



无人机危险品集装箱堆场 巡查路径优化研究

傅正堂¹, 胡志华¹, 费海平²

(1. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306
2. 工业互联网创新中心(上海)有限公司, 上海 201306)

摘要: 针对危险品集装箱堆场的巡逻问题, 提出使用无人机进行危险品集装箱堆场巡逻的方法, 通过和车辆路径 CVRP 问题的类比, 得到优化后的无人机路径。该方法是在传统扫描算法的基础之上, 提出一种全扫描的方法, 使用模拟退火算法不断求出无人机当前阶段的飞行距离, 再将该距离与无人机的额定航程进行对比, 直到求得距离大于无人机航程时, 扫描停止, 并将该点除去, 保留之前的点和路径, 形成一条无人机的飞行路径。最后通过和传统方式的比较, 得出使用无人机巡逻可以比人工巡逻节省 73.33% 的时间, 节约 66.21% 运营成本。

关键词: 无人机巡逻; 模拟退火; 全扫描法; 算法改进

中图分类号: U691.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-7029(2017)11-2467-06

Hazardous container yard patrol optimization research with UAVS

FU Zhengtang¹, HU Zhihua¹, FEI Haiping²

(1. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Industrial Internet Innovation Center, Shanghai 201306, China)

Abstract: In the paper, a method was proposed that used the UAV to patrol the hazardous cargo wharf. Compared with the capacitated Vehicle Routing Problem, the optimized routing was obtained. A whole sweep algorithm was developed to handle this problem based on the traditional sweep algorithm. In the whole sweep algorithm, the simulated annealing was first used to get the distance of the UAV in real time. Second, the real-time distance was compared with the UAV' maximum flying distance until the distance is found to be longer than the maximum flying distance. Then, sweeping was terminated and the previous vertex and routes were saved so that the optimized routing was obtained. Finally, this patrol method was compared with the traditional method, which would save 73.33% time and 66.21% cost.

Key words: UAV patrol; simulated annealing algorithm; whole sweep algorithm; algorithm improvement

随着天津港爆炸等港口安全事件的发生, 危险品集装箱堆场的安全检查工作也日益引起管理部门的重视。同时伴随中国石化产业和液体化工产业

对危险货物进出口需求的快速发展, 铁路、港口的危险货物吞吐量也在不断增长。根据海关的数据统计, 每年中国危化品等有毒有害物质的进出口种类

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471109); 2017 年上海海事大学研究生创新基金资助项目(2017YCX025); 工业互联网综合实验床平台基金资助项目(ZN2016020109)

通信作者: 胡志华(1978-), 男, 湖南宁乡人, 教授, 博士, 从事物流系统工程研究; E-mail: zhhu@shmtu.edu.cn

有近 3 000 种, 金额在 400 亿美元以上。而危险品集装箱堆场则是主要对危险品进行装卸、存储的堆场。该类货物的特性决定了危险品集装箱堆场长期处于潜在的危险中, 需要特别关注安全、环保标准和专业化运作。传统的危险品集装箱堆场巡查工作主要采用人工方式, 该种方式误差率较大, 且负责巡查工作的作业人员也有一定的安全隐患。当危险品集装箱堆场繁忙之时, 大量的危险品货物也会给巡查带来很大的困难, 从而埋下一些安全的隐患。

