

交通运输网络能力限制路段分析 及扩能优化研究

田志强 倪少权 宋琦 宋娟

西南交通大学, 交通运输学院, 成都 610031

摘要: 交通运输网络是交通运输系统的重要组成部分, 确定交通运输网络中的能力限制路段, 设计合理的路网扩能优化方案都是交通运输部门需要面临的问题。本文依据最大流理论制订了路网能力限制路段的确定方法, 建立了以换算扩能费用最小为目标的扩能优化模型并设计了相应的求解算法。算例表明, 本文研究的模型及算法是有效的, 且扩能优化方案中的扩能路段与路网能力限制路段基本上是一致的。

关键词: 交通运输网络; 能力限制路段; 扩能优化; 最短路

中图分类号: U491.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2010)01-0044-06

Analysis of the Capacity Restriction Path and the Optimization for Enlarging the Capacity of a Transportation Network

TIAN Zhi-qiang NI Shao-quan SONG Qi SONG Juan

School of Traffic and Transportation,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: Transportation network is an important part of a transportation system. How to find out the capacity restriction paths and design a rational scheme for enlarging the capacity of the network are the problems the traffic and transportation department have to face. This paper researched a method for finding the capacity restriction paths based on the theory of maximum flow, and founded an optimization model aiming at minimize the cost of the conversion expanding cost, then designed an algorithm for solving it. An example test was used to the effectiveness of the model and the algorithm, and the result

收稿日期: 2009-04-24.

作者简介: 田志强 (1981-), 男, 甘肃武威人, 西南交通大学博士研究生, 从事交通运输规划及管理研究。

shows that the expanded paths in the optimization scheme basically consistent with the capacity restriction paths.

Key words: Transportation networks, capacity restriction paths, optimization of network capability, the shortest path

0 引言

交通运输网络是交通运输系统的重要组成部分,其结构、能力等对交通运输部门的运输组织工作具有十分重要的意义。随着经济的发展及人民生活水平的提高,交通运输网络的能力会呈现出阶段性的供给不足,使得拥堵、绕行等现象影响运输部门的服务质量。

近年来,有关学者对交通运输网络的可靠性^{[1][2]},交通运输网络最短路径的关键边^[3],交通运输网络瓶颈路段^[4]等问题进行了研究,但对于交通运输网络能力限制路段的分析及扩能优化算法的研究相对较少。事实上,了解交通运输网络中的能力限制路段的分布及其对路网能力限制的程度,对于改进路网能力具有一定的指导意义;同时,交通运输网络的扩能优化已经成为提高路网能力、改善交通运输部门服务质量的重要途径。因此,研究交通运输网络能力限制路段的确定方法及路网扩能优化算法,具有十分重要的意义。

本文主要研究交通运输网络能力限制路段的确定方法及交通运输网络的扩能优化方法,以期有关研究提供理论支持。

1 交通运输网络能力限制路段确定方法

在交通运输网络中,各个路段的通过能力(容量)一般都不相同,而且受路网结构的影响,其对路网整体能力的限制程度也不同。在一个运输网络中,某些路段的能力增加能够使路网总能力得到较大改善,而有些路段能力增加时,路网能力改进很小,在此,我们将前者称为交通运输网络能力限制路段,并用网络最大流理论^[5]来研究其确定方法。

交通运输网络能力限制路段的确定方法如下:

将路段 e_{ij} 的能力设为 $+\infty$, 其它路段的能力不变,并在此状态下计算网络的最大能力 $v(F_{ij})$, 即可得出在只改进路段 e_{ij} 的容量时, 能够得到的路网最大流。同时, 根据该最大流量, 也可以反推出为达到该流量, 路段 e_{ij} 实际需要的能力增量。

为衡量各路段对路网能力的限制程度, 定义路段扩能改进量 η_{ij} , 并用来表示路段 e_{ij} 能力为 $+\infty$ 时所得到的路网最大流与现有路网最大流之间的差值。路段 e_{ij} 的扩能改进量越高, 表明该路段对路网能力的限制越大。

路段扩能改进量 η_{ij} 的计算方法如下:

$$\eta_{ij} = \max v(f_{ij}) - \max v(F)$$

其中: $\max v(f_{ij})$ 表示当且仅当路段 e_{ij} 能力为 $+\infty$ 时, 路网的最大流量, $\max v(F)$ 表示初始状态时的路网最大流。

