DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.03.007

文章编号:1005-0523(2015)03-0006-06

铁路空车调配问题的区间线性规划模型及算法

曲思源

(上海铁路局运输处,上海 200071)

摘要:铁路空车调配问题是合理解决空车需求与供应之间的不平衡问题。在借鉴空车调配问题模型已有成果的基础上,围绕空车供应与需求量的不确定性、空车调配的时效性、路段通过能力的限制性3个方面,对区间数运用于空车调配问题加以适应性分析,以空车总走行公里最少和到达时间满足空车需求限定时间可信度加权和最大为目标,提出利用线性区间规划理论解决空车调配问题的模型和算法,并结合算例验证了区间规划的灵活性和简便性,使得空车调整模型符合运输生产实际并具有普遍意义,该模型的采用对路网上空车调整问题将起到很好的借鉴作用。

关键词:铁路运输;区间规划;空车调配;模型

中图分类号:U292.45 **文献标志码:**A

铁路空车调配问题是合理解决空车需求与供应之间的不平衡问题。受路网规模庞大和涉及因素复杂等影响,长期以来空车调配一直是理论研究上的难点。许多学者针对这一问题展开研究,构建了一系列模型及算法,成效显著。分析目前该领域的研究工作主要有如下特点:可将空车调配问题分为静态和动态优化两种类型,静态调配研究通常以空车走行公里或运输费用最小化为目标构建模型获得路网供需节点间的空车最优分配方案。前提是不考虑随机变化,假设一段时期内的空车供需情况是稳定的。静态调配模型大多作为简单的运输问题处理,研究方法包括传统运输问题方法以及现代启发式方法包括遗传、蚁群、粒子群法等[1-4]。动态优化使得模型进一步符合空车调配的运输组织实际,主要表现在运输时间、空车供给量和需求量以及路段通过能力等方面具有随机特征。文献[5]提出了基于时间约束的空车调配模型和求解算法;文献[6]考虑到路网运输能力限制,采取了迭代算法进行分步优化;文献[7]引入随机规划理论研究了铁路空车调配的随机性。同时,文献[8]引入“时间窗”约束条件,文献[9]利用模糊数学隶属度函数提出货主满意度,使得空车调整向装车站的配空时机方向扩展。然而,利用区间规划理论研究空车调配问题较少。本研究在前人学者研究成果的基础上,针对铁路空车调配运输过程中的不确定性和动态性等因素,构建基于区间规划的空车调整模型,体现出区间规划灵活以及简便的求解特征,以便为空车调配问题提供新的思路和方法。

1 区间数运用空车调配问题的适应性分析

1.1 空车供求的不确定性

空车调配确定性模型往往都是假设卸车站的空车数、装车站需要的空车数是确定的,实际上每天卸车站产生的空车数由于作业车延误、扣修车辆和到达货车信息不准确等不确定性因素,装车站由于路网意外情况导致的停限装、货主需求不同和资金等不确定性因素影响,需要对确定性模型进行改进[7]。也就是说,空车供应和需求量均存在着不确定因素。目前的不确定系统优化问题比较成熟的模型有随机与模糊数学规划方法。随机规划问题中,以一定的概率满足运输需求,并假定空车数据服从某些分布的随机变量,要

收稿日期: 2014-11-14

作者简介: 曲思源(1972—),男,高级工程师,博士,研究方向为交通运输规划与管理。

求系数的分布函数为已知;而模糊规划问题要求知道系数的隶属度函数。在实际问题中,分布函数与隶属度函数并不总是容易得到。很多情况下,数学规划问题的系数在某个区间内变化范围是容易知道的。在空车调配过程中,空车供应数和需求数可描述为区间数,不确定系统用区间规划的模型描述与求解会变得简单实用,同时也符合实际需要。

1.2　路段通过能力限制

一般而言,空车在调配过程中要按照最短径路运送,而且在同一路段不准许空车对流,这样空车从卸车站到装车站的单位走行公里是确定值,以保证正常的运输秩序。但是,空车在运送过程中,经常受径路上的路段通过能力限制,路段通过能力限制(比如施工、设备故障等情况影响)主要体现在运送的空车流量方面无法达到该路段的空车容量。在考虑空车调配模型过程中,路段通过能力限制不能忽视。此时,需要采取车流迂回径路的调整方式,其前提是不影响迂回径路正常的运输秩序。这种现象在调度指挥过程中经常遇到。调度员在做计划的过程中,要事先考虑路段限制情况,再分配给该路段限制通过空车数量,路段限制能力是空车调配模型的主要约束条件之一。

