

井下调度运输的自动调度策略研究

李文宏^{1,2}, 郑建志^{1†}

(1. 山东科技大学 海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 泰安华讯电气有限公司, 山东 泰安 271219)

摘要: 为了提高煤矿井下机车调度效率和实现井下调度系统自动化, 基于Petri网理论知识结合实际井下矿场路况建立机车调度Petri网模型, 然后对Petri网模型添加限制库所和变迁使其调度过程无死锁, 并通过理论证明了该调度模型是无死锁和冲突的, 可以指导机车井下运输调度. 然后在机车调度规则下针对不同的井下机车调度相关参数, 提出了3种不同情况下的机车最优调度策略, 并通过验证实际矿场参数后的分析证明了该调度策略下机车的调度是不触发死锁情况下的最优调度. 最后通过仿真实验以及实际应用证明了该调度策略的正确性和完备性, 为井下运输的自动调度提供了理论基础.

关键词: 矿井机车调度; Petri网模型; 无死锁控制; 自动调度策略

引用格式: 李文宏, 郑建志. 井下调度运输的自动调度策略研究. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 757 – 765

DOI: 10.7641/CTA.2021.00500

Research on automatic scheduling strategy for downhole dispatching transportation

LI Wen-hong^{1,2}, ZHENG Jian-zhi^{1†}

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China;
2. Taian Huaxun Electric Co. LTD., Taian Shandong 271219, China)

Abstract: To improve the efficiency of underground locomotive dispatching in coal mines and realize the automation of a underground dispatching system, Petri nets models of locomotive dispatching are established based on the theoretical knowledge of Petri nets and actual underground mine road conditions, then add restricted places and transitions to the Petri net model to make the dispatching process deadlock-free, and theoretically proved that the dispatching model is deadlock and conflict-free, and can guide locomotive underground transportation dispatching. And under the locomotive operation rules for different underground locomotive dispatching related parameters, three optimal locomotive dispatching strategies under different conditions are proposed, and the analysis after verifying the actual mine parameters proves that the locomotive dispatching under the scheduling strategy is the optimal dispatching without triggering deadlock. And finally through the simulation experiment and practical application proves the correctness and completeness of the dispatching policy, provides a theoretical basis for the underground transportation automatic dispatching.

Key words: mine locomotive dispatching; Petri net model; deadlock-free control; automatic strategy

Citation: LI Wenhong, ZHENG Jianzhi. Research on automatic scheduling strategy for downhole dispatching transportation. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 757 – 765

1 引言

机车调度监控系统对于保障矿井机车的运输安全, 提高矿井轨道机车的运输效率具有非常重要的作用, 是现代化矿井必须具备的^[1]. 随着煤矿自动化水平的提高, 机车数量增多, 如果没有有效的机车调度, 会出现机车碰撞、井下调度效率降低问题. 这就需要减少人工调度在机车调度系统中所占的比重, 优化机车调度系统至全自动调度. 本文研究的目标就是提出行

之有效的机车调度策略, 实现机车调度监控系统可以自动调度井下机车行驶, 能够避免机车碰撞, 提高井下调度效率.

为了得到符合矿场结构的调度策略, 首先需要对矿场路况等进行模拟, Petri网在模拟、决策和制造业中来模拟复合系统已经拥有了广泛的应用^[2], 机车调度过程本质上属于离散动态系统, 可以用Petri网来进行描述, 有许多论文^[3-4]也通过Petri网对机车调度

收稿日期: 2020-08-02; 录用日期: 2021-01-05.

[†]通信作者. E-mail: 3034596613@qq.com; Tel.: +86 17864267921.

本文责任编辑: 王凌.

山东省自然科学基金项目(ZR2014FQ020), 山东省重点研发计划项目(2019GHY112051)资助.

Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2014FQ020) and the Key Technology Research and Development Program of Shandong (2019GHY112051).

过程进行建模研究. 在本文中通过利用Petri网来模拟机车调度过程, 发现其中容易发生死锁的进路或区段, 通过添加约束避免死锁, 进而发现实际矿场中易发生碰撞的路段并进行预防.

早在2007年郭智奇等人^[2]就利用有色Petri网对机车调度系统进行了建模, 但是其主要研究内容是系统本身, 而没有对机车调度过程进行优化, 2012年, 霍晓宇等人结合矿山运输调度系统实际, 考虑到计划产量、生产能力、质量要求和运输过程等方面约束, 建立了一个通用性较强的矿山运输调度系统模型^[5], 对井下机车调度有一定的参考意义. 2013年, 方欢等人利用Petri网对机车调度过程进行了详细的建模并分析其无死锁调度提出了最优调度策略^[4], 但是未进一步将调度策略与调度系统结合解决机车调度自动化问题. 2016年, V. Nguyen等人^[6]分析了所谓的混合车间问题的特征, 提出了一种改进的遗传算法, 以最大程度地提高了混合车间计划的效率, 为井下机车调度效率的提高提供了解决方案. 2017年, 陈晨针对铁路调度建立Petri网模型, 并提出模型优化策略^[7], 2018年, 李国清以最短工序时间间隔和最短完成时间为共同优化目标构建了地下矿山生产接续与设备调度集成优化模型^[8]. Renaud Senécal等^[9]在处理多个处理流的矿山生产调度问题中, 开发并行多邻域禁忌搜索元启发式算法, 以优化所提出的模型.

