

## 目录

1	问题重述 .....	4
1.1	问题背景 .....	4
1.2	问题要求 .....	4
1.3	我们的工作 .....	5
2	模型假设 .....	5
3	符号说明 .....	5
4	问题一的模型的建立和求解 .....	5
4.1	问题一的描述与分析 .....	5
4.2	预备工作 .....	6
4.3	模型建立 .....	6
4.3.1	传输速率计算 .....	6
4.3.2	服务质量评估函数 .....	7
4.3.3	优化模型 .....	8
4.4	模型求解 .....	8
4.5	求解结果 .....	9
5	问题二的模型的建立和求解 .....	9
5.1	问题二的描述与分析 .....	9
5.2	预备工作 .....	9
5.3	模型建立 .....	10
5.3.1	时变信道与传输速率模型 .....	10
5.3.2	任务队列动态演化模型 .....	10
5.3.3	时延计算模型 .....	11
5.3.4	动态服务质量评估函数 .....	11
5.3.5	多时间段优化模型 .....	11
5.4	模型求解 .....	12
5.5	求解结果 .....	12
6	问题三的模型的建立和求解 .....	12
6.1	问题三的描述与分析 .....	12
6.2	预备工作 .....	12

6.3 模型建立 .....	12
6.4 模型求解 .....	12
6.5 求解结果 .....	13
7 模型的分析与检验 .....	13
7.1 灵敏度分析 .....	13
7.2 误差分析 .....	13
8 模型的评价 .....	13
8.1 模型的优点 .....	13
8.2 模型的缺点 .....	13
A 附录 文件列表 .....	14
B 附录 代码 .....	14

# 1 问题重述

## 1.1 问题背景

随着移动通信需求的激增和物联网（IoT）的快速发展，网络架构正向异构化和虚拟化演进。异构蜂窝网络（HetNet）通过混合部署宏基站与微基站，有效提升了网络容量与覆盖。在此基础上，5G 网络切片技术利用网络功能虚拟化（NFV），将单一物理网络划分为多个逻辑切片，以满足超高可靠低时延（URLLC）、增强移动宽带（eMBB）和大规模机器通信（mMTC）等多样化服务需求。

无线资源的管理依赖于正交频分多址接入（OFDMA）技术，它将频谱划分为时频资源块（RB）进行灵活分配。因此，在异构网络与多切片共存的复杂场景下，如何设计高效的资源块和功率分配策略，以最大化用户服务质量并优化能耗，成为无线资源管理领域的核心挑战。

## 1.2 问题要求

本赛题旨在研究异构蜂窝网络中基于网络切片的无线资源管理问题。核心任务是设计一套优化方案，在满足不同用户多样化服务质量（QoS）需求的同时，实现系统资源的高效利用。具体来说，需要解决以下几个层层递进的问题：

- **问题一：**针对单个微基站和单一用户任务的场景，研究如何将有限的资源块在 URLLC、eMBB、mMTC 三类切片间进行静态分配，以实现用户服务质量的最大化。
- **问题二：**在动态场景下，考虑用户任务的随机到达和用户移动性，设计一个多周期的资源分配策略。该策略需要在 10 个决策点上对资源进行重新分配，不仅要服务新到达的任务，还要处理队列中积压的任务，目标是最大化整个时间窗口内的总体用户服务质量。
- **问题三：**将场景扩展到多个微基站，引入了基站间的同频干扰问题。要求在进行资源块分配的同时，对每个基站各切片的发射功率进行协同优化，以抑制干扰，最大化全系统的用户服务质量。
- **问题四：**构建一个包含宏基站和多个微基站的异构网络模型。在此模型中，需要为每个用户决策其接入基站（宏基站或微基站），并为所有基站进行切片划分和功率控制，以应对更大规模的用户需求和更复杂的网络环境，最终目标仍是最大化整体服务质量。
- **问题五：**在问题四的基础上，引入基站能耗模型，探讨在保证最大化用户服务质量的同时，如何通过优化资源分配策略来实现网络总能耗的最低化，从而在服务性能和绿色节能之间取得平衡。

