

文章编号:1671-6833(2014)01-0020-05

树枝形专用线取送车优化问题的研究

李 斌,董 昱,孙云霞

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 基于企业铁路树枝形专用线的分布特点,采用多种取送作业方式,针对列车分批到达编组站情况下的取送车优化问题建立数学模型,该数学模型是以充分利用调机的牵引能力为原则,以货车总消耗时间最小化为优化目标;同时提出遗传蚁群算法求解该取送车优化问题.利用遗传算法的随机搜索、快速性及全局收敛性等特点,产生取送车问题的初始信息素分布;然后利用蚁群算法的并行性、正反馈机制及求解效率高等特性求出精确解.最后结合实例求得取送车作业的最优解,来验证该模型的合理性、可行性;并通过遗传蚁群算法和蚁群算法的对比,说明该算法的优越性.

关键词: 企业铁路;树枝形;取送车作业;遗传蚁群算法

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.01.005

0 引言

当前,我国企业铁路以人工调度为主,编组站容易长期处于满负荷状态,从而造成堵车、运输不及时等问题^[1].在企业专用线运输中,取送车作业衔接着车辆交接、调车运用、货物装卸等作业,因此合理安排取送车作业,有效缩短货车停留时间,对于提高运输效率 and 经济效益有着重大意义.

取送车问题是经典的 NP 问题,为此学者们提出了许多优化方法求解此问题.文献[2-3]提出以调机走行时间最短为优化目标,采用“单一送车”的方式,仅对一趟到达列车的送车作业进行研究,其模型的建立没有考虑装卸区容车能力、调机牵引能力、货物作业时间等重要因素.文献[4-11]从求解算法方面进行优化,哈密尔顿图法直观简单,但仅适用于规模较小的问题;模拟退火算法^[6]和遗传算法^[7]具有良好的全局搜索性,但求解效率较低;蚁群算法能求得较好的解^[8-9],但执行时间长且全局搜索能力差.

1 问题的描述

从当前的布置形式上来看,多数工矿企业编组站内轨道纵横、装卸点分散、呈树枝状分布、车流分散到发.所以笔者把企业编组站内的装卸货专用线抽象为树枝型专用线,其特点是调机在同

一批次取送作业过程中不必返回编组站.

尽管企业编组站没有列车运行图的限制,但为了节约成本,尽量使货车在编组站停留时间最少.所以笔者针对多趟列车分批到达编组站进行取送作业的情况,采用“连送带取”、“单取(送)”的作业方式,提出以货车总消耗时间最小化为优化目标.取回的车组被编入就近的出发列车,离开编组站.

2 数学模型的建立

设有 n 趟列车分批到达编组站,调机将分组后的各个车组送往其对应的装卸点.由于调机的牵引能力和装卸点容车能力的限制,在同一批次的作业过程中其牵引的货车辆数有限.该模型的最终目的是求得取送作业的顺序方案及相应的批次方案,以使计划阶段内所有货车的总消耗时间最短,同时使调机的牵引能力得到充分利用.

2.1 确定作业条件

根据前面的分析,得到取送车问题的条件:

- (1) 一台调机执行任务;
- (2) 将解体完毕时刻相同、去往同一装卸点的车辆作为一个车组;
- (3) 每个车组的货车辆数已知;
- (4) 装卸点个数及各装卸点的容车辆数已知;
- (5) 调机的最大牵引力已知;

收稿日期:2013-10-13;修订日期:2013-11-06

基金项目:甘肃省科技支撑计划资助项目(1204GKCA038)

通信作者:董 昱(1962-),男,甘肃兰州人,兰州交通大学教授,研究方向为交通信息工程及控制.

(6) 各车组的货物作业时间、调机在每个装卸点之间所用时间已知;

(7) 编组列车的开始编组时间及牵引能力已知.

