

# 电力网络机巡智能调度编排系统设计

周强辅<sup>1</sup>, 廖如超<sup>1</sup>, 廖建东<sup>1</sup>, 李成功<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司机巡管理中心, 广州 510160; 2. 华北计算技术研究所, 北京 100083)

**摘要:** 目前, 大多数国家电网公司仍采用“人巡+机巡”协调定期检查的方式对输电线路进行维护; 定期检验计划由人工安排, 耗费大量人力物力; 为了解决上述问题, 提出电力网络机巡智能调度编排系统设计, 考虑到各城市年检的个性化需求, 将年检计划的调度问题转化为 NP 问题, 采用禁忌搜索算法结合遗传算法实现年检计划的智能调度; 通过仿真实验验证了算法的可行性, 证明了禁忌搜索算法与遗传算法的结合可以有效提高机器巡更网格的效率。

**关键词:** 电力巡检计划编排; NP 问题; 智能编排; 遗传算法; 禁忌搜索

## Design of Intelligent Dispatching and Arrangement System for Power Network Machine Patrol

ZHOU Qiangfu<sup>1</sup>, LIAO Ruchao<sup>1</sup>, LIAO Jiandong<sup>1</sup>, LI Chengong<sup>2</sup>

(1. Machine patrol management center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510160, China;

2. North China Institute of computing technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** At present, most State Grid Corporations still adopt the way of “Man Patrol + Machine Patrol” coordinated regular inspection to maintain the transmission line. The regular inspection plan is still manually arranged, which consumes a lot of manpower and material resources. In order to solve above problems, the design of intelligent dispatching and scheduling system for power network machine patrol is proposed. Considering the personalized needs of each city’s annual inspection, the scheduling of inspection plan is transformed into the NP problem, and the tabu search algorithm combined with the genetic algorithm is used to realize the intelligent scheduling of inspection plan. The feasibility of algorithm is verified by the simulation experiment, the combination between the tabu search algorithm and the genetic algorithm is proved to effectively improve the efficiency for the Machine Patrol grid.

**Keywords:** power inspection scheduling; NP problem; intelligent scheduling; genetic algorithm; tabu search

## 0 引言

定期对输电线路进行巡检能够维持电网整体长期平稳运行。随着国民经济的不断发展, 输电线路快速增长, 输电网络大幅增加, 电力网络巡检的复杂度以及工作强度也随之增大, 单纯依靠人工巡视线路已经无法满足实际需求。因此, 我国积极引进新技术, 开拓新思路, 将越来越多的人工操作改为机械化工作, 提高了整体线路巡检的自动化程度, 降低了工作强度以及安全风险。

文献 [1] 在求解不确定环境下物流配送车辆路径问题时提出了一种基于插入启发式的混合遗传算法。该算法采用改进的推入-碰撞-抛出算法来处理问题的模糊性。并通过对比其他算法, 证明了遗传算法在求解这一问题上的优越性。文献 [2] 提出了基于装卸过程问题分析的数学模型, 建立了基于运动路径简洁性、集装箱之间安全距离等要求的最优路径目标。最后, 通过采用遗传算法进行了解。

本文在上述研究的基础上, 设计了电力网络机巡智能调度编排系统。

## 1 机巡计划智能调度编排研究现状

### 1.1 国外发展现状

美国 Entergy 电力公司基于视频以及数据监控采集系统在线监测输电线路, 监控系统终端设备安装在输电线路的杆塔或输电线路路上。通过该系统持续返回线路自身运行状态以及周围环境状况, 例如温度、风速数据等, 并将采集到的数据上传至服务器端, 由服务器端负责分析当前输电线路的状态以及可能存在的问题, 然后转发至上层系统处理。

澳大利亚电力公司设有对口部门负责整体输电网络的运行维护, 采用一体化管控、分别控制的两级管理模式。根据自身实际情况, 加强基层电网自主控制, 降低整体管控负荷, 提高运行效率。澳大利亚电力公司采用输电线路防盗报警监控系统, 完成了线路监测的实时化、智能化、自动化, 大幅提升了运维人员的工作效率, 且降低了出错几率。

英国国家电网公司通过在线监测系统实施输电线路环境管控、预防性检修、输电线路改造、输电装置更新等方式保障输电线路的高可用性。在提高监测系统自动化程度

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-12-10。

作者简介: 周强辅 (1976-), 男, 贵州安顺人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事电力自动化电网智能巡检技术方向的研究。

引用格式: 周强辅, 廖如超, 廖建东, 等. 电力网络机巡智能调度编排系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 163-168.

