铁路超限超重货物运输径路综合优化模型与算法*

汤　波，雷定猷，张英贵
（中南大学 交通运输工程学院，长沙 410075）

摘　要：以铁路超限超重货物运输径路决策为研究对象，结合超限超重货物运输特征，构建了边带属性向量和权重向量的超限超重货物运输网络；综合考虑限界、桥梁承载能力、车流平衡等约束因子，以最小化对正常运输组织的干扰、最小化运输里程和最小化运输费用为优化目标，建立超限超重货物运输径路综合优化模型。为便于模型求解，改进戒上型和戒下型隶属度函数定量表达干扰；在采用对数 Logistic 模式规范化目标函数的基础上构建综合评价函数，将多目标模型转换为单目标模型，并进行了模型一致性证明。设计了启发式径路搜索算法，运用不断修正规范化目标函数权重的实例匹配策略求解模型。实例表明，模型和算法可以快速决策合理的超限超重货物运输径路，满足货物运输的安全要求。

关键词：超限超重货物；运输径路；综合优化模型；隶属度；实例匹配
中图分类号：U294.4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)08-2876-06
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.020

Integrated optimizing model and algorithms of transportation route in out-of-gauge and overweight freights of railway

TANG Bo, LEI Ding-you, ZHANG Ying-gui
(*School of Traffic & Transport Engineering, Central South University, Changsha* 410075, *China*)

Abstract: Through taking transportation route in out-of-gauge and overweight freights of railway as the research object and combining with features of out-of-gauge and overweight freights transportation, this paper bulit the transportation network of out-of-gage and overweight freights with attribute vector and weight vector in arcs. Considered some constraint factors such as section's gauge, bridge bearing capacity, and balance of traffic flow. Then, taking minimizing interference, transportation mileages and transportation costs as objective functions. It put forward an integrated optimizing model of transportation route in out-of-gauge and overweight freights. And it introduced the two membership functions in order to describe interference quantitatively. On the basis of normalized objective functions with Logistic mode, it structured comprehensive evaluation function with the purpose of converting the multi-objective model into a single-objective model and proved the consistency of models. For solving the model, it devised a kind of heuristic algorithm for searching route and adopted cases matching strategy with revising weights of normalized objective functions continually. The instance demonstrates that the model and algorithms can obtain the reasonable transportation route of out-of-gauge and overweight freights quickly, and meet the requirements for transportation safety.

Key words: out-of-gauge and overweight freight; transportation route; integrated optimizing model; grade of membership; matching case

铁路超限超重货物具有笨重、长大和价格昂贵等特征，大都是国家建设的大型设备。超限超重货物运输是高成本、高风险、组织高度复杂的运输，涉及调度、车辆、机务、工务、电务等几乎所有铁路运输部门，特别是超限超重专列运输。与普通货物运输相比，超限超重货物运输条件要求更严格，一些学者对提高超限超重货物运输效率、保证运输安全等方面进行了深入研究。例如文献[1]建立了双目标双容量超限超重货物运输径路模型；文献[2]指出对于铁路网这种超大规模网络的径路决策问题通常采用启发式算法——动态广探算法(DBFS)来提高计算效率；文献[3]给出了适合于铁路管理方式的车流径路制定参照模型及其算法；文献[4]提出了铁路车流径路优化的分布式算法。总体来说，以往针对铁路超限超重货物运输径路的研究强调对运输里程和对正常运输组织的干扰单个目标研究，忽略运输费用；主要考虑限界约束，忽略桥梁承载能力；建立定性的路阻矩阵来描述干扰。目前，笔者正在开发全路铁路限界管理及超限超重货物运输决策支持系统，超限超重货物运输径路决策是系统的核心模块。本文综合考虑铁路限界、桥梁承载能力、车流平衡等约束，对正常运输组织的干扰、运输里程和运输费用进行综合优化，建立超限超重货物运输径路综合优化模型。在借鉴优质启发式径路搜索算法[5~13]的基础上，采用实例匹配策略求解模型，快速确定超限超重货物运输径路。

1　铁路超限超重货物运输径路综合优化问题

《铁路超限超重货物运输规则》(以下简称《超规》)第 30 条规定：超限超重车应经由最短径路运输，但受到建筑限界或其他不利影响时，可指定径路绕道运输。径路决策是超限超重

收稿日期：2012-02-13；**修回日期**：2012-03-28　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(70971140)

作者简介：汤波(1984-)，男，湖南浏阳人，博士，主要研究方向为交通运输营运管理及优化(tb84100122@126.com)；雷定猷(1958-)，男，湖南浏阳人，教授，博导，主要研究方向为特种货物运输、交通运输营运管理及优化等；张英贵(1984-)，男，安徽六安人，博士，主要研究方向为交通运输营运管理及优化.

