运输过程中路径突发堵塞事件对策研究

苏 兵[1]，徐寅峰[1,2]
(1. 西安交通大学 管理学院，陕西 西安 710049；2. 机械制造系统工程国家重点实验室，陕西 西安 710049)

摘　要：运输过程中经常受到某一或一系列突发性道路堵塞等难以预测事件的影响，给决策者制定选路策略带来了较大的困难。本文从占线问题竞争策略的设计和竞争性能分析的角度出发，针对可恢复路径堵塞问题，对等待策略、迂回策略和混合策略及其相应的竞争性能进行了分析，混合策略的竞争性能优于等待策略和迂回策略的竞争性能。

关键词：运输过程；突发堵塞；对策
中图分类号：TB114.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-5192(2005)02-0076-05

Research on Strategy for Unexpected Blockage in the Transportation Process

SU Bing[1], XU Yin-feng[1,2]
(1. *School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *China*; 2. *The State Key Lab for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an* 710049, *China*)

Abstract: It is difficult for policy-maker to make a routing when some unexpected accident or a series of unexpected accidents occur during the transportation process. From the online point of view, we analyze the waiting strategy, circuity strategy and the mix strategy for the online recoverable routing problem and their competitive ratios are given. We show that the competitive ratio of the mix strategy is better than the competitive ratio of the waiting strategy and the circuity strategy within the same assumption.

Key words: transportation process; unexpected blockage; strategy

1　引言

运输路线规划是指通过对运输车辆行程的合理安排，及时将货物运达目的地，从而快速响应客户需求，节约车辆运行时间，提高车辆利用效率，降低成本。目前，随着运输在商品流通成本中所占比例的增加，运输路线规划问题已成为运筹学、人工智能等领域研究学者关注的一个热点。运输过程中经常遇到难以预测因素的影响，如突发性路径堵塞等，对运输路线的规划带来了困难。针对这类受不确定因素影响较大的决策问题，经典的优化方法有：一是将可变化的因素随机化，寻求平均意义上的最优方案，二是考虑可变化因素的最坏情形，寻求最坏情形达到最优的方案。目前通常采用的方法是精确算法或者启发式算法，具体讲包括概率分析、统计分析、动态规划等。然而，这些处理方法由于依赖对经验数据的统计和对未来事件发生概率的预测，可能给出离实际最优解相距甚远的解，显然难以满足实际要求。占线问题与竞争策略为这类问题的决策提供了一种新思路，这种方法主要针对的是问题具有较强的动态特征，决策者对未来的因素变化难于预测甚至一无所知，它在变化因素的每一个特例中都能给出一个策略，使用这一策略所得到的解离最优方案给出的解总在一定的比例之内[1,2]。这种方法不强调决策过程对风险发生的经验分析，而注重风险应对策略的制定，从而能够做到快速应对突发事件，同时它注重策略竞争性能的分析和改进。在经济管理领域，近年来对一些问题进行了占线竞争策略的研究，取得了较好的理论和实践成果。如 Keskinocak 等在《Management Science》上撰文用占线的方法研究了制造商如何根据客户下达订单时间与订单处理之间的间隔期，对

收稿日期：2004-04-03
基金项目：国家自然科学基金资助项目(10371094, 70121001)

客户进行报价的一个有效方案,提出了一种订单延迟处理策略[3]。

对于运输过程中出现的突发性路径堵塞的占线竞争策略的研究,文献[4]分析了堵塞边动态产生,恢复时间小于最小边通过时间条件下的可恢复路径选择问题,给出了一个贪婪策略,其相应策略下的竞争性能比为$\frac{k+2}{2}$。文献[5]分析了堵塞不可恢复的路径选择问题,给出了贪婪策略和复位策略,及策略相应的竞争性能比为 $2k+1$ 和 $2^{k+1}-1$,并证明了对于不可恢复的路径选择问题,不存在竞争性能比小于 $2k+1$ 的策略,同时给出了贪婪策略优于复位策略的条件。