## 1.3 我们的工作

## 2 模型假设

为简化问题，本文做出以下假设：

- 假设 1
- 假设 2
- 假设 3

## 3 符号说明

符号	含义
$N$	资源块总数， $N = 50$
$\mathcal{S}$	切片集合， $\mathcal{S} = \{U, e, m\}$ （分别代表 URLLC、eMBB、mMTC）
$\mathcal{U}_s$	切片 $s$ 的用户集合
$n_s$	分配给切片 $s$ 的资源块数量
$D_k$	用户 $k$ 的任务数据量（Mbit）
$\phi_k$	用户 $k$ 的大规模衰减（dB）
$h_k$	用户 $k$ 的小规模瑞利衰减系数
$p_{\text{tx}}$	基站发射功率， $p_{\text{tx}} = 30$ dBm
$b$	单个资源块带宽， $b = 360$ kHz
$L_s^{\text{SLA}}$	切片 $s$ 的时延 SLA 要求
$r_s^{\text{SLA}}$	切片 $s$ 的速率 SLA 要求
$M_s$	切片 $s$ 的任务丢失惩罚系数
$\alpha$	URLLC 切片的效益折扣系数

## 4 问题一的模型的建立和求解

### 4.1 问题一的描述与分析

问题一考虑单个微基站的资源分配场景。该基站拥有 50 个资源块（Resource Block, RB），需要为三类网络切片——URLLC（高可靠低时延）、eMBB（增强移动宽带）和 mMTC（大规模机器通信）进行资源分配，以最大化用户服务质量。这是一个静态资源分配优化问题，需要在满足资源约束的条件下，找到最优的资源块分配方案。

## 4.2 预备工作

为便于复现与对比，本问采用如下统一的数据、参数与约定：

- 数据来源（附件 1，单时刻数据）：任务量 **q1\_ 任务流.csv**（单位：Mbit）、大规模衰减 **q1\_ 大规模衰减.csv**（单位：dB）、小规模瑞利衰减 **q1\_ 小规模瑞利衰减.csv**（幅度  $|h|$ ）。按列名一一对应同名用户，忽略非数值列（如 **Time**）。
- 系统与物理层参数：单小区、无同频干扰；发射功率  $p_{tx} = 30 \text{ dBm}$ ；单 RB 带宽  $b = 360 \text{ kHz}$ ；噪声系数  $NF = 7 \text{ dB}$ 。白噪声按如下公式计算：

$$N_0 (\text{dBm}) = -174 + 10 \log_{10}(ib) + NF \quad (1)$$

并换算为 mW。仅考虑传输时延，单时刻下排队时延取  $Q_k = 0$ 。

- 资源占用粒度（同表 1）：URLLC/eMBB/mMTC 用户并发占用 RB 数分别为  $v_U = 10$ 、 $v_e = 5$ 、 $v_m = 2$ 。为避免 RB 碎片化，约束切片 RB 分配满足  $n_U \bmod 10 = 0$ 、 $n_e \bmod 5 = 0$ 、 $n_m \bmod 2 = 0$ ，且  $n_U + n_e + n_m = 50$ 。
- SLA 与 QoS：URLLC 时延 SLA  $L_U^{\text{SLA}} = 5 \text{ ms}$ 、折扣因子  $\alpha = 0.95$ 、惩罚  $M_U = 5$ ；eMBB 速率 SLA  $r_e^{\text{SLA}} = 50 \text{ Mbps}$ 、时延 SLA  $L_e^{\text{SLA}} = 100 \text{ ms}$ 、惩罚  $M_e = 3$ ；mMTC 时延 SLA  $L_m^{\text{SLA}} = 500 \text{ ms}$ 、惩罚  $M_m = 1$ 。
- 评估口径：URLLC/eMBB 以用户级 QoS 加和；mMTC 以满足 SLA 的接入比例计分（当期存在任务的 mMTC 用户数作分母）。

## 4.3 模型建立

### 4.3.1 传输速率计算

根据附录中的信号传输模型，用户  $k$  获得  $i_k$  个资源块时的接收功率为：

$$p_{rx,k} = 10^{\frac{p_{tx} - \phi_k}{10}} \cdot |h_k|^2 \quad (\text{mW}) \quad (2)$$

其中， $p_{tx}$  为基站发射功率（dBm）， $\phi_k$  为大规模衰减（dB）， $h_k$  为小规模瑞利衰落系数， $p_{rx,k}$  为接收功率（mW）。

