能量与容忍度约束下的信息年龄最优多信道调度

Xujin Zhou、Irem Koprulu、Atilla Eryilmaz

电气与计算机工程 俄亥俄州立大学美国哥伦布市{
zhou.2400@osu.edu,
irem.koprulu@gmail.com,eryilmaz.2@osu.edu}

arXiv:2301.00562v1 [cs.IT] 2 Jan 2023

摘要—**我们研究最优调度问题：源节点尝试通过共享无线开关衰落信道传输更新信息，以在能量和年龄违约容忍约束下优化其年龄性能。具体而言，我们将信息年龄优化统一建模为约束马尔可夫决策过程（CMDP），并通过求解相应的线性规划问题获得最优调度器。针对平均年龄最小化和违规率最小化这两个重要特例，我们探讨了最优单用户多信道调度器的特性。这带来了关于有限能量最优分配方式的若干关键见解：通常的基于阈值的策略并不适用，这些见解有助于指导调度器设计者。随后，我们研究多用户情形下最优调度器的稳定区域。我们还利用李雅普诺夫漂移最小化方法设计了一种在线调度器，该方法不需要了解信道统计信息。数值研究将在线调度器的稳定区域与最优调度器进行了比较，结果表明，即使在信道统计信息未知的情况下，在线调度器的表现也非常接近最优调度器。**

I. 引言

近年来，物联网（IoT）已成为下一代无线网络最重要的框架之一，这类网络需要通过超宽频谱支持大量移动设备（例如，参见 [1]）。尤其对于许多实时 IoT 应用而言，设备必须通过共享频谱发送新鲜的更新信息。为衡量数据的新鲜度，过去十年间提出了信息年龄（*AoI*）这一概念（例如，参见 [2]–[4]），其简明定义为自最近收到的状态更新信息的生成时间起所经过的时间。自信息年龄指标提出以来，各种网络场景中涌现了大量相关研究，包括无线随机接入网络（例如， [5], [6]）、内容分发网络（例如， [7], [8]）、调度（例如， [9]–[13]）、排队网络（例如， [14], [15]）以及车联网（例如， [16]）。

近年来，为了应对更广义或不同形式的信息老化，研究者提出了其他与信息年龄相关的指标，例如：非线性信息年龄（如 [4], [17]）、峰值信息年龄（如 [18]）、距上次服务时间（如 [19]）、决策时信息年龄（如[20]）等。其中，称为信息年龄违规率的指标（见 [15], [21], [22]），对于具有严格年龄截止期限约束的实时 IoT 服务尤为重要且对违反该截止期限的容忍度有限的服务（有关该指标的进一步动机，见 [23]–[24]）。

鉴于其对下一代物联网的重要意义，本文研究一般的最优多信道调度问题，在能量约束和年龄违约容忍约束下优化不同形式的信息年龄性能。我们的贡献如下：

- 我们将信息年龄优化一般性地建模为约束马尔可夫决策过程（CMDP）（见 [25]–[27]），并通过求解相关的线性规划问题，获得信息年龄最优的多信道调度器；首先研究单源场景（第 III 节），随后研究一般的多源场景（第 IV 节）。

- 对于单源多信道场景，我们针对物联网应用中两种重要的信息年龄指标，研究能量约束下最优调度器的特性：（i）最小化平均年龄；（ii）最小化年龄违规率，这是一种非凸/凹指标（第 III-C 节）。我们的研究揭示了不同能量分配结构的多种特性，以及最小化这两种指标的最优调度器所共有的单调性，这些结果有助于指导调度器设计者。

- 对于多源信息年龄最优调度问题，我们还研究了在信息年龄违规率容忍度约束下平均信息年龄最优调度器的可行域，并将其结果与针对单信道多用户场景提出的相关早期研究进行对比（见第IV-C节和第VI节）。

- 此外，我们在第V节提出了一种采用李雅普诺夫漂移最小化方法（例如， [28]）的在线调度器，该方法不需要信道统计信息，并将其性能与最优方案及早期设计进行比较，以揭示信道统计信息对可行域的影响程度（见第VI节）。

我们的工作与该领域的若干相关研究既有关联，也存在差异。许多早期研究（例如， [9]–[12], [29]）旨在最小化信息年龄，并考虑功率约束，但假设信道是可靠的；而我们研究的是衰落信道。较新的研究

（例如， [10], [30]）旨在基于最大年龄匹配来最小化信息年龄相关成本，而另一些研究（例如， [29], [31]）则提出了基于*Whittle* 指数方法的信息年龄最小化调度器。然而，据我们所知，先前研究大多假设每个源最多只能选择一个信道；这一假设对于证明其所研究问题的 *Whittle* 指数可索引性 至关重要。相比之下，我们所设定场景的一项关键特征是，随着新型无线技术的发展，每个用户都可以通过多个信道进行传输。此外，上述大多数研究都以平均信息年龄或峰值信息年龄作为目标函数，而我们考虑更一般的基于年龄的目标函数，例如，这使得目标函数可以是年龄违规率这样的非凸指标。在具有一般目标函数的多信道设置中，我们发现（参见第 III-C 节），最优解实际上可能具有非单调 特征，因此 Whittle 指数可索引性方法通常并不适用。文献 [21] 研究了容忍度约束下的多源单信道调度问题，这是我们所设定场景的一个特例。值得指出的是，这项颇有启发性的研究[21] 是促使我们开展当前工作的主要动因之一，即探索一种基于约束马尔可夫决策过程框架的不同方法，该方法能够保证最优性，并适用于具有额外能量约束的更一般多信道场景。此外，也有一些研究（例如， [32], [33]）着重于基于学习的方法，可视为与本文的研究重点互为补充。

II. 系统模型

我们考虑一个离散时间无线接入系统的运行，其中 n 个源节点共享 L 开/关衰落无线信道，在能量与违约容忍度约束下更新其接收端（例如基站）的年龄状态（见图 1）。

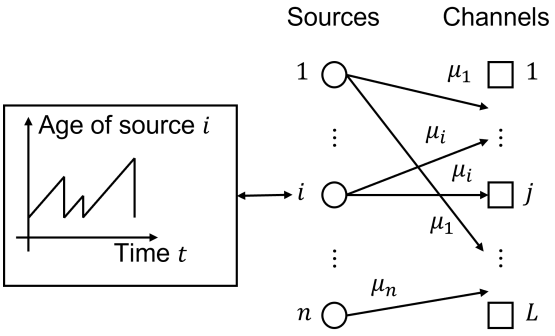

图 1. n 个信源共享 L 开关衰落信道，在能量与容忍度约束下向接收端更新其状态，以保持较低的信息年龄。

我们的目标是开发通用的求解策略，以找到最优调度器，在满足能量消耗和容忍度要求的同时，优化多种基于信息年龄的指标。本节余下部分将介绍关键术语和基本系统动态。然后，在接下来的各节中，我们将依次针对单源和多源情况，构建并求解各类信息年龄优化问题。