本文研究的是实际运输路径规划中,决策人考虑车辆行驶稳定性、车辆油耗、车辆故障发生率等影响运输成本的因素,通常不选择路况差,交通设施不完备的道路,而常常选择一条从起点至终点,由高速路或干道组成的运输路径(以下简称经济路径 MR),以保证车辆的正常行驶,从而节约成本。运输车辆在沿着经济路径行进的过程中,会遇到某一或一系列无法预测的突发性堵塞事件,假设这些堵塞可以恢复,在这种状态下,决策人经常采取这些策略,一为等待策略,即在每一个堵塞点均等待路径开通,然后沿着经济路径继续行进;二为迂回策略,即遇到每个堵塞点,都从这个堵塞点开始寻找一条路径迂回到经济路径上的某一点(位于堵塞点后),然后沿着经济路径继续前进;三为混合策略,即在每个堵塞发生时,或者等待或者迂回。我们从占线问题与竞争策略的角度,对每一种策略以及策略相应的竞争性能比进行了分析,从理论上阐释了决策人制定这些策略的依据,同时结合案例,比较了仅采用其中某一种策略所得执行效果的差异。

2 问题描述和基本定义

假设车辆由 s 城出发将货物运到目的地 t 城,选择了一条由 s 到 t 的经济路径,运输车辆在沿着这条路径行驶过程中,如果遇到因某一或一系列难以预测的突发事件造成的堵塞,比如交通事故、自然灾害等,假设堵塞是可以恢复的,应制定怎样的对策?

记交通网络图为 $G(V,E)$,s 表示出发地,t 表示目的地,$R(r_1,r_2,\cdots,r_k)$ 表示堵塞点序列,如果堵塞序列 $R(r_1,r_2,\cdots,r_k)$ 的发生情况事先预知,做为离线问题,决策者使用动态规划的方法就可以找到一条从 s 到 t 的经济路径 MR, $v_i(i=1,2,\cdots,n)$ 表示 MR 上的节点序列,$r_i(b)(i=1,2,\cdots,k)$ 表示第 i 个堵塞点,$S(s,t)$ 表示在没有堵塞事件发生的情况下沿着 MR 行走的 s 到 t 的费用(时间),$t'(r_i)$ 表示堵塞点 r_i 的恢复时间。为了便于讨论,我们对费用和时间不加以区分,所有的讨论基于以下假设:

(1) 当运输车辆遇到堵塞点时,可以获取堵塞恢复时间的相关信息;

(2) 堵塞点均出现在经济路径 MR 上,而且完全在无法预知的情况下一个一个顺序出现;

(3) 总是能够找到一条路径,从堵塞点出发绕行并回到经济路径的某一节点,这一节点位于堵塞点之后;

(4) 堵塞点的个数 k 远远小于经济路径上的节点个数 n。

我们从占线问题和竞争策略的角度来分析运输过程中遇到某一或一系列突发性堵塞事件的应对策略和竞争性能分析。

我们用 $C_{opt}(R)$ 表示占线问题对应的离线问题 s 到 t 的最优费用,$C_A(R)$ 表示在策略 A 下 s 到 t 的总费用,如果存在一个与序列事件无关的常数 α,使得如下关系式成立

$$C_A(R) \le \alpha \cdot C_{opt}(R)$$

则称 α 为策略 A 的竞争性能比,即占线问题所采用策略的费用在与之对应的离线问题的最优费用的 α 倍之内。竞争性能比是对占线问题策略效用的衡量,对于同一占线问题,采用策略不同,策略相应的竞争性能比也不同,如果竞争性能比较大,说明所采用策略的费用同与之对应的离线问题的最优费用的偏离较大,在实际中较难实施。对于同一假设的成本费用问题来讲,α 越接近于 1 竞争性能越好。

