

单采区大巷轨道运煤系统 HPN 模型的建立及分析

孙宇博¹, 陆刚², 叶怀珍¹

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 由于单采区大巷轨道运煤系统是一个复杂的离散事件和连续事件相结合的混合动态系统, 因此, 根据矿井轨道运输过程的混杂性, 应用排队网络法和混合 Petri 网建模技术对单采区轨道运输过程进行建模与分析。该模型能很好地描述单采区矿井轨道运煤系统的静态属性与动态行为, 为矿井轨道运煤系统的优化调度与控制提供了新的方法。

关键词: 采区; 轨道运输; 混合 Petri 网; 建模; 运煤系统

中图分类号: TD67 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2012)06-0073-04

HPN Model Establishment and Analysis of Coal Railway Transportation System in Mine Roadway of Single Mining Block

SUN Yu-bo¹, LU Gang², YE Huai-zhen¹

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The railway transportation system of the single mining block is a mixed dynamic system combined with a complicated dispersed incident and a continued incident. Thus according to the miscellaneity of the mine railway transportation process, the queuing network method and the mixed Petri net modeling technology were applied to the modeling and analysis on the railway transportation process in the single mining block. The model could well state the static attribute and the dynamic action of the mine railway transportation system in the single mining block and could provide a new method to the optimization dispatching and control of the mine railway transportation system.

Key words: mining block; railway transportation; mixed Petri net; modeling; coal transportation system

在连接单个采区的大巷轨道运煤系统中有双线运输和单线双向运输线路, 其中单线双向线路轨道运煤系统中涉及各种过程(如列车运行)、事件(如调车、装载等)和资源(如矿车、电机车、线路等), 因此可认为单采区大巷轨道运煤系统是复杂的离散事件和连续事件相结合的混合动态系统。为对矿井轨道运煤系统优化调度与控制, 采用混合 Petri 网(Hybrid Petri Net, HPN)对矿井轨道运输过程进行建模与分析。混杂 Petri 网是近年来在传统 Petri 网的基础上发展起来的一种新的 Petri 网模型, 是离散和连续事件系统并存的一种 Petri 网建模方法, 它具有表示形象, 修改方便, 以及可用于定性、定量分析, 实时监控和仿真可采用同一模型等优点, 并可以与实时数据库进行交互^[1]。

1 混合 Petri 网基本概念

1) 定义 1。定义 6 元组 $H_{PN} = (P, T, I, O, D, C)$ 为混杂 Petri 网系统^[2-3]。^①P 是库所的有限集合, 它分解为离散库所集合 P_d 与连续库所集合 P_c , 即 $P = P_d \cup P_c$ 。^②T 是变迁的有限集合, 它分解为离散变迁集合 T_d 与连续变迁集合 T_c , 即 $T = T_d \cup T_c$; T_d 再分解为即时变迁 T_i 与赋时离散变迁 T_t , 即 $T_d = T_i \cup T_t$; 而 T_t 再进一步分解为确定时间离散变迁 T_D 与随机离散变迁 T_E (其时延服从指数分布), 即 $T_t = T_D \cup T_E$ 。^③I 为输入函数, 它定义了从 P 到 T 的有向弧权的集合, $P_c T \rightarrow R_0^+$, $P_d T \rightarrow N_0^+$, 这里 R_0^+ 为非负实数, 而 N_0^+ 为非负整数。^④O 为输出函数, 它定义了从 T 到 P 的有向弧权的

收稿日期: 2011-12-27; 责任编辑: 赵瑞

作者简介: 孙宇博(1977—), 女, 河南睢县人, 讲师, 博士研究生。Tel: 13952182063, E-mail: cumtsyb@126.com

网络出版时间: 2012-06-15 10:27:00; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120615.1027.201206.73_020.html

引用格式: 孙宇博, 陆刚, 叶怀珍. 单采区大巷轨道运煤系统 HPN 模型的建立及分析 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6): 73-76.

