

Research on Train Operation Safety of Large-Scale Railway Passenger Station Based on Petri Net*

Feng Xu, Qing Zhang, Xiaohong Chen

School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou
Email: 962396742@qq.com

Received: Jan. 18th, 2013; revised: Feb. 9th, 2013; accepted: Feb. 17th, 2013

Abstract: Based on the importance and complexity of large-scale railway passenger station operation safety, large-scale railway passenger station operation safety was analyzed by using the Petri net from the perspective human error and equipment failure. Taking the overrunning of signal accident of a railway passenger station an example, the accident model was built based on Petri net theory, then qualitative and quantitative analysis was made. The results show that Petri net could more clearly and accurately describe the operation accident process of railway passenger station and the calculated results reflect the situation of railway passenger station operation safety.

Keywords: Large-Scale Railway Passenger Station; Train Operation Safety; Qualitative and Quantitative Analysis; Petri Net

基于 Petri 网的铁路大型客运站行车安全研究*

徐 峰, 张 青, 陈晓红

兰州交通大学交通运输学院, 兰州
Email: 962396742@qq.com

收稿日期: 2013 年 1 月 18 日; 修回日期: 2013 年 2 月 9 日; 录用日期: 2013 年 2 月 17 日

摘 要: 鉴于铁路大型客运站行车安全的重要性和复杂性, 从人因错误和设备故障的角度出发, 应用 Petri 网对铁路大型客运站行车安全进行了系统分析。以某车站发生列车冒进信号事故为例, 依据 Petri 网相关理论构建事故模型, 并对模型进行定性和定量分析。研究表明, Petri 网能够更加清晰和准确地描述客运站行车事故过程, 计算得到的结果反映了客运站目前的行车安全状况。

关键词: 铁路大型客运站; 行车安全; 定性和定量分析; Petri 网

1. 引言

客运站是铁路与旅客之间的纽带, 同时也是铁路旅客运输的基层生产单位, 是铁路的窗口城市的大门。客运站工作质量直接影响到旅客、铁路、城市 3 个方面, 其运营的安全性与路网的安全畅通、生产效率甚

至经营效益密切相关。近年来该问题也成为铁路管理部门和相关学者高度关注的热点和难点问题。文献[1]采用了层次分析法(AHP)对客运站日常运营中的安全影响因素的重要度进行了分析; 文献[2]利用层次分析法得出影响因素对各个评价目标的相对权重, 运用模糊综合评判法对整个安全体系进行了多层次的综合评估方法。但上述大部分的研究所采用的评判方法受主观因素影响较大, 可能对计算结果产生一定影响。

*基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金(11YJCZH170); 兰州市科技局研政产合作支撑计划项目(2011-1-111); 甘肃省青年科技基金(1208RJYA054)。

Petri 网作为一种图形化的建模方法, 可以动态, 准确地模拟系统内部状态转移的过程。基于此, 本文根据客运站实际运营情况并结合面向对象的技术, 提出了一种基于对象的 Petri 网模型, 准确地描述了行车事故的发生和传播这一动态过程。

2. 铁路大型客运站行车安全影响因素分析

铁路客运站是一个复杂的大系统, 其内部结构复杂, 工作种类繁多, 影响其行车安全的因素错综复杂, 涉及面很广。从系统论的观点, 与客运站行车安全有关的因素可以划分为人、机器、环境以及管理^[3,4]。本文重点从人员和设备这两个方面去分析其对客运站行车安全的影响。

2.1. 人误因素

在安全问题上, 人往往起到主导作用。在人—机—环境这个系统中只有人能够发挥主观能动性, 在铁路运输生产中, 人操纵、控制、监督各项设备去完成各项作业, 所以高效、安全、可靠的人行为直接关系到铁路运输的安全与否。但据统计, 绝大多数事故的发生又与人的不安全行为有关。英国历年铁路事故责任分析资料表明, 由于职工失误操作而引起的事故比例远大于因为技术设备故障所占的比例。

影响客运站安全的人员主要包括: 运输系统内人员和运输系统外人员。运输系统内人员主要指车、机、工、电、辆、客、货等部门的作业人员, 他们是确保运输安全的最关键人员。系统外人员则指, 旅客、货主等。