调度策略与年龄违规容忍度： 我们假设每个源节点 $i \in \{1, \cdots, n\}$ 在每个时隙 $t \in \{1, 2, 3, \cdots\}$开始时都会刷新其状态并生成一个新数据包。源节点一旦有机会发送，就会尝试向接收端传输其最新的数据包。每当基站成功接收到来自源节点 i的新状态时，便会保存当前状态，并丢弃此前从该节点接收到的所有数据包。因此，基站为每个源节点仅保留一个数据包，即最新的数据包。我们用 $X_i[t]$ 表示时刻 t基站存储的来自源 i 的数据包的生成时间。我们将时刻 t 源节点 i 的信息年龄 $A_i[t]$定义为自其最后一个已接收数据包生成以来经过的时间[1]：$A_i[t] \triangleq t - X_i[t]$。我们用[2] $\boldsymbol{A}[t] \triangleq (A_1[t], \cdots, A_n[t])$表示时隙 t.所有信源的信息年龄

在每个时隙开始时，集中式调度器根据所有源节点的信息年龄 $\boldsymbol{A}[t]$，决定每个源节点将使用哪些信道向基站传输。令 $u_i(\boldsymbol{A}[t])$ 表示源节点 i 在时间 t 用于传输的信道数量。每次传输尝试可能成功，也可能失败；我们将在下文的信道成功模型中进行说明。如果基站在时间 t 成功接收到源 i 的数据包，那么其在时间 $t+1$ 的信息年龄将重置为 1，否则其信息年龄将增加 1，即，

$$A_i[t+1] = \begin{cases} 1, & \text{if transmission of source } i \text{ succeeds} \\ A_i[t] + 1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

我们允许每个源 i 设定一个期望的信息年龄阈值／截止期限 τ_i。如果源 i 的信息年龄小于或等于此阈值 τ_i，则该源的信息是最新的；否则，我们称该时隙发生了年龄违规。具体而言，我们将源 i 的信息年龄违规率 定义为长期平均的时隙占比，即源的信息年龄 $A_i[t]$ 超过其阈值 τ_i 的时隙占比，即 $\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \mathbb{1}\{A_i[t] > \tau_i\}$。我们用 $\epsilon_i \in [0, 1]$ 表示源 i 的容忍度，它衡量其更新信息所允许的最大信息年龄违规率。（$\epsilon_i = 1$ 表示没有违规率约束，而 $\epsilon_i = 0$ 表示不允许发生任何截止期限违规。）当信息年龄违规率不高于容忍率时，即满足信息年龄违规容忍约束。

信道成功模型和能量约束： n源节点共享 L 无线开关衰落信道，每个信道最多只能容纳一个数据包传输。然而，即使信道上只有一次传输，也无法保证传输成功。在

[1]该指标在不同语境下也称为信息年龄 *(AoI)* 和距上次服务时间 *(TSLS)* 。在本文其余部分中，我们将交替使用 AoI 或信息年龄来指代该指标。[2]我们将始终使用粗体符号表示向量。

具体而言，源节点 i 在其分配到的每个信道[3]上传输时，信道成功概率为μ_i。

如果源 i 在一个时隙内通过其分配的信道进行的任一次传输成功，我们就称该源的更新在该时隙内成功。由于信道是碰撞信道，对于n最优调度器，我们始终有 $\sum u_i(\boldsymbol{A}[t]) \leq L$. 一旦$i=1$所有 i 对应的 $u_i(\boldsymbol{A}[t])$ 值确定，调度器就会为不同的源分配不同的信道，从而不会有两个源通过同一信道进行传输。另外需要注意的是，在所描述的信道成功模型下，当源节点 i 使用 l 个信道时，基站成功接收来自该源节点的更新的概率为 $1-(1-\mu_i)^l$.

我们假设通过一个信道进行的每次传输都会产生1单位的能量成本[4]。我们要求源 i 的总时间平均能量成本不超过给定的约束 b_i 个信道/时隙，即我们要求

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}u_i\left(\boldsymbol{A}[t]\right)\leq b_i,\quad b_i\in\mathbb{R}^+.$$

显然，通过更多信道进行传输会提高源的成功概率，但也会增加能量消耗。我们希望找到分配给各源的信道数量，使其在给定当前年龄状态以及上述能量和容忍度约束的情况下，优化期望的年龄性能。在下一节中，我们首先针对单用户，在受约束的马尔可夫决策过程（MDP）框架内研究这一问题，然后将该方法扩展到多用户场景。

III. 单用户年龄最优多信道调度

本节首先考虑单用户年龄最优多信道调度问题。这不仅让我们能够省略下标以简化符号，而且对于下一代超宽带无线通信技术也尤为重要，因为这类技术预计将支持通过多个衰落信道进行低时延接入。我们在第三节A中构建一个通用的年龄最优优化问题，该问题可用于不同场景，随后在第三节B中分析其性能。为此，在第三节C中，我们研究两个重要特殊情形下最优调度器的特征及其启示：分别是最小化平均年龄 和年龄违规率。这些研究结果将有助于指导调度器设计者。

A. 问题构建

最小化基于信息年龄的时间平均目标，同时满足平均能耗和容忍度约束的问题可以通常可表述为以下约束马尔可夫决策问题 [25]:

$$\min_{u(A)}\quad\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathbb{E}\left[\omega_0(A[t])\right] \tag{1}$$

$$\text{s.t}\ :\quad\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathbb{E}\left[u\left(A[t]\right)\right]\leq b, \tag{2}$$

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathbb{E}\left[\omega_k\left(A[t]\right)\right]\leq c_k,\ k=1,\cdots,K,$$

$$u(A[t])\in\{0,1,\cdots,L\}.$$

该优化针对由函数 $u(\cdot)$ 描述的马尔可夫策略进行，该函数将年龄等级映射为信道数量。已知此类马尔可夫策略足以实现最优运行 [25]。

时间平均 $u(\cdot)$ 的第一个约束体现了系统模型中讨论的平均能耗约束。函数 $\omega_k(\cdot)$是通用函数，用于将当前状态 $A[t]$ 映射为一个值，以衡量该信息年龄在各种指标[5] 下的代价。通过为权重函数 $\omega_0(A[t])$设置不同的映射，可以将目标函数转化为不同的常见年龄相关目标：令$\omega_0(a) = -\mathbb{1}\{a=1\}$ 可将目标函数转化为最大化平均吞吐量；令 $\omega_0(a)=a$ 可使目标函数最小化平均信息年龄；令 $\omega_0(a)=\mathbb{1}\{a\geq d\}$ 可使目标函数最小化平均信息年龄违规率。请注意，这使得目标函数可以是非凸/凹函数。

B. 性能分析

接下来，我们将通过证明该问题等价于一个线性规划（LP）问题，分析能量约束下的一般约束优化问题，并由此描述最优策略。

定理1： 通过求解以下线性规划问题，可以得到一般年龄优化问题（1）的解:

$$\begin{aligned}
\min_{y_a^l}\quad&\sum_{a=1}^{D}\sum_{l=0}^{L}y_a^l\omega_0(a)\\
\text{s.t:}\quad&\sum_{a=1}^{D}\sum_{l=0}^{L}y_a^l\cdot l\leq b,\\
&\sum_{a=1}^{D}\sum_{l=0}^{L}y_a^l\omega_k(a)\leq c_k,\ k=1,\cdots,K,\\
&0\leq y_a^l\leq 1\quad\forall 1\leq a\leq D, 0\leq l\leq L,\\
&\sum_{a=1}^{D}\sum_{l=0}^{L}y_a^l=1,\\
&\mathbf{Q}\boldsymbol{y}=\mathbf{0},
\end{aligned}$$

