

非定向军事路网交通流隐蔽性 测度及分配模型

周伟¹ 何建敏¹ 余德建¹

摘要 为了解决原有军事路网隐蔽性测度模型中存在的不同运量在相同路况下隐蔽性测度值相等的悖论, 以及路网定向性导致分配非最优两方面缺陷, 本文在对隐蔽性测度方法进行修正以及对非定向军事路网三方面性质(始点终点相连路段的定向性、路网的可转换性、中点相连路段的后定向性)详细分析的基础上, 提出了一个基于隐蔽性测度修正方法的非定向军事路网交通流分配模型, 并针对模型在计算过程中可能出现的循环流现象提出了逐步去环的解决方法。最后, 通过算例证实了非定向路网三方面性质及计算中可能存在的循环流现象, 计算过程和结果充分说明新模型的可行性与实用性。

关键词 军事路网, 交通流, 关隐蔽性, 循环流, 信息熵

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00315

Traffic Flow Hidden Measure and Assignment Model for the Uncertain Direction Military Traffic Network

ZHOU Wei¹ HE Jian-Min¹ YU De-Jian¹

Abstract We first revise the hidden measure method and analyze the three natures of the uncertain direction military traffic network such as the direction determinacy of the beginning and end points, the convertibility of the traffic network, and the direction after-determinacy of the center points. Then, we derive a traffic flow hidden measure and assignment model for the uncertain direction military traffic network, which could make up for two deficiencies of the old models, i.e., the same concealment value about the different flows even in the same conditions and the direction determinacy hypothesis of the whole military traffic network. Next, we propose a subsets algorithm to avoid the circle flow, which could appear during the computational process of the new model. At last, the above natures and circle flow phenomenon are proved by an example, in which the feasibility and the usability of the new model and method are also reflected.

Key words Military traffic network, traffic flow, concealment, circle flow, information entropy

战争时期如何保证在隐蔽性最大的情况下进行军事物资的运送是一个重大的实际问题, 不仅仅关系到一个部队军事物资配送的效率, 甚至能左右一场战争的胜负^[1-3], 所以对军

事路网交通流配送的研究是一个涉及军事、管理、运筹等领域的重要课题。目前, 有关一般交通流分配方法的研究成果较多, 如: 刘洪丽等^[4] 和 Chiou^[5] 提出了基于目标函数优化的交通流分配模型, 这也是经典的常规交通流分配方法。郭瑞军等^[6] 提出了一种基于矩阵迭代法计算最短路径的交通流分配方法。王京元等^[7] 和 Ben^[8] 分别提出的基于拍卖算法和微观模拟实验的交通流最优配置方法, 以及群体智能混合求解方法^[9]、交通流模型参数的迭代学习辨识方法^[10] 等。但容易发现, 上述方法和模型的运用一般都局限于针对时间和成本等限制的普通交通流进行分配, 难于运用到军事运输领域。而真正意义上研究军事交通流的文献主要有: 李岩等^[11] 研究了基于运输风险的战时运输网络交通流分配模型, 该模型通过引入风险评价方法对交通流分配, 其研究结合了军事运输安全性的特点, 但文中对用风险衡量军事运输安全性的理论可行性未做研究; 陈建林等^[12] 重点研究了战区军事交通运输网络保障能力评价问题, 但该研究仅限于交通流分配后的评估问题。方志耕等^[13] 结合 GERT 网络模型对公路军事交通运输勤务综合演习项目进行了具体研究, 该方法局限于交通流合理分配后的情景仿真。宇仁德等^[14] 提出了一种基于 DEA 理论的交通安全评价与流量分配模型。曾运清等^[15] 结合模糊综合评价理论进行了陆路国防交通网络评价。但上述研究多数属于前向视角(即指在某些条件已知或假定的情况下进行研究和分析, 而对应的后向视角是指在相关条件均不确定的情况下进行整体的研究和分析)的军事路网评价或仿真模型, 无法对战时交通流如何具体分配提供决策依据。为了解决该问题, 方志耕等^[1] 首次提出了一种基于隐蔽性测度的军事路网交通流分配方法, 具有很好的实用性和可行性。方志耕等^[2] 在文献 [1] 的基础上进一步将隐蔽性测度公式扩展到了全路况(路况的界定可参见文献 [16]) 的情形, 并在几次人机仿真实验中都得到了较好的运用。但是, 根据笔者的进一步研究和仿真分析, 发现上述模型仍存在两方面不足: 1) 模型中隐蔽性测度公式的非单调性导致存在不同运量在相同路况下隐蔽性测度值相同的悖论; 2) 模型建立在军事路网定向性的基础上, 而战争中实际情况更可能是一种非定向的军事路网, 路网的定向性也将导致交通流分配结果无法达到隐蔽性最大的目标。基于上述两方面不足, 本文将在对隐蔽性测度进行修正和对非定向军事路网进行详细分析的基础上提出一个更符合实际情况的非定向军事路网交通流分配模型, 并通过算例进一步说明新模型的可行性和实用性。