集合， $TP_c \rightarrow R^+$ ， $TP_d \rightarrow N^+$ 。⑤D: $T_t \rightarrow R^+$ 定义确定时间离散变迁的时延 d 或服从指数分布的随机离散变迁的激发率 λ 。⑥对于任意连续变迁 $t_j \in T_e$ ，定义 $C(t_j) = (V'_j, V_j)$ ， $V'_j \leq V_j$ ，这里 V'_j 与 V_j 分别表示连续变迁 t_j 的最小激发速度与最大激发速度。

2) 定义 2。HPN 的标识 $m: P_d \rightarrow N^+$ ， $P_c \rightarrow R^+$ 为一函数^[2-3]，它为每一个离散库所分配一定数量的托肯，而为每一连续库所分配一定容量的“流体”。在时刻 τ 的系统标识记为 $m(\tau)$ ，初始时刻 τ_0 的系统标识为 $m(\tau_0)$ 。 P_c 与 P_d 的标识为 m_c 与 m_d ，分别为标识的连续与离散部分。

2 单采区大巷轨道运煤系统分析

2.1 大巷轨道运煤系统的实体构成

矿井轨道运煤系统由矿车、电机车、井底车场的卸载站、采区煤仓的装车站、轨道线路等实体所组成^[4]。矿车由电机车牵引，在井底车场的卸载站和采区煤仓间来回运行，通常每列车的矿车数为 15~20 辆。采区煤仓装车站负责将空车装上煤炭，其状态有装车、待装和空闲。卸载站负责将到达井底车场的煤炭卸至井底煤仓，其状态有卸载、待卸和空闲。调车线负责将空车（重车）列车到达装车站（卸载站）后，将空车推至空车（重车）存车线并挂钩，其状态有调车、矿车占用或空闲。轨道线路主要提供电机车和车辆运行的线路，其状态有占用和空闲。系统的各个实体都有各自的特征属性，如电机车与矿车的类型、煤仓容量及放煤口大小、车场类型及空重车线长度等，其属性特征值决定矿井轨道运煤系统的运行工作状态与运输能力。

2.2 大巷轨道运煤过程分析

电机车在井底车场和采区煤仓间的轨道线路上做往返行驶，矿车轨道运煤的基本过程^[5-6]如下。
 ①当电机车将从井底煤仓牵引过来的空车在空车线上调车完毕时，将驶至重车线上等待一列矿车装车完毕挂钩。②当空车推至采区煤仓放煤口下的装车线上，若采区煤仓煤量不低于最小量时，打开放煤口进行装车，装车完毕推至重车线上。当重车数达到一列车的矿车数时，等待电机车挂钩。③一列矿车全部完成装车后，在重车线上与电机车挂钩，当轨道线路处于空闲状态时，即可发车至井底车场，行驶速度为 v'_z 。④当电机车牵引重车列车运行至

井底车场，电机车将其牵引至井底车场的重车调车线后与其脱钩，并行驶至空车线，牵引空列车驶向采区。⑤在重车线上，脱钩的重车至井底车场卸车线，打开煤仓仓口，并卸煤至井底煤仓，空车被推至空车线上，等待电机车挂钩。

3 轨道运煤系统的混合 Petri 网建模

3.1 单采区大巷轨道运煤系统网络

在不考虑设备故障及各种事件的随机因素影响的情况下，即稳定状态的矿车轨道运煤过程中矿车的排队网络模型如图 1 所示。系统中每辆矿车在采区煤仓的平均装车时间为 t_z ，在井底车场的平均卸载时间为 t_x ，电机车牵引空车和重车在轨道线路上的平均运行速度分别为 v_k 、 v_z （考虑轨道坡度后的速度）。电机车在采区煤仓与空车脱钩后至重车线上的平均运行时间为 t_1 ，电机车在井底车场与重车脱钩后至空车线上的平均运行时间为 t_2 ，一列车的矿车数为 N ，采区煤仓空车线的最多停车数为 $N_{c,max}$ ，井底车场重车线的最多停车数为 $N_{j,max}$ ，根据《矿井轨道运输安全管理规程》的规定：井口、井底和上下山出口存车场长度不得小于规定列车长度的 1.5 倍。因此各空、重车存车线和调车线的线长为 $1.5N$ 。采区煤仓装车速度为每分钟装 N_z 辆矿车，则 $N_z = q_f/G$ ，其中： q_f 为采区煤仓的放煤速度， G 为矿车的载煤量。