其中，$\boldsymbol{y}$ 是一个大小为 DL 的列向量，其分量为 $\boldsymbol{y}=(y_1^1,\ \cdots,\ y_1^L,\ \cdots,\ y_D^1,\ \cdots,\ y_D^L)^T$； D是一个

[3]我们的所有推导均可推广至源 i 与信道 j 之间的成功概率允许不同的情形，即 μ_{ij}.但此处不再讨论，因为这会增加阐述的复杂性，却不会增添实质内容。4

[4]不同信道上的能量成本均相同，但为避免符号表示过于繁琐，故省略不提。这也可以推广到非

[5]需要指出的是，也可以采用相同的方法（但符号更繁琐）求解该问题，具体做法是更一般地将 $\omega_k(A[t],\ u(A[t]))$ 定义为信息年龄和动作的函数。

系统中信息年龄状态的上界，该上界可以设得足够大，使得达到 D的概率趋于零。[6] $\mathbf{Q}\boldsymbol{y} = \mathbf{0}$ 是以下（全局平衡）方程的矩阵表示:

$$\begin{aligned}
&\sum_{l=0}^{L} y_{a+1}^l - \sum_{l=0}^{L} y_a^l (1-\mu)^l = 0 \quad \forall a = 1, \cdots, D-2, \\
&\sum_{l=0}^{L} \left(1-(1-\mu)^l\right) y_D^l - \sum_{l=0}^{L} y_{D-1}^l (1-\mu)^l = 0, \\
&-\sum_{l=0}^{L} y_1^l (1-\mu)^l + \sum_{a=2}^{D} \sum_{l=0}^{L} y_a^l \left(1-(1-\mu)^l\right) = 0.
\end{aligned}$$

如果该线性规划可行，且 $\boldsymbol{y}$ 是一个最优解，则最优策略 $u^*(a)$是一个概率策略，即当信息年龄处于状态a 时，选择 l 个信道的概率 f_a^l 为:

$$f_a^l = \begin{cases} \dfrac{y_a^l}{\sum_{l=0}^{L} y_a^l}, & \text{if} \sum_{l=0}^{L} y_a^l \neq 0 \\ \dfrac{1}{L}, & \text{if} \sum_{l} y_a^l = 0 \end{cases} \tag{3}$$

对于 $l = 0,\ 1,\ \cdots,\ L$和 $a = 1,\ 2,\ \cdots,\ D$.

证明： 如 [25], 所示，对于问题1，我们只需在马尔可夫策略上进行优化。由于该过程不受时间平移的影响，我们可以定义概率调度策略，其中 f_a^l 表示当单个源的信息年龄处于状态 a时选择l 个信道的概率。概率调度策略的归一化约束L要求 $\sum_{l=0}$ $f_a^l = 1$以及对所有 a均有 $f_a^l \geqslant 0$。

注意到，系统状态可以由以信息年龄 $A[t]$ 为状态的一维马尔可夫链完全刻画。给定当前状态信息 $A[t]$后，下一时隙的系统状态 $A[t+1]$仅取决于当前状态 $A[t]$（与更早的状态无关）和当前动作 $u[t]$。此外，目标函数和约束仅取决于当前状态和动作。因此，可以构造一个等价的MDP问题。令 $\lambda_{a_1}^{a_2}$ 表示从状态 a_1 转移到 a_2的转移概率，并将 $\bar{\mu} \triangleq 1-\mu$ 定义为信道失败的概率。于是，根据信道成功模型，

$$\lambda_{a_1}^{a_2} = \begin{cases} \sum_{l=1}^{L} f_{a_1}^l \bar{\mu}^l, & 1 \leq a_1 \leq D-1, a_2 = a_1+1 \\ \sum_{l=1}^{L} f_a^l (1-\bar{\mu}^l), & a_1 = 1, \cdots, D, a_2 = 1 \\ \sum_{l=1}^{L} f_D^l (1-\bar{\mu}^l), & a_1 = D, a_2 = D \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{4}$$

由于状态数量有限，对于每个 $a.$，都存在一个平稳分布 $\pi(a)$。令 $\mathcal{C}$ 为所有常返状态的集合，则 $\mathcal{C}$ 不可约且闭，因此 $\mathcal{C}$ 正常返。当 $a \in \mathcal{C}$ 时，平稳分布 $\pi(a)$等于长期平均值 $\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \mathbb{1}\{A[t] = a\}$，且与起始点无关。当状态 $a \notin \mathcal{C}$ 时，平稳分布和长期平均值均为零。因此，优化问题等价于以下约束马尔可夫决策过程问题:

$$\min_{f_a^l} \quad \sum_{a=1}^{D} \pi(a)\omega_0(a)$$

$$\text{s.t:} \quad \sum_{a=1}^{D} \sum_{l=0}^{L} \pi(a) f_a^l l \leq b$$

$$\sum_{a=1}^{D} \pi(a)\omega_k(a) \leq c_k,\ k = 1, \cdots, K \tag{5}$$

$$\sum_{l=0}^{L} f_a^l = 1, f_a^l \geqslant 0 \quad \forall a \leq D, l \leq L \tag{6}$$

$$H \cdot \Pi = \Pi, \quad \mathbf{1} \cdot \Pi = 1 \tag{7}$$

其中，$\Pi = [\pi(1) \cdots,\ \pi(D)]^T$是马尔可夫链的平稳分布，$H$是 $D \times D$转移矩阵，其中 $_L h_{ij} = \lambda_j^i$。定义 $y_a^l = \pi(a) f_a^l$，则 $\pi(a) = \sum y_a^l$对于 $_{l=0} a \leq D$。于是，约束5变为:

$$\sum_{a=1}^{D} \sum_{l=0}^{L} y_a^l \omega_k(a) \leq c_k,\ k = 1, \cdots, K.$$

方程7中的归一化约束要求D $_L\sum\sum y_a^l = 1$。将 y_a^l 代入约束马尔可夫决策过程问题，并在$_{a=1}$ $_{l=0}$简化后，我们证明了线性规划问题的等价性。得到解 $\boldsymbol{y}$后，对于 $\pi(a) \neq 0$, 令 $f_a^l = y_a^l / \pi(a)$。具有 $\pi(a) = 0$, 的状态 a 是暂态状态，这些状态下的动作不会影响平均结果。对于这些状态，我们采用方程3中的简单策略，此时约束7也得到满足。

■

C. 年龄最优调度器的特征与见解

我们的通用框架涵盖了针对不同信息年龄和年龄违约指标，采用不同 $\omega_k(\cdot)$ 函数时的一系列目标与约束。本节聚焦于两个可在该框架中表述的重要问题：平均年龄最小化 和年龄违规率最小化。这项工作将帮助我们刻画相应的最优调度器，并深入了解其特性。

使平均信息年龄最小化的最优调度器： 当我们在 (1) 中设置$\omega_0(a) = a$ 时，优化问题的目标函数变为最小化平均信息年龄

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \mathbb{E}\{A[t]\} = \sum_{a=1}^{D} a\, \pi(a).$$

[6]实践中，适度的 D就足以避免线性规划的维度过大。此外，当目标函数和约束仅与年龄违规有关时，设置 $D = d+1$就足够了。参考文献见 III-C 和 IV-C。