1 军事路网交通流隐蔽性测度一般方法及其不足

1.1 军事路网交通流隐蔽性一般测度方法

根据邱苑华^[17]、Shannon^[18] 和 Abba^[19] 对信息熵的界定, 肖玉明等^[20]、陈冬华^[21] 与 Yang^[22] 对信息熵与交通流分配结合的理论分析以及方志耕、周伟等^[1-2] 把信息熵理论运用到实际军事路网交通流的分配中等相关研究可知: 结合信息熵理论对路段隐蔽性进行测度是合理可行的, 因为路段隐蔽性的信息熵测度意味着通过信息熵对路段运输流的“分散程度”或者“混乱程度”等不确定性程度进行度量。而军事物资运输的隐蔽性最大主要是指在敌我双方对运输物资种类和数量都了解的情况下, 我方一定数量军事物资的运输需要保证尽可能避免被敌方发现, 或者能给敌方造成物资运输的不确定性最大, 由此建立运输流“混乱程度”与相对“隐蔽程度”之间的联系, 即在军事物资运输数量一定的情况下, 路网混乱程度正是相对敌军的隐蔽性大小, 故可用作军事路网的

收稿日期 2011-04-25 录用日期 2011-08-04

Manuscript received April 25, 2011; accepted August 4, 2011

国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB328104-02), 国家自然科学基金(71071034), 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助课题(CXZZ-0183), 教育部博士研究生学术新人奖资助

Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB328104-02), National Natural Science Foundation of China (71071034), Innovative Research Project of Graduate in Jiangsu Province (CXZZ-0183), and Academic New Artist Ministry of Education Doctoral Post Graduate

本期责任编辑 关新平

Recommended by Associate Editor GUAN Xin-Ping

1. 东南大学经济管理学院 南京 211189

1. School of Economics and Administration, Southeast University, Nanjing 211189

隐蔽性测度,参考上述文献,对这种“混乱程度”或“不确定程度”正好可以借鉴信息熵理论进行计算。

为了进一步研究非定向路网的隐蔽性测度及其交通流分配问题,先引入相关概念如下:

定义 1. 称路段通过归一化转换后的流量为路段的标准交通流量 $x_{ij}^{e(i,j)}$, 即 $x_{ij}^{e(i,j)} = A_{ij}^{e(i,j)} / A$ 。

根据定义可知,标准交通流量为 $[0, 1]$ 区间内的值, $x_{ij}^{e(i,j)}$ 为从 i 地到 j 地第 $e(i, j)$ 条路段的标准交通流量。其中,从 i 地到 j 地共有 $E(i, j)$ 条路段, A 为总物资量, $A_{ij}^{e(i,j)}$ 为对应路段运输物资量。

定义 2. 称 $I(x) = -kx \ln x$ 为单车道、单位距离、流量为标准交通流量 x 的路段隐蔽性信息熵测度,简称隐蔽性测度。其中, k 在熵理论中为玻尔兹曼常数,这里为定值系统参数,恒大于 0。

由于隐蔽性测度中的玻尔兹曼常数未知,故引入单位路段标准流量的隐蔽性测度,进而可计算不同流量、不同路网的隐蔽性相对测度值。

下面不加证明地引入基于路宽和路长的全路况路段及路网交通流隐蔽性测度公式,具体证明过程可参考文献 [2]。

定理 1. q 车道、单位距离长度、流量为标准交通流量 x 的路段隐蔽性测度公式为: $I(x) = kx(-\ln x + \ln q)$ 。

定理 2. 单车道长度为 s 的路段隐蔽性测度公式为: $I(x) = -ksx \ln x$ 。

结合定理 1 和定理 2 可得出基于全路况路段隐蔽性测度的一般式为

$$I(x) = ksx(-\ln x + \ln q) \quad (1)$$

并有,基于全路况路网隐蔽性测度的一般式为

$$I(x) = \sum_{j=0}^{V+1} \sum_{i=0}^{V+1} \sum_{e(i,j)} \left(ks_{ij}^{e(i,j)} x_{ij}^{e(i,j)} \times \left(-\ln x_{ij}^{e(i,j)} + \ln q_{ij}^{e(i,j)} \right) \right) \quad (2)$$

其中, 0 和 $V+1$ 表示路网起点和终点, x, s, q 为对应路段的标准流量、长度及车道数,其余变量定义同上。

1.2 隐蔽性一般测度方法的不足

1) 隐蔽性一般测度公式的非单调性导致原模型存在同路段、相同条件下运送不同数量物质隐蔽性相同的悖论。

在同一条路段且条件相同的情况下,路段长度 s 相等,令车道数 q 为 1 (多车道可作多条并行单车道处理),则路段隐蔽性测度值为: $I(x) = -ksx(\ln x)$, 其中 k, s 为路况常量。分别对隐蔽性测度值 $I(x)$ 求交通流的一次导和二次导有:

$$\frac{dI}{dx} = -ks(\ln x + 1), \quad \frac{d^2I}{dx^2} = -\frac{ks}{x} < 0$$

当 $x = 1/e$ 时有 $dI/dx = 0$, 故该测度公式不具备单调性。更确切为: 当 $x \in [0, 1/e]$ 和 $x \in [1/e, 1]$ 时测度值分别为递增和递减函数,同时两个不同定义域对应相同值域,即存在同路段、相同条件下运送不同数量物质隐蔽性相等的悖论。

2) 原有军事路网隐蔽性测度中路网的定向性影响了最优分配方案的确定。

为了更有效地控制交通和利用路段,正常情况下路段都固定了相应的运行方向,而原有路网隐蔽性测度正是建立在此基础上,针对每条路段都用前向视角确定其方向,而后进行整体隐蔽性最优交通流分配。这种方法理论上正确,但与战时

