

求解动态随机综合运输问题的仿真优化方法

林 健

(北京航空航天大学 北京 100083)

提要 解决动态随机综合运输问题的一种有效途径是系统仿真方法与优化技术的结合。根据问题的特点,提出解决该问题的仿真优化结构,给出寻找最优货物调拨方案的最佳步长探测仿真优化算法,并对算法的收敛性进行了证明。实例分析表明,所提出的优化结构及算法十分有效。研究问题的思路能为其他动态随机多目标仿真优化问题的研究提供有价值的启迪。

关键词 运输问题 系统仿真 优化算法 多目标优先

The Simulation-optimisation Approach for Solving the Dynamic Stochastic Coordinated Transportation Problem

Lin Jian

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing)

Abstract An effective way for solving the dynamic stochastic coordinated transportation (DSCT) problem is the combination of system simulation and optimisation techniques. Based on DSCT characteristics, the simulation—optimisation structure for DSCT and the optimisation algorithm, the exploratory method of optimum step (EMOS) of searching the optimal plans of commodity allocations are presented, with the proof of EMOS convergence. It is shown by a real example studies that the structure and algorithm are quite effective. The train of thought researching the problem provides some valuable enlightenment for other kind of dynamic stochastic multi-objective simulation-optimisation problems.

Key words Transportation problems System simulation
Optimisation algorithm Multi-objective optimisation

1 动态随机综合运输问题与仿真优化技术

动态随机综合运输问题 (Dynamic Stochastic Coordinated Transportation Problem), 简称 DSCT 问题, 代表着一类典型的复杂运输问题, 正在引起各国学者的关注与重视。这个问题可描述为: 在一个以若干城市 (或地区) 为节点构成的运输网上, 用几种不同运输方式进

行地区间各种物资的运输。各地对各种物资的供需量服从随机分布, 运输作业时间也是随机变量。各地拥有的各类运输工具量是动态变化的, 系统内主要实体——运输工具在时间 t 的活动是由系统在 t 时的状态决定的。系统的资源(如某类运输工具总数、线路通过能力等)有限。费用包括: 物资运输费用、空载费用、库存费用和缺货损失费用等。要求确定最优的物资调运方案, 使系统的多个目标最优, 即总费用最低, 剩余货物周转量最少, 设备利用最好。

应用解析法来解决 DSCT 问题是不可能的^[1]。对于那些随机动态因素较 DSCT 少, 且复杂程度不及 DSCT 的运输问题, 人们提出了一些解决问题的方法^[2~5]。但对 DSCT 问题, 有效的解决途径是系统仿真技术。充分分析研究问题的性质与特点, 运用流程图仿真系统 Q-GERT^[6]或 SLAM II^[7], 能够构筑完整的 DSCT 问题的随机网络模型^[8]。对于一个给定的初始方案, 通过对这个模型的仿真运行所得的结果仅反映该方案的优劣情况, 而无法改进方案, 更不可能找到最优方案。要找到最佳解, 只有将这个随机网络模型(或称仿真模型)与优化技术结合起来。

仿真与优化技术的结合, 一直是从事系统仿真研究人们的主要研究方向之一。对单个目标的仿真优化问题, 有 4 类解决问题的方法: 基于梯度的搜索法(GSM), 随机逼近法(SAM), 响应曲面法(RSM)和启发式搜索法(HSM)。然而多个目标的仿真优化问题不仅具有其他多目标优化问题的特点, 也具有由于各种随机因素而引起的复杂性。至今在这方面完成的研究主要是将运筹学中一般多目标优化技术予以稍微的修改。一种方法是在保证其他目标函数达到一定响应值的条件下, 以某一目标函数为主响应进行优化。也可将这种方法与复合型方法或梯度和梯度投影法相结合。另一种方法是对目标规划方法进行改动而形成的。还有一种方法称之为多属性值函数法。在各种专门针对多目标仿真优化而研究的方法中, Teleb 和 Azadivar 提出的方法将仿真响应的随机性质与优化技术较好地结合起来。他们应用了复合搜索法, 但采用不同方法比较极点的响应值。对在复形面上的每一点计算了响应向量属于代表所有目标函数最优值的随机向量的概率, 然后舍弃概率值最低的点, 并将该点对其余点重心的反映加到单形面上。