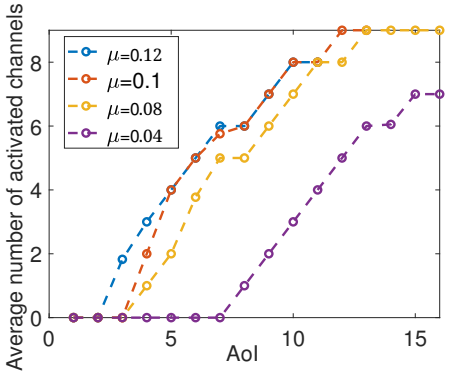

图2. 当 $b=2$ 时，为使平均信息年龄最小，应选择的最优信道数。

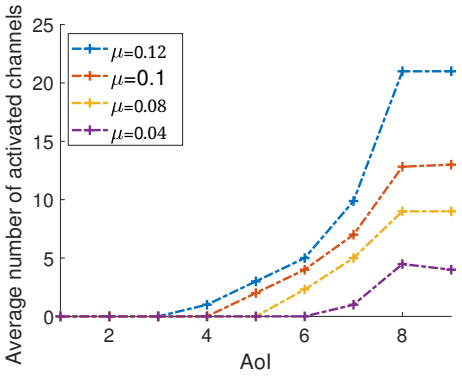

图3. 当 $b=2$ 且 $\tau=8$时，为最小化信息年龄违规率而选择的最优信道数量。

对于这一问题构建，我们保留能量约束 $\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathrm{E}\left[u\left(A[t]\right)\right]\leq b$; 但不需要额外的年龄约束。因此，对于所有 k 和 a，$\omega_k(a)=0$ 和 $c_k=0$。

图2展示了在能量约束 $b=2$ 下，不同信道成功概率 μ 时，平均年龄最优调度器激活的信道平均数量随年龄状态的变化情况。我们将在本节末尾与下一个关注的调度器进行比较，并进一步讨论这些结果。

使年龄违规率最小的最优调度器： 令$\omega_0(a)=\mathbb{1}\{a>\tau\}$ n (1)，目标函数即变为最小化平均年龄违规率

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathbb{E}\{\mathbb{1}\{A[t]>\tau\}\}=\sum_{a=\tau+1}^{D}\pi(a).$$

与之前一样，我们保留能量约束，但不需要额外的年龄约束。因此，对于所有 k 和 a，$\omega_k(a)=0$ and $c_k=0$。

这样，问题就变为在能量约束下最小化年龄违规率。与前一个问题不同，我们的目标不是最小化平均年龄，而是避免年龄违规事件。在这种情况下，我们可以将所有满足 $a>\tau$ 的状态视为状态 $\tau+1$，因此只需设置$D=\tau+1$.

图3展示了在不同信道成功概率 μ 、年龄阈值 $\tau=8$ 以及相同能量约束 $b=2$下，违规率最优调度器的激活信道平均数量随年龄状态的变化。接下来，我们比较这两种调度器的最优策略，并讨论从研究中获得的见解。

关于这两种最优调度器的见解： 我们首先指出两种情形下最优策略的相似之处：

(i) 每个最优策略都是至多两个确定性策略的概率组合，这与 [25]所示的结果一致：随机化次数至多等于约束数量。(ii) 对于每种情形，随着信道成功概率增加，相应的最优策略开始在更低的信息年龄等级进行传输，并且在相同的信息年龄等级下也倾向于选择更多信道。这一特点有些违背直觉，表明当信道更加可靠时，最优策略应当更加积极，并且更早采取行动。

(iii) 在每种情形下，当信息年龄相对较小时，最优策略都是不进行调度。这一点很有意义，因为我们可以看到，当年龄相对较小时，成功传输对目标函数的改善不如年龄较大时明显。因此，最优调度器会将能量留给年龄状态较大的情况。

不过，我们也注意到这两组调度器之间存在差异：

(i) 在平均年龄最小化问题中，最优策略的激活函数 $u^*(\cdot)$ 随年龄状态增大而单调不减。另一方面，在年龄违规率最小化问题中，这种单调性并不成立。这种差异源于后一种情形下年龄违规率函数的非凸性质。在 [25] 及许多相关研究（例如 [9], [34]）中，作者利用最优调度策略的单调结构和阈值特性求解约束马尔可夫决策过程，并揭示相关见解；此外，还利用目标函数的凸性或凹性简化算法。然而，在我们的通用处理方法中，年龄违规率等目标函数不一定是凸函数或凹函数，因此无法采用相同的方法。因此，为了得到最优策略，尽管计算复杂度可能更高，我们仍采用普遍适用的线性规划方法，以深入了解最优解。

(ii) 在平均年龄最小化问题中，当信息年龄超过激活信道数量开始大于零的年龄等级后，最优策略的激活信道数量会随信息年龄呈次线性／类似凹函数的增长。相比之下，年龄违规率最小化调度器的激活信道数量会随信息年龄增长，呈超线性／类似凸函数的增长，直至截止期限级别τ。这种差异可以解释如下：在年龄

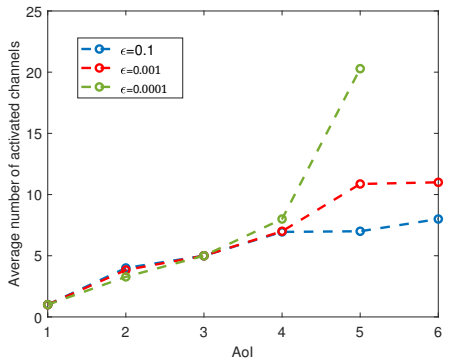

图4. 在违约率约束下，使平均年龄最小化的信道最优选择数量，其中 $\tau = 5$, $b = 3, \mu = 0.2$

违规率最小化问题中，只有当信息年龄超过年龄截止期限时才会产生惩罚，因此，随着信息年龄从下方接近阈值，最优调度器会采取更积极的策略。相比之下，在平均年龄最小化问题中，激活信道数量的增加更为渐进，以平衡两个方面：在信息年龄很低时不必要地消耗能量，以及等待过久才消耗可用能量（这会导致成本无限增长）。

关于最优调度器分配函数结构的这些见解，可以指导设计者在无法通过线性规划策略求解（因为缺乏先验统计信息和计算资源）时，将搜索范围限制在足够灵活且易于处理的函数类别中。

为更清楚地展示年龄违规率约束如何影响调度器的形状，在图4中，我们将目标函数设为 $\omega_0(a) = a$，能量约束设为 $b = 3$，信道成功概率设为 μ =0.2。此外，我们设定 $\omega_1(a) = \mathbb{1}\{a > \tau\}$，其中年龄截止期限 $\tau = 5$. 。我们设定 $c_1 = \epsilon$，并展示不同 ϵ水平下，激活信道数量如何随年龄状态变化。通过加入并收紧容差约束，我们可以看到其形状从凹（或次线性）转变为凸（或超线性）。因此，随着年龄增加，最优调度器会变得更加激进。这揭示了平均年龄与年龄违规率之间的权衡：降低年龄违规率需要采用日益激进的分配函数。

IV. 多用户场景下的年龄最优多信道调度

本节中，我们将框架扩展到一般的多用户 多信道信息年龄最优调度问题。与之前一样，该表述使我们能够根据目标函数和约束的选择，涵盖一系列场景。为此，我们研究最优策略的可行性和稳定区域，并将其与相关文献中针对多用户场景提出的其他方案进行比较。