1.3　空车到达实效性

为了操作上的方便,目前各铁路局使用的空车调配方法,一般都淡化了车流的时效性,而采用比较笼统的方法。随着各种交通方式竞争的激烈和现代物流理论的发展,货主对铁路空车按时到达装车站的时间要求越来越高。只有在规定时间内到达的空车才会使货物得到及时装运。因此,在运输组织的实际过程中,不考虑时效性的空车调配会带来不良后果:一是造成了货源流失,站点的计划货源由于无车可装而转向其他运输方式;二是造成了装车站装车资源的浪费,而其它装车站装车资源匮乏。这样,建立空车送达时间表就显得尤为重要,这也是提高铁路运输服务质量的表现。在空车运送过程中,受各种变化的运输环境影响,调度员要做好列车运行计划调整,通过阶段计划不断地将空车到达装车站时间精确,运送时间是一个区间数就显得更为合理。因此,在空车调配过程中,空车从卸车站到达装车站的时间可用区间数表示,具有一定的不确定性,符合实际需要,同时要规定装车站送达限制时间。

综上,在空车调配过程中,还需要考虑各种随机和干扰因素,可将这些因素初步划归为区间数处理,而区间数的两端取值根据这些因素的影响而变化,通过取值的不同表现出各种因素的变化。

2　区间线性规划基本理论

2.1　区间数定义

参考文献[10],给出定义1—定义3。

用一个带有上标I的量表示一个区间量,例如 $a^{\mathrm{I}}=\left[a^-,a^+\right]$,其中 a^-、a^+ 分别表示区间量的左右端点。实数 a 可以看做区间量 $a=\left[a,a\right]$,此时 $a^-=a=a^+$。为便于比较,将实数称为一元数。

对于区间数 $A^{\mathrm{I}}=\left[a^-,a^+\right]$,$B^{\mathrm{I}}=\left[b^-,b^+\right]$:

定义1

$$\left[a^-,a^+\right]+\left[b^-,b^+\right]=\left[a^-+b^-,a^++b^+\right]$$

$$\left[a^-,a^+\right]-\left[b^-,b^+\right]=\left[a^--b^+,a^+-b^-\right]$$

$$r\left[a^-,a^+\right]=\begin{cases}\left[ra^-,ra^+\right] & r\geqslant 0\\ \left[ra^+,ra^-\right] & r<0\end{cases}\quad r\in R$$

$$\left[a^-,a^+\right]\left[b^-,b^+\right]=\left[\min\left(a^-b^-,a^-b^+,a^+b^-,a^+b^+\right),\max\left(a^-b^-,a^-b^+,a^+b^-,a^+b^+\right)\right]$$

定义2

$$\left[a^-,a^+\right]\leqslant\left[b^-,b^+\right]\Leftrightarrow a^-\leqslant b^-,a^+\leqslant b^+$$

$$\left[a^-,a^+\right]<\left[b^-,b^+\right]\Leftrightarrow\left[a^-,a^+\right]\leqslant\left[b^-,b^+\right]且\left[a^-,a^+\right]\neq\left[b^-,b^+\right]$$

定义3

记 $len\left(A^{\mathrm{I}}\right)=a^+-a^-$ ，$len\left(B^{\mathrm{I}}\right)=b^+-b^-$ 称为区间数的长度，则称

$$P\left(A^{\mathrm{I}}\leqslant B^{\mathrm{I}}\right)=\frac{\max\left[0,len(A^{\mathrm{I}})+len(B^{\mathrm{I}})-\max\left(0,a^+-b^-\right)\right]}{len(A^{\mathrm{I}})+len(B^{\mathrm{I}})}$$

为 $A\leqslant B$ 的可信度。

2.2 区间规划模型及求解

20世纪60年代曾引起学者们关注的区间线性规划指的是下述问题 [10]

$$\min c^{\mathrm{T}}x$$
$$\text{s.t. } A^{\mathrm{I}}x\leqslant b^{\mathrm{I}},\ x\geqslant 0$$