上述论文只是对井下调度策略进行了优化, 但是还未上升到自动调度的高度, 在井下自动调度方向, 许多学者将方向放在机车自动化上, 在2014年王建斌等人^[10]就对矿井机车无人驾驶系统进行了形式化的设计与开发, 李宏刚等人^[11]提出了一种矿用运输车辆无人驾驶感知及控制方法, 实现无人驾驶矿用运输车辆纵向速度和横向位置的精准控制. 井下机车的无人控制只是井下机车自动调度系统的一部分, 还需要自动调度策略, 只有两者结合才能实现井下运输调度的完全自动化.

本文首先利用Petri网对井下调度过程进行了无死锁建模, 然后根据矿井轨道的结构提出了3种不同参数下的最优调度策略, 然后利用最优调度策略进行矿井调度参数的设置, 最后通过仿真实验验证了调度策略的有效性.

2 井下Petri网建模过程

2.1 Petri网建模基本概念

时延 Petri 网^[12]是一个六元组 $N = (P, T, F, W, M, D)$, P 代表库所Place, T 代表变迁Transition, F 代表有向弧. Petri网用标识 M 来表示系统的当前状态, 用不同颜色的令牌(Token)的流动表示系统的变化状态和活动行为.

$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$: Petri网中“○”, 即库所.

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$: Petri网中“■”表示瞬时变迁, “□”表示时延变迁.

M : Petri网中库所中的点称为令牌或者Token, 其图形为“○”, 不同颜色的令牌定义为机车或者命令.

F : Petri网中“—→”, 即有向弧, 定义为机车和命令的流动方向.

W : 代表有向弧上的权值函数, 矿山机车模型中 W 表示一条路段同时通过的机车数量.

D : 为所有库所的时延集, 定义为机车通过该路段所需时间.

2.2 进路和区段的划分

图1中蓝色线段表示机车轨道, 轨道附近的各种图标是机车调度监控系统的组成部分, 轨道上的数字是划分的区段, 区段和进路是机车调度规则中基本的元素^[13], 井下轨道区段和进路的划分直接影响到调度策略的形成.

图1中区段和进路的划分如表1所示, 其对应的区段长度表如图2所示.

2.3 井下调度Petri网建模

在该节对图1矿场进行Petri网建模, 图1井下轨道为单向轨, 机车从图1平峒口01#车场出发, 去往301盘区02#车场和303盘区03#车场, 机车行驶路线1为01#车场到02#车场再返回01#车场, 为变迁触发序列A, 机车行驶路线2为01#车场到03#车场再返回01#车场, 为变迁序列B.

变迁触发序列A的Petri网建模如下图2所示.

其中 P_n 代表 n 号区段, 其中后缀有a和b的代表该区段为公共区段, a, b表示不同方向. 黑色令牌代表空载机车, 蓝色代表重载机车, 黑色变迁没有时延, 变迁时延 T_n 是机车驶过 n 号区段的时间. 绿色的令牌代表限制库所, 用来限制进路内只有一辆机车和变迁序列A调度的无死锁, 可以看成机车调度监控系统中的调度命令.

整个调度流程为图2中黑色Token通过CH1车场出发, 经过进路1, 2, 3后, 经过限制库所X1, X2确定公共路段4, 5可以进入后机车进入, 经过进路6, 7到达采矿车场02, 装车后变为蓝色Token, 然后返回CH1车场, 再次经过路段4, 5时, 再次确定, 之后经过10, 11 到达CH1卸车再次变为黑色Token.

变迁触发序列B的Petri网建模如下图3所示.

两个变迁序列完成后, 可以研究自身循环中可能出现的冲突和竞争, 避免死锁的出现, 但是两个变迁序列是具有交集的, 所以还需要将两个变迁触发序列结合得到如图4所示的完整的井下调度建模.

