

工程硕士学位论文

**概率弧Petri网及其在路径寻优中的应用**

Probability Arc Petri Nets and its Application in Path Optimization

**作 者 刘雷**

**导 师 刘伟 教授**

山东科技大学

二〇一九年六月

中图分类号 TP39 学校代码 10424

UDC 密 级 公开

山东科技大学

硕士学位论文

**概率弧Petri网及其在路径寻优中的应用**

Probability Arc Petri net and Its Application in Path Optimization

作 者 刘雷 入学时间 2016年9月

导 师 刘伟 职 称 教授

申请学位 工程硕士 所在学院 计算机科学与工程学院

学科（类别）计算机技术 方向（领域）软件开发与系统集成

答辩日期2019年06月01日 提交日期 2019年06月10日

**学位论文使用授权声明**

本人完全了解山东科技大学有关保留、使用学位论文的规定，同意本人所撰写的学位论文的使用授权按照学校的管理规定处理。

作为申请学位的条件之一，学校有权保留学位论文并向国家有关部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库发表，并可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版；允许学校档案馆和图书馆保留学位论文的纸质版和电子版，可以使用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文；为教学和科研目的，学校档案馆和图书馆可以将公开的学位论文作为资料在档案馆、图书馆等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。

（保密的学位论文在解密后适用本授权）

作者签名： 导师签名：

日 期： 年 月 日 日 期： 年 月 日

**学位论文原创性声明**

本人呈交给山东科技大学的学位论文，除所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人攻读学位期间在导师指导下的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：

                                      年   月   日

**学位论文审查认定书**

研究生 在规定的学习年限内，按照培养方案及个人培养计划，完成了课程学习，成绩合格，修满规定学分；在我的指导下完成本学位论文，论文中的观点、数据、表述和结构为我所认同，论文撰写格式符合学校的相关规定，同意将本论文作为申请学位论文。

导师签名：

日 期：

摘 要

在对业务流程建模时，越来越多的人使用Petri网。Petri网能够直观的、动态的描述业务流程的运行过程。根据Petri网对业务流程建立的模型分析业务流程的性质，并对业务流程进行优化，从而提高业务流程的性能。使用现有的Petri网对具有选择分支的业务流程建模，但在描述资源选择哪条分支时还存在不足，无法判断哪条分支相对于整个流程是最优的。因此针对这一问题我们提出了概率弧Petri网，并结合我们提出的基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中的应用，对其使用概率弧Petri网进行建模及分析并获得最优路径。本文的研究内容如下：

（1）针对业务流程中的流程优化问题，基于逻辑Petri网和随机Petri网提出了概率弧Petri网。概率弧Petri网是基于逻辑Petri网，在库所输入弧上添加了变迁引发后托肯进入不同库所的概率，同时为库所添加了预测函数，预测函数是根据库所属性集合中的属性预测托肯进入该库所的前集变迁引发所需要的时间。概率弧Petri网中存在两种托肯，其中一种是模拟托肯，用来模拟业务流程的运行，寻找业务流程中的最优路径；另外一种是主托肯，主托肯根据库所输入弧上的值判断进入哪个库所。并对概率弧Petri网重新定义变迁引发规则。概率弧Petri网具有灵活性，可以根据不同的业务流程更改预测函数和转入率表达式，使概率弧Petri网能够为业务流程寻找最优路径。并通过仿真工具对概率弧Petri网进行验证。

（2）针对智能道路系统中最优路径寻找的准确性问题，提出了基于蚁群算法的路径寻优算法。首先通过智能道路交通系统获取道路中的车流量、初始车辆密度，并使用概率弧Petri网的预测函数预测道路上车辆到达时刻的速度。在计算蚂蚁转入下一个道路时加入预测的速度，使改进的路径寻优算法能够为车辆寻找花费时间最短的路径。每当车辆进入一个新路口时，都要进行一次路径寻优算法，为车辆不断地矫正到达目的地的最优路径，避免车辆进入由于突发事件导致拥堵的路段。同时通过概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法的路网进行建模，根据概率弧Petri网的变迁引发规则寻找从开始节点到目标节点的最优路径。通过分析可达图的可达性，分析车辆的运行状态。并对比其它Petri网在业务流程建模时存在的优势。

关键词：概率弧Petri网；最优路径算法；速度预测；智能交通；蚁群算法

**Abstract**

In modeling business processes, more and more people use Petri Nets to model business processes. The Petri nets can intuitively and dynamically describe the running process of business processes. By analyzing the model established by Petri nets for business processes, analyzing the nature of business processes and optimizing business processes to improve the performance of business processes. However, in the present Petri Nets, there is no proper model to describe the business process with choice structures and it is impossible to judge which branch is optimal with respect to the entire process. Therefore, we propose a Probability Arc Petri Nets for this problem and combined it with our propose Dynamic Path Optimization Algorithm based on Ant Colony Algorithm in intelligent road traffic system to modeling and analysis. The optimal path can be derived by simulationof a Probability Arc Petri Nets. The research content of this thesis is as follows:

(1)Probability Arc Petri nets are proposed based on Logical Petri nets and Probability Petri nets for the problem of path optimization in business processes. The Probability Arc Petri nets add the Probability on the input arc of the place base on Logical Petri Nets and this Probability can decide the token entering which one place. At the same time, the prediction function is added to the place, and the prediction function is based on the attribute set of the place to predict the transition firing time while tokens enter the place. There are two kinds of tokens in the Probability Arc Petri nets, one of which is the simulate token, which is used to simulate the operation of business processes and find the optimal path in the business process. The other is the mainly token. The mainly token enters different places according to the Probability on the input of the place. And the transition firing rule is redefined for the Probability Arc Petri nets. The Probability Arc Petri nets have the flexibility by change the prediction function and the transfer rate expression according to different business processes, so that the Stochatic Arc Petri nets can find the optimal path for the business process.

(2) Aiming at the problem of accuracy for dynamic optimal path finding in intelligent road systems, a Dynamic Path Optimization Algorithm based on Ant Colony Algorithm is proposed. First, the traffic flow in the road and the initial vehicle density are obtained through the intelligent road traffic system, and the speed of the vehicle at the time of arrival of the vehicle on the road is predicted according to the Prediction function of Probability Arc Petri nets. The predicted speed is added when calculating the ant colony to move to the next road, so that the improved path optimization algorithm can find the shortest path for the vehicle. Whenever a vehicle enters a new intersection, a Dynamic Path Optimization Algorithm is performed to continuously correct the optimal path to the destination for the vehicle, and to avoid the vehicles entering road congestion due to unexpected events. At the same time, the intelligent road traffic system is modeled by the Probability Arc Petri nets, and the optimal path in the road is found according to the transition firing rule. According to the Reachable Graph of the Probability Arc Petri nets, the intersection passing through the optimal path is found. And analyze the shortcomings of other Petri nets in modeling business processes with choice structures.

**Key words:** Probability Arc Petri nets; Optimal Path; Speed Prediction; Intelligent Traffic System; Ant Colony Algorithm;

# 目 录

图清单……………………………………………………………………………………Ⅰ

表清单…………………………………………………………………………………………9

变量注释表…………………………………………………………………………………9

[1 绪论 1](#_Toc6651897)

[1.1研究背景及意义 1](#_Toc6651899)

[1.2国内外研究现状 2](#_Toc6651900)

[1.3研究内容 4](#_Toc6651901)

[1.4论文组织结构 5](#_Toc6651902)

[2 基本知识 7](#_Toc6651903)

[2.1 Petri网 7](#_Toc6651905)

[2.2 蚁群算法 10](#_Toc6651906)

[2.3本章小结 13](#_Toc6651907)

[3 概率弧Petri网 14](#_Toc6651908)

[3.1概率弧Petri网相关定义 14](#_Toc6651910)

[3.2概率弧Petri仿真工具 18](#_Toc6651911)

[3.3 基于SAPN的普通路网建模与分析 21](#_Toc6651912)

[3.4本章总结 24](#_Toc6651913)

[4 概率弧Petri网与基于蚁群算法的路径寻优算法 25](#_Toc6651914)

[4.1 ITS的信息获取 25](#_Toc6651916)

[4.2 概率弧Petri网的参数 26](#_Toc6651917)

[4.3基于蚁群算法的路径寻优算法的预测函数 27](#_Toc6651918)

[4.4 概率弧Petri网中路径寻优算法的相关定义及算法 30](#_Toc6651919)

[4.5路况描述及速度预测仿真 34](#_Toc6651920)

[4.6本章总结 35](#_Toc6651921)

[5概率弧Petri网对基于路径寻优算法的路网建模与分析 36](#_Toc6651922)

[5.1 概率弧Petri网建模与分析 36](#_Toc6651924)

[5.2性质分析 40](#_Toc6651925)

[5.3算法对比 45](#_Toc6651926)

[5.4模型对比 46](#_Toc6651927)

[5.5 本章总结 46](#_Toc6651928)

[6 总结与展望 47](#_Toc6651929)

[6.1总结性 47](#_Toc6651931)

[6.2 展望 48](#_Toc6651932)

**参考文献**

**作者简历**

**致谢**

# Contents

**List of Figures……………………………………………………………………………Ⅰ**

**List of Tables……………………………………………………………………………11**

**List of Variables……………………………………………………………..…………11**

[**1 Introduction 1**](#_Toc6479341)

[1.1 Background and Significance 1](#_Toc6479342)

[1.2 Research Status at Home and Abroad 2](#_Toc6479343)

[1.3 Research Contents 4](#_Toc6479344)

[1.4 Organizational Structure of Thesis 5](#_Toc6479345)

[**2 Relevant Knowledge 7**](#_Toc6479347)

[2.1 Petri Nets 7](#_Toc6479348)

[2.2 Ant Colony Optimization 10](#_Toc6479349)

[2.3 Summary 13](#_Toc6479350)

[**3 Probability Arc Petri Net 14**](#_Toc6479352)

[3.1 Probability Arc Petri Net Definition 14](#_Toc6479353)

[3.2 Probability Arc Petri Simulation Tool 18](#_Toc6479354)

[3.3 Modeling and Analysis of Ordinary Road Network Based on SAPN 21](#_Toc6479355)

[3.4 Summary 24](#_Toc6479356)

[**4 Probability Arc Petri Nets and the Path Ptimization Algorithm Based on Ant Colony Algorithm 25**](#_Toc6479358)

[4.1ITS Road System 25](#_Toc6479359)

[4.2 Parameters of Probability Arc Petri Nets 26](#_Toc6479360)

[4.3 Prediction Function of Path Optimization Algorithm Based on Ant Colony Algorithm 27](#_Toc6479361)

[4.4 Correlation Definition of Path Optimization Algorithm Based on Ant Colony Algorithm 30](#_Toc6479362)

[4.5 Traffic Road Description and Speed Prediction Simulation 34](#_Toc6479363)

[4.6 Summary 35](#_Toc6479364)

[**5 Modeling and Analysis of Road Network Based on Ant Colony Optimization Algorithm by Probability Arc Petri Nets 36**](#_Toc6479366)

[5.1 Modeling and Analysis of Probability Arc Petri Nets 36](#_Toc6479367)

[5.2 Property Analysis 40](#_Toc6479368)

5.3Algorithm Comparison………………………………………………………………………………………………45

[5.4 Model Comparison 46](#_Toc6479369)

[5.5 Summary 46](#_Toc6479370)

[**6 Conclusions and Prospects 47**](#_Toc6479372)

[6.1 Conclusions 47](#_Toc6479373)

[6.2 Prospects 48](#_Toc6479374)

**References**

**Author’s Resume**

**Acknowledgements**

# 图清单

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 图序号 | 图名称 | 页码 |
| 图2.1 | 图2.1 普通Petri网 | 8 |
| Fig.2.1 | Ordinary Petri Nets | 8 |
| 图2.2 | 带有逻辑输入变迁的LPN | 9 |
| Fig.2.2 | LPN with Logical input Transition | 9 |
| 图2.3 | 带有逻辑输出变迁的LPN | 9 |
| Fig. 2.3 | LPN with Logical output Transition | 9 |
| 图2.4 | SPN示例 | 10 |
| Fig. 2.4 | SPN Example | 10 |
| 图2.5 | 图2.4模型的马尔科夫 | 10 |
| Fig. 2.5 | Fig. 2.4 Model of Markov | 10 |
| 图2.6 | 图2.6 蚂蚁觅食过程 | 11 |
| Fig. 2.6 | Fig. 2.6 Ant Foraging Process | 11 |
| 图3.1 | SAPN变迁引发流程图 | 17 |
| Fig.3.1 | Figure3.1 Flow Chart of SAPN Transition | 17 |
| 图3.2 | 抑止弧表示的三种基本结构 | 20 |
| Fig. 3.2 | Three Basic Structures Represented by the Suppression Arc | 20 |
| 图3.3 | Tina的编辑界面中的可达界面 | 21 |
| Fig. 3.3 | The Reachable Interface in Tina's Editing Interface | 21 |
| 图3.4 | 概率弧Petri网示例 | 21 |
| Fig.3.4 | Example of Probability Arc Petri Nets | 21 |
| 图3.5 | 变迁Tf1将要引发 | 22 |
| Fig. 3.5 | Transition Tf1 will Fire | 22 |
| 图3.6 | TOKM引发变迁t0 | 23 |
| Fig. 3.6 | TOKM Makes Transion t0 firing | 23 |
| 图4.1 | 车辆发出请求信号到获取路径流程图 | 26 |
| Fig 4.1 | Flow Chart of the Vehicle Sending Request Signal to the Acquisition Path | 26 |
| 图4.2 | 车辆运行中车辆密度的计算 | 28 |
| Fig 4.2 | Calculation of Vehicle Density During Vehicle Operation | 28 |
| 图4.3 | 速度、时间、距离的关系图 | 29 |
| Fig 4.3 | Speed, Time, Distance Diagram | 29 |
| 图4.4 | 改进的蚁群最优路径选择算法流程图 | 32 |
| Fig 4.4 | Improved Ant Colony Optimal Path Selection Algorithm Flow Chart | 32 |
| 图4.5 | 某地区路段拓扑结构图 | 34 |
| Fig 4.5 | Topological Structure of a Section of a Certain Area | 34 |
| 图5.1 | 普通Petri网对路网进行建模 | 37 |
| Fig 5.1 | Ordinary Petri Nets Model the Road Network | 37 |
| 图5.2 | 基于概率弧Petri网对改进蚁群算法的动态路径建模 | 38 |
| Fig 5.2 | Dynamic Path Modeling of Improved Ant Colony Algorithm Based on Probability Arc Petri Nets | 38 |
| 图5.3 | 概率弧Petri网第一次路径寻找 | 38 |
| Fig 5.3 | Probability Arc Petri Nets Simulation for the First Time Path Finding | 38 |
| 图5.4 | TOKM使变迁tb引发 | 39 |
| Fig 5.4 | TOKM makes transition tb firing | 39 |
| 图5.5 | 图5.5 TOKM使变迁t1引发后 | 39 |
| Fig 5.5 | After TOKM Makes Transition t1 Firing | 39 |
| 图5.6 | 最优路径寻找结束 | 40 |
| Fig 5.6 | End of optimal path finding | 40 |
| 图5.7 | 基于蚁群算法的最优路径寻找的智能道路建模的可达图 | 44 |
| Fig. 5.7 | Reachable Graph of Intelligent Road Modeling Based on Ant Colony Algorithm for Optimal Path Finding | 44 |
| 图5.8 | 不同算法下的预测时间与车辆运行时间 | 45 |
| Fig. 5.8 | Prediction Time and Vehicle Running Time under Different Algorithms | 45 |

# 表清单

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 表序号 | 表名称 | 页码 |
| 表 4.1 | 最优路径寻找过程中对应的概率弧Petri网中的符号含义 | 27 |
| Table4.1 | Symbolic meanings in the Probability Arc Petri Nets in the optimal path finding process | 27 |
| 表4.2 | 各路段初始参数 | 34 |
| Table 4.2 | Initial Parameters of Each Section | 34 |
| 表4.2 | 各路段初始参数(续) | 35 |
| Table 4.2 | Initial Parameters of Each Section(Continue) | 35 |
| 表5.1 | *P1*→*P*10的最优路径寻找 | 40 |
| Table 5.1 | Optimal Path Finding of P1→P10 | 40 |
| 表5.1 | *P1*→*P*10的最优路径寻找(续) | 41 |
| Table 5.1 | Optimal Path Finding of *P1*→*P*10 (Continue) | 41 |
| 表5.2 | *P1*→*P*10的最优路径寻找 | 42 |
| Table 5.2 | Optimal Path Finding of *P*1→*P*10 | 42 |
| 表5.2 | *P1*→*P*10的最优路径寻找(续) | 43 |
| Table 5.2 | Optimal Path Finding of P1→P10 (Continue) | 43 |
| 表5.3 | P5→P10上TOKM的运行 | 43 |
| Table 5.3 | Running of TOKM on P5→P10 | 43 |

# 变量注释表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **变量** | **注释** | **初现页** |
| λ | 变迁引发后托肯进入不同库所的概率 | 14 |
| Pb | 开始库所 | 14 |
| Pe | 结束库所（目标库所） | 14 |
| Tb | 开始变迁 | 14 |
| Te | 结束变迁 | 14 |
| TOKM | 主托肯 | 15 |
| TOKO | 模拟托肯 | 15 |
| initial(λ) | 初始化λ的值 | 15 |
| Ttim | 变迁TOKM在变迁引发的时间 | 15 |
| TabuP | 托肯上的禁忌表 | 16 |
| q(x,k) | K时刻路段x处的车流量 | 27 |
|  | K时刻路段x处的车辆密度 | 27 |
|  | 道路的阻塞密度 | 27 |
|  | 车辆的自由速度 | 27 |
| Pi | 道路 | 35 |
|  | 道路上车辆的自由速度 | 35 |
|  | 道路上的阻塞密度 | 35 |
|  | 道路上的输入流 | 35 |
|  | 道路上的输出流 | 35 |
|  | 道路的初始密度 | 35 |
| PiL | 道路长度 | 35 |
| Num(Pi) | 库所中托肯的个数 | 40 |
| Type(TOK) | 托肯的类型 | 40 |
|  |  |  |
|  |  |  |

