

doi: 10.7690/bgzd.2018.10.009

# 基于时间依赖网络的战时军事物流路径优化研究

秦 潇, 曾 斌

(海军工程大学管理工程系信息管理研究室, 武汉 430033)

**摘要:** 为提高战时军事物流的质量和战时保障水平, 考虑到战时路径规划过程中的广义成本是随时间变化的时变函数; 因此, 基于时间依赖网络(time dependent network, TDN)对其进行了研究。在重点分析军事效益即运输时间和战时风险基础上, 基于 TDN 建立了考虑综合成本的战时路径优化模型, 并利用 TDN-Z 算法进行实例求解, 得到了最短路径与途径具体节点的大致时刻。研究结果能为战时军事物流最短路径规划提供较有参考价值的决策辅助。

**关键词:** 战时军事物流; 路径优化; 时变依赖网络

**中图分类号:** TJ01 **文献标志码:** A

## Research on Military Logistics Routing Optimization Based on Time Dependent Network

Qin Xiao, Zeng Bin

(Information Management Laboratory, Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of the wartime military logistics and the logistics support level, considering the generalized cost route optimization process are the time-varying function, therefore, the time dependent network (TDN) is used. Based on the analysis of military benefit, namely transport time and wartime risk, a route optimization model with comprehensive cost was established based on TDN, then the examples are solved by TDN-Z algorithm, and the time of the shortest path and the specific node was obtained. The research results can provide reference decision-making aid for the shortest route planning and guarantee command of military logistics in wartime.

**Keywords:** the wartime military logistics; route optimization; time dependent network

### 0 引言

作为战时物流规划中运输决策环节的重要一环, 最短路径的规划对物流运输甚至战时保障都至关重要, 关系到精确保障的效率。近年来, VRP 问题成为路径规划也是国内外研究热点, 无论是相关模型研究<sup>[1-5]</sup>还是求解算法<sup>[6-9]</sup>, 都有大量极具参考意义的研究成果。而针对战时军事物流路径的规划研究中, 涌现出不少在静态网络中考虑战时运输不确定性<sup>[10-13]</sup>和基于多目标规划<sup>[14-15]</sup>的研究, 姜海洋<sup>[16-17]</sup>提出了一种静态网络中的战时风险评估模型, 而考虑动态边权综合指标的战时路径研究则相对较少<sup>[18-21]</sup>, 其中李宇飞<sup>[21]</sup>较为全面地考虑了各项综合权值, 并提出一种考虑风险等待时间的综合权重最优算法(TDN-Z 算法)。最短路径研究模型可以概述为: 通过给运输网络中的每一路段设定权值, 表示其广义成本, 通过找到从运输起点到运输终点之间各路段权值相加最小的运输路段集合, 最终确定最短运输路径。战时物流的最短路径规划, 考虑

到其服务对象和服务环境的特殊性, 主要决策目标为追求最大化军事效益, 即以最快速度、最少损耗将物资送至作战部队, 而运输费用成本则作为次要考虑目标。在对其路段赋值的过程中, 应该综合考虑时间成本和风险成本。故笔者主要从时变的运输时间成本和战时风险成本的角度, 对战时军事物流最短路径规划进行研究。

### 1 运输时间成本函数

战时物流最短路的运输总时间, 具体由在运输路线上各路段的通行质量决定。影响路段的通行质量决定了运输车辆通过该路段所消耗时间。路段的通行质量因素有很多, 包括道路条件、交通条件、交通管制条件、气候条件<sup>[22]</sup>等。从影响因素可以看出, 路段的通行质量是动态变化的, 即通过路段所消耗的时间为动态数据。

而考虑现今道路监控技术的高速发展, 实时获取该路段的车辆通行信息已不是难事, 故笔者考虑通过图像视频和射频等技术手段<sup>[23]</sup>, 对某一单位时