定理1

满足 $A^{\mathrm{I}}x\geqslant b^{\mathrm{I}},x\geqslant 0$ 时 x 的最小取值范围为

$$\left\{x\middle|A^-x\geqslant b^+,x\geqslant 0\right\} \tag{1}$$

最大取值范围为

$$\left\{x\middle|A^+x\geqslant b^-,x\geqslant 0\right\} \tag{2}$$

下面给出有关证明。

任取 $A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}}$ ，则对 $x\geqslant 0$ ，有

$$Ax\geqslant A^-x$$

若 $x\geqslant 0$ 满足 $A^-x\geqslant b^+$，必有 $Ax\geqslant A^-x\geqslant b^+\geqslant b$ 成立，亦即 $x\geqslant 0$ 只要满足式(1)，则必满足 $Ax\geqslant b,A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}}$，这就证明了

$$\left\{x\middle|A^-x\geqslant b^+,x\geqslant 0\right\}\subset\left\{x\middle|Ax\geqslant b,x\geqslant 0,A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}}\right\}$$

所以，式(1)表示的是满足 $A^{\mathrm{I}}x\geqslant b^{\mathrm{I}},x\geqslant 0$ 时 x 的最小取值范围。

又由于对任意的 $x\geqslant 0$ ，成立

$$A^+x\geqslant Ax$$

任取 $A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}}$ ，$x\geqslant 0$ ，若 $Ax\geqslant b$ ，$x\geqslant 0$ ，则有

$$A^+x\geqslant Ax\geqslant b\geqslant b^-$$

这就说明对任意的 x ，只要满足 $Ax\geqslant b$ ，$x\geqslant 0$ ，$A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}}$ ，就必成立 $A^+x\geqslant b^-$ ，亦即

$$\left\{x\middle|Ax\geqslant b,x\geqslant 0,A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}}\right\}\subset\left\{x\middle|A^+x\geqslant b^-,x\geqslant 0\right\}$$

所以，式(2)表示的是满足 $A^{\mathrm{I}}x\geqslant b^{\mathrm{I}},x\geqslant 0$ 时的 x 的最大取值范围。证毕。

记 $f\left(A,b,c\right)=\min\left\{c^{\mathrm{T}}x\middle|Ax=b,x\geqslant 0\right\}$ ，$A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}},c\in c^{\mathrm{I}}$ ，引入如下符号

$$f^-\left(A,b,c\right)=\inf\left\{f(A,b,c)\middle|A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}},c\in c^{\mathrm{I}}\right\}$$
$$f^+\left(A,b,c\right)=\sup\left\{f(A,b,c)\middle|A\in A^{\mathrm{I}},b\in b^{\mathrm{I}},c\in c^{\mathrm{I}}\right\}$$

称区间 $\left[f^-\left(A,b,c\right),f^+\left(A,b,c\right)\right]$ （可能是无界的）为相应区间规划问题最优值集合的包括，简称区间最优值区间。其中，$f^-\left(A,b,c\right)$ 为最好最优解，$f^+\left(A,b,c\right)$ 为最劣最优解。

定理2 设区间线性规划问题含有一个等式约束 $\sum_{j=1}^{n}a_{ij}^{\mathrm{I}}x_j=b_i^{\mathrm{I}}$ ，则其最劣最优解必位于其边界超平面 $\sum_{j=1}^{n}a_{ij}^{+}x_j=b_i^{-}$ 或 $\sum_{j=1}^{n}a_{ij}^{-}x_j=b_i^{+}$ 之上（证明过程略）。

3 模型构建与求解

3.1 模型构建

所讨论的路网结构是一个封闭的系统,空车按最短径路运送,在同一路段不存在空车对流现象,不存在重车、车种代用现象,卸车站和装车接轨站空车流供需平衡。假设空车从卸车站 $S_i(i=1,2,\cdots,m)$ 到装车站 $D_j\left(j=1,2,\cdots,n\right)$ 的单位走行距离公里是一元数,记为 c_{ij};装车站 D_j 的需求量为区间数 $D_j^{\mathrm{I}}=\left(b_j^-,b_j^+\right)$,卸车站 S_i 的供应量为区间数 $S_i^{\mathrm{I}}=\left(a_i^-,a_i^+\right)$;$S_i \to D_j$ 运送时间分别为区间数 $t_{ij}^{\mathrm{I}}=\left[t_{ij}^-,t_{ij}^+\right]$,要确定的是决策变量 x_{ij}^{I} 表示配空的数量。

