

4.2 考虑时间延迟传播的泊位和岸桥集成调度计划恢复数学规划模型

4.2.1 问题描述

上一章节聚焦于泊位-岸桥调度的主动阶段，通过考虑风险导致的运营时间不确定性实现泊位-岸桥的弹性调度，以此制定一个具有弹性的基线调度计划表。但是，随着时间在规划范围内流逝，泊位和岸桥集成调度存在实时的中断风险和运营风险，如极端台风天气、设备临时故障、物料备货延迟和船舶延迟到港（Tang et al., 2022）。这些风险不可避免地造成船舶任务执行出现时间延迟问题，进而导致实际执行偏离基线调度计划，严重影响码头运营的弹性。更为重要地，与一般的集装箱码头的泊位和岸桥集成调度不同，本章的泊位和岸桥集成调度问题聚焦于泊位具有多任务属性场景，其导致船舶到港后需要在不同的泊位之间频繁移泊，以此满足任务的需求。因此，面向泊位多任务属性场景下的泊位和岸桥集成调度中的船舶任务之间表现出更强的耦合关系，其会导致调度非常脆弱，主要体现于：尽管单个任务的延误偏差可能很小，但由于任务之间的强耦合关系，时间延迟具有很大的概率产生连锁效应，形成时间延迟传播现象，最终会破坏整个基线调度计划，具体如图 4-1 所示。

