arXiv:2303.00507v1 [cs.IT] 1 Mar 2023

无线能量传输系统中的动作年龄

Ali Nikkhah*、Anthony Ephremides†和Nikolaos Pappas*
*瑞典林雪平市林雪平大学计算机与信息科学系····
†美国马里兰州大学公园市马里兰大学电气与计算机工程系{ali.nikkhah、nikolaos.pappas}@liu.se、etony@umd.edu

摘要——本文研究一种与语义感知目标导向通信相关的模型。具体而言，外部过程的观测通过状态更新传输至电池供电接收器。接收器根据这些更新获知过程的状态，并在能量充足时利用这些信息执行操作以实现目标。我们考虑一种无线能量传输模型，其中目的端从专用能量发射器以及偶尔从数据发射器接收能量。我们分析信息年龄（AoI）。此外，我们提出一种新指标，即动作年龄（AoA），适用于接收器利用状态更新及时采取行动的情形。我们对动作年龄进行解析刻画，并表明它是比信息年龄更通用的指标。我们针对这两种指标提出优化问题，并通过数值计算评估分析结果。

I. 引言

在当前的通信系统中，信息的重要性和有效性一直被忽视。语义感知的目标导向通信 [1]–[3] 致力于将信息语义融入从信息生成到利用的整个信息链中。信息年龄（AoI） [4], [5] 是衡量信息及时性的指标，而及时性是状态更新系统中的一种语义属性。然而，AoI无法捕捉信息利用对基于数据的动作及时性的影响。在本文中，我们定义了一种新的指标，即动作年龄（AoA），用于捕捉远程目的端基于源端接收的数据执行最近一次动作以来经过的时间。为了执行动作，目的端需要能量，而该能量由能量发射设备以无线方式提供。

射频无线能量传输（WPT） [6] 对于配备能量采集（EH）设备的网络十分重要，因为这些设备无法连接到电网，且难以到达以更换电池。已有多项研究考察了能量采集系统中的信息及时性。在绝大多数此类研究中，能量消耗与信息传输相关，而不是与利用信息执行动作相关。能量采集系统有两种类型：第一种是将来自环境的能量采集建模为外部随机过程。更具体地说，在假设时间连续的研究中，能量采集过程通过泊松过程 [7]–[12]建模。在离散时间模型中，能量采集通过伯努利过程 [13]–[17]建模。

本研究部分获得瑞典研究理事会 (VR)、ELLIIT、Zenith 和欧盟（ETHER，101096526）的资助。

第二类能量收集是通过无线能量传输采集能量。文献 [18]–[22] 在多种设置下研究了无线能量传输，并采用了不同的优化工具，例如马尔可夫决策过程框架和强化学习。不过，上述论文虽然考虑了利用采集能量传输信息，却没有考虑如何根据接收到的信息执行动作，以及执行该动作所需的能量。

在本研究中，电池供电接收器利用接收到的状态更新来了解远程过程的状态并执行操作。接收更新不消耗能量，但执行操作会消耗能量。系统中有一个专用节点用于传输无线电力，还有一个节点用于监测外部过程，并按照按需生成策略向接收器传输状态更新。这两个节点共用同一无线信道，因此功率传输会干扰数据传输。我们的模型属于同时无线信息与能量传输（SWIPT） [23]。

本文的贡献如下：

- 我们考虑一种与语义感知目标导向通信相关的模型，其中设备会生成状态更新，向电池供电的远程目的端通报外部过程的情况。目的端可以利用这些更新采取行动以实现目标。我们考虑一种同时无线信息与能量传输模型，在该模型中，目的端从专用发射器获取能量，偶尔也从数据发射器获取能量。
- 我们分析接收器处的信息年龄（AoI）。此外，我们对电池的演化进行解析刻画，并利用这些结果刻画本文所定义的动作年龄（AoA）。正如我们所示，AoA 是比 AoI 更通用的指标；当接收器使用状态更新及时采取行动时，AoA 就显得尤为重要，而这对于以目标为导向的通信至关重要。
- 我们考虑两个优化问题，即最小化平均信息年龄（AoI）和最小化平均AoA。
- 我们对分析结果进行数值评估。

II. 系统模型

我们考虑一个由两个发射设备组成的系统，如图 1 所示；其中，第一个设备以数据包的形式向接收器传输状态更新，而第二个设备专门用于

功率传输。这些设备通过随机接入共享同一无线信道。接收器在接收到数据包时执行一次操作，前提是其电池中以能量包形式存储的能量可用。发射器为接收器提供执行操作所需的数据和能量。因此，接收器侧采用同时无线信息与能量传输（SWIPT），由能量采集（EH）和信息解码（ID）单元组成。如图 1 所示，参数 ρ^2表示功率分配比。更具体地说，ρ^2 和 $1-\rho^2$ 分别是分配并导向能量采集（EH）和信息解码电路（ID circuits）的功率分数。时间是离散的，并被划分为时隙 t，每个时隙的长度为一个时间单位。第一个发射器观测一个随机过程，并以概率（w.p.）q_1 在一个时隙内采样和传输一次状态更新。该状态更新将向接收器告知远程源的状态，随后，如果能量充足，接收器将利用该状态更新执行操作。