特殊情况不符,因为军事路网交通流分配一般是考虑战时如何在更有效(隐蔽性最大)的基础上对军事物资进行分配、运送,一旦交战,这些交通规则和路网方向均不需考虑,唯一目标就是如何有效把军事物资送达目的地,基于此,军事路网应该是一个非定向路网。再者,从建模的角度分析,在军事路网中任意两地 i 与 j 相连的路段,如果前向的规定方向是从 i 到 j , 则 $x_{ij}^{e(i,j)} \geq 0$, 而 $x_{ji}^{e(j,i)} = 0$, 即定向路段建模中对每条路段都增加了一个方向约束条件,而约束条件的增加将导致分配方案可行域缩小、最终分配方案非最优。

2 隐蔽性测度修正方法与非定向军事路网性质

2.1 隐蔽性测度修正方法

定义 3. 称 $I(x) = -k(x/e) \times \ln(x/e)$ 为单车道、单位距离、标准流量为的路段隐蔽性测度修正公式。

令 $y = x/e$, 代入隐蔽性测度修正公式可得 $I(y) = -ky \ln(y)$, 故与原公式形式一致,即通过信息熵对隐蔽性大小进行度量的基本原理不变。计算中可直接运用该公式进行隐蔽性测度,其中 $y \in [0, 1/e]$, y 为修正标准流量,并有 $\sum y = \sum x/e = 1/e$ 。通过计算 y 可得标准流量 x , 由标准流量 x 进行反归一法计算得到路段具体分配的物资运输流量。

修正的测度公式包含两层含义: 1) 因为修正测度公式取值范围的改变,故所有路段和路网隐蔽性测度均变化为修正公式形式,而具体计算的目标函数值与原模型目标函数值不具备可比性; 2) 因为路段和路网中的流量可取值为 0, 且部分路段流量值也将为 0, 故修正测度公式完整形式应为 $I = -ky \ln(y + \delta)$, 其中 $\delta \rightarrow 0^+$, 但考虑到当流量趋于 0 时 $I(y) = -ky \ln(y)$ 的极限值仍取值为 0, 不影响定义域, 因此, 计算中可直接运用 $I(y) = -ky \ln(y)$ 进行建模。

定理 3. q 车道、距离长度为 s 、修正标准流量为 y 的路段交通流最大隐蔽性测度公式为

$$I(y) = ksy(-\ln y + \ln q) \quad (3)$$

其中, q 为正整数, $y \in [0, 1/e]$ 。

证明. 根据隐蔽性测度修正公式知单位长度路段、单车道下隐蔽性测度值为 $I(y) = -ky \ln(y)$ 。把距离为 s 的单车道路段等同于 s 条单位长度、单车道串行路段,再根据不同串行路段隐蔽性的可加性,可知,单车道、距离长度为 s 、修正标准流量为 y 路段交通流最大隐蔽性测度值为

$$I(y) = -ksy \ln(y) \quad (4)$$

多车道可等同多条并行且路况一致的单车道,根据并行单车道平均流量分配隐蔽性最大原理(原理证明可参考文献 [2]) 可得修正后 q 车道、单位长度路段隐蔽性测度公式为

$$I(y) = -\sum_{e=1}^q k \left(\frac{y}{q} \right) \ln \left(\frac{y}{q} \right) \quad (5)$$

综合距离和车道,可得 q 车道、距离长度 s 、修正标准流量 y 的路段交通流隐蔽性测度公式为

$$I(y) = ksy(-\ln y + \ln q) \quad (6)$$

其中, q 为正整数, $y \in [0, 1/e]$, $s \in [0, +\infty)$ 。□

定理 4. 隐蔽性测度修正公式满足在同路况、不同流量下具有不同的隐蔽性测度值。

证明. 参考式 (6) 可知路段隐蔽性修正测度值为 $I(y) = ksy(-\ln y + \ln q)$ 在相同路况不同运量下, k, s, q 为常量, y 为变量. 分别对隐蔽性测度值 I 求流量 y 一次和二次导, 有:

$$\frac{dI}{dy} = ks(-\ln y - 1 + \ln q) > 0, \quad \frac{d^2I}{dy^2} < 0$$

不难发现, 隐蔽性测度修正公式具备单调性, 即在同路况、不同流量条件下满足测度值不同. \square

通过上述隐蔽性测度修正公式可知, 军事路段的隐蔽性与长度、车道数以及流量成正比 (分别对车道数、路段长度以及修正标准流量求导可得结论), 这满足军事路网运输的现实情况, 即:

- 1) 在路段运送物资数量一定的情况下, 路段越长越难侦查, 隐蔽性越高;
- 2) 车道数越多, 可分散程度越大, 隐蔽性越高;
- 3) 物资运送越多, 隐蔽性越高, 即与流量成正比.

需要指出的是, 与流量成正比, 具体是指在总流量一定的情况下物资全部运送比部分运送或不运送隐蔽性大, 因为物资部分运送或不运送时, 敌方可以根据发送点位置发现其余部分或全部物资所在, 即在一定运量下隐蔽性与路网物资运送流量成正比.

同时, 还存在整个路网的隐蔽性大小与整个路网物资运输总量成反比, 与整个路网的构成路段数成正比, 即当运输物资总量扩大时整体隐蔽性减小, 路段增加时隐蔽性增加.

2.2 非定向军事路网性质分析

性质 1. 始(终)点相连路段的定向性, 即与唯一物资发送点相连路段的运输方向是确定的, 与唯一物资接收点相连路段的运输方向也是确定的.