货物运输调度的关键技术之一。与普通货物运输径路相比,超限超重货物运输径路除了须满足车流平衡和站线能力等约束外,对线路条件有更加严格的要求,主要体现在以下两个方面:

a)限界限制。限界是决定装有超限货物的车辆能否通行及运行条件的基本依据。在直线或曲线线路上,超限货物的任何超限部位必须与实际建筑限界之间保持一定的安全距离。

b)桥梁承载能力限制。《超规》规定:装车后,重车总重活载效应超过桥涵设计标准活载(中—活载)的货物,称为超重货物,即车辆及所装货物的总重(包括装载附件、加固设备)对桥梁的作用超过按照中华人民共和国铁路标准活载设计的桥梁承载能力的货物。《铁路桥梁检定规范》规定:桥梁的承载能力应以桥梁的检定承载系数表示。车辆过桥时,桥上允许通行的运行活载必须小于等于检定承载系数。

在满足上述货物运输安全性要求的条件下,超限超重货物运输径路应尽量达到以下三个目标:

a)对正常运输组织干扰最小。超限超重货物运输在组织上高度复杂,各个环节都需要针对货物特点采取相应措施,如运行中限速、禁会等,严重干扰正常运输组织。超限超重货物运输径路避开繁忙干线和限速、禁会区间,尽量降低对正常运输组织的干扰。

b)运输里程最短。在尽量降低对正常运输组织干扰的前提下,超限超重货物经最短径路运输可缩短货物运送时间。

c)运输费用最低。超限超重货物运输引起的线路改造费用十分昂贵,绕道运输的总费用有时比最短径路运输的总费用要低。降低运输费用可以节约社会资源,提高铁路在货运市场的占有率。

综上所述,铁路超限超重货物运输径路决策是一个以限界、桥梁承载能力等为主要约束,以最小化对正常运输组织的干扰、最小化运输里程和最小化运输费用为目标的多约束、多目标综合优化问题。超限超重货物运输径路综合优化克服了对正常运输组织的干扰、运输里程和运输费用三个单项优化的不足,体现了优化方案的整体性。

2　铁路超限超重货物运输径路综合优化模型

为便于建模,将一条铁路线路两端的车站、不同线路交汇处的车站、各铁路局分界口车站统称为节点,节点之间的路段称为节点路段。以此为基础构建的超限超重货物运输网络记为 $G=(V,E,P,W)$。其中:$V=\{i\mid i=1,2,\cdots,n\}$ 为节点集,n 为节点数量;$E=\{ij\mid i,j=1,2,\cdots,n\}$ 为节点路段集;P 为节点路段的属性集,包括里程、综合最小建筑限界、桥梁检定承载系数、运输密度和通过能力。节点路段 ij 上的总区间数记为 n_{ij}。对于 $\forall ij\in E$ 和 $k=1,2,\cdots,n_{ij}$,d_{ij}^k 表示节点路段 ij 上第 k 个区间的里程;l_{ij}^{k1} 和 l_{ij}^{k2} 分别表示节点路段 ij 上第 k 个区间直线和曲线上的综合最小建筑限界;c_{ij}^{kq} 表示节点路段 ij 的第 k 个区间的第 $q(q=1,2,\cdots,n_{ij}^k)$ 座桥梁的检定承载系数,n_{ij}^k 表示节点路段 ij 的第 k 个区间的桥梁数量,若节点路段 ij 的第 k 个区间无桥梁,规定 $c_{ij}^{kq}=+\infty$;t_{ij}^k 表示节点路段 ij 上第 k 个区间的运输密度;s_{ij}^k 表示节点路段 ij 上第 k 个区间的通过能力。$W=\{w_{ij}=(w_{ij}^1,w_{ij}^2,w_{ij}^3)\mid ij\in E\}$ 为节点路段的权重向量集。其中:w_{ij} 表示节点路段 ij 的权重向量;w_{ij}^1 表示超限超重货物经由节点路段 ij 运输产生的干扰;w_{ij}^2 表示节点路段 ij 的里程;w_{ij}^3 表示超限超重货物经由节点路段 ij 运输产生的费用。记 o 表示发站,d 表示到站,f_{od} 表示从发站 o 至到站 d 的超限超重车流强度。

记超限货物装后在直线和曲线线路上的轮廓分别为 S_1 和 S_2,安全量记为 S',则对 $\forall ij\in E$,有

$$x_{ij}\widetilde{\otimes}(S_p\widetilde{\oplus}S')\preccurlyeq l_{ij}^{kp}\quad k=1,2,\cdots,n_{ij};p=1,2 \tag{1}$$

其中:x_{ij} 为 0-1 变量,若超限超重货物运输径路选择了节点路段 ij,$x_{ij}=1$,否则 $x_{ij}=0$;p 为指示变量;$\widetilde{\otimes}$ 为自定义运算符,若 $x_{ij}=1$,则 $x_{ij}\widetilde{\otimes}(S_p\widetilde{\oplus}S')$ 为 $S_p\widetilde{\oplus}S'$ 所表示的轮廓,否则为描述货物轮廓坐标系的原点;$\widetilde{\oplus}$ 为自定义运算符,$S_p\widetilde{\oplus}S'$ 表示超限货物装后留有安全量的轮廓;$\preccurlyeq$ 为限界比较关系。式(1)表示超限货物装后留有安全量的轮廓不超出运输径路经由区间在直线和曲线上的综合最小建筑限界。

记超限超重车通过节点路段 ij 的第 k 个区间的第 q 座桥梁的运行活载为 Q_{ij}^{kq},则 $\forall ij\in E$,有

$$x_{ij}Q_{ij}^{kq}\leqslant c_{ij}^{kq}\quad k=1,2,\cdots,n_{ij};q=1,2,\cdots,n_{ij}^k \tag{2}$$

对于超限超重货物运输径路而言,发站有流出量无流入量,到站有流入量无流出量,中间站点的流入量和流出量相等。记 $\varphi(i)=\{j\in V\mid ij\in E\}$ 为节点 i 的外邻点集,$\beta(i)=\{j\in V\mid ji\in E\}$ 为节点 i 的内邻点集,则 $\forall ij\in E$,有

$$\sum_{j\in\varphi(i)}x_{ij}-\sum_{j\in\beta(i)}x_{ij}=\begin{cases}1 & i=o\\ 0 & i\neq o,d\\ -1 & i=d\end{cases} \tag{3}$$

