

物流工程

面向最短路径的工业包装生产线时间成本研究

方景芳, 叶波, 刘军

(兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 研究在时间成本条件下, 面向最短路径的工业包装生产线物料配送选择的方式。**方法** 首先对该公司工业包装生产线物料配送过程中存在的资源浪费、路线重复等问题进行研究, 给出该工业包装生产制造车间物料配送布局图, 建立起适用于该工业包装生产线物料配送的优化模型, 使用仿水流算法对该模型进行求解, 同时将该方法与常规方法进行对比分析。**结果** 从利用计算机求得的数据可以看出, 仿水流算法不但使迭代的次数减少, 而且与其他类似的蚁群算法相比, 也明显缩短了计算机的运算时间。**结论** 通过实例验证对比分析得出, 所列出的模型和算法具有较好的优越性和有效性, 可以在企业实际生产中利用计算机自动生成该装、卸货路径配送的模式, 节约了人工指导的成本。

关键词: 物料配送; 路径优化; 工业包装; 仿水流算法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)09-0120-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.020

Time Cost of the Shortest Path-oriented Industrial Packaging Production Line

FANG Jing-fang, YE Bo, LIU Jun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China)

ABSTRACT: The work aims to study the material distribution mode of the shortest path-oriented industrial packaging production line under the condition of time cost. Firstly, the problems of waste of resources and duplication of routes in material distribution of industrial packaging production line of the company were studied. The layout chart of material distribution in industrial packaging production workshop was given, and an optimization model for material distribution in industrial packaging production line was established. The model was solved by simulated flow algorithm. At the same time, the method was compared to the conventional method for analysis. The data obtained by computer showed that the simulated flow algorithm not only reduced the number of iterations, but also significantly shortened the computing time compared with other similar ant colony algorithm. The superiority and validity of the model and algorithm are obtained by comparing and analyzing the examples. The distribution mode of loading and unloading route can be automatically generated by computer in the actual production of enterprises to save the cost of manual guidance.

KEY WORDS: material distribution; route optimization; industrial packaging; flow simulation algorithm

在现代生产物流体系中, 准时化 (just in time, JIT) 生产越来越受到人们的广泛关注, 很多方法和配送模式也被广泛应用到生产企业当中, 是企业降低制造成本和库存成本的有效竞争方法之一。其中工业包

装企业生产线的物料配送水平能够直接影响该企业的生产效率和效益, 因此如何提高工业包装生产线的物料配送水平是企业急需研究的问题之一, 这就要求工业包装生产线所需的物料在合适的时间以合适的

收稿日期: 2018-12-01

基金项目: 国家自然科学基金 (71861025)

作者简介: 方景芳 (1964—), 女, 兰州理工大学教授、硕导, 主要研究方向为智能优化调度。

数量配送到合适的工位上。

汽车零部件工业包装生产线是典型的物料装配流水线,但是生产线旁边库存空间有限,要想及时顺利地满足生产所需,就需要合理规划物料配送的路径,要对配送路径进行实时优化,才能提高生产的运作效率。

工业包装生产线上高效理想的物流方式是装配生产和物料配送合作紧密,但是在实际的生产作业中,生产线的物料配送存在很多问题:物料配送的路线不是固定的,同时对物料配送的时间点和物料配送的量没有统一,导致物料配送没有按时到达,甚至出现生产线停工状态,给企业造成无法弥补的经济损失;生产线物料配送过程中牵引车经常会出现堵塞的情况,这是因为物料配送的路径缺少实时的优化,造成配送混乱。