2 交通运输网络扩能优化研究

2.1 优化模型的建立

对于一个交通运输网络, 其最大流量只有在计划运输(如铁路, 民航)或具有很完善的路况指导信息(如带路况信息的公路交通)时才能充分发挥出来。当交通运输网络中的各出行者处于自组织状态且道路信息不能及时有效进行传递时, 路网的最大能力一般得不到较好的利用。这是因为出行者在出行的过程中, 假设道路信息传递的排队信息不会引起道路选择者决策的改变, 此时, 出行者通常都是选择从出发地至目的地相对较短的路径, 如最短路、次短路等。因此, 这些相对较短的路径能力利用率一般都比较高, 此时, 即使其它路径上的能力还有剩余, 出行者也因不知道该信息或不愿选择长度较长的路径而使得这

些剩余的能力不能得到有效的利用。

交通运输网络扩能优化的一般思路是以较小的费用对路网能力进行改进,使改进后的路网能力满足预期的路网流量。但仅以费用最小为目标的扩能优化方法并不能保证新增的路网流量分布在网络中从出发地至目的地的最短路、次短路等相对较短的路径上,导致新增的路网流量可能得不到较好的利用。

基于上述分析,当交通运输网络应用于非计划运输且出行者无法获得路段能力利用情况时,网络的扩能优化应当将扩能路径的长度与扩能费用结合起来考虑,使得扩能后的网络能够在满足流量增长需要的同时不违背出行者的出行规律。

为了使在扩能优化时既考虑扩能路径的费用,同时也能兼顾扩能路径的长度,本文定义如下的费用函数,用以表示路段 e_{ij} 的单位扩能换算费用,

$$b_{ij}^* = b_{ij} l_{ij}$$

式中: b_{ij} 表示路段 e_{ij} 的单位扩能费用; l_{ij} 为路段 e_{ij} 所在扩能路径的总长度。

综合以上分析,本文建立的以最小化路网扩能换算费用为目标的优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum x_{ij} b_{ij}^* \\ \text{St.} & \\ \max v(f) &= Q & (1) \\ X_{ij} &\leq X_{ij} & (2) \\ 0 &\leq f_{ij} \leq c_{ij} & (3) \\ \sum_j f_{ij} - \sum_j f_{ji} &= \begin{cases} v(f) & i = s \\ 0 & i \neq s, t \\ -v(f) & i = t \end{cases} & (4) \end{aligned}$$

式中: x_{ij} 为路段 e_{ij} 的实际扩能量; $v(f)$ 表示路网的流量; Q 为路网的预期流量; X_{ij} 为路段 e_{ij} 的最大允许扩能量; f_{ij} 为路段 e_{ij} 的流量; c_{ij} 为路段 e_{ij} 的容量; s 表示路网中网络流的源点; t 表示路网中网络流的汇点。

约束条件(1)表示交通运输网络的扩能优化是以满足预期流量为目标,因此,扩能后的网络能力应等于路网的预期流量;约束条件(2)表示路段 e_{ij} 能力的实际改进量不会超过该路段能力改进的上限;约束

条件(3)表示交通运输网络中各路段的实际流量均小于该路段的最大容量;约束条件(4)表示交通运输网络中的各结点都必须满足流量平衡约束。

2.2 模型求解算法设计

对于 2.1 中建立的交通运输网络扩能优化模型,直接求解存在一定的困难。因此,本文设计了如下的求解算法,具体步骤如下:

Step 1 将所有路段的容量修改为 $c_{ij} + X_{ij}$, 计算网络最大流,若当前最大流 $\max v(f)$ 大于等于路网预期流量 Q , 表明该网络必定存在可行的路网扩能优化方案,转下一步;若 $\max v(f) < Q$, 则该问题无可行解,转 Step 5;

Step 2 建立基于当前路网关于扩能费用的接续网络;

Step 3 找出从源点 s 至汇点 t 的所有可扩能路径 P_k 并计算各条路径的长度 L_k 及其单位扩能费用 B_k 。计算所有可扩能路径的单位换算扩能费用 B_k^* , 并将换算扩能费用最小的路径标记为下一步需要进行扩能的路径。若所求出的具有最小换算扩能费用的路径大于一条,则选择其中路径长度较短的一条优先扩能。