对 $\forall ij\in E$,区间通过能力约束可表示为

$$f_{od}x_{ij}+t_{ij}^k\leqslant s_{ij}^k\quad k=1,2,\cdots,n_{ij} \tag{4}$$

记超限超重货物运输径路综合优化模型的解为 x,则 $x=(x_{ij},ij\in E)$。记解空间为 X,则 $x\in X$。在满足式(1)~(4)的前提下,超限超重货物应经对正常运输组织干扰小、里程短、费用低的径路运输。

记 f_{ij}^{kp},$p=1,2,3$ 分别表示超限超重货物经节点路段 ij 的第 k 个区间运输因限速、禁会和运输繁忙产生的干扰。其中:限速越小,f_{ij}^{k1} 越大;f_{ij}^{k3} 与 t_{ij}^k 正相关,t_{ij}^k 等于 s_{ij}^k 时 f_{ij}^{k3} 最大。由 $G=(V,E,P,W)$ 可知 $w_{ij}^1=\sum_{p=1}^{3}\sum_{k=1}^{n_{ij}}f_{ij}^{kp}$。将对正常运输组织的干扰 $f_1(x)$ 最小化为第一优化目标,即

$$\min f_1(x)=\sum_{ij\in E}f_{od}x_{ij}w_{ij}^1=\sum_{ij\in E}f_{od}x_{ij}\sum_{p=1}^{3}\sum_{k=1}^{n_{ij}}f_{ij}^{kp} \tag{5}$$

由 $G=(V,E,P,W)$ 可知 $w_{ij}^2=\sum_{k=1}^{n_{ij}}d_{ij}^k$,将运输里程 $f_2(x)$ 最小化为第二优化目标,即

$$\min f_2(x)=\sum_{ij\in E}f_{od}x_{ij}w_{ij}^2=\sum_{ij\in E}f_{od}x_{ij}\sum_{k=1}^{n_{ij}}d_{ij}^k \tag{6}$$

超限超重货物运输费用构成复杂,本文只考虑受运输径路不同影响的费用,如运费、电气化区段附加费和铁路建设基金等,装载加固费用等不考虑。记 f_{ij}^{kp},$p=4,5,\cdots,8$ 分别表示超限超重货物经节点路段 ij 的第 k 个区间运输产生的运费、货车使用费、电气化区段附加费、铁路建设基金、押运人乘车费。由 $G=(V,E,P,W)$ 可知 $w_{ij}^3=\sum_{p=4}^{8}\sum_{k=1}^{n_{ij}}f_{ij}^{kp}$。将运输费用 $f_3(x)$ 最小化为第三优化目标,即

$$\min f_3(x)=\sum_{ij\in E}f_{od}x_{ij}w_{ij}^3=\sum_{ij\in E}f_{od}x_{ij}\sum_{p=4}^{8}\sum_{k=1}^{n_{ij}}f_{ij}^{kp} \tag{7}$$

由上述分析可得超限超重货物运输径路综合优化模型 M_1:式(1)~(7)。

值得注意的是,模型 M_1 并不一定总是有解。例如,从发站至到站因限界或桥梁承载能力限制不存在径路,只能通过改造线路(设备拆除、桥梁加固等)来确定运输径路。

如果节点路段 ij 的第 k 个区间进行了限界改造,则记改造后的区间在直线和曲线上综合最小建筑限界分别为$\overline{l_{ij}^{k1}}$和$\overline{l_{ij}^{k2}}$;否则$\overline{l_{ij}^{k1}}$和$\overline{l_{ij}^{k2}}$分别为 l_{ij}^{k1} 和 l_{ij}^{k2}。对 $\forall ij \in E$,松弛约束条件式(1)如下:

$$x_{ij} \widetilde{\otimes} (S_p \widetilde{\oplus} S') \preccurlyeq \overline{l_{ij}^{kp}} \quad k=1,2,\cdots,n_{ij};p=1,2 \tag{8}$$

若节点路段 ij 的第 k 个区间的第 q 座桥梁进行了改造,改造后的桥梁检定承载系数记为$\overline{c_{ij}^{kq}}$;否则令$\overline{c_{ij}^{kq}} = c_{ij}^{kq}$。对 $\forall ij \in E$,约束式(2)可松弛为

$$x_{ij} Q_{ij}^{kq} \leqslant \overline{c_{ij}^{kq}} \quad k=1,2,\cdots,n_{ij};q=1,2,\cdots,n_{ij}^{k} \tag{9}$$

记节点路段 ij 的第 k 个区间的改造费用为f_{ij}^{k9},则第三优化目标函数式(7)可扩展为

$$\min f_3(x) = \sum_{ij \in E} f_{od} x_{ij} \sum_{p=4}^{9} \sum_{k=1}^{n_{ij}} f_{ij}^{kp} \tag{10}$$

约束条件和目标函数扩展后,模型 M_1 转换为模型 M_2:式(3)~(6)(8)~(10)。当模型 M_1 可行时,模型 M_2 也可行,反之不然。当模型 M_2 不可行时,说明该超限超重货物无法经由铁路运输,或者还需要进行更大规模的线路改造,如对不可拆卸的控制物进行拆除。