该性质主要是指, 在单发送点-单接收点军事路网中 (性质 2 将说明该类路网具备一般性), 唯一物资发送点只能发送物资, 运输方向为流出, 而唯一物资接收点只能接收物资, 运输方向为流入. 其原因是两者的逆向运输都将导致产生回流, 增加整体流量而降低隐蔽性.

性质 2. 路网的可转换性, 即多发送点-多接收点非定向路网可对应转化为单发送点-单接收点非定向路网.

多发送点 (N 个) 多接收点 (M 个) 的非定向军事路网如图 1 所示, 通过引入两个虚拟点 0 和 $V+1$, 构成如图 2 所示的单发送点-单接收点的非定向军事路网 (与虚拟点相连路段距离为 0, 即不影响整体隐蔽性). 因为原发送点和接收点的物资储备和接收数一定, 通过在单发送点-单接收点的非定向路网中增加约束: $x_{01} = A_1, x_{02} = A_2, \dots, x_{0N} = A_N; B_{(V-M+1)V} = x_{(V-M+1)V}, \dots, B_V = x_{VV}$ 进而得到原多发送点-多接收点非定向路网等价的单发送点-单接收点非定向路网, 即路网具有可转换性.

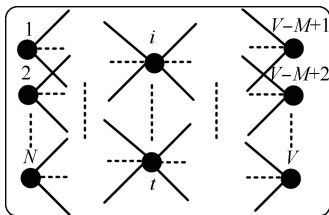


图 1 多发送点-多接收点非定向军事路网图

Fig. 1 Multi-sending receiving points network

根据性质 2 可知, 任何非定向军事路网均可转化为单发

送点-单接收点非定向军事路网的统一形式.

性质 3. 中点相连路段的后定向性, 即非定向军事路网中点相连路段存在运输方向的后确定性.

性质 3 可用数学公式表示为 $x_{ij}^{m(i,j)} \times x_{ji}^{n(j,i)} = 0$, 其中 $m(i, j), n(j, i)$ 为连接两点的不同路段.

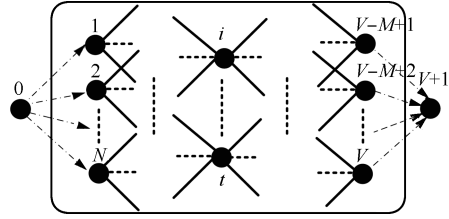


图 2 加入虚拟点转换后的多始点-多终点非定向军事路网图

Fig. 2 Conversion traffic network by adding virtual points

设连接两点 i, j 的两条路段, 若存在 $x_{ij}^{m(i,j)} \times x_{ji}^{n(j,i)} \neq 0$, 即 $x_{ij}^{m(i,j)} \neq 0, x_{ji}^{n(j,i)} \neq 0$ 则通过 $m(i, j)$ 和 $n(j, i)$ 两条路段物资运输, 结果是: i 点多了物质 $x_{ji}^{n(j,i)}$, j 点多了物质 $x_{ij}^{m(i,j)}$. 但这并非最优运输结果, 因为物资回流导致了整体运输物资数量增加, 隐蔽性降低. 上述运输方式可简单优化为: i 点保留 $x_{ji}^{n(j,i)}$ 物资 (若 $x_{ij}^{m(i,j)} \geq x_{ji}^{n(j,i)}$), 而仅向 j 点运输 $[x_{ij}^{m(i,j)} - x_{ji}^{n(j,i)}]$ 数量的物资, 而 j 点保留 $x_{ji}^{n(j,i)}$ 的物资, 即不输出, 该方案不仅能满足两点物资需求量, 还能通过整体流量的减少增加隐蔽性.

综上可知, 连接两中点的不同路段存在双向运送的可能性, 但为了避免物资运输回流, 其最优方案应该是单向运输, 但方向的确应该是全局优化的结果, 即非定向军事路网中相关的路段存在后定向性.

性质 4. 路网循环流产生的可能性, 即非定向军事路网流量分配的最优化计算可能产生路网循环流.

根据路段隐蔽性测度公式的单调性与路网非定向性可得到该性质, 具体可见实例计算部分. 因为循环流的产生增加了路网整体流量, 影响最优流量分配故模型计算中需要进行“去环”处理. 具体方法是: 当计算中出现循环流后, 加入循环路段流量乘积为 0 的约束条件重新计算, 直到最终流量分配不存在循环流. 该性质与计算方法具体在算例中验证.

3 基于全路况隐蔽性最大的非定向军事路网交通流分配模型构建

根据性质 2 可知任何非定向路网均可转化为单发送点-单接收点非定向路网的统一形式. 其转化过程仅需增加一个虚拟发送点 0 和虚拟接收点 $V+1$, 同时增加两个相应约束条件. 因此, 模型构建将以单发送点-单接收点非定向军事路网为对象. 构建前假设如下:

- 1) 敌我双方路况信息对称;
- 2) 路网中交通流分配的第一要务是如何有效避免敌方发现, 即要求整个路网具有最大隐蔽性;
- 3) 路网容量、质量以及运输距离不变化, 且运输费用不考虑.