如下所述，接收器可以从两个发射机处收集能量。第二发射机以概率 q_2 在一个时隙内传输无线电力。第一发射机在传输数据时，也只能在第二发射机进行传输时协助传输能量。能量传输成功时，一个能量包会存入电池。稍后将介绍更多细节。我们考虑有限容量电池和无限容量电池两种情况。

在一个时隙结束时，接收器可以使用电池中的一个能量包，并利用同一时隙内接收到的数据包来执行操作。如果没有接收到数据，或能量不足，接收器就无法执行该操作。因此，一个时隙内是否执行操作取决于以下两种情况：i）电池非空，且成功接收到数据；ii）电池为空，但在该时隙内成功接收到能量包和数据包。

A. 物理层模型

我们将 $\mathcal{D}$ 表示一个时隙中成功传输数据包的事件，其发生概率为

$$P_{\mathcal{D}} = q_1 q_2 P_{d12} + q_1 \bar{q}_2 P_{d1}, \tag{1}$$

其中，P_{d1} 表示仅第一个发射机尝试发送时数据包的成功概率；P_{d12}表示两个发射机同时发送时的成功概率。相关表达式见第 II-B 节。我们

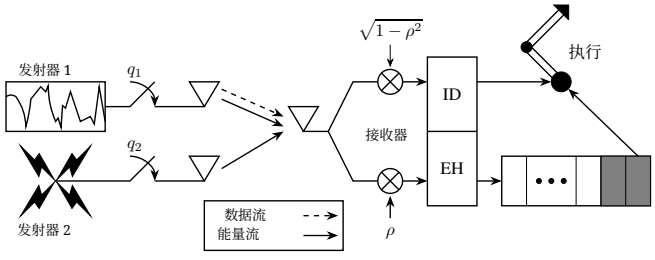

图 1. 所考虑的系统模型。

假设数据包若未能在一个时隙内成功发送，发射机便会将其丢弃。在本研究中，我们不要求接收器与发射机之间存在反馈信道。

我们用 $\mathcal{E}$ 表示一个时隙内能量数据包成功传输的事件，其发生概率为

$$P_{\mathcal{E}} = q_1 q_2 P_{e12} + \bar{q}_1 q_2 P_{e2}, \tag{2}$$

其中，P_{e12}、P_{e2} 分别表示两个发射机同时传输以及仅第二发射机传输时能量数据包成功传输的概率。表达式见第 II-B 节。

四种可能的联合结果的概率为

$$P_{\mathcal{D},\mathcal{E}} = q_1 q_2 P_{d12} P_{e12}, \tag{3}$$

$$P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}} = q_1 q_2 P_{d12} \bar{P}_{e21} + q_1 \bar{q}_2 P_{d1}, \tag{4}$$

$$P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}} = q_1 q_2 \bar{P}_{d12} P_{e12} + \bar{q}_1 q_2 P_{e2}, \tag{5}$$

$$P_{\bar{\mathcal{D}},\bar{\mathcal{E}}} = \bar{q}_1 \bar{q}_2 + q_1 \bar{q}_2 \bar{P}_{d1} + \bar{q}_1 q_2 \bar{P}_{e2} + q_1 q_2 \bar{P}_{d12} \bar{P}_{e12}. \tag{6}$$

Note that $P_{\mathcal{D}} = P_{\mathcal{D},\mathcal{E}} + P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}$ and $P_{\mathcal{E}} = P_{\mathcal{D},\mathcal{E}} + P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}$.

B. 数据与能量传输的成功概率

这里，我们进一步说明如何得到前述表达式中使用的成功概率。假设第 j 个发射机的发射功率表示为 $P_{tx,j}$，$j \in \{1,2\}$。因此，$P_{rx,j} = g_j A_j$ 是第 j 个发射机的接收功率，其中 $g_j = P_{tx,j} d_j^{-\alpha_j}$，$d_j$ 是发射机 j 与接收器之间的距离，α_j 是从第 j 个发射机到接收器的路径损耗指数。A_j 表示第 j 个发射机链路的小尺度衰落；本文假设该衰落为瑞利衰落。

当数据传输的信干噪比（SINR）高于阈值时，我们认为数据传输成功，即 $SINR \geq \gamma_d$。此外，当接收器处的采集能量高于阈值时，我们认为能量包传输成功，即 $E \geq \gamma_e$。数据包和能量包成功传输的概率可表示如下。

1）两个发射机均发送（$0 \leq \rho \leq 1$）：当 $SINR_{d12} = \frac{P_{rx,1}}{P_{rx,2} + \frac{P_N}{1-\rho^2}} \geq \gamma_d$ 时，数据传输成功，~~且其发生概~~率为 w.p.

$$P_{d12} = \exp\left(-\frac{\gamma_d P_N}{(1-\rho^2)\upsilon_1 g_1}\right)\left(1+\gamma_d \frac{\upsilon_2 g_2}{\upsilon_1 g_1}\right)^{-1}. \tag{7}$$