为了使工业包装生产线所需的物料能够按时送达,减少牵引车运输消耗的成本,需要对牵引车运输的路线进行不断的优化。

企业工业包装生产线物料配送的路径优化问题可以概括为车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)。自从车辆路径问题在1959年由Dantzig^[1]首次提出来之后,引发了国内外众多专家学者的注意,因此在对VRP问题的研究^[2-5]上已经形成了一个较为系统的理论。在国外,Mazzeo^[6]等首次提出一种求解容量约束的车辆路径问题的蚁群算法,发现蚁群算法与其他算法比更具高效性。Nagy^[7]等提出了一种收发货物单目标及多目标车辆路径问题的算法,该算法成功避免了插入法的观点,首次提出了综合对待收发货物的方法。Boysen^[8]等提出了混流装配生产线物料准时化配送。在国内,遗传算法和启发式算法被广泛应用处理路径优化问题。陈湘州^[9-12]等引入一种演变的回旋算子,使用遗传算法求解路径优化问题,同时改进了局部检索能力。郭辉煌^[13]等是我国首批研究路径优化问题的学者,他们运用启发式算法解决了一些简单的路径优化模型。李兵、王小霞^[14]针对约束条件下的物料配送路径优化问题,首次提出仿水流方法求解该路径优化模型。李晋航等^[15-16]首次提出模糊讯息条件下的时机限制计划模型来求解所列出的模型,同时改进了以往的混杂智能算法。文中对生产车间的物料配送进行梳理,研究如何运用数量有限的牵引车对汽车零部件工业包装生产线所需的物料进行准时化的配送。

1 车间物料配送问题简述

1.1 生产制造车间布局

为了能够深入了解工业包装生产线的配送问题,首先要对生产制造车间物料配送的流通运输情况

加以分析和研究。在分析完生产车间的布局以后,针对已经计划的物料配送任务来研究确定该次配送任务的最优化路径。生产制造车间物料配送简图见图1,它的基本流通步骤为:首先按照分配的任务,半成品或原材料由牵引车运出库存中心;然后所有小车进入绿色缓冲区,依次访问其沿途的工位点后;最后返回到库存中心。

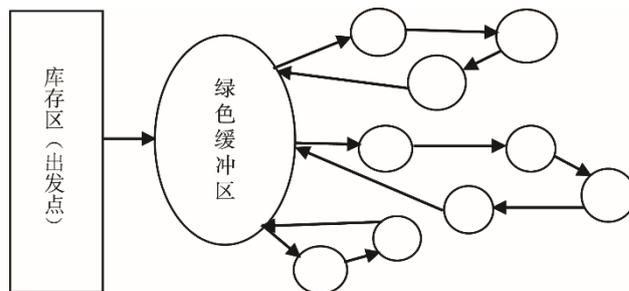


图1 生产制造车间物料配送简图

Fig.1 Map of material distribution in production workshop

1.2 生产线物料配送问题描述

企业在生产中,通常看到在生产线的旁边都会预留出一部分面积用来储存生产所需要的物料,但是更多的生产线物料则停放在物料存放中心,这样就要求牵引车多批次、少批量的输送。当企业车间在作业到某个时间段,生产线物料即将出现空缺时,库存管理人员就会接收到需求的信息,并且安排小车从库存中心出发对工位所需物料进行输送,而且在配送的过程中,要考虑怎样利用有限的配送牵引车对工位所需物料进行准时化的配送。

工业包装生产车间物料的实时配送问题可描述如下:假设包装的生产线是由 n 个工位组成,储存中心或库房计划用 m 辆牵引车为 n 个工位进行物料的配送,假设每一个工位的物料需求量为 $q_i(i=1,2,\dots,n)$,每辆牵引车的载质量最大为 W ,每一个工位的物料需求量不能大于每辆车的最大载质量,即 $q_i \leq W$,同时 n 个工位的物料需求量之和大于 m 辆牵引车总载质量。牵引车从同一库存中心出发对各个工位进行物料的配送。其中在牵引车配送的过程中需要满足以下几个约束条件和假设条件。

- 1) 各个工位所需要的物料仅由一辆车一次配送完成且所有的工位所要的物料都被该次配送满足。
- 2) 运输车辆从同一起点(仓库)出发为每个工位进行物料的配送,并且送完后返回库存中心。
- 3) 配送牵引车行驶速度、规格都相同。
- 4) 每个配送牵引车的额定载质量都相同并且不需要考虑小车最大的行驶里程。
- 5) 库存量满足牵引车的循环取货和取货频率。
- 6) 每个工位所处位置已知,且该工位需求量已知。