当给定需求点 D_j 的从空车运送时间开始计时的装车站空车需求限定期 T_{ij},根据定义3,可得资源 S_i 准时运到 D_j 的可信度为

$$\alpha_{ij}=\begin{cases}0 & T_i<t_{ij}^- \\ \left(T-t_{ij}^-\right)/\left(t_{ij}^+-t_{ij}^-\right) & t_{ij}^-\leqslant T_i\leqslant t_{ij}^+,\forall i,j \\ 1 & T_i\geqslant t_{ij}^+\end{cases} \tag{3}$$

这样,建立目标如下

$$\min F_1=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}c_{ij}x_{ij}^{\mathrm{I}} \tag{4}$$

$$\max F_2=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ij}x_{ij}^{\mathrm{I}} \tag{5}$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n}x_{ij}^{\mathrm{I}}=a_i^{\mathrm{I}} \quad i=1,2,\cdots,m \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{m}x_{ij}^{\mathrm{I}}=b_j^{\mathrm{I}} \quad j=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

$$f_l\leqslant f_L \quad \forall l\in L \tag{8}$$

$$\varepsilon y_{ij}\leqslant x_{ij}\leqslant My_{ij},\forall i,j \tag{9}$$

$$y_{ij}\in\{0,1\},\forall i,j \tag{10}$$

$$t_{ij}^{\mathrm{I}}\leqslant T_{ij} \tag{11}$$

目标函数式(4)表示空车总走行公里最少;目标式(5)表示空车运送时间满足装车站装车需求时间限制的可信度加权值最大。

限制条件中,式(6)—式(7)表示空车供需平衡;式(8)表示路段能力限制,L 为路网上所有路段集合,l 为路网上任意路段,有 $l\in L$,相应路段的流量和容量分别为 f_l 和 f_L;式(9)确保0~1变量 $y_{ij}=1$ 仅当 $x_{ij}>0$,ε 表示任意小的正数,M 表示任意大的正数;式(11)表示 $S_i\to D_j$ 运送时间 t_{ij}^{I} 小于等于从空车运送时间开始计时的装车站空车需求限定期。

3.2 模型求解

考虑到可信度取值,其累加值比较小,当第一部分值较大时,在整个模型中所占的比重非常小,它对总目标函数的影响很少,有可能搜索不到最优解。为增强时间期限的变化,要通过转换因子 μ 转换以确保目标结果正确,转化为的单目标规划模型

$$\lambda=\mu c_{ij} \tag{12}$$

通常 $0.5\leqslant\mu\leqslant0.8$,本文取 $\mu=0.5$。

令 $b_{ij}=1-a_{ij}\left(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n\right)$,存在

$$\min F_3=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}b_{ij}x_{ij} \tag{13}$$

这样,多目标可转换为单目标

$$\min F=\omega_1F_1+\omega_2F_3 \tag{14}$$

式中:ω_1,ω_2 表示权重,且 $\omega_1+\omega_2=1$ 。

然后根据区间规划求解方法进行求解,因运输问题具有特性,如 $a_{ij}=1$,可直接利用Lingo软件进行求解,并把路段通过能力限制作为限制条件之一。

4 算例

现模拟某铁路局管内配空实例,存在3个卸空站、4个装车需求站。考虑到随机干扰等因素,其发送、需求量及走行公里如表1所示;运送时间及装车需求时间如表2所示。设 $S_1\to D_1$ 路段能力限制为40辆,$S_3\to D_2$ 限制为70辆,且 $\omega_1=0.6,\omega_2=0.4$ 。

表1 卸车站、装车站走行公里及发送量和需求量表

Tab.1 Running kilometers, sending quantity and demand quantity at unloading stations and loading stations

卸车站	装车站				发送量/辆
	D_1	D_2	D_3	D_4	
S_1	200 km	600 km	300 km	550 km	[70,80]
S_2	100 km	500 km	150 km	450 km	[44,50]
S_3	400 km	250 km	550 km	300 km	[102,110]
需求量/辆	[37,40]	[65,70]	[52,60]	[62,70]	[216,240]

表2 卸车站、装车站运送时间和限定时间

Tab. 2 The delivery time and time limit of unloading stations and loading stations h