关于离线问题最优解的求解方法另行讨论,需要说明的是,$S(s,t)$ 是没有堵塞发生时离线问题的最优经济路径的费用,如果有一个堵塞点出现,那么 $C_{opt}(R)$ 一定不小于 $S(s,t)$。为了便于讨论,我们用 $S(s,t)$ 代替 $C_{opt}(R)$。

3 策略与竞争性能分析

3.1 策略

在现实中,运输车辆在遇到突发性事件造成地

路径堵塞时,通常会选择以下两种策略,一种为总是在堵塞地等待路径开通,继续沿着经济路径行进,另一种为总是寻找一条路径从堵塞点出发,并迅速回到经济路径上这个堵塞点后的某一点(迂回点),继续沿着经济路径行进。

如果在这条路径上有一系列堵塞事件发生,那么运输车辆还会考虑选择一种混合策略,即每到达一个堵塞点,比较等待性能(堵塞点等待时间和经济路径上这个堵塞点到下一邻近节点的时间的比值)和迂回性能(选取一条路绕行回到经济路径的时间与经济路径上这个堵塞点到迂回点通过时间的比值)的大小,在两者之间选择一个小的,在当前的状态下或者等待,或者绕行,这里我们给出这三种策略的定义。

等待策略:当运输车辆到达堵塞点 r_i 时,选择在原地等待,堵塞恢复后继续沿着经济路径行走。

迂回策略:当运输车辆到达堵塞点 r_i 时,选择一条路径从 r_i 开始绕行,回到经济路径上 r_i 后的某一节点 r_i'',继续沿着经济路径行走。

混合策略:当运输车辆到达堵塞点 r_i 时,比较等待性能和迂回性能,选择竞争性能好者做为当前的策略,或者等待,或者迂回。

下面,我们对这每一种策略的竞争性能进行分析,比较单独采用每种策略时不同的执行效果。

3.2　竞争性能比分析

我们用 $C_W(R)$ 表示等待策略下的总费用(时间),$C_C(R)$ 表示迂回策略下的总费用,$C_M(R)$ 表示混合策略下的总费用,r_i' 表示经济路径上 r_i 之后的邻近节点,r_i'' 表示经济路径上采用迂回策略由 r_i 开始绕行回到经济路径上的点,$t'(r_i)$ 表示堵塞点 r_i 的恢复时间,$t''(r_i)$ 表示由堵塞点 r_i 开始回到经济路径上的 r_i'' 的迂回时间,$t(r_i)$ 表示无堵塞点出现时,经济路径上 r_i 到 r_i' 的通过时间,$t_1(r_i)$ 表示无堵塞点出现时,经济路径上 r_i 到 r_i'' 的通过时间。$a_i(i=1,2,\cdots,k)$ 表示 $t'(r_i)$ 与 $t(r_i)$ 的比值,$a=\max\{a_1,a_2,\cdots,a_k\}$;$1+b_i$ 表示 $t''(r_i)$ 与 $t_1(r_i)$ 的比值,$b=\max\{b_1,b_2,\cdots,b_k\}$,$c_i=\min\{a_i,b_i\}$,$c=\max\{c_1,c_2,\cdots,c_k\}$,$a_i>0$,$b_i>0$,$c_i>0$,$i=1,2,\cdots,k$。