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-08-20

作者简介: 秦 潇(1992—), 男, 四川人, 硕士研究生, 从事物流工程研究。

间  $T$  内通过该路段的车辆信息进行样本采集, 获得样本数据, 通过对样本数据的处理得到该路段此时间段的车辆行驶速度, 从而获得车辆通过的消耗时间。

通过监控手段获得样本数据对于路段的实际通行质量的刻画准确度, 可能受到获取样本的数量差异的影响; 因此, 为了减少个别车辆的实际车速过多偏离大部分车辆的车速带来的平均车速较大波动, 故将用于路径选择的路段车速指标表达如下:

$$v_{\langle i, j \rangle}(t) = \varepsilon \bar{v}_n + (1 - \varepsilon) \bar{v}_{n-1} \quad (1)$$

其中:  $\bar{v}_n$  和  $\bar{v}_{n-1}$  分别为在 2 个监控周期 ( $[t_{n-1}, t_n]$  和  $[t_{n-2}, t_{n-1}]$ ) 内的样本车辆平均速度; 式(1)则为每个监控周期内样本车辆的具体计算公式。

**定义 1** 将路段的实际距离定义为成  $d_{ij}$ , 则路段的通行时间则为:

$$T_{ij}(t) = \frac{d_{ij}}{v_{\langle i, j \rangle}(t)} \quad (2)$$

其中,  $T_{ij}(t)$  和  $\bar{v}_{ij}(t)$  均为离散时变函数, 即在时间区间  $[t_{n-1}, t_n]$  内数值不变, 而各个时间内数值是变化的。

## 2 战时风险成本

战时物流最短路径规划中的运输情景特殊性影响, 规划中单纯将时间成本作为决策目标往往会损失运输的安全性; 所以, 战时风险成本的评估在战时物流最短路径规划具有重要价值。

### 2.1 节点重要度

由于现代战争战场城市化, 战时物流对城市交通网的依赖也越来越大。胡一斌<sup>[24]</sup>在复杂网络理论的基础上, 对我国城市道路网络进行的研究表明, 在国内城市中, 交通网络中重要节点大概只占 10%, 而剩下的 90% 的节点并不重要。这直接导致我国城市交通网络在蓄意攻击下, 会变得非常脆弱, 对重要节点的打击常常会使整个城市交通网络瘫痪。而在战时情况下, 敌方往往会设法攻击我军的后勤保障运输网络中的重要节点, 重要程度越高的节点受到敌方蓄意攻击的可能性越大, 即更高的战损风险。

**定义 2** 借鉴王建伟等<sup>[25]</sup>提出的基于局部特征的网络节点重要性度量方法, 5 节点  $v_i$  的重要程度  $C(i)$  可表示为:

$$C(i) = \alpha + \beta d_{\Gamma_i} \quad (3)$$

其中:  $\alpha$ 、 $\beta$  为可调参数且  $\alpha + \beta = 1$ ;  $d_i$  为节点  $v_i$  的度, 反映与该节点直接连接的节点数目;  $\Gamma_i$  为节点  $v_i$  的直接连接节点;  $d_{\Gamma_i}$  为所有直接连接节点度的总和。

### 2.2 战场距离系数

战时物流的运输环境为我方补给点和作战部队之间的区域, 距离战场越远, 我方对该区域的控制能力越强, 交通运输环境的可靠性就越强; 反之, 则受到损毁的风险就越高, 距离战场近的运输路径受到损毁的概率更大。姜海洋<sup>[16]</sup>在对军事运输风险的研究中, 对战时风险概率模型进行了阐述: 正如地震波及影响一样, 路径损毁程度与战场之间的距离成正比例关系, 即距离战场越远, 震动等级越小, 受到损害的程度也越小, 故距离战场近的路径或节点受损毁的概率高于距离战场远的路径或节点。