这可以通过 [24, 定理 1], 将噪声功率除以 $1-\rho^2$ 得到。能量数据包成功传输的条件是 $E_{e12} = \rho^2(P_{rx,1} + P_{rx,2}) \geq \gamma_e$，其概率为 w.p.

$$P_{e12} = 1 - \frac{g_2\upsilon_2(\exp(-\frac{\gamma_e}{\rho^2 g_2 \upsilon_2}) - 1) + g_1\upsilon_1(1 - \exp(-\frac{\gamma_e}{\rho^2 g_1 \upsilon_1}))}{g_1\upsilon_1 - g_2\upsilon_2}. \tag{8}$$

由于篇幅限制，证明略去。

2）仅第一个发射机发送（$\rho = 0$）：在这种情况下，成功数据传输的概率为 $P_{d1} = \exp\left(-\frac{\gamma_d P_N}{\upsilon_1 g_1}\right)$。

3) 仅第二发射机进行传输（$\rho = 1$）：能量传输成功的概率为$P_{e2} = \exp(-\frac{\gamma_e}{g_2 \upsilon_2})$，将$g_1 = 0$ 和 $\rho = 1$代入式 (8) 后即可得到。

III. 分析结果

本节将分析电池、信息年龄（AoI）以及所提出的动作年龄（AoA）指标的演变。

A. 信息年龄（AoI）

数据包的接收与能量可用性无关。这里简要讨论信息年龄指标。我们采用按需生成策略，因此，在时隙 $t+1$，如果成功接收到数据，则信息年龄 $I(t+1)$ 会降至 1；否则，信息年龄 $I(t+1)$ 会增加 1。图2中的竖线描绘了信息年龄的一条样本路径。信息年龄的演变可概括为

$$I(t+1)=\begin{cases}1 & \text{w.p. } P_{\mathcal{D}},\\ I(t)+1 & \text{w.p. } 1-P_{\mathcal{D}}.\end{cases} \tag{9}$$

信息年龄可建模为离散时间马尔可夫链（DTMC） [25], , 平均信息年龄为 $\bar{I}=\frac{1}{P_{\mathcal{D}}}$。请注意，我们也可以像 [25] 中那样求得其平稳分布。受篇幅限制，此处省略详细内容。

B. 电池的演变

在继续分析动作年龄之前，我们需要先给出一些关于电池的分析结果。我们考虑两种情况：有限容量电池和无限容量电池。将时隙 t 的电池状态记为 $B(t)$，那么对于有限容量电池（m 表示电池容量）和无限容量电池这两种情况，分别有 $B(t)=\{0,1,\ldots,m\}$ 和 $B(t)=\{0,1,\ldots,\infty\}$。电池的演变可描述如下。如果 $B(t)=0$，则

$$B(t+1)=\begin{cases}0 & \text{w.p. } P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}+P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}+P_{\bar{\mathcal{D}},\bar{\mathcal{E}}},\\ 1 & \text{w.p. } P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}.\end{cases} \tag{10}$$

在有限情形下，若 $1\le B(t)\le m-1$；在无限情形下，若 $B(t)\ge 1$，则有

$$B(t+1)=\begin{cases}B(t)-1 & \text{w.p. } P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}},\\ B(t) & \text{w.p. } P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}+P_{\bar{\mathcal{D}},\bar{\mathcal{E}}},\\ B(t)+1 & \text{w.p. } P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}.\end{cases} \tag{11}$$

若 $B(t)=m$，则对于有限容量电池，有

$$B(t+1)=\begin{cases}m-1 & \text{w.p. } P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}},\\ m & \text{w.p. } P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}+P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}+P_{\bar{\mathcal{D}},\bar{\mathcal{E}}}.\end{cases} \tag{12}$$

两种情况下，电池容量的变化都可以用离散时间马尔可夫链（DTMC）建模。由于篇幅所限，这里省略转移概率，但可通过前述表达式求得。其稳态分布表示为π，而 π_k 是电池中存有 k 个能量包的概率。电池为空的概率 $\Pr(B=0)$ 等于 π_0，我们将 $\bar{\pi}_0$ 记为电池非空的概率。为简化记号，将电池非空这一事件记为 $\mathcal{B}$。上述概率的表达式如下所示。

无限容量电池和有限容量电池分别可以建模为 Geo/Geo/1 队列和 Geo/Geo/1/B 队列[26, 第 3.4.2 节和第 3.4.3] 节。在 [26], 中，服务利用率定义为一次到达且没有离开的概率与一次离开且没有到达的概率之比。可以看出，前者的概率为 $P_{\bar{\mathcal{D}},\,\mathcal{E}}$，后者的概率为 $P_{\mathcal{D},\,\bar{\mathcal{E}}}$。因此，对于无限容量的情况，电池为空的概率 $\Pr(B=0)=1-\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\,\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\,\bar{\mathcal{E}}}}$，而电池非空的概率 $\Pr(B\neq 0)=\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\,\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\,\bar{\mathcal{E}}}}$。请注意，对于无限容量电池，这些关系在稳定性条件 $P_{\bar{\mathcal{D}},\,\mathcal{E}}<P_{\mathcal{D},\,\bar{\mathcal{E}}}$成立时有效。当 $P_{\bar{\mathcal{D}},\,\mathcal{E}}\ge P_{\mathcal{D},\,\bar{\mathcal{E}}}$时，电池永远不会耗尽，这等同于始终连接到电网系统。因此，我们有

$$\pi_0^i=\begin{cases}0 & \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\ge 1,\\ 1-\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}} & \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}<1,\end{cases}\quad \bar{\pi}_0^i=\begin{cases}1 & \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\ge 1,\\ \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}} & \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}<1.\end{cases} \tag{13}$$