定理 1　等待策略下的竞争性能比为 $1+a$,即 $C_W(R)\le(1+a)\cdot S(s,t)$。

证明　$C_W(R)$ 是 $S(s,t)$ 与在所有堵塞点上所花等待时间的和,即

$$C_W(R)=S(s,t)+\sum_{i=1}^{k}t'(r_i)$$

因为 $$\sum_{i=1}^{k}t'(r_i)=\sum_{i=1}^{k}a_i\cdot t(r_i)\le a\cdot S(s,t)$$

所以 $$C_W(R)\le(1+a)\cdot S(s,t)$$

定理 2　迂回策略下的竞争性能比为 $1+b$,即 $C_C(R)\le(1+b)S(s,t)$。

证明　用 $C'(R)$ 表示采用迂回策略时运输车辆在经济路径 MR 上的行走费用,$C_C(R)$ 是 $C'(R)$ 与所有的迂回费用的和,则有

$$\begin{aligned}C_C(R)&=C'(R)+\sum_{i=1}^{k}t''(r_i)\\&=C'(R)+\sum_{i=1}^{k}t''(r_i)\\&=C'(R)+\sum_{i=1}^{k}t_1(r_i)+\sum_{i=1}^{k}b_i\cdot t_1(r_i)\\&=S(s,t)+\sum_{i=1}^{k}b_i\cdot t_1(r_i)\end{aligned}$$

所以 $$C_C(R)\le(1+b)S(s,t)$$

定理 3　混合策略的竞争性能比是 $1+c$,即 $C_M(R)\le(1+c)S(s,t)$;该竞争性能比不超过等待策略和迂回策略下的竞争性能比,即 $1+c\le1+a$,$1+c\le1+b$。

证明　用 $C_M(W)$ 表示在经济路径 MR 上 s 到 t 的过程中采用混合策略时总的等待费用(时间),$C_M(C)$ 表示采用混合策略时总的迂回费用(时间),$C_M(E)$ 表示在混合策略下运输车辆在 MR 上行走的费用,则有

$$C_M(R)=C_M(E)+C_M(W)+C_M(C)\qquad(1)$$

令 $R=R_W+R_C$,$R_W=(r_{W_1},r_{W_2},\cdots,r_{W_i}\cdots,r_{W_{k_1}})$ 表示运输车辆在这些堵塞点上等待路径开通,即在这些点上 $a_{W_i}\le b_{W_i}$,所以有 $c_{W_i}=\min(a_{W_i},b_{W_i})=a_{W_i}$;$R_C=(r_{C_1},r_{C_2},\cdots,r_{C_i},\cdots,r_{C_{k_2}})$ 表示运输车辆以这些堵塞点为起点开始迂回,在这些点上 $a_{C_i}\ge b_{C_i}$,所以有 $c_{C_i}=\min(a_{C_i},b_{C_i})=b_{C_i}$。

因为

$$C_M(W) = \sum_{i=1}^{k_1} t'(r_{W_i}) = \sum_{i=1}^{k_1} a_{W_i} t(r_{W_i}) \quad (2)$$

$$C_M(C) = \sum_{i=1}^{k_2} t''(r_{C_i}) = \sum_{i=1}^{k_2} (1 + b_{C_i}) t(r_{C_i}) \quad (3)$$

由(1) (2) (3)式可知下式成立

$$C_M(R) = C_M(E) + \sum_{i=1}^{k_1} a_{W_i} t(r_{W_i}) + \sum_{i=1}^{k_2} (1 + b_{C_i}) t(r_{C_i})$$
$$= C_M(E) + \sum_{i=1}^{k_1} a_{W_i} t(r_{W_i}) + \sum_{i=1}^{k_2} b_{C_i} t(r_{C_i}) + \sum_{i=1}^{k_2} t(r_{C_i}) \quad (4)$$

因为 $C_M(E) + \sum_{i=1}^{k_2} t(r_{C_i}) \le S(s,t)$

由(4)式可得

$$C_M(R) \le S(s,t) + \sum_{i=1}^{k_1} a_{W_i} t(r_{W_i}) + \sum_{i=1}^{k_2} b_{C_i} t(r_{C_i})$$

因为

$$c_{W_i} = a_{W_i} \le b_{W_i} \le b$$
$$c_{C_i} = b_{C_i} \le a_{C_i} \le a$$

令 $c = \max\{c_{W_i}, c_{C_i}\}$

所以

$$C_M(R) \le S(s,t) + c\left[\sum_{i=1}^{k_1} t(r_{W_i}) + \sum_{i=1}^{k_2} t(r_{C_i})\right]$$
$$\le (1 + c) S(s,t) \quad (5)$$