Krishnamoorthy 等^[1]对无人机的飞行路径的动态性进行了相关的研究; Joanne 等^[2]对海运危险品的风险防控做出了相应的研究; LI 等^[3]对海运化学危险品的运输及存放做出了相关的研究; Boysen 等^[4]对铁路集装箱货物的调度及检查问题做了相关的研究; Boysen 等^[5]对铁路运输的堆场问题进行了研究, 并提出了相应的改进措施。贾斌等^[6]提出了通过构建无线传感网络进行危险品货场的监管; 张书明等^[7]对我国铁路危险品的运输进行了进一步的调研; 邵苇苇^[8]以北方国际物流有限公司的危险品堆场管理为例, 进行了实践研究; 黄兴建等^[9]利用动态模糊理论对铁路危险品的管理进行了评价; 黄国华^[10]对港口危险货物作业管理系统进行了相关的研究; 赵恺等^[11]提出了构建港口枢纽的预警系统; 戴春妮等^[12]提出了危险品码头的事故防治与技术支持; 骆勤^[13]针对上海内河危险品码头的安全管理提出了相关的对策和建议; 乔福超等^[14]提出了一种新的无人机协同模式; 饶卫振等^[15]提出了一种求解 CVRP 问题的快速贪婪式算法。针对目前危险品码头巡查机制, 提出了一种新的构想, 使用多台无人机进行大规模危险品码头巡查, 每台无人机搭载图像采集器, 将采集的图像实时传回码头控制中心, 控制中心的人员可以由传回的图像进行分析, 判断和识别, 从而进一步降低危险品码头的营运风险。在无人机的调度优化方面, 通过构造数学模型, 并编程求解的方式进行解决。传统的扫描法一般都只能解决容量约束问题, 而无人机的航程既是容量又是距离, 所以对扫描法做出了相关的改进, 同时结合模拟退火算法进行无人机路径优化, 使派出的无人机总的行驶距离最短, 从而节约运营成本。

1 问题描述

针对传统危险品集装箱堆场的安全问题, 大部

分学者还是从人员管理、制度规范等角度进行文字性的描述和建议, 对危险品集装箱堆场巡逻这一方向并未作出过多深入的研究和改进。为了高效率的使用无人机进行危险品集装箱堆场的巡查工作, 本文采用了提出了一种“串联电阻丝”式的巡逻模式, 对危险品存放的大型集装箱堆场, 可以对集中堆放的子集装箱群进行分区, 再按照划分的分区, 在单台无人机的航程约束下, 分派无人机进行巡逻。对于子集装箱群的巡逻, 使用类似于电路图中电阻丝的图形, 进行“Z”字型路径飞行, 从而尽最大可能的捕捉到整个子集装箱群的实时情况, 如图 1 所示。

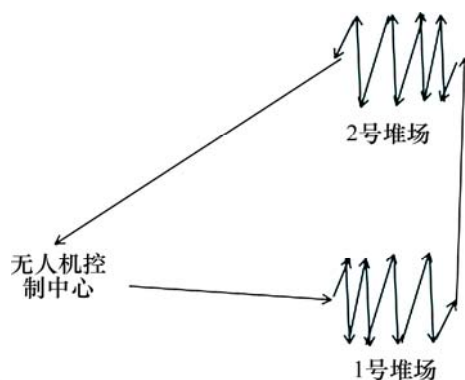


图 1 飞行示意图

Fig. 1 Flight schematic

2 数学建模

2.1 符号说明

假设有 1 个无人机控制中心, 周边需要待检验的子集装箱群数量为 N , 任意两节点形成的边为 d_{ij} , 每一个子集装箱群需要无人机巡逻的里程数分别为 l_1, l_2, \dots, l_n , 每架无人机最大飞行距离为 L_{\max} , 第 k 架无人机巡逻的子集装箱群集合为 V_k 。

2.2 飞行调度模型

假设 $\max(d_{ij} + d_{ji}) + \max(l_i) < L_{\max}$, 即表示任意一台无人机至少可以完成 1 个集装箱堆场的巡逻任务并返回飞控中心。在安排无人机巡逻路径时, 应该还要满足以下几个条件: 1) 每辆无人机都以无人机控制中心作为起点和终点; 2) 每一个子集装箱群只用一台无人机进行巡逻; 3) 每台无人机的飞行距离都不超过最大航程 L_{\max} ; 4) 每架无人机在航程范围内允许巡逻多个子集装箱群。