M_2 属于多目标规划模型,不同量纲使得三个目标无法直接进行比较。典型的情况是赋予数值较大目标稍大权值即可抵消数值较小目标,以致数值较小目标无法在问题中发挥作用。考虑到$f_k(x)$的最大值和最小值未知且不易获得,采用对数 Logistic 模式对$f_k(x)$进行规范化处理,$k=1,2,3$。

$$\gamma_k(x) = \frac{1}{1+\mathrm{e}^{-f_k(x)}} \quad k=1,2,3 \tag{11}$$

其中:$\gamma_k(x)$为$f_k(x)$的规范化形式,$k=1,2,3$。

构建规范化目标函数的加权综合评价函数,将多目标模型转换为单目标模型。

$$\min u(\gamma(x)) = \sum_{k=1}^{3} \omega_k \gamma_k(x) \tag{12}$$

其中:$u(\gamma(x))$为加权综合评价函数;$\gamma(x) = (\gamma_1(x), \gamma_2(x), \gamma_3(x))$;$\omega_k$ 为规范化目标函数的权系数,$\omega_k > 0$。

构建加权综合评价函数后,模型 M_2 由多目标模型转换为单目标模型 M_3:式(3)(4)(8)(9)(12)。

3 模型进一步处理

3.1 目标函数定量表达

在模型的目标函数中,运输里程和运输费用都可以定量表达,对正常运输组织的干扰属于定性指标。为便于问题解决,对干扰目标函数进行定量化处理。在模糊控制论中,研究对象具有模糊性和经验性。模糊变量语言的定量描述由隶属度函数确定,隶属度函数实质上反映了事物的渐变性。

1)戒上型隶属度函数[14]

$$\mu(\tilde{x}) = \begin{cases} 1 & \tilde{x} \leqslant c \\ \dfrac{1}{1+[a(\tilde{x}-c)]^b} & \tilde{x} > c \end{cases} \tag{13}$$

其中:$a>0, b>0, c>0$。

2)戒下型隶属度函数[14]

$$\eta(\tilde{x}) = \begin{cases} 0 & \tilde{x} < c' \\ \dfrac{1}{1+[a'(\tilde{x}-c')]^{b'}} & \tilde{x} \geqslant c' \end{cases} \tag{14}$$

其中:$a'>0, b'<0, c' \geqslant 0$。

上述戒上型和戒下型隶属度函数的值域为[0,1],用这个区间的值来度量干扰区分不明显。引入参数 g,对戒上型和戒下型隶属度函数进行改进,使得函数的值域为[0,g],增强函数的实用性。

1)改进的戒上型隶属度函数

$$\overline{\mu(\tilde{x})} = \begin{cases} g & \tilde{x} \leqslant c \\ \dfrac{g}{1+[a(\tilde{x}-c)]^b} & \tilde{x} > c \end{cases} \tag{15}$$

其中:$a>0, b>0, c>0, g>0$。

2)改进的戒下型隶属度函数

$$\overline{\eta(\tilde{x})} = \begin{cases} 0 & \tilde{x} < c' \\ \dfrac{g}{1+[a'(\tilde{x}-c')]^{b'}} & \tilde{x} \geqslant c' \end{cases} \tag{16}$$

其中:$a'>0, b'<0, c' \geqslant 0, g>0$。

约定干扰度量区间为[0,g]。超限超重车禁会将导致区间其他运输任务停止,对正常运输组织的干扰最大,规定$f_{ij}^{k2} = g$。节点路段 ij 第 k 个区间的允许最大速度记为 $v_{ij}^{k,\max}$。超限超重车在节点路段 ij 第 k 个区间的最小限速记为 $v_{ij}^{k,\min}$,实际运行速度为 v_{ij}^{k}。v_{ij}^{k}越小,干扰越严重,以 $v_{ij}^{k,\min}$运行干扰最大,以 $v_{ij}^{k,\max}$或接近 $v_{ij}^{k,\max}$运行,对正常运输组织的干扰忽略不计。结合改进的戒上型隶属度函数,依据f_{ij}^{k1}随 v_{ij}^{k}变化的趋势,参数 c 取 $v_{ij}^{\min}$,f_{ij}^{k1}可表示为

$$f_{ij}^{k1} = \begin{cases} g & v_{ij}^{k} < v_{ij}^{k,\min} \\ \dfrac{g}{1+[a(v_{ij}^{k}-v_{ij}^{k,\min})]^b} & v_{ij}^{k,\min} \leqslant v_{ij}^{k} \leqslant v_{ij}^{k,\max} \end{cases} \tag{17}$$

其中:$a>0, b>0, g>0$。

超限超重货物经节点路段 ij 的第 k 个区间运输因正常运输繁忙产生的干扰f_{ij}^{k3}与 t_{ij}^{k}和 s_{ij}^{k}有关。若 $t_{ij}^{k}=0$,则 $f_{ij}^{k3}=0$,t_{ij}^{k}越接近 s_{ij}^{k},f_{ij}^{k3}越大。结合改进的戒下型隶属度函数,依据f_{ij}^{k3}随 t_{ij}^{k}变化的趋势,参数 c'取 0,f_{ij}^{k3}可表示为

$$f_{ij}^{k3} = \begin{cases} 0 & t_{ij}^{k} < 0 \\ \dfrac{g}{1+(a' t_{ij}^{k})^{b'}} & 0 \leqslant t_{ij}^{k} \leqslant s_{ij}^{k} \end{cases} \tag{18}$$