2.2 数学模型

设阶段计划内所有取送货车总消耗时间为 F , 得到该研究的取送问题数学模型为

(1) 目标函数. 货车的总消耗时间为

$$\min F = \sum_i \sum_j m_{ij} (t_{ij}^{\text{marsh}} - t_i^0). \quad (1)$$

(2) 约束条件. 约束条件为

$$\begin{cases} c(ij^q) < c(ij^{q'}), \text{ if } q < q'(1); \\ f_j^{\text{region}} < wac_j, \text{ if } j \in J(2); \\ f_b^{\text{wagon}} < hcl, \text{ if } j \in B(3). \end{cases} \quad (2)$$

式中: j 为装卸点的编号, 其集合为 J ; i 为按所到列车的先后进行排号, 其集合为 I ; q 为作业性质 ($q=1$ 是送, $q=2$ 是取); ij 为取送车组, ij^q 为 ij 的作业类型; t_i^0 为 i 的解体完成时分; m_{ij} 为车组 ij 的车辆数; t_{ij}^{marsh} 为是指车组 ij 所对应的编组开始时分; wac_j 为装卸点 j 最多同时容纳的车辆数; hcl 为调机的牵引能力; b 为取送批次编号, 其集合为 B . f_j^{region} 为用以判断装卸点 j 容纳货车辆数的最大值; f_a^{wagon} 为判断在第 a 批次中调机牵引车辆数的最大值.

上述(1)式是对于同一个车组要满足先送后取的偏序约束, (2)式是到达装卸点的车辆数要满足其容车能力.

2.3 取送批次的构造

根据到达编组站列车的先后顺序, 再依据车组要到达装卸点编号的大小, 对每个车组 ij 的取送作业进行编号, 得到唯一一个顺序集合 C , 设解的集合为 $x = \{c(ij^q) | c \in C, i \in I, j \in J, q = 1, 2\}$.

取送批次的划分是根据调机不必要走行原则、及时取送和牵引能力的约束进行优化的, 为此定义了3个函数.

函数1 最大牵引能力函数: $f_{\max}(x): c_{\text{begin}}(a) \rightarrow c_{\text{end}}(a)$

其中, $c_{\text{begin}}(a)$ 表示第 a 批次中第一个作业在 x 中的作业编号, $c_{\text{end}}(a)$ 表示最后一个作业的编号.

原则: 以调机牵引效率最大化为目标, 调机在每个批次 a 中要尽可能达到其最大牵引能力,

功能: 根据充分利用调机的牵引效率来确定第 a 批次中的最后一个作业. 由此可知, 当 $a=1$ 时, $c_{\text{begin}}(a)=1$; 当 $a>1$ 时, $c_{\text{begin}}(a)=c_{\text{end}}(a-1)+1$.

函数2 调机走行最小函数: $f_{\min}(x): c_{\text{end}}(a) \rightarrow c'_{\text{end}}(a)$

原则: 如果批次 a 中有两个不相邻的作业要到达同一个装卸点, 那么这两个作业的性质只能是先送后取.

功能: 在函数1生成第 a 批次中 $c_{\text{end}}(a)$ 的基础上, 根据调机走行最小原则来更新 $c_{\text{end}}(a)$, 产生新的最后一个作业 $c'_{\text{end}}(a)$.

函数3 及时取送函数: $f_{\text{pro}}(x): c'_{\text{end}}(a) \rightarrow c''_{\text{end}}(a)$

原则: 如果 x 中的 $a-1$ 个批次已经确定, 那么函数2确定的第 a 批次中满足此原则的作业不能再出现在以后批次中.

功能: 在函数2生成第 a 批次中 $c'_{\text{end}}(a)$ 的基础上, 根据及时取送原则来更新 $c'_{\text{end}}(a)$, 产生新的最后一个作业 $c''_{\text{end}}(a)$.

根据以上3个原则, 生成取送批次的主函数.

输入: 顺序方案 x , 作业总数 n ;

Step1 令 $s:=1, a:=1$;

Step2 如果 $s \leq n$ 并且方案 x 可行, 转 Step3;

否则, 如果 x 可行, 计算且输出 x ;

否则, 输出“方案不可行”提示;

Step3 调用函数1;

调用函数2;

调用函数3;

令 $c_{\text{begin}}(a+1) := c''_{\text{end}}(a) + 1, a := a + 1, s := c_{\text{begin}}(a)$;

转 Step2;

注: 在 Step2 中, 若“ x 不可行”, 那么必须产生新的初始取送方案 x' .

3 优化算法的设计

遗传算法的全局搜索速度很快, 但对反馈信息的利用不充分, 容易陷入冗余迭代, 使其求精确解效率较低; 蚁群算法 (Ant Colony Algorithm, ACA) 虽然初期信息素匮乏, 可是具有鲁棒性、易与其他算法结合和全局精确的收敛能力. 因此, 笔者把两种算法融合成 GACA 对该问题进行求解. 前期利用遗传算法产生取送车问题的初始信息素分布; 然后利用蚁群算法求出精确解.