对现有各种多目标仿真优化方法的分析研究表明: 这些方法存在着一定的局限性, 也不适合于 DSCT 这类问题。比如说, 初始点的选择及有关评价准则和策略的确定, 对应用这些方法带来的结果有直接的影响; 此外, 每一迭代步骤的进行, 必须花费较大的工作量; 再有, 由于搜索方向带有一定的随机性, 使问题的收敛速度往往较慢, 等等。现有方法的针对性及适应面, 也使它们无法处理 DSCT 这类问题。

2 DSCT 问题的仿真优化结构

解决 DSCT 问题的基本原则是: 在考虑到多目标仿真优化问题的共性的同时, 充分利用 DSCT 问题自身的特点^[8]。在研究 DSCT 问题的仿真优化结构之前, 首先必须有一套评价系统目标的指标体系。

采用了某一决策方案后, DSCT 问题仿真优化系统在仿真运行后可能出现两种不同的结果: a. 未完成运输任务(即还有剩余周转量存在); b. 完成了运输任务。对这两种结果, 根据 DSCT 问题的多个目标, 可以分别建立两种不同的指标评价体系:

1. 存在剩余周转量 (1) 剩余货物周转量最少; (2) 总费用最低; (3) 线路利用率高; (4) 空车率低。
2. 不存在剩余周转量 (1) 总费用最低; (2) 线路利用率高; (3) 空车率低。

用于处理这种多指标评价体系的方法被称为优先级方法,也即所谓字典序极小化 (Lexicographic Minimum) 方法。上面两种体系的指标排序是按照各自的重要性程序排列的,这就构成了它们的优先级。对两个不同的决策方案,先用第一优先级评价,若不能评出优劣,则用第二优先级评价,如此下去。

要使整个运输系统产生最经济的效果,在系统的运行过程中必须做到:(1) 运输工具的最优调度与货物的合理运输;(2) 全系统各种物资的最优调拨分配。这两个方面形成了 DSCT 问题的两部分优化内容。将这两部分的工作与 DSCT 问题的随机网络模型结合起来,就形成了 DSCT 问题的仿真优化系统,如图 1 所示。

做好运输工具的最优调度及货物的合理运输这部分的工作是为了加速物资周转,降低运输费用,节省运输能力,提高运输效率及保证运输质量。这些工作是在随机网络模型的运行过程中进行的,并且通过应用高级 Q-GERT 技术——用户程序 UF 模块插入来实现^[8]。具体地是通过 UF 模块调用各个具有特定功能的新建模块来完成。当某种运输实体到达某地后,UF 模块将根据实体的各属性值自动调用各有关模块,在系统当前状态下进行卸车(或中转)、计费、装车(或空车调度)、线路确定、发车等几项作业。系统在进行这些作业时充分考虑了各种运输方式的特点,选用最经济的运输工具运送货物,选择最短运输路径,避免不合理运输。

只有最优的货物调拨方案才能使整个系统产生最大的效益。对于某一货物调拨方案的仿真结果,DSCT 仿真优化系统将根据有无剩余周转量而调用不同的优化货物调拨方案算法模块以改进该方案。若算法模块能产生出新的改进方案,系统将以这一新方案作为随机网络模型的输入重新开始仿真运行;否则当前货物调拨方案就是最佳货物调拨方案,整个系统的仿真优化过程到此结束。