其中:$a'>0, b'<0, g>0$。

3.2 模型一致性证明

本节将证明由模型 M_3 得到的解,或者是模型 M_2 的绝对最优解,或者是模型 M_2 的弱有效解。

证明 记 x_k^* 分别为$f_k(x)$,$k=1,2,3$ 在 X 上的最优解,x^* 为 M_3 的最优解,即 $\forall x \in X$,有

$$f_k(x_k^*) \leqslant f_k(x) \quad k=1,2,3 \tag{19}$$

$$u(\gamma(x^*)) \leqslant u(\gamma(x)) \tag{20}$$

对 $\gamma_k(x)$的$f_k(x)$求导,有

$$\frac{\mathrm{d}\gamma_k(x)}{\mathrm{d}f_k(x)} = \frac{\mathrm{e}^{f_k(x)}}{(1+\mathrm{e}^{f_k(x)})} > 0 \quad k=1,2,3 \tag{21}$$

由式(21)可知 $\gamma_k(x)$是关于$f_k(x)$的单调递增函数,结合式(19),有

$$\gamma_k(x_k^*) = \frac{1}{1+\mathrm{e}^{-f_k(x_k^*)}} \leqslant \frac{1}{1+\mathrm{e}^{-f_k(x)}} = \gamma_k(x), \forall x \in X; k=1,2,3 \tag{22}$$

由式(11)可得

$$f_k(x)=\ln\frac{\gamma_k(x)}{1-\gamma_k(x)}\quad k=1,2,3 \tag{23}$$

a)若 $x^*=x_1^*=x_2^*=x_3^*$,由式(23)可知,对 $\forall x\in X$,有

$$f_k(x^*)=f_k(x_k^*)=\ln\frac{\gamma_k(x_k^*)}{1-\gamma_k(x_k^*)}\quad k=1,2,3 \tag{24}$$

令 $\overline{\gamma_k(x)}=\dfrac{\gamma_k(x)}{1-\gamma_k(x)}$,对 $\overline{\gamma_k(x)}$ 的 $\gamma_k(x)$ 求导,有

$$\frac{\mathrm{d}\,\overline{\gamma_k(x)}}{\mathrm{d}\gamma_k(x)}=\frac{1}{(1-\gamma_k(x))^2}>0\quad k=1,2,3 \tag{25}$$

因此,$\overline{\gamma_k(x)}$ 是关于 $\gamma_k(x)$ 的单调递增函数,结合式(22)有

$$\frac{\gamma_k(x_k^*)}{1-\gamma_k(x_k^*)}=\overline{\gamma_k(x_k^*)}\leqslant\overline{\gamma_k(x)}=\frac{\gamma_k(x)}{1-\gamma_k(x)},\ \forall x\in X\quad k=1,2,3 \tag{26}$$

由式(23)(24)和(26)可得

$$f_k(x^*)=\ln\frac{\gamma_k(x_k^*)}{1-\gamma_k(x_k^*)}\leqslant\ln\frac{\gamma_k(x)}{1-\gamma_k(x)}=f_k(x)\quad k=1,2,3 \tag{27}$$

由式(27)可知,$x^*=x_1^*=x_2^*=x_3^*$ 是 M_2 的绝对最优解。

b)若 x_1^*、x_2^*、x_3^* 不全相同,假设 x^* 不是模型 M_2 的弱有效解,则由弱有效解的定义可知,存在 $x'\in X$ 使

$$f_k(x')<f_k(x^*)\quad k=1,2,3 \tag{28}$$

由式(28)及 $\gamma_k(x)$ 是关于 $f_k(x)$ 的单调递增函数可知

$$\gamma_k(x')<\gamma_k(x^*)\quad k=1,2,3 \tag{29}$$

由式(29)可得

$$\omega_k\gamma_k(x')<\omega_k\gamma_k(x^*)\quad k=1,2,3 \tag{30}$$

由式(30)可得

$$\sum_{k=1}^{3}\omega_k\gamma_k(x')<\sum_{k=1}^{3}\omega_k\gamma_k(x^*) \tag{31}$$

式(31)也可以表示为

$$u(\gamma(x'))<u(\gamma(x^*)) \tag{32}$$

式(32)与式(20)矛盾,假设不成立。因此,x^* 是模型 M_2 的弱有效解。

证毕。

4　模型求解

4.1　实例匹配决策

在实际工作中,超限超重货物发、到站相对固定或者在同一区段或枢纽。对于新的超限超重货物可以遵守规章并结合过去的经验来决策其运输径路。首先查找承运货物是否有历史运输记录,若没有,再查找类似货物是否有历史运输记录,它们走怎样的运输径路,这些径路可以作为标准来评判求解模型得到的运输径路是否可以接受。笔者有近 10 年来铁道部和部分路局的批复电报及部分专列运输方案,是多年积累下来的历史资料。以这些成功案例为基础数据,建立超限超重货物运输径路实例库,通过相同或相似货物的运输径路来评估求解模型获得的径路。

定义 1　实例。实例是指过去已安全运输过的超限超重货物基本数据与运输径路,是超限超重运输组织者经验知识的总结。

定义 2　实例库。实例库是所有实例的集合,即保存在数据库中所有超限超重货物基本数据及相应的运输径路。

定义 3　匹配实例。与新货物的发、到站,以及超限程度和超重程度相同或相似的实例。通过以下三个条件进行判断:

a)发、到站属于同一区段或同一枢纽。

b)中心高差小于 40 mm,超限货物的上部、中部、下部与国标的距离差小于 20 mm。

c)重车总重差小于 10 t。

超限超重货物运输径路综合优化模型的实例匹配决策过程如下:

a)确定匹配实例。给定目标 f_k 允许偏差量 Δ_k,$k=1,2,3$;记 $\bar{x}$ 为当前最好解,置初始 $\bar{x}$ 为任取一个匹配实例对应的解;记 R 为最大循环次数。