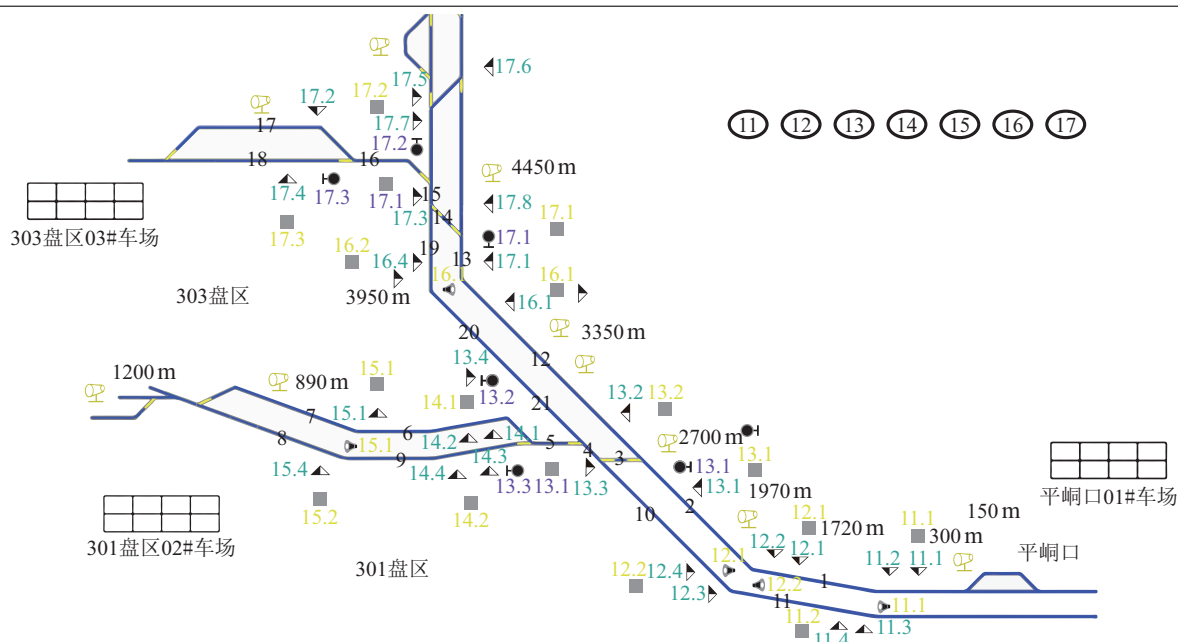


图1 某煤矿界面图

Fig. 1 Interface diagram of a coal mine

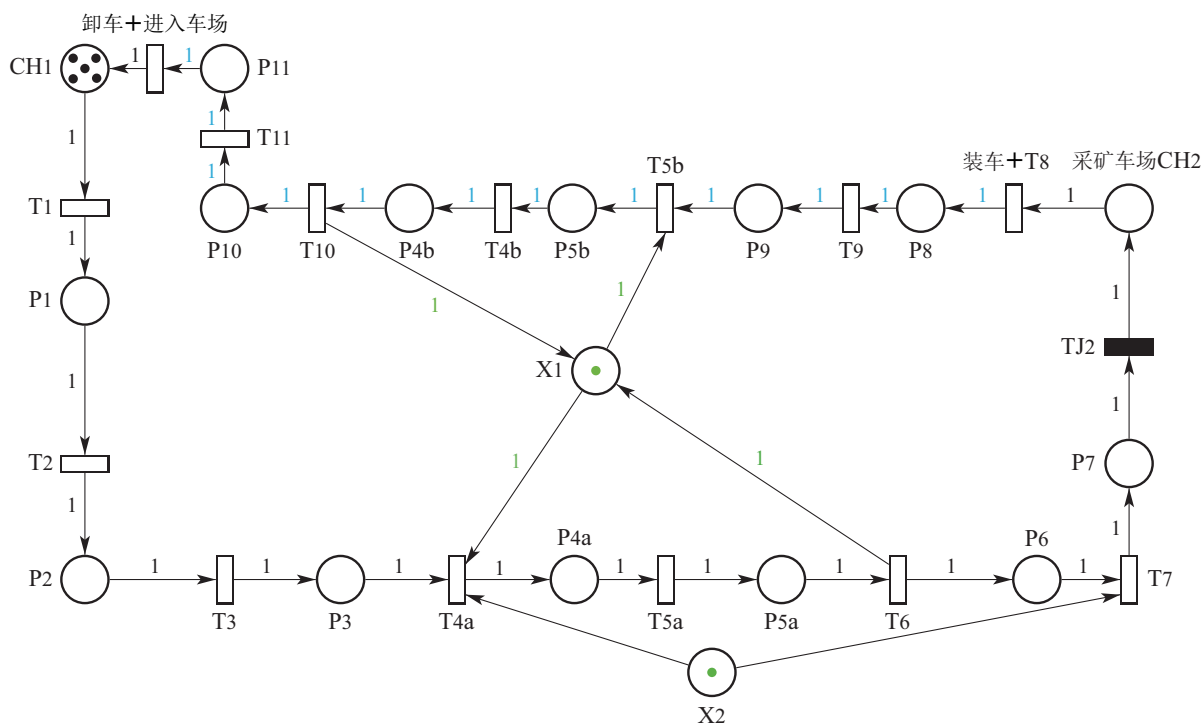


图2 变迁触发序列A的建模

Fig. 2 Modeling of transition trigger sequence A

表1 路线及区段对应表

Table 1 Route and section correspondence table

机车路线	对应机车区段
1	1, 2, 3, (4, 5, 6), 7
2	8, 9, (5, 4), 10, 11
3	1, 2, 12, 13, 14, (15, 16, 17)
4	18, (16, 15), 19, 20, 21, 4, 10, 11

3 消除死锁和冲突的分析

死锁出现的条件结合Petri网为

- 1) 互斥: 共享令牌同一时刻只能被一个变迁序列占用。
- 2) 请求与保持: 库所因变迁发生条件不满足时, 不释放库所内令牌。
- 3) 不可抢占: 库所内令牌不能凭空消失。