根据路网交通流隐蔽性测度修正公式及上述假设, 可知军事路网运输需要满足最大隐蔽性条件的目标函数为

$$\max \left\{ \sum_{j=0}^{V+1} \sum_{i=0}^{V+1} \sum_{e(i,j)=1}^{E(i,j)} k [s_{ij}^{e(i,j)} y_{ij}^{e(i,j)} (-\ln y_{ij}^{e(i,j)}) + \right.$$

$$\ln q_{ij}^{e(i,j)} + s_{ji}^{e(j,i)} y_{ji}^{e(j,i)} (-\ln y_{ji}^{e(j,i)} + \ln q_{ji}^{e(j,i)}) \} \quad (7)$$

由性质 1 单发送点单接收点非定向军事路网始(终)点相连路段的定向性,可得始点和终点运输约束条件,即约束条件(1)为

$$x_{io}^{e(i,0)} = 0, \quad x_{V+1,i}^{e(V+1,i)} = 0$$

$$\sum_{j=0}^{V+1} \sum_{e(0,j)=1}^{E(0,j)} x_{0j}^{e(0,j)} = 1, \quad \sum_{j=0}^{V+1} \sum_{e(j,V+1)=1}^{E(j,V+1)} x_{j(V+1)}^{e(j,V+1)} = 1$$

由 $y = x/e$ 可知,在隐蔽性测度修正公式中,始点和终点的运输约束条件可变为约束条件(2)为

$$y_{io}^{e(i,0)} = 0, \quad y_{V+1,i}^{e(V+1,i)} = 0$$

$$\sum_{j=0}^{V+1} \sum_{e(0,j)=1}^{E(0,j)} y_{0j}^{e(0,j)} = \frac{1}{e}, \quad \sum_{j=0}^{V+1} \sum_{e(j,V+1)=1}^{E(j,V+1)} y_{j(V+1)}^{e(j,V+1)} = \frac{1}{e}$$

其中, $E(i, j)$ 表示从 i 到 j 所有路段条数,而同一路段情况不变,即 $e(i, j) = e(j, i)$, $q_{ij}^{e(i,j)} = q_{ji}^{e(j,i)}$, $s_{ij}^{e(i,j)} = s_{ji}^{e(j,i)}$,当两点间无直接连接路段时,流量和长度取 0 即可。

根据性质 3 以及运输中点进出平衡的原理,可得中点 i 的约束条件,即约束条件(3)为

$$y_{ij}^{e(i,j)} \times y_{ji}^{e(j,i)} = 0, \quad \sum_{j=0}^{V+1} \sum_{e(i,j)=1}^{E(i,j)} y_{ij}^{e(i,j)} = \sum_{k=0}^{V+1} \sum_{e(k,i)=1}^{E(k,i)} y_{ki}^{e(k,i)}$$

根据性质 4,路网交通流分配中将可能产生循环流,并假设最优结果中出现循环流: $y_{ij}^{e(i,j)} \rightarrow y_{jk}^{e(j,k)} \rightarrow \dots \rightarrow y_{ni}^{e(n,i)}$,其中流量均不为 0,可通过加入式(8)的约束条件进行“去环”处理。

$$y_{ij}^{e(i,j)} \times y_{jk}^{e(j,k)} \times \dots \times y_{ni}^{e(n,i)} = 0 \quad (8)$$

模型中,对修正流量值 y 存在取值约束,即: $y \in [0, 1/e]$,且 $i, j \in [0, 1, \dots, V+1]$ 。

然后再进行非线性规划计算,并重复去环处理步骤,直到不存在循环流(即逐步去环法),最终结果即为流量分配方案。结合上述目标函数(7)、约束条件(2)和(3)以及参数取值范围就构成一个完整的非定向军事路网交通流分配模型。通过该模型能得到隐蔽性最大目标下军事路网的最优流量分配。然后,根据,得到标准流量,再把标准流量转化为具体流量,就能得到隐蔽性最大情况下的军事路网交通流分配方案,模型运用与具体计算过程见下一小节。

4 算例分析

某军事演习中一方需要把一批重要军事物资通过图 3 所示路网,从发送地点 0 运送到战略要地点 6 (根据性质 2 可对多发送点-多接收点非定向路网转化后同样计算)。运输目标是尽可能降低被敌方发现而摧毁的可能性,求具体运输方案。不难发现,该问题属于求隐蔽性最大情况下军事物资运输分配问题,可根据上述模型进行求解。图 3 中, (p, q, s) 三个字分别表示某两点中的路段编号、车道数以及路段距离。如从 i 到 j 点中某路段标有 $(1, 2, 3)$,则表示从 i 到 j 点的第 1 条路段,车道数 2,路段长度 3。

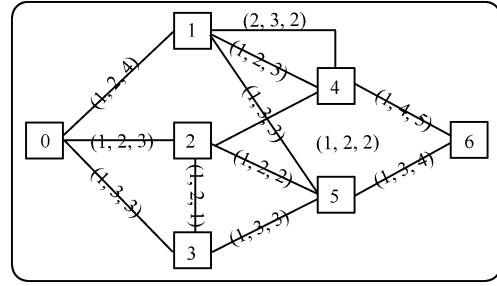


图 3 某非定向军事交通路网

Fig. 3 A uncertain directional military traffic network

令 $y_{ij}^{e(i,j)}$ 表示从 i 点到 j 点第 $e(i, j)$ 条路段交通流的修正标准流量分配,无直接路段相连则 $y_{ij}^{e(i,j)} = 0$,且 $0 \leq y_{ij}^{e(i,j)} \leq 1/e, i, j \in \{0, 1, \dots, 6\}$ 。