A. 问题构建

多用户情形下优化问题的构建与单用户情形（1）类似:

$$
\begin{aligned}
\min_{\boldsymbol{u}(\boldsymbol{A})} \quad & \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} \mathbb{E}\left[\omega_0(\boldsymbol{A}[t])\right] \\
\text{s.t} \ : \quad & \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} \mathbb{E}\left[u_i\left(\boldsymbol{A}[t]\right)\right] \le b_i,\ i = 1, \cdots, n, \\
& \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} \mathbb{E}\left[\omega_k\left(\boldsymbol{A}[t]\right)\right] \le c_k,\ k = 1, \cdots, K, \\
& u_i(\boldsymbol{A}[t]) \in \{0, 1, \cdots, L\},\ i = 1, \cdots, n, \\
& \sum_{i=1}^{n} u_i(\boldsymbol{A}[t]) \le L
\end{aligned}
\tag{8}
$$

其中，$=(u_1(\boldsymbol{A}) \cdots,\ u_n(\boldsymbol{A}))$ 表示状态 $\boldsymbol{A}$ 下的调度策略，$u_i(\boldsymbol{A})$ 表示分配给源 i 的信道数量。权重函数 $\omega_k(\cdot)$ $k = 0$, 1, $\cdots$, K，将年龄状态映射为成本值，以体现年龄相关目标和约束。源节点可以具有异构能量约束 b_i，这意味着节点 i 平均每个时隙最多可以通过 b_i 个信道进行传输。

B. 性能分析

接下来，我们将证明多用户问题构建等价于一个线性规划（LP）问题，与单用户情形下第三节B中的做法相同。为使符号表示更紧凑，我们用 $\boldsymbol{a} \triangleq (a_1,\ a_2,\ \cdots,\ a_n)$ 和 $\boldsymbol{l} \triangleq (l_1,\ l_2,\ \cdots,\ l_n)$ 分别表示 $\boldsymbol{A}[t]$ 和 $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{A})$ 的值。我们进一步定义集合 $\mathcal{A} \triangleq \{1, \cdots, D\}^n$、 $\mathcal{L} \triangleq_n \{1, \cdots, L\}^n$, and $\mathcal{L}_1 \triangleq \{\boldsymbol{l} : l_\Sigma \le L\}$ where $l_\Sigma \triangleq \sum_{i=1} l_i$.

Th定理：多用户信息年龄优化问题（8）的解可以通过求解以下线性规划问题获得:

$$
\begin{aligned}
\min_{y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}} \quad & \sum_{\boldsymbol{a}\in\mathcal{A}} \sum_{\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}_1} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}} \omega_0(\boldsymbol{a}) \\
\text{s.t:} \quad & \sum_{\boldsymbol{a}\in\mathcal{A}} \sum_{\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}_1} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}} l_i \le b_i, i = 1, 2, \cdots, n \\
& 0 \le y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}} \le 1 \quad \forall \boldsymbol{l} \in \mathcal{L}, \boldsymbol{a} \in \mathcal{A} \\
& y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}} = 0 \quad \forall \boldsymbol{l} \in \mathcal{L}/\mathcal{L}_1 \\
& \sum_{\boldsymbol{a}\in\mathcal{A}} \sum_{\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}_1} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}} = 1 \\
& \sum_{\boldsymbol{a}\in\mathcal{A}} \sum_{\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}_1} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}} \omega_k(\boldsymbol{a}) \le c_k, k = 1, \cdots, K \\
& \mathbf{Q}\boldsymbol{y} = \mathbf{0}
\end{aligned}
\tag{9}
$$

其中 $\boldsymbol{y}$ 是一个以 $y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}$ 为分量的列向量，$\mathbf{Q}$ 表示与信息年龄动态相关的转移矩阵

其形式与单用户情形完全相同（参见定理1）。

如果该线性规划可行，且 $\boldsymbol{y}$ 是一个最优解，那么最优策略 $u_i^*(\boldsymbol{a})$ 是概率策略，即当信息年龄处于状态 $\boldsymbol{a}$ 时，为源节点$i=1$、$\cdots$、n选择 $\boldsymbol{l}$ 个信道的概率 $f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}$ 为:

$$f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}=\begin{cases}\frac{y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}}{\sum_{\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}}, & \text{if} \sum_{\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}\neq 0\\ \frac{1}{|\mathcal{L}|}, & \text{if} \sum_{\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}= 0\end{cases}$$

对于 $\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}$ 和 $\boldsymbol{a}\in\mathcal{A}$.

证明： 我们用 $f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}$ 表示当信息年龄处于状态 $\boldsymbol{a}$时，为源节点 (1、$\cdots$、n) 选择$\boldsymbol{l}=(l_1、\cdots、l_n)$ 个信道的概率。因此 $\sum f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}=1$，且对所有 $\boldsymbol{a}$都有 $f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}\geq 0$。$\iota_{\in\mathcal{L}}$与定理1类似，对于采用$n$–维马尔可夫链的多用户调度，约束马尔可夫决策过程问题通常可表述为:

$$\begin{aligned}\min\quad & \sum_{\boldsymbol{a}}\pi(\boldsymbol{a})\omega_0(\boldsymbol{a})\\ \text{s.t:}\quad & \sum_{\boldsymbol{a}}\sum_{\boldsymbol{l}}\pi(\boldsymbol{a})f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}l_i\leq b_i, i=1,2,\cdots,n \qquad (10)\\ & f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}=0\quad \forall \boldsymbol{l}\in\mathcal{L}/\mathcal{L}_1\\ & \sum_{\boldsymbol{a}}\pi(\boldsymbol{a})\omega_k(\boldsymbol{a})\leq c_k\quad k=1,\cdots,K\\ & H\cdot\Pi=\Pi,\quad \mathbf{1}\cdot\Pi=1, \qquad (11)\end{aligned}$$

其中，索引的取值范围为 $\boldsymbol{a}\in\mathcal{A}$ 和 $\boldsymbol{l}\in\mathcal{L}$；$\pi(\boldsymbol{a})$ 是状态 $\boldsymbol{a}$的平稳分布；$\omega_k(\boldsymbol{a})$ $k=0$，1，$\cdots$，K，是与年龄相关的目标函数和成本函数。约束10将节点 i 的平均能耗限制为 b_i，其中 $i=1$、$\cdots$、n。在约束11中，Π 是一个 $D^n\times 1$ 平稳分布向量，其元素为 $\pi(\boldsymbol{a})$ $\boldsymbol{a}\in\mathcal{A}$ 。[7] H 表示$D^n\times D^n$ 转移矩阵，其中 $h_{i,\ j}$ 等于从 Π 中的 j^{th} 状态转移到 Π中的 i^{th} 状态的概率；与公式4类似，可利用年龄演化和信道成功概率方程对其进行详细说明。同样，我们将定义

$$y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}\triangleq y_{a_1,a_2,\cdots,a_n}^{l_1,l_2,\cdots,l_n}=\pi(\boldsymbol{a})f_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}.$$

通过改变权重函数的取值，我们可以得到不同的信息年龄相关指标，但它们都关于$y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}$呈线性关系。然后，

$$\pi(\boldsymbol{a})=\sum_{\boldsymbol{l}} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}},$$

归一化约束要求:

$$\sum_{\boldsymbol{a}}\sum_{\boldsymbol{l}} y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}=1.$$