影响安全作业的人的因素, 是指上述人员的安全素质, 这其中包括: 思想素质, 业务素质, 生理素质, 心理素质。

2.2. 设备故障因素

客运站基础设备: 1) 行车基础设备: 线路、道岔、信号设备(信号、联锁、闭塞)等。2) 客运基础设备: 站房、站台、站前广场、雨棚、天桥、地下通道等。

客运站技术设备: 1) 安全监测设备; 2) 安全监控设备; 3) 自然灾害预确报与防治设备; 4) 事故救援设备; 5) 其他安全设备。

影响客运站行车安全的设备因素: 1) 设计安全性

(设备的可靠性, 可维修性, 可操作性等)。2) 使用安全性^[5,6]。

3. 基于 Petri 网的大型客运站行车安全建模

3.1. Petri 网的基本理论^[7]

定义 1 一个 Petri 网表示为一个五元组

$$SPN = (P, T, F, W, Mo)$$

其中:

- 1) $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为库所(Place)的有限集合。
- 2) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为变迁(Transition)的有限集合, 且 $P \cup T \neq \Phi$, $P \cap T = \Phi$ 。
- 3) $F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$ 为存在于库所与变迁之间的有向弧集。
- 4) $W : F \rightarrow N+$ 为弧权函数, $N+ = \{1, 2, \dots\}$, $W(p, t)$ 和 $W(t, p)$ 分别表示由库所到变迁和由变迁到库所的弧权。
- 5) $M_0 : P \rightarrow N$ 为库所的初始标识, $N = \{0, 1, 2, \dots\}$ 。

定义 2

- 1) $\cdot t = \cdot t \cup t \cdot$ 称为 t 的外延。
- 2) 变迁发生条件: t 在 M 有发生权的条件是: $\forall p \in \cdot t : M(p) \geq W(p, t)$;
 t 在 M 有发生权也可以叫做 M 授权 t 发生或者 t 在 M 的授权下发生的。
- 3) 变迁发生后果: 若 t 在 M 授权下发生, 则标识 M 改变为 M 的后继 M' , M' 定义为:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - W(p, t) & \text{若 } p \in \cdot t - t \cdot \\ M(p) + W(p, t) & \text{若 } p \in t \cdot - \cdot t \\ M(p) - W(p, t) + W(p, t) & \text{若 } p \in \cdot t \cap t \cdot \\ M(p) & \text{若 } p \notin \cdot t \cdot \end{cases}$$

3.2. 大型客运站的行车安全 Petri 网模型

根据面向对象技术以及对客运站行车安全影响因素分析, 可以具体将客运站系统划分为人、站房、站台、线路、信号、车辆等 6 个对象类模块, 如图 1 所示: MP_1 表示源库所(初始状态); MP_8 表示汇库所(终止状态); $MP_2, MP_3, MP_4, MP_5, MP_6, MP_7$ 分别对应不同的对象类模块, 称为对象库所。圆角矩形表示对象模块的封装, 即对象库所; 圆形代表对象内部的

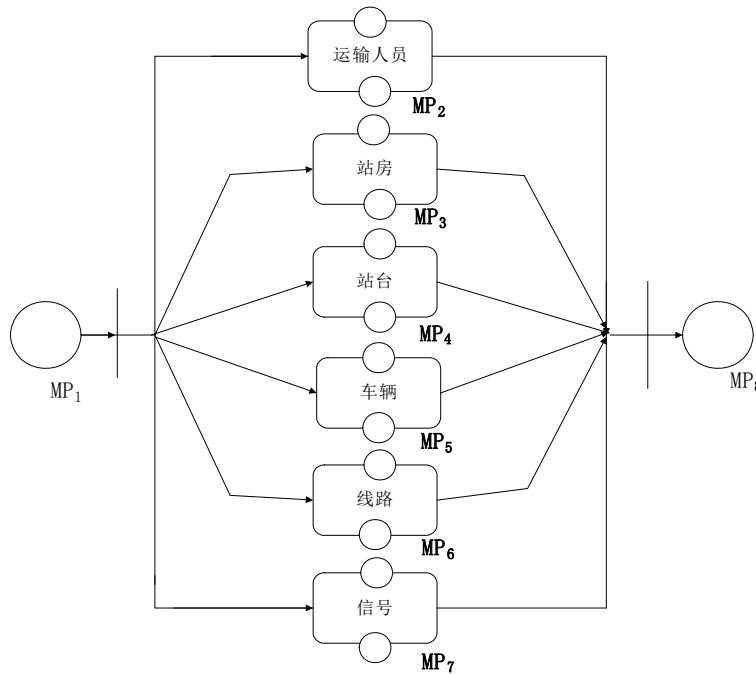


Figure 1. The model of large-scale railway passenger station operation safety based on Petri net
图 1. 基于 Petri 网的大型客运站行车安全模型