考虑噪声功率的影响，噪声功率谱密度为：

$$N_0 = -174 + 10 \log_{10}(i_k \cdot b) + 7 \quad (\text{dBm}) \quad (3)$$

其中， $i_k$  为用户  $k$  占用的 RB 数量， $b$  为单 RB 带宽（Hz）， $-174 \text{ dBm/Hz}$  为热噪声谱密度， $7 \text{ dB}$  为噪声系数。

信干噪比（SINR）在无干扰情况下简化为信噪比（SNR）：

$$\gamma_k = \frac{p_{rx,k}}{10^{\frac{N_0}{10}}} \quad (4)$$

其中,  $N_0$  以 dBm 计,  $10^{\frac{N_0}{10}}$  为噪声功率 (mW)。

根据香农公式, 用户  $k$  的传输速率为:

$$r_k = i_k \cdot b \cdot \log_2(1 + \gamma_k) \quad (\text{bps}) \quad (5)$$

其中,  $r_k$  为传输速率 (bps),  $i_k$  为 RB 数量,  $b$  为单 RB 带宽。

#### 4.3.2 服务质量评估函数

根据附录中的用户服务质量定义, 不同切片的 QoS 评估函数如下:

##### (1) U 切片 (URLLC)

用户  $k$  的传输时延为:

$$T_k = \frac{D_k \times 10^6}{r_k} \quad (\text{s}) \quad (6)$$

总时延为:

$$L_k^s = Q_k + T_k, \quad s \in \{U, e, m\} \quad (7)$$

其中,  $D_k$  为任务数据量 (Mbit),  $Q_k$  为排队时延,  $T_k$  为传输时延。

服务质量函数为:

$$y_k^U = \begin{cases} \alpha^{L_k^U} & \text{若 } L_k^U \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{若 } L_k^U > L_U^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\alpha \in (0, 1)$  为效益折扣系数 (本题取  $\alpha = 0.95$ ),  $M_U$  为 U 切片任务丢失惩罚系数,  $L_U^{\text{SLA}}$  为 U 切片时延 SLA。

##### (2) e 切片 (eMBB)

e 切片用户采用三段式 QoS 函数:

$$y_k^e = \begin{cases} 1 & \text{若 } r_k \geq r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_k^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k}{r_e^{\text{SLA}}} & \text{若 } r_k < r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_k^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{若 } L_k^e > L_e^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $r_e^{\text{SLA}}$ 、 $L_e^{\text{SLA}}$  分别为 e 切片的速率与时延 SLA,  $M_e$  为惩罚系数。

##### (3) m 切片 (mMTC)

m 切片的 QoS 基于接入成功率 (满足时延 SLA 时按接入比例计分):

$$y_k^m = \begin{cases} \frac{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c'_i}{\sum_{i \in \mathcal{U}_m} c_i} & \text{若 } L_k^m \leq L_m^{\text{SLA}} \\ -M_m & \text{若 } L_k^m > L_m^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\mathcal{U}_m$  为 m 切片用户集合,  $c_i$  表示是否有任务需求,  $c'_i$  表示是否成功接入,  $L_k^m$  为用户  $k$  的总时延 (同上定义),  $M_m$  为惩罚系数。

### 4.3.3 优化模型

基于上述分析，建立如下优化模型：

$$\begin{aligned} \max_{n_U, n_e, n_m} \quad & Q = \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{k \in \mathcal{U}_s} y_k^s \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} n_U + n_e + n_m \leq N \\ n_s \geq 0, \quad \forall s \in \mathcal{S} \\ n_s \in \mathbb{Z}, \quad \forall s \in \mathcal{S} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

其中， $n_U, n_e, n_m$  分别为分配给 U、e、m 切片的 RB 个数， $\mathcal{S} = \{U, e, m\}$ ， $\mathcal{U}_s$  为切片  $s$  的用户集合； $y_k^U$ 、 $y_k^e$  为用户级 QoS 得分， $y^m$  为 m 切片的聚合式接入比例得分。