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (d_{ij} x_{ijk} + l_i) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (d_{ij} x_{ijk} + l_i) \leq L_{\max} (1 \leq k \leq m) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 (1 \leq i \leq n) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 (1 \leq j \leq n) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{0jk} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{i0k} = m (1 \leq i, j \leq n) \quad (5)$$

$$\sum_{i,j \in S \times S} x_{ijk} \leq |S| - 1, S \subset V_k \quad (6)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{无人机 } k \text{ 经过弧}(i, j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$(0 \leq i, j \leq n, 1 \leq k \leq m) \quad (7)$$

式(1)为目标函数,表示要求所有 m 台无人机飞行总路径最短。式(2)为每辆无人机的飞行距离约束。式(3)表示每个子集装箱群都恰好由一台无人机进行巡逻。式(4)表示每个子集装箱群也恰好被一台无人机巡逻。式(5)表示所有无人机的起点和终点都在无人机飞行控制中心。式(6)表示 m 台无人机在子集装箱群之间飞行的路径轨迹都恰好为一个 Hamilton 简单圈。式(7)是一个整数式,从这个式子中,可以看出,该模型变量很多,是一个 NP -Hard 问题,该问题的求解只能借助模拟退火,遗传算法等智能算法。

3 扫描算法改进

3.1 传统扫描算法简介

传统扫描算法一般应用在求解车辆路径优化问题中,即从车场所在点向任意方向引一条射线沿顺时针或逆时针方向旋转,将扫到的点按顺序加入到路径当中,直到加入某点时货物量超出车载量,则剔除此点得到一个分组并确定一条路线,继续旋转构造新的路径直到所有点都被分组并安排到路线中,结果通常被用作一组可行的初始解,再结合其他算法(遗传算法或者模拟退火等智能算法)进行优化。

3.2 对扫描法的改进

本文提出在子集装箱群进行“Z”字型巡逻,无人机在进行“Z”字型巡逻时所飞过的路径长度也要被考虑到单架飞机总的续航长度之中,这样类比于传统扫描法解决车辆问题,本文的在子集装箱群进行巡逻时的路径长度 l_i 就类比于车辆问题的需求量 q_i ,无人机在子集装箱群之间的飞行就类似于车辆在在站点之间行驶。

基于以上特征,提出一种全扫描的方法,即每扫描过一个点后,就将无人机从控制中心起飞到返回控制中心的总的路径长度 L' 求出,再和无人机的最大飞行距离 L_{\max} 进行比较,如果 $L' < L_{\max}$,则继续进行扫描,将下一个子集装箱群纳入扫描区域,重复上述步骤,直到 $L' > L_{\max}$,此时,就将该子集装箱群排除,将之前的子集装箱群串联起来,形成一条巡逻路径。

4 模拟退火算法

1) 控制参数的设置

需要设置的主要控制参数有降温速率 q , 初始温度 T_0 , 结束温度 T_{end} , 以及链长 L 。

2) 初始解

对于 n 个子集装箱群的 TSP 问题,得到的可行解就是 $1 \sim n$ 的一个排序,其中每一个数字为对应子集装箱群的编号,如对 9 个子集装箱群的 TSP 问题 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, 则 $1|9|6|4|3|7|5|2|8$ 就是一个可行解。

3) 解变换生成新解

通过对当前解 S_1 进行变换,产生新的路径数组及新解,这里采用的变换是产生随机数组的方法来产生将要交换的 2 个子集装箱群,用二领域变换方法产生新的路径,即新的可行解 S_2 。例如: $n=9$ 的时候,产生两个在区间 $[1, 9]$ 范围内的随机整数 r^1 和 r^2 , 确定 2 个位置,将其对换,如 $r^1=3$, $r^2=5$, 则对下数列进行处理, $1|9|6|4|3|7|5|2|8$, 交换 3 和 5 的位置, $1|9|3|4|6|7|5|2|8$ 。

4) Metropolis 准则

若无人机路径长度函数为 $f(s)$, 则当前飞行路径函数 $f(s_1)$, 新飞行路径函数 $f(s_2)$, 路径差为 $df = f(s_2) - f(s_1)$, 则 Metropolis 准则为

$$p = \begin{cases} 1, & df < 0 \\ \exp(-\frac{df}{T}), & df \geq 0 \end{cases}$$