库所；短直线代表思维变迁。各对象类模块中的对象是作为一个单独整体来考虑的，而对象内部又是由不同层次的各单元结构所组成。对象类模块中的对象是由各种设备按一定的可靠性逻辑(如串联、并联、选择等)关系所组成的，其中的设备由各种部件组成，而部件又是由各种元件所组成。元件还可进一步细化下去，直到基本单元为止。如此，可将对象划分为若干层次，每个层次由属于该层次的若干单元组成，每个层次可构建对应的 Petri 网模型。

4. 实例分析

某车站运输生产过程中，由于列车冒进信号产生的列车冲突，脱轨等重大事故给客运站安全生产造成了极为严重的影响。现就列车冒进信号事故最主要因素，按照其逻辑关系，作出如图 2 所示的 Petri 网描述模型。Petri 网中，库所和变迁的含义如表 1 所示。

4.1. 模型的安全性分析

4.1.1. 定性分析

由图 2 可知，Petri 网模型结构中含有并发，条件，或，与等连接关系，定性分析可知：

1) 此 Petri 网中导致事故发生的逻辑连接多为或连接，所以系统的危险性较大。

2) 由源库所 P_1 引发的事故原因库所 P_3, P_4, P_5, P_9 皆为人的因素所致，所以人的可靠性就成了影响系统安全运营的主要因素。

4.1.2. 定量分析

Petri 网模型的计算方法：

定义一个含有时间特性的 Petri 网模型，设各转换的发射时间 (T_i) 为一随机变量，并服从指数分布，其概率分布函数 $F_i(T) = \int_0^T \lambda_i e^{-\lambda_i x} dx$ ^[8]。 λ_i 对应各变迁 t_i 的平均发射概率， $F_i(T)$ 表示变迁 t_i 所对应发射时间 T_i 的概率分布， $Q_{M_i M_j}(T)$ 表示变迁 t_i 在时间 T 内，系统标识由 M_i 变迁到 M_j 的概率。 F_{ik} 表示系统经过一个给定的变迁序列 (t_i, \dots, t_k) 后，标识由 M_i 到 M_j 的概率。 n 为标识由 M_i 变迁到 M_j 所经历变迁的个数。如果变迁只有一个可达集，则由于只经历一个变迁 t_i 的时间为 T ，因此标识由 M_i 变迁到 M_j 的概率

$Q_{M_i M_j} = F_i(T) = \int_0^T \lambda_i e^{-\lambda_i x} dx$ ；以此类推在有两个或者两个以上的变迁时，需要计算在时间 T 内，不发生变迁 (t_k, \dots, t_n) 以及发生变迁 t_i 的概率，则由标识由 M_i 变迁到 M_j 的概率 $Q_{M_i M_j} = F_i(T) = \int_0^T \lambda_i e^{-(\lambda_i + \lambda_k + \dots + \lambda_n)x} dx$ 。