3 最佳步长探测 (EMOS) 优化算法

根据 DSCT 问题的特点,提出的优化货物调拨方案的算法在方案改进的搜索过程中采取的是最佳步长,而每一步迭代属于探测性移动,故称之为最佳步长探测搜索法 (Exploratory Method of Optimum Step),或称 EMOS 算法。

所谓最佳步长,是指在已确定的调整方向上,能使系统响应有最大变化的步长值。因为在这个方向 (e^i) 上,若取更小的步长也能使系统发生变化,如果这次探索成功,则还需在原 e^i 方向上继续探索才能达到最佳步长一次探索的效果。

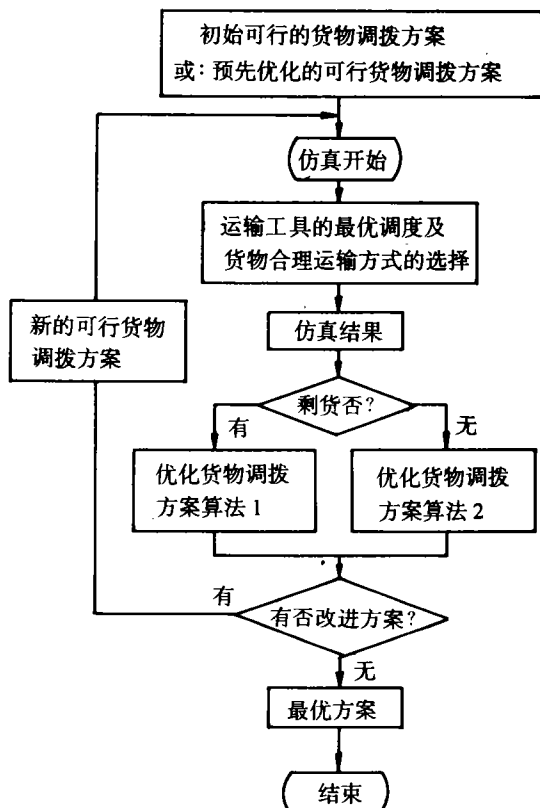


图 1 DSCT 问题仿真优化结构

所有非基变量, 设这些非基变量组成的集合为 D' , 分量为 $\bar{X}_l^t$ 。

3. 具备进基变量的条件

(1) 进基变量对应的运输线路上平均利用率小于容许的利用率。这是为了保证线路上有较大的剩余运输能力提供给新调整的运量运输。同时要求该线路上的运输工具是合理的运输方式。

(2) 若 $\bar{X}_l^t$ 是进基变量, 则它应保证出基变量 $X_{ij}^t(t)$ 能出基, 否则就达不到改善的目的。

(3) 使 $\bar{X}_l^t$ 进基, $X_{ij}^t(t)$ 出基的方案必须满足供需平衡条件。

设满足以上条件的非基变量有 m 个, 则集合 D' 可缩小成 D , 分量为 $\bar{X}_l^t(i), i=1, \dots, m$ 。

4. 集合 D 中非基变量的比较

如何从 D 中确定一个理想的非基变量为进基变量? 从系统的效益角度出发, 必须选择那些局部费用增加最小, 但对系统改善较大的非基变量进基。因而对 D 中 m 个元素, 依次计算由于它们进基引起的单位调整费用的增值 $\Delta C_{it}^{(i)}$, 取 $\min \{\Delta C_{it}^{(i)}\}_{it} = \Delta C_{it}^{(I)}$, 则 D 中的第 I 个分量被确定为进基变量。

经过前面的过程, 若最后确定的出基变量为 X_k^i , 进基变量为 X_l^i , 则方案调整方向为

$$e^i = \overbrace{(0, 0, \dots, 0, -1, 0, \dots, 0)}^M, \overbrace{(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)}^{N-M}$$

$\uparrow$
 X_k^i

$\uparrow$
 X_l^i

最佳步长为使等式

$$X^{i+1} = (X_1^{i+1}, X_2^{i+1}, \dots, X_{k-1}^{i+1}, 0, X_{k+1}^{i+1}, \dots, X_m^{i+1}, 0, \dots, 0, X_l^{i+1}, 0, \dots, 0)$$