由证明过程可以得到 $1 + c \le a$, $1 + c \le 1 + b$。

根据竞争策略和竞争性能比的定义,混合策略是堵塞可恢复路径选择问题的竞争策略,混合策略相应的竞争性能比为 $1 + c$,该竞争性能优于等待策略和迂回策略的竞争性能。

从以上的分析可知,等待策略、迂回策略、混合策略的竞争性能与堵塞点出现的个数和位置无关。即不论在行驶过程中的什么位置,遇到多少次因突发事件造成的路径堵塞,运输车辆花费的费用(时间),仅与采用策略的执行效果有关。在实际中,分别采用以上每一种策略都可能取得较好的执行效果,我们对每一种策略的竞争性能进行讨论并结合案例来说明。

4 竞争性能讨论与案例分析

4.1 等待策略竞争性能讨论

当 a 远远小于 1 时,采用等待策略所花费用接近于无堵塞事件发生时经济路径全程最优费用,而且最多不超过 2 倍。比如在运输过程中遇到红灯的情形,堵塞无法预知但堵塞恢复时间非常短,采用等待策略较为理想。当 a 远远大于 1 时,从定理 1 可知,采用等待策略花费的总费用(时间)主要依赖于所有的等待时间之和与无堵塞事件发生时经济路径全程最优费用的比值,而不仅仅取决于 a 的大小,在一些情况下, a 可能非常大,但等待策略依然非常有效,比如只在某一点发生了重大交通事故,而其他的堵塞恢复时间均比较短;但当每个堵塞点的恢复时间都非常长时,等待策略的效用较差。

4.2 迂回策略竞争性能讨论

当 b 远远小于 1 时,采用迂回策略所花费用接近于无堵塞事件发生时经济路径全程最优费用,而且最多不超过 2 倍。比如在运输过程中遇到突发性路径堵塞,迅速找到了一条花费时间很短的路径,能够从堵塞点迂回到经济路径上的堵塞点后的某一点,迂回时间与在经济路径上堵塞点至迂回点之间通过的时间很接近,采用迂回策略较为理想。当 b 远远大于 1 时,从定理 2 可知,采用迂回策略花费的总费用(时间)主要依赖于所有的迂回时间之和与无堵塞事件发生时经济路径全程最优费用的比值,不仅仅取决于 b 的大小,在一些情况下, b 可能非常大,但迂回策略依然非常有效,比如只在某一点发生堵塞时,寻找的迂回路径花费时间很长,而其他迂回时间均比较短;但当每个迂回时间都非常长时,迂回策略的效用较差。

4.3 混合策略竞争性能讨论

从理论上得出的竞争比分析来看,等待策略和迂回策略是两种完全不同的策略,他们的竞争性能比虽然在形式上接近,但意义是完全不同的, a 表示等待费用(时间)与无堵塞事件发生时经济路径上从堵塞点至下一个邻近节点之间的通过费用(时间)的比, b 表示迂回费用与无堵塞事件发生时经济路径上堵塞点至迂回点通过费用(时间)的比。运输车辆在采取等待策略时,某一段时间会出现原地等待而停止前进的状态,而采取迂回策略时,运输车辆总是在行走而不停歇的。实际上较为理想的是采用混合策略,从理论上讲,混合策略的竞争性能优于等待策略和迂回策略的竞争性能,它避免了分别采取等待策略或迂回策略的不利,而且在迂