2 物料配送问题模型的建立

2.1 参数的设置

$Z = \{i | i = 0, 1, 2, \dots, n\}$, i 表示生产线的工位点, Z 表示各工位的集合, 其中 $i = 0$ 表示库存中心; $G_z = \{(i, j) | i \in z, j \in z, i \neq j\}$ 为工位点的集合; d_{ij} 为工位点 i 到 j 的距离; q_i 为工位点 i 所需要的物料数; t_i 为工位点 i 所需物料单位时间, 包括上货和取货时间; v 为小车行驶的平均速度; x_{ijm}, y_{ijm} 为 0—1 变量,

$$x_{ijm} = \begin{cases} 1, & \text{小车 } m \text{ 由第 } i \text{ 个工位点移到第 } j \text{ 个工作点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases},$$

$$y_{im} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个工位点的物料由小车 } m \text{ 输送} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}.$$

2.2 模型的建立

基于上文对生产车间物料实时配送问题的描述, 以最短运输路径为目标, 建立生产制造车间物料准时配送的数学模型如下所述。

目标函数:

$$\min T = \frac{1}{v} \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{m=1}^n d_{ij} x_{ijm} + t_i \cdot \sum_{i=1}^n q_i y_{im} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{m=1}^n y_{im} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i \cdot y_{im} \leq w_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijm} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijm} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in G_z} x_{ijm} \geq y_{im} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{im} \leq Z \quad (7)$$

式中: $m = 1, 2, 3, \dots, n$; $0 \leq i \neq j \leq n$ 。

其中式(1)是目标函数, 表示总的配送时间包括牵引车的行驶时间和上货、卸载物料的时间; 式(2)表示每个工位点只能由一辆牵引车服务; 式(3)表示每辆牵引车每次载有的物料量不能超过牵引车的容量; 式(4—5)表示每辆牵引车经过每个工位点的唯一性; 式(6)表示假如工位点 z 被牵引车 m 服务, 则牵引车 m 至少经过 G_z 中工位点 1 次; 式(7)表示牵引车 m 服务工位点不能超过 Z 。

阅读以往的文献可知, 他们求解的是一般性的最短路径问题数学模型, 文中以完成配送服务时间最短为目标, 进而确定最优路径。在生产制造车间为各工位提供物料配送服务的目的是在确保生产顺利完成的前提下, 尽可能的缩短物料配送的时间, 同时把卸载、上货的时间同配送时间一起作为目标函数进行求解。求解路径优化目标函数通常有启发式算法和精确算法。精确算法采用严密的数学求解方法, 它只能解决

规模较小的路径优化问题。文中根据最短路径优化问题的各个约束条件, 采用了一种全新的仿水流算法对模型进行精确的求解, 该启发式算法能够对全局进行高效的搜索, 同时具有启发式算法的实用性和有效性, 并能自如地控制搜索过程来求取目标函数的最优解。

3 仿水流算法的建立

在生活中受大自然流水的启发, 文中采用仿水流的一种算法来求解 VRP 问题。在路径的选择上, 改进了原有的路径选择概率公式; 在水流的更新过程当中, 采用全局更新和局部更新互相结合的方法, 其中在局部水流搜索更新当中, 采用 Dijkstra 方法, 使得水流朝最优路径流淌速度加快。仿水流算法首先要确定好水流的起始位置并且保证每一次迭代时要随机的选择起始位置, 在水流流过的地方采用 Dijkstra 方法进行局部水流信息素的搜索更新, 然后选择一条最优路径信息素完成全局的更新, 这时候就完成了迭代, 通过这种方法多次的迭代之后, 从而可以求得一个最优化的解。

3.1 水流的更新方式

通常情况下, 在每一次的迭代以后, 水流量在路径上需要进行更新, 但由于水流量的堆积或停止, 搜索的效率不容乐观, 跟进的算法没办法完成, 最优路径就无法顺利找到。文中针对水流的更新方式, 采用一种全局动态更新和局部更新相结合的方法对水流进行有效的搜索。