**定义 3** 若设  $L(v)$  为某点与战场的距离, 将距离战场中心  $L_0$  以内的区域按距离划分为 9 等份, 各区域内的影响系数分别为从 0.1~0.9, 与战场中心距离大于  $L_0$  则为 0, 并规定战场中心影响系数为 1, 则可将该点战场距离系数  $F(i)$  为:

$$F(i) = \begin{cases} 0, & L(v) > \tilde{L} \\ 0.1 \times i, & L_{i-1} \leq L(v) < L_i \\ 1, & L(v) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

所以战时的运输风险, 应该考虑受到的敌方蓄意攻击和战场距离远近对可靠性的影响; 因此, 可以将战时风险成本简化为由节点的重要程度和与战场的距离共同决定。

**定义 4** 节点  $v_i$  的风险概率  $G(i)$  可为:

$$G(i) = C(i)F(i) \quad (5)$$

对  $G(i)$  进行无量纲化处理, 使其值为在  $[0, \eta]$  区间分布的概率系数, 具体的规范化处理如下:

$$\tilde{G}(i) = \eta_1 \frac{G(i)}{G_{\max}} \quad (6)$$

其中:  $\eta_1$  为规范化系数;  $G_{\max}$  为网络中最大的节点风险系数。

接下来, 考虑将节点的风险概率转换为路段的风险成本, 在某一路段运输过程中, 顺利通过不受起点遭遇损毁的影响, 而只受到行驶终点的影响。加之, 在路段上的敌袭风险与行驶时间成正比例关系, 因此, 风险成本取决于节点风险概率和路段通行时间。

**定义 5** 路段的风险成本由其终点  $v_j$  节点风险系数  $\tilde{G}(j)$  和路段通行时间  $T_{ij}$ , 具体如下:

$$U_{ij}(t) = \tilde{G}(j)T_{ij}(t) \quad (7)$$

可以看出: 其中的通行时间成本  $T_{ij}(t)$  为时变离散函数, 由此, 路段的风险成本  $U_{ij}(t)$  也为时变离散

函数，而运输费用成本，文中则将其作为静态数据，与其路段距离长短成正比例关系。所以，笔者考虑的最短路径问题为基于时间依赖网络 (time-dependent network) 的进行规划。

### 3 战时物流最短路径模型

战时物流运输网可表示为带向的时间依赖网络  $G=(V, E, W)$ ，其中  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为节点集合， $E \subseteq V \times V$  为边的集合， $Z=(z_{ij}(t))$  为任一时间区间内从  $v_i$  到  $v_j$  的通行时间成本和风险成本的综合权值矩阵，其中  $z_{ij}(t)$  为综合权值对于时间的函数。笔者研究的最短路径问题即寻求一条路段综合权值最小的路径，故建立基于时间依赖网络的战时物流最短路径模型如下：

$$\min Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n Z_{ij}(t) x_{ij}; \tag{8}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, e_{ij} & \text{在选择路径上} \\ 0, e_{ij} & \text{不在选择路径上} \end{cases} \tag{9}$$

笔者将目标函数中考虑各权值指标规范化后，综合权值如下：

$$z_{ij}(t) = \varphi_1 \eta_2 \frac{T_{ij}(t)}{T_{\max}(t)} + \varphi_2 \eta_3 \frac{U_{ij}(t)}{U_{\max}(t)} + \varphi_3 \eta_4 \frac{D_{ij}}{D_{\max}} \tag{10}$$

其中： $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  和  $\varphi_3$  为权重系数； $\eta_2$ 、 $\eta_3$  和  $\eta_4$  为规范化系数； $T_{\max}(t)$  和  $U_{\max}(t)$  分别为所有路段的时间成本和权值成本的最大值； $D_{ij}$  和  $D_{\max}$  则为各路段的实际距离和其最大值，用于作为费用成本的衡量权值指标。