Step 4 计算该最短路径上以当前费用所能增加的最大流量 P , 判断 P 是否大于路网预期流量与路网现有能力的差值 ΔQ , 若 $P = \Delta Q$, 则已找到该问题的最优解,转 Step 5; 若 $P > \Delta Q$, 则取路网的扩能量为 ΔQ , 转 Step 5; 否则,令 $\Delta Q = \Delta Q - P$, 并以流量 P 更新网络流量,转 Step 2。

Step 5 算法结束。

其中,关于扩能费用接续网络的构造方法如下:接续网络的结构与交通运输网络完全相同,其边上的扩能量及扩能费用(即权值)依据下式取值:

$$\begin{aligned} \Delta_{ij} &= \begin{cases} c_{ij} - f_{ij} & f_{ij} < c_{ij} \\ c_{ij} + X_{ij} - f_{ij} & c_{ij} \leq f_{ij} \leq c_{ij} + X_{ij} \\ 0 & c_{ij} + X_{ij} \leq f_{ij} \end{cases} \\ w_{ij} &= \begin{cases} 0 & f_{ij} < c_{ij} \\ b_{ij} & c_{ij} \leq f_{ij} \leq c_{ij} + X_{ij} \\ M & c_{ij} + X_{ij} \leq f_{ij} \end{cases} \end{aligned}$$

式中, M 为一个很大的数, 表示路段 e_{ij} 不具备扩能条件。

$$B_k = \sum_{e_{ij} \in P_k} w_{ij}, \quad B_k^* = B_k L_k。$$

3 算例分析

设有如图 1 所示的交通运输网络, 其路段上的数值 (c_{ij}, f_{ij}, l_{ij}) 表示该路段的容量、流量及路段长度。路网流量已经达到最大值 16, 且已知路网在今后一段时间内的流量将达到 21, 因此, 路网的现有能力将无法满足不同时期流量的需要, 需要对该交通运输网络进行扩能优化。

对应于图 1 中各路段的改扩建上限及单位改扩建费用如图 2 所示, 其各路段上的数值分别表示 (X_{ij}, b_{ij}) 。

本文将以前所研究的方法确定该交通运输网络中的能力限制路段, 并对其扩能优化方案进行研究。

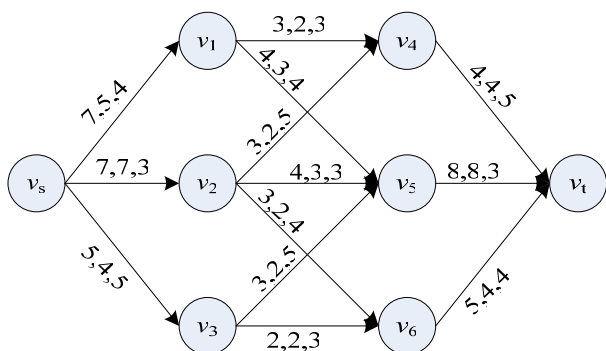


图 1 初始路网示意
Fig.1 Initial network

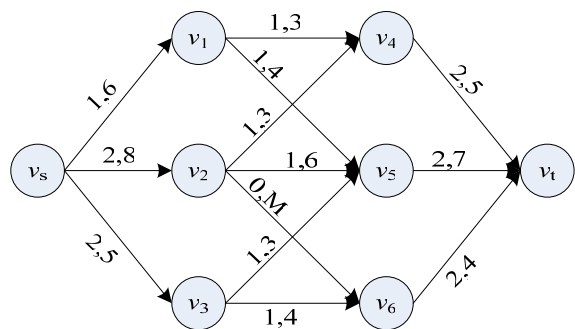


图 2 初始路网扩能信息
Fig.2 Enlarging capacity information of the initial network

3.1 能力限制路段分析

以本文所述的方法计算该交通运输网络的能力限制路段, 计算结果如表 1 所示。

表 1 路网能力限制路段分析

Tab.1 Analysis of the capacity restriction paths

路段 e_{ij}	最大路网能力 $\max v(f_{ij})$	路段扩能改进量 η_{ij}	限制程度排序
e_{s1}	16	0	—
e_{s2}	17	1	2
e_{s3}	16	0	—
e_{14}	16	0	—
e_{15}	16	0	—
e_{24}	16	0	—
e_{25}	16	0	—
e_{26}	16	0	—
e_{35}	16	0	—
e_{36}	17	1	2
e_{4t}	17	1	2
e_{5t}	18	2	1
e_{6t}	16	1	2