局部更新。在水流搜索进程当中, 可能会存在一些在很接近全局最优解位置的局部最优解位置, 因此, 如水流处于局部最优位置中, 流水可能会在这个局部最优的地方滞留相当长的时间, 而且也很难走出局部水流收敛的情况, 因此在路径的选择上, 使用式(8)对坐标 (i, j) 进行水流量的更新:

$$T_{ij}(t+1) = \rho T_{ij} + c \quad (8)$$

式中: $T_{ij}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻留在支路 (i, j) 上的水流量; ρ 为水流蒸发后的留存率; T_{ij} 为 t 时刻留在支路 (i, j) 上的水流量; c 为水流量的初始值。

全局动态更新。每条局部水流更新迭代完成时, 然后算法对系统整体最优路线进行全局的变量更新:

$$T_{ij}(t+1) = \varepsilon T_{ij} + \Delta T_{ij} \quad (9)$$

$$\Delta T_{ij} = (1 - \rho) \frac{L_1 - L_g}{L_g} \quad (10)$$

式中: ε 为全局更新的水流蒸发后的留存率; ΔT_{ij} 为全局更新的水流量的增量; L_1 为系统整体最优路径中存在的水流量; L_g 为目前路径长度中存在的水流量。

3.2 路径的选择方式

在水流流动过程的路径选择中, 都使用初步决策

的方法，它的演算流程为先随机的选第 1 条水流，然后选所有流水所要经过的路线，选择的根据是流水经过概率的高低，它的具体概率见式 (11)。

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{[T_{ij}(t)]^\alpha * \left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^\beta}{\sum_{mek} [T_{ij}(t)]^\alpha * \left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^\beta}, & \text{若 } j \in \{\text{允许 } E_m\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中： α 为水流量的占比大小，表示水流在各分支口选择下一条路线的权重比，当它的权重占比系数较大时，表示水流选择水流量较大的那条路线的概率很大； β 为水流能见度占比系数，水流量在各条路径留下能见度的重要性，它表示水流在选择路径的时候它的能见度信息素是否得到重视的程度，当它的数值很大的时候，表示流水选择长度距当前位置相对短的路径概率很大； k 为水流可以备选的所有可能经过的路线之和； E_m 为当前牵引车 m 可以服务点的集合； d_{ij} 为工位点 i 和 j 之间的距离； T_{ij} 为第 t 次迭代时，路径 i 到 j 的水流量。

在路径选择时，为了避免浪费，接下来对原有的路径选择公式进行了改进。在实际生产车间，牵引车所运行的不仅和工位之间的距离有关，而且还和工位到库存中心（始发点）距离有关，所以文中引入节省区间（ C_{ij} ）的概念：

$$C_{ij} = d_{ai} + d_{aj} - d_{ij} \quad (12)$$

如果小车在服务过程中节省区间 $d_{ai} + d_{aj} \geq d_{ij}$ ，那么牵引车在物流通道中行驶服务完 i 工位点后就驶往邻近的 j 工位点，为 j 点服务；如果小车在服务过程中节省区间 $d_{ai} + d_{aj} < d_{ij}$ ，那么牵引车在物流通道中行驶服务完 j 工位点后返回库存中心（始发点），重新为下一工位点服务。

牵引车选择路径的概率公式重新拓展为：

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{T_{ij}(t) * [C_{ij}(t)]^\alpha * \left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^\beta}{\sum_{mek} T_{ij}(t) * [C_{ij}(t)]^\alpha * \left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^\beta}, & \text{若 } j \in \{\text{允许 } E_m\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

3.3 局部搜索策略

为了降低算法难度，改善以往文献局部搜索的局限性，同时具有计算的精度，文中采用以下搜索方法：在所有的迭代完成之后，接下来对所输出的路线长度大小降序列出来；采用 Dijkstra 方法对列出路线相对较短的 s 条路线展开局部搜索，该搜索方法只对迭代时路径相对较短部分进行局部精确搜索，很大程度上节省了时间，加强了搜索的精度。