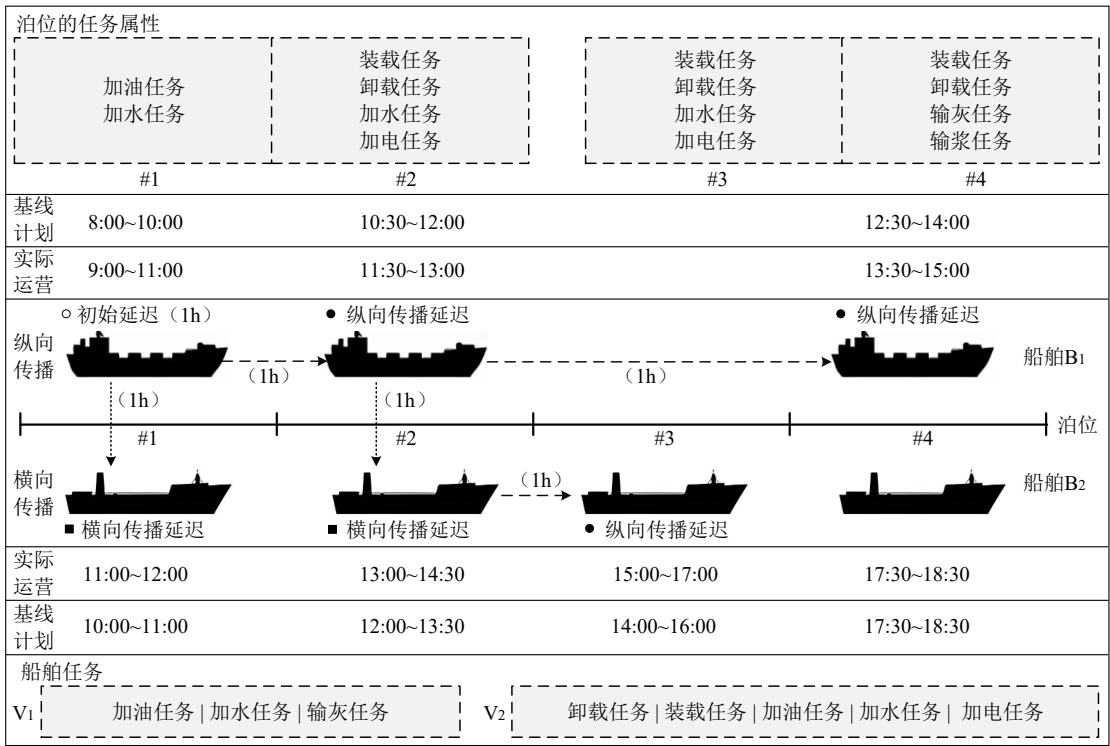


图 4-1：船舶任务执行时间延迟及其传播逻辑示例图

在图 4-1 中，初始延迟表示由船舶任务受极端天气、机械故障等原因直接导致的延误，由船舶任务自身原因引起的最开始的延迟，是时间延迟传播的起源。时间延迟传播分为纵向时间延迟传播和横向时间延迟传播。纵向时间延迟传播表示时间延迟沿着船舶的任务链在不同的泊位上进行传播；横向时间延迟传播表示时间延迟由于泊位的资源独占性在不同的船舶之间进行传播。具体地，当船舶  $V_1$  在泊位 #1 中执行任务出现 1 小时的初始时间延迟后，其会沿着船舶 1 的任务的执行路径发生纵向时间延迟传播，即船舶  $V_1$  在后续泊位的任务执行同样会存在 1 小时的时间延迟。同时，由于泊位在时间维度上的资源独占性，船舶  $V_1$  在泊位 #1 的初始时间延迟同样会在不同船舶之间进行横向时间延迟传播。例如，在泊位 #1 和泊位 #2 上，由于横向时间延迟传播，船舶  $V_2$  在这两个泊位上的任务执行都由于船舶  $V_1$  中任务的时间延迟出现 1 小时的时间延迟。更进一步地，当船舶受到其他船舶的横向时间延迟传播影响时，其可能导致船舶进一步产生纵向时间延迟传播。例如，船舶  $V_2$  由于在泊位 #1 和泊位 #2 上受到船舶  $V_1$  的横向时间延迟传播影响，导致其在泊位 #1 到泊位 #2 产生 1 小时的纵向时间传播。

因此，本章聚焦于泊位多任务属性的场景，研究考虑时间延迟传播的泊位-岸桥调度计划恢复问题，具体可以描述为：在实际日常运营中，码头运营者在当天会按照预先制定的基线调度计划表执行船舶任务。同时，在任务执行过程中，运营者会实时判断任务执行的延误程度。当某个时刻，运营者认为现有任务执行情况存在严重的延误时，其会启动被动的泊位-岸桥调度计划恢复流程：首先，依赖于局部调整策略，运营者会根据时间延迟传播机制明确时间延迟传播的边界，以此确定需要重新调度的船舶任务集合；其次，运营者对该集合执行重新调度策略，主要依赖于基线调度计划信息和调度计划恢复的弹性策略。其中，基线调度计划信息主要包含船舶任务的基线执行泊位、船舶任务的基线执行岸桥、船舶任务的基线开始时间和船舶任务的基线结束时间等。同时，对于调度计划恢复的弹性策略，本章主要聚焦于灵活性和风险偏好和两种策略，具体为：

(1) 灵活性策略：主要通过资源配置的程度保证船舶任务执行的灵活性，包括任务执行速率的灵活性。但是，任务执行的灵活性与资源配置的成本存在

明显的背反关系，因此泊位-岸桥调度计划恢复规划中需要充分权衡。

（2）风险偏好策略：根据前景理论，港口运营者在处理偏差时会表现出避免风险的行为，即当面临中断风险或运营风险时，港口运营者大多数情况下会偏向于让大部分船舶按基线计划执行，尽量避免所有船舶的调整（Wang et al., 2024）。因此，本章在进行泊位-岸桥调度计划恢复规划时尽量减少基线中船舶的泊位和岸桥资源分配的改变，具体策略包括：通过时间延迟传播机制明确时间延迟的传播边界缩小计划恢复范围；使用偏离最小化优化目标。

（3）移泊次数最小化策略：与一般的集装箱码头相比，船舶在具有泊位多属性的码头执行任务时，往往需要在不同泊位上执行不同的任务需求，其导致频繁移泊的后果。但是，移泊往往需要昂贵的成本并且具有严重的任务中断性（Brown et al., 1994）。最重要地，船舶移泊是一项复杂的任务，导致移泊时间较长且具有严重的不确定性。可见，频繁移泊会严重影响泊位-岸桥调度的弹性。因此，本章通过移泊次数最小化策略提升调度弹性。

因此，本章的目标是在泊位多任务属性场景下，充分考虑时间延迟传播，制定泊位-岸桥调度计划的事后被动恢复计划，以此保证调度计划的弹性运营。基于以上目标，本章着重需要解决的问题包含：如何明确时间延迟传播的边界；如何制定泊位-岸桥调度的弹性恢复计划。