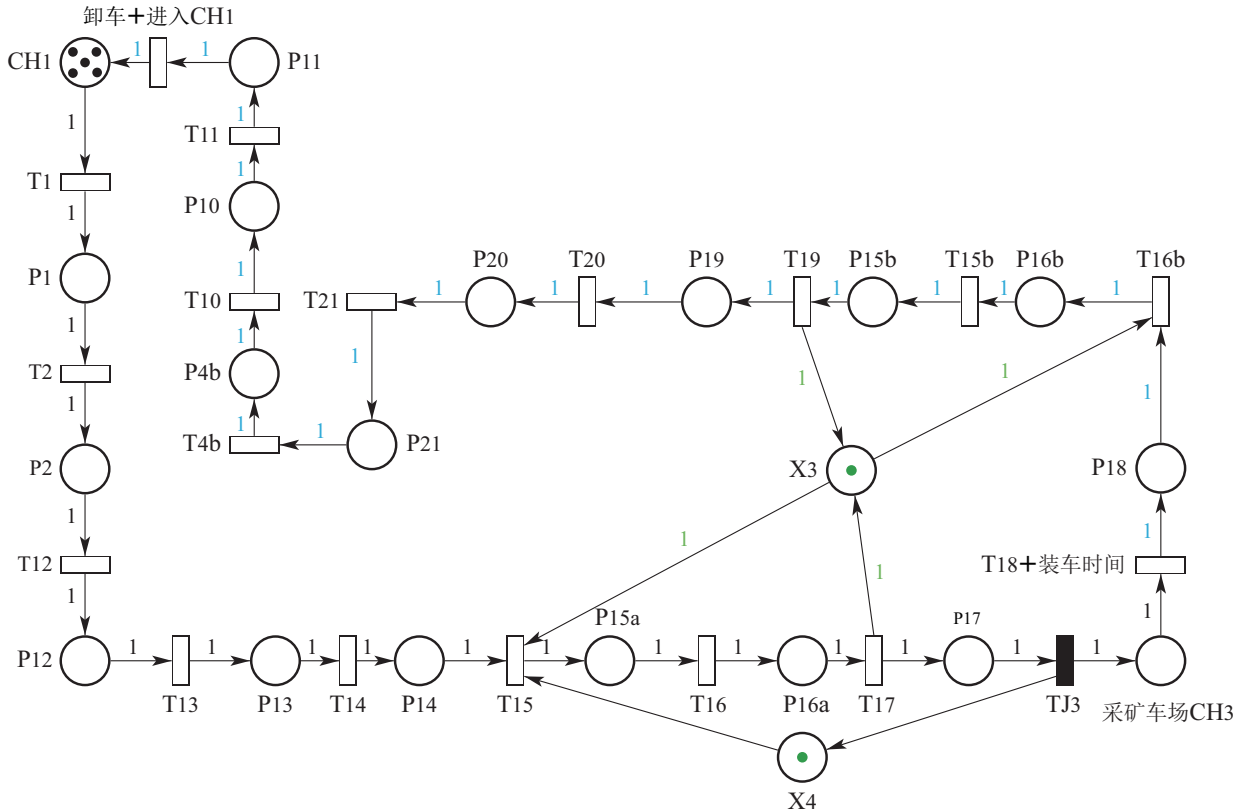


图3 变迁触发序列B的建模

Fig. 3 Modeling of transition trigger sequence B

4) 循环等待: 进路之间形成一种头尾相接的循环等待资源关系。

在上述4个条件中, 前3个是Petri网本身的性质, 是无法避免的, 所以要做到模型无死锁^[14]就要使条件4不满足。井下轨道公共路段使得机车进入和驶出时头尾相接, 这是死锁条件4循环等待的出现原因。

冲突在Petri网中是两个变迁对一个令牌的夺取, 在单轨道Petri网模型中不会出现, 即在图2和图3中不会出现, 只会出现在图4中T12和T3对P2中令牌的抢夺, 即机车对采矿车场的选择, 而机车出车时就已经确定采矿车场, 所以无需对此进行设置。

3.1 模型死锁约束

变迁触发序列A中进路(4, 5)是机车来回的公共路段, 故4, 5, 6, 7, 8, 9, CH2形成闭环回路, 易形成死锁。

同理, 在变迁触发序列B中, 进路(15, 16)是机车来回的公共路段, 故15, 16, 17, 18, CH3形成闭环回路, 易形成死锁。

当上述任意库所都有令牌时, 就会陷入死锁, 所以防止死锁的方法是将进入区段和驶出区段错开, 使死锁条件4不满足。

序列A中区段4和5是公共路段无法设置, 所以将进入区段6或是驶出区段9与区段4, 5形成一个新进路,

只允许进入或驶出时只有1辆机车, 即可避免死锁的发生, 在图2中利用X2限制库所使(4, 5, 6)为一个进路。

同理得在变迁序列B中将(15, 16, 17)作为一个进路, 也避免了死锁条件4的发生。

两者结合形成图4完整建模后, 没有形成新的头尾相接的循环等待关系, 没有形成新的死锁, 但是两者都具有区段4, 因此通过X1对区段4进行了约束。

4 调度策略的建立

井下机车在获取矿产资源的过程中, 由于路线复杂, 空间有限, 多辆机车同时运行会发生碰撞等问题需要进行机车调度, 机车调度本身是对进路和区段的分配与控制, 在本节中是通过协调机车运行顺序或路段资源的分配, 在保证安全的前提下, 达到系统生产最优化的目的。