b)按照式(11)将目标函数 $f_k(x)$,$k=1,2,3$ 进行规范化处理,得到规范化目标函数 $\gamma_k(x)$,$k=1,2,3$。给定模型 M_3 的初始权系数 $\omega_k\geqslant 0$,$k=1,2,3$;令 $r=1$。

c)求解模型 M_3(求解模型 M_3 的径路搜索算法在 4.2 节给出)得到解 x^r。若循环若干次后 x^r 保持不变或者 $r>R$,则输出 $\bar{x}$ 为所求满意解,决策结束;否则进行步骤 d)。

d)满意性判断。计算 $f_k(x^r)$,将其与匹配实例的均值 $\overline{f_k}$ 进行比较,若 $\left|\dfrac{f_k(x^r)-\overline{f_k}}{\overline{f_k}}\right|\leqslant\Delta_k$,$k=1,2,3$,转步骤 g);否则,转步骤 e)。

e)修正不满足允许偏差量目标的权系数。记不满足允许偏差量的目标为 $f_k(x)$,$k=k_1^r,\cdots,k_{s_r}^r$,$1\leqslant s_r\leqslant 3$。令 $v_k^r=f_k(x^r)-\overline{f_k}$,$k=k_1^r,\cdots,k_{s_r}^r$,计算

$$\omega_k^r=v_k^r/\sum_{k=k_1^r}^{k_{s_r}^r}v_k^r\quad k=k_1^r,\cdots,k_{s_r}^r \tag{33}$$

f)更新当前最好解。

若 $u(\gamma(x^r))<u(\gamma(\bar{x}))$ 成立,置当前解 x^r 为当前最好解 $\bar{x}$,转步骤 h);

若 $u(\gamma(x^r))=u(\gamma(\bar{x}))$ 成立,以概率 0.5 接受当前解 x^r 为当前最好解 $\bar{x}$,转步骤 h);

若 $u(\gamma(x^r))>>u(\gamma(\bar{x}))$ 成立,当前最好解 $\bar{x}$ 保持不变,转步骤 h);

若 $u(\gamma(x^r))>u(\gamma(\bar{x}))$ 成立且 $u(\gamma(x^r))>>u(\gamma(\bar{x}))$ 不成立,以概率 $\exp(u(\gamma(\bar{x}))-u(\gamma(x^r)))$ 接受当前解 x^r 为当前最好解 $\bar{x}$,即若 $\mathrm{random}[0,1]<\exp(u(\gamma(\bar{x}))-u(\gamma(x^r)))$,接受当前解 x^r 为当前最好解 $\bar{x}$,转步骤 h)。

g)输出满意解。若 $u(\gamma(x^r))<u(\gamma(\bar{x}))$,置当前解 x^r 为当前最好解 $\bar{x}$;否则,当前最好解 $\bar{x}$ 不变。输出 $\bar{x}$ 为所求满意解,决策结束。

h)更新模型 M_3。令 $\omega_k=\omega_k^r$,$k=k_1^r,\cdots,k_{s_r}^r$,其余 ω_k 保持不变,更新后的模型仍记为 M_3。$r\leftarrow r+1$,转步骤 c)。

4.2　径路搜索算法

4.1 节已经给出了超限超重货物运输径路综合优化的实例匹配决策过程,其中有一个重要问题尚未解决:求解模型 M_3。模型 M_3 实质上是最短路问题。文献[2]指出铁路车流径路问题应采用动态广探算法(DBFS)进行求解。DBFS 是启发式方法,典型的是 A* 算法。A* 算法的核心是对问题中所含的启发信息进行正确分析判断和充分挖掘,抓住问题的关键特征,得出估计节点价值的算式或算法。估计节点价值的算式或算法是 A* 算法的关键。根据超限超重货物运输安全特征,结合模型 M_3,设计节点价值估计函数 $f(i)$。对于 $\forall i\in V$,有

$$f(i) = g(i) + h(i) \tag{34}$$

其中:$g(i)$表示从起始节点 o 到当前节点 i 的实际径路耗散值;$h(i)$表示当前节点 i 到目标节点 d 的最优径路估计耗散值,$h(i)$称为启发函数。

根据两点之间直线段最短的原理,对于$\forall i \in V$,令

$$h(i) = \bar{f}(ld_{id}) \tag{35}$$

其中:$ld_{id} = \sqrt{(x_i - x_d)^2 + (y_i - y_d)^2}$表示节点 i 与目标节点 d 的直线距离;(x_i, y_i)为节点 i 的地理坐标;(x_d, y_d)为目标节点 d 的地理坐标;$\bar{f}(ld_{id})$表示里程为 ld_{id} 的运输径路的总耗散值,包括运输里程、干扰和运输费用。其中干扰的计算与运输组织方式有关,改造费用与限界有关。根据直线距离 ld_{id} 无法计算这两项指标,估计下界也是一个十分困难的事情。因此,计算 $\bar{f}(ld_{id})$的过程中忽略干扰和改造费用。由式(35)可知:

$$h(j) + \bar{f}(ld_{ij}) = \bar{f}(ld_{jd}) + \bar{f}(ld_{ij}) = \bar{f}(ld_{jd} + ld_{ij}) \geqslant \bar{f}(ld_{id}) = h(i) \tag{36}$$

由式(36)和文献[15]中定义 4-3 可知,由式(35)确定的启发函数$h(i)$满足单调限制;由文献[15]中定理 4-3 可知,$g(i)$为从起始节点 o 到节点 i 的最优径路耗散值。