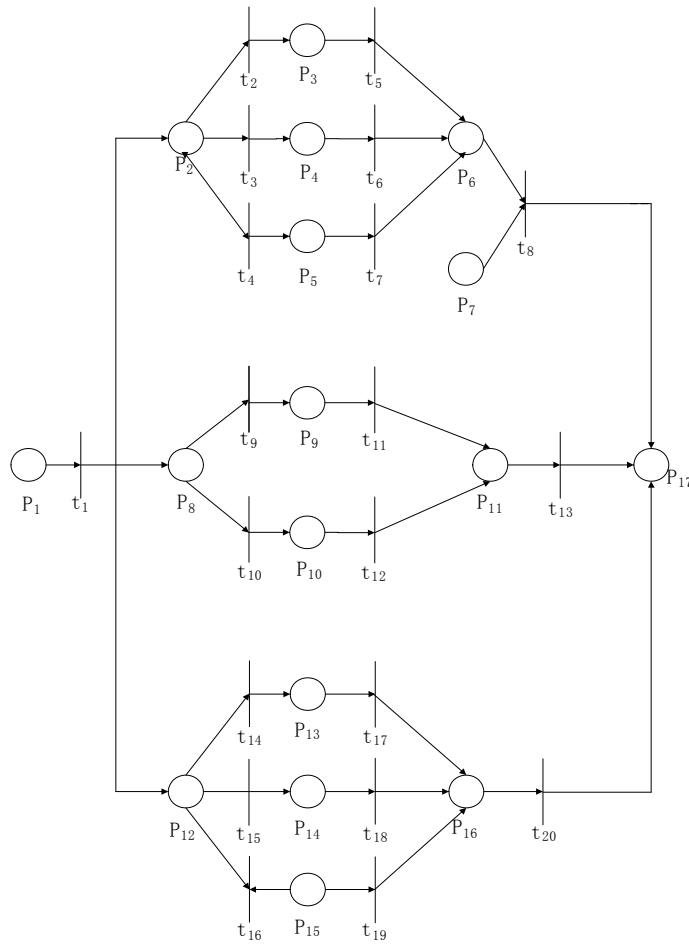


Figure 2. Petri net model of overrunning of signal
图 2. 列车冒进信号的 Petri 网模型

Table 1. The meaning of places and transitions in the Figure 2
表 1. 图 2 中库所和变迁所代表的含义

库所	含义	变迁	含义
P_1	列车正常运行	t_1	列车开始进站
P_2	轨司正常控制机车	t_2	机车乘务员麻痹大意
P_3	误认信号	t_3	机车乘务员超速、使闸晚
P_4	操纵不当	t_4	机车乘务员疲劳作业
P_5	间断瞭望	t_5	机车乘务员错误作业
P_6	机车乘务员作业失误列车冒进信号行驶	t_6	机车乘务员错误作业
P_7	安全防护失灵	t_7	机车乘务员错误作业
P_8	进站信号机正在工作	t_8	未发现列车冒进信号
P_9	信号员错办信号	t_9	信号员违章作业
P_{10}	信号灯故障	t_{10}	电缆故障
P_{11}	信号突变列车冒进信号行驶	t_{11}	车站信号设备发生故障
P_{12}	车辆制动装置正在工作	t_{12}	车站信号设备发生故障
P_{13}	折角塞门关闭	t_{13}	未发现列车冒进信号
P_{14}	风缸发生故障	t_{14}	列车途中多次制动
P_{15}	风泵发生故障	t_{15}	风缸泄露
P_{16}	列车无法及时制动冒进信号行驶	t_{16}	风泵无法打气
P_{17}	列车发生事故	t_{17}	车辆制动装置发生故障
		t_{18}	车辆制动装置发生故障
t_{20}	未发现列车冒进信号	t_{19}	车辆制动装置发生故障

而对于一个给定的变迁序列 $f_{ij} = \prod_{i \in E} Q_{M_i M_j}$ ，可以得到系统由状态 i 到状态 j 的发生概率为 $F_{ij} = \sum_n f_{ij}^n$ ，其中， h 为系统从状态 i 到状态 j 所有可能得变迁个数。

Petri 网模型的求解

由于列车冒进信号的 Petri 网模型可达集数量巨大，本文以系统的各对象模块为基础逐层分析，而可能导致列车冒进信号事故的对象模块有运输人员，信号系统，车辆系统。

根据铁路行车关键工种人员可靠性分析以及车站运输设备使用手册对各变迁的平均发射率进行假设，如表 2。

现以客运站运营 365 天为例，计算一年内发生行车事故的概率。在运输人员模块子网内，可能导致列车冒进事故的标识集为 $M_1(P_2, P_3, P_6, P_7)$ ； $M_2(P_2, P_4, P_6, P_7)$ ； $M_3(P_2, P_5, P_6, P_7)$ ，其对应的变迁序： t_1, t_9, t_{11}, t_{13} ； $t_1, t_{10}, t_{12}, t_{13}$ 。

信号模块子网：可能导致列车冒进信号事故的标识集为： $M_4(P_8, P_9, P_{11})$ ； $M_5(P_8, P_{10}, P_{11})$ ，其对应的变迁序列分别是： t_1, t_9, t_{11}, t_{13} ； $t_1, t_{10}, t_{12}, t_{13}$ 。

车辆模块子网：可能导致列车冒进信号的标识集为： $M_6(P_{12}, P_{13}, P_{16})$ ； $M_7(P_{12}, P_{14}, P_{16})$ ； $M_8(P_{12}, P_{15}, P_{16})$ ，其对应的变迁序列分别是： $t_1, t_{14}, t_{17}, t_{20}$ ； $t_1, t_{15}, t_{18}, t_{20}$ ； $t_1, t_{16}, t_{19}, t_{20}$ 。