其中，第一个约束为资源块总数限制，第二个约束为非负约束，第三个约束为整数约束。

### 4.4 模型求解

为求解最优切片 RB 分配与接入选择，采用离散枚举结合贪心选择的求解流程：

1. 切片 RB 枚举：枚举  $R_U \in \{0, 10, \dots, 50\}$ 、 $R_e \in \{0, 5, \dots, 50 - R_U\}$ ，令  $R_m = 50 - R_U - R_e$ ，若  $R_m < 0$  或  $R_m \bmod 2 \neq 0$  则跳过。并发可接入上限为  $\text{cap}_U = \lfloor R_U/10 \rfloor$ 、 $\text{cap}_e = \lfloor R_e/5 \rfloor$ 、 $\text{cap}_m = \lfloor R_m/2 \rfloor$ 。
2. 指标计算：对每个用户按其所属切片以固定并发 RB 数  $v_s \in \{10, 5, 2\}$  计算

$$r_k = v_s b \log_2(1 + \gamma_k), \quad T_k = \frac{D_k \cdot 10^6}{r_k}, \quad L_k = T_k (Q_k = 0)$$

并据式 (??) 中各切片 QoS 定义得到  $y_k^s$  (URLLC:  $\alpha^{L_k}$ ; eMBB: 分段函数; mMTC: 是否满足时延 SLA)。

3. 接入选择：

- URLLC/eMBB: 过滤  $y_k^s > 0$  的用户，按  $y_k^s$  从高到低取不超过  $\text{cap}_s$  个；
- mMTC: 筛选满足  $L_k \leq L_m^{\text{SLA}}$  的用户，并按“编号靠前优先”的统一顺序取不超过  $\text{cap}_m$  个（与题目处理顺序一致）。

4. 目标计算：

$$Q(R_U, R_e, R_m) = \sum_{k \in \mathcal{U}_U} y_k^U + \sum_{k \in \mathcal{U}_e} y_k^e + \underbrace{\frac{\# \text{mMTC 已接入}}{\# \text{当期有任务的 mMTC}}}_{y^m}$$

记录达到最大  $Q$  的分配与接入集合及其关键指标。

该方法的搜索空间规模仅为  $\mathcal{O}(\frac{50}{10} \cdot \frac{50}{5})$  量级的枚举，配以线性时间的用户评分与选择，整体复杂度低且可完全遍历，能够找到全局最优的离散解；同时满足题目给定的“资源块相邻”“编号靠前优先”等实现约束。



## 4.5 求解结果

基于附件 1 数据与上述流程,得到的最优分配与接入如下(发射功率固定为 30 dBm):

- 最优切片 RB 分配:  $R_U = 20$ ,  $R_e = 20$ ,  $R_m = 10$  (合计 50)。
- 接入选择: URLLC 接入  $\{U2, U1\}$ ; eMBB 接入  $\{e1, e2, e4, e3\}$ ; mMTC 接入  $\{m1, m2, m3, m4, m5\}$ 。
- 关键指标: mMTC 接入比例  $y^m = 0.5000$ ; URLLC QoS 合计  $\sum y^U = 1.9870$ ; eMBB QoS 合计  $\sum y^e = 3.7953$ ; 目标函数  $Q = 6.2823$ 。

说明: 所有被接入的 URLLC 与 mMTC 任务均满足各自时延 SLA; eMBB 中 e3 的瞬时速率低于 50 Mbps, 按  $r/r_e^{\text{SLA}}$  计分 (约 0.7953), 其余 eMBB 用户达到满分; 该组合在保证 URLLC 低时延与较高 eMBB 速率的同时, 实现了 mMTC 一半终端的及时接入, 从而使总体服务质量达到最大。

## 5 问题二的模型的建立和求解

### 5.1 问题二的描述与分析

问题二考虑动态环境下的多时间段资源分配场景。与问题一的静态单时刻分配不同, 问题二面临用户移动性、信道时变性以及任务队列动态变化的复杂问题。在 1000ms 的观测窗口内, 系统需要每 100ms 进行一次资源分配决策 (共 10 次), 既要处理新到达的任务, 又要考虑积压在排队队列中的历史任务。这是一个多阶段动态优化问题, 需要在时间维度上综合考虑任务到达、信道变化和排队延迟的耦合影响。

### 5.2 预备工作

为便于复现与对比, 本问采用如下统一的数据、参数与约定:

- 数据来源 (附件 2, 动态数据): 任务到达流 q2\_ 用户任务流.csv (单位: Mbit, 1ms 时间粒度)、大规模衰减 q2\_ 大规模衰减.csv (单位: dB)、小规模瑞利衰减 q2\_ 小规模瑞利衰减.csv (幅度  $|h|$ )、用户位置 q2\_ 用户位置.csv (坐标信息)。按列名一一对应同名用户, 忽略非数值列 (如 Time)。
- 决策周期: 每 100ms 进行一次资源分配决策, 共 10 个决策时刻:  $t \in \{0, 100, 200, \dots, 900\}$  ms。
- 系统与物理层参数: 单小区、无同频干扰; 发射功率  $p_{\text{tx}} = 30$  dBm; 单 RB 带宽  $b = 360$  kHz; 噪声系数  $NF = 7$  dB。白噪声按问题一相同公式计算。
- 资源占用粒度 (同表 1): URLLC/eMBB/mMTC 用户并发占用 RB 数分别为  $v_U = 10$ 、 $v_e = 5$ 、 $v_m = 2$ 。约束切片 RB 分配满足  $n_U \bmod 10 = 0$ 、 $n_e \bmod 5 = 0$ 、 $n_m \bmod 2 = 0$ , 且  $n_U + n_e + n_m = 50$ 。

- SLA 与 QoS: 各切片的 SLA 参数、QoS 函数定义与问题一完全一致。
- 任务处理机制: 每个决策周期内, 先服务队列中的历史任务 (按 FIFO 顺序), 再处理新到达任务; 任务传输可跨越多个决策周期; 超过 SLA 时延的任务立即丢弃并计入惩罚。

### 5.3 模型建立

#### 5.3.1 时变信道与传输速率模型

在动态环境中, 用户  $k$  在时刻  $t$  的接收功率需要考虑时变信道特性:

$$p_{rx,k}(t) = 10^{\frac{p_{tx} - \phi_k(t)}{10}} \cdot |h_k(t)|^2 \quad (\text{mW}) \quad (12)$$

其中,  $\phi_k(t)$  和  $h_k(t)$  分别为时刻  $t$  用户  $k$  的大规模衰减和小规模瑞利衰落系数。

相应地, 用户  $k$  在时刻  $t$  获得  $i_k(t)$  个资源块时的传输速率为:

$$r_k(t) = i_k(t) \cdot b \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{p_{rx,k}(t)}{10^{\frac{N_0(i_k(t))}{10}}} \right) \quad (\text{bps}) \quad (13)$$

#### 5.3.2 任务队列动态演化模型

定义用户  $k$  在时刻  $t$  的任务队列状态:

- $A_{k,\tau}(t)$ : 用户  $k$  在时刻  $\tau$  到达且在时刻  $t$  仍在队列中的任务数据量 (Mbit)
- $Q_k(t) = \sum_{\tau=0}^t A_{k,\tau}(t)$ : 用户  $k$  在时刻  $t$  的总排队任务量
- $W_k(t)$ : 用户  $k$  在时刻  $t$  已等待的排队时间

任务队列的动态演化遵循以下规律:

**(1) 任务到达:** 在每个 1ms 时刻  $\tau$ , 根据数据文件读取新到达任务:

$$A_{k,\tau}(\tau) = \text{TaskFlow}_k(\tau) \quad (14)$$

**(2) 任务服务:** 在决策时刻  $t$ , 若用户  $k$  被分配  $i_k(t)$  个 RB, 则在接下来的 100ms 内可传输的数据量为:

$$S_k(t) = r_k(t) \times 0.1 \times 10^{-6} \quad (\text{Mbit}) \quad (15)$$

**(3) 队列更新:** 任务按 FIFO 顺序服务, 队列更新规则为:

$$Q_k(t+100) = \max \left( 0, Q_k(t) + \sum_{\tau=t+1}^{t+100} \text{TaskFlow}_k(\tau) - S_k(t) \right) \quad (16)$$