回过程中,可以回避掉一些突发性堵塞事件。

4.4 案例分析

假设运输车辆沿着经济路径由 s 出发到 t 的行驶过程中一共遇到三个堵塞点,各段的行驶时间如图 1,令

$$t(r_1)=2,\ t(r_2)=4,\ t(r_3)=6$$

$$t'(r_1)=6,\ t'(r_2)=1,\ t'(r_3)=1$$

$$t''(r_1)=8,\ t''(r_2)=5,\ t''(r_3)=6$$

可得到

$$a_1=3,\ a_2=0.25,\ a_3=0.17$$

$$a=\max\{a_1,a_2,a_3\}=3$$

$$b_1=0.3,\ b_2=0.25,\ b_3=2$$

$$b=\max\{b_1,b_2,b_3\}=2$$

$$c_1=0.3,\ c_2=0.25,\ c_3=0.17$$

$$c=\max\{c_1,c_2,c_3\}=0.3$$

实际上采用混合策略时的总费用(时间)为 20 小时,仅且始终采用等待策略下的总费用(时间)为 28 小时,仅且始终采用迂回策略下的总费用(时间)为 33 小时。显然,采用混合策略的效果优于仅采用等待策略或仅采用迂回策略的效果。

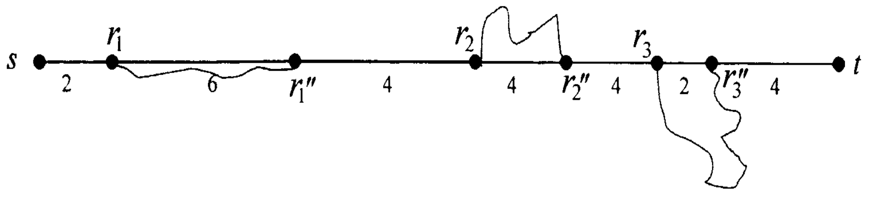

图 1

从以上的等待时间和迂回时间的赋值来讲,只在某一堵塞点出现了等待时间和迂回时间较长的情况,如果在每一点的等待时间或迂回时间都非常长,如果 $a_1=a_2=a_3=3$, $a=\max\{a_1,a_2,a_3\}=3$ 或 $b_1=b_2=b_3=2$, $b=\max\{b_1,b_2,b_3\}=2$,等待策略与迂回策略的竞争性能比与案例中的比值相等,但仅采用等待策略或迂回策略的效用均很差。

5 结论

运输路线规划中,对于路径堵塞无法预测的情形,如何制定一个好的应对策略是决策者的难题。在现实中,决策者对堵塞信息及可选择的迂回路径缺乏完备的信息,在做出决策时往往具有主观偏好性,使得策略的执行效果不尽如人意。本文从占线竞争策略与竞争性能分析的角度出发,对现实中采用的三种策略及其竞争性能进行了分析,一则从理论上求得方法上的创新,寻求实际中采用三种策略所得效果差异的理论依据;二则为运输中遇到堵塞时的决策提供依据,GPS 导航系统可以借鉴本文的研究结果,根据交通图及实际中遇到的堵塞情况迅速制定有效的策略指挥车辆行进。

对于占线路径选择,存在许多新的有待研究的问题,在堵塞时间和堵塞地点信息获取方式不同的情形下,如何制定一个有效策略是未来研究的方向。

参 考 文 献:

[1] Manasse S M, McGeoch L A, Sleator D D. Competitive algorithms for server problems[J]. Journal of Algorithms, 1990, 11: 208-230.

[2] David S B, Borodin A. A new measure for the study of the on-line algorithm[J]. Algorithmica, 1994, 11: 73-91.

[3] Keskinocak P, Ravi R, Tayur S. Scheduling and reliable lead-time quotation for orders with availability intervals and lead-time sensitive revenues[J]. Management Science, 2001, 47(2): 264-279.

[4] 朱志军,徐寅峰. 加拿大旅行者问题[J]. 系统工程理论方法应用, 2003, 12(2): 177-181.

[5] 朱志军,徐寅峰,刘春草. 局内车辆选线问题和竞争策略分析[J]. 系统工程学报, 2003, 18(4): 324-330.