将$y_{\boldsymbol{a}}^{\boldsymbol{l}}$ 代入约束马尔可夫决策过程问题，我们可以得到与线性规划问题等价的问题。 ■

[7]平稳分布的存在性可由定理1中的同一证明得出。

C. 具有违约容忍度约束的多用户调度问题的特征与见解

由于一般的信息年龄最优问题不存在闭式解，我们将研究带有年龄违约容忍约束的多用户单信道调度可行性问题，并将其作为一种常见设置来考察其性能和特性。

具体而言，我们将最优调度器的稳定区域与先前针对特殊的多用户单信道设置 [21]开发的算法进行比较。为此，我们设定 $L=1$ 和 $b_i>1$。因此，所有能量约束均不活跃，我们可以像 [21]中那样，专注于容忍度约束。由于我们只关心可行性，因此对所有 $\boldsymbol{a}$，设定 $\omega_0(\boldsymbol{a})=1$ 。为表示年龄违约率约束，我们定义权重函数

$$\omega_k(\boldsymbol{a})=\begin{cases}0, & \text{if } a_k\leq\tau_k\\ 1, & \text{if } a_k\geq\tau_k+1,\end{cases}$$

并令 $c_k=\epsilon_k$for $k=1,\ 2,\ \cdots,\ K=n,$ 表示 k^{th} 源的异质性年龄违规容忍水平。

那么，约束 $\sum\pi(\boldsymbol{a})\omega_k(\boldsymbol{a})\leq c_k$ 变为$_{\boldsymbol{a}}$

$$\pi_k(\tau_k+1)\leq\epsilon_k\quad\forall k=1,\cdots,K=n,$$

其中，$\pi_k(\tau_k+1)$ 表示在平稳分布下，源 k 违反其年龄阈值τ_k的总概率。由于

$$\pi_k(\tau_k+1)=\sum_{j_1,\ldots,j_{k-1},j_{k+1},\ldots,j_n}\pi(j_1,\ldots j_{k-1},\tau_k+1,j_{k+1}\ldots,j_n),$$

线性规划问题中的约束 (9) 变为

$$\sum_{j_1,\ldots,j_{k-1},j_{k+1},\ldots,j_n}\ \sum_{\boldsymbol{l}} y_{j_1,\ldots,j_{k-1},\tau_k+1,j_{k+1},\ldots,j_n}^{\boldsymbol{l}}\leq\epsilon_k.$$

为了便于直观展示，我们研究有$n=2$ 个用户的情形。在这种情况下，线性规划问题表述为:

$$\begin{aligned}\min\quad & 1\\ \text{s.t:}\quad & 0\leq y_{a_1,a_2}^{l_1,l_2}\leq 1\quad\forall l_1,l_2=0,1\\ & y_{a_1,a_2}^{l_1,l_2}=0\quad\forall l_1+l_2>1\\ & \sum_j\sum_{l_1,l_2} y_{\tau_1+1,j}^{l_1,l_2}\leq\epsilon_1\\ & \sum_j\sum_{l_1,l_2} y_{j,\tau_2+1}^{l_1,l_2}\leq\epsilon_2\end{aligned}$$

不同参数下的数值结果如图 5 和图 6 所示，其中蓝色实线右上方的区域是最优调度器的稳定区域。这些典型示例表明，即使在仅有两个用户的小规模设置下，最优调度器与先前提出的设计之间仍存在不可忽视的性能差距。

这促使我们寻找能够更接近最优调度器性能的新算法，即使事先未知信道统计信息也是如此。我们将在下一节介绍在线调度算法，并在此之后进一步讨论这些数值结果。

在继续之前，我们注意到，出于可视化目的，上述数值结果针对的是具有容忍度约束的双用户单信道调度问题；而我们的方法适用于具有违约容忍度和能量约束的更一般的多用户多信道调度问题。尽管与利用特定问题特殊结构的其他方案相比，求解线性规划的计算复杂度可能相对较高，但如上所述，由于容忍度约束具有非凸性和非凹性，最优策略的单调结构和阈值结构并不成立。Whittle 指数方法（例如在 [29], [31] 中使用的方法）计算复杂度相对较低，但也不适用于我们的多信道调度问题，因为在我们的设定中，每个用户都可以同时通过多个信道传输，因此 Whittle 指数可索引性条件并不成立。采用普遍适用的基于线性规划的方法，可以揭示关键见解，帮助设计人员为未来的多信道无线技术开发高效的调度器。

V. 信道统计信息未知时的在线调度

到目前为止，我们在求解优化问题时都假设已知信道成功概率。本节中，我们将使用 Lyapunov 漂移加惩罚方法（见 [28]），在仅知道当前信道状态、但不知道信道统计信息的情形下，求解多用户在线年龄相关优化问题。

我们将所有能量和信息年龄相关约束转化为虚拟队列，并将目标函数视为参数为 M 的惩罚项。对于源 i 的能量约束，定义相应的虚拟队列为$Q_{1,\,i}[t]$，其初始值为 $Q_{1,\,i}[0]=0$，更新方程为：

$$Q_{1,i}[t+1]=\left(Q_{1,i}[t]+u_i\left(\boldsymbol{A}[t]\right)-b_i\right)^+.$$

类似地，对于信息年龄相关约束，我们定义虚拟队列 $Q_{2,\,k}[t]$，其初始值为 $Q_{2,\,k}[0]=0$，更新方程为：

$$Q_{2,k}[t+1]=\left(Q_{2,k}[t]+\omega_k\left(\boldsymbol{A}[t]\right)-c_k\right)^+.$$

一般而言，如果虚拟队列 $Q_{1,\,i}[t]$ 稳定，则其输入速率 $\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathrm{E}\left[u_i\left(\boldsymbol{A}[t]\right)\right]$ 将小于其输出率b_i [28]，从而相应的约束得以满足。将时刻 t两个虚拟队列及信息年龄的状态定义为 $\boldsymbol{Q}[t]=(Q_{1,\,1}[t],\,\cdots,\,Q_{1,\,n}[t],\,Q_{2,\,1}[t],\,\cdots,\,Q_{2,\,K}[t],\,\boldsymbol{A}[t])$。基于这些虚拟队列，我们将定义二次 Lyapunov 函数如下：

$$V[t]=\frac{1}{2}(\sum_{i=1}^{n}Q_{1,i}^2[t]+\sum_{k=1}^{K}Q_{2,k}^2[t]),$$

并提出一种在线算法，以贪心方式最小化 Lyapunov 漂移加惩罚函数的上界

$\Delta V(\mathbf{q})+M\mathrm{E}[\omega_0(\boldsymbol{a})]$，给定当前状态 $\boldsymbol{q}=(q_{1,\,1},\,\cdots,\,q_{1,\,n},\,q_{2,\,1},\,\cdots,\,q_{2,\,K},\,\boldsymbol{a})$，其中：

$$\Delta V(\mathbf{q})=\mathbb{E}[V[t]-V[t-1]|\boldsymbol{Q}[t]=\boldsymbol{q}].$$

我们以容忍度约束下的多用户单信道调度问题为具体示例来展示设计。由于不存在能量约束，因此无需设置虚拟队列集合 $\{Q_{1,i}[t]\}_i$。为了表示源$k=1,\cdots,n$的 k^{th} 违约率约束，我们令 $\omega_k(\boldsymbol{A}[t])=\mathbb{1}\left(A_k[t+1]>\tau_k\right)$ and$c_k=\epsilon_k$。然后，虚拟队列 $Q_{2,k}[t]$（初始值为 $Q_{2,\,k}[t]=0$）按如下方式更新：

$$Q_{2,k}[t+1]=\left(Q_{2,k}[t]+\mathbb{1}\left(A_k[t+1]>\tau_k\right)-\epsilon_k\right)^+,$$

其中 $A_k[t+1]=1+A_k[t](1-S_k[t]U_k[t])$； $S_k[t]$ 表示信道成功； $U_k[t]$ 表示源是否被调度进行传输。如果虚拟队列 $Q_{2,k}[t]$ 稳定，则其输入速率（阈值违约率 $\pi_k(\tau_k+1)=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\mathbb{1}\left(A_k[t+1]>\tau_k\right),$）将低于其输出率 ϵ_k.