#### 4.2.2 时间延迟传播边界

在制定泊位-岸桥调度的恢复计划之前，本章首先依据前景理论研究泊位多任务属性场景下船舶任务执行时间延迟的传播机制，明确时间延迟的传播范围边界，以此减少基线计划中船舶的调整范围。

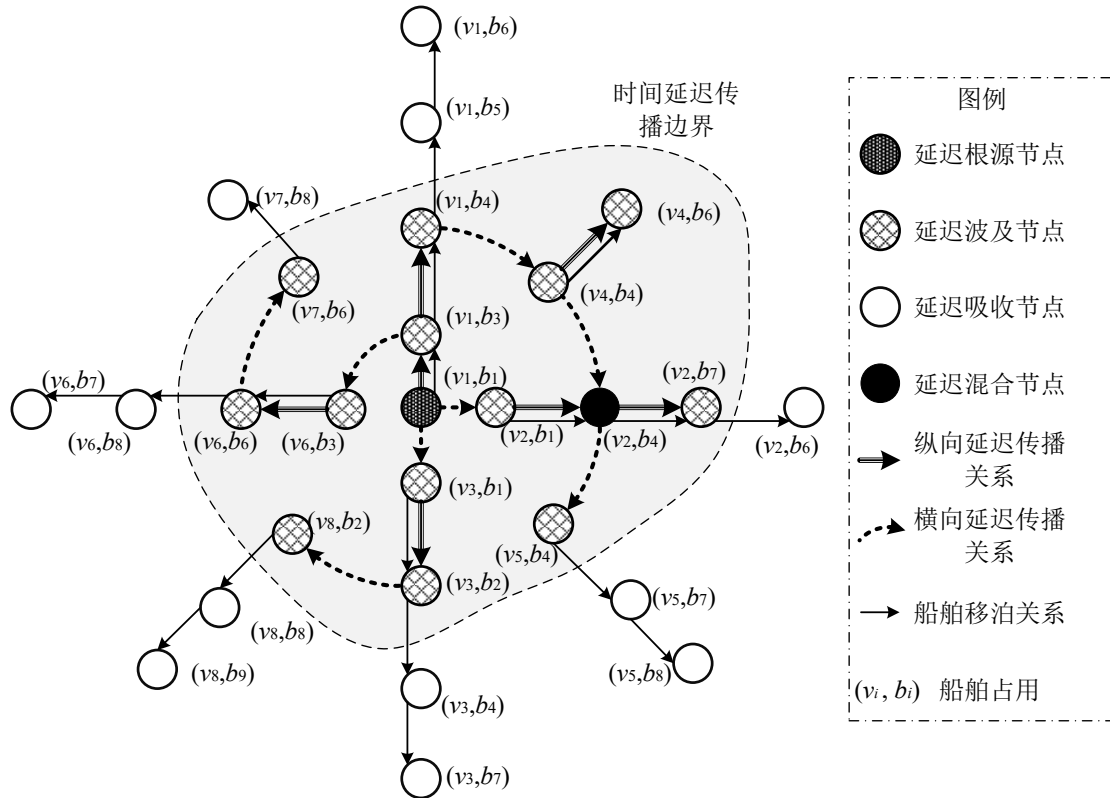


图 4-2：泊位多任务属性场景下泊位-岸桥调度计划的时间延迟传播网络及其边界图

图 4-2 为泊位多任务属性场景下泊位-岸桥调度计划的时间延迟传播网络及其边界图，其能形象地给出时间延迟传播及其边界的直观视觉。

在图 4-2 中，船舶  $v$  在泊位  $b$  上的占用映射为网络节点，主要分为四类：

1) 延迟根源节点，其是时间延迟传播的起点，其延迟不受前面船舶占用的影响，由其自身延误因素引起的初始延误。根据延迟根源节点的数量，可以分为单源时间延迟传播网络和多源时间延迟传播网络，如节点  $(v_1, b_1)$ 。