4.1 井下调度参数设置

通过上述证明了模型的无死锁性, 但是如果不采用符合矿场的调度策略的话, 会使得机车在无死锁调度的过程中浪费大量的时间。

为了方便得到井下调度策略, 将井下车辆速度设为匀速 v 。机车数目设置为 n 。

机车同一序列发车时间间隔设为 Td 。不同序列机车发车间隔设为 Tl 。

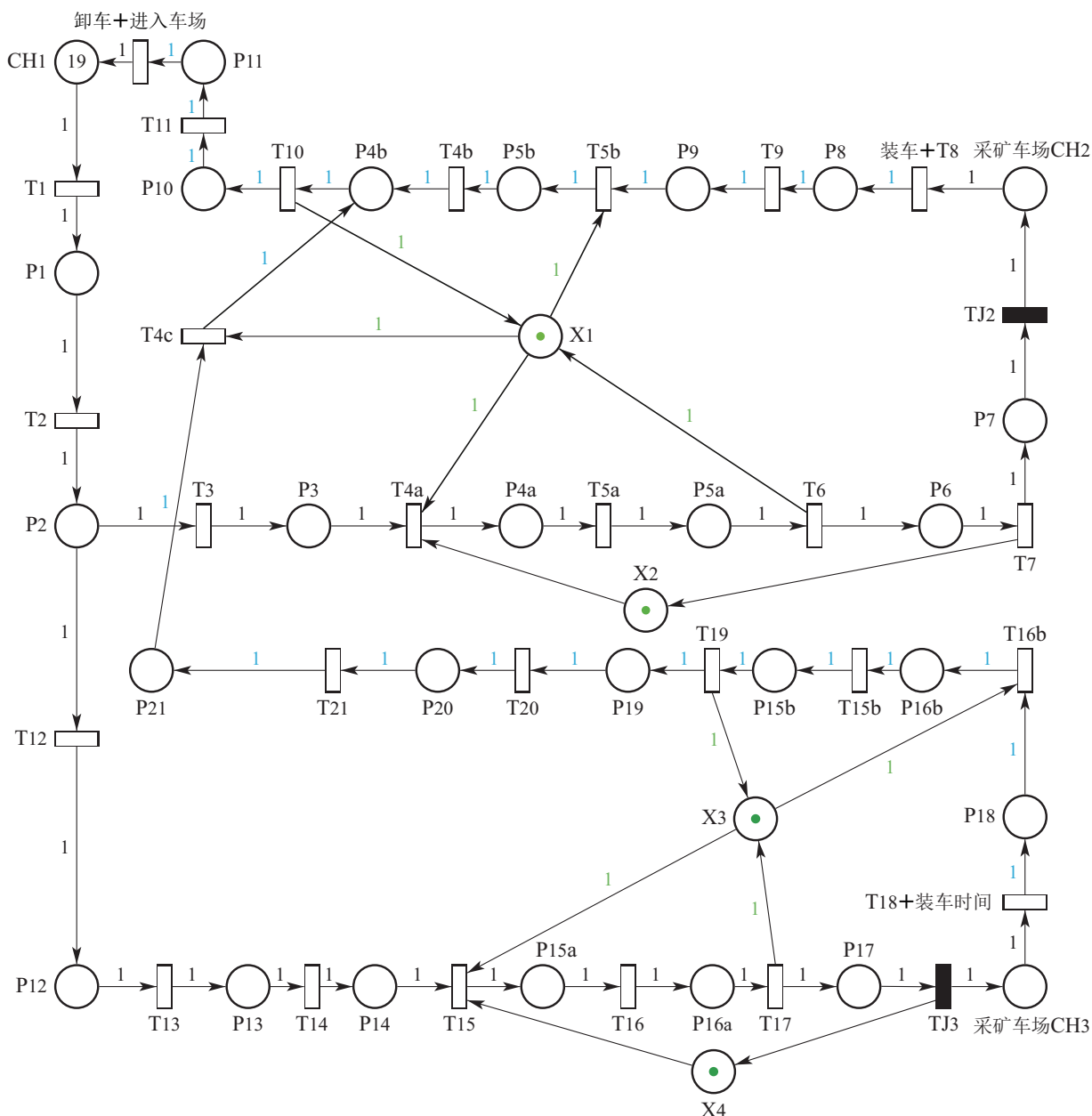


Fig. 4 Petri net modeling diagram of complete locomotive track model in underground mine

机车在整个循环过程中还需要装车和卸车, 卸车在01#车场不占用循环时间, 装车时间分别在02#和03#车场占用循环时间, 装车时间设为 T_z 。根据机车调度规则^[2], 一段进路中只能有一辆机车, 由于该调度规则的原因, 两辆机车之间的间隔时间等于机车占用一个库所的最长时间 T 。

证 假设有 $Li(i=1, 2, \dots, n)$ 个区段, 其中当 $i=m$ 时, 区段最长, 库所占用时间最长. 第 1 辆机车在轨道行驶时间为 $\sum_{i=1}^n Li/v$.

设第2辆机车在第1辆机车驶出 L_1 后,立刻驶出,此时间隔时间为 L_1/v ,当到达 L_2 之前,若 $L_1 > L_2$,则机车不需要等待,可以直接进入 L_2 ,此时间隔时间

依然为 $L1/v$, 当 $L1 < L2$ 时, 第 1 辆机车还未驶出 $L2$, 需要等待时间为 $(L2 - L1)/v$ 后才可进入 $L2$, 此时间间隔时间为 $L1/v + (L2 - L1)/v = L2/v$.

以此类推, 两辆机车间隔时间为 Lm/v , 为机车占用一个库所的最大时间.

所以一条变迁序列中两车之间最长的间隔时间 Td 可能为 Lm/v 或者 $Tz(Tz \geq Lm/v)$.

当存在多条变迁序列时,不同变迁序列之间的间隔时间应为最长公共路段的行驶时间. 证毕.

4.2 3种情况下的调度策略

变迁触发序列 A: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 5, 4, 10,

变迁触发序列 B: 1, 2, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,

16, 15, 19, 20, 21, 4, 10, 11.

变迁触发序列A的总时间 TA 为

$$\sum_{i=1}^n Li/v + Tz, i \in A.$$

变迁触发序列B的总时间 TB 为

$$\sum_{i=1}^n Li/v + Tz, i \in B.$$

在该例中 $TA = 7250/v + Tz$, $TB = 9790/v + Tz$, $TB - TA = 2540/v$, 且两个变迁触发序列有最长公共区段1. A, B单独发生时, 变迁间隔时间为 $L1/v$ 或者 Tz ($Tz \geq L1/v$).

同时发生时, A, B变迁间隔时间为 $L1/v$, A, B单独变迁序列为 $2L1/v$ 或 Tz ($Tz \geq 2L1/v$).

不同的机车发车间隔时间对调度策略的优化方式是不同的, 所以提出3种不同的情况:

情况1 当 $Tz \leq L1/v$ 时, 序列变迁间隔 Td 为 $L1/v$, $L1$ 为序列A, B公共起始段, 又因为 $TB > TA$, 所以最优调度方式即为仅触发序列A变迁.

如果井下调度要求两条变迁序列A, B都需要触发时, $TB - TA = 2540/v$, 其值与 $2L1/v$ 最接近, 因此触发序列设置为BAABAA...且最后触发序列必须是A时与仅触发序列A变迁时时间相同. 当井下有10辆机车时变迁触发情况如图5-6所示.