# 1 绪论

# 1 Introduction

本章主要从智能道路交通系统动态路径寻优以及Petri网在道路交通系统中应用的背景及意义；并从最优路径的国内外研究现状、Petri网的国内外研究现状进行分析；最后给出了本篇论文的研究内容、组织机构。

## 1.1研究背景及意义（Background and Significance）

随着信息化的发展和兴起智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)也应运而生，运用计算机、无线通信等技术手段将车—车、车—物等与交通相关的因素紧密的协调起来，相互通信，使交通管理系统具有实时性、准确性、高效性等 [1、2]。智能交通系统的建立，能够实时的了解道路及各个基础设施的状况，能够充分发挥网络的功能，提升了交通系统对车辆的服务能力与水平，为车辆提供安全、高效、便捷的交通服务。

ITS在解决由于各种原因引起的交通问题时具有新的突破。随着交通运输网中道路的互相连通互通，便利的交通促进了社会经济的发展，同时提高了人们的生活质量。但是在交通运输发展的同时也带来了很多问题，比如能源消耗、交通事故等问题。ITS能够解决交通运输网络复杂性带来问题的同时，实现交通系统中的新突破。ITS不仅能够解决上述问题，而且能够减少驾驶员在行车中的负担。在交通网络中不仅仅司机朋友对ITS依赖性增强，人们出行也越来越依靠ITS。ITS在为人们提供便利交通的同时，减少了交通事故发生、交通拥挤、绕路等因素造成的时间浪费和能源消耗。另外ITS能为运输企业（比如快递业）创造更好的运输环境，在解决由交通拥堵引起的各种问题的同时，推动国民经济的发展。

近几年随着经济、生活节奏的发展，人们对出行环境也提出了新的要求，渴望交通环境能够舒适、快捷。计算机以及道路基础设施为智能交通系统的迅速发展提供了支持，同时智能道路交通系统也为计算机技术和通信技术提出新的要求[3]。ITS在满足人们的需求的同时，通过先进的技术实现大规模的信息交换，建立了一个远程通信框架，使出行者提前预知道路状况与出行时间。最优路径成为人们对ITS的新要求，ITS要求计算机技术给出准确的最优路径寻找算法。最优路径寻找及建模成为人们研究的重要课题。由于道路中各个因素是不断变化的，变化的因素会影响车辆的运行速度及到达目的地的时间，所以静态的路径寻找已经不能满足ITS的需求，需要把影响车辆运行时间的动态因素考虑到ITS的最优路径寻找中，因此最优路径的寻找要做到准确性。智能道路交通系统中的动态因素成为寻找最优路径的关键因素。在ITS最优路径寻找中不仅要考虑动态因素，还要进行动态的寻找，因此需要准确的算法对智能道路交通系统进行路径寻优。

然而对智能道路交通系统的分析离不开有效的建模工具，建模和仿真对过于复杂的道路交通系统的算法优化具有重要的作用。模拟工具能够对道路系统建立的模型提供当前情景的一些参数。这些参数有助于交通规划者对道路系统进行优化。一些工具是基于一些规则运行的，这些规则描述了交通网中的行为，而另一些工具则基于数学模型，例如：Lighthill Whitham Richards(LWR）模型、Payne模型等，这些模型能够解决交通拥塞和智能交通控制、优化城市交通系统的承载能力[4]。这些性能指标包括智能道路交通系统中所有车辆花费的总时间、以及交叉口处的总延迟。能够准确描述和预测交通状态的模型中，除了LWR和Payne模型外，其他交通模型也能够预测将来时间和不同道路的交通状态信息以及分析系统的性能。这些模型包括排队论[5]、基于Agent建模[6]、神经网络[7、8]等。道路交通系统中的车流量、运行时间、延迟、转向能够从这些模型中预测出来。这些预测的参数在智能道路交通系统的性能评估和优化策略中具有重要的作用。

除了以上模型外，Petri网在建模、性能分析和交通系统控制方面已经应用十几年。Petri网作为一种可视化的建模工具，在模拟业务流程的动态性和并发活动中具有较好的效果[9、10]。作为一种数学工具，它使系统能够由一组数学方程式控制，例如状态方程。Petri网建模相对于前面的建模方式添加了另外一种建模范例，因为它可以适当地描述具有分布式、并行、确定性、随机、离散和连续的城市交通和运输系统[11]。因此，Petri网成为交通系统建模与性能分析的有效工具，从Petri网建立的模型中能够分析系统性能、优化交通控制。

本文研究的目的是针对Petri网对具有选择分支的业务流程建模时存在的问题提出了概率弧Petri网。并根据智能道路交通系统选择最优路径时的准确性问题，提出了基于蚁群算法的路径寻优算法。由于智能道路交通系统中的路网建模是典型的具有选择分支的业务流程，通过概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻找算法在智能道路交通系统中的应用进行建模，通过仿真工具对概率弧Petri网进行动态运行，得出了最优路径，通过分析路网的可达图，车辆运行时路网中各个变量的状态。

## 1.2国内外研究现状（[Research Status at Home and Abroad](http://www.baidu.com/link?url=x_f2DrKQlfDftuJBY_UIT3PKkZ_UNs4TzV8zXnDEIH4atx8uMa3xtkxJZdIxGaIV9OClpE_bBoXzIxWnSFel1KE-C9JCETk2bWDzRuywVJUStCimm5U0b11yToYdPYM1YcAFEIvxT8ynaVWtE-ixUN0CLoOZCrCCiXjVAb6e2Hq" \t "_blank)）

本小节主要是从智能道路交通系统寻找最优路径的研究现状和Petri网的研究现状两部分进行分析。

### 1.2.1最优路径研究现状

从近几年国内外的现状来看，西方国家在研究智能道路交通系统的动态路径寻找算法相对国内比较早，尤其是北美欧洲等国家的车辆导航系统中的路径寻优算法发展已经相当成熟[14]。从1980年美国已经开始研究智能交通系统了，并通过高端先进的技术获取道路信息，进而调整车辆的运行，提升了道路的利用率，目前美国的智能交通体系已经相当完备，在提高出行效率方面取得了明显的效果[12]。

动态路径规划算法是ITS中路径寻优的核心算法，而路径寻优算法从根本意义上就是寻找花费时间最短的道路，动态路径寻优算法的准确性在路径寻找中起着决定性的作用。不同的路径寻优算法，考虑到的影响因素不同，寻找的最优路径也会出现差别。然而在路径寻优研究中，国内外很多专家进行了很多研究。二十世纪六十年代，Ramser等人首次提出了最优路径优化，主要结合了数学理论、割平面法、分支定界法、Dijkstra算法[13]。Kensuke Takami[14]等人提出了一种基于时间函数形式的优化路径模型，根据交通量增加还是减少来设置参数的比率，以获得稳健的最优路径，在对难以预测交通量时，所提出的模型可以整体考虑增加和减少交通量是非常有用的，但是该模型在使用时比较复杂。Williams Billy M.对传统的卡尔曼滤波进行改进，改进后的自适应卡尔曼滤波算法在交通量变化不稳定的时候展现了很强的适应性；Ghosh Bidisha[15]采用贝叶斯来替代传统的最小二乘法对SARIMA预测模型进行参数估计，以解决该模型面对高维数据的整合问题，能更好的匹配快速波动的交通变化。

国内在动态最优路径寻找中也做出了很多贡献，主要在动态路径优化模型和优化策略方面取得很大成就。胡小兵[17]等人提出了协同进化路径优化算法，该算法只需要在原始大小的路网上进行一次波纹扩散算法就可以很好的解决CEPO的K-SPP问题。北京工商大学提出了基于蚁群算法的交通拥堵情况下最短路径算法，把道路的车流量加入模型中使其成为动态交通网，能够动态的获取道路上的车流量，在拓扑图上结合Petri网使用AHP找到最短的路径，通过研究表明当道路拥堵时基于蚁群算法的交通拥堵情况下最短路径算法能够为出行者找到最短路径[18]；北京交通大学李海建等人通过相应的数学转换得到影响交通流模型的参数，提出了最大积分值模型，通过缩小空间的方式动态的获取最优路径，引导车辆运行[19]；王倩玉等提出了基于Dijkstra算法的城市交通诱导系统最优路径算法，该算法能够满足复杂交通规则下最优路径寻找，并能成功的避免拥挤道路，在算法性能方面减少了迭代次数，但是该算法只考虑到了信号灯在最优路径寻找的影响，未考虑到变化的车辆速度对最优路径的寻找[20]。

但是在以上的研究中只是对车辆短时间的车流量预测，并没有很好的利用的车流量与车辆速度的关系，对车辆的速度进行预测并应用于最短路径的寻找，也并没有进行路径矫正。道路矫正能够防止车辆进入由于突发事件拥堵的路段，造成车辆长时间等待。

### 1.2.2 Petri网研究现状

Petri 网是由数学家和信息学家 Carl Adam Petri 首次提出的，用其对离散的或并行的系统进行表示，由于 Petri 网有多种系统结构表述和行为分析的技术， 适合于描述复杂的计算机系统、异步通讯、业务流程等，为计算机科学研究提供了建模基础[21]。Petri 网不仅有严谨的形式化描述语言，而且还有直观的图形表述方式，可以形象对业务流程进行建模与动态运行[22]。随着Petri网的发展与应用，Petri网已成为兼顾数学的形式化语言和图形可视化建模工具，已在计算机技术领域中广泛应用，相对于以往的建模方法，Petri网创建的模型具有动态性、准确性，并能够对业务流程进行性质分析。在对业务流程进行建模中需要一定的建模原则和方法，Peter James和 Prentice Hall 主要研究了在原型 Petri 网基础上的模型理论，详细研究对系统如何建立合理的 Petri 网模型以促进Petri网在业务流程中的应用[23]。

考虑到事件发生概率的物理特性，清华学校的林闯教授研究了随机 Petri 网。随机 Petri 网中变迁的引发时延遵循一定时间概率分布，随机 Petri 网也是时间 Petri 网的扩展网[24]。随机 Petri 网与广义随机 Petri网[25]对事件具有随机特性的业务的描述具有恰当的表达能力，通过严谨的数学形式化符号、表达式以及图形表示，为其业务流程提供了良好的建模方法与仿真。颜色Petri网根据业务流程中业务类型对库所的每一个托肯定义颜色、命名、属性，以及为变迁输出弧上添加表达式，以实现对网系统的折叠。并且用向量的形式表示库所中所含不同颜色的托肯的数量，不同的分量代表不同颜色，分量的数值代表不同颜色的托肯个数，用库所和托肯颜色对信息区分[26]。颜色 Petri 网的提出对系统的资源分类具有较好的描述作用（例如可以表达柔性制造系统 FMS 的动态行为）[27]。逻辑 Petri 网是普通Petri网的抽象和扩展，在普通Petri网的基础上添加了逻辑输入输出表达式，这种限制简化了网结构，并能够描述批处理系统中的不确定性[28]。与普通的Petri 网相比，逻辑 Petri 网在描述实时协同工作流程中发挥着重要的作用，通过对模型进行性质分析，时设计者更好的对系统进行设计[29]。

Petri网在研究业务流程优化中也得到了迅速的发展，在流程优化中取得一定的成就，主要是通过日志对模型进行优化，从而使模型在对流程建模是能够更准确。国内山东科技大学杜玉越教授的团队通过过程挖掘技术根据业务流程中的日志对模型进行修正，消除建模中的活动与事件日志中观察到的活动之间的偏差。

Petri网在智能交通系统中的应用也得到一些国内外权威专家的认可。意大利学者A.D.Febbraro 基于混合Petri网（HPN）理论，使用混合Petri网来指定交叉口的交通控制，并使用二阶宏观模型来模拟两个连续交叉口之间道路延伸的车辆的运动[30]。此外，J.Jorge等人利用连续Petri网模型对道路交通系统建立宏观模型，并对其进行仿真试验，避免大型离散业务流程建模中的状态爆炸[31]。Angela Di Febbraro, Davide Giglio等人,使用随机Petri网模拟交通拥堵、交叉路口划分、道路容量等减少城市区域内拥挤的问题 [32-33]。在道路交通系统的建模方面，混合Petri网在对交通道路交通系统进行建模具有优势，同时对交通道路系统中的道路因素、道路交叉口转向、信号控制等建立细化的Petri网模型，即在道路交叉口模型的基础上拓展为多路口模型，并建立多层模型，实现对整个城市的路网建模分析，进而结合实际交通数据实现短时交通流预测、动态车流评估，并保障交通预测的准确性[34-40]。但是以上拓展的Petri网并没有把预测的车辆密度、速度、车流量与最优路径进行统一建模，在动态路径建模方面还存在一定的不足。

## 1.3研究内容（[Research Contents](http://www.baidu.com/link?url=SOYE_MOSpuktbiB83Hlg4nekUACpsjXDpbvij797Cl-BRpj-kt6FvfEjSMxF1VNjwf4Whw-9XkHtE9h9CwfPGdX7F3oc6BzRVuvLWWFcIl61ajCfCvqbxVRTPQ2OfOgM" \t "_blank)）

本文主要针对普通Petri网对具有选择分支的业务流程建立的模型，在寻找到达目的地的最优分支以及对流程优化中还存在不足，因此本文对Petri网进行改进形成新的Petri网——概率弧Petri网。同时针对智能道路交通中的车辆到达目的地的时间受道路中车辆密度、车流量、车辆速度等动态因素的影响，提出了基于蚁群算法的路径寻优算法，其中对蚂蚁的转移率表达式进行改进，加入了预测的速度，使蚁群算法能够动态的寻找花费时间最少的路径。通过对基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中的应用，使用概率弧Petri网对其进行建模，并寻找最优路径。

（1）概率弧Petri网基于普通Petri网在库所的输入弧上加入了概率，转入概率是模拟托肯在运行过程中根据影响业务流程运行的某些因素的值通过计算得到的，主托肯根据库所输入弧上的转入率的值进入不同的库所。并在每一个库所上加入库所属性集、预测函数，根据库所属性集中的属性对影响业务流程因素进行预测。概率弧Petri网是比较灵活的建模工具，能够根据不同的业务流程进行改变概率弧Petri网中的库所属性集、预测函数和转换率公式。本文对基于蚁群算法的路径寻优算法在智能交通中的应用进行建模，分析了概率弧Petri网在对具有选择分支的业务流程建立的模型能够准确的寻找最优分支。

（2）根据智能道路交通系统中信息采集手段获取道路中的车流量、道路初始密度，通过概率弧Petri网的预测函数对道路中未来某个时刻车辆的平均速度进行预测。动态预测车辆的速度能够准确的得到该条道路上花费的时间，根据流体动力学车辆的速度与车辆的运行时间成反比，因此把车辆的平均速度与蚂蚁的转入率结合，使蚁群能够准确的寻找花费时间最短的路径。在车辆每进入一个路口时蚁群重新对该路口到目标路口再次运行路径寻优算法，计算是否需要更新路径，这使得车辆能够避免进入由于突发事件引起堵塞的路段。并通过Matlab对概率弧Petri网中的预测函数进行编程获取未来时刻车辆的速度。

（3）最后，使用概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中的应用进行建模，根据概率弧Petri网的变迁引发规则动态的模拟基于蚁群算法的路径寻优算法，得出最优路径，并根据概率弧Petri网的可达图分析车辆的运行状态。分析了其它Petri网在对具有选择分支的业务流程进行优化时存在的不足。

## 1.4论文组织结构（Organizational Structure of Thesis）

本文的组织结构如下：

1. 介绍了该课题研究的背景及意义、智能交通中最优路径寻找和Petri网在国内外研究现状以及论文主要研究内容和组织结构。
2. 介绍了Petri网、逻辑Petri网和随机Petri网的相关定义和变迁引发规则以及蚁群算法的相关公式及参数。
3. 对概率弧Petri网进行定义，并对概率弧Petri网的变迁引发规则进行介绍。分析了不同的Petri网建模工具，把概率弧Petri网分解成抑止弧Petri网。举例说明定义的概率弧Petri网中相关符号和函数的意义，并使用仿真工具对该示例仿真，证明了概率弧Petri网的有效性。
4. 主要介绍了智能道路交通系统中输入、输出流以及道路初始密度的获取方式，根据概率弧Petri网中库所属性集中的变量计算概率弧Petri网的预测函数，并对智能道路交通系统中车辆的速度进行预测。介绍了车辆速度与库所输入弧上转移概率的关系。基于蚁群算法提出了基于蚁群算法的路径寻优算法，最后给路况描述并对概率弧Petri网中预测函数进行仿真。
5. 本章主要分析了概率弧Petri网在智能道路交通系统中的应用，根据第四章中概率弧Petri网与基于蚁群算法的路径寻优算法的关系，使用概率弧Petri网对智能道路交通系统进行建模；通过概率弧Petri网的运行过程，动态的寻找最优路径寻；通过对所建模型进行可达性分析能够得到车辆运行时的各个状态。并对普通Petri网逻辑Petri网、时延Petri网在对具有选择的业务流程建模中存在的不足进行了分析。
6. 对本文进行总结，并展望未来的工作研。

# 2 基本知识

# 2 Relevant Knowledge

本章主要介绍本文所使用到的相关基本知识。主要是在创建概率弧Petri网时用到的基本Petri网、逻辑Petri网、随机Petri网；以及对蚁群算法及算法中的相关参数的取值进行介绍。