### 4 算法及算例

动态最短路径规划，传统的最短路径算法<sup>[25]</sup>已经不能满足其求解需要，故选择用时间依赖网络的综合权值最短路径算法<sup>[21]</sup>进行求解。若设起始节点为  $o$ ，目标节点为  $d$ ，建立一个队列，记作  $list$ ；用  $s[u]$  表示从节点  $u$  出发的时刻； $A(u)$  表示  $(u, w)$  的终点  $w$  的集合；用  $a[w]$  表示从起点  $o$  出发到达节点  $w$  的时刻； $g_{uw}(t)$  和  $z_{uw}(t)$  分别表示在  $t$  时刻从节点  $u$  出发到节点  $w$  所需的时间成本和综合权值； $Z[w]$  表示从起点  $o$  出发到达节点  $u$  的最小综合权值； $pre[w]$  表示计算路径上  $w$  的前一节点。算法流程如下：

begin

初始化，对于每个节点  $w$ ， $a[w]=\infty$ ， $Z[w]=\infty$ ， $s[u]=a[o]=t_0$ ， $z[o]=z_0$  建立个队列表  $list$ ，将起始节

点  $o$  插  $list$  中

while  $list$  为空 do

begin

从  $list$  表中选取第 1 个节点  $u$  为当前节点，并把该节点从  $list$  表中删除（节点  $o$  一旦删除，永不再插入  $list$  表）

for 每个  $w \in A(u)$ ，do

begin

$z'=Z[u]=z_{uw}(a[u])$

if  $Z[w] > z'$  then

begin

$Z[w]=z'$

$a[w]=s[u]+g_{uw}(s[u])=a(u)+g_{uw}(a(u))$

$pre[w]=u$

if  $w$  不在列表  $list$  中 then

把  $w$  插入列表  $list$  中

end

if  $w=d$  而且所有  $A(w)$  中的点都不在队列表  $list$  中 then 算法结束

end

end

end

算法结束后，根据  $pre[w]=u$  建立从  $o$  到  $d$  的最短路径。

笔者假设某供给点在早上 7 时左右接到补给需求，向战场前线的作战分队进行物资补给，由于补给需求对时效要求紧迫且需求物资重要程度高，故不考虑运输成本，以最小时间和最少消耗的决策目标进行最短路径规划。

补给路径网络如图 1 所示，其中  $v_1$  和  $v_{23}$  分别表示供给点和作战部队，即路径的起点和终点，虚线为战场等距离线，据此得到表 1 和表 2。

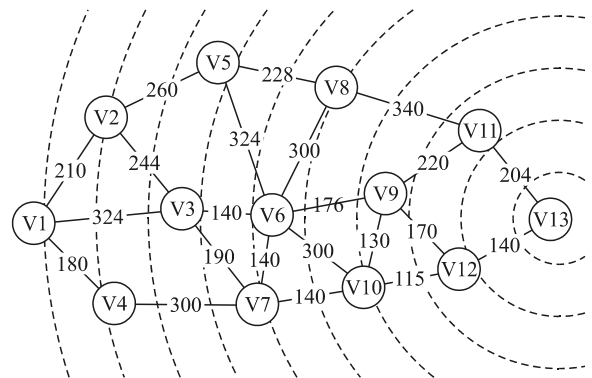


图 1 路网拓扑结构

表 1 节点相关数据统计

节点	节点度	邻节点度	重要程度	距离系数	风险系数	规范风险系数
v1	3	10	5.8	0	0.0	0.0
v2	4	18	9.6	0.1	1.0	0.2
v3	4	13	7.6	0.3	2.3	0.4
v4	2	8	4.4	0.2	0.9	0.1
v5	3	12	6.6	0.3	2.0	0.3
v6	5	24	12.6	0.5	6.3	1.0
v7	5	14	8.6	0.4	3.4	0.5
v8	3	11	6.2	0.5	3.1	0.5
v9	5	14	8.6	0.7	6.0	1.0
v10	3	13	7	0.6	4.2	0.7
v11	3	10	5.8	0.8	4.6	0.7
v12	3	10	5.8	0.8	4.6	0.7
v13	2	6	3.6	1	3.6	0.6