3.1 遗传算法的设计

Step1 初始种群: 设 $X_k = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 代表一个取送方案. 以每个车组先送后取、装卸时间长的作业尽量排在前面为原则, 使用“轮盘赌”的方法构成第一代取送方案 $X = (X_1, X_2, \dots, X_j)$;

Step2 适应度评估: 设 $f_k = 1/F_k$ 为的适应度函数, f_k 越大的被选择的概率越大, F_k 越接近最优解;

Step3 自然选择: 计算 X 的平均适应度 f , f_k 的相对适应度, 得到 X_k 的生存数量, 生成下一代

取送方案;

Step4 交叉重组:根据选择概率 P_c 选择个体进行交叉重组,交叉规则采用 PMX 法;

Step5 变异操作:在每代取送方案中,以变异概率 P_m 对染色体进行变异;

返回 Step2,进行循环.

3.2 遗传算法与蚁群算法的衔接

GA 求出的若干组优化路径 G_{better} 决定了 ACA 的初始信息素分布,在初始 t_0 时刻,作业点 (i,j) 间的信息素生成规则为

$$\tau_{ij}(t_0) = \begin{cases} \tau_c, & \text{otherwise;} \\ \tau_c + \tau_j, & i, j \in G_{better}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ_c 为信息素常数; τ_j 为 G_{better} 转换的信息素值.

3.3 蚁群算法的设计

在 t 时刻作业点 i 的第 k 只蚂蚁在作业点 i 和 j 间转移概率 $P_{ij}^k(t)$ 为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} 0, & \text{others;} \\ \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{u \in \text{allowed}_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}(t)]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 表示边 (i,j) 上的遗留信息浓度; $\eta_{ij}(t)$ 表示路径启发信息; j 表示还未访问过的需求点.

只将最好的蚂蚁用于信息素的更新,其全局更新规则为

$$\tau_{ij}(t+n) \leftarrow (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t) \quad (6)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} (L_{\text{best}})^{-1}, & \text{if } (i,j) \in g_{\text{lobal}} - \text{best;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ 表示信息素挥发参数; $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻作业点 i,j 间信息素的增加量; L_{best} 为到目前为止找出的全局最优路径.

在搜索路径的同时,每只蚂蚁应用局部更新规则对它们经过的边进行激素更新,更新规则为

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t). \quad (8)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} Q/d_{ij}, & \text{if } ant \in (i,j) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (9)$$

式中: Q 是蚂蚁通过轨迹 (i,j) 时所释放的信息素量,若蚂蚁通过轨迹 (i,j) ,则进行信息素的更新.

4 算例验证与分析

4.1 数学模型的验证

某钢铁企业的树枝形专用线如图 1 所示,该编组站只有一台调机进行取送作业. $V_1 \sim V_5$ 表示 5 个装卸点,括号内数字代表其容车能力.由此可得出调机在各装卸点之间的行走时间表(见表 1).

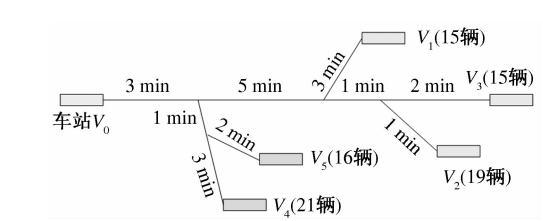


图 1 树枝形铁路专用线布置示意图

Fig. 1 Wagons in branch-shaped private siding

表 1 各路径的调机行走时间

Tab. 1 The travel time of conditioner at each path min

	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
V ₀	0	11	10	11	7	6
V ₁	11	0	5	6	12	11
V ₂	10	5	0	3	11	10
V ₃	11	6	3	0	12	11
V ₄	7	12	11	12	0	5
V ₅	6	11	10	11	5	0

现有 4 列车相继到达 V_0 ,解体后根据货车要到达的装卸点进行分组,该问题的已知信息如表 2 所示.