## 2.1 Petri网 (Petri Nets)

Petri网是一种有向图，Petri网的建模能够对业务流程进行动态的描述以及性质分析。下面是对Petri网、逻辑Petri网和随机Petri网的概念及变迁引发规则的介绍。

### 2.1.1基本Petri网

**定义 1.1：***N*=(*P*, *T*, *F*)是一个网，其中：

（1）*P*是库所的有限集；

（2）*T*是变迁的有限集*，P*∪*T*≠∅ 并且*P*∩*T*=∅；

（3）*F*⊆(*P*×*T*)∪(*T*×*P*) 是有向弧的集合。

**定义1.2：**输入输出集：设*x* ∈*P* ∪ *T*是网*N*的任一元素，

•x={*y*|(*y*, *x*)∈ *F*}称为*x*的输入集或前集

x•={*y*|(*x*, *y*) ∈*F*}称为*x*的输出集或后集

*N*=(*P*, *T*, *F*)称为一个纯网，满足∀*t*∈*T*：•*t*∩ *t*•=∅。

**定义1.3：**四元组∑ = (*P*, *T*, *F*, *M*)称为Petri网[50]，当且仅当：

（1）*N* = (*P*, *T*, *F*)是一个纯网；

（2）*M*:*P*→*N*是标识函数，其中*M0*是初始标识；

（3）∑具有下面的变迁引发规则：

（a）对于变迁*t*∈*T*，如果∀*p*∈•*t*: *M*(*p*)≥1，则变迁*t*在标识*M*下使能，记作*M*[*t*>；

（b）若*M*[*t*>，则在标识*M*下*t*使能，当*t*在标识*M*下引发后产生新的标识*M*’记作*M*[*t*>*M*’

图2.1为普通Petri网，根据Petri网的定义*P*1、*P*2、*P*3为Petri网的库所，*t*1为变迁，从图2.1中可以看出*M*(*P*1)=1，*M*(*P*2)=1，满足∀*p*∈•*t*: *M*(*p*) ≥1的变迁引发规则，当变迁*t*1发生后，根据变迁引发规则库所*P*1，*P*2中的托肯消失，而库所*P*3中的增加一个托肯。这就是普通Petri网的引发过程。



图2.1 普通Petri网

Fig.2.1 Ordinary Petri Nets

### 2.1.2 逻辑Petri网

逻辑Petri网(Logical Petri Nets, LPN)可用于模拟和分析批处理系统中的传值不确定性，是抑止弧Petri网的高级抽象。逻辑Petri网的以下定义来自参考文献[41]。

**定义1.4：**设LPN = (*P*, *T*, *F*; *I*, *O*)，LPN = (LN, *M*)称为一个逻辑Petri网，当且仅当

1. *P*是库所的有限集；
2. *T* = *TD* ∪ *TI* ∪ *TO*是变迁的有限集，*T* ∪ *P*≠∅，∀*t*∈*TD*∪ *TI* ∪ *TO*：•*t*∩*t*• =∅

其中：

（a）*TD*表示经典Petri网变迁；

（b）*TI*表示变迁*T*的逻辑输入变迁集，且∀*t*∈*TI*，*TI*的所有前集库所受逻辑输入表达式*fI*的限制；

（c）*TO*表示变迁*T*的逻辑输出变迁集，且∀*t*∈*TO*，*TO*的所有的后集库所受逻辑输出表达式*fO*的限制；

1. *F*⊆(*P*×*T*)∪(*T*×*P*)是弧有限集；
2. *I*是逻辑限制输入函数，使对∀*t*∈*TI*，*I*(*t*)=*fI*是逻辑输入表达式；
3. *O*是逻辑限制输出函数，使对∀*t*∈*TO*，*O*(*t*)=*fO*是逻辑输出表达式；
4. *M*:P→{0,1}是标识函数，∀*p*∈*P*，*M*(*p*)表示库所*p*中含有的托肯个数；
5. 变迁引发规则是：  
    a）对∀*t*∈*TD*, 如果∀*t*∈*TD*，变迁*t*引发规则满足定义1.3中的变迁引发规则；  
    b）对∀*t*∈*TI*, *I*(*t*)=*fI*，如果*fI*|*M*=•*T*•，•*t*满足逻辑输入表达式*fI*，则称*t*在*M*使能；若*t*使能，并且*t*在标识*M*下引发，演变到新的标识*M*':∀*p*∈•*t* *M*'(*p*)=0，∀*p* ∈ *t*• ，*M*'(*p*)= *M*(*p*)+1，∀*p*∉•*t* ∩ *t*•: *M*' (*p*)=*M*(*p*)

c）对∀*t*∈*TO*，*O*(*t*)=*fO*，如果∀*p*∈•*t*，*M*(*p*)=1，则*t*在*M*使能；若*t*使能，则它可以引发，且*t*在标识*M*下引发后，演变到新的标识*M*’:∀*p*∈•*t*: *M*’(*p*)=*M*(*p*)-1, ∀*p*∉•*t* ∩ *t*•: *M*’(*p*)=*M*(*p*)。而对*t*•应满足*fO* | *M*’=•*T*•，即*t*•在*M*’必须满足逻辑表达式*fO*。

逻辑Petri网中托肯的输入输出受逻辑输入表达式*fI*和逻辑输出表达*fO*的约束，正是由于输入输出表达式存在产生了逻辑Petri网中批处理的不确定性。

在图2.2和图2.3中分别是带有逻辑输入变迁和逻辑输出变迁的逻辑Petri网示例。在图2.2中，逻辑输入变迁受逻辑输入表达式*fI*=*P*1˅(*P*2˄*P3*)的限制，且*M*(*P*1)=1、*M*(*P*2)=1、*M*(*P*3)=1,所以要使逻辑输入变迁*I*使能库所*P*1或者库所*P*2和*P*3中存在托肯。在图2.3中，逻辑输出变迁发生时会受逻辑输出表达式的约束，根据逻辑输出表达式*fO*=*P*4˅(*P*5˄*P*6)，当逻辑输出变迁发生后，库所*P*4中含有托肯或者库所*P*5且*P*6中含有托肯。这就是逻辑Petri网的引发过程



图2.2带有逻辑输入变迁的LPN 图2.3带有逻辑输出变迁的LPN

Fig. 2.2 LPN with Logical input Transition Fig. 2.3 LPN with Logical output Transition

### 2.1.3随机Petri网

随机Petri网（Probability Petri Nets，SPN），通过在Petri网中添加时间参数的方法，在每个变迁的实施与可实施之间建立一个随机的延时时间，也有网模型中根据事件的离散性，将离散时间引入随机Petri网，从而增强了模拟能力[42]。基于马尔科夫链与状态空间对随机Petri网进行性能分析，随机马尔科夫过程为模型的评价提供了坚实的数学基础[42]。

**定义1.5**：SPN = (*S*, *T*; *F*, *W*, *M*0, *λ*)其中(*S*, *T*; *F*, *W*, *M*0)为一个基本逻辑网：

其中：

*λ* = {*λ*1，*λ*2，…，*λ*n}是每个变迁发生时的平均实施速率集合，*λ*i是每个变迁平均实施速率，表示变迁在可实施情况下单位时间内变迁可执行的次数。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 |
| M0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| M1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| M2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| M3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| M4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

图2.4 SPN示例 图2.5 图2.4模型的马尔科夫



Fig. 2.4 SPN Example Fig. 2.5 Fig. 2.4 Model of Markov

在随机Petri网中任意一个变迁都有可能引发，但是不同的变迁的引发概率不同：以下是*ti*引发的可能性：



(2.1)

同构的马尔科夫的获取比较简单，求出随机Petri网的可达图，将其每条弧上的标注变迁*ti*的实施概率，就可以获得MC，可达表示*M*0→*M*1变迁*t*1发生，在马尔科夫图中*M*0→*M*1的弧上标注*t*1的引发概率。因此随机Petri网在稳定状态下的概率和等于1，在不同稳定状态标识下托肯的输入、输出是平衡的。

## 2.2 蚁群算法 ( Ant Colony Optimization )

蚁群算法是一种启发式算法，根据路径中的启发因素寻找最优路径的概率型算法[57]。蚁群算法本质上是具有分布计算、信息反馈、启发式搜索特征的全局优化算法，由于蚁群算法中的信息反馈和启发式搜索的特性在路径寻优中被学者们广泛应用[58]。

### 2.2.1 蚁群算法的基本原理

自然界中蚂蚁群体寻找食物的过程是通过相互协作感知路径中的信息素浓度实现最优路径的寻找。为了解释蚁群算法的中蚂蚁觅食原理，通过图2.4分析了蚂蚁在觅食中信息素的产生、蚂蚁之间信息的交流与传递，以及蚂蚁之间协同工作共同完成觅食过程[43]。图2.4为蚂蚁从巢穴到食物的整个寻找食物的过程，蚂蚁从巢穴出发，一开始蚂蚁道路中没有信息素，也可以说障碍物两边的信息素的浓度是一样的，在遇到障碍物时，蚂蚁从障碍物两边通过的概率是一样的。在图2.4(b)中通过障碍物两边蚂蚁的数量都是六只。在蚂蚁绕过障碍物时，蚂蚁会释放信息素，由于障碍物小的一边，蚂蚁提前到达食物，释放信息素，当蚂蚁吃完食物后返回巢穴，在图2.4(c)中路径短的一边的蚂蚁已经有两只蚂蚁觅到食物在返回巢穴的路上，而障碍物路径远的一边的蚂蚁才刚刚到达食物。由于比较短的路径上的蚂蚁的数量越来越多，蚂蚁释放的信息素也会越多。后来的蚂蚁由于感受到路径短的信息素浓度大，后来的蚂蚁就会从这条道路上去寻找食物。在图2.4(d)中由于障碍物短的路径上的信息素浓度大，所有的蚂蚁都通过障碍物短的道路去觅食。

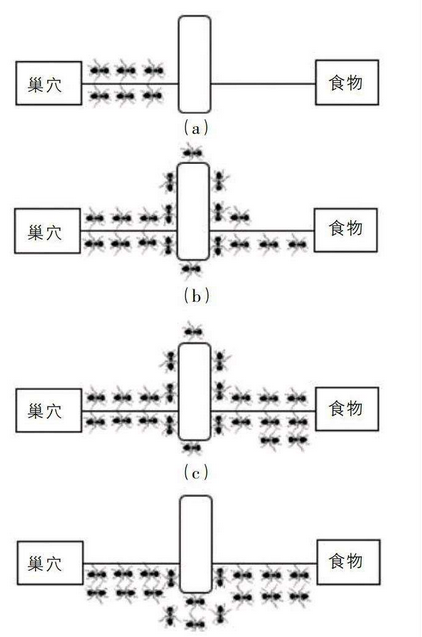
****（d）

图2.4 蚂蚁觅食过程

Fig. 2.4 Ant Foraging Process

于是，由大量蚂蚁组成的蚁群在寻找食物的过程中，它们个体的行为受其它蚂蚁的影响，而在路径短的道路上信息素的浓度越来越多，形成正反馈机制，后来的蚂蚁受到信息素的影响更偏向于路径短的道路 [44]。也就是说，蚂蚁通过信息素的交互，最终找到从巢穴到食物源的最优路径[45]。

### 2.2.2蚁群算法模型

蚁群算法是解决路径寻优问题的算法，在求解不同性质的问题时，所建立的算法模型未必完全相同。蚁群算法在求解问题时的思路为：首先根据求解问题规模的大小，释放一定数量的蚂蚁形成蚁群，然后让蚂蚁在路径上探索到达目的地的路径，并把这些路径作为初始解，根据初始解，让蚂蚁执行蚁群算法，然后把蚂蚁放在求解问题的初始点，这些蚂蚁根据路径上的信息素浓度或启发信息，选择到达下一个节点的路径，重复选择未走过的节点，直到到达目的地，重复上诉过程，最终找到全局的最优解[46]。

蚁群算法解决TSP问题时，t时刻，蚂蚁*k*由城市*i*转移到城市*j*的概率公式如(2.2)表示：



(2.2)

其中，*i*表示出发城市，路径寻找中的初始位置，*j*为目标城市，城市*i*到目标城市*j*的距离用*dij*表示，*τij*(*t*)表示由城市*i*到*j*城市在*t*时刻蚂蚁遗留的信息素浓度，*ηij*(*t*)是各个城市间启发函数，取值为1/*dij*，*α*：为蚁群算法中的信息启发式因子，当*α*值越大，蚂蚁选择之前走过路径的可能性越大，路径的随机性就增大，当*α*值越小时，蚁群搜索范围变小，路径容易进入局部最优。一般*α*的取值范围为0-5。*β*：期望式启发因子，*β*越大蚁群的收敛速度越快，越容易进入局部最优的，但是随机性比较弱，*β*的取值范围为[0-5]，*allowekk*(*k* = 1,2,3,…,*m*)表示蚂蚁下一步被允许经过城市的集合，蚂蚁*k*所经过的城市记录在蚂蚁的禁忌表中用*tabuk*（*k*=1,2, 3,…,*m*）进行记录[55]。

在蚂蚁运行过程中信息素会被更新，其中(1-ρ)为信息素的挥发程度，经过时刻n蚂蚁完成一次循环，信息素表达式为公式(2.3)所示，

 （2.3）

 （2.4）

公式2.4中的表示第k只蚂蚁经过城市*i*到城市*j*的路径上一次留下的信息素的量，表示在这个过程中所有蚂蚁一次经过该条路径时留下的信息素的总量。

 （2.5）

其中Q是常数表示蚂蚁在本条路径上释放信息素的总量，表示蚂蚁在该条路径上行走道路长度。在初始时刻，。

### 2.2.3蚁群算法中参数调优

蚁群算法中蚂蚁寻找路径的过程是通过蚂蚁间的通信进行的，蚂蚁的数量对路径寻优起着重要的作用。蚁群中蚂蚁的数量即m的值越大，道路中分散的信息素越多，全局搜索能力越强，但是会导致各个路径上的信息素浓度差距小，正反馈机制比较低，收敛速度比较慢。但是如果蚂蚁的数量较少时，会导致蚂蚁进入局部路径中，使路径进入局部最优，从而影响道路寻找的准确性。因此选择合适的蚂蚁数量是相当重要的，根据参考文献得出蚂蚁最优的数量是30。

其中蚁群算法中信息素启发式因子*α*、期望启发因子*β*以及信息素挥发系数*ρ*都会对蚁群算法的准确性及性能产生影响。通过参考文献[47]设置实验得出信息素启发式因子*α*、期望启发因子*β*以及信息素挥发系数的最优值分别为*α* =0.5、*β* = 0.5、*ρ*=0.6时取到蚁群算法的最优值。

## 2.3本章小结（Summary）

本章介绍了Petri网基本知识，包括普通Petri网、逻辑Petri网、随机Petri网的基本结构以及变迁引发规则，并说明了逻辑Petri网在处理批处理时产生不确定性的原因；介绍了蚁群算法，分析了蚁群算法的基本原理、算法模型，以及论述了影响蚁群算法性能的几个参数。

# 3 概率弧Petri网

# 3 Probability Arc Petri Net

Petri网是一种有向图，可以用网状结构表示系统模型，事件映射为变迁的引发、库所对状态进行描述，以及库所与变迁的流关系来模拟系统的动态运行。逻辑Petri是在普通Petri网的基础添加了逻辑输入、输出变迁，以及为逻辑变迁添加了逻辑输入、输出表达式。逻辑Petri网能够动态的模拟批处理系统，体现批处理系统中的不确定性，基本Petri网不能准确的表现这一性质。

随机Petri网在每个变迁的可实施与实施之间加入了随机的时延，在对系统的定量分析方面起到重要的作用。但是不论是逻辑Petri网还是随机Petri网在描述事件发生时，无法控制资源进入哪条分支。

## 3.1概率弧Petri网相关定义（Probability Arc Petri Nets Definition）

该小节是结合了Petri网、随机Petri网、逻辑Petri网对概率弧Petri网进行定义。在概率弧Petri网中加入了托肯进入不同库所的概率，即变迁发生后托肯转入到不同库所的概率，使得概率弧Petri网能够描述不同资源转入不同状态的概率，除了转移概率外概率弧Petri网在逻辑Petri网的基础上还添加了其它因素。

### 3.1.1概率弧Petri网

**定义3.1:** 概率弧Petri网（Probability Arc Petri Nets，SAPN），SAPN= ( *P*，*T*，*F*；*λ*，*TOK*，*t*，Find ( *TokM*)，IF(*t*)，*M*，*Ttim* )。

1. *P* = *Pb*∪*Po*∪*Pe*为库所的有限集合；

其中：

1. *Pb*表示开始库所集，即开始状态；
2. *Po*表示普通库所集，每个库所都含有一个属性集合*PC*，用于存放预测函数所需要的属性；
3. *Pe*表示结束库所集，即目标状态；

（2）*T* = *Tb*∪ *Tf* ∪*Te*为变迁的有限集合，变迁分为三类，

其中：

1. *Tb*表示开始变迁集，即业务流程开始发生的事件，∃*pb*∈；
2. *Tf*表示普通变迁集，即业务流程运行的中的事件，*pi*∈，∀*pi*≠*pb*，*pj*∈，∀*Pj*≠*Pe*，
3. *Te*表示结束变迁集，即业务流程的结束发生事件，∃*pe*∈；

（3）*F* ⊆ ( *P*×*T* ) ( *T*×*P* )，*F*为网概率弧Petri网的流关系，且*P*∩*T* = Φ，*P*∪*T*≠Φ；

（4）*λ*表示变迁引发后，托肯进入不同库所的概率，*λ* = { *λ*1, *λ*2, *λ*3, …, *λn*}为转移率的集合。存在于库所的输入弧上，每条库所的输入弧上都含有值。不同库所输入弧上的λ值不同。 =Prob()，其中Prob()是计算值的函数，输入弧上*λ*的值越大，变迁发生后托肯转入该库所的概率就越大；