基于上述的节点价值估计函数设计超限超重货物运输径路搜索算法。

算法 1 超限超重货物运输径路搜索算法

输入:$G = (V, E, P, W)$、S_1、S_2、S'、Q、o、d、f_{od}、ω_k,$k = 1, 2, 3$。

输出:超限超重货物运输径路。

a)建立一个只含有起始节点 o 的搜索树 T,T 中边的方向由子节点(扩展节点的后继节点)指向父节点(扩展节点)。建立一个未扩展节点表 open,将起始节点 o 置于其中。open 表中的节点按 f 值由小到大排序。

b)建立扩展节点表 closed,初始置为空。

c)若 open 为空,则输出未找到最优径路;否则,转下一步。

d)选择 open 表上的第一个节点(f 值最小的节点),将其从 open 表转移至 closed 表。若存在若干个 f 值最小且相同的节点,为了保证搜索能尽量朝着目标节点的方向进行,选择起始节点到当前节点的矢量方向和当前节点到目标节点的矢量方向夹角最小的节点。记此节点为节点 i。

e)若节点 i 为目标节点 d,则输出最优径路并退出。此径路可在搜索树 T 由目标节点 d 回溯至起始节点 o。

f)若节点 i 不为目标节点 d,生成节点 i 的后继节点集合 $\psi(i)$,令 $\psi(i) = \varnothing$。生成 $\psi(i)$实质上是确定超限超重货物可通行节点路段集合。为了提高效率,更好地利用超限超重货物运输径路实例库,记节点路段 ij 安全运输过的超限货物装后在直线和曲线上的最大综合轮廓分别为 $S_{1,ij}^{\max}$和 $S_{2,ij}^{\max}$,安全通过节点路段 ij 的超重车的最大运行活载为 $Q_{ij}^{\max}$,$ij \in E$。

(a)限界约束判断。

①对于节点 i 和 $\forall j \in \varphi(i)$,若 $S_p \not\prec S_{p,ij}^{\max}$,$p = 1, 2$ 成立,$\psi(i) \leftarrow \psi(i) \cup j$;否则,跳过节点 j。若 $\psi(i) = \varphi(i)$,转步骤(b);否则,转②。

②对于节点 i 和 $\forall j \in \varphi(i) - \psi(i)$,若式(1)成立,$\psi(i) \leftarrow \psi(i) \cup j$;否则,检查区间的控制设备是否可拆卸。若存在可拆卸的控制设备,改造相应可拆卸控制设备并记录改造费用;否则,跳过节点 j。改造完成后运用判别式(1)的方法判别式(8)是否成立,直到货物可通行或者所有的可拆卸设备都已改造。

若 $\psi(i) = \varnothing$,转步骤 g);否则,转步骤(b)。

(b)桥梁承载能力约束判断。

①令集合$\overline{\psi(i)} = \varnothing$。对于节点 i 和 $\forall j \in \psi(i)$,若 $Q_{ij}^{kq} \leqslant Q_{ij}^{\max}$,$k = 1, 2, \cdots, n_{ij}$,$q = 1, 2, \cdots, n_{ij}^k$成立,将节点 j 加入到$\overline{\psi(i)}$;否则,跳过节点 j。若$\overline{\psi(i)} = \psi(i)$,转步骤(c);否则,转②。

②对于节点 i 和 $\forall j \in \psi(i) - \overline{\psi(i)}$,若式(2)成立,保持节点 j 在 $\psi(i)$不变;否则,对不满足承载要求的桥梁进行加固改造后判别式(9)是否成立。若式(9)成立,保持节点 j 在 $\psi(i)$不变并记录桥梁改造费用;否则,$\psi(i) \leftarrow \psi(i) - j$。

若 $\psi(i) = \varnothing$,转步骤 g);否则,转步骤(c)。

(c)对于节点 i 和 $\forall j \in \psi(i)$,若式(4)成立,保持节点 j 在 $\psi(i)$不变;否则,$\psi(i) \leftarrow \psi(i) - j$。

若 $\psi(i) = \varnothing$,转步骤 g);否则,转步骤 h)。

g)返回到节点 i 的父节点,删除节点 i 及其与之相关联的边,令父节点为节点 i,返回步骤 e);否则,转步骤 h)。

h)将 $\psi(i)$中的节点(未进入过 open 表或 closed 表的节点)作为 i 的后继节点添加到搜索树 T 中。设置 $\psi(i)$中的成员指向节点 i 的指针。把 $\psi(i)$中的节点成员加入 open 表并计算 f 值。

i)按照 f 值重排 open 表,转步骤 c)。

5 实例

根据本文提出的模型和算法,开发了超限超重货物运输径路决策支持系统。现有国家电网公司实施的重点工程所需电抗器 1 台,采用铁路组专列方式进行运输,发站为南宁南站,到站为长沙东站,件重 284 t,外形尺寸为 10230 × 3920 × 4970 mm,重心位置纵向不偏心,横向偏离几何中心线 30 mm,重心高度为 2160 mm。电抗器使用 D26B 型 290 t 落下孔车装载,装后数据如表 1 所示;装后轮廓如图 1 所示。