表 2 路段相关数据统计

路段	距离	节点	风险	路段	距离	节点	风险
1-2	206	v2	0.1	6-9	175	v9	0.8
1-3	320	v3	0.3	7-6	143	v6	0.8
1-4	189	v4	0.1	7-9	301	v9	0.8
2-3	240	v3	0.3	7-10	144	v10	0.5
2-5	263	v5	0.3	8-11	345	v11	0.6
3-6	143	v6	0.8	9-11	220	v11	0.6
3-7	192	v7	0.4	9-12	176	v12	0.6
4-7	305	v7	0.4	10-9	134	v9	0.8
5-6	323	v6	0.8	10-12	118	v12	0.6
5-8	229	v8	0.4	11-13	203	v13	0.5
6-8	300	v8	0.4	12-13	143	v13	0.5

表 4 各路段不同时间段时间成本

路段	7-9点	9-11点	11-13点	13-15点	15-17点	17-19点
1-2	2.65	2.60	2.69	2.90	2.65	2.89
1-3	4.00	3.94	4.34	4.72	4.40	4.62
1-4	2.52	2.51	2.55	2.81	2.52	2.88
2-3	2.80	2.75	3.06	3.48	3.10	3.50
2-5	3.19	3.13	3.18	3.63	3.19	3.58
3-6	1.74	1.72	1.92	2.14	1.94	2.09
3-7	2.48	2.51	2.46	2.50	2.78	2.74
4-7	3.97	3.94	4.03	4.25	3.97	4.47
5-6	4.09	4.11	4.09	4.49	4.09	4.52
5-8	2.96	2.99	2.96	2.93	2.96	3.26
6-8	3.85	3.92	3.89	4.14	4.25	4.21
6-9	2.54	2.25	2.30	2.29	2.34	2.29
7-6	1.89	1.89	1.90	2.08	2.09	2.09
7-9	3.11	3.16	3.14	4.37	4.01	4.05
7-10	1.95	1.73	1.73	2.02	2.06	1.99
8-11	4.41	4.53	4.35	5.01	5.12	5.02
9-11	3.35	3.38	2.63	2.92	2.65	1.78
9-12	2.90	3.22	2.15	2.46	2.69	2.40
10-9	2.22	2.26	1.72	1.83	2.53	1.61
10-12	2.00	2.17	1.49	1.65	1.80	1.76
11-13	2.59	2.57	2.65	2.81	2.89	2.81
12-13	1.75	1.74	1.77	1.95	1.99	1.69

表 1 和表 2 分别为路径网节点和边的相关数据。其中：表 1 的节点重要度  $C(i)$  在计算时参数取值为  $\alpha=0.6$ ,  $\beta=0.4$ , 规范化系数  $\eta_1=0.8$ ; 表 3 和表 4 分别为各路段不同监测周期的平均速度, 以及根据路段距离求得的路段各时间段运输时间成本; 在此基础上, 算得表 5 中的各路段不同时间段的风险成本。

表 3 各路段在不同监测周期内的平均速度

路段	7-9点	9-11点	11-13点	13-15点	15-17点	17-19点
1-2	77.8	79.1	76.7	71.1	77.8	71.3
1-3	80.0	81.2	73.8	67.8	72.8	69.2
1-4	75.0	75.4	74.0	67.2	75.0	65.7
2-3	85.6	87.3	78.5	68.9	77.5	68.5
2-5	82.5	84.1	82.6	72.4	82.5	73.4
3-6	82.4	83.2	74.3	66.9	73.7	68.5
3-7	77.6	76.5	78.1	76.7	69.1	70.2
4-7	76.9	77.5	75.6	71.8	76.9	68.3
5-6	79.0	78.6	78.9	71.9	79.0	71.4
5-8	77.3	76.5	77.4	78.2	77.3	70.3
6-8	77.9	76.6	77.2	72.4	70.6	71.2
6-9	69.0	77.9	76.2	76.4	74.9	76.4
7-6	75.7	75.5	75.3	68.9	68.3	68.5
7-9	96.8	95.2	95.8	68.9	75.0	74.3
7-10	73.7	83.4	83.2	71.3	70.0	72.5
8-11	78.2	76.2	79.4	68.9	67.3	68.7
9-11	65.7	65.0	83.5	75.4	83.0	123.3
9-12	60.7	54.6	82.0	71.4	65.4	73.2
10-9	60.5	59.2	77.9	73.2	53.1	83.4
10-12	59.0	54.3	79.4	71.3	65.7	67.1
11-13	78.5	79.1	76.5	72.3	70.3	72.3
12-13	80.0	82.0	81.0	73.3	71.8	84.5