（5）*TOK* = *TOKM*∪ *TOKO*，*TOK*表示概率弧Petri网中托肯的有限集合。*TOKM*为主托肯，*TOKO*为模拟托肯。*TOKO*在主托肯运行前先对业务运行进行模拟，*TOK*={*tok*1, *tok*2, *tok*3, …, *tokm*}，其中*m*>0，比较不同分支的概率，及时更新相应分支的概率，并把到达*Pe*库所的最优分支反馈给主托肯，*TOKM*中含有变迁判断函数IF(*x*)函数；每个*TokO*中也含有IF(*x*)，用于判断是否到达目标库所；

（6）*t*为附着在*TOKO*上的时间标记，*t*为托肯所经过的变迁发生时花费时间的总和；

（7）Find ( *TokM*)寻找*TOKM*所在库所的后集变迁，若果Find(*TokM*) = *Te*，则*TOKO*停留在目标库所中，等待*TOKM*的IF(*t*) = *Te*结束概率弧Petri网的运行。

（8）IF(*t*)为变迁判断函数，IF(*t*)位于*TOKM*和*TOKO*上，IF(*t*)函数用于判断变迁是不是终止变迁，如果T*OKM*上的IF(*t*) = *Te*，则概率弧Petri网运行结束；如果*TOKO*上的IF(*t*) = *Te*∧ Find( *TokM*) ≠*Te*，则*TOKO*引发Find( *TokM*)变迁的发生。

（9）*M*为概率弧Petri网的运行时产生的状态标识，*M0*为概率弧Petri网的初始标识。

（10）*Ttim*为*TOKM*在变迁上引发时消耗的时间。

**定义3.2：**初始化函数initial(*λ*)，初始化函数是指在初始时刻对每个库所输入弧上的*λ*值进行初始化，初始时刻是指所有的*TOKO*都没有到达*Pe*，各个库所输入弧上*λ*值的大小为初始值；

**定义3.3：**预测函数Forec(*v*)，根据库所中的属性集合预测将来某个时刻影响系统性能的因素。若影响因素是恒定不变的，该函数可以省略。

**定义3.4：**转移率更新函数Prob(*x*)，转移函数是用来更新库所输入弧上的λ值的函数，当*TOKO*到达目标库所时，执行Prob(*x*)函数更新经过路径的转移率，该函数根据不同的业务流程进行设定。

**定义3.5：**托肯反馈机制，托肯反馈机制是指所有的*TOKO*到达目标库所后，更新各个路径上的*λ*值，选择λ值最大的分支，把*TOKO*禁忌表中的库所序列反馈给*TOKM*。

**定义3.6：**分支更新函数Update(*x*)，更新函数是存在于*TOKM*上，当*TOKO*上的IF(*x*) = *Te*时，根据托肯反馈机制*TOKO*更新该分支上的转移率，直到所有的*TOKO*的IF(*x*) = *Te*时，执行Updata(*x*)函数，该函数用于更新*TOKM*的分支。*TOKM*每进入一次变迁前都会执行一次Update(*x*)函数，如果最新反馈的最优分支发生变化则更新最优分支，如果没有发生变化则按原来的分支继续运行，直到*TOKM*上的函数IF(*x*) = *Te*时结束概率弧Petri网运行。

**定义3.7：**禁忌表Tabu*P*是用于存放*TOKO*走过的库所集合，禁忌表能够控制托肯再次进入之前经过的库所。

**定义3.8：**库所判断函数IFP(*p*)，该函数用于判断下一个库所是否在禁忌表中，如果不存在，托肯进入该库所，否则无法进入该库所。

### **3.1.2**概率弧Petri网变迁引发规则

Petri网的变迁引发规则是指在变迁引发时所遵循的规则，由于概率弧Petri网对托肯进行了分类以及输出弧上添加了转移率使得变迁引发规则发生变化。

下面介绍概率弧Petri网的变迁引发规则：

1. 当概率弧Petri网中有出现*TOKM*，*TOKM*∈ *Pi*，则*Pi*释放m个*TOKO*，则*Pi*为开始库所。若*TOKM*到达目标库所，则所有的*TOKO*停留在目标库所中；
2. 各个流关系中的*λ*值通过initial(*λ*)函数进行初始化；
3. 对于分支结构变迁引发后，如果*λ*为初始值变引发后托肯进入实施度高的库所。
4. 当变迁 ∈ ，且不同时，则变迁引发后进入库所输入弧上值最大的库所中；
5. 变迁引发时需要执行IF()，如果IF() = ，则执行概率更新函数；
6. 执行IFP()函数，如果IFP()=，通过转移率更新函数Prob()更新该分支上的转移率，同时会增加一条到Find()的弧，*TOKO*引发Find(*TOKM*)返回的变迁。如果TOKM上的IFP(*Pi*∈，则库所Pi中的托肯不会执行转移率更新函数；
7. TOKM在引发下一变迁前，检测IF(*TOKM*)是否为*Te*。如果IF(*TOKM*) = *Te*，则该概率弧Petri网运行结束；
8. *TOKM*进入变迁，函数IF(*TOKM*)为*Tf*，则该变迁执行路径更新函数Update(*x*)，寻找最优路径；
9. *TOKM*在流关系弧上的λ为初始值时， *TOKM*不能使变迁使能，只有当所有的*TOKO*进入目标库所且向*TOKM*反馈了最优路径后，*TOkM*在*Tf*上开始引发。
10. 每个变迁的引发符合逻辑表达式，变迁发生时不需要所有的*Pi* ∈的库所中含有托肯，变迁满足变迁*t*就能引发。
11. 每当*TOKO*使Find(*TOKM*)返回的变迁使能时，托肯中的*t*初始为空、禁忌表清空。

图3.1 SAPN变迁引发流程图



Figure3.1 Flow Chart of SAPN Transition

图3.1为概率弧Petri网变迁引发规则流程图，该流程图主要是根据概率弧Petri网的变迁引发规则得出的流程图，能够直观地看出概率弧Petri网的运行状态。

可达性是Petri网分析其它性质的基础，可达性的分析是对可达图进行分析，比如Petri网的有界性、有无死锁，安全性等。以下是根据概率弧Petri网托肯的处理规则以及变迁引发规则，给出了生成概率弧Petri网可达图的算法：

输入：SAPN=( *P*，*T*，*F*；*λ*，*TOK*，*t*，Find ( *TokM* )，IF(*t*)，*M*，*Ttim* )；

输出：概率弧Petri网的可达图；

Step 0：概率弧Petri网运行时第一次引发变迁产生的标识*S0*为根标识，并标记为“new”；

Step 1：当存在标识上的标记为“new”时，任选一个带有“new”节点的标识，并标记为S；

Step 2：if *S*∈*S*(*old*)，then返回Step 1；

Step 3：if ∀*t*∈*T*： ¬*S*[*t*> Then 把*S*标注为“叶子”，返回Step 1；

Step 4：∀*t*∈*T*， 并且 *S*[*t*>， 则引发变迁t，根据变迁引发规则，得到新的标识S’，将其标注为“new”，从*S*到*S*’连接一条有向弧，并在有向弧上标注引发的变迁*t*，然后更改节点*S*的标注为“old”，执行Step 1；

用概率会Petri网对业务流程进行建模，其主要目的之一就是借助所建立的模型来寻找系统的最优分支，可达图是概率弧Petri网最基本的动态性质，是其它性质分析的基础，根据以上算法可以构造概率弧Petri网的可达图，可达图可以描述概率弧Petri网的模型的状态变换，基于概率弧Petri网的可达图能够找到系统的最优路径。

## 3.2概率弧Petri仿真工具（Probability Arc Petri Simulation Tool）

### 3.2.1 仿真工具简介

仿真工具是验证业务流程中所建模型的正确性，业务流程仿真是通过计算机仿真工具，对模型中的多种业务流程实例进行模拟运行。通过业务流程的模拟，不仅能够看出模型中存在结构上的不合理性或错误（比如：死锁、冲突、不安全等），而且在模型运行中能够得到一些数据，利用这些数据使用统计和对比的方法分析业务流程中的一些性质，并根据模型分析的性质优化业务流程。

Petri网对业务流程进行建模时，所建立的模型具有动态性，Petri网动态模拟业务流程需要相应的工具支持。目前在Petri网仿真方面已经存在许多软件仿真工具，一些Petri网仿真工具已经相当成熟，并被广泛的应用甚至商业建模与分析中。其中：Tina是由OLC小组研究开发的用于对时间Petri网及其扩展网的建模与分析工具。Dr Rainer Drath开发设计一款入门级的模拟软件，支持时间、混杂Petri网，操作简单、功能强大。美国Duke大学的Trivedi教授开发了SPNP用于对随机Petri网进行模拟与仿真，解决了随机Petri网中的状态研究问题，并能够对多种方案和参数进行结构分析、马尔科夫求解、仿真等在随机Petri网的建模中具有重要的作用。CPN Tools是对颜色Petri网的建模的有效工具，并根据仿真中表达式以及库所状态的改变，进行性能分析。

Tina工具通过直观的绘图方式来对Petri网进行设计和模拟，他是一款对时间Petri网支持比较好的软件，他适用于库所/变迁系统、含有时间变迁的Petri网等多种Petri网类型。其中Tina分为建模界面和运行界面，通过建模界面中的Tools按钮中的reachability analysis、structural analysis界面能够对所建模型的可达性进行分析、结构性进行分析，其中可达性分析得到\*.ktz的文件，文件中包含构建Petri网的可达标识、到达可达标识时引发的变迁。结构性分析了Petri网的有界性、*T*不变量、*S*不变量，并保存在\*.text文本中。Tina对建立的Petri网是以\*.ndr形式进行保存，在运行时可以单步执行和随机执行，同时在单步执行过程中可以对变迁设置延迟。

### 3.2.2仿真工具的选择

由于概率弧Petri网是基于逻辑Petri网提出的一种新的模型工具，在现有的Petri网建模工具中还没有逻辑Petri网仿真工具，而我们有需要对扩展逻辑Petri网模型进行正确性验证。我们在对概率弧Petri网进行正确性验证方面，将概率弧Petri网进行等价转换，然后通过Tina进行仿真。

其中，托肯上的时间是通过变迁的延时来实现的。由于抑制弧无法表达逻辑Petri网中的逻辑输出（or），因此在模拟逻辑输出（or）表达式，要对逻辑Petri网进行拆分三个子网进行模拟分析，逻辑Petri网中的逻辑输入、输出表达式的三种结构转换成抑止弧表示结构，通过Tina工具对抑止弧结构进行仿真模拟，从而对所建模型进行验证和仿真。如图3.2所示，将逻辑Petri网的三种基本结构转换为抑止弧表示的结构。

（a）逻辑输出(and)



（a）Logical output(and)

（b）逻辑输入(and)



(b)Logical input(and)



（c）逻辑输入（or）

(c)Logical input(or)

图 3.2 抑制弧表示的三种基本结构  
Fig 3.2 Four Basic Structures Represented by the Suppression Arc

图3.2 为逻辑Petri网中三种逻辑表达式转换为抑止弧Petri网的三种基本结构，目的是能够使用模拟工具对逻辑Petri网进行模拟。由于抑制弧无法表达逻辑Petri网中的逻辑输出（or），因此在模拟逻辑输出（or）表达式，要对逻辑Petri网进行拆分三个子网进行模拟分析。

图3.3是Tina的编辑界面和可达性分析界面，第一行为状态栏，通过状态栏对Petri网进行建模，并通过状态栏中的Tools按钮中reachability analysis、structural analysis对所建Petri网进行可达性、结构性进行分析，并通过stepper simulator对模型进行运行。在3.2节中的示例及第五章中使用Tina对概率弧Petri网进行建模分析。

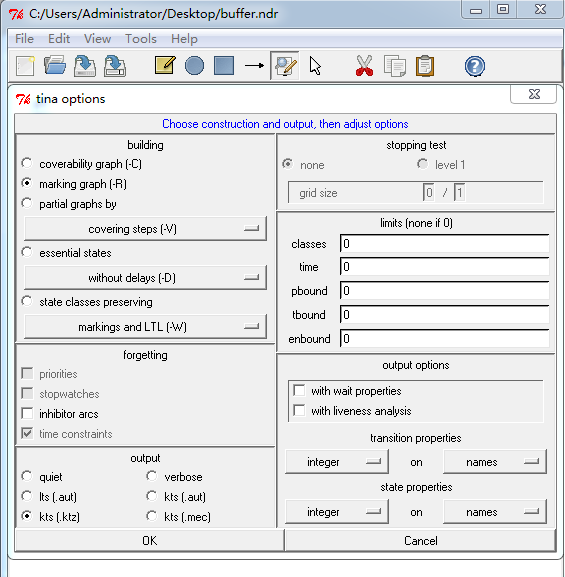
图3.3 Tina的编辑界面中的可达界面

Fig. 3.3 The Reachable Interface in Tina's Editing Interface

## 3.3 基于SAPN的普通路网建模与分析（Modeling and Analysis of Ordinary Road Network Based on SAPN）

### 3.3.1 普通路网描述

图3.4是在3.1定义的基础上，给出概率弧Petri网的示例，通过这个示例对概率弧Petri网的概念及变迁规则进行说明。



图3.4概率弧Petri网示例

Fig. 3.4 Example of Probability Arc Petri Nets

图3.4是概率弧Petri网的一个简单示例，主要是对概率弧Petri网中的符号进行说明，并对照相应的函数以及变迁引发规则对图3.4中的概率弧Petri网进行解释。

图3.4描述的是整个路网，概率弧Petri网的运行是寻找从目标*Pb*出发到*Pe*花费时间最少的路径。为了能够精确的得到花费时间最短的路径需要考虑道路中的速度变化，假设路径上的速度变化遵循*V* =*V0*+ *t*，即速度等于初始速度加上到达该地点时的时间，*t* = *L*/*V*，即该路径长度固定时行驶时间与速度成反比，转移率函数为*λ*=*1*/*t*。其中，*POv*、*POL*、*Pev*、*Pel*、*Piv*、*Pil*为库所属性集中的属性，代表车辆的运行速度和路段长度，这些属性是在预测未来速度时用到的参数。当库所*Pb*存在主托肯，则此时*Pb*释放10个模拟托肯，这些模拟托肯中都含有时间*t*，并初始化时间*t*，*t* = 0、禁忌表，并初始化库所输入弧上的*λ*值。

图3.4中*Pb*为开始库所，*Pb*中红色的托肯为主托肯*TOKO*，黑色的为模拟托肯。其中*PO2*、*PO3*、*PO4*、*PO5*、*PO5*为普通库所，*Pe*为结束库所。图中的变迁存在三类，其中*Tb*为开始变迁；*Tf1*、*Tf2*、*Tf3*表示的是普通变迁；*Te*代表的是结束变迁。其中*M* = 10表示的是模拟托肯的数量，库所名后边的集合为库所属性集，其中每个集合表示为[*Poiv*,*Poil*]。

### 3.3.2 模型运行过程分析

图3.5根据逻辑表达式与抑制弧的转换以及概率弧Petri网的变迁引发规则不断的更改概率弧Petri网中的概率。同时通过改变变迁的时间，以达到统计每条路径上的时间。

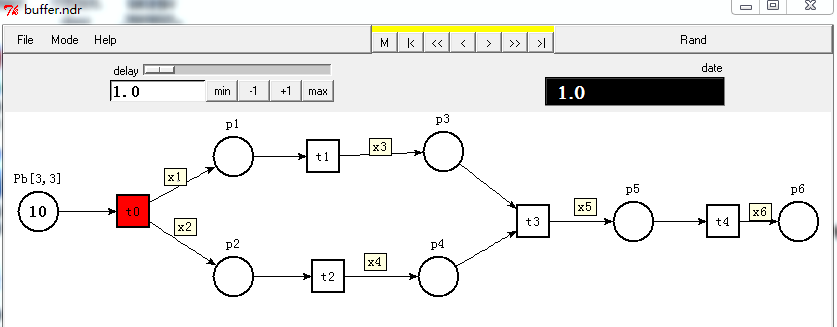
图3.5变迁*Tf*1将要引发

Fig 4.5 Transition Tf1 will Fire

图3.5是概率弧Petri网中托肯将要引发变迁*t*1，并根据*y*=*V0*+*t*及*t*=*L*/*v*，计算引发变迁*t*1的时间为0.67*t*，由于软件的局限性，库所上的预测函数、库所输入弧上的转入率需要手动计算，当变迁*t0*引发时，模拟托肯会进入库所*P1*、*P2*，在运行时我们先计算一个分支上的时间及转入率。根据库所输入弧上转入率的大小，使用单步运行的方式运行*TOKM*。