$\uparrow$
 X_k^{i+1}

$\uparrow$
 $X_l^{i+1} \neq 0$

成立的值, 即 $\lambda^i(w) = X_k^i$ 。

这样就可根据 $X^{i+1} = X^i + \lambda^i(w)e^i$ 进行新的迭代运行。

3.3 EMOS-2 优化算法

EMOS-2 算法侧重于对进基变量的选择。具体是根据当前方案运行后产生的空车量来确定可行的进基变量。

设: Y_{jl}^k 为从 j 到 l , 运输方式 k 在整个仿真过程中总的空车量; S^p 为第 p 种货物的供应点集合; D^p 为第 p 种货物的需求点集合; M 为整个系统所有的地区数; P 为货物种类数。

则下面几种情况均可能产生进基变量:

1. 对 Y_{jl}^k , 若 $j \in S^p, l \in D^p$, 且 X_{jl}^k 为非基变量。
2. 若存在 $Y_{ij}^k > 0$, 则有 $Y_{il}^k = Y_{ij}^k + Y_{jl}^k$ 。如 $i \in S^p, l \in D^p$, 且 X_{il}^k 为非基变量。
3. 若存在 $Y_{if}^k > 0$, 则有 $Y_{jf}^k = Y_{il}^k + Y_{lf}^k$ 。如 $j \in S^p, f \in D^p$, 且 X_{jf}^k 为非基变量。
4. 若有 $Y_{ij}^k > 0$ 及 $Y_{if}^k > 0$, 则有 $Y_{if}^k = Y_{ij}^k + Y_{jl}^k + Y_{lf}^k$ 。如 $i \in S^p, f \in D^p$, 且 X_{if}^k 为非基变量。

对满足以上任一条件的非基变量都可作为进基变量考虑。这是因为, 如果有合适的货运量从这些非基变量表示的线路走, 可以减少空车费用。符合上述 4 个条件的非基变量较多, 设为 m 个, 在确定考虑 m 个非基变量为进基变量的先后顺序时, 根据的是这些非基变量对应的线路上空车费用的大小。优先将空车费用大的非基变量作为进基变量。当然进基变量还需满足 EMOS-1 算法中 1、3 两个条件, 即线路利用率条件及供需平衡条件。

选定进基变量后,在满足供需平衡条件下进行调整时,现有方案中调整为零的基变量即为出基变量。

调整方向及最佳步长的确定同 EMOS-1 算法。

在对某一具体问题仿真优化时,随着方案的不断改进,仿真的输出结果可能由存在剩余周转量转向无剩货情况,这时所选用的优化算法将从 EMOS-1 转到 EMOS-2。

4 EMOS 算法的收敛性

给定一个货物调拨方案 X^i , 相应的仿真响应为 $F(X^i)$ 。

定理 1 EMOS 算法的迭代步骤有限。

证明 设系统有 P 种物资,每一种物资的供应点数 m_i , 需求点数 n_i ($i=1, 2, \dots, P$),

则问题的维数 $N = \sum_{i=1}^P m_i n_i$, 每个分配方案的基变量数 $M = \sum_{i=1}^P (m_i + n_i) - P$ 。

从 N 个变量中取出 M 个变量组成一个基本解 (一个方案), 这样的数目最大可能有

$$\binom{N}{M} = \frac{N!}{M!(N-M)!}$$

因为 $m_i < \infty, n_i < \infty, i=1, 2, \dots, P$, 故 $N < \infty$, 即 $\binom{N}{M} < \infty$, 所以构成系统方案的

数目是有限的。或者说, 算法最多经过 $\binom{N}{M}$ 次迭代搜索后终止。证毕

定理 2 若 X^i 不是最优解, 则以 X^i 为起点, 至少能找到一点 $X^{i+1} = X^i + \lambda^i(w)e^i$ 使 $F(X^{i+1}(w)) < F(X^i(w))$ 。