2) 延迟波及节点，受到纵向延迟传播和横向延迟传播的影响导致延迟的节点，如节点  $(v_1, b_3)$ 。

3) 延迟混合节点，其本身就是延迟根源节点，同时受到纵向延迟传播和横向延迟传播的影响，如节点  $(v_2, b_4)$ 。

4) 延迟吸收节点，通过节点间的时间间隙吸收时间延迟传播的节点，即出现于时间延迟传播的边界，如节点  $(v_3, b_4)$ 。

同时，在图 2 中，存在三类边的要素，分别为：

1) 船舶移泊关系：在基线调度计划中，船舶执行任务时在不同泊位之间的

先后移泊关系，其是纵向时间延迟传播的基础。

2) 纵向时间延迟传播关系：初始时间延迟随着船舶在泊位之间的先后移泊关系进行纵向传播的关系。

3) 横向时间延迟传播关系：初始时间延迟随着同一泊位前后船舶的执行顺序进行横向传播的关系。

明确时间延迟传播边界主要是以时间维度区分四类不同节点，即受到时间延迟及其传播影响的节点包括延迟根源节点、延迟波及节点和延迟混合节点。

为了研究泊位多任务属性场景下泊位和岸桥集成调度计划的时间延迟传播机制，本章进行定量描述。首先，定义相关数学符号，如下表 4-1 所示。

**表 4-1：泊位多任务属性场景下泊位和岸桥集成调度计划的时间延迟传播机制数学符号表**

符号	描述
$V$	船舶集合，索引为 $v$ 。
$B$	泊位集合，索引为 $b$ 。
$SO$	船舶在泊位上的占用集合。
$TPS_{vb}$	船舶 $v$ 在泊位 $b$ 上任务执行的计划开始时间。
$TPE_{vb}$	船舶 $v$ 在泊位 $b$ 上任务执行的计划结束时间。
$TAS_{vb}$	船舶 $v$ 在泊位 $b$ 上任务执行的实际开始时间。
$TAE_{vb}$	船舶 $v$ 在泊位 $b$ 上任务执行的实际结束时间。
$TC_v$	船舶 $v$ 在泊位之间的移泊时间。
$D_{vb}$	船舶 $v$ 在泊位 $b$ 上的任务执行的延迟时间。
$DI_{vb}$	船舶 $v$ 在泊位 $b$ 上的任务执行的初始延迟时间。
$TS_{vbb'}$	船舶 $v$ 在前后泊位 $b$ 和 $b'$ 之间的缓冲时间。
$TS_{bv'v'}$	泊位 $b$ 上前后船舶 $v$ 和 $v'$ 之间的缓冲时间。
$SO_{vb}$	船舶 $v$ 在泊位 $b$ 上的占用。
$TPEL$	所有存在时间延迟的船舶占用中计划结束时间最晚的船舶占用计划结束时间。

根据以上描述和数学符号，获得以下时间延迟传播边界命题 4.1：

**命题 4.1：**泊位多任务属性场景下泊位-岸桥调度计划的时间延迟传播的边界存在于以下两种情况：

- 边界i：船舶占用  $SO_{v'b'}$  的延迟时间为  $D_{v'b'} = 0$ ；
- 边界ii：船舶占用  $SO_{v'b'}$  的延迟时间为  $D_{v'b'} > 0$ ，但其泊位是基线调度计划中船舶  $v'$  的最后一个靠泊泊位。

$D_{v'b'}$  的计算公式如下：

$$D_{v'b'} = \max \left\{ D_{v'b} - (TPS_{v'b'} - TPE_{v'b} - TC_{v'}), \max \{ D_{vb'} - (TPS_{v'b'} - TPE_{vb'}), DI_{v'b'} \}, 0 \right\}, \forall v, v' \in V, b, b' \in B, v \neq v', b \neq b' \quad (4.1)$$

其中，在恢复计划开始时刻，若泊位  $b'$  为船舶  $v'$  的第一个靠泊泊位，则

$$D_{v'b'} = DI_{v'b'}; \quad TAS_{v'b'} = TPS_{v'b'} + D_{v'b'}; \quad TAE_{v'b'} = TPE_{v'b'} + D_{v'b'}。$$

证明：泊位多任务属性场景下，船舶占用  $SO_{vb}$  可能存在时间延迟，可以表述为：  $D_{vb} = TAE_{vb} - TPE_{vb}$ 。船舶占用之间存在两种前后关系：同一船舶在不用泊位上占用的前后关系和同一泊位上不同船舶占用的前后关系。两种关系分别对应纵向时间延迟传播和横向时间延迟传播，如图 4-3(a)和图 4-3(b)所示。纵向时间延迟传播机制主要为船舶的第一个占用的初始延迟时间沿着同一船舶在不用泊位上占用的前后关系进行时间延迟传播，其会被前后泊位之间的缓冲时间进行吸收。于是，船舶占用的时间延迟存在以下递推关系：

$$D_{v'b'} = \max \{ D_{v'b} - TS_{v'bb'}, 0 \}。进一步可以表述为： D_{v'b'} = \max \{ D_{v'b} - (TPS_{v'b'} - TPE_{v'b} - TC_{v'}), 0 \}，$$