表 5 各路段不同时间段风险成本统计

路段	7-9点	9-11点	11-13点	13-15点	15-17点	17-19点
1-2	0.32	0.32	0.33	3.02	0.32	0.35
1-3	1.16	1.14	1.26	5.01	1.27	1.34
1-4	0.28	0.28	0.29	2.92	0.28	0.32
2-3	0.81	0.80	0.89	3.77	0.90	1.01
2-5	0.80	0.79	0.80	3.88	0.80	0.90
3-6	1.39	1.38	1.54	2.94	1.55	1.67
3-7	1.08	1.10	1.07	2.94	1.21	1.19
4-7	1.73	1.72	1.76	4.68	1.73	1.95
5-6	3.27	3.29	3.28	5.29	3.27	3.62
5-8	1.17	1.18	1.16	3.32	1.17	1.28
6-8	1.52	1.54	1.53	4.54	1.67	1.66
6-9	1.94	1.72	1.76	3.06	1.79	1.75
7-6	1.51	1.52	1.52	2.88	1.68	1.67
7-9	2.38	2.42	2.40	5.13	3.07	3.10
7-10	1.04	0.92	0.92	2.55	1.10	1.06
8-11	2.60	2.67	2.56	5.60	3.02	2.96
9-11	1.97	1.99	1.55	3.51	1.56	1.05
9-12	1.71	1.90	1.26	3.05	1.59	1.42
10-9	1.69	1.73	1.31	2.60	1.93	1.23
10-12	1.18	1.28	0.88	2.24	1.06	1.04
11-13	1.18	1.17	1.21	3.26	1.32	1.28
12-13	0.80	0.80	0.81	2.41	0.91	0.77

在表 4 和表 5 的统计数据上, 根据前文的综合权值构造方法, 权重系数设定为  $\varphi_1=0.42$ ,  $\varphi_2=0.34$

和  $\varphi_3=0.24$ ，得到表 6 中路段各时间段的综合权值。

表 6 各路段不同时间段综合权值统计

路段	7-9 点	9-11 点	11-13 点	13-15 点	15-17 点	17-19 点
1-2	40	43	42	44	57	39
1-3	63	72	71	77	92	72
1-4	37	40	39	41	54	37
2-3	46	52	50	55	69	51
2-5	50	57	55	57	72	53
3-6	28	41	40	44	46	42
3-7	38	48	48	48	52	49
4-7	60	77	75	78	85	72
5-6	64	95	95	96	92	90
5-8	45	56	56	57	61	52
6-8	62	73	73	74	83	73
6-9	35	56	51	53	50	50
7-6	29	44	43	44	45	45
7-9	61	75	75	76	89	86
7-10	28	39	36	36	42	38
8-11	67	93	94	92	100	97
9-11	42	68	67	57	61	53
9-12	34	58	62	46	51	51
10-9	27	48	48	40	40	50
10-12	23	40	42	32	36	34
11-13	40	51	50	52	57	52
12-13	28	35	34	35	41	36

根据 TDN-Z 算法得到此项任务的行驶计划为：1-4-7-10-12-13，即 7 点从供给点出发，9 点经过节点 4，13 点经过节点 7，15 点半经过节点 10，17 点 18 分左右经过节点 12，最终在 19 点到达作战部队手中。