用反证法, 已知系统的目标函数均为凸的, 设系统的可行域为 R 。

若在 R 上, 不存在点 X^{i+1} 使 $F(X^{i+1}(w)) < F(X^i(w))$ 成立, 即对任一 $X^{i+1} \in R$ 均有 $F(X^{i+1}(w)) \geq F(X^i(w))$, 则

$X^i(w)$ 是一个最优解。显然这与定理中条件相矛盾。故存在一个点 $X^{i+1} \in R$ 使

$$F(X^{i+1}(w)) < F(X^i(w))$$

如果在找到改进点 X^{i+1} 时, 在 X^i 处的 {未探测方向集} $\neq \emptyset$, 则说明还可能存在其他使系统目标改善的点, 所以这样的点可能不止一个。证毕

定理 3 EMOS 算法是收敛的。

证明 显然 DSCT 问题存在可行解, 故系统目标的最优值一定有下界 $\bar{F}(x(w))$ 。

实际上, 对任意 $X \in R$, 均有 $F(X(w)) \geq 0$, 故这个下界可取

$$\bar{F}(X(w)) = 0$$

因此, 通过不断地用 EMOS 迭代寻优, 所产生的解序列 $\{X^i\}$ 是有限的, 即

$$\{X^i\}: X^0, X^1, \dots, X^i, \dots, X^*$$

由定理 2 知, 与解序列 $\{X^i\}$ 相应的系统目标值序列是单调递减有下界的序列, 即

$$F(X^0) > F(X^1) > F(X^2) > \dots > F(X^*(w)) > \bar{F}(X(w))$$

因而这一序列一定有极限存在, 记为 $F(X^*(w))$ 。

此外, R 是一个满足系统各种约束的有界集合, 而 X^i 为 R 内一点, 即 $X^i \in R$, 故而得到

$$X^i \rightarrow X^*$$

证毕

全局收敛性: 迭代算法是由指定的一个起始点开始的, 如果对于任意的一个起始点, 都能保证算法产生一个收敛于解的点列, 则说这算法是全局收敛的。换句话说, 如果从任意的

起始点开始迭代,都能达到系统的最优目标值点,则这算法具有全局收敛性。对 EMOS 算法,不论选用什么样的点为起始点,都将经过有限步的迭代而达到系统的目标最优解,前面定理的证明过程已保证了 EMOS 算法具有全局收敛性。故有

定理 4 EMOS 算法具有全局收敛性。

此外,为了提高优化速度,减少系统运行时间,建立了预先优化模块。在仿真开始前,对各种物资在仅满足供需平衡条件下进行预先优化分配。优化方法是由位势法改进而成的,改进后的位势法能适应多货物分配及不平衡运输问题。实际运行表明,预先优化模块给出的初始点较理想。

5 实例分析

应用在微机上实现的 DSCT 仿真优化系统,研究了某经济区 15 个网点间的综合运输问题。运输方式为铁路、公路、水路 3 种,待运物资有煤炭、石油、钢铁、建材及粮食等 5 种。仿真 2 个月的运输情况,两种不同初始方案的仿真结果及系统进行优化迭代后得到的最优货物调拨方案的结果如表 1 所示。

不同货物调拨方案比较 表 1

货物调拨方案 仿真响应	初 始 方 案		最优方案
	任意给定	预先优化	
剩余货物周转量 (千吨公里)	1 379 875	99 994	2
库存费用 (元)	19 461	1 301	1
缺货损失 (元)	100 003	3 004	2
总费用 (元)	179 341 500	187 847 900	245 869 100
线路平均利用率 (%)	0. 200 8	0. 245 4	0. 305 2