*Pb*中含有10个模拟托肯，此时模拟托肯使变迁*t0*使能，*t0*发生后所有的托肯中的*t*变为1*t*，由于*λ*1与*λ*2的值和*P1*、*P2*的实施度相同，所以模拟托肯进入*P1*和*P2*的概率是相同，托肯进入*P1*后执行预测函数Forec(*v*)计算1t后的时间，通过预测函数计算的*P1*此时的速度为3则*P1*所花费的时间为0.67*t*。预测1*t*后t2的花费的时间为0.5*t*，则*t*2先引发，同时这些托肯更新*t*的值为1.5*t*，再预测t3花费的时间为0.5*t*。则此时*t*1引发，更新进入*P3*托肯中的*t*为1.67*t*，同时更新禁忌表为*Pb*、*P1*。预测*P3*花费的时间为0.64t，若经过*P3*的托肯使*t*3要在2.31*t*时发生，则此时*t*3引发只能转移*P4*中的托肯，*t*3引发后更新经过*P4*中的t值，*t*=2.07，并更新禁忌表为*Pb*、*P2*、*P4*。预测*PO*6所花费的时间为0.49*t*，则t=2.56*t*时经过*P4*的托肯才能使*t4*引发，所以此时经过*P3*的托肯使*t*3引发，并更新*t*的值为2.31*t*。此时*PO*6花费时间为0.46*t*，当时间变为2.77*t*时，托肯才能使*t4*引发。所以禁忌表为*Pb*、*P2*、*P4*、*P5*的托肯先引发，*t4*引发后托肯进入*p*6，*t*更新为3t，禁忌表更新为*Pb*、*P2*、*P4*、*P5*、*Pe*同时更新该路径上的转移率为1/3。经过*Pb*、*P1*、PO4、P5的托肯变迁发生后进入Pe，的更新*t*的值为3.18t，则该条路径上的转移率为1/3.18。则路径上*Pb*、*P2*、*P4*、*P5*、*Pe*的转移率大。*λi*值不为0，主托肯*TOKM*开始运行。根据计算两条路径上的转入率，*Pb*→*P2*→ *P4*→*P5*→*Pe*路径上的转入率大，因此*TOKM*引发*t4*，t*4*发生后*TOKM*后进入*P2*。

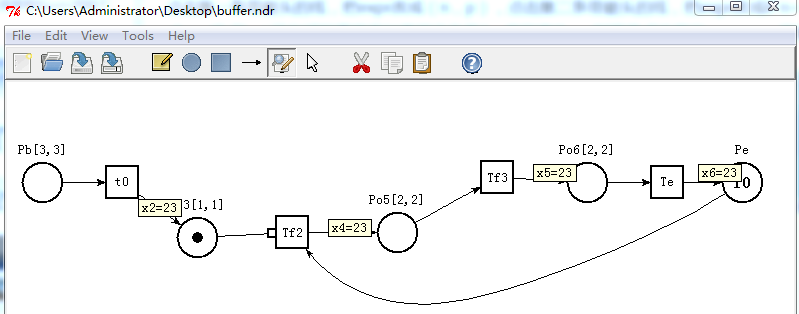
图3.6 *TOKM*引发变迁*t*0

Fig 3.6 TOKM Makes Transion t0 Firing

*TOKM triggers t0, after TO0 occurs, TOKM enters P2, and Token in p6 reaches the next transition of TOKM through Find(ToKM) function.TOKM triggers t0, after TO0 occurs, TOKM enters P2, and Token in p6 reaches the next transition of TOKM through Find(ToKM) function.*到达*p6*中的托肯能够引发*t*2，*t*2引发后按照第一次模拟过程在进行寻找路径，当寻路托肯再次到达*p6*后通过概率更新函数对变迁输出弧上的概率进行更新，通过分支更新函数更新路径。由于变迁*t*2引发后只能进入*P4*，Update(*x*)更新函数更新后的路径依然是*P4*、*P5*、*P6*。重复以上过程直到*TOKM*中的IF(*t*)函数返回*t4*后，*TOKM*引发*t4*进入*p6*，概率弧Petri网的整个过程运行结束，则*Pb*到*P*6的最优路径为*Pb*、*P2*、*P4*、*P5*、*P6*。

## 3.4本章总结（Summary）

本章主要针对业务流程建模中的流程优化问题提出了一种新的Petri网——概率弧Petri网。主要介绍了概率弧Petri网的定义、函数的含义，并对变迁引发规则进行重新定义。并分析了Petri网的模拟工具，通过对概率弧Petri网的解构，使用Tina对概率弧Petri网进行建模；并给出了概率弧Petri网的示例，对概率弧Petri网中的符号进行解释，并通过Tina模拟工具对示例进行模拟分析。

# 4概率弧Petri网与基于蚁群算法的路径寻优算法

# 4 [Probability](http://www.baidu.com/link?url=K4qylVIOIt0x162fOa8XNLC8uqLClZ-JYmRBQtJ-wr0LyruGvQD1Wkk-qyVMuxl_SZ_B2MA0QIzws41QISn3Ic9hfbV2AmO_DCax6kfa-Fq) Arc Petri Nets and the Path Optimization Algorithm Based on Ant Colony Algorithm

智能道路交通系统中的路径寻优成为人们关心的核心和重点，蚁群算法具有动态寻优的特点，能够及时为车辆作出路径调整，而概率弧Petri网在业务流程以及路径优化中发挥着重要的作用。因此，本章基于蚁群算法结合概率弧Petri网的运行得出基于蚁群算法的路径寻优算法，托肯的运行不断的对道路进行矫正，使寻找的道路达到最优。

## 4.1 ITS的信息获取（ITS Road System）

智能道路交通系统中，主要是通过智能交通系统网络的互联按照通信协议、数据交互标准获取道路和车辆的信息。通过获取的车辆和道路的信息，实现智能交通管理控制、车辆智能化控制和智能动态服务的一体化网络，车联网技术的兴起，为研究智能道路交通提供了有效的获取道路以及车辆信息的有效手段[49-59]。在ITS道路系统中的通过共享无线信道实现信息交换，获取信息道路及车辆信息，并分析影响车辆运行的因素[56]。

在普通的路径寻优中，并没有考虑到车辆运行中的动态因素对车辆行驶造成的影响，而是在车辆出发前只把道路中路径的长短作为路径寻优的主要参数，但是在智能交通中，影响路径寻优的因素不仅仅只有路径的长短。还要兼顾更多的限制因素，道路中的拥堵程度，道路的饱和程度，是否存在交通故障等复杂因素。而且在车辆运行中一些参数是动态变化的，通过这些参数的变化要及时的做出路径调整以保证路径达到最优。

图4.1为车辆从发出请求信号到获取路径的流程图，车辆发出路径请求后，信息到达车辆导航系统，车辆导航系统根据车载网络接入设备，获得算法为车辆选择的最优路径。选路算法根据不同的选路策略为车辆进行选路，影响选路策略的因素主要是道路上车辆的密度、车流量以及其它突发因素。选路算法根据选路策略为车辆选择道路，并把获得的最优路径反馈给车辆导航系统，驾驶员通过车辆导航系统的反馈查看最优路径。



图4.1车辆发出请求信号到获取路径流程图

Fig 4.1 Flow Chart of the Vehicle Sending Request Signal to the Acquisition Path

在道路寻优中大部分的研究是静态情况下的最优路径的寻找，但是随着道路环境的变化，影响道路寻优的因素有很多。蚁群算法具有动态性，能够动态的调整最优路径，但是要把蚁群算法运用到智能交通中，需要对蚁群算法进行改进。在蚁群算法中加入影响车辆运行的因素，使新的蚁群算法能够动态的寻找智能交通中的最优路径。

## 4.2 概率弧Petri网的参数(Parameters of [Probability](http://www.baidu.com/link?url=WRUMQruSM8XdZWUx8YY0dZwHMfivSVv92YLdTkD1xsAjcf2Mp4rVd4XdMwdQY14RuFTs-uPI5J7dPq5rvweacTM5PekxYHm1lp58BqHdb5S) Arc Petri Nets)

概率弧Petri网具有一定的灵活性，能够根据不同的应用场景改变库所属性集中的参数、转移率函数和预测函数等，以准确的模拟业务流程。智能道路交通系统是具有选择分支的业务流程的典型示例，通过分析概率Petri网运行运行基于蚁群算法的路径寻优算法得出从出发地到目的地的最优路径，以下是智能道路交通系统中参数在概率弧Petri网中的映射，如表4.1所示：

表 4.1智能道路交通系统中变量对应的概率弧Petri网中的符号含义

Table4.1 Symbolic Meanings in the Probability Arc Petri Nets in the Optimal Path Finding Process

|  |  |
| --- | --- |
| 符号 | 含义 |
| Pi | 道路 |
|  | 道路上车辆的自由速度 |
|  | 道路上的阻塞密度 |
|  | 道路上的输入流 |
|  | 道路上的输出流 |
|  | 道路的初始密度 |
| PiL | 道路长度 |
| *Vpi*(*t*) | *t*时刻道路*i*车辆的速度 |
|  | 路段*i*时间*t*的车辆密度 |
| *T* | 路口 |
| *Tb* | 开始路口 |
| *Tfok* | 经过路口 |
| *Te* | 目标路口 |
| *TOKM* | 车辆 |
| *TOMO* | 蚂蚁 |

表4.1中分别说明了概率弧Petri网在智能道路交通系统应用中库所、库所属性集合、变迁等各个符号代表的含义。其中库所集合中的属性用于计算蚂蚁在路口选择不同路径的概率。三种变迁也代表着不同的路口，以及两种托肯各代表了车辆和蚂蚁。

概率弧Petri网在描述业务流程中不仅要对库所属性集、变迁、托肯赋予不同的含义，而且还要根据不同的业务流程对预测函数、转入率计算公式以及分支更新函数进行设置。智能道路交通系统在路径寻优时，影响车辆运行时间的是车辆的速度、路径的长度。结合车辆速度预测算法通过概率弧Petri网中的预测函数对车辆的速度进行预测。根据概率弧Petri网对给出基于蚁群算法的路径寻优算法。

## 4.3基于蚁群算法的路径寻优算法的预测函数(Prediction Function of Path Optimization Algorithm Based on Ant Colony Algorithm)

影响车辆速度的因素很多，在本篇论文中主要考虑道路中的车辆密度对车辆速度的影响。要实现车辆最优路径的寻找，车辆速度必须满足严格的实时性，为了保证动态车辆速度影响下状态信息传输的实时性和可靠性，需要对车辆速度进行预测，通过预测未来某个时刻车辆速度，对车辆功率进行控制，避免车辆进入拥堵路段。车辆速度是车辆运行时间的一个重要参数，车辆速度的获取是在对车辆密度预测算法的基础上得出了车辆的速度预测算法，同时车辆初始密度也是计算交通流的一个重要参数，交通流具有自身时间和空间的变化规律，可以通过交通流模型，对车辆密度预测，根据车辆密度的预测算法进而预测车辆的速度[60]。

在图4.2中假设路段的长度为500m的双向4车道，在某一时刻每一车道上有10辆车，则车道的密度为：q(x,k) = 10/( 500/1000 ) = 20辆/km。



图4.2车辆密度的计算

Fig 4.2 Calculation of Vehicle Density

交通流包含三个反映交通流宏观运行状态的参数，主要包括车辆流量、车辆速度和车辆密度，三者满足以下关系[61]：

 (4.1)

其中，*q*(*x*,*k*)为时间*k*时刻路段*x*上车流量，*v*(*x*,*k*)为时间*k*时刻路段*x*上车辆的行驶速度，为时间*k*时刻路段*x*上车辆密度。

交通流符合流体动力学模型，满足守恒定律。交通流模型中通用的模型是LWR模型，该模型是关于车辆密度和车辆流量的一个常微分方程[62]：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2) |

其中，为单位时间内在路段*i*上的车辆驶入率，而为单位时间内路段*i*上的车辆的驶出率。

而在真实的交通环境下，车辆的速度受道路中车辆密度的约束，车辆的速度在道路密度达到饱和前，道路中车辆的密度越大车辆的速度越小。为了动态的得到道路中车辆的密度，利用道路中前向道路密度速度模型，描述车辆密度与车辆速度之间的关系，前向车辆密度依赖的车辆速度模型为[63]:

|  |  |
| --- | --- |
| =(1 -) | (4.3) |

其中为车辆的自由流速，为车辆的阻塞密度，为*t*时间步下位置*i*处车辆的密度。

以下为交通流体力学模型中的相关公式，基于道路车辆密度预测算法提出车辆速度预测算法。根据车辆速度预测算法得出概率弧Petri网中预测函数的计算算法。以下为获取预测函数算法的过程：

概率弧Petri网的预测函数算法

车辆速度预测算法是基于车辆密度和车辆流量，以及关系模型给出的：

输入：、、、*CI*(*x*,*t*)、*CO*(*x*,*t*)；

输出：车辆的速度；

Step 0：在库所属性集中获取车辆的自由速度和车辆的阻塞密度；

Step 1：获取*t*=0时刻道路上车流量，在库所属性集合中初始化道路的初始密度；

Step 2：根据车流量初始化库所中属性集中，道路上车辆的驶入流和驶出流；

Step 3：把、及带入公式(4.3)得出*Vpi*(0)；

Step 4：把*Vpi*(0)带入公式(4.2)计算出下一时间*t*= 1时的车辆密度；

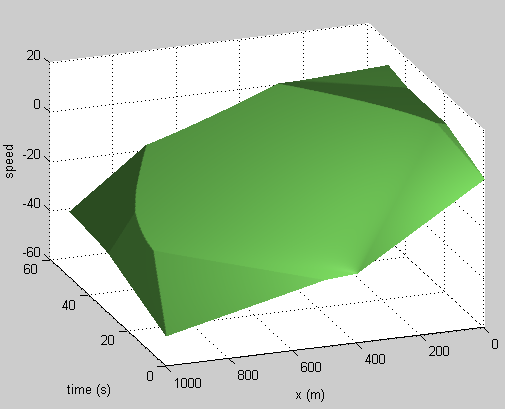
Step 5：把车辆密度带入公式(4.3)获得下一个时间步的车辆的速度；

图4.3速度、时间、距离的关系图

Fig 4.3 Speed, Time, Distance Diagram

根据概率弧Petri网的预测函数算法对各个路段上车辆的速度进行预测，用于概率弧Petri网对智能道路交通系统进行建模。图4.3为速度、时间、距离的关系图，

概率弧Petri网的预测函数算法，通过MATLAB仿真得出的车辆速度、时间、距离的关系图，对道路分成不同的长度，单位为米，则[0-400]、[400-500]、[500-1000]的车辆密度初始化为0.08veh/m、0.01veh/m、0.03veh/m。自由速度为30m/s，阻塞密度为0.1veh/m，车辆在[0-20s]、[20s-40s]、[40s-50s]的输入流为0.4veh/s、0.01veh/s、0.2veh/s。通过matlab得出速度、时间、距离图。

~~上述过程通过概率弧Petri网的预测函数计算不同道路上未来某时刻车辆的速，使车辆提前预知未来某个时间的车辆速度。当路径长度固定时车辆速度与路径上车辆消耗的时间成反比。道路中阻碍车辆速度的因素越少，车辆的速度越快，完成该条路的时间越少。动态的计算车辆的速度在路径寻优中能够保证获得的最优路径的准确性。~~

## 4.4 概率弧Petri网中路径寻优算法的相关定义及算法(Correlation Definition of Path Optimization Algorithm Based on Ant Colony Algorithm)

蚁群算法是受蚂蚁在寻找食物过程中蚂蚁会在道路上留下信息素的启发得出的一种寻找最优路径的算法。开始的蚂蚁不知道哪条路径是从巢穴到食物源的最短路径，直到道路中有信息素，蚂蚁会随着信息素浓度高的路径运行。在研究道路寻优中，很多论文中都证明了蚁群算法在路径寻优中是有效的，但是要动态的寻找路径中花费时最少的路径，还是要对蚁群算法进行改进，在原有蚁群算法的基础上加入影响车辆运行的动态因素[64]。

根据流体动力学知识能够知道，如果车辆的速度是匀速的，在一定的距离下车辆的速度与车辆的运行时间成反比。在车辆速度预测算法中可以得出将来某个时刻车辆在该路段上的平均速度，车辆速度与车辆的行驶时间成正比，结合蚁群算法中的转移率，为车辆的转移率表达式添加速度因素。根据智能道路交通系统中变量在概率弧Petri网中的对应关系及预测函数，对路径寻优算法进行定义，以及给出路径寻优算法。

### 4.4.1路径寻优算法的相关定义

**定义4.1：**路径寻优算法中蚂蚁由城市*i*到城市*j*的转入率公式为

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.5) |

其中*τij*(*t*)表示路口*i*到路口*j*在*t*时刻遗留的信息素浓度，*ηij*(*t*)是路口间启发函数，取值为1/*tij*，*Vpi*(*t*)为路段*i*路段上的平均速度。*allowekk*( *k* = 1, 2, 3, …, n )表示蚂蚁下一步允许选择的路段，*tabukk*(*k* = 1, 2, 3, …, *n*)表示蚂蚁已经走过的路段*tabuk*将随着蚂蚁的搜索过程*tabuk*集合增加。

**定义4.2：**蚂蚁分为两类，第一类为普通蚂蚁*TOKO*；另一类为主蚂蚁*TOKM*，主蚂蚁的数量Num(*TOKM*) = 1；*TOKM*的目的地为*Pe*，*Tf*为普通路口；IF(*t*)为路口判断函数判断路口的类型，变迁*t*为路口，每个*TOKO*都会含有一个IF(*t*)，IF(*t*)判断函数判断返回路口是否为*Te*。*TOKM*也含有一个判断函数，如果IF(*TOKM*)∈ *Te*，则此次路径寻优结束。

**定义4.3：**当IF(*TOKO*) ∈ *Tf*时，当IF(*TOKO*) ∈ *Te*时，*TOKO*释放信息素并更新该弧上的转移概率，并通过Find(*TOKM*)函数寻找*TOKM*的下一变迁，执行Find(*TOKM*)后返回*tf*，*TOKO*回到Find(*TOKM*)函数返回的变迁*tf*路口。

**定义4.4：**路径更新函数Update(t)，路径更新函数不断的根据各个路段上的信息素更新最优路径，当IF(*TOKM*) = *tf*时，都要执行路径更新函数Update(*t*)，返回信息素最高的路径给*TOKM*。

**定义4.5：**以下为信息素更新函数

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.6) |

其中*ρ*为挥发系数，经过*n*时刻蚂蚁经过一次循环，各个路径上的信息素更新。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.7) |

表示第*k*只蚂蚁在路径*i*到路径*j*上留下的信息素，表示在这个过程中所有蚂蚁经过该条路径时留下的信息素的总量。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.8) |