3.4 算法的计算步骤

1) 各个参数初始化。令迭代计数器 $N_0=0$ ，调整当前最优流水路线长度为 g 、迭代数最大为 H 、工位

之间间隔为 d_{ij} ($i, j=1,2,3...n$) 当前最优路径表 h 、启发式信息 η_{ij} ($i, j=1,2,3...n$) 路径上的水流量为 T_{ij} ($i, j=1,2,3...n$)、初始化 m 个水流的禁忌表 h_q ($q=1,2,3...n$) 所走过的路径长度为 l_q ($q=1,2,3...n$)。

2) 水流路径流动方式的确定。全部水流无序的放置在始发位置，并将选择的坐标信息加入到初始水流的禁忌表 h_q 中，并不断更新所走过的路线长度为 l_q 的值。

3) 水流量的更新方式。局部水流的跟新方式按照式 (9) 进行更新，水流的全局动态更新按照式 (9)，(10) 进行更新。并不断把当前路线水流的存量与系统目前发现的水流流动的最大路径相比较，对当前最优路径上的水流量进行全局的动态更新。

4) Dijkstra 局部搜索方式。对完成的路径构建后，降序排列所有路径上保留的水流量的值，对排列靠前的路径进行局部搜索，并不断更新 h_q 和 l_q 。

5) 迭代循环。若 $N_0 \leq g$ ，则返回步骤 2) 持续迭代，否则算法结束，输出最优结果。

4 案例分析

某汽车零部件包装基地总装配线共有 18 个工位点，同时有 3 辆牵引车为这些工位点服务，假设牵引车匀速行驶的速度为 0.7 m/s，它的最大载货量为 20 kg，单位物料的上货和卸货的时间为 80 s。库存中心和工位的坐标信息以及各工位点的需求量见表 1。

表 1 工位点的信息
Tab.1 Workstation information

工位编号	需求量	坐标/m
库存中心	0	(0,0)
1	7	(-2,10)
2	9	(-4,10)
3	6	(-6,10)
4	2	(-8,10)
5	12	(-10,10)
6	4	(-12,10)
7	3	(-14,10)
8	3	(-16,10)
9	8	(-18,10)
10	5	(2,10)
11	6	(4,10)
12	5	(6,10)
13	6	(8,10)
14	8	(10,10)
15	14	(12,10)
16	9	(14,10)
17	8	(16,10)
18	2	(18,10)

4.1 仿水流算法求解

为了验证该仿水流算法对VRP问题求解的可行性,下面采用Matlab编程实现,计算结果见表2。当 $\alpha=1, \beta=3, \rho=0.1$,牵引车1需要来回完成3车次的配送任务,该车配送服务时间为3618s,平均迭代次数为25次;当 $\alpha=2, \beta=3, \rho=0.5$,牵引车2需

要来回完成2次的配送任务,该车配送服务时间为3745s,平均迭代次数为28次;当 $\alpha=1, \beta=3, \rho=0.5$,牵引车3需要来回完成3次的配送任务,该车配送时间为3560s,平均迭代次数为24次;在牵引车完成所有配送服务时,取3辆车中的最大值3745s,平均迭代次数28次。得出最终的结果为计算机共耗时35s。

表2 仿水流算法计算结果
Tab.2 Calculation results of imitation flow algorithm

车辆编号	配送路径	α	β	ρ	配送耗时/s	迭代次数
	库存中心→工位1→工位3→工位4→库存中心					
牵引车1	库存中心→工位5→库存中心	1	3	0.1	3618	25
	库存中心→工位2→工位7→库存中心					
牵引车2	库存中心→工位6→工位8→工位9→工位10→库存中心	2	3	0.5	3745	28
	库存中心→工位12→工位13→工位14→库存中心					
牵引车3	库存中心→工位11→工位17→工位18→库存中心	1	3	0.5	3560	24
	库存中心→工位15→库存中心					
	库存中心→工位16→库存中心					