如果 $df < 0$ ，则以概率 1 接受新的路径；否则以概率 $\exp(-\frac{df}{T})$ 接受新的路径。

5) 降温

利用降温速率 q 进行降温，即 $T = q \times T$ ，若 T 小于结束温度，则停止迭代，输出当前状态，否则继续迭代。

5 算例分析

5.1 实验设置

假设一个危险品集装箱堆场有 12 个危险品集装箱群，分别离散分布在集装箱堆场的 12 个位置，假设无人机最大航程 14 km(取自大疆精灵 4 参数)，因为每个集装箱群的大小可能有所不同，所以，无人机在进行“Z”字型搜索的路径长度也是不等，每个群的搜索长度值存放在元胞矩阵 A 中，每个集装箱群的坐标位置放在元胞矩阵 XY 中，相应数据如表 1 所示，无人机控制中心坐标为(50, 60)。实验所使用的电脑配置为 win 7 64 位操作系统，4G 运行内存，CPU 频率为 1.8 GHz。实验所得的与电脑性能有关的数据都是基于该电脑的。

表 1 位置参数设置

Table 1 Position parameter setting

集装箱群编号	横坐标/km	纵坐标/km	巡逻总长/m
1 号群	840	550	1 300
2 号群	810	450	1 100
3 号群	40	800	900
4 号群	960	930	1 200
5 号群	940	800	1 400
6 号群	760	890	1 800
7 号群	820	310	2 200
8 号群	600	440	1 200
9 号群	490	940	1 800
10 号群	190	580	2 100
11 号群	0	710	1 500
12 号群	70	660	1 300

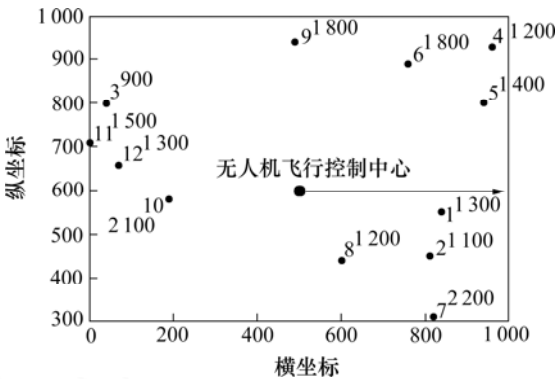


图 2 全扫描示意图

Fig. 2 Full scan diagram

5.2 基于全扫描模拟退火算法

步骤 1：在如图所示构建极坐标系，逆时针旋转极轴，使其触碰到第一个点，将该点所需要的无人机飞行距离加上往返距离后，得出的路径长度小于无人机的航程(14 km)，所以继续逆时针旋转极轴。

步骤 2：不断旋转极轴，计算出无人机的飞行距离，和无人机最大航程进行比较，直到有一个点的加入，使得飞行距离超过无人机的最大航程，此时除去这个点，保留之前的点和路径。此时，第 1 台无人机飞行总距离 $S=12\ 083\ m$ ，在最大飞行航程内。

步骤 3：当第 1 架无人机路径规划完成后，进入下一台无人机的路径规划，具体做法与上述步骤相同，直到所有子集装箱群全部被覆盖，此时第 2 台无人机总的飞行距离 $S=9\ 487.843\ 3\ m$ ，满足最大航程的约束，此时，结束算法，记录路径。