其中*Q*是常数表示蚂蚁在本条路径上释放信息素的总量，表示蚂蚁在该条路径上行走所花费的时间。在初始时刻，。

### 4.2.2基于蚁群算法的路径寻优算法

道路寻优中的道路选择策略将会影响寻找最优路径的准确性，以及寻找最优路径的时间。本文以改进的蚁群算法作为基础，通过智能道路交通系统中的基础设施动态的获取道路中车流量，动态的预测车辆的速度，并把预测的车辆速度作为车辆转入不同路口的重要影响因素。下面是基于的蚁群算法的路径寻优算法的具体流程：

图4.4 改进的蚁群最优路径选择算法流程图



Fig 4.4 Improved Ant Colony Optimal Path Selection Algorithm Flow Chart

~~(1)：车辆发出路线请求；~~

~~(2)：判断该路口是否为出发点，若是出发点，初始化蚂蚁的数量、各个道路上~~

~~的信息素浓度，若不是出发点找信息素浓度高的路径；~~

~~(3)：如果不是车辆目的地蚁群继续向下寻找；如果路口为车辆的目的地，则反馈最优路径给车辆，并更新各个路径上的道路信息；~~

~~(4)：如果车辆没有到达目的地且蚂蚁也没有到达目的地，根据路段上的信息素浓度选择路径直到所有的蚂蚁到达目的地；~~

~~(5)：检查车辆是否到目的地，如果车辆没有到达目的地，但蚂蚁到达了目的地，则蚂蚁反馈最优路径，若最优路径不同，选择最新的最优路径作为最优路径；~~

~~(6)：蚂蚁再返回到车辆的下一个路口，根据下一路口各个路段的车辆速度及之前信息素浓度寻找路径，并更新路径上的信息素，重复Step4、Step5、Step6直到车辆到达目的地；~~

图4.4是对基于蚁群算法的路径寻优算法的流程图，在流程图中能够直观的看出选路策略的具体过程，根据基于蚁群算法的路径寻优算法的流程得出基于蚁群算法的路径寻优算法。以下为基于蚁群算法的路径寻优算法：

输入：*Nmax*、Num(*TOMO*)、Pe、*CI*(*x*,*t*)、*CO*(*x*,*t*)、*ρ*(*x*,0)、*Vf*、*ρj、L*(*x*)、α、β、ρ；

输出：最优路径；

Step 0：车辆发出目的地请求后，初试化参数，令蚂蚁托肯的时间*TOMO.t* = 0和循环次数*Nc* = 0，同时设置最大的循环次数*Nmax* = 100，将蚂蚁的数量Num(*TOMO*)=10，并将蚂蚁托肯放置在开始库所*Pe*中，设置每条路径上的信息素的初始浓度= 0，初始化库所属性集中的变量；

Step 1： IF(*TOKO*) = *tf*，并且各个弧上相同，则*TOKO*会随机的进入各个未被访问的库所，根据预测函数对进入路段的车辆速度进行预测，计算该路段花费的时间，更新*TOKO*上*t*；

Step 2：修改禁忌表中城市，把刚走完的城市移入该蚂蚁的禁忌表内；

Step 3：IF(TOKO) ∈Te，通过信息素更新函数更新该条路径上的信息素；

Step 4：循环次数；

Step 5：IF(*TOKM*) ∈ *Tf*；

Step 6：Update(*t*)更新最优路径；

Step 7：更新各个库所属性集合中变量的值；

Step 8：Find(*TOKM*)，蚂蚁返回到Find(*TOKM*)继续重复步骤(2)、(3)、(4)步；

Step 9：IF(*TOKM*) = *pe*，结束算法；

以上算法是基于蚁群算法的路径寻优算法在智能交通中的应用，该算法在蚁群算法的基础上通过预测函数对各个路段未来某个时刻的车辆速度进行预测，根据蚂蚁在未来时刻走过不同路径的时间更新道路信息素浓度，在车辆到达每个路口前，都要再次进行最优路径寻找算法，根据各个路径上的最新的信息素浓度，再次反馈最优路径，在不断的对最优路径进行矫正的同时，达到寻找路径的最优。

## 4.5路况描述及速度预测仿真(Traffic Road Description and Speed Prediction Simulation )

图4.5为某个地区的路段拓扑结构图，道路拓扑结构中有九个路口，其中路口1、路口2、路口3都存在分支路口，路口2和路口3到达路口5有两条重复的道路。在拓扑结构图中不能很好的表示。该道路的拓扑结构中共有11条道路，根据基于蚁群算法的最优路径寻找算法寻找从道路1到道路11的最优路径。其中有三个路口有到达道路11的分支，因此道路1到达路径11的路径有5条，通过基于蚁群算法的路径寻优算法寻找道路1到道路11的花费时间最短的路径。



4.5某地区路段拓扑结构图

Fig 4.5 Topological Structure of a Section of a Certain Area

该路网中初始信息如表4.1所示，*CI*(*x*,*t*)为每个路段的流入车流量，*CO*(*x*,*t*)为每个路段的流出车流量，*ρ*(*x*,0)为路段上的初始密度，*Vf*为该条路段上的阻塞速度，*ρj*为该条路段上的阻塞密度，*L*(*x*)该条路段上的路径长度。输入输出流量的单位为veh/h，初始密度与阻塞密度的单位为veh/km，自由速度为km/h，各个道路的长度的单位为km。表4.2给出部分路段的初始参数：

表4.2各路段初始参数

Table 4.2 Initial Parameters of Each Section

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *NO* | *CI*(*x*,*t*) | | | *CO*(*x*,*t*) | | *ρ*(*x*,0) | | *Vf* | | *ρj* | | *L*(*x*) |
| 1 | 110 | | | 110 | | 50 | | 100 | | 100 | | 2.0 |
| 2 | 120 | | | 105 | | 45 | | 100 | | 100 | | 1.6 |
| 3 | 125 | | | 113 | | 53 | | 100 | | 100 | | 1.8 |
| 4 | 114 | | | 116 | | 46 | | 100 | | 100 | | 1.9 |
| 表4.2各路段初始参数(续)  Table 4.2 Initial Parameters of Each Section(continue) | | | | | | | | | | | | |
| *NO* | | *CI*(*x*,*t*) | *CO*(*x*,*t*) | | *ρ*(*x*,0) | | *Vf* | | *ρj* | | *L*(*x*) | |
| 5 | 100 | | | 120 | | 55 | | 100 | | 100 | | 2.2 |
| 6 | 124 | | | 132 | | 48 | | 100 | | 100 | | 1.7 |
| 7 | 110 | | | 110 | | 50 | | 100 | | 100 | | 2.9 |
| 8 | 132 | | | 130 | | 47 | | 100 | | 100 | | 1.6 |
| 9 | 127 | | | 129 | | 65 | | 100 | | 100 | | 2.1 |
| 10 | 142 | | | 140 | | 56 | | 100 | | 100 | | 2.0 |
| 11 | 127 | | | 120 | | 64 | | 100 | | 100 | | 1.9 |

表4.2为各个路段的初始参数，通过对各个路段设置的初始参数，根据路段车流量、道路初始密度、自由速度、阻塞密度通过车辆密度依赖车辆速度的模型(4.3)。根据概率弧Petri网预测函数算法，通过MATLAB对算法进行仿真，得出每条路径上不同时刻的速度。根据各路段花费时间总和寻找对应时间道路上车辆速度。

## 4.6本章总结（Summary）

本章主要介绍了智能道路交通系统中输入、输出流以及道路初始密度的获取方式，根据概率弧Petri网中库所属性集中的变量计算概率弧Petri网的预测函数，并对智能道路交通系统中车辆的速度进行预测。介绍了车辆速度与库所输入弧上转移概率的关系。基于蚁群算法提出了基于蚁群算法的路径寻优算法，最后给路况描述并对概率弧Petri网中预测函数进行仿真。

# 5概率弧Petri网对基于路径寻优算法的路网建模与分析

# 5 Modeling and Analysis of Road Network Based on Path Optimization Algorithm by Probability Arc Petri Net

智能道路交通系统的最优路径寻找是典型的选择分支的业务流程，因此我们选用概率弧Petri网对智能道路交通系统进行建模。在智能道路交通系统的动态路径寻找中，路径长度、车流量、车辆速度等因素都会影响车辆的运行时间。基于本文第三章对概率弧Petri网的概念及引发规则的定义，对智能道路交通系统进行建模，并通过概率弧Petri网动态的模拟智能道路交通系统的最优路径寻找，找出从出发点到目的地的最优路径。

## 5.1 概率弧Petri网建模与分析（Modeling and Analysis of Probability Arc Petri Nets）

根据第四章节中对概率弧Petri网中的库所属性集的初始化，预测函数的定义转入率的计算以及基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中的应用。使得概率弧Petri网能够动态的描述最优路径寻找过程。

### 5.1.1 概率弧Petri网建模

图5.1为逻辑Petri网对道路交通系统进行建模。在模型中库所代表的路段，变迁代表的是道路的交叉路口。图5.2为概率弧Petri网对道路交通系统进行建模，，图5.2-5.5为概率弧Petri网模拟改进蚁群算法在智能道路系统中动态的寻找最优路径的过程。

图5.1为逻辑Petri网对路网进行建模，逻辑Petri网中，当变迁引发后，无法判断托肯将要进入哪一个库所，库所中也不含有用于预测将来某个时刻车辆平均速度的信息以及预测函数。因此，普通的逻辑Petri网在描述动态最优路径寻优时还存在一定的局限性，而概率弧Petri网能够准确的模拟智能道路中基于蚁群算法的路径寻优算法的动态路径寻优。

图5.1普通Petri网对路网进行建模



Fig 5.1 Ordinary Petri Nets Model the Road Network

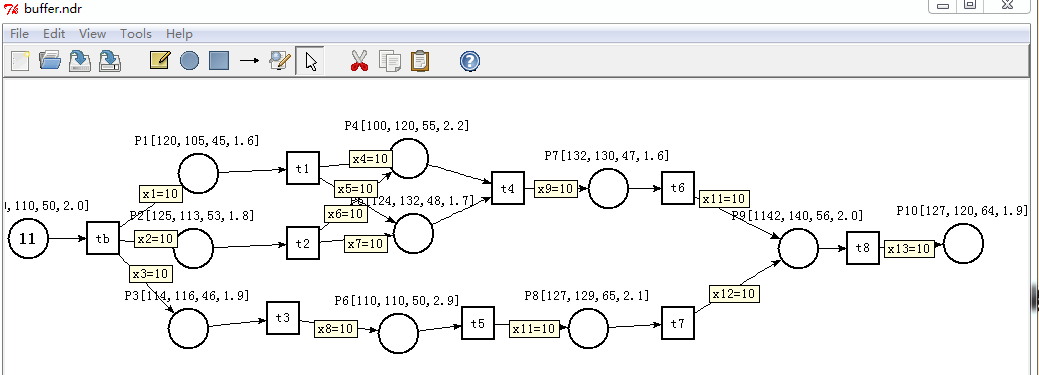
根据第三章给出的概率弧Petri网以及概率弧Petri网中的基于蚁群算法的路径寻优算法，使用概率弧Petri网对具有基于蚁群算法的路径寻优算法的路网进行建模。图5.2为概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法的智能道路系统的建模。蚁群算法中的参数值已在2.2.3节中给出，预测函数中用到的参数在库所属性集中显示。道路中的相应信息在库所属性集中显示[*Pici*，*Pico*，*Piρ0*，*PiL*]，分别表示的是道路的输入流、输出流、初始密度和道路的长度。这里假设各个路段上的阻塞密度为100veh/km，各个路段上的自由速度为100km/h。库所集中属性的*Pici*、*Pico*、的单位为veh/h，*Piρ0*的单位为veh/h，*PiL*的单位为km。 并使用Tina对具有基于蚁群算法的路径寻优算法的路网模拟，通过模拟寻找最优路径。

图5.2概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法的智能道路系统的建模

Fig 5.2 Modeling of Intelligent Road System Based on Optimum Path Finding Based on Ant Colony Algorithm with Probability Petri Nets

图5.2是概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法的智能道路系统的建模，图中库所上多了库所集合属性，这些值是根据具体交通情况进行假设的数据，通过预测函数预测车辆的速度。普通Petri网是无法携带这些信息。图5.2中的*λi*为车辆进入路口后选择进入哪条道路的概率。在图5.2概率弧Petri网中根据变迁引发规则寻找路口*Pb*到路口*P*10的花费时间最少的道路。根据2.2.3节，蚁群参数设置为α =0.5、*β* = 0.5、*ρ*=0.6。根据参考文献[24]的建议设定库所*Pb*中的初始托肯数为10，*λ*1~*λ*13的初始信息素均为10，库所P1到库所*P*10各个库所的初始实施度分别为34、26、28、20、30、17、33、16、22、24。

### 5.1.2过程分析

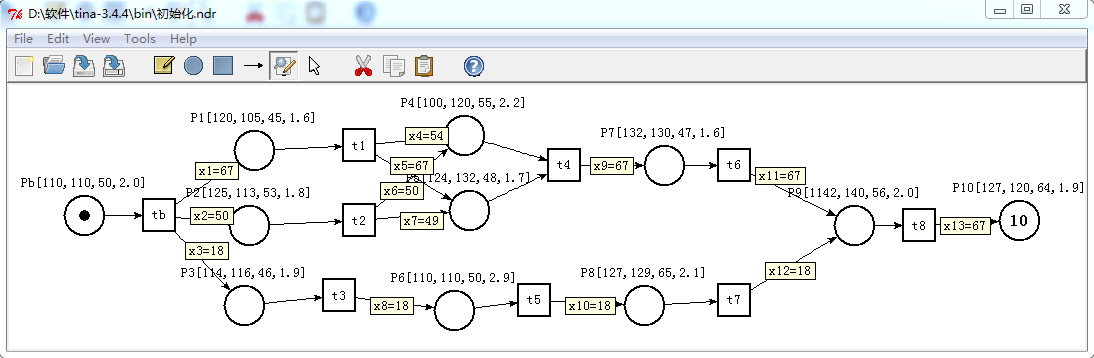
根据概率弧Petri网设定的各个初始值，图5.3为概率弧Petri网在经过一次路径寻找后，对各条道路上的*λ*值进行更新，寻找到最优路径通过信息反馈机制把最优路径反馈给主托肯，即道路中的车辆。

图5.3概率弧Petri网第一次路径寻找

Fig 5.3 Probability Arc Petri Nets Simulation for The First Time Path Finding

图5.3为概率弧Petri网对道路经过一次最优路径寻找，更新了各个路径上的*λ*值后，得到的最优路径为*Pe*→*P*1→*P*5→*P*7→*P*9→*P*10，最优路径花费时间为0.185h。并通过概率弧Petri网中的信息反馈机制把最优路径反馈给了*TOKM*，*TOKM*使变迁*tb*使能。当变迁*tb*引发后*TOKM*进入库所*P*1，通过*TOKO*上的Find(*t*)函数寻找*TOKM*，库所*P*10形成一条指向变迁*t*1的弧，再次寻找*P*1到*P*10的最优路径，纠正之前的道路。

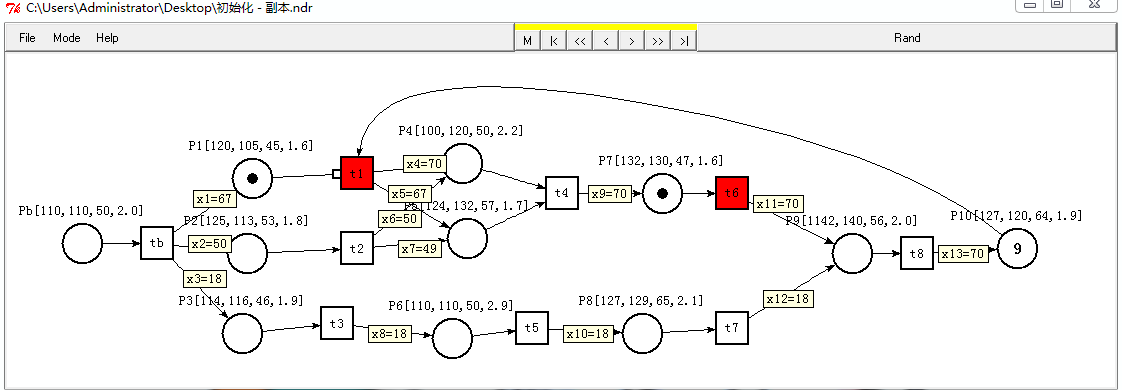
图5.4 TOKM使变迁tb引发后

Fig 5.4 After TOKM Makes Transition tb Firing

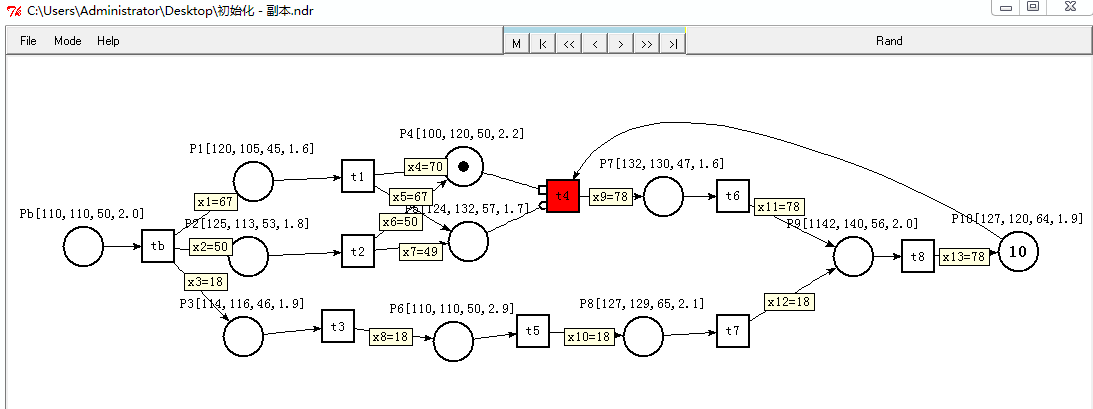
图5.4为*TOKM*引发变迁*Tb*后，*TOKM*引发变迁*tb*的时间为0.029h。概率弧Petri网再次获取道路2到道路11的各个道路的信息，*TOKO*再次寻找从*P*1到*P*10的最优路径，并更新各个弧上的*λ*值。根据图5.4能够看出，由于道路中的车辆的密度发生了改变，更新各个路段上的车辆密度，车辆速度，对库所属性集中的变量重新赋值，寻路*TOKO*经过一次寻找最优路径后，道路*P*1→*P*4→ *P*7→*P*9→ *P*10上的*λ*值最大，因此通过道路更新函数更新的最优路径为*P*1→*P*4→ *P*7→*P*9→ *P*10。