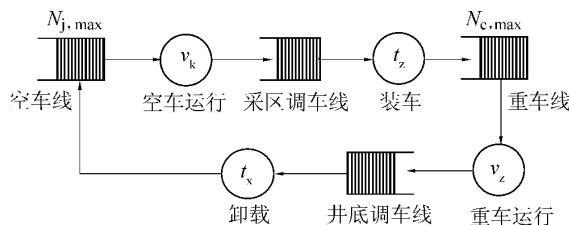


图 1 单采区单线轨道运煤系统排队网络模型

3.2 大巷轨道运煤系统的混合 Petri 网模型

在大巷运输阶段，采区煤仓、大巷轨道运煤系统、井底煤仓各子系统形成串联关系。由于系统中各个实体是受故障因素影响的，所以要考虑系统中设施设备的故障模型。大量的观测和许多文献资料^[5-7]表明：运输系统中的运输设备（电机车、大巷轨道）出现故障的时间和修复时间均是服从正态分布的概率变量，分别设电机车和大巷轨道的故障率和修复率分别为 λ_j 、 λ_x 和 μ_j 、 μ_x 。矿车轨道运煤系统主要由运输设施设备经装车、调车、大巷

运输、卸载等环节组成，采用模块化的建模方法建立大巷轨道运煤系统的 HPN 模型如图 2 所示^[8]，

图 2 中各库所和变迁的含义见表 1 和表 2。

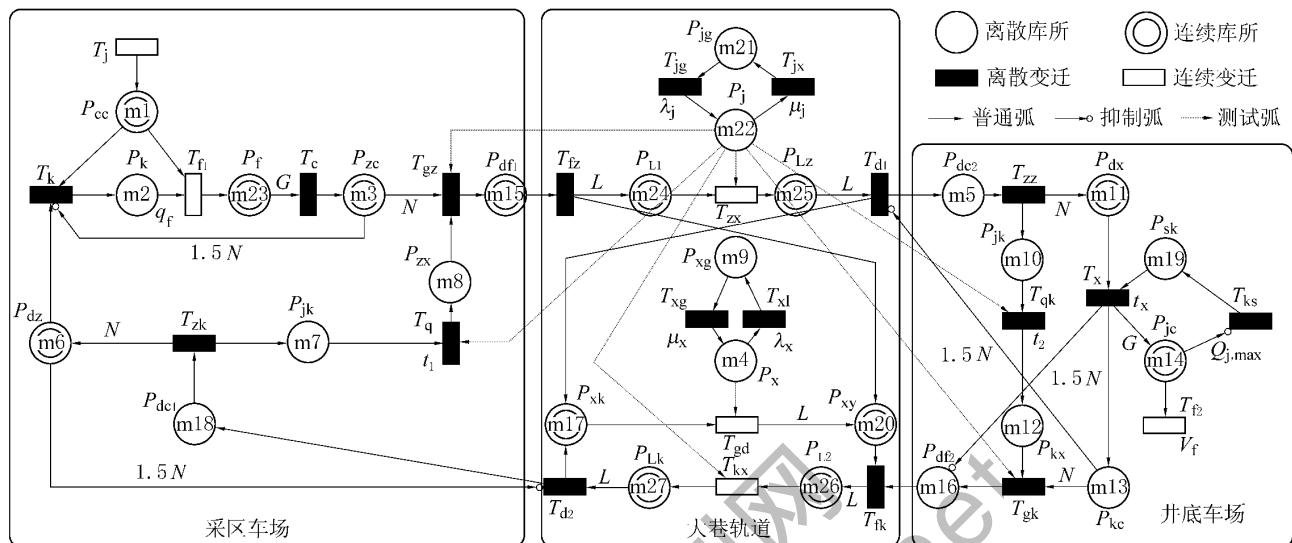


图 2 单采区单线轨道运煤系统 HPN 模型

表 1 各库所含义

库所	类型	标记的意义
P_{cc}	C (连续)	采区煤仓中的煤炭
P_k	D (离散)	采区煤仓开放状态
P_f	C (连续)	采区煤仓放煤
P_{ze}	C (连续)	装满的重矿车
P_{df1}	D (离散)	待发的重列车
P_{zx}	D (离散)	电机车至重车线
P_{jk}	D (离散)	电机车摘空状态
P_{dz}	C (连续)	待装的空矿车
P_{L1}	C (连续)	重列车要行驶的路长
P_{Lz}	C (连续)	重列车已行驶的路长
P_j	D (离散)	电机车完好状态
P_{jg}	D (离散)	电机车故障状态
P_x	D (离散)	线路完好状态
P_{xg}	D (离散)	线路故障状态
P_{sk}	C (连续)	线路空闲
P_{xy}	C (连续)	线路占用
P_{Lk}	C (连续)	空列车已行驶的路长
P_{l2}	C (连续)	空列车要行驶的路长
P_{dc2}	D (离散)	重列车达到井底车场调车线
P_{dx}	C (连续)	待卸的重矿车
P_{sk}	D (离散)	井底煤仓开上仓口
P_{je}	C (连续)	井底煤仓中的煤炭
P_{kc}	C (连续)	卸空的矿车
P_{kx}	D (离散)	电机车至空车线
P_{dl2}	D (离散)	待发的空列车

1) 系统模型 HPN 模型中, 装车站和卸载站均是单任务服务设施, 采用单一变迁表示; 卸煤由自卸式矿车或翻车机一次完成卸煤作业, 持续时间短

采用离散变迁 T_x ，设置 T_x 激发时间为一个矿车的卸煤作业时间；装煤过程采用连续变迁 T_f 表示，变迁的激发速度为放煤速度，由放煤口的大小来定。

表2 各变迁含义

变迁	类型	标记的意义