## 5 结论

笔者根据战时物流最短路径规划的军事效益成本影响因素与时间相关，构造通行时间成本和战时风险成本的时变函数，并给出获取基础数据的相关手段，在此基础上建立基于时变依赖网络的最短路径模型，进行综合考虑战时物流的时效性和可靠性构造综合边权。最后，利用 TDN-Z 算法进行简单的算例应用，得到的最短路径与途径具体节点的大致时刻，对战时后勤保障的控制决策具有一定参考意义和实用价值。当然，利用遗传算法、蚁群算法等算法进行求解实际路径网络节点较多和数据复杂的情况，相关研究较多不再赘述。涉及的基础数据和参数较多，如何有效地获取更准确数据以及考虑节点的延误时间，将是下一步研究的方向和重点。

## 参考文献：

- [1] 潘立军. 带时间窗车辆路径问题及其算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [2] 肖增敏. 动态网络车辆路径问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [3] REIMANN M, DOERNER K, HARTL R F. D-Ants: Savings Based Ants divide and conquer the vehicle routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2004, 31(4): 563-591.

- [4] 臧涛涛. 基于模糊层次分析法(FAHP)的军事运输路径优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [5] PARRA O J S, RUBIO G L, DAZA B S R. Dijkstra algorithm based on a reliability model[C]//International Conference on Information Society. IEEE, 2015.
- [6] 李相勇. 车辆路径问题模型及算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [7] 王斌, 尚新春, 李海峰. 解决车辆路径问题的混合模拟退火算法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(3): 651-653.
- [8] 周生伟, 蒋同海, 张荣辉. 改进遗传算法求解 VRP 问题[J]. 计算机仿真, 2013, 30(12): 140-143.
- [9] 唐成. 运输优化问题中常见启发式算法比较与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [10] 石玉峰. 战时不确定性运输路径优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [11] ROYSET J O, CARLYLE W M, WOOD R K. Routing Military Aircraft With A Constrained Shortest-Path Algorithm[J]. Military Operations Research, 2007, 14(3): 31-52(22).
- [12] 王煜. 战时陆路军事运输路径优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [13] 肖健梅, 黄有方, 李军军, 等. 基于离散微粒群优化的物流配送车辆路径问题[J]. 系统工程, 2005, 23(4): 97-100.
- [14] 赵虎. 信息化战争环境下的军事物资应急配送研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [15] HAAPALA J. Routing Military Aircraft by Solving a Dynamic Multi-Objective Network Optimization Problem with the A\* Algorithm[D]. Aalto University School of Science, 2015.
- [16] 姜海洋. 基于复杂网络的军事运输风险及路径优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [17] 姜海洋, 周宽久, 林林, 等. 战时运输风险评估模型及其路径优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(17): 235-242.
- [18] 谭国真, 高文. 时间依赖的网络中最小时间路径算法[J]. 计算机学报, 2002, 25(2): 165-172.
- [19] 谭国真, 柳亚玲, 高文. 随机时间依赖网络的 K 期望最短路径[J]. 计算机学报, 2003, 26(3): 323-331.
- [20] 刘永强, 常青, 熊华钢. 改进蚁群算法求解时变网络中最短路径问题[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1245-1248.
- [21] 李宇飞. 基于时间依赖网络的军事物流配送路径优化问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [22] 孙洪运, 杨金顺, 李林波, 等. 恶劣天气事件对道路交通系统影响的研究综述[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(6): 26-32.
- [23] 王元彪. 智能交通系统中 Dijkstra 算法的高效实现[J]. 计算机工程, 2007, 33(6): 256-258.
- [24] 胡一站. 基于复杂网络的交通网络复杂性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- [25] 王建伟, 荣莉莉, 郭天柱. 一种参数可调的网络节点重要性度量方法[J]. 科研管理, 2009, 30(4): 74-79.