对于有限容量电池，电池为空和非空的概率分别为

$$\pi_0^f=\frac{1-\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}}{1-\left(\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\right)^{m+1}},\quad \bar{\pi}_0^f=\frac{\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}-\left(\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\right)^{m+1}}{1-\left(\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\right)^{m+1}}. \tag{14}$$

可以看出，当 $\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\,\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\,\bar{\mathcal{E}}}}<1$时，(14) 转化为 (13)，其中 $m\to\infty$。我们使用上标 i 和 f，分别区分无限容量电池和有限容量电池。

C. 执行年龄（AoA）

本节首先定义并分析一种新指标；当使用状态更新及时执行操作时，该指标便与之相关。执行年龄（AoA），$A(t)=t-a(t)$，是自上一次执行操作以来经过的时间，其中 $a(t)$ 表示上一次执行操作的时间，并假设 $A(0)=1$。图2展示了 AoA 的一条样本路径。竖线所围成的面积表示信息年龄，横线所围成的面积表示执行年龄，因此网格区域是二者的重叠部分。我们注意到，在 $t=2$ 和 $t=5$ 时，成功传输了一个数据包，信息年龄重置为 1。然而，在 $t=2$ 时，能量传输失败且电池为空，因此执行年龄继续增长。在 $t=5$ 时，能量传输成功或电池非空，因此执行年龄重置为 1。

在一个时隙 $t+1$、$A(t+1)=1$ 时刻 t 发生了以下两种情况之一。第一种情况是，成功传输了数据，即 $\mathcal{D}$，且电池非空，即 $\mathcal{B}$，因此可以为一次执行提供能量（$\mathcal{D}$、$\mathcal{B}$），其发生概率为 $P_{\mathcal{D}}\bar{\pi}_0^b$。第二种情况是，如果电池¯为空，即 $\mathcal{B}$，那么我们需要（$\mathcal{D}$、$\mathcal{E}$），这意味着能量传输和数据传输同时成功。其发生概率为 $P_{\mathcal{D},\,\mathcal{E}}\pi_0^b$。否则，$A(t+1)=A(t)+1$。动作年龄的演化可概括为

$$A(t+1)=\begin{cases}1 & \text{w.p. } P_{\mathcal{D}}\bar{\pi}_0^b+P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}\pi_0^b,\\ A(t)+1 & \text{w.p. } 1-(P_{\mathcal{D}}\bar{\pi}_0^b+P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}\pi_0^b).\end{cases} \tag{15}$$

其演变过程与式（9）类似，只是采用$P_{\mathcal{D}}\bar{\pi}_0^b+P_{\mathcal{D},\,\mathcal{E}}\pi_0^b$而非 $P_{\mathcal{D}}$。因此，我们有

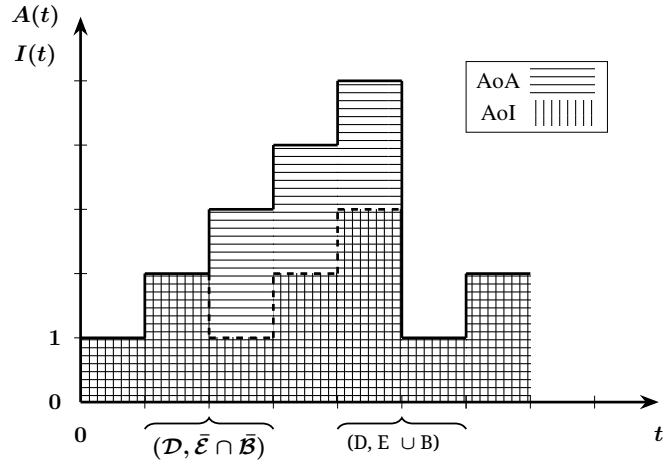

图2. 动作年龄和信息年龄指标的演变。

$$\bar{A} = \frac{1}{P_{\mathcal{D}}\bar{\pi}_0^b + P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}\pi_0^b}. \tag{16}$$

对于无限容量电池，通过将式（13）中的 π_0^b 和 $\bar{\pi}_0^b$ 进行替换,) 我们得到

$$\bar{A} = \begin{cases} \bar{A}_1 = \frac{1}{P_{\mathcal{D}}} & \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}} \geq 1, \\ \bar{A}_2 = \frac{1}{P_{\mathcal{D}}\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}} + P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}\left(1 - \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\right)} & \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}} < 1. \end{cases} \tag{17}$$