表 2 取送问题的已知信息表

Tab. 2 The known information of TPW

c	i	q	j	i _j	m _{ij} /辆	t ₀	t _{ijcargo} /min
1	1	1	1	3	6	11:55	48
2	1	2	2	1	5	11:55	50
3	1	1	2	1	5	11:55	99
4	1	2	4	2	11	11:55	99
5	1	1	4	2	11	11:55	99
6	1	2	2	1	5	12:02	64
7	2	1	2	6	8	12:02	80
8	2	2	3	7	9	12:02	63
9	2	1	5	4	5	12:02	55
10	2	2	2	6	8	12:02	80
11	2	1	3	7	9	12:02	63
12	2	2	5	4	5	12:02	55
13	2	1	5	4	5	12:02	55
14	2	2	2	6	8	12:02	80
15	3	1	1	10	5	12:39	39
16	3	2	2	9	5	12:39	50
17	3	1	2	9	5	12:39	50
18	3	2	5	8	6	12:39	66
19	3	1	5	8	6	12:39	66
20	3	2	2	12	3	14:31	25
21	4	1	2	12	3	14:31	25
22	4	2	3	11	2	14:31	23
23	4	1	3	11	2	14:31	23
24	4	2	4	13	5	14:31	45
25	4	1	4	13	5	14:31	45
26	4	2	2	12	3	14:31	25

注: t_{ij}^{cargo} 表示车组 i_j 的货物作业时间.

取回编组站的车组要进行编组,根据就近原则编入出发列车,出发列车信息表见表 3。

表 3 出发列车信息表
Tab.3 The train information

出发列车编号	1	2	3	4	5
编组开始时刻	14:50	14:10	15:30	15:50	16:00
牵引能力/辆	30	20	20	20	20

设调机在挑选车组时所用时间是相等的(4 min),根据上述已知条件,利用 GACA 在 MAT-

LAB 中进行求解,参数设置如下。
遗传算法: $N_1=50,P_c=95\%,P_m=5\%$;
蚁群算法: $N_2=150,\tau_c=60,\tau_x=2,\alpha=1,\beta=5,Q=1\,000,\rho=0.7$ 。
算法得到最优的取送车顺序为 5-7-11-3-17-6-1-8-9-4-12-2-15-13-19-25-18-21-10-23-16-24-26-14-20-22,货车总消耗最少时间 $F=270.43\text{ h}$,根据运算结果得到相应的取送方案如表 4 所示。

表 4 算例仿真取送方案
Tab.4 The take delivery program of simulation

顺序	作业 编号	取送 时刻	批次	装卸点	挂运 列车	顺序	作业 编号	取送 时刻	批次	装卸点	挂运 列车
1	5	12:00	1	4	—	14	13	14:16	3	5	—
2	7	12:04	1	1	—	15	19	14:20	3	5	—
3	11	12:08	1	3	—	16	25	14:24	3	4	—
4	3	12:12	1	2	—	17	18	14:28	3	2	3
5	17	12:48	2	2	—	18	21	15:23	4	2	—
6	6	12:52	2	4	1	19	10	15:27	4	2	3
7	1	12:52	2	1	—	20	23	15:27	4	1	—
8	8	12:56	2	5	1	21	16	15:31	4	1	3
9	9	12:56	2	2	—	22	24	15:31	4	3	4
10	4	13:00	2	2	1	23	26	15:31	4	4	4
11	12	13:00	2	3	2	24	14	15:31	4	5	4
12	2	14:12	3	1	2	25	20	15:31	4	5	5
13	15	14:12	3	1	—	26	22	15:31	4	2	5

注:解对应的优化目标: $F=270.43\text{ (h)}$; 批次数:4(次)。

表 5 各批次调机最大牵引辆数表
Tab.5 The capacity of machine traction

取送批次	1	2	3	4
牵引能力/辆	36	32	35	35

结果表明,针对多趟列车分批到达编组站的情况,笔者将取送顺序、取送时间、批次和挂运列车作为一个整体进行优化;所得取送作业方案中作业(15,16)为“同送”方式,(21,22,23)为“同取”方式,(6,7,8),(12,13),(19,20,21)为“送取结合”方式;由表 5 可得在优化的批次中使调机的能力达到了最大化,这使得方案在不影响此系统货车总消耗时间的基础上,提高了调机的牵引效率。