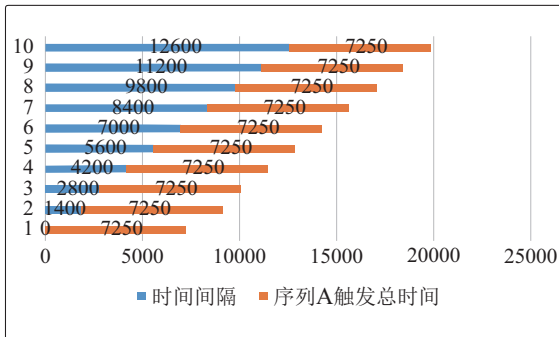


图5 仅触发变迁序列A

Fig. 5 Only trigger transition sequence A

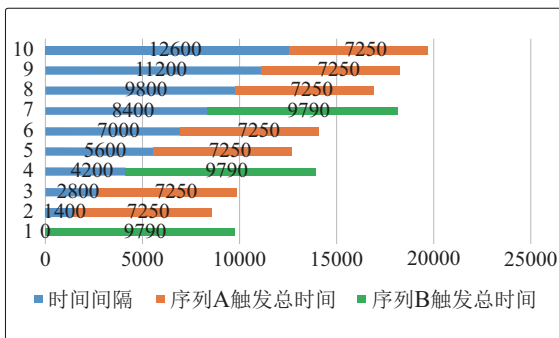


图6 序列A, B触发

Fig. 6 Sequence A, B trigger

从图5-6可以看出两者消耗时间一样, 所以情况1下的最优调度策略为A单独触发或是BAABAA...

情况2 当 $L1/v \leq Tz \leq 2L1/v$ 时, 单独触发序列A变迁时, 同一序列变迁间隔 $Td = Tz$, 单独触发序列A的时间为 $(n-1)Tz + TA$.

当序列A, B交错发生时, A, B序列之间变迁间隔 Tl 为 $L1/v$, 同一序列变迁间隔 $Td = 2L1/v$.

当机车数目为偶数时, 最优调度方式为BABA..., 当机车数目为奇数时, ABABA和BABAA的方式还需要再考虑, 具体序列发生总时间公式如下:

$$\begin{cases} (n-2)\frac{L1}{v} + TB, \\ n \text{ 为偶数;} \\ \begin{cases} (n-2)\frac{L1}{v} + TB(Tz \geq TB - TA), \\ (n-2)\frac{L1}{v} + TA + Tz(Tz \leq TB - TA), \end{cases} \\ n \text{ 为奇数且大于1.} \end{cases}$$

随着机车数目 n 的增加, 单独触发序列A的调度方式总时间越来越长, 不适合多机车调度井下矿场.

情况3 当 $Tz \geq 2L1/v$ 时, 同一序列变迁间隔 $Td = Tz$, A, B序列之间变迁间隔 Tl 不再只是 $L1/v$, 此时最优调度策略是在序列A之间插入序列B, 两者间隔时间前段为 $L1/v$, 而后段为 $Tz - L1/v$.

由上述3种情况可以看出, 当机车匀速行驶在轨道上时, 机车运行速度 v 和装车时间 Tz 决定了机车行驶的最优调度策略.

4.3 轨道内部调度时间

上述最优调度策略忽略了机车在井下轨道内部经过调度系统调度的时间, 是理论上的最优调度.

情况1和情况3不易发生且调度逻辑简单, 机车调度时间被 Tz 或 Tl 覆盖, 不再赘述.

情况2为井下调度的多数情况, 因此对情况2下发生的机车调度做研究, 需要机车调度的情景为变迁序列A从CH2回来的车和变迁序列A去往CH2车相遇, 变迁序列A去往CH2的车和变迁序列B从CH3回来的车相遇, 变迁序列B从CH3回来的车和变迁序列B去往CH3的相遇, 以及变迁序列A回来的车和B回来的车竞争.

A回A去:

冲突路段为进路(4, 5), 当 n 为奇数 $Tz \geq TB - TA$ 时机车进入(4, 5)的时间区段为

$$\left(\frac{LA(3)}{v} + Td(A_{qn} - 1), \frac{LA(5)}{v} + Td(A_{qn} - 1) \right),$$

$$\left(\frac{LA(9)}{v} + TdA_{hn}, \frac{LA(11)}{v} + TdA_{hn} \right).$$

发生死锁时要满足下式:

$$\frac{LA(3)}{v} + Td(A_{qn} - 1) \leq \frac{LA(11)}{v} + TdA_{hn},$$

$$\frac{LA(5)}{v} + Td(A_{qn} - 1) \geq \frac{LA(9)}{v} + TdA_{hn},$$

解得

$$\frac{LA(9) - LA(5)}{vTd} \leq (A_{qn} - A_{hn} - 1) \leq \frac{LA(11) - LA(3)}{vTd}. \quad (1)$$

当 n 为偶数或 n 为奇数 $Tz \leq TB - TA$ 时死锁的时间区段为

$$\left(\frac{LA(3)}{v} + Td(A_{qn} - 1) + Tl, \frac{LA(5)}{v} + Td(A_{qn} - 1) + Tl \right),$$

$$\left(\frac{LA(9)}{v} + TdA_{hn} + Tl, \frac{LA(11)}{v} + TdA_{hn} + Tl \right).$$

同理解得式(1).

其中: Td 为机车发车间隔时间, v 为机车行驶速度, A_{qn} 为序列A去往采区车场CH2的第 n 辆车, 序列为序列A回到车场CH1的第 n 辆车. $LA(n)$ 为序列A前 n 个进路的长度.