从表 1 中可见,预先优化方案比任意给定方案好得多,前者的剩余货物周转量只有后者的 7.2%。而最优方案能充分协调系统内各种运输工具,全部完成运输任务,不存在剩货,无库存及缺货费用。由于两种初始方案在 2 个月内远未能完成运输任务,故它们的总费用略低于最优方案。

6 结论

本文研究了 DSCT 问题的仿真优化结构、相应的 EMOS 仿真优化算法及其收敛性,并用实例证明了优化结构及算法的有效性。这一研究说明了,对于动态随机多目标仿真优化问题,其仿真结构和优化方法的研究可灵活地根据问题自身的特点进行,往往可以获得更简单有效的结构及算法,而无需遵循某种固定的研究模式。

参考文献

1 林健, 冯允成. 多物流流多运输方式动态随机运输问题的解析模型. 中国流通经济, 1995, 52 (4): 35~39

- 2 Guelat J, Flrian M, Ckainic T G. A multimode mulproduct network assignment model for strategic planning of freight flows. Trans Sci, 1990, 24 (1): 25~39
- 3 Frantzeskakis L F, Powell W B. A successive linear approximation procedure for stochastic, dynamic vehicle allocation problems. Trans Sci, 1990, 24 (1): 40~57
- 4 Laporte G, Nobert Y, Taillefer S. Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems. Trans Sci, 1988, 22 (3): 161~172
- 5 Powell W B. A stochastic model of the dynamic vehicle allocation problem. Trans Sci, 1986, 20 (2): 117~129
- 6 冯允成, 吕春莲. 随机网络及其应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1987
- 7 Pritsker A A B. Introduction to simulation and SLAM. 3rd ed. New york: John Wiley & Sons, 1986
- 8 林健, 冯允成. 动态随机综合运输问题的随机网络模型. 重庆交通学院学报, 1996 (2)

我国铺筑高速公路用进口沥青的历史已经结束

1995年11月24日,交通部组织专家在北京对齐鲁石化公司胜利炼油厂生产的丁苯胶乳改性沥青进行了鉴定。专家们认为:这种沥青经京石高速公路1年的使用考核和江苏、河南、山东等省市多年的应用,证明完全可以用于高等级公路铺筑,其性能、质量已达到国外铺筑高等级公路所用沥青水平。鉴定会确定该产品为替代进口产品。这种沥青的生产,填补了我国公路铺筑材料的一项空白,标志着我国长期依赖进口沥青铺筑高等级公路和机场路面的历史已经结束了。

胜利炼油厂是我国最大的沥青生产基地,年产量达70万吨。长期以来,胜利炼油厂大力研究沥青生产新技术,努力提高产品质量,不断开发沥青新产品,许多牌号的沥青被评为国家和省、部优质产品,并形成了产品系列化。1987年,这个厂的科研人员根据我国各主要油田能直接炼制出高等级路面沥青的原油资源甚少,我国建设高速公路、机场路面所用沥青长期依赖进口的实际和随着国家经济的不断发展,公路交通和航空也将快速发展的形势,对用普通原油生产建设高等级路面沥青进行了专题攻关,他们利用齐鲁公司橡胶厂生产的丁苯胶乳,对本厂生产的沥青进行改性研究,生产出了丁苯橡胶改性沥青,在南京环城公路、北京三环路、京张公路进行应用试验,取得了较好结果。在此基础上,他们又优化了沥青和胶乳对比,将胶乳含量由22%提高到50%左右,提高了应用可靠度。1994年,与北京市公路局联合在京石高速公路对改性沥青路用性能进行考核。该段路面总长13.3公里,双向三车道,日车流量5.3万辆。考核证明,该沥青使用性能良好,各种指标已达到和超过国外铺筑高等级路面沥青,完全可以替代进口产品。“九五”期间,我国规划建设高速公路9000公里,国产丁苯胶乳改性沥青将会发挥重要作用。

山东淄博市胜利炼油厂

张洪礼