T_j	C (连续)	煤炭进入采区煤仓
T_k	D (离散)	采区煤仓开放
T_{fl}	C (连续)	采区煤仓放煤
T_c	D (离散)	装满一矿车煤炭
T_{gz}	D (离散)	电机车挂重矿车
T_{qz}	D (离散)	电机车去重车线
T_{zk}	D (离散)	电机车摘空列车
T_{fz}	D (离散)	发重列车
T_{zx}	C (连续)	重列车运行
T_{dl}	D (离散)	重列车到达井底车场
T_{jg}	D (离散)	电机车出现故障
T_{jx}	D (离散)	电机车正在修理
T_{xg}	D (离散)	线路出现故障
T_{xx}	D (离散)	线路正在修理
T_{fk}	D (离散)	发空列车
T_{kx}	C (连续)	空列车运行
T_{d2}	D (离散)	空列车到达采区车场
T_{zz}	D (离散)	电机车摘重列车
T_{qk}	D (离散)	电机车去空车线
T_{gk}	D (离散)	电机车挂空车
T_x	D (离散)	矿车卸煤
T_{ks}	D (离散)	井底煤仓开进煤口
T_{p}	C (连续)	井底煤仓放煤

2) 当空车到达装车线, 若采区煤仓非空, 打开采区煤仓的放煤口即给矿车装煤。设煤仓放煤速

度为 q_f ，一矿车的容量为 G ，当放煤量达到 G 时就有一辆矿车离开到重车线，当重车数达到 N 时就可作为一列车等待电机车挂钩驶离。

3) 采区调车线和重车等待线、井底车场的调车线和空车等待线均对相应停放的矿车数有一定限制^[9]。因此，模型中用库所 P_{zc} 至变迁 T_k 、库所 P_{kc} 至变迁 T_{zz} 、弧长表示调车线和存车线的线长。当停放的矿车达到相应的最大停车数时，通过 P_{zc} 至 T_k 的抑制弧来禁止后面矿车的进入。

4) 当重车达到井底车场的重车线，如果井底煤仓未满即可打开井底煤仓入仓口向煤仓卸煤，平均卸煤时间为 t_x ，每卸一辆矿车，井底煤仓中增加 G 的煤量。

5) 当电机车挂一列车后，仅在线路空闲条件下才可发车，重、空列车将要行使的线路长分别用 P_{L1} 和 P_{L2} 的标识数来表示，初始标识数均为 L 。

6) 重、空列车在轨道上运行分别采用连续变迁 T_{kx} 和 T_{zx} 表示，激发速度分别为各自运行的平均速度 v_k 和 v_z ，运行距离分别用 P_{Lz} 和 P_{Lk} 的标识数表示，当列车运行时， P_{Lz} 和 P_{Lk} 的标识数增加， P_{L1} 和 P_{L2} 的标识数就相应减少，当 P_{Lz} 和 P_{Lk} 的标识数达到大巷线路的长度 L 时表示到达，列车停止运行，分别用 P_{Lz} 至 T_{dl} 弧和 P_{Lk} 至 T_{d2} 弧的权数（即大巷线路长 L ）表示。