A去B回:

冲突路段为进路4, 同理解得当 n 为奇数 $Tz \geq TB - TA$ 时机车进入进路4的死锁时间区段为

$$\frac{LB(14) - LA(4)}{vTd} \leq (A_{qn} - B_{hn} - \frac{3}{2}) \leq \frac{LB(15) - LA(5)}{vTd}. \quad (2a)$$

n 为偶数或 n 为奇数 $Tz \leq TB - TA$ 时机车进入进路4的死锁时间区段为

$$\frac{LB(14) - LA(4)}{vTd} \leq (A_{qn} - B_{hn} - \frac{1}{2}) \leq \frac{LB(15) - LA(5)}{vTd}. \quad (2b)$$

B回B去:

冲突路段为进路(15, 16), 同理解得当 n 为任意情

况时机车进入进路4的死锁时间区段为

$$\frac{LB(9) - LB(7)}{vTd} \leq (B_{qn} - B_{hn} - 1) \leq \frac{LB(11) - LB(5)}{vTd}. \quad (3)$$

A回B回:

竞争路段为进路4, 同理解得当 n 为奇数 $Tz \geq TB - TA$ 时机车进入进路4的竞争时间区段为

$$\frac{LB(14) - LA(11)}{vTd} \leq (A_{hn} - B_{hn} - \frac{1}{2}) \leq \frac{LB(15) - LA(10)}{vTd}. \quad (4a)$$

n 为偶数或 n 为奇数时机车进入进路4的竞争时间区段为

$$\frac{LB(14) - LA(11)}{vTd} \leq (A_{hn} - B_{hn} + \frac{1}{2}) \leq \frac{LB(15) - LA(10)}{vTd}. \quad (4b)$$

将 $Td = 2L1/v$ 和表 2 中长度数据代入式 (1)(2a)(2b)(3)(4a)(4b)得到下式:

$$\begin{cases} \frac{1860}{2800} \leq (A_{qn} - A_{hn} - 1) \leq \frac{2460}{2800}, \\ \frac{4800}{2800} \leq (A_{qn} - B_{hn} - \frac{3}{2}) \leq \frac{5000}{2800}, \\ \frac{4800}{2800} \leq (A_{qn} - B_{hn} - \frac{1}{2}) \leq \frac{5000}{2800}, \\ \frac{1250}{2800} \leq (B_{qn} - B_{hn} - 1) \leq \frac{1850}{2800}, \\ \frac{2440}{2800} \leq (A_{hn} - B_{hn} - \frac{1}{2}) \leq \frac{2640}{2800}, \\ \frac{2440}{2800} \leq (A_{hn} - B_{hn} + \frac{1}{2}) \leq \frac{2640}{2800}, \end{cases}$$

其中 A_{qn} , A_{hn} , B_{qn} , B_{hn} 都为整数, 经过计算发现上述条件都不满足.

表 2 煤矿区段长度表

Table 2 Coal mine section length table

Pi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Li/m	1400	950	100	100	200	480	480	450	450	940	1400
Pi	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	—
Li/m	1200	300	100	100	200	650	600	350	600	600	—

从上述过程可以发现, 当机车发车间隔 Td 与机车速度 v 相关时, 机车死锁和竞争的发生与两者都没有关系, 只与机车区段长度有关, 而机车发车间隔 Td 的设置针对不同的情况有不同的值, 上述策略确定后结合Petri网模型可以通过可达树^[15]进行时间上的优化.

5 实验过程

本文的自动调度策略是对山西王坪矿场结构研究得到的, 是为在该矿场井下安装KJ654调度监控系统做准备, 在整个机车调度系统研发完成后, 首先通过人工模拟井下机车运行对调度监控系统的信号灯、位

置传感器等设备进行有效性进行验证, 人工模拟时数据如下:

9:15:02→E4号车离开车库: 303盘区01车场
 9:22:55→E3号车离开车库: 303盘区01车场
 ⋮
 9:43:58→E3进入车库: 303盘区02车场
 9:44:27→E4进入车库: 303盘区03车场
 ⋮
 9:48:58→E3离开车库: 303盘区02车场
 9:49:27→E4离开车库: 303盘区03车场
 ⋮
 10:12:05→E3进入车库: 303盘区01车场
 10:16:57→E4进入车库: 303盘区01车场
 ⋮

从数据中可以看出, 在人工模拟机车过程中, 机车车场等待时间为5 min, E3号车从01车场到02车场时间为22 min左右. E4号车从01车场到03车场时间为28 min左右.

机车在井下并非匀速行驶, 但结合表2可以看出 $L1/v \leq Tz \leq 2L1/v$ 且 $Tz \leq TB - TA$, 实际调度共有19辆机车, 选择情况2下BABA...A作为调度顺序.

选择好调度策略后, 由于人工难以完全模拟距离与速度的变化, 该实验为仿真实验, 将速度设置为 $Tz = 2L1/v$, Tz 不变为5 min, 得 $v = \frac{14}{3}$ m/s, 算出每个变迁 T 的时间, 将Petri网模型中每个变迁的时延设定好之后, 设定机车数目为9辆, 通过图4 Petri网模型进行仿真实验, 调度数据对比如表3所示, 1为数据库数据, 2为实验数据.

表3 调度数据对比表

Table 3 Dispatching data comparison table

	02车场	03车场	9车总用时
1	21分3秒	29分25秒	70分40秒
2	13分19秒	17分38秒	53分19秒

考虑到井下机车的速度具有一定的限制, 速度不变进行实验仿真, 对比如表4所示.