### 5.3.3 时延计算模型

对于用户  $k$  在时刻  $\tau$  到达的任务，其总时延包含排队时延和传输时延：

(1) 排队时延：任务在时刻  $\tau$  到达，在时刻  $t_{\text{start}}$  开始服务，则排队时延为：

$$Q_{k,\tau} = t_{\text{start}} - \tau \quad (17)$$

(2) 传输时延：假设任务从时刻  $t_{\text{start}}$  开始传输，数据量为  $D_{k,\tau}$ ，则传输时延为：

$$T_{k,\tau} = \frac{D_{k,\tau} \times 10^6}{r_k(t_{\text{start}})} \quad (18)$$

(3) 总时延：

$$L_{k,\tau}^s = Q_{k,\tau} + T_{k,\tau}, \quad s \in \{U, e, m\} \quad (19)$$

### 5.3.4 动态服务质量评估函数

在多时间段场景下，各切片的 QoS 评估需要考虑所有完成任务的累积效果：

(1) URLLC 切片：对于在时间窗口  $[0, 1000]\text{ms}$  内完成的所有 URLLC 任务：

$$y_{k,\tau}^U = \begin{cases} \alpha^{L_{k,\tau}^U} & \text{若 } L_{k,\tau}^U \leq L_U^{\text{SLA}} \\ -M_U & \text{若 } L_{k,\tau}^U > L_U^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (20)$$

(2) eMBB 切片：对于在决策时刻  $t$  服务的 eMBB 用户  $k$ ：

$$y_k^e(t) = \begin{cases} 1 & \text{若 } r_k(t) \geq r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ \frac{r_k(t)}{r_e^{\text{SLA}}} & \text{若 } r_k(t) < r_e^{\text{SLA}} \text{ 且 } L_{k,\tau}^e \leq L_e^{\text{SLA}} \\ -M_e & \text{若 } L_{k,\tau}^e > L_e^{\text{SLA}} \end{cases} \quad (21)$$

(3) mMTC 切片：在每个决策时刻  $t$ ，mMTC 切片的 QoS 基于接入成功率：

$$y^m(t) = \frac{\sum_{k \in \mathcal{U}_m(t)} c'_k(t)}{\sum_{k \in \mathcal{U}_m(t)} c_k(t)} \quad (22)$$

其中， $c_k(t)$  表示用户  $k$  在时刻  $t$  是否有待服务任务， $c'_k(t)$  表示是否成功接入服务。

### 5.3.5 多时间段优化模型

基于上述分析，建立如下多时间段动态优化模型：

$$\begin{aligned}
\max_{\{n_s(t)\}_{s,t}} \quad & Q_i = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[ \sum_{k \in \mathcal{U}_U} y_k^U(t) + \sum_{k \in \mathcal{U}_e} y_k^e(t) + y^m(t) \right] \\
\text{s.t.} \quad & \begin{cases} n_U(t) + n_e(t) + n_m(t) = 50 \\ n_U(t) \bmod 10 = 0 \\ n_e(t) \bmod 5 = 0 \\ n_m(t) \bmod 2 = 0 \\ Q_k(t+100) = \max(0, Q_k(t) + \Delta A_k(t) - S_k(t)) \\ n_s(t) \geq 0 \\ \forall t \in \mathcal{T}, \quad \forall s \in \mathcal{S}, \quad \forall k, t \end{cases}
\end{aligned} \tag{23}$$

$$Q_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{10} Q_i \tag{24}$$

其中， $\mathcal{T} = \{0, 100, 200, \dots, 900\}$  为决策时刻集合， $i$  为决策次数， $n_s(t)$  为时刻  $t$  分配给切片  $s$  的 RB 数量， $Q_k(t)$  为用户  $k$  在时刻  $t$  的排队任务量， $\Delta A_k(t)$  为时间段  $[t, t+100)$  内用户  $k$  的新增任务量。

该模型的核心挑战在于：(1) 状态空间的指数级增长；(2) 任务到达的随机性与信道的时变性；(3) 排队时延与传输时延的耦合优化。需要设计高效的求解算法来处理这一复杂的多阶段随机优化问题。

## 5.4 模型求解

**Step1:**

**Step2:**

**Step3:**

## 5.5 求解结果

# 6 问题三的模型的建立和求解

## 6.1 问题三的描述与分析

## 6.2 预备工作

## 6.3 模型建立

## 6.4 模型求解

**Step1:**

**Step2:**

**Step3:**

## **6.5 求解结果**

# **7 模型的分析与检验**

## **7.1 灵敏度分析**

## **7.2 误差分析**

# **8 模型的评价**

## **8.1 模型的优点**

- 优点 1
- 优点 2
- 优点 3

## **8.2 模型的缺点**

- 缺点 1
- 缺点 2

## 附录 A 文件列表

文件名	功能描述
q1.m	问题一程序代码
q2.py	问题二程序代码
q3.c	问题三程序代码
q4.cpp	问题四程序代码

## 附录 B 代码