4.2 基本蚁群算法求解

采用基本蚁群算法求解此类问题,得到的结果见表3。 α 值的大小表明留在每个结点上的信息量受重视的程度, α 值越大,蚂蚁选择以前经过的路线的可能性越大,过大会使搜索过早陷于局部最小解; β 的大小表明启发式信息受重视的程度, β 值越大,蚂蚁选择离它近的工位的可能性也越大; ρ 表示信息素的保留率,如果它的值取得不恰当,得到的结果会很差。得出最终的结果为计算机共耗时42s。

表3 基本蚁群算法求解结果
Tab.3 Solution results of basic ant colony algorithm

α	β	ρ	配送耗时/s	平均迭代次数
1	3	0.1	3826	269
2	3	0.5	3957	287
1	3	0.5	3675	256

4.3 禁忌搜索方法求解

禁忌搜索具有局部搜索方法的优点,它的计算没有其他算法复杂,它适合用于解决NP问题,但禁忌搜索方法的使用,对局部搜索会产生难以克服的搜索贪婪的情况。该案例运用禁忌搜索方法会使局部搜索

太贪婪地对某一个局部区域以及领域搜索,这会导致开始找到的最优解会自动忽略,从而出现搜索时间过长,在利用禁忌搜索方法求解得到最优解时,需要耗时46s。

4.4 基于遗传算法求解

针对物流配送路径优化的特点,文中构造了求解该问题常见的遗传算法。

1) 编码方法的选定。采用二进制编码,用0表示库存中心,用1表示某个工位(n 个1表示有 n 个不同的工位)。由于库存中心有 m 辆牵引车,则最多存在 m 条配送的路径,每一条都是起始于库存中心,也结束于库存中心,这样, n 个1或者 $m-1$ 个0随机排列成一条染色体,对应于一条配送路径的方案。

2) 初始种群的生成。随机产生一个 n 个1和 $m-1$ 个0的序列,形成一条染色体, r 条不同的染色体形成初始的种群(种群大小为 r)。

3) 适应度的评估。对于每一条染色体所对应的配送路径方案,要对各条逐一进行判断,看其能否满足约束的条件,如果不满足,则为不可行路径,同时计算它的目标函数值。

4) 选择操作、结合使用最优的个体保留策略,将每代种群中的 N 条染色体按适应度从大到小排列,适应度最高的染色体复制直接进入下一代,采用

轮盘赌法产生下一代种群的另 $N-1$ 条染色体, 计算出种群中全部染色体适应度的总和, 接着计算每一条染色体适应度所占的比例, 将其结果作为被选中的概率。

5) 交叉操作。选择操作产生的新种群, 除了第 1 条染色体外, 其他 $N-1$ 条染色体根据交叉概率采用两点交叉法进行交叉配对。

6) 变异操作。根据变异的概率, 假如染色体的某基因片段发生变异, 则染色体上的另一片段也要同时发生变异。

基于上述操作步骤, 对于案例一共求解 10 次得到的结果耗时都大于仿水流算法 (最大值为 3746 s), 且计算机耗时为 39 s。

4.5 方法比较

仿水流算法在解决 VRP 问题时, 可以看出来它不但使迭代的次数减少, 而且也明显缩短了计算机运算的时间, 其比基本蚁群算法、遗传算法、禁忌搜索方法计算机耗时分别减少了 7, 4, 11 s。在解决 VRP 问题的时候使用仿水流算法不仅节约了时间, 而且全局和局部的搜索能力也得到了加强。

5 结语

针对汽车零部件工业包装生产企业, 再结合牵引车物料配送问题的特点, 对物料配送路径优化问题进行了研究, 得到以下结论。

1) 针对问题的特点, 建立新的生产制造车间物料准时配送的数学模型。模型中, 添加了人们容易忽略的装、卸货时间方程, 使配送的时间更加合理化。

2) 对传统路径选择方式和局部搜索策略进行了改进, 使算法的全局搜索能力得到一定的加强, 同时重新定义拓展了路径选择的概率公式, 更加符合路径选择的实际情况。

3) 设计改进了一种新提出的仿水流算法进行求解, 数据中可以看到迭代次数减少了 259 次, 计算机运行耗时也减少了 7 s。

4) 文中的数学模型和它的求解方法具有很强的实际和理论价值, 企业可以利用计算机自动生成装、卸货路径配送方案, 大大节约了人工指导牵引车配送的成本。

参考文献:

- [1] DANTZIG G B, RAMSER J H. The Truck Dispatching Problem[J]. *Management Science*, 1959(6): 80—91.
- [2] AUBUUDAYASANKAR S, GANESH K, LENNY K S C, et al. Modified Savings Heuristics and Genetic Algorithm for Bi-objective Vehicle Routing Problem

- with Forced Backhauls[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 39(3): 2296—2305.
- [3] QURESHI A G, TANIGUCHI E, YAMADA T. Exact Solution for the Vehicle Routing Problem with Semi Soft Time Windows and Its Application[J]. *Procedia-social and Behavioral*, 2015, 2(3): 5931—5943.
- [4] 冯爱军. 基于蚁群算法的汽车零部件循环取货车路径优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- FENG Ai-jun. Vehicle Routing Optimization Research Based on Ant Colony Algorithm[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [5] CALVO R W A. Memetic Algorithm and a Tabu Search for the Multi-compartment Vehicle Routing Problem[J]. *Computers and Operations Reserch*, 2013, 35(5): 1725—1741.
- [6] MAZZEO S, LOISEAU. An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing[J]. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2004, 18: 181—186.
- [7] NAGY G. Heuristic Algorithms for Single and Multiple Depot Vehicle Routing Problems with Pickups and Deliveries[J]. *European Journal of Operational*, 2015(1): 126—141.
- [8] BOYSEN N, BOCK G. Scheduling Just In-Time Part Supply for Mixed-Model Assembly Lines Original Research[J]. *Structures*, 2016, 215(1): 15—25.
- [9] 陈湘洲. 一种改进的整数编码遗传算法在车辆路径优化问题中的应用[J]. *南方冶金学院学报*, 2004, 25(1): 36—41.
- CHEN Xiang-zhou. An Improved Integer-coded Genetic Algorithm for Vehicle Routing Optimization[J]. *Journal of Southern Metallurgical University*, 2004, 25(1): 36—41.
- [10] 李旭. 车辆路径问题的改进遗传算法[J]. *山东建筑大学学报*, 2016(4): 148—158.
- LI Xu. Improved Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2016(4): 148—158.
- [11] 张勇. 基于改进蚁群算法物流配送路径优化研究[J]. *控制工程*, 2015, 22(2): 252—256.
- ZHANG Yong. Research on Logistics Distribution Route Optimization Based on Improved Ant Colony Algorithms[J]. *Control Engineering*, 2015, 22(2): 252—256.
- [12] 张景玲, 李川. 制造业装配线物料准时配送路径优化研究[J]. *机械制造*, 2012, 50(2): 1—4.
- ZHANG Jing-ling, LI Chuan. Research on Material Punctual Distribution Route Optimization of Manufacturing Assembly Line[J]. *Machinery Manufacturing*, 2012, 50(2): 1—4.
- [13] 郭辉煌, 李军. 物流配送车辆优化调度理论与方法

- [M]. 北京: 中国物资出版社, 2001.
- GUO Hui-huang, LI Jun. Theory and Method of Optimal Vehicle Scheduling in Logistics Distribution [M]. Beijing: China Materials Press, 2001.
- [14] 李兵, 王小霞. 基于仿水流算法的最短路径问题求解[J]. 唐山学院学报, 2017, 23(2): 45—49.
- LI Bing, WANG Xiao-xia. Shortest Path Problem Solution Based on Simulated Flow Algorithms[J]. Journal of Tangshan University, 2017, 23(2): 45—49.
- [15] 李晋航. 制造企业装配线物料准时配送路径优化问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 47(3): 108—112.
- LI Jin-hang. Research on Material Punctual Distribution Route Optimization of Assembly Line in Manufacturing Enterprises[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 47(3): 108—112.
- [16] 田宇. 云南白药公司物流配送路径优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- TIAN Yu. Yunnan Baiyao Company Logistics Distribution Route Optimization Research[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.