7) 电机车和轨道线路均存在可修复的故障，并且均服从负指数分布^[10]。模型中分别用 2 个离散库所与 2 个离散变迁表示电机车和轨道的工作状态。例如对于电机车来说，当电机车处于完好状态时库所 P_j 被标识；当库所 P_{jg} 标识时，标识电机车处于故障状态，而电机车的故障和维修分别对应着变迁 T_{jg} 和 T_{jx} 的激发。

4 结语

在对单采区大巷轨道运煤系统的构成要素及其运煤过程分析的基础上，构建了单采区单线轨道运煤系统排队网络模型，并由此建立了单采区轨道运煤系统混合 Petri 网模型。通过对单采区单线轨道运煤系统混合 Petri 网模型中各变量的使能激发规则的设定，模拟分析了单采区单线轨道运煤系统中矿车的综合实时调度过程，从而达到使整个过程能够在某些性能指标下达到最优调度与控制的目的。

参考文献：

- [1] 何贤会,高春华,王慧.基于混杂 Petri 网的混杂系统建模方法 [J].机电工程,2000(2): 69-72.
- [2] LIAO Wei - zhi, WANG Ru - liang, GU Tian - long. Scheduling and Control of Mixed Batch/Continuous Processes Based on GeneralHybrid Petri Net [C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 2005: 981-987.
- [3] 江志斌.Petri 网及其在制造系统建模与控制中的应用 [M].北京:机械工业出版社,2004: 168-189.
- [4] 贺文海.矿车运行状态及跑车捕捉过程的仿真研究 [D].西安:西安科技大学,2004.
- [5] 杨洪涛,张萍.煤矿大巷运输综合技术改造 [J].山东煤炭科技,2009(5): 19-21.
- [6] 郝传波,迟学海,苏广福.矿井井下运输系统的动态模拟 [J].黑龙江科技学院学报,2009,19(2): 154-157.
- [7] 章壮新,吴桂义.矿井大巷矿车运输系统模拟 [J].矿业安全与环保,2001,28(2): 21-22.
- [8] 张振菊.煤矿大巷轨道运输的安全性分析 [J].矿业安全与环保,2005,32(3): 13-15.
- [9] 叶阳东,程少芬,王旭,等.基于一种混合 Petri 网的列车运行系统的建模与分析 [J].铁道学报,2009,31(5): 32-35.
- [10] 戴华平,孙优贤.一种新型的混合 Petri 网建模及其分析方法 [J].浙江大学学报:工学版,2000,34(6): 608-612.

(上接第 72 页)

- [2] 余志生.汽车理论 [M].3 版.北京:机械工业出版社,2003: 135-139.
- [3] 黄其柏,王勇,赵明,等.汽车空气悬架系统的发展概况 [J].噪声与振动控制,2005,25(3): 13-15.
- [4] Hostens I. An Improved Design of Air Suspension for Seats of Mobile Agricultural Machines [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276: 141-156.
- [5] 喻凡,黄宏成.汽车空气悬架的现状发展趋势 [J].汽车技术,2001(8): 6-9.
- [6] 郑明军,王海花,王渊.空气弹簧弹性特性理论分析与试验研究 [J].噪声与振动控制,2009(3): 43-45.
- [7] 袁玉亮.基于模糊控制的空气悬架模型建立 [J].北华航天工业学院学报,2008,18(6): 22-25.
- [8] 江洪,祁晨宇,汪栋,等.空气弹簧特性试验研究 [J].机床与液压,2008,36(9): 204-207.
- [9] 单红艳.空气弹簧的弹性特性分析 [J].农业装备与车辆工程,2009(11): 30-33.
- [10] 魏寒冰.重型载重汽车空气悬架设计及悬架系统分析研究 [D].武汉:武汉理工大学,2006: 31-42.
- [11] 赵韩,袁敏,钱德猛.汽车悬架的空气弹簧与扭杆弹簧的性能对比分析 [J].现代制造工程,2005(11): 95-97.
- [12] 钱德猛.汽车空气悬架系统的参数化建模、分析及设计理论和方法研究 [D].合肥:合肥工业大学,2005: 31-42.
- [13] 陈刚.空气悬架客车操纵稳定性仿真和试验研究 [D].上海:上海交通大学,2005: 50-55.