对于有限容量电池，同理可得

$$\bar{A} = \frac{1 - \left(\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\right)^{m+1}}{P_{\mathcal{D}}\left[\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}} - \left(\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\right)^{m+1}\right] + P_{\mathcal{D},\mathcal{E}}\left(1 - \frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}}\right)}. \tag{18}$$

注意，当 $\frac{P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}}}{P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}} \to 1$ 时，(18) 转换为 (17)，$m \to \infty$

我们也可以得到动作年龄的平稳分布，但由于篇幅有限，此处省略。

注释1：当系统不受能量限制时，如式（17）所示，平均AoA会退化为平均信息年龄。这是因为始终有可用能量来执行动作，因此AoA仅取决于数据到达，与信息年龄相同。当涉及执行时，这一指标是信息年龄更一般的形式，能够捕捉语义属性，因此与目标导向的语义感知通信相关。

IV. 优化

本节考虑两个优化问题。具体而言，我们通过优化传输变量 q_1 和 q_2，分别最小化平均信息年龄和平均AoA。

A. 平均信息年龄的优化

信息年龄不受电池状态影响，因此对有限容量电池和无限容量电池的分析相同。目标函数 $\bar{I}(q_1, q_2) = \frac{1}{P_{\mathcal{D}}} = \bar{A}_1$ 关于 q_1 和 q_2 的梯度为

$$\nabla \bar{I}(q_1, q_2) = \Bigg[-\frac{P_{d1}(1-q_2) + P_{d12}q_2}{(P_{d1}q_1(1-q_2) + P_{d12}q_1q_2)^2}, \frac{q_1(P_{d1} - P_{d12})}{(P_{d1}q_1(1-q_2) + P_{d12}q_1q_2)^2} \Bigg]. \tag{19}$$

鉴于 $0 \leq q_1, q_2 \leq 1$，我们发现第一项始终为负。此外，由于 $P_{d1} \geq P_{d12}$，第二项始终为正。因此，通过 $[q_1^*, q_2^*] = [1, 0]$ 可实现最小平均信息年龄。

且最优值为

$$\bar{I}^* = \frac{1}{P_{d1}}. \tag{20}$$

注释2：由于信息年龄不取决于能量，要使平均信息年龄最小化，我们需要关闭专用于功率传输的发射机，以消除干扰。然而，在平均AoA受约束的平均信息年龄最小化约束优化问题中，情况并非如此。受篇幅限制，我们将此留待期刊版本讨论。

B. 平均AoA优化

在本节中，我们考虑电池容量无限的情况，目标函数为 (17)。对于系统不受能量限制的情形，即 (17) 中的第一种情况，由于 $\bar{A}_1 = I$，第 IV-A 节中的分析仍然成立。此处我们考虑该 $\bar{A}_2$。我们有

$$\nabla \bar{A}_2(q_1, q_2) = \Bigg[\frac{P_{e2} - P_{e12}}{((q_1-1)P_{e2} - q_1P_{e12})^2 q_2}, \frac{1}{((q_1-1)P_{e2} - q_1P_{e12})q_2^2} \Bigg]. \tag{21}$$

第一个元素的符号取决于 $P_{e2} - P_{e12}$，而第二个元素始终为负。

两个区域的交集 $\bar{A}_1$ 和 $\bar{A}_2$ 需要求解 $P_{\bar{\mathcal{D}},\mathcal{E}} = P_{\mathcal{D},\bar{\mathcal{E}}}$。然后我们得到

$$q_1P_{d1} - q_2P_{e2} = q_1q_2(P_{d1} - P_{d12} + P_{e12} - P_{e2}). \tag{22}$$

我们求出 q_1（或 q_2），然后将其代入 $\bar{A}_1$（或 $\bar{A}_2$），得到交线。临界点为

$$q_1 = \frac{P_{e2}(P_{e2} - P_{e12}) - \sqrt{(P_{d1} - P_{d12})P_{e2}^2(P_{e2} - P_{e12})}}{(P_{e12} - P_{e2})(P_{d1} - P_{d12} + P_{e12} - P_{e2})} = \theta_1, \tag{23}$$

and

$$q_2 = \frac{P_{d1}(P_{e12}P_{e2} - P_{e2}^2 + \sqrt{(P_{d1} - P_{d12})P_{e2}^2(P_{e2} - P_{e12})})}{(P_{d1} - P_{d12} + P_{e12} - P_{e2})\sqrt{(P_{d1} - P_{d12})(P_{e2} - P_{e12})P_{e2}^2}} = \theta_2. \tag{24}$$

此外，这两个区域的交集与 $q_1 = 1$ 的边界相交于

$$q_2 = \frac{P_{d1}}{P_{d1} + P_{e12} - P_{d12}} = \delta_2, \tag{25}$$

并与 $q_2 = 1$ 的边界相交于

$$q_1 = \frac{P_{e2}}{P_{e2} + P_{d12} - P_{e12}} = \delta_1. \tag{26}$$

比较式 (19) 和 (21)，若 $P_{e12} > P_{e2}$，则梯度 $\bar{A}_1$ 和 $\bar{A}_2$ 的前 $\bar{}$ 个元素具有相同的