条件李雅普诺夫漂移可按如下方式进行界定：

$$\begin{aligned}&\Delta V(\mathbf{q})\\\leq&\sum_{k=1}^{n}q_{2,k}\mathbb{E}\left[R_k-\epsilon_k|q_{2,k}\right]+\sum_{k=1}^{n}\mathbb{E}\left[\frac{\left(R_k-\epsilon_k\right)^2}{2}|q_{2,k}\right],\end{aligned}$$

其中 $R_k\triangleq\mathbb{1}\{1+A_k\left(1-S_kC_k\right)>\tau_k\}$. 在每个时隙$t$，给定队列长度 $\boldsymbol{Q}[t-1]$ 和 $\boldsymbol{A}[t-1]$，我们可以设计如下在线算法，贪心地最小化李雅普诺夫漂移的上界，因为此处没有目标函数或惩罚项。

算法1启发式调度策略

1：输入当前系统状态： $A_i[t]$、$Q_i[t]$。2：定义可用的传输决策集：仅有一个 $U_i[t]$可以为 1。3：选择 $\boldsymbol{U}[t]$，使上述不等式中李雅普诺夫漂移函数的上界最小化。4：更新队列长度，供下一时隙使用。

同样，为便于直观展示，我们仅呈现年龄容忍约束下双用户在线调度问题的仿真结果，但该在线算法可直接应用于任意数量的信源。不同参数下的仿真结果如图5和图6所示，其中虚线点划紫线右上方的区域是信道条件为 μ_i 时在线调度器的稳定区域。下一节将进行比较。

VI. 年龄违约约束下稳定区域的比较

在本节中，我们比较了三种不同算法在满足年龄违规容忍度约束的双用户单信道调度可行性问题上的性能。这些算法分别是：第四节中的最优调度器；此前的

为单信道多用户场景开发的设计 [21]；以及第五节中的在线调度器，该调度器不需要信道统计信息。

我们首先关注两个源节点对称的情况。在图5中，两个源节点具有相同的信息年龄阈值 $\tau_1 = \tau_2 = 2$ ，以及相同的信道成功概率 $\mu_1 = \mu_2 = 0.85$。蓝线右上方的区域是第IV-C节中最优调度算法的稳定区域。黄线和橙线对应于 [21]中的算法，分别表示速率向量具有或不具有某种特殊性质（称为递减速率向量）的两种情况。紫线标示出信道条件 μ_1， μ_2 未知时在线算法的稳定区域。根据这些仿真结果，可以得出以下几点观察：

(i) 由于期限阈值和信道条件齐次，所有稳定区域均呈对称分布，这符合预期。(ii) 最优策略（蓝线）的表现优于其他策略；当各容忍度之间差异很大时，其性能优势尤为显著。(iii) 在线算法（紫线）的表现与最优策略非常接近，仅在某些极端容忍度范围内出现轻微的性能损失。(iv) 与 [21]中的算法（黄线和红线）相比，当某个容忍度速率小于相应的信道丢失概率时，在线算法表现尤为出色，这可从紫线与黄线之间的垂直间距看出。(v) 在线策略和最优策略关于容忍度连续变化，因此无需检查容忍度速率向量是否满足某些特定性质，例如 [21]中的递减速率条件。

为了比较非齐次场景下各算法的优缺点，在图6中，我们考虑两个年龄阈值不对称的源节点$\tau_1 = 2$， $\tau_2 = 4$ ，且它们具有相同的信道成功概率$\mu_1 = \mu_2 = 0.85$。由于违规率取决于年龄阈值和信道成功概率，因此即使 $\mu_1 = \mu_2$. ，这仍然是一个非齐次场景。在这张图中，与前一张图相比，我们还可以看到，当其中一个

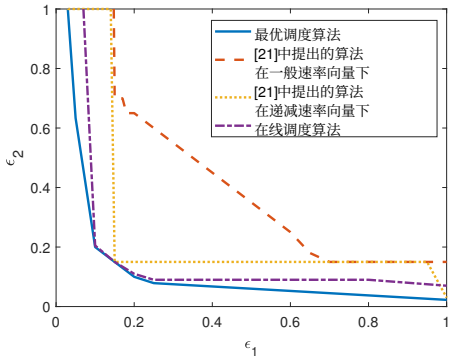

图5。 对称情况下稳定区域（右上方）的比较 ic 情况。

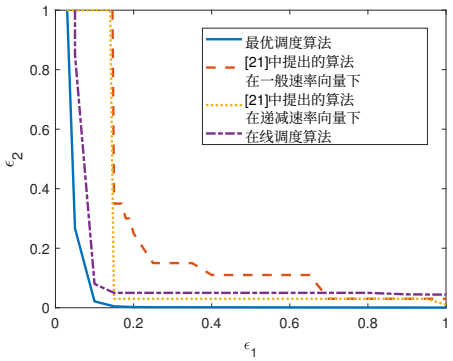

图6。非对称情况下稳定区域（右上方）的比较。

容忍度约束非常严格时，即当 ϵ_1 趋近于1时，可行容忍度 ϵ_2 方面，其他算法的用户2取值始终远离零，而最优算法的取值则逐渐趋近于零。

这些仿真结果也代表了其他情形，普遍观察到我们的在线调度器的表现接近最优调度器，且通常显著优于与之最相关的最先进算法 [21]，尽管该算法在运行时并不知道其他设计所假设的信道统计信息。

VII. 结论

本文研究了多源多信道通信中的一类一般性年龄最优调度问题。我们将具有灵活权重函数 ω_k 的通用年龄优化问题，在能量与容忍度约束下建模为约束马尔可夫决策过程。借助约束马尔可夫决策过程的强大理论，我们将该通用问题与相应线性规划问题的解联系起来，从而求解了这一通常不适用基于阈值的结构策略的问题。随后，我们聚焦于单源多信道场景这一特殊情形，研究了平均年龄和违规率最小化这两个重要特殊情形下最优调度器的特性。

我们的研究揭示了若干有趣的见解，包括：与平均年龄最小化调度器采用随信息年龄增长而次线性增长的能量分配策略不同，年龄违规率最小化调度器采用随信息年龄增长而呈超线性增长趋势的能量分配策略。这些见解可以为物联网网络设计者提供有益指导，帮助他们根据应用对年龄性能的不同敏感度制定有效的更新策略。

我们还研究了带有年龄违规率约束的多源单信道调度问题这一特殊情形，以考察最优调度器与最密切相关的先前研究各自的可行域。最后，我们开发了一种无需信道统计信息的在线调度器，并通过仿真将其性能与最优调度器进行比较。结果表明，尽管缺乏信道统计信息，该在线调度器的表现仍与最优调度器十分接近。