4.2 遗传蚁群算法的验证

为了验证 GACA 的优点,分别用基本 ACA 和 GACA 对本取送问题进行求解,解与迭代次数之间的关系如图 2、图 3 所示。

由仿真对比图可知:GACA 当迭代次数达到 103 次时求得最优解为 $F=270.43\text{ h}$,ACA 当迭代

次数达到 123 次时求得最优解 $F=291.63\text{ h}$ 。因此 GACA 的迭代次数大幅度减小;所求得的解收敛精度提高。

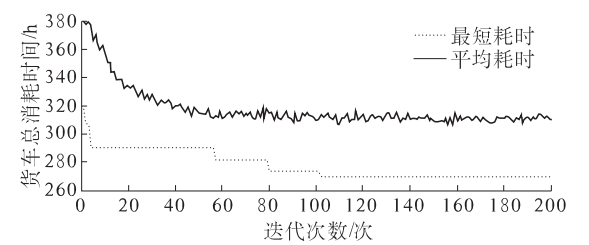


图 2 GACA 最优解与迭代次数关系图
Fig.2 The relation graph of GACA

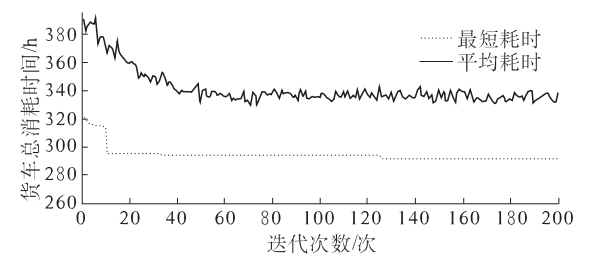


图 3 ACA 最优解与迭代次数关系图
Fig.3 The relation graph of ACA

5 结论

笔者针对多趟列车分批到达编组站的情况,提出了一种新型树枝形取送问题的数学模型和遗传算法与蚁群算法的融合算法求解此问题。

与传统模型相比,笔者改进后所得到的数学模型把取送问题的顺序、时间和批次作为一个系统进行优化,适用于多种取送作业方式,同时考虑到了调机的牵引能力和装卸区的容车能力的约束,因此所得数学模型更符合编组站的实际要求。

提出用 GACA 求取最优取送顺序,由 GA 产生的初始解,减少了 ACA 盲目的搜索次数,加快了收敛速度;在收敛速度加快的同时,ACA 中的参数对取送车问题规模变化的敏感度降低,提高了算法的鲁棒性。所以无论是算法的性能优化、收敛速度还是鲁棒性,GACA 都取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 雷友诚,吴志飞.改进的蚁群算法在放射形专用线取送车优化中的应用[J].控制工程,2012,19(6):1007-1010.
- [2] 李智.基于改进蚁群算法的货物作业车取送模型优化[J].铁道运输与经济,2004,26(4):73-76.
- [3] 杨运贵,王慈光.树枝形铁路专用线取送车问题的遗传算法研究[J].计算机工程与应用,2008,44(12):210-214.
- [4] 石红国,彭其渊.树枝型专用线取送车问题的哈密尔顿图解法[J].中国铁道科学,2005,26(2):132-135.
- [5] 张健,宋建业.货物作业车取送模型的优化[J].铁道货运,2008,26(10):13-16.
- [6] 张波,叶家玮,胡郁葱.模拟退火算法在路径优化问题中的应用[J].中国公路学报,2004,17(1):179-181.
- [7] 王雅琳,李开峰.遗传算法在企业铁路取送调车作业优化中的应用[J].系统工程,2007,25(3):94-99.
- [8] 吴海辉.基于遗传算法的铁路编组站阶段计划编制研究[D].南昌:华东交通大学机电工程学院,2009.
- [9] WANG Miao. Hybrid behavior ant colony algorithm for vehicle routing problem[J]. Computational and Information Sciences,2012,4:168-171.

Research on PTW on Branch-shaped Sidings

LI Bin, DONG Yu, SUN Yun-xia

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the distribution characters of enterprise railway branch - shaped sidings, using a variety of mode of operation, the mathematical model of wagons for several trains arriving at station in batches was built. The principle is to make full use of the traction and the optimization goal was the least time of vehicle total consumption; meanwhile, the genetic ant colony algorithm(GACA) was put forward to solve the problem. Using the random search, rapidity and global convergence of genetic algorithm, the initial pheromone was produced. Then the exact solution was calculated by using the parallelism, positive feedback mechanism and high solving efficiency of ant algorithm. In combination with an example, the optimal solution was found to verify the rationality and feasibility of the model. And in comparison with ant colony algorithm, illustrate the superiority of the algorithm is shown.

Key words: railway station; branch-shaped; Placing-in and Taking-out wagons; genetic ant colony algorithm