注: “—” 表示路段能力增加并不能使路网能力得到改善, 因此, 没有对路网能力产生限制。

从表 1 可以看出, 该交通运输网络中对路网能力限制程度较高的路段依次为 e_{5t} 、 e_{s2} 、 e_{36} 、 e_{4t} 、 e_{6t} 。

3.2 扩能优化方案

对初始网络构造关于改扩建费用的接续网络, 如图 3 所示, 路段上的数值 (Δ_{ij}, w_{ij}) 表示路段 e_{ij} 上以 w_{ij} 为改扩建费用的最大改进量为 Δ_{ij} 。

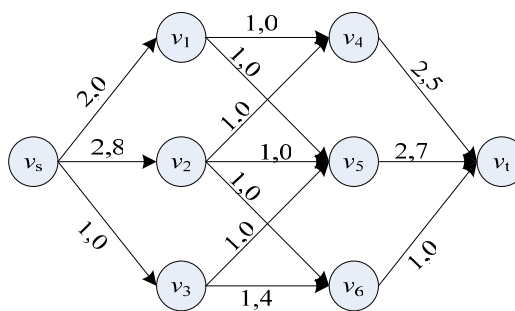


图 3 初始路网接续网络
Fig.3 Capacity enlarging network of the initial network

使用隐枚举法^[6]寻找从源点 v_s 至终点 v_t 的所有可扩能路径, 计算各条可扩能路径的换算扩能费用, 结果如表 2 所示。

表 2 扩能路径换算扩能费用

Tab. 2 Conversion expense of the path capacity enlarging of the network

可扩能路径	路径长度/km	路径单位扩能费用/万元	路径换算扩能费用/(km·万元)
$v_s v_1 v_4 v_t$	12	5	60
$v_s v_1 v_5 v_t$	11	7	77
$v_s v_2 v_4 v_t$	13	13	169
$v_s v_2 v_5 v_t$	9	15	135
$v_s v_2 v_6 v_t$	11	8	88
$v_s v_3 v_5 v_t$	13	7	91
$v_s v_3 v_6 v_t$	12	4	48

从表 1 中可以得出, 应首先选择换算扩能费用最小的路径 $v_s v_3 v_6 v_t$ 进行扩能, 即对其中路段 e_{36} 的能力进行改进。将路径 $v_s v_3 v_6 v_t$ 上的容量按照当前扩能费用下所能进行的最大改进量进行修改, 扩能后的网络最大流为 17, 尚未达到网络预期流量, 因此, 重复上述过程, 得到新的网络流量分布及其关于扩能费用的接续网络如图 4、图 5 所示, 并通过计算得出第二次扩能的路径为 $v_s v_1 v_4 v_t$, 即路段 e_{4t} , 扩能量为 1, 扩能后网络流量为 18。