现根据变迁的激发概率得到标识 M_1 变迁序列中变迁的权值以及所经历的近似时间，如表 3。

计算 E_1 的发生概率：

$$P_{E_1}^1 = \int_0^{T_1} \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} dx = 1$$

$$P_{E_1}^2 = \int_0^{T_2} \lambda_2 e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) x} dx = 0.0332$$

$$P_{E_1}^3 = \int_0^{T_5} \lambda_5 e^{-\lambda_5 x} dx = 0.0285$$

$$P_{E_1}^4 = \int_0^{T_8} \lambda_8 e^{-\lambda_8 x} dx = 0.0089$$

所以，因机车乘务员误认信号导致列车冒进信号的概率： $P_{E_1} = 8.4212e-6$ 。同理分别计算出 $P_{E_2} = 1.4256e-5$ ； $P_{E_2} = 1.4256e-5$ 。

在信号模块子网和车辆模块子网用同样的方法求得： $P_{E_4} = 6.7989e-10$ ； $P_{E_5} = 2.9104e-7$ ； $P_{E_6} = 5.1084e-8$ ； $P_{E_7} = 4.455e-8$ ； $P_{E_8} = 1.9602e-8$ 。

这样得到整个系统在 365 天内发生列车冒进信号事故的概率为 $F_{ij} = \sum_n f_{ij}^n = 4.0485e-5$ 。计算结果与实际客运站行车事故状况比较吻合。

根据上述对可能导致事故标识集的概率计算可以看出，机车乘务员作业失误最容易导致列车冒进信号的发生，其中又以间断瞭望出现的概率最高。因此，要不断加强运输人员的安全意识，针对机车乘务员，还要在上岗前保证其良好的身体状况，严禁出现疲劳作业。

此外，机车安全防护装置一旦失灵，将为列车发生事故埋下隐患，因此，也是系统安全性的薄弱环节之一。这一类设备要经常检查，发现故障及时检修、

Table 2. Excitation probability of transitions in the Figure 2
表 2. 图 2 中变迁的激发概率

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
1.000	0.01	0.015	0.015	0.009	0.008	0.008	0.005	0.005	0.01
λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}	λ_{16}	λ_{17}	λ_{18}	λ_{19}	λ_{20}
0.0008	0.008	0.003	0.008	0.007	0.005	0.005	0.003	0.003	0.001

Table 3. The weight and time of transitions in the M_1 transition sequence
表 3. 标识 M_1 变迁序列中变迁的权重及时间

W_1	W_2	W_5	W_8
0.97656	0.009766	0.008789	0.004883
T_1	T_2	T_5	T_8
356.4451	3.56445	3.20801	1.78223

更换,防止因安全防护装置失灵造成列车事故。

5. 结论

本文利用 Petri 网的相关知识对大型客运站的安全运营进行了分析和研究,将客运站运营系统划分为 6 大对象模块,以各模块为单位逐层分析,给出了相对准确的定量分析,避免了因系统复杂而可能遇到的状态空间爆炸等难题。模型中变迁的激发概率参数具有实际的物理意义,本文由于缺少系统在实际运行过程中的统计数据,只是对数据进行了假设,在后续的研究中还需进行更为深入的统计与分析工作。

参考文献 (References)

[1] 陈明仙,沈斐敏. AHP 对客运站安全影响因素的重要度分析

- [J]. 安全健康, 2006, 5: 40-42.
- [2] 杨超琼,徐志胜,姜学鹏,袁步平. 铁路大型客枢纽站安全评估[J]. 中国公共安全(学术版), 2010, 2: 1-5.
- [3] 肖贵平. 铁路行车安全评价研究[J]. 中国安全科学学报, 1995, 5(4): 32-35.
- [4] 姚鑫. 铁路大型客运站行车安全评价研究[D]. 西南交通大学, 2007.
- [5] 秦进. 运输安全管理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009.
- [6] 鞠洪钦. 高速铁路客运站不安全因素与运营可靠性[J]. 铁道运输与经济, 1999, 21(5): 25-27.
- [7] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [8] Y. Dutuit, F. Inna, A. Rauzy and J. Signoret. Probabilistic assessments in relationship with safety integrity levels by using fault trees. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(12): 1867-1876.