根据非定向军事路网交通流分配模型建立目标函数为

$$\begin{aligned} \max I = & k \times (4[y_{01}^1(-\ln y_{01}^1 + \ln 2)] + \\ & 3[y_{02}^1(-\ln y_{02}^1 + \ln 2)] + 3[y_{03}^1(-\ln y_{03}^1 + \ln 3)] + \\ & 3[y_{14}^1(-\ln y_{14}^1 + \ln 2) + y_{41}^1(-\ln y_{41}^1 + \ln 2)] + \\ & 2[y_{14}^2(-\ln y_{14}^2 + \ln 3) + y_{41}^2(-\ln y_{41}^2 + \ln 3)] + \\ & 3[y_{15}^1(-\ln y_{15}^1 + \ln 3) + y_{51}^1(-\ln y_{51}^1 + \ln 3)] + \\ & 2[y_{24}^1(-\ln y_{24}^1 + \ln 2) + y_{42}^1(-\ln y_{42}^1 + \ln 2)] + \\ & 2[y_{25}^1(-\ln y_{25}^1 + \ln 2) + y_{52}^1(-\ln y_{52}^1 + \ln 2)] + \\ & 1[y_{23}^1(-\ln y_{23}^1 + \ln 2) + y_{32}^1(-\ln y_{32}^1 + \ln 2)] + \\ & 3[y_{35}^1(-\ln y_{35}^1 + \ln 3) + y_{53}^1(-\ln y_{53}^1 + \ln 3)] + \\ & 5[y_{46}^1(-\ln y_{46}^1 + \ln 4)] + 4[y_{56}^1(-\ln y_{56}^1 + \ln 3)] \end{aligned}$$

模型约束条件为

s.t.

$$\begin{aligned} y_{01}^1 + y_{02}^1 + y_{03}^1 &= \frac{1}{e}, \quad y_{46}^1 + y_{56}^1 = \frac{1}{e}, \\ y_{01}^1 + y_{41}^1 + y_{41}^2 + y_{51}^1 &= y_{14}^1 + y_{14}^2 + y_{15}^1, \quad y_{41}^1 \cdot y_{14}^1 = 0, \\ y_{41}^2 \cdot y_{14}^2 &= 0, \quad y_{51}^1 \cdot y_{15}^1 = 0, \\ y_{02}^1 + y_{32}^1 + y_{42}^1 + y_{52}^1 &= y_{23}^1 + y_{24}^1 + y_{25}^1, \\ y_{32}^1 \cdot y_{23}^1 &= 0, \quad y_{42}^1 \cdot y_{24}^1 = 0, \quad y_{52}^1 \cdot y_{25}^1 = 0, \\ y_{03}^1 + y_{23}^1 + y_{53}^1 &= y_{32}^1 + y_{35}^1, \quad y_{23}^1 \cdot y_{32}^1 = 0, \quad y_{35}^1 \cdot y_{53}^1 = 0, \\ y_{14}^1 + y_{14}^2 + y_{24}^1 &= y_{41}^1 + y_{41}^2 + y_{42}^1 + y_{46}^1, \\ y_{14}^1 \cdot y_{41}^1 &= 0, \quad y_{14}^2 \cdot y_{41}^2 = 0, \quad y_{24}^1 \cdot y_{42}^1 = 0, \\ y_{15}^1 + y_{25}^1 + y_{35}^1 &= y_{51}^1 + y_{52}^1 + y_{53}^1 + y_{56}^1, \\ y_{15}^1 \cdot y_{51}^1 &= 0, \quad y_{25}^1 \cdot y_{52}^1 = 0, \quad y_{35}^1 \cdot y_{53}^1 = 0, \\ 0 \leq y_{ij}^{e(i,j)} &\leq \frac{1}{e}, \quad i, j \in \{0, 1, \dots, 6\} \end{aligned}$$

目标函数中前面两行为始点相连三条路段的隐蔽性测度,最后一行为终点相连两条路段的隐蔽性测度,其余行为中点相连路段的隐蔽性测度。

约束条件中第一行分别是始点和终点相连路段的总流量约束。中间各行分别代表中点 1 至中点 5 相连路段的流入流出均衡,及其后定向性约束。通过 LINGO 9.0 软件可解得上述非线性规划结果。

第一次计算得结果如图 4 示,不难看出,结果中存在环路: $x_{25}^1 \rightarrow x_{51}^1 \rightarrow x_{14}^1(x_{14}^2) \rightarrow x_{42}^1$,引入去环约束条件:

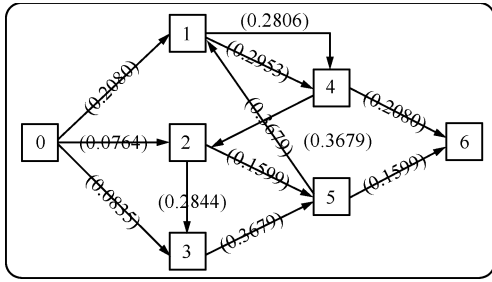


图 4 逐步去环法首次计算结果
Fig. 4 The first result by dealing circle

$$x_{25}^1 \times x_{51}^1 \times x_{14}^1 \times x_{42}^1 = 0, \quad x_{25}^1 \times x_{51}^1 \times x_{14}^2 \times x_{42}^2 = 0$$

重复上述计算步骤, 通过四次计算, 三次去环处理, 得到最优结果如图 5 所示, 图中已不存在循环流, 最大隐蔽性目标已达到, 故为最优军事物资的分配方案. 计算中另外两次存在的循环流分别为: $x_{52}^1 \rightarrow x_{23}^1 \rightarrow x_{35}^1$ 和 $x_{14}^1 \rightarrow x_{41}^1$.