通过上述步骤，可以得到无人机的飞行路线，并且所有点都已经被覆盖，算法结束。

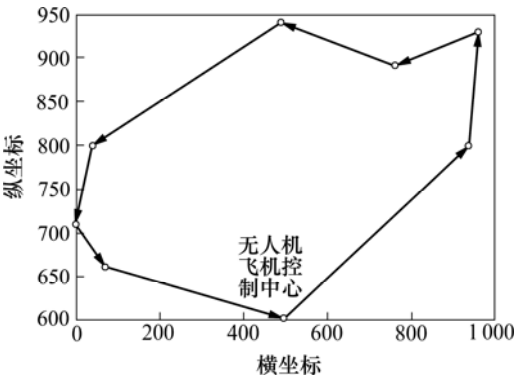


图 3 第 1 架无人机轨迹图

Fig. 3 First UAV path diagram

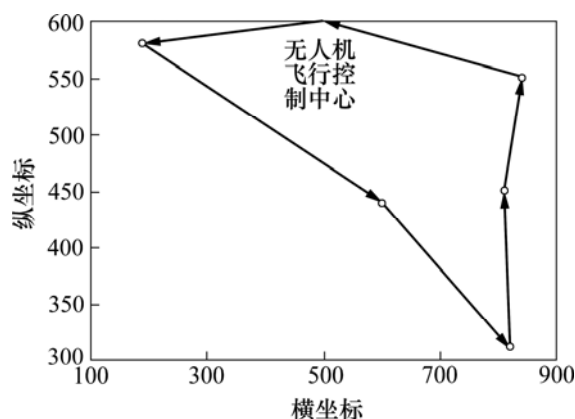


图 4 第 2 架无人机轨迹图

Fig. 4 Second UAV path diagram

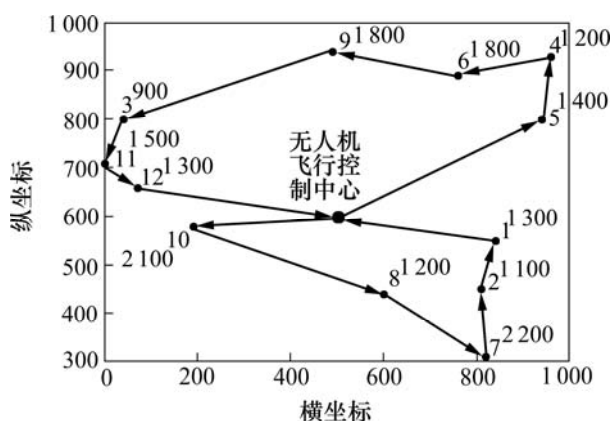


图 5 无人机巡逻轨迹图

Fig. 5 Final diagram

6 与传统方式的比较

6.1 作业时间比较

传统作业方式一般采取人工巡查, 巡查速度一般为 40 m/min, 而无人机的速度为 150 m/min, 在完成上述案例时, 派出 2 位工作人员巡查分别耗时为 302.07 min 和 237.19 min, 总耗时为 539.26 min, 而使用无人机巡查时, 则分别耗时 80.55 min 和 63.25 min, 总耗时为 143.8 min 同比缩短 73.33% 的巡逻时间。

6.2 运营成本比较

假设每台无人机使用寿命为 3 a, 每台无人机的固定成本 $C_{\text{固定}1} = 1000$ 元, 后台数据库系统每年的运营成本 $C_{\text{固定}2} = 12000$ 元, 无人机每年运行维护成本为 6000 元/a。而每 d 负责巡查的工作人员, 假设每天工资为 100 元/d。在无人机使用寿命 3 a 的

期限内, 2 台无人机总计消耗资金 74 000 元, 而负责巡查的 2 位工作人员在 3 a 内总计消耗资金 219 000 元, 同比节约资金 66.21%。

7 结论

1) 针对危险品集装箱堆场的巡逻问题, 提出了一种全新的巡逻方式, 即使用无人机进行危险品集装箱堆场巡逻, 该方法既可以作为主要巡逻方式, 也可以作为其他巡逻方式的补充。

2) 通过和车辆路径 CVRP 问题的类比, 得到了无人机路径优化的方法。并在传统扫描算法的基础之上, 提出了一种全扫描的方法: 使用模拟退火算法不断求出无人机当前阶段的飞行距离, 再将该距离与无人机的航程进行对比, 直到求得距离大于无人机航程时, 扫描停止, 并将该点除去, 保留之前的点和路径, 就可以形成无人机的飞行路径。