¯符号，因此，随着 q_1 增大， A 的值将单调减小。注意到，当 $P_{e12} > P_{e2}$ 时，式 (23) 和 (24) 将变为复数，由此可确认这一点。因此， $q_1^* = 1$。随后，可通过式 (25) 计算 q_2 。若 $P_{e12} \geq P_{d12}$，则 $\delta_2 \geq 1$，因此 $[q_1^*, q_2^*] = [1, 1]$。若 $P_{e12} < P_{d12}$，则 $[q_1^*, q_2^*] = [1, \delta_2]$。

若 $P_{e12} < P_{e2}$，则 (23) 和 (24) 将具有有理值。因此，若 $\theta_1, \theta_2 \leq 1$，则有 $[q_1^*, q_2^*] = [\theta_1, \theta_2]$。否则，最小值将出现在 $q_1 = 1$ 或 $q_2 = 1$ 的边界上。根据 (25) 和 (26)，可以看出，若 $P_{e12} < P_{d12}$，则 $[q_1^*, q_2^*] = [\delta_1, 1]$；若 $P_{e12} > P_{d12}$，则 $[q_1^*, q_2^*] = [1, \delta_2]$；若 $P_{e12} = P_{d12}$，则 $[q_1^*, q_2^*] = [1, 1]$。

因此，使平均AoA 最小的 $[q_1^*, q_2^*]$ 为

$$\begin{cases} [1,1] & P_{e12} > P_{e2}, P_{d12} \geq P_{e12} \\ [\delta_1, 1] & P_{e12} < P_{e2} \\ [1, \delta_2] & P_{e12} < P_{e2} \ \{\theta_1 > 1, \theta_2 < 1\} \cup \{\theta_1 > 1, \theta_2 > 1\} \ P_{d12} < P_{e12} \\ [1,1] & P_{e12} < P_{e12} < P_{e2} \ \{\theta_1 > 1, \theta_2 > 1\} \end{cases} \begin{cases} [1,1] & P_{e12} > P_{e2}, P_{d12} < P_{e12} \\ [\theta_1, \theta_2] & P_{e12} < P_{e2} \ \{\theta_1 < 1, \theta_2 < 1\}, \\ \{\theta_1 < 1, \theta_2 > 1\} \cup \{\theta_1 > 1, \theta_2 > 1\}, & P_{d12} > P_{e12}, \\ \{\theta_1 < 1, \theta_2 > 1\} \cup \{\theta_1 > 1, \theta_2 < 1\} & P_{d12} < P_{e12} \\ & P_{d12} = P_{e12}. \end{cases} \tag{27}$$

¯最小平均AoA， A^*，为

$$\bar{I} \begin{cases} \frac{1}{P_{e12}} & P_{e12} > P_{e2}, \ P_{d12} \geq P_{e12}, \\ \theta_1 \ \theta_2 & P_{e12} < P_{e2} \\ \\ \\ \end{cases} \begin{cases} \frac{P_{d1} - P_{d12} + P_{e12}}{P_{d1} P_{e12}} & P_{e12} > P_{e2} \ P_{d12} < P_{e12} \\ \{\theta_1 < 1, \theta_2 < 1\}, & P_{d12} > P_{e12}, \\ \{\theta_1 < 1, \theta_2 > 1\} \cup \{\theta_1 > 1, \theta_2 > 1\}, & P_{d12} > P_{e12}, \\ \frac{P_{d1} - P_{d12} + P_{e12}}{P_{d1} P_{e12}} & P_{e12} < P_{e2} \ \{\theta_1 > 1, \theta_2 < 1\} \cup \{\theta_1 > 1, \theta_2 > 1\} \ P_{d12} < P_{e12} \\ \frac{1}{P_{e12}} = \frac{1}{P_{d12}} & P_{e12} < P_{e2} \ \{\theta_1 > 1, \theta_2 > 1\} \ P_{d12} = P_{e12}. \end{cases} \tag{28}$$

V. 数值结果

本节对前文给出的分析结果进行数值评估。我们考虑两种不同的设置。第一种设置的参数为：$P_{tx,\ 1} = 10$毫瓦，$P_{tx,\ 2} = 1$瓦， $P_N = -50$分贝毫瓦， $\gamma_d = \gamma_e = -10$分贝， $d_1 = 1$米，$d_2 = 2$米， $\alpha_1 = \alpha_2 = 4$、 $\upsilon_1 = \upsilon_2 = 1$和 $\rho = 0.99$。对于第二种设置，我们只改变 $d_2 = 1.5$米的值。成功概率列于表 I 中。

在第一种/第二种设置中，当两个发射器均处于活动状态时，接收到数据包的可能性高于/低于接收到能量包的可能性。请注意，对于较大的 ρ值， $P_{e12} \geq P_{e2}$ 是可行的。这是因为通过功率分配，我们还可以利用来自第一个发射器的能量。在图中，我们用数据提示标出了最优点。此外，有限能量状态区域以黑色边框标示。

图3和图4分别展示了第一种和第二种设置下，当无限容量电池对应于 q_1 和 q_2时的平均AoA。最小点及其数值验证了式（27）和（28）中的解析结论。图3对应第一种设置，我们看到最小点为