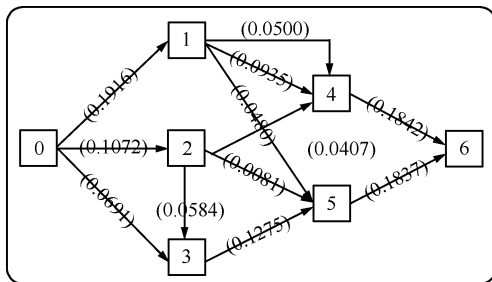


图 5 逐步去环法最终计算结果
Fig. 5 The last result by dealing circle

根据表 1 可知路网中每条路段的标准流量分配方案, 而具体物资运输量可通过乘以物资总量数获得. 通过上述计算就得到了战时如何确保隐蔽性最大情况下军事物资运送与分配的具体方案.

表 1 非定向军事路网交通流最优分配结果
Table 1 The allocated result of the U-D-M network

<i>i</i>	0	1	2	3	4(1)/4(2)	5	6
0		0.5208	0.2914	0.1878			
1					0.2543/0.1360	0.1305	
2				0.1588	0.1105	0.0221	
3						0.3466	
4							0.5007
5							0.4993
6							

通过以上算例的计算和分析可知, 新构建的模型和隐蔽性测度方法与已有模型相比, 具有以下优点:

1) 由于军事物资的重要性和运输时期的特殊性, 为了保证物资按时达到, 从无向路网出发考虑军事物资的运输分配问题更符合实际情况. 因此, 以控制交通而制定的运输方向可以暂不考虑.

2) 新模型具备一般性和广义性, 即新模型能有效包含已有模型 (通过加入定向路段的限制即可), 故新模型计算的分配方案将不劣于已有模型的分配方案.

在此, 笔者需要强调的是, 模型构建的背景是军事物资运输分配, 具体研究的是在仅知道路况条件下如何进行特殊时期军事物资运输分配的问题, 最终得出的军事物资运输分配方案属于一种相对有效的分配方案. 同时, 一旦对路网信息和敌方情况有了全面的了解和掌握, 笔者认为该模型可能不再合适, 但考虑到现实中更多的情况是仅限于路网状况的知情信息, 因此, 本文提出的方法和模型适用范围更广, 特别是在战争爆发初期或者军事物资调度布局期.

5 结束语

本文根据战争时期的特殊性, 在全面考虑路网路况的基础上提出了非定向军事路网隐蔽性测度修正公式及其交通流分配模型. 对路网隐蔽性测度修正公式相关定理与非定向路网三方面主要性质进行详细研究, 解决了原有模型存在的两方面不足. 新模型进一步贴近实际情况, 相信模型的提出对战争时期军事物资如何在隐蔽性最大情况下进行分配能提供一个合理的参考方案, 具备较大的理论意义和实用价值.

References

- 1 Fang Zhi-Geng, Liu Si-Feng, Dang Yao-Guo, Zhang De, Cheng Han-Hua. The military traffic flows distribution model research of maximum gray information entropy based on maximum concealment. *Chinese Journal of Management Science*, 2003, **11**(3): 56–61
(方志耕, 刘思峰, 党耀国, 张德, 程汉华. 最大灰信息熵路网军事交通流最大隐蔽性分配模型研究. *中国管理科学*, 2003, **11**(3): 56–61)
- 2 Fang Zhi-Geng, Zhou Wei, Chen Chang-Jun. The measure of road confidentiality in the entire road conditions and application in the military traffic flows. *China Soft Science*, 2009, (8): 155–161
(方志耕, 周伟, 陈长军. 全路况隐蔽性测度及其在军事路网交通流分配中的应用. *中国软科学*, 2009, (8): 155–161)
- 3 Zhu Dai-Shu, Ni Bin-Hai. How to ensure wartime military traffic flow in information age. *China Ordnance*, 2008, (6): 50
(朱代树, 倪滨海. 信息化条件下如何确保战时军事交通畅通. *中国民兵*, 2008, (6): 50)
- 4 Liu Hong-Li, Feng Bo-Lin. Distribution of cities' traffic flow based on ideas of optimization. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2005, **29**(6): 913–916
(刘洪丽, 冯伯林. 基于最优化思想的城市交通流分配. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2005, **29**(6): 913–916)
- 5 Chiou S W. TRANSYT derivatives for area traffic control optimization with network equilibrium flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003, **37**(3): 263–290
- 6 Guo Rui-Jun, Wang Wan-Xiang. One improvement to find the nearest route by matrix iteration method in traffic flow distribution. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2008, **29**(4): 41–44
(郭瑞军, 王晚香. 交通流分配中利用矩阵迭代法计算最短路径的一点改进. *大连交通大学学报*, 2008, **29**(4): 41–44)
- 7 Wang Jing-Yuan, Wang Wei. Application of auction algorithm for shortest paths in the traffic flow assignment. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2007, **5**(3): 16–20
(王京元, 王伟. 最短路拍卖算法在交通流分配中的运用. *交通运输工程与信息学报*, 2007, **5**(3): 16–20)