3) 通过和传统方式的比较, 可以得出可以比人工巡逻节省 73.33% 的时间, 运营成本节约 66.21%, 从而证明了该方法明显优于传统的方法, 可以考虑在企业进行实践和推广。

参考文献:

- [1] Krishnamoorthy K, Park M, Darbha S, et al. Approximate dynamic programming applied to uav perimeter patrol[M]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2013: 119-146.
- [2] Joanne Ellis. Undeclared dangerous goods-Risk implication for maritime transport[J]. WMU Journal of Maritime Affairs, 2010(2): 5-27.
- [3] LI Jianmin, SONG Shaozhen, DIAO Yalin, et al. A study on safety of transportation system of marine dangerous chemicals based on energy concept[C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2015: 159-170.
- [4] Boysen Nils, Flidner Malte, Jaehn Florian, et al. A survey on container processing in railway yards[J]. Transportation Science, 2013, 47(3): 312-329.
- [5] Boysen Nils, Jaehn Florian, Pesch Erwin. Scheduling freight trains in rail-rail transshipment yards[J]. EN, 2011,

- 45(2): 199–211.
- [6] 贾斌, 孙超奇, 董立峰, 等. 基于无线传感网的铁路危险品运输监控系统设计[J]. 科技创新与应用, 2012(27): 21–22.
- JIA bin, SUN Chaoqi, DONG Lifeng, et al. The railway dangerous goods transport monitoring system based on wireless sensor network design[J]. Technology Innovation and Application, 2012(27): 21–22.
- [7] 张书明. 对我国铁路发展危险品物流的思索[J]. 中国高新技术企业, 2008(7): 63–64.
- ZHANG Shuming. Thinking of railway dangerous goods logistics development in our country[J]. China High Technology Enterprises, 2008(7): 63–64.
- [8] 邵苇苇. 北方国际物流有限公司危险品仓储管理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- SHAO Weiwei. Northern international logistics corporation' warehouse management research[J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [9] 黄兴建, 王伟. 基于动态模糊理论的铁路货运安全评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1421–1425.
- HUANG Xingjian, WANG wei. Railway freight transportation based on the theory of the dynamic fuzzy safety evaluation research[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1421–1425.
- [10] 黄国华. 港口危险货物作业管理系统设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- HUANG Guohua. Dangerous cargo management system design and implement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [11] 赵恺, 初秀民, 王耀兵. 港口物流枢纽危险品监控与预警系统[J]. 水运工程, 2013(5): 130–134.
- ZHAO Kai, CHU Xiumin, WANG Yaobin. Port logistics hub for the monitoring and early warning system of dangerous goods[J]. Marine Traffic Engineering, 2013(5): 130–134.
- [12] 戴春妮, 谢耀峰. 危险品集码头库场事故的防治及技术支持[J]. 常州工学院学报, 2008, 21(1): 306–308.
- DAI Chunni, XIE Yaofeng. Dangerous goods wharf library accident prevention and technical support[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2008, 21(1): 306–308.
- [13] 骆勤. 上海内河危险品集装箱堆场的安全管理及监管对策[J]. 港口管理, 2012(7): 53–54.
- LUO Qin. Shanghai inland container yard of dangerous goods safety management, and regulatory measures[J]. Port Management, 2012(7): 53–54.
- [14] 乔福超, 王昌金. 按关注度分布的多无人机协同巡逻航路规划[C]// 海洋发展与指挥控制会议. 烟台, 2013: 144–147.
- QIAO Fuchao, WANG Changjin. According to the distribution of attention of unmanned aerial vehicle (uav) cooperative patrol route planning[C]// Conference on Marine Development and Command and Control. Yantai, 2013: 144–147.
- [15] 饶卫振, 金淳. 求解大规模 CVRP 问题的快速贪婪算法[J]. 管理工程学报, 2014(2): 45–54.
- RAO Weizhen, JIN Chun. Fast greedy algorithm of solving large scale CVRP problem[J]. Journal of Management Engineering, 2014(2): 45–54.