若泊位  $b'$  为船舶  $v'$  的第一个靠泊泊位，则  $D_{v'b'} = DI_{v'b'}$ 。类似地，横向时间延迟传播机制主要为船舶的时间延迟会沿着同一泊位上船舶占用的前后关系进行时间延迟传播，其会被前后船舶占用之间的缓冲时间进行吸收。于是，船舶占用的时间延迟存在以下递推关系：  $D_{v'b'} = \max \{ D_{vb'} - TS_{b'vv'}, DI_{v'b'} \}$ 。进一步可以表述为：

$$D_{v'b'} = \max \{ D_{vb'} - (TPS_{v'b'} - TPE_{vb'}), DI_{v'b'} \}。结合以上推导，在充分考虑纵向时间延迟传播和横向时间延迟传播的情况下，  $SO_{v'b'}$  的时间延迟  $D_{v'b'}$  的计算如公式（1）所示。$$

结合公式（1），在泊位多任务属性场景下，时间延迟传播的终止条件存在两种情境：第一，船舶占用  $SO_{v'b'}$  的时间延迟  $D_{v'b'} = 0$ ，即初始时间延迟随着纵向传播路径和横向船舶路径传播至船舶占用  $SO_{v'b'}$ ，船舶路径上的缓冲时间

（ $TS_{vbb'}$  和  $TS_{bvv'}$ ）吸收全部的初始时间延迟，导致延迟传播的终止；第二，船舶占用  $SO_{v'b'}$  的时间延迟  $D_{v'b'} > 0$ ，但其是船舶  $v'$  的最后一个占用。由于是最后一个占用，处于纵向延迟末端，导致延迟传播的终止。证明完毕。

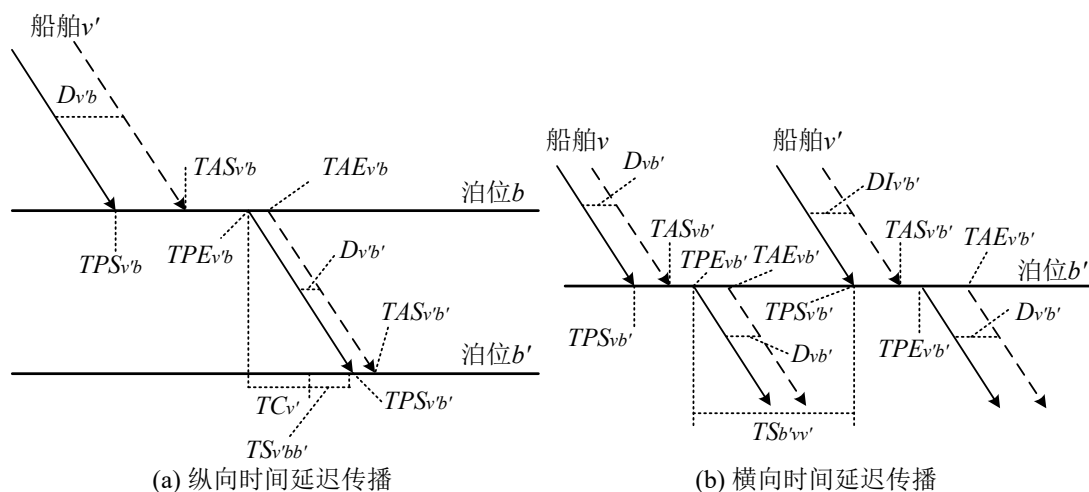


图 4-3：泊位多任务属性场景下泊位-岸桥调度计划的时间延迟传播机制图

根据命题 4.1 确定所有存在初始时间或传播延迟的船舶占用后，进一步确定恢复计划的规划的时间范围，即 $[t_0, TPEL]$ ，其中  $t_0$  表示恢复计划开始时间。