参考文献

[1] F. C. Commission 等，“FCC通过规则以推动下一代无线技术的发展”，美国联邦通信委员会，2016年7月，第14卷。[2] S. Kaul、M. Gruteser、V. Rai 和 J. Kenney，“将车联网中的信息年龄降至最低”，载于《2011年第8届IEEE通信学会传感器、网状及自组织通信网络年会》，IEEE，2011年，第350–358页。[3] S. Kaul、R. Yates 和 M. Gruteser，“实时状态：应该多久更新一次？”，载于《2012年IEEE INFOCOM会议论文集》，IEEE，2012年。[4] A. Kosta、N. Pappas、V. Angelakis 等，“信息年龄：一种新概念、度量指标与工具”，《网络基础与趋势》，第12卷，第3期，第162–259页，2017年。[5] H. Chen、Y. Gu 和 S.-C. Liew，“面向大规模物联网的信息年龄依赖型随机接入”，载于INFOCOM研讨会，IEEE，2020年，第930–935页。[6] X. Zhou、I. Koprulu、A. Eryilmaz 和 M. J. Neely，“面向动态需求的高效分布式MAC：基于拥塞和信息年龄的设计”，IEEE/ACM网络汇刊，第1–14页，2022年。[7] B. Abolhassani、J. Tadrous、A. Eryilmaz 和 E. Yeh，“无线边缘动态内容的新鲜缓存”，IEEE/ACM网络汇刊，2022年。[8] R. Liu、E. Yeh 和 A. Eryilmaz，“面向预测不确定情形下低接入时延服务的主动缓存”，ACM计算系统测量与分析论文集，第3卷，第1期，2019年。[9] H. Tang、J. Wang、L. Song 和 J. Song，“带功率约束的多状态时变网络中使信息年龄最小化的调度”，载于《2019年第57届阿勒顿通信、控制与计算会议（Allerton）》，IEEE，2019年，第1198–1205页。[10] B. Sombabu 和 S. Moharir，“面向异构信源的信息年龄感知调度”，载于《第24届移动计算与网络年度国际会议论文集》，2018年，第696–698页。[11] M. Li、C. Chen、H. Wu、X. Guan 和 X. Shen，“面向边缘辅助工业无线网络的信息年龄感知调度”，IEEE工业信息学汇刊，第17卷，5571，2020年8月，第5562页，第8期。[12] P. R. Jhunjhunwala 和 S. Moharir，“信息年龄感知调度”，载于SPCOM，IEEE，2018年。[13] D. Han、W. Chen 和 Y. Fang，“面向对时延敏感的移动边缘计算、具有功率约束的信道与队列联合感知调度”，IEEE无线通信汇刊，第19卷，第6期，第3938–3951页，2020年。[14] L. Hu、Z. Chen、Y. Dong、Y. Jia、L. Liang 和 M. Wang，“物联网中的状态更新：信息年龄违规概率与最优更新率”，IEEE物联网期刊，第8卷，第14期，2021年。[15] N. Pappas 和 M. Kountouris，“双用户多址信道中的时延违规概率与信息年龄的相互影响”，载于第20届SPAWC国际研讨会，IEEE，2019年，第1–5页。[16] M. Chen、Y. Xiao、Q. Li 和 K.-c. Chen，“利用深度Q学习使雾计算支持的车联网中的信息年龄最小化”，载于ICC 2020——2020年IEEE国际通信会议（ICC），IEEE，2020年，第1–6页。[17] Y. Sun 和 B. Cyr，“数据新鲜度优化的采样：非线性信息年龄函数”，《通信与网络期刊》，第21卷，第3期，第204–219页，2019年。[18] M. Emara、H. Elsawy 和 G. Bauch，“上行物联网中峰值信息年龄的时空模型：时间触发流量与事件触发流量”，IEEE物联网期刊，第7卷，第8期，第6762–6777页，2020年。[19] B. Li、A. Eryilmaz 和 R. Srikant，“在无线网络中模拟轮询机制”，载于《第18届ACM移动自组织网络与计算国际研讨会论文集》，2017年，第1–10页。[20] Y. Dong、Z. Chen、S. Liu、P. Fan 和 K. B. Letaief，“物联网中使决策时信息年龄最小化的调度：随机还是确定性？”，IEEE物联网期刊，第7卷，第2期，2019年。[21] C. Li、Q. Liu、S. Li、Y. Chen、Y. T. Hou 和 W. Lou，“关于具有信息年龄违规容限的调度”，载于IEEE INFOCOM，2021年，第1–9页。[22] M. Song、H. H. Yang、H. Shan、J. Lee、H. Lin 和 T. Q. Quek，“无线网络中的信息年龄违规概率分析”，载于第17届ISWCS，IEEE，2021年。[23] R. Devassy、G. Durisi、G. C. Ferrante、O. Simeone 和 E. Uysal-Biyikoglu，“短分组传输中的时延与峰值年龄违规概率”，载于ISIT，IEEE，2018年，第2471–2475页。

[24] L. Hu、Z. Chen、Y. Dong、Y. Jia、M. Wang、L. Liang 和 C. Chen，《物联网系统中的最优状态更新：从信息年龄违反概率的角度分析》，载于 *VTC2020-Fall*。IEEE，2020 年，第 1–5 页。[25] E. Altman，《受约束马尔可夫决策过程：随机建模》。Routledge，1999 年。[26] D. A. Dolgov 和 E. H. Durfee，《具有多重奖励、成本和折扣因子的受约束 MDP 的平稳确定性策略》，载于 *IJCAI*，第 19 卷。Citeseer，2005 年，第 1326–1331 页。[27] H. Satija、P. Amortila 和 J. Pineau，《通过后向价值函数求解受约束马尔可夫决策过程》，载于国际机器学习会议。PMLR，2020 年，第 8502–8511 页。[28] M. J. Neely，《随机网络优化及其在通信和排队系统中的应用》，通信网络综合讲座，第 3 卷，第 1 期，第 1–211 页，2010 年。[29] Y.-P. Hsu，《信息年龄：随机到达调度的 Whittle 指数》，载于 *ISIT*。IEEE，2018 年，第 2634–2638 页。[30] V. Tripathi 和 S. Moharir，《多源系统中的信息年龄》，载于 *GLOBECOM*。IEEE，2017 年，第 1–6 页。[31] Y. Zou、K. T. Kim、X. Lin 和 M. Chiang，《异构多信道系统中信息年龄的最小化：一种新的部分指数方法》，载于 第二十二届移动网络与移动计算理论、算法基础及协议设计国际研讨会论文集，2021 年，第 11–20 页。[32] A. Elgabli、H. Khan、M. Krouka 和 M. Bennis，《用于优化超可靠低时延网络中信息年龄的强化学习调度算法》，载于 *ISCC*。IEEE，2019 年，第 1–6 页。[33] M. Li、C. Chen、C. Hua 和 X. Guan，《面向信息年龄感知工业无线网络的基于学习的自主调度》，*IEEE*物联网期刊，第 7 卷，第 9 期，第 9175–9188 页，2020 年。[34] H. Tang、J. Wang、L. Song 和 J. Song，《功率约束下信息年龄的最小化：多状态时变信道中的多用户机会式调度》，*IEEE*通信领域精选期刊，第 38 卷，第 5 期，第 854–868 页，2020 年。