表 I 数据与能量传输的成功概率。

	P_{d1}	P_{d12}	P_{e2}	P_{e12}
设置 1	1	0.62	0.20	0.23
设置 2	1	0.34	0.60	0.63

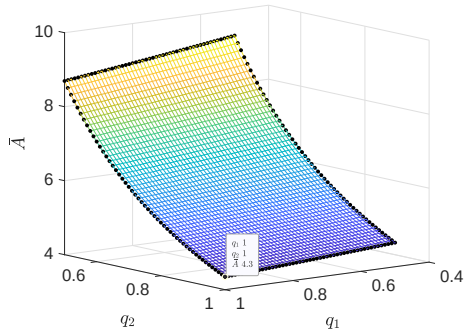

图 3. 第一种设置下无限容量电池的平均AoA。最小 $\bar{A}^* = 4.3$ 由 $q_1^* = 1$ 和 $q_2^* = 1$ 实现。

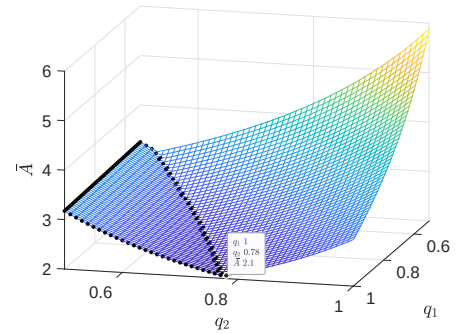

图 4. 第二种设置下无限容量电池的平均AoA。最小 $\bar{A}^* = 2.1$ 由 $q_1^* = 1$ 和 $q_2^* = 0.78$ 实现。

当 $q_1^* = q_2^* = 1$时，这意味着同时激活两个发射器是最优的。

图 4 对应第二种设置，此时干扰会显著降低数据传输的成功概率。我们有 $q_1^* = 1$ 和 $q_2^* = 0.78$，这是意料之中的，因为我们需要允许一段静默期，以免发射功率的设备降低数据节点的传输性能。我们不能将 q_2 降低太多，否则可能会收到数据，却没有足够的能量来执行相关操作。

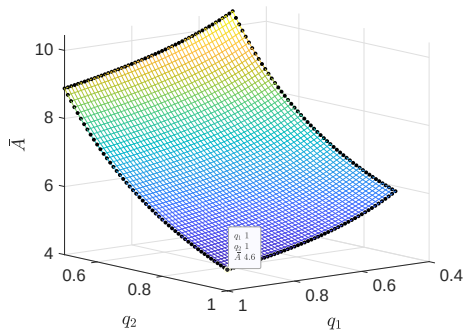

图 5. 第一种设置下，容量为 $m = 1$ 的有限容量电池的平均AoA。最小的 $\bar{A}^* = 4.6$ 由 $q_1^* = q_2^* = 1$ 实现。

在图5和图6中，我们分别考虑第一种和第二种设置下电池容量为 $m = 1$ 的情况。请注意，有限容量电池情况下的最小值

通过穷举搜索获得。比较与第一种设置相关的图5和图3，最优点 $[q_1^*, q_2^*]$ 没有差异。从设计角度来看，该设置只需使用小容量电池即可实现最优运行。

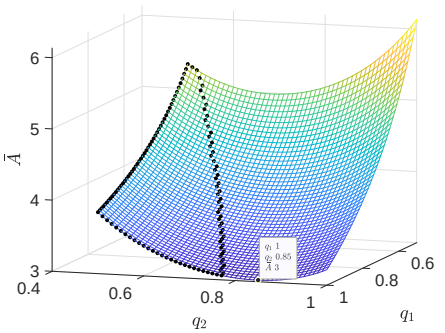

图 6. 与第二种设置相关的电池（容量为 $m = 1$）的平均AoA。 $\bar{A}^* = 3$ 的最小值由 $q_1^* = 1$ 和 $q_2^* = 0.85$实现。

然而，对比与第二种设置相关的图 6 和图 4，我们发现，电池容量越小，能量供给就越关键。这是因为当两个发射机都处于活动状态时，能量包成功传输的概率高于数据包；同时，由于容量较低，电池无法将这些能量包储存起来。因此，电池可能经常处于空电状态，许多动作不得不消耗刚刚到达的能量包来执行。这也会影响最小平均AoA。

随着电池容量增大， q_2^* 会减小，因为能量包可以储存起来以供日后使用。从渐近意义上看，最优点趋向于能量受限区域的边界。

VI. 结论

在本研究中，我们定义了一种名为动作年龄（AoA）的新指标。与信息年龄（AoI）相比，该指标适用范围更广，并且与目标导向的语义感知通信相关。此外，它还将通信与控制系统及多种应用联系起来。我们在这样一个系统中研究了 AoA：发射机监测一个过程，并向接收器发送状态更新。接收器由电池供电，通过专用于无线能量传输的辅助发射机充电，并根据收到的更新执行动作。此外，我们研究了两个优化问题，揭示了 AoA 与 AoI 之间的差异。本研究为进一步探索更一般且重要的问题开辟了方向，例如将所提出的指标纳入实际系统、刻画其分布，以及研究动态优化。