图5.5 TOKM使变迁t1引发后

Fig 5.5 After TOKM Makes Transition t1 Firing

通过更新函数更新的路径, 路径*P*1→*P*4→ *P*7→*P*9→ *P*10上的转入率大于其他道路上的转入率，因此*TOKM*引发变迁*t1*后进入库所*P*4。进入库所*P*4后，即使*P*4到*P*10没有选择分支，但寻路*TOKO*依然会进行再次寻找最优路径，直到*TOKM*中的IF(*t*)函数返回*t8*，*TOKO*才不会再次寻找*TOKM*到目标库所的最优路径。变迁t1引发后库所*P*10指向变迁*t1*的弧消失。当*TOKO*再次全部进入目标库所时，形成一条从库所*P*10指向变迁*t*4的弧。



图5.6最优路径寻找结束

Fig 5.6 End of Optimal Path Finding

其它变迁的引发情况类似，此处不再赘述。图5.6为*Pb*到*P*10最优路径结果图。

*TOKO*为*TOKM*最终寻找的最优路径为*P*1→*P*4→ *P*7→*P*9→ *P*10，总用时为0.183h，*TOKM*进入*P*10后概率弧Petri网运行结束，概率弧Petri网动态模拟最优路径寻找过程结束。

## 5.2性质分析(Property Analysis)

可达性是Petri网的基本性质，Petri网的可达性是分析其它动态性质的基础，通过可达图能够得出从*Pb*到*P*10的最短路径。下面首先根据网的运行状态获得概率弧Petri网的可达标识。根据图3.2，用M表示信息状态，M=([num(*TOK*), Type(*TOK*)], *Poiv*, *Poil*)，其中num(*TOK*)表示库所中托肯的数量，Type(*TOK*)为托肯的类型，*POiv*表示此时库所的速度， *POil*表示该库所的路径长度。下面的表是图3.2的状态列表：

表5.1 *P*b→*P10*的最优路径寻找

Table 5.1 Optimal Path Finding of *P*b→*P10*

|  |  |
| --- | --- |
| S0 | (([(1,TOKM),(10,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S1(tb) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([1,TOKo],65.1,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S2(t1) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([1,TOKo],45.2, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |

表5.1 *P*b→ *p*10的最优路径寻找(续)

Table 5.1 Optimal Path Finding of *Pb*→ *p*10(Continue)

|  |  |
| --- | --- |
| S3(t4) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([1,TOKo],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S4(t6) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([1,TOKo],44.3,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S5(t8) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([1,TOKo],36.1,1.9)) |
| S6(t1) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([1,TOKo],48.1,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S7(tb) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([1,TOKo], 47,3,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S8(t2) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([1,TOKo],45.3, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S9(t4) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([1,TOKo],53.2,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S10(t6) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([1,TOKo],44.3,2.0), ([0],361.9)) |
| S11(t8) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([1,TOKo],36.5,1.9)) |
| S12(t2) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([1,TOKo],52.2,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S13(tb) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([1,TOKo],54.2,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S14(t3) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([1,TOKo],50.4,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S15(t5) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([1,TOKo],45.4,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S16(t7) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([1,TOKo],44.1,2.0), ([0],36,1.9)) |
| S17(t8) | (([(1,TOKM),(9,TOKO)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([1,TOKo],36.4,1.9)) |
| S18(tb) | (([(1,TOKM)],50,2.0), ([0],65,1.6), ([0], 47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([10,TOKo],36.5,1.9)) |

由于相似的状态比较多，因此处省略了一些状态不在一一进行列举。根据概率弧Petri网的运行过程，当托肯全部进入目标库所*P*10时，路径*P*1→*P*5→ *P*7→*P*9→ *P*10上的信息素浓度最大，因此*TOKM*引发*tb*使能后进入库所*P*1，表5.2是从*P*1到库所*P*10的最优路径寻找状态：

表5.2 *P*1→ *P10*的最优路径寻找

Table 5.2 Optimal Path Finding of *P*1→ *P10*

|  |  |
| --- | --- |
| S19(tb) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45, 2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([10,TOKo],36.5,1.9)) |
| S20(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([1,TOKO],45.7,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([9,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S21(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([1,TOKO],53.8,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([9,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S22(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9),([0],53.8,1.6),([0],45,2.1),([1,TOKO],44.4,2.0), ([9,TOKo],36.5, 1.9) ) |
| S23(t8) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([0],53.8,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([10,TOKo],36.7, 1.9) ) |
| S24(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([3,TOKO],45.7,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([7,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S25(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([3,TOKO],53.8,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([7,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S26(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7),([0],50,2.9),([0],53.8,1.6),([0],45,2.1), ([3,TOKO],44.4,2.0), ([7,TOKo],36.5, 1.9) ) |
| S27(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([5,TOKO],45.7,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([5,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S28(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([5,TOKO],53.8,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([5,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S29(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7),([0],50,2.9),([0],53.8,1.6),([0],45,2.1), ([5,TOKO],44.4,2.0), ([5,TOKo],36.5, 1.9) ) |
| S30(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([7,TOKO],45.7,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([3,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S31(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([7,TOKO],53.8,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([3,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S32(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7),([0],50,2.9),([0],53.8,1.6),([0],45,2.1), ([7,TOKO],44.4,2.0), ([3,TOKo],36.5, 1.9) ) |
| S33(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([1,TOKO], 52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([9,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S34(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([1,TOKO],53.9.,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([9,TOKo],36.5,1.9) ) |

表5.2 *P1→ P10*的最优路径寻找(续)

Table 5.2 Optimal Path Finding of *P*1→ *P*10 (Continue)

|  |  |
| --- | --- |
| S35(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53.,1.6), ([0],45,2.1), ([1,TOKO],44.4,2.0), ([9,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S36(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([5,TOKO], 52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([5,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S37(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([5,TOKO],53.9.,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([5,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S38(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53.,1.6), ([0],45,2.1), ([5,TOKO],44.4,2.0), ([5,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S39(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([8,TOKO], 52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([2,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S40(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([8,TOKO],53.9.,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([2,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S41(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53.,1.6), ([0],45,2.1), ([8,TOKO],44.4,2.0), ([2,TOKo],36.5,1.9) ) |
| S42(t1) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6),([0],47,1.8),([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([10, TOKO], 52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36.5,1.9) ) |
| S43(t4) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([10,TOKO],53.9.,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44,2.0), ([0],36.5,1.9) ) |
| S44(t6) | (([0],50,2.0), ([(1,TOKM)],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52,1.7), ([0],50,2.9), ([0],53.,1.6), ([0],45,2.1), ([10,TOKO],44.4,2.0), ([0],36.5,1.9) ) |

根据运行过程中，转入率更新，*TOKM*使变迁*t*1引发后进入*P*4，通过更新路径得到新的路径为*P*1→*P*4→ *P*7→*P*9→ *P*10。表5.3为库所*P*7到*P*10,*TOKM*的运行状态：

表5.3 *P*5→ *P*10上*TOKM*的运行

Table 5.3 Running of TOKM on *P*5→ *P*10

|  |  |
| --- | --- |
| S45(t1) | (([0],50,2.0), ([0],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([(1,TOKM)],52.5, 1.7), ([0],50,2.9), ([0],53.,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44.4,2.0), ([10, TOKO], 36,1.9)) |
| S46(t4) | (([0],50,2.0), ([0],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52, 1.7), ([0],50,2.9), ([(1,TOKM)],53.8,1.6), ([0],45,2.1), ([0],44.4,2.0), ([10, TOKO],36,1.9)) |
| S47(t6) | (([0],50,2.0), ([0],65.3,1.6), ([0],47,1.8), ([0],54,1.9), ([0],45,2.2), ([0],52.5, 1.7), ([0],50,2.9), ([(0)],53,1.6), ([0],46,2.1), ([1,TOKM],44.4,2.0), ([10 , TOKO],36,1.9)) |
| S48(t8) | (([0],50,2.0),([0],65.3,1.6),([0],47,1.8),([0],54,1.9),([0],45,2.2),([0],52.5,1.7),([0],50, 2.9), ([(0)],53,1.6), ([0],46,2.1), ([0],44.4,2.0), ([(1,TOKM),(10, TOKO)], 36, 1.9)) |

图5.7 基于蚁群算法的最优路径寻找的智能道路建模的可达图

Fig 5.7 Reachable Graph of Intelligent Road Modeling Based on Ant Colony Algorithm for Optimal Path Finding

表5.1到表5.3的状态标识是通过图5.2概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法的智能道路系统的建模的运行过程得出来的，第一次最优路径寻找过程中的状态表示比较多，由于篇幅限制省略了一部分状态标识，但是省略的状态标识不会影响概率弧Petri网可达性分析。图5.7是根据概率弧Petri网的可达图算法得出了基于蚁群算法的路径寻优算法的智能道道路交通系统的可达图，根据可达图能够分析车辆走过的状态，根据图5.7得出*TOKM*的在变迁引发时的状态标识*S*19、*S*23、*S*45、*S*46、*S*47、*S*48。

根据概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中应用进行建模与分析得到从路径1到路径11花费时间最短的路径为1→2→5→8→10→ 11，通过概率弧的动态运行得出该路径下的预测时间为0.183h。该时间是基于概率弧Petri网中预测函数对车辆速度的预测，以及车辆路径寻优算法的基础上，通过概率弧Petri网的运行得出的。

## 5.3算法对比(Algorithm Comparison)

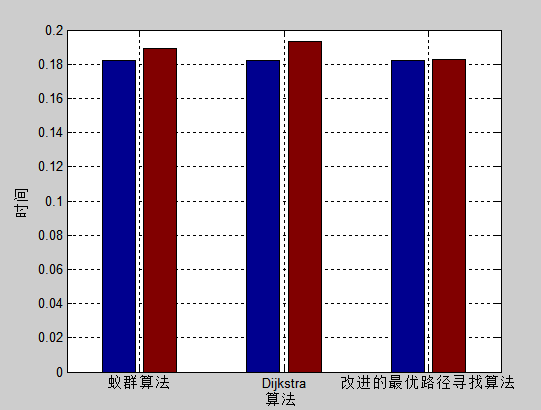
本节的数据使用4.3节给出的各个路段的初始数据，通过车辆速度预测算法对各个路段上的速度进行预测。在使用相同速度预测算法预测各个路段上的速度，使用不同的算法寻找路段1到路段11最优路径。对文献[64]提出的改进的Dijkstra算法和文献[48]中提出的蚁群算法与基于蚁群算法的路径寻优算法得出的最优路径对比车辆的运行时间。根据matlab对给出初始化的交通网进行仿真，得出各条道路上车辆花费时间，图5.8为不同算法下的预测时间与车辆运行时间：

图5.8 不同算法下的预测时间与车辆运行时间

Fig 5.8 Prediction Time and Vehicle Running Time under Different Algorithms

图5.8为不同算法下寻找的最优路径后预测的时间与车辆在最优路径上运行时间的柱状图，蓝色表示的为车辆在各个路径上运行的最少时间的柱状图。红色的表示的是不同算法下寻找的最优路径预测的时间。通过图5.8的柱状图，能够看出虽然改进Dijkstra算法与改进的动态最优路径寻找算法寻找的最优路径为同一条道路，但是改进Dijkstra算法对该条路径的预测时间为0.193，基于蚁群算法的路径寻优算法预测的时间为0.183。蚁群算法寻找的最优路径的预测时间为0.189h。相对于其他两种算法，基于蚁群算法的路径寻优算法预测的时间与车辆到达目的地的最短时间相差最小。改进的动态最优路径算法寻找的最优路径虽然不是长度最短的，但是他能兼顾道路车流量、车辆速度、路径长短为车辆寻找一条花费时间最短的道路并能成功的避开由于各种原因造成的突然拥堵的路段。

## 5.4模型对比(Model Comparison)

经过上述概率弧Petri网对智能道路交通系统中最优路径寻找过程，找出了从Pb到Pe的最优路径为*P*1→*P*4→ *P*7→*P*9→ *P*10，花费时间为0.183h。概率弧Petri网在最优路径寻找中不断的更新库所中的信息，车辆每到达一个新的路口时，对车辆未通过的路段进行信息更新，不断的更新库所中的信息，保证预测函数的准确性，在上述寻找过程中由于不断的更新道路中的信息，才能成功的避开了*P*5路段突然拥堵的情况。概率弧Petri网的两类托肯，其中模拟托肯能够根据预测函数预测的某些影响性能的因素，根据时间计算转入率，托肯根据库所输入弧上转入率的大小选择不同的分支。并把寻找的最优分支反馈给主托肯，主托肯沿着最优分支完成业务流程的运行。

普通的Petri网在业务流程建模中发挥着重要的作用，但是在业务流程未知因素的预测、最优路径寻找时，普通Petri网无法对未知因素进行预测和区分各条路径的优劣。逻辑Petri网通过逻辑表达式简化了普通Petri网，在处理批处理系统中发挥着重要的作用，表现出批处理中的不确定性，但是在业务流程优化中需要寻找最优的路径，逻辑Petri网没有区分不同分支对于整个业务流程的影响程度的能力，因此逻辑Petri网不能对具有分支的业务流程进行优化。

时间延迟Petri网，只能在事先知道每个变迁花费时间多少的情况下才能使用时间延迟Petri网。时延Petri网中没有预测函数，无法预先知道哪个变迁花费的时间，只有每个流程都进行真实的运行后才能知道哪条路径是最优的。普通Petri网、逻辑Petri网、时延Petri网在对具有选择分支的业务流程中不能准确的选择最优分支，容易造成资源浪费等。

## 5.5 本章总结（Summary）

本章主要分析了概率弧Petri网在智能道路交通系统中的应用，根据第四章中概率弧Petri网与基于蚁群算法的路径寻优算法的关系，使用概率弧Petri网对智能道路交通系统进行建模；通过概率弧Petri网的运行过程，动态的寻找*Pb*到*P*10的最优路径寻；通过对所建模型进行可达性分析能够得到车辆运行时的各个状态，以及根据到达该状态时引发的变迁得到车辆经过的所有路口。并对普通Petri网逻辑Petri网、时延Petri网在对具有选择的业务流程建模中存在的不足进行了分析。

# 6 总结与展望

# 6 Conclusions and Prospects

## 6.1总结（Conclusions）

在对具有分支的业务流程建模时，如何获得业务流程的最优路径是人们关注的问题。本文通过概率弧Petri网对基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中的应用进行建模，并分析了基于蚁群算法的路径寻优算法以及概率弧Petri网的有效性。

在对带有选择分支的业务流程建模时，普通的Petri网以及时延时Petri网不能预先得知哪条路径是最优的，只有业务流程运行结束后才能确定哪个分支是最优的。本文针对这一问题提出了概率弧Petri网。概率弧Petri网是一种相对灵活的建模工具，它可以根据不同的应用场景修改库所中的属性集合、转换率公式以及预测函数，库所属性集中的属性作为预测函数的参数，预测函数用来预测业务流程运行过程中某些变化的参数，转换率用来引导主托肯的运行。在概率弧Petri网的运行过程中，如果有参数发生改变要及时更新库所集中属性的值。转换率是主托肯在变迁引发后选择进入哪条路径的重要依据，解决了普通逻辑Petri网在对带有选择分支的业务流程建模时不能预先知道哪条路径最优的问题。智能道路交通系统的建模是带有选择分支的一种网状结构。根据基于蚁群算法的路径寻优算法与概率弧Petri网的映射关系，得出概率弧Petri网的预测函数以及基于概率弧Petri网的路径寻优算法。

本文在深入研究智能道路交通系统运行过程的基础上，为了能够准确的得到智能道路交通系统中从出发位置到目标位置花费时间最短的路径，在预测交通密度算法的基础上得出概率弧Petri网的预测函数。预测函数能够预测将来某个时刻不同路段上车辆的平均速度。车辆速度是影响车辆运行时间的重要因素，根据流体动力学，确定时间与速度的关系。蚁群算法在最优路径寻找中得到广泛的应用，在寻找从出发位置到目标位置花费时间最短的路径中，把道路上运行时间的长短作为蚂蚁释放信息素的参考因素。在原有蚁群算法的基础上改进了转入率，在车辆到达每个路口时都要进行一次最优路径寻找过程，纠正最优路径，防止车辆进入由于突发事件导致车辆拥堵的路段。并通过Matlab对概率弧Petri网中的预测函数进行仿真。

基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中的应用，使用概率弧Petri网对智能道路交通系统建立模型，分析了概率弧Petri网的运行过程，找出了从出发库所到目的库所的花费时间最短的路径，成功的避开了由于突发因素导致拥堵的段路径，根据可达图找出了车辆运行时的状态。通过分析其它Petri网在对具有分支的业务流程建模时存在的问题，分析概率弧Petri网的优势。