表4 调度数据对比表

Table 4 Dispatching data comparison table

	02车场	03车场	9车总用时
1	21分3秒	29分25秒	70分40秒
2	22分5秒	28分30秒	62分5秒

在速度大约一致时, 虽然单一车场时间相似, 但多辆机车时使用调度策略的也要更快一点.

在实际应用过程中, 该矿场井下有运料车, 运人车及运煤车各类车辆30余辆, 速度不一致, 情况较复杂, 但运煤车为普通矿车, 速度约为3~4 m/s, 矿车车皮数非常多, 所以机车装卸车时间比较长, 所以选择情况3下的调度策略.

在井下安装设备测试时出现了不少问题, 硬件问题居多, 而在调度策略方面, 是因为机车损坏等井下突发情况的出现, 所以最后的机车调度监控系统还是保留了人工调度的功能, 并未完全依赖自动调度, 但是依然能证明该调度策略能够指导井下机车调度, 提高调度效率.

6 结论

本文使用Petri网结合井下调度监控系统结构, 以真实井下矿场为实例, 提出了机车在井下轨道行驶下的Petri网模型, 基于该无死锁模型建立了模拟专业调度人员控制机车运行的调度策略. 并对调度策略进行了理论验证, 最后通过仿真实验以及实际应用验证了调度策略的有效性. 为井下自动调度系统的形成提供了行之有效的自动调度策略.

参考文献:

- [1] XUN Jiabao. *Research on intelligent monitoring and optimal dispatching system of mine track transportation*. Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2017.
(荀家宝. 矿井轨道运输智能监控与优化调度系统研究. 江苏: 中国矿业大学, 2017.)
- [2] VLADIMIR K, VALERY D. Petri nets as a tool for mine simulation. *Mineral Resources Engineering*, 1999, 8(4): 361 – 380.
- [3] GUO Zhiqi. *Dispatching modeling and Simulating of locomotive in mine based on Petri net*. Hefei: HeFei University of Technology, 2007.
(郭智奇. Petri网在井下机车调度中的建模与仿真. 合肥: 合肥工业大学, 2007.)
- [4] FANG Huan, LU Yang, XU Zijun. Resource allocation model and deadlock-free optimization scheduling for underground locomotive transportation. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(8): 2087 – 2096.
(方欢, 陆阳, 徐自军. 井下机车运输调度的资源分配模型及无死锁优化调度. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2087 – 2096.)
- [5] HUO Xiaoyu, YANG Shijiao, WU Changzhen. Particleswarm optimization for transportation dispatching system of open-pit mines. *Journal Of China Coal Society*, 2012, 37(S1): 234 – 239.
(霍晓宇, 杨仕教, 吴长振. 露天矿山运输调度系统粒子群优化. 煤炭学报, 2012, 37(S1): 234 – 239.)
- [6] NGUYEN V, BAO H P. An efficient solution to the mixed shop scheduling problem using a modified genetic algorithm. *Procedia Computer Science*, 2016, 95: 475 – 482.
- [7] CHEN Chen. *Optimization study on the freight organization of railway branch line base on Petri nets*. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
(陈晨. 基于Petri网的铁路支线货运组织优化研究. 成都: 西南交通大学, 2017.)
- [8] LI Guoqing, HOU Jie, HU Nailian. Integrated optimization model for production and equipment dispatching in underground mines. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(9): 1050 – 1057.
(李国清, 侯杰, 胡乃联. 地下矿山生产接续与设备调度集成优化模型. 工程科学学报, 2018, 40(9): 1050 – 1057.)

- [9] SENECA R, DIMITRAKOPOULOS R. Long-term mine production scheduling with multiple processing destinations under mineral supply uncertainty, based on multi-neighbourhood Tabu search. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020, 34(7): 459 – 475.
- [10] WANG Jianbin, HAN Jianghong, WEI Zhenchun. Modeling and verification of operation process control of underground unmanned locomotive. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 41(6): 773 – 779.
(王建斌, 韩江洪, 魏振春. 井下无人驾驶机车运行过程控制的建模与验证. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(6): 773 – 779.)
- [11] LI Honggang, WANG Yunpeng, LIAO Yaping. Unmanned mining vehicle perception and control method. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(11): 2335 – 2344.
(李宏刚, 王云鹏, 廖亚萍. 无人驾驶矿用运输车辆感知及控制方法. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(11): 2335 – 2344.)
- [12] WU Zhehui. *Introduction to Petri*. Beijing: Machinery Industry Press, 2006.
(吴哲辉. Petri网导论. 北京: 机械工业出版社, 2006.)
- [13] LI Yuliang. *Mine Locomotive Monitoring System*. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2003.
(李玉良. 矿井机车监控系统. 北京: 中国矿业大学出版社, 2003.)
- [14] LI Shaoyong, XIAO Xingda, CAI Ying, et al. A two-stage deadlock control policy with maximally reachable number for ordinary Petri nets. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(2): 243 – 250.
(李绍勇, 肖兴达, 蔡颖, 等. 普通Petri网最大可达数的两段式死锁控制策略. 控制理论与应用, 2017, 34(2): 243 – 250.)
- [15] BOUCHENEB H, LIME D, ROUX O H, et al. Optimal-cost reachability analysis based on time Petri nets. *International Conference on Application of Concurrency to System Design*. Bratislava: IEEE, 2018: 30 – 39.

作者简介:

李文宏 博士, 教授, 目前研究方向为煤矿井下监控系统、智能控制器、矿井电力漏电, E-mail: liwenhong6849@163.com;

郑建志 硕士研究生, 目前研究方向为煤矿井下监控系统, E-mail: 3034596613@qq.com.