卸车站	装车站			
	D_1	D_2	D_3	D_4
S_1	[2.5,3.1];4.0	[7.5,9.2];8.0	[3.8,4.6];6.0	[6.9,8.5];5.0
S_2	[1.3,1.5];2.0	[6.3,7.7];6.0	[1.9,2.3];3.0	[5.6,6.9];6.5
S_3	[5.0,6.2];3.0	[3.1,3.8];4.0	[6.9,8.5];7.0	[3.8,4.6];6.0

求解步骤如下:

1)由已知数据及定义算得各线路运输准时的可信度矩阵$\boldsymbol{\alpha}_{ij}$为

$$\boldsymbol{\alpha}_{ij}=\begin{bmatrix}1 & 0.294 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 1 & 0.692\\ 0 & 1 & 0.063 & 1\end{bmatrix}$$

2)利用LINGO软件进行求解,按照式(14)可得最优方案运输费用 $z=[35\,943.0,40\,431.6]$,其区间解如表3所示。

表3 区间解

Tab.3 The interval solution 辆

卸车站	装车站			
	D_1	D_2	D_3	D_4
S_1	[37,40]		[33,40]	
S_2			[19,20]	[25,30]
S_3		[65,70]		[37,40]

算例表明,该模型能够很好的解决空车调整实际并克服经验决策,使得配空更科学、合理,在当前压缩运输成本、增运节支方面起到很好的效果,可用于编制高质量的空车调配计划。

5 结语

采用区间规划方法验证了铁路空车调配的可行和有效性,使得不确定模型更接近实际问题,反映现场作业情况,为空车调配问题提供新的思路和方法。然而,一个复杂的决策问题通常在各种不确定因素混合环境之中,这种不确定性不再是单一的随机性或模糊性,而是它们相互渗透、相互影响,模糊随机性是一种具体体现。所以,不确定性优化研究将在铁路运输管理中越来越受到重视。空车调配模型需要进一步研究各种干扰因素的模糊随机性等机会约束的影响。

参考文献:

[1] 刘洪涛.技术计划空车调整的数学模型[J].铁路计算机应用, 2005,14(7):21-23.

[2] 杜艳平,尹晓峰,刘春煌.采用蚁群算法求解铁路空车调整问题[J]. 中国铁道科学, 2006,27(4):119-122.

[3] 闫海峰,谭云江,朱健梅.铁路空车调整蚁群算法的研究[J]. 铁道运输与经济, 2006,28(8):31-34.

[4] 邬开俊,鲁怀伟,王铁君.基于自适应变异粒子群算法的铁路空车调配[J]. 兰州理工大学学报, 2011,37(2):102-105.

[5] 李宗平,夏剑锋,基于时间约束的铁路空车调配模型与算法[J]. 西南交通大学学报, 2005,40(3):361-365.

[6] 林柏梁,乔国会.基于线路能力约束下的铁路空车调配迭代算法[J]. 中国铁道科学, 2008,29(1):93-96.

[7] 雷中林,何世伟,宋瑞,等.铁路空车调配问题的随机机会约束模型及遗传算法[J]. 铁道学报, 2005,27(5):1-5.

[8] 陈昱,张喜.带时间窗空车调整问题的遗传算法研究[J]. 铁路计算机应用, 2007,16(2):4-7.

[9] 程学庆,蒲云.基于货主满意度的模糊空车调配模型的研究[J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(11): 71-73.

[10] 李炜.线性规划及其扩展[M]. 北京:国防工业出版社, 2011:8.

Interval Linear Programming Model and Algorithm for Railway Empty Car Distribution

Qu Siyuan

(Transport Department, Shanghai Railway Bureau, Shanghai 200071, China)

Abstract: Railway empty car distribution is a solution to the demand and supply imbalance of empty cars. On the basis of the empty car distribution model, centering on three aspects including the supply and demand uncertainty of empty cars, the deployment timeliness and the limit of interval capability, this paper conducts adaptive analysis of the empty car distribution. To achieve minimum kilometers of the total empty mileage and the maximum weighted credibility of the empty demand for limited time in terms of arrival time, the paper proposes linear interval planning theory to obtain the model and algorithm of empty car distribution. Combined with examples to verify the flexibility and simplicity of the interval planning, it concludes the proposed empty distribution model can meet the practical transportation and production demands, providing reference and significance for the distribution of railway empty car.

Key words: railway transport; interval linear programming; empty car distribution; model

(责任编辑 姜红贵)