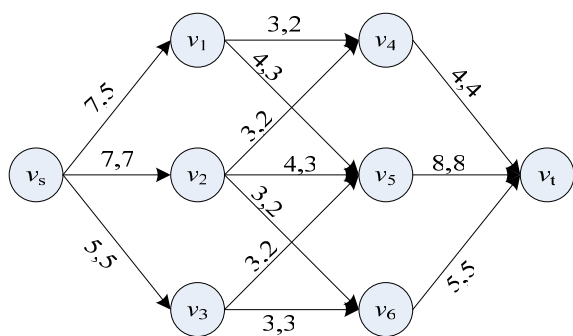


图 4 扩能 1 次后路网流量示意

Fig. 4 Flows of the network after one iteration

由于已知路网预期流量小于路网能够提供的最大流量, 因此, 在重复上述过程若干次后, 必可找到

最优的路网扩能优化方案。路网的扩能优化过程及最终的扩能优化方案如表 3、表 4 所示, 扩能后的路网如图 6 所示。

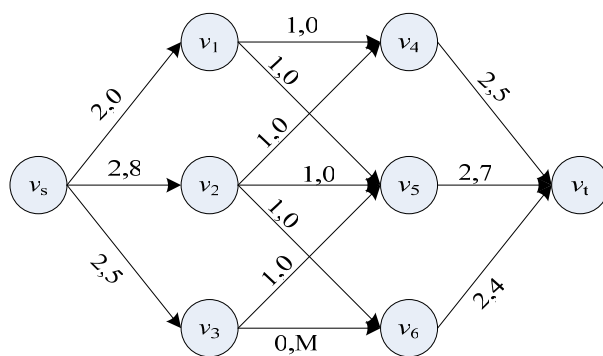


图 5 扩能 1 次后扩能接续网络

Fig. 5 Capacity enlarging network after one iteration

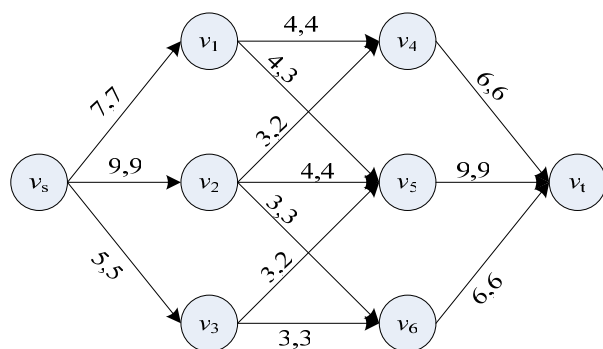


图 6 最终路网流量示意

Fig. 6 Final flows of the enlarging network

表 3 网络扩能优化计算过程

Tab. 3 Optimization procedure of the enlargement

序号	换算扩能费用最短路径	扩能路段	路径单位扩能量	扩能费用/万元	路径长度/km	路径换算扩能费用/(km·万元)
1	$v_s v_3 v_6 v_t$	e_{36}	1	4	12	48
2	$v_s v_1 v_4 v_t$	e_{4t}	1	5	12	16
3	$v_s v_1 v_4 v_t$	e_{14}, e_{4t}	1	8	12	96
4	$v_s v_2 v_6 v_t$	e_{s2}, e_{6t}	1	12	11	132
5	$v_s v_2 v_5 v_t$	e_{s2}, e_{5t}	1	15	9	135
总计	—	—	5	44	—	427

表 4 网络扩能优化方案

Tab. 4 Optimization scheme of the enlargement

序号	路段	限制程度 排序	扩能量	单位扩能 费用/万元	扩能费用/ 万元
1	e_{s2}	2	2	8	16
2	e_{14}	—	1	3	3
3	e_{36}	2	1	4	4
4	e_{4t}	2	2	5	10
5	e_{5t}	1	1	7	7
6	e_{6t}	2	1	4	4
总计	—	—	—	—	44

从表 3、表 4 中可以看出，采用本文设计的扩能优化算法，经过 5 次迭代，求得该交通运输网络的扩能优化方案，其中共对 6 条路段进行扩能，总扩能费用为 44 万元，总换算扩能费用为 427km·万元，扩能后的网络最大流量达到路网预期流量。

此外，从表 4 中还可得出，在能力限制路段分析中计算得出的 5 条能力限制路段均得到了改善，说明

改进路网中的能力限制路段，对于提高整个路网的能力具有十分重要的影响。

4 结束语

本文研究了交通运输网络能力限制路段的确定方法及非计划运输路网的扩能优化方法，建立了以最小化换算扩能费用为目标的数学模型，并设计了相应的求解算法，为交通运输网络能力限制路段的分析及扩能优化提供了理论和方法支持。

本文对于路网的扩能优化研究主要针对非计划运输网络，在模型中考虑了路径的扩能费用和扩能路径的长度，使得长度较短的路径在路网扩能时有机会得到优先改进（本文虽然选取了路径的实际长度进行讨论，但模型及算法对于路径的时间长度，旅行费用等指标同样适用）。文中对路网中各路段的拥挤程度、扩能路段数量限制等问题没有涉及，因此，如何全面地考虑各种因素，建立更为合理、有效的扩能优化方法，仍需要进一步研究。

参考文献

- [1] 杨小宝, 张 宁. 交通运输网络可靠性研究现状及展望[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(6): 30-34.
- [2] 许 良. 交通运输网络可靠性研究分析[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 135-140.
- [3] 李引珍, 郭耀煌. 交通运输网络最短路径关键边问题研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(4): 69-73.
- [4] 鲍利平, 杨希锐, 李 畅. 军事交通运输网络“瓶颈”路段的计算方法研究[J]. 后勤工程学院学报, 2003, (4): 83-86.
- [5] 卜月华. 图论及其应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [6] 刘缙武. 应用图论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.

(中文编辑: 吴继屏)