参考文献

[1] M. Kountouris 和 N. Pappas，《面向网络化智能系统的语义赋能通信》，IEEE通信杂志，第59卷，2021年第6期。[2] D. Gunduz、Z. Qin、I. E. Aguerri、H. S. Dhillon、Z. Yang、A. Yener、K. K. Wong 和 C.-B. Chae，《超越比特传输：上下文、语义与面向任务的通信》，arXiv:2207.09353，2022年。

[3] P. Popovski、F. Chiariotti、K. Huang、A. E. Kalør、M. Kountouris、N. Pappas 和 B. Soret，《面向无线6G的时间展望》，IEEE会刊，第110卷，第8期，第1116–1146页，2022年。[4] R. D. Yates、Y. Sun、D. R. Brown、S. K. Kaul、E. Modiano 和 S. Ulukus，《信息年龄：简介与综述》，IEEE通信领域精选期刊，第39卷，第5期，第1183–1210页，2021年。[5] N. Pappas、M. Abd-Elmagid、B. Zhou、W. Saad 和 H. Dhillon，《信息年龄：基础与应用》。剑桥大学出版社，2023年2月。[6] L. R. Varshney，《信息与能量同时传输》，载于IEEE国际信息论研讨会，2008年。[7] R. D. Yates，《慵懒而及时：能量采集源的状态更新》，载于IEEE国际信息论研讨会，2015年。[8] S. Feng 和 J. Yang，《噪声信道下能量采集传感器的最优状态更新》，载于IEEE INFOCOM研讨会，2018年。[9] X. Zheng、S. Zhou、Z. Jiang 和 Z. Niu，《能量采集发射机状态更新中信息年龄非线性函数的闭式分析》，IEEE无线通信汇刊，第18卷，第8期，2019年。[10] B. T. Bacinoglu、Y. Sun、E. Uysal 和 V. Mutlu，《有限电池能量采集源的最优状态更新》，通信与网络期刊，第21卷，第3期，2019年。[11] A. Arafa 和 S. Ulukus，《能量采集双跳网络中的及时更新：离线与在线策略》，IEEE无线通信汇刊，第18卷，第8期，第4017–4030页，2019年。[12] M. A. Abd-Elmagid 和 H. S. Dhillon，《能量采集供能的多源更新系统中的信息年龄》，IEEE信息论精选领域期刊，第3卷，第1期，2022年。[13] N. Pappas、Z. Chen 和 M. Hatami，《能量采集传感器监测过程的缓存状态更新平均信息年龄》，载于第54届CISS，2020年。[14] M. Hatami、M. Leinonen 和 M. Codreanu，《能量采集传感器状态更新控制中的信息年龄最小化》，IEEE通信汇刊，第69卷，第12期，2021年。[15] Z. Chen、N. Pappas、E. Bj¨ornson 和 E. G. Larsson，《异构设备多址信道中的信息新鲜度优化》，IEEE通信学会开放期刊，第2卷，2021年。[16] E. T. Ceran、D. G¨und¨uz 和 A. Gy¨orgy，《通过强化学习，利用混合自动重传请求和感知成本，最小化能量采集传感器的信息年龄》，载于IEEE INFOCOM研讨会，2019年。[17] M. Xie、Q. Cao、M. Zhou 和 X. Jia，《能量采集双传感器网络中的抢占式传输信息年龄》，载于IEEE春季车辆技术会议，2022年。[18] I. Krikidis，《无线供能传感器网络中的平均信息年龄》，IEEE无线通信快报，第8卷，第2期，2019年。[19] Y. Khorsandmanesh、M. J. Emadi 和 I. Krikidis，《无线供能协作网络中的平均信息峰值年龄分析》，IEEE认知通信与网络汇刊，第7卷，第4期，2021年。[20] M. A. Abd-Elmagid、H. S. Dhillon 和 N. Pappas，《无线供能通信系统中信息年龄最优的联合采样与更新》，IEEE车辆技术汇刊，第69卷，第11期，2020年。[21] S. Leng、X. Ni 和 A. Yener，《认知无线电网络中无线能量采集次级用户的信息年龄》，载于IEEE移动自组网与传感系统会议，2019年。[22] M. A. Abd-Elmagid、H. S. Dhillon 和 N. Pappas，《用于优化射频供能通信系统信息年龄的强化学习框架》，IEEE通信汇刊，第68卷，第8期，2020年。[23] R. Zhang 和 C. K. Ho，《同时无线信息与能量传输的MIMO广播》，IEEE无线通信汇刊，第12卷，第5期，2013年。[24] G. D. Nguyen、S. Kompella、J. E. Wieselthier 和 A. Ephremides，《基于捕获的无线网络中传输调度的优化》，载于IEEE军事通信会议，2008年。[25] E. Fountoulakis、T. Charalambous、N. Nomikos、A. Ephremides 和 N. Pappas，《双用户多址信道中信息新鲜度与丢包率的相互作用》，通信与网络期刊，第24卷，第3期，2022年。[26] R. Srikant 和 L. Ying，《通信网络：优化、控制与随机网络视角》。剑桥大学出版社，2013年。