- 8 Ben A M, Cuneo D, Hasan M, Jha M, Yang Q. Evaluation of freeway control using a microscopic simulation laboratory. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2003, **11**(1): 29–50
- 9 Wang Su-Xin, Gao Li, Cui Xiao-Guang, Cao Hong-Mei. Study on multi-requirement points vehicle scheduling model and its swarm mix algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(1): 102–104
(王素欣, 高利, 崔小光, 曹宏美. 多需求点车辆调度模型及其群体智能混合求解. 自动化学报, 2008, **34**(1): 102–104)
- 10 Hou Zhong-Sheng, Jin Shang-Tai, Zhao Ming. Iterative learning identification method for the macroscopic traffic flow model. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(1): 64–71
(侯忠生, 金尚泰, 赵明. 宏观交通流模型参数的迭代学习辨识方法. 自动化学报, 2008, **34**(1): 64–71)
- 11 Li Yan, Dai Ming-Qiang, Wen Lin. Traffic assignment model of wartime transportation network based on transportation risk. *Ordnance Industry Automation*, 2009, **28**(2): 22–24, 29
(李岩, 戴明强, 温林. 基于运输风险的战时运输网络交通流分配模型. 兵工自动化, 2009, **28**(2): 22–24, 29)
- 12 Chen Jian-Lin, Chen Pei. Study on evaluating the guarantee ability of military traffic and transport network in war zone. *Railway Transport and Economy*, 2005, **27**(5): 79–80
(陈建林, 陈蓓. 战区军事交通运输网络保障能力评价研究. 铁道运输与经济, 2005, **27**(5): 79–80)
- 13 Fang Zhi-Geng, Gong Zheng, Huang Xi-Lin. Research on random network model for synthetic maneuver projection of military traffic transportation service by highway. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2000, **20**(4): 132–135
(方志耕, 龚正, 黄西林. 公路军事交通运输勤务综合演习项目 GERT 网络模型研究与分析. 系统工程理论与实践, 2000, **20**(4): 132–135)
- 14 Yu Ren-De, Zhang Hong-Bin, Li Da-Long. The evaluating model of road traffic safety based on data envelopment analysis. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2007, **27**(8): 159–166
(宇仁德, 张洪宾, 李大龙. 基于 DEA 理论的交通安全评分模型. 系统工程理论与实践, 2007, **27**(8): 159–166)
- 15 Zeng Yun-Qing, Wang Chun-Ying, Zhou De-Rong, Jia Yong-Tao. The application of fuzzy synthesis evaluation of entropy weight in evaluating national defense transportation network of land. *Journal of Academy of Military Transportation*, 2007, **9**(4): 62–65, 85
(曾运清, 王春颖, 周德荣, 贾永涛. 熵权值模糊综合评价法在陆路国防交通网络评价研究中的应用. 军事交通学院学报, 2007, **9**(4): 62–65, 85)
- 16 Xie Lun, Wang Zhi-Liang, Ren Dong-Chun, Teng Shao-Dong. Research of driver emotion model under simplified traffic condition. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(12): 1732–1743
(解仑, 王志良, 任冬淳, 滕少冬. 简化路况模式下驾驶员情绪模型的研究. 自动化学报, 2010, **36**(12): 1732–1743)
- 17 Qiu Wan-Hua. *Management Decision and Application of Entropy*. Beijing: China Machine Press, 2001. 358–364
(邱苑华. 管理决策与应用熵学. 北京: 机械工业出版社, 2001. 358–364)
- 18 Shannon C E. A mathematical theory of communication. *Bell Systems Technical Journal*, 1948, **27**: 379–423
- 19 Abbas A E. Maximum entropy utility. *Operation Research* 2006, **54**(2): 277–290
- 20 Xiao Yu-Ming, Wang Xian-Yu. Early warning analysis on stability of supply chain based on entropy. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2008, **22**(3): 57–63
(肖玉明, 汪贤裕. 基于熵理论的供应链稳定性预警分析. 管理工程学报, 2008, **22**(3): 57–63)
- 21 Chen Dong-Hua. Application of structure entropy in research of transport network. *Communications Standardization*, 2008, (6): 176–179, 250
(陈冬华. 结构熵在交通运输网研究中的应用. 交通标准化, 2008, (6): 176–179, 250)
- 22 Yang J P, Qiu W H. A measure of risk and a decision-making model based on expected utility and entropy. *European Journal of Operational Research*, 2005, **164**(3): 792–799
- 周伟 东南大学经济管理学院博士研究生. 主要研究方向为管理工程, 系统工程, 金融工程. 本文通信作者. E-mail: zw453@163.com
(ZHOU Wei Ph.D. candidate at the School of Economics and Administration, Southeast University. His research interest covers management engineering, systems engineering, and financial engineering. Corresponding author of this paper.)
- 何建敏 东南大学经济管理学院教授. 主要研究方向为管理工程, 系统工程, 金融工程. E-mail: hejianmin@seu.edu.cn
(HE Jian-Min Professor at the School of Economics and Administration, Southeast University. His research interest covers management engineering, systems engineering, and financial engineering.)
- 余德建 东南大学经济管理学院博士研究生. 主要研究方向为管理工程, 系统工程. E-mail: yudejian62@126.com
(YU De-Jian Ph.D. candidate at the School of Economics and Administration, Southeast University. His research interest covers management engineering and systems engineering.)