## 6.2 展望（Prospects）

基于蚁群算法的路径寻优算法在智能道路交通系统中的应用，为智能道路交通系统最优路径的寻找奠定了基础，车辆平均速度的预测算法为以后智能道路系统研究提供了贡献。基于蚁群算法的路径寻优算法在考虑到道路上车辆密度与车流量的基础上是有效的，但是在智能道路系统的车辆行驶还会受路口红绿灯、天气等因素的影响，要想准确的寻找花费时间最短的路径还需要考虑更多的因素。

概率弧Petri网方面，下一步的工作将改进概率弧Petri网使其得到更广泛的应用，不仅仅只用于带有分支的业务流程最优路径的寻找，而是在概率弧Petri网不设置某些参数、函数时与普通的Petri网相同，使概率弧Petri网更灵活、通用。在定量分析方面，概率弧Petri网需要考虑其它性能评价因素，从而能对业务流程进行性能预测及瓶颈分析等，在没有较好的仿真前，在分析概率弧Petri网的可达性可能会存在一定的难度。在模型仿真工具方面，设计开发概率弧Petri网的仿真工具，能够对概率弧Petri网建立的业务模型进行模拟和性质分析。

# 参考文献

1. 刘智勇．智能交通控制理论及其应用[M]．科学出版社，2003．
2. 张国伍．智能交通系统工程导论[M]．电子工业出版社，2003．
3. 宁涛,焦璇,魏瑛琦,梁旭.基于量子蚁群算法的随机需求的动态车辆路径问题[J].大连交通大学学报,2018,39(05):107-110.
4. 陈冠宇,孙鹏,廖梦琛,张杰勇,武君胜.基于全局更新规则蚁群优化的决策实体配置问题求解方法[J/OL].计算机应用研究,2019(10):1-9[2019-03-13]
5. [G](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28Guohui%20Zhang%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson).H Zhang， Y.H [Wang](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28Yinhai%20Wang%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson)．[Optimizing Minimum and Maximum Green Time Settings for Traffic Actuated Control at Isolated Intersections](http://www.researchgate.net/publication/220109150_Optimizing_Minimum_and_Maximum_Green_Time_Settings_for_Traffic_Actuated_Control_at_Isolated_Intersections" \t "_blank)[J]. [IEEE Intelligent Transportation Systems Society](http://sites.ieee.org/itss/),2011, 164 - 173．
6. B Chen and H.H Cheng, A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems[J], [IEEE Intelligent Transportation Systems Society](http://sites.ieee.org/itss/), Jun. 2010, 485 - 497．
7. C.Q Ma, D.SH Jiang. Intelligent Model of Urban Road Tunnel Ventilation System Based on Multi-Level Neural Network[P]. CircuITS, Communications and Systems, 2009. PACCS '09. Pacific-Asia Conference on, 2009.
8. X.J Guo, Q.A Zhu traffic flow forecasting model based on BP neural network[P]. Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), 2009 2nd International Conference on, 2009.
9. 王聘, 刘伟, 杜玉越. 基于逻辑数据 Petri 网的业务过程建模与分析[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(5):921-930
10. W Liu, P Wang, Y.Y Du, et al. Extended Logical Petri Nets-based Modeling and Analysis of Business Processes[J]. IEEE Access, 2017, (5):16829-16839.
11. X.F Zou, Zh Wang, L Zheng, H.H Dong, Traffic impact analysis of urban construction projects based on traffic simulation[J]. 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, 2012, pp. 3923-3927.
12. 景玲．城市动态路径诱导系统框架及最优路径选择算法研究[D]．重庆：重庆大学，2002．
13. Y. Lv, Y. Duan, W. Kang, Z. Li and F. Wang, Traffic Flow Prediction With Big Data: A Deep Learning Approach[J], in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 16, no. 2, pp. 865-873, April 2015.
14. D Kang, Y Lv and Y Chen, Short-term traffic flow prediction with LSTM recurrent neural network[J], 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, 2017, pp. 1-6.
15. 高曼,韩勇,陈戈,张小垒,李洁.基于K-means聚类算法的公交行程速度计算模型[J].计算机科学,2016,43(S1):422-424+439.
16. 宫晓燕,汤淑明.基于非参数回归的短时交通流量预测与事件检测综合算法[J].中国公路学报,2003(01):83-87.
17. 伍伟. 智能化交通路径优化算法的设计与实现[D].南昌大学,2016.
18. 韦凌翔,陈红,王永岗,蔡志理,钟栋青,李玉华.短时交通流量预测方法[J].山东交通学院学报,2017,25(03):22-29.
19. 黄文明,徐双双,邓珍荣,雷茜茜.改进人工蜂群算法优化RBF神经网络的短时交通流预测[J].计算机工程与科学,2016,38(04):713-719.
20. 李松,刘力军,解永乐.遗传算法优化BP神经网络的短时交通流混沌预测[J].控制与决策,2011,26(10):1581-1585.
21. 吴哲辉．Petri 网导论[M]．机械工业出版社, 2006．
22. W Liu, P Wang, Du Y.Y, Yan C. Logical Petri nets with data[C]. Proceedings - 5th International Conference on Instrumentation64 and Measurement, Computer, Communication, and Control, IMCCC 2015, 2016: 840-844.
23. Peterson, J.L, PrenticeHall. Petri Net Theory and Modeling of Systems[J]. 2010: 290-293．
24. 林闯, 王元卓, 杨扬,等. 基于随机 Petri 网的网络可信赖性分析方法研究[J].电子学报,2006,
25. X. M Gui, Jian-Sheng H.U, Huang X M, et al. Simulation of Discrete Time Probability Petri  
    Nets Based on VHDL[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(8):1953-1956.
26. F Liu. Colored Petri Nets for Systems Biology[D]. German: Brandenburg University of Technology Cottbus, 2012: 4-15, 88-89.
27. Han S, Youn H.Y. Modeling and Analysis of Time-Critical Context-Aware Service Using Extended Interval Timed Colored Petri Nets[J]. IEEE Press, 2012,42 (3) :630-640
28. [L](http://apps.webofknowledge.com/OneClickSearch.do?product=UA&search_mode=OneClickSearch&excludeEventConfig=ExcludeIfFromFullRecPage&SID=6CjrhFtEuWS8hnWJips&field=AU&value=Liu,%20Lei) Liu, [W](http://apps.webofknowledge.com/OneClickSearch.do?product=UA&search_mode=OneClickSearch&excludeEventConfig=ExcludeIfFromFullRecPage&SID=6CjrhFtEuWS8hnWJips&field=AU&value=Liu,%20Wei) Liu, [Y](http://apps.webofknowledge.com/OneClickSearch.do?product=UA&search_mode=OneClickSearch&excludeEventConfig=ExcludeIfFromFullRecPage&SID=6CjrhFtEuWS8hnWJips&field=AU&value=Du,%20Yuyue).Y Du. [Business Process Modeling and Analysis Based on Queue Logical Petri Nets[J]. 2019(29):115-137.](http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=6CjrhFtEuWS8hnWJips&page=1&doc=1)
29. Pashazadeh S, Niyari E.A. Modeling Enterprise Architecture Using Timed Colored PETRI Net: Single Processor Scheduling[J]. International Journal of Managing Public Sector Information&Co, 2014, 5(1):1-12.
30. 肖增良,乐晓波,周辉.基于蚁群-遗传算法的模糊Petri网参数优化算法[J].计算机工程与应用,2010,46(29):33-35+52.
31. 雷甜. 基于时延赋色Petri网的车辆旅行时间预测与分析[D].长安大学,2015.
32. 胡昆. 基于改进蚁群算法的避免拥堵最优路径选择[D].西南交通大学,2018.
33. 朱启航,周杰,张文举.基于蚁群算法和Petri网的井下有轨运输调度优化[J].现代矿业,2016,32(05):21-24.
34. 杨琰. 基于Petri网的城市交通网络建模及最优路径算法研究[D].广西师范学院,2013.
35. 郑文艳,赵丽敏.改进蚁群算法在VRP问题中的应用及颜色Petri网实现[J].计算机系统应用,2018,27(11):186-191.
36. 张梅. 基于Petri网与蚁群算法的可重入系统调度问题的研究[A]. 中国自动化学会控制理论专业委员会、中国系统工程学会.第三十三届中国控制会议论文集（E卷）[C].中国自动化学会控制理论专业委员会、中国系统工程学会:中国自动化学会控制理论专业委员会,2014:6.
37. 惠晓龙,郜振鑫.一种基于Petri网的多目标无死锁蚁群调度算法[J].电子科技,2014,27(05):179-181.
38. 龙运军,陈宇宁,陈英武,邢立宁.基于Petri网和混合蚁群算法的多星成像调度[J].计算机工程,2013,39(01):35-40.
39. 朱伟,徐克林,孙禹,高丽.Petri网融合蚁群算法的物流配送路径规划[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(12):2229-2234.
40. 石立宝,张舒,姚良忠,倪以信,Masoud Bazargan.蚁群-条件禁忌混合计算智能算法的Petri网路径寻优[J].系统仿真学报,2011,23(11):2400-2405.
41. 杜玉越. 电子商务系统的 Petri 网建模理论与分析技术研究[D]. 同济大学, 2003:15-85
42. 林闯．随机Petri网和系统性能评价[M]．北京：清华大学出版社，2005．
43. 宁涛,焦璇,魏瑛琦,梁旭.基于量子蚁群算法的随机需求的动态车辆路径问题[J].大连交通大学学报,2018,39(05):107-110.
44. 耿浩. 智能交通分布式动态路径诱导系统路径优化问题研究[D].兰州交通大学,2016.
45. 胡小兵．蚁群优化原理，原理及其应用研究[D]，重庆：重庆大学，2004．
46. 郭晓法．改进蚁群算法在智能交通系统领域中的应用研究[D]，大连：大连海事大学2016．
47. 李士勇．蚁群算法及其应用[M]．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2004．
48. 杜磊．蚁群算法的研究及其在路径寻优中的应用[D]，太原，太原理工大学，2018．
49. 张福新．协同车辆安全系统自适应信道拥塞控制研究[D]．大连：大连理工大学，2016．
50. Hart P.E，Nilsson N.J，Raphael B．A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]．IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics，1968，4( 2) : 100-107．
51. Liu B, Yan X, Li Q and Huang S, An improved method for traffic control relying on close-loop control theory[J].2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010)*,* Wuhan, 2010, pp. 48-50.
52. Zhu X, A Petri-net modeling approach for airport apron traffic dynamics[C]. 2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*,* Dalian, 2017, pp. 2332-2337.
53. 王勇,刘国盼.基于蚁群算法的货物配送路径优化研究[J].内燃机与配件,2018(14):178-181.
54. 程政. 城市道路短时车流量预测模型研究[D].中国科学技术大学,2016.
55. 刘研. 基于萤火虫算法和RBF神经网络的高速公路交通流预测[D].长安大学,2016.
56. 范静. 车联网环境下城市车辆安全高效寻路方法研究[D].武汉大学,2017.
57. 张艳蕊．基于改进蚁群算法的BP神经网络优化的研究与应用[D]**．**东北**．**东北大学，2013．
58. 秦勇,梁旭．[基于混合遗传算法的并行测试任务调度研究](http://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=GWCL201609017&dbcode=CJFQ&dbname=CJFD2016&v=" \t "kcmstarget)[J]. 国外电子测量技术. 2016(09)．
59. 余婷．基于实时路况的交通网络耗时最优路径研究[D]．南京：南京林业大学，2017．
60. 袁崇义．Petri网原理[M]．北京：电子工业出版社，2005．
61. Moretti F，Pizzuti S，Panzieri S，et al．Urban traffic flow forecasting through statistical and neural network bagging ensemble hybrid modeling [J]．Neurocomputing, 2015, 167: 3-7．
62. Oh S.D,Kim Y.J, Hong J.S, Urban traffic flow prediction system using a multifactor pattern recongnition model[J]．IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2015，16(5)：2744-2755．
63. Han K, Gayah V.V, Piccoli B，et al．On the continuum approximation of the on-and –off signal control on dynamic traffic networks [J]．Transportation Research Part B：Methodological，2011，61: 73-87．
64. Ho I.W，Leung K.K，Polak J.W．Probability model and connectivity dynamics for VANETs in signalized road systems [J]．IEEE/ACM Transactions on Networking，2011, 19(1) :195-208．

**作者简历**

一、基本情况

姓名：刘雷 性别：女 民族：汉 出生年月：1991-02-10 籍贯：山东省泰安市

1. 2011.09-2016.07 山东滨州学院学士

2. 2016.09-2019.07 山东科技大学硕士

二、攻读学位期间发表学术论文情况

1. Business Process Modeling and Analysis Based on Queue Logical Petri Nets[J]. 2019(29):115-137，第一作者，SCI检索号：000458392900006

2. Business Process Modeling and Analysis Based on Queue Logical Petri Nets[C].  1st International Conference on Networks Information Service .会议录用，第一作者；2017年7月22.

3. ‘一种基于队列逻辑Petri网的过程分析方法’ 发明专利，发明人，专利号201810616589.6.

三、攻读学位期间获奖情况

1. 2017年美国大学生数学建模，获得三等奖；

2. 2016-2017年获得学业奖学金二等奖；

3. 2017年获得优秀个人；

4. 2017-2018年获得学业奖学金一等奖；

5. 2018年获得优秀研究生；

6.2019年获得优秀研究生；

7.2019年获得优秀毕业生。

四、攻读学位期间研究项目情况

1. 扩展逻辑 Petri 网理论及其在跨组织业务过程协同中的应用研究， 国家自然科学基金项目(61472228)，2015.01-2018.12.

# 致 谢

时间飞逝，转眼我的研究生生涯即将画上一个句号，在这充满奋斗三年的历程中，带给我学生生涯无限的激情和收获，对此要非常感谢我的老师和同学们，感谢他们一路来对我细心的照顾和帮助，感谢他们对我一直以来的鼓励和指导。在此我要向他们表达我最真挚的谢意。

在这三年的学习生涯中，首先要感谢我的导师刘伟教授，感谢刘老师这三年来孜孜不倦的教诲，感谢刘老师一直对我的鼓励和指引。刚来的时候，对于研究生充满了向往和期待，可随之而来的是迷茫和不知所措，因为这是一个新的开始，是刘老师组织我们所有人在一起交流，一起解决学习、生活上的困惑，与师姐彼此互相鼓励，相互帮助，一起前进，一起成长。是老师的指引，让我有勇气面对不管是来自生活还是学习上的挑战，是他的教导让我对未来充满期待和激情，感谢我的导师给我的启发和指导，让我顺利完成学术论文，我不是刘老师最好的学生，但他是我最尊敬的老师。他严谨的教学态度和一丝不苟的学术精神、广阔的视野，用心营造的学习氛围，让我不断自我完善、成长。感谢刘老师的辛勤的付出。同时还要感谢X张老师和杜玉越教授不管是在小论文还是大论文中提出的宝贵意见，并不厌烦的对我的指导，感谢老师们。

其次还要感谢在这里遇到的每一位师姐师弟，感谢你们给我关心和帮助、这三年共同努力的生活是我最难以忘记的，同时还要感谢我的舍友和朋友们，是他们的陪伴与鼓励，使我的研究生生活多姿多彩，愿我们今后都会有一个好的未来。

最后我要感谢的一直在背后默默付出的父母，是他们的支持和鼓励让我不断前行，是他们的关心和理解，让我对未来更加从容。

谨以此文献给最爱的你们！

**学位论文数据集**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **关键词\*** | **密级\*** | | | | **中图分类号\*** | | | **UDC** | | | | **论文资助** |
| 概率弧Petri网；最优路径算法；速度预测；智能交通；蚁群算法 | 公开 | | | | TP39 | | |  | | | |  |
| **学位授予单位名称\*** | | **学位授予单位代码\*** | | | | | **学位类别\*** | | | **学位级别\*** | | |
| 山东科技大学 | | 10424 | | | | | 工学 | | | 工程硕士 | | |
| **论文题名\*** | | | | | | **并列题名\*** | | | | | **论文语种\*** | |
| 基于概率弧Petri网的路径寻优算法与建模 | | | | | | Algorithm and Modeling of Path Optimization Based on Probability Arc Petri Net | | | | | 中文 | |
| **作者姓名\*** | | 刘雷 | | | | | **学号\*** | | | 160630019 | | |
| **培养单位名称\*** | | **培养单位代码\*** | | | | | **培养单位地址** | | | **邮编** | | |
| 山东科技大学 | | 10424 | | | | | 山东省青岛市 | | | 266590 | | |
| **学科专业\*** | | **研究方向\*** | | | | | **学制\*** | | | **学位授予年\*** | | |
| 计算机技术 | | 软件开发与系统集成 | | | | | 3 | | | 2019 | | |
| **论文提交日期\*** | | | | | 2019年4月23日 | | | | | | | |
| **导师姓名\*** | | 刘伟 | | | | | **职称\*** | | | 教授 | | |
| **评阅人** | | | | **答辩委员会主席\*** | | | | **答辩委员会成员** | | | | |
|  | | | | 禹继国 | | | |  | | | | |
| **电子版论文提交格式 文本（ ） 图像（ ） 视频（ ） 音频（ ） 多媒体（ ）**  **其他（ ）**  **推荐格式：application/msword; application/pdf** | | | | | | | | | | | | |
| **电子版论文出版（发布）者** | | | **电子版论文出版（发布）地** | | | | | | **权限声明** | | | |
|  | | |  | | | | | |  | | | |
| **论文总页数\*** | | | | 72 | | | | | | | | |
| **注：共33项，其中带\*为必填数据，共22项。** | | | | | | | | | | | | |



工学硕士学位论文

**概率弧Petri网及其在路径寻优中的应用**

Probability Arc Petri Nets and its Application in Path Optimization

**作 者 刘雷**

**导 师 刘伟 教授**

山东科技大学

二零一九年六月