表 1 货物装后数据

次序	距轨面高度/mm	货物及车辆半宽/mm	通过 300 m 曲线半径时计算半宽/mm
中心高	5 250	450	717
一侧高	4 960	1 540	1 807
二侧高	4 775	1 690	1 957
三侧高	4 740	1 715	1 982
四侧高	4 700 ~ 4 460	1 724	1 991
五侧高	4 460 ~ 4 240	1 750	2 017
六侧高	4 240	1 852	2 119
七侧高	3 950 ~ 2 550	1 990	2 257
八侧高	2 550 ~ 1 750	2 050	2 079
九侧高	1 750 ~ 1 280	1 990	2 257
十侧高	1 280 ~ 360	1 750	2 017
十一侧高	250	1 607	1 874
备注	表中尺寸未衔接处均为斜坡形连接,表中高度及宽度尺寸包含了 30 mm 裕量。其中八侧高 2 550 ~ 1 750 mm 处为车辆心盘梁		
重车重心高/mm	2 095	区间限制速度/km/h	50
超限等级	超级超限	超重等级	二级超重

g、a、b、a'、b'分别取值 1000、0.03、2、0.0035、-5;初始权重 ω_k,$k = 1, 2, 3$ 分别取 0.5、0.3、0.2;解不变的迭代次数取 10 次;允许偏差量 Δ_k 取 10%,$k = 1, 2, 3$。

综合优化径路全长 986 km,途经湘桂线和京广线,跨南宁和广州两个铁路局。若区间蓝家村—滩头湾、黄土井—紫溪、幽兰—黄冕和高溪市—黄阳司不进行改造,因永州—娄底线路限界限制,将从洛满—牙屯堡—怀化—娄底—株洲北绕行。考

虑到实际工作的需要,可将综合优化径路作为主选径路,将绕行径路作为备选径路。

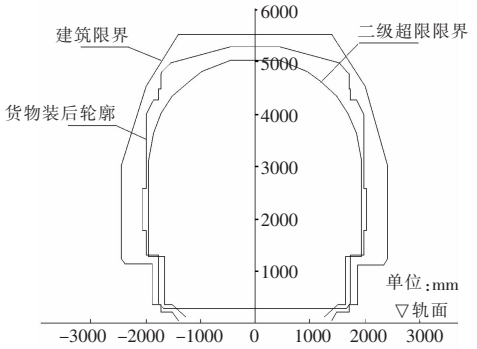

图 1　货物装后轮廓

径路比较结果如表 2 所示。与绕行径路相比,综合优化径路经由的区间数更少,总运输里程缩短了 14.48%,总运输费用减少了 18.66%,总干扰度量降低了 12.59%。

表 2　径路比较

径路	经由区间数量	总干扰度量	总运输里程/km	总运输费用/元
综合优化径路	110	112 970.02	986	97 205.35
绕行径路	126	129 240.44	1 153	119 510.10

区间稔竹—黎塘、来宾—凤凰、白山—进德、幽兰—黄冕和田心铺—才湾限速 15 km/h;区间黎塘—和吉村、和吉村—小平阳、小平阳—平塘、大溪河—横山、永岁—夏马、黄土井—紫溪、黄阳司—水口桥和南河岭—万福岭限速 25 km/h;其他区间限速 50 km/h,无禁会区间。

6　结束语

径路决策是超限超重货物运输调度的核心内容之一。综合考虑对正常运输组织的干扰、运输里程和运输费用体现了优化方案的整体性。目标函数的定量表达有利于问题的求解,模型一致性证明保证了解的有效性,实例匹配策略体现了优化方案的灵活性,实例表明了模型和算法的有效性。以本文提出的模型和算法为基础开发的铁路超限超重货物运输径路决策支持系统可实现全路超限超重货物运输组织的全程网上办公。

参考文献:

[1] 雷定猷. 货物装运优化理论与应用研究[D]. 长沙:中南大学,2005.

[2] 胡思继. 铁路行车组织[M]. 2 版. 北京:中国铁道出版社,2009:114-117.

[3] 江南,李夏苗,朱永辉,等. 论铁路车流径路的数学问题[J]. 中国铁道科学,2004,25(5):121-124.

[4] 农静,季令,叶玉玲,等. 铁路车流径路优化分布式算法[J]. 中国铁道科学,2008,29(3):115-121.

[5] 杨瑞臣,周永付,云庆厦. 寻找车辆最优路径的混合算法[J]. 交通运输工程学报,2005,5(1):102-105.

[6] 邓亚娟,陈小鸿,杨超. 需求不确定的枢纽辐射式航线网络设计[J]. 交通运输工程学报,2009,9(6):69-74,79.

[7] 祁文祥,陆志强,孙小明. 带软时间窗的集货与送货多车辆路径问题节约算法[J]. 交通运输工程学报,2010,10(2):99-103,109.

[8] 徐肖豪,李成功,赵巍飞,等. 基于人工势场算法的改航路径规划[J]. 交通运输工程学报,2009,9(6):64-68.

[9] 彭松,贾阳. 月球车全局路径规划中的 A* 算法改进[J]. 航天器工程,2010,19(4):80-85.

[10] 符卓,聂靖. 求解带装载能力限制的开放式车辆路径问题的遗传算法[J]. 系统工程,2008,26(2):78-83.

[11] WASSAN N A, WASSAN A H, NAYG G. A reactive tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2008, 15(4):358-368.

[12] FALLAHI A E, PRINS C, CALVO R W. A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2008, 35(5):1725-1741.

[13] BRANDAO J, EGLESE R. A deterministic tabu search algorithm for the capacitated arc routing problem[J]. Computers and Operations, 2008, 35(4):1112-1126.

[14] 王季方,卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法[J]. 河南科学,2000,18(4):348-351.

[15] 王士同,陈剑夫. 人工智能中的模糊启发式搜索技术[M]. 北京:机械工业出版社,1993:35-54.