的同时，首先在人员管理考核机制上，将关键运维参数纳入绩效指标考核来提高管理水平，例如输电线路故障率、事故处理响应时长等。其次，采用定期巡检方式，及时发现问题，预防性地对线路进行维护。

文献 [3] 在解决印刷和制版行业车间调度问题时。提出了基于 NSGA-II 的快速最优遗传算法。为避免陷入局部最优解，该算法的初始种群一部分随机生成，一部分使用禁忌搜索算法生成的部分种群，最后经过实验证明对这种算法求解效率的可用性及其高效性。文献 [4] 提出了基于遗传算法的路径选择和通行能力分配问题的综合优化算法，并将该算法用于解决当前大规模计算机通信网络中链路容量的分配和路由的选择问题，并通过实验证明了基于该算法可以节省大量的带宽并降低信号延迟。文献 [5] 提出了在移动范围和时间双重约束下灵活作业车间调度问题求解模型。采用基于禁忌搜索的遗传算法，解决了资源分配和资源排序问题。

### 1.2 国内发展现状

我国南方电网自 2004 年开始首先采用直升机巡线，开创了输电线路巡检的新局面。此后随着无人机技术的发展与进步，我国低空空域的不断开放，无人机巡检逐步应用到实际工作当中。2013 年，国家电网开始在多个省份试点运行直升机、无人机以及人工相结合巡检工作模式，从中总结经验教训，完善电力巡线标准体系。由此开始，“人巡为主，机巡为辅”逐渐向“机巡为主，人巡为辅”转变。2020 年南方电网公司依据各地市供电局提供的待巡线路需求，结合线路运维策略、人机资源、机巡区域天气数据以及地理特征等信息，规划出直升机+固定翼飞机相结合的机巡计划方案。基本完成了“机巡为主，人巡为辅”的输电线路协同巡检目标。

文献 [6] 提出了基于多种群连续遗传算法的机器人逆运动学算法。使用多种群算法避免了遗传算法容易陷入局部最优值的缺陷，提高了收敛精度；通过连续遗传算法，加快了收敛速度。文献 [7] 采用改进布谷鸟搜索算法求解多任务分配及路径规划问题。改进的策略中融合了遗传算子、2-opt、模拟退火算法。文献 [8] 通过选择和变异操作采用自适应调整的方法对传统的遗传算法进行了改进，提高了遗传算法的寻优效率。通过引入模拟退火算法的 Metropolis 准则，避免了陷入局部最优值的问题。文献 [9-12] 针对不同的问题，在传统遗传算法的基础上引入其他算法，通过对问题的建模与求解，均证实了遗传算法在解决 NP 问题上的可行性。

人工编排机巡调度计划的方式已逐渐无法满足中心未来的机巡作业管理需求，迫切需要机巡作业计划管理向着自动化、智能化方向发展。本文将通过研究机巡计划智能调度和风险管理技术，引入多目标多约束规划方法，实现机巡计划编排的自动化、智能化，以减轻人员工作负荷，提升机巡资源使用效率以及机巡作业效果。

## 2 电力网络机巡智能调度编排系统原理及结构

按照《2019 版广东电网有限责任公司一输电线路运维策略及管控机制实施细则》，年度计划中，运维策略主要考虑日常运维。

日常运维是指按照日常巡视计划定期对输电线路开展的检查及维护工作。与机巡相关的运维策略如表 1 所示。具体的，直升机精细化巡视周期是一年一次，通道巡视周期是三月一次。实施细则中对“通道巡视”的工作要求中有“在通道巡视周期内完成一次直升机精细化巡视可代替一次通道巡视”，说明年度计划中通过合理的规划“直升机精细化巡视”和“通道巡视”周期，能利用直升机精细化巡视代替一次通道巡视，输电线路的年度巡视次数应为四次<sup>[13-15]</sup>。

表 1 输电线路日常巡视运维策略表

线路区段	巡视项目	周期
直升机可巡视线路区段	直升机精细化巡视	1 年 1 次
	通道巡视	3 月 1 次

在年度计划编排方案中，按照要求：

- 1) 在每一地市输电线路需完成 1 次直升机精细化巡视，1 次直升机通道巡视，2 次固定翼通道巡视；
- 2) 直升机在地市之间的调机作业距离最短；
- 3) 满足时间约束：指定运维时间约束和禁止运维的时间约束；
  - (1) 指定运维时间：某一地市要求在指定的时间段内进行一次直升机精细化巡视；
  - (2) 禁止运维时间：某一地市禁止在指定的时间段有巡视作业。
- 4) 同一地市不同巡视任务应在这一年度计划中均匀分布。
- 5) 同一地市相邻巡视任务时间间隔应满足最小时间间隔；
- 6) 直升机精细化机队之间总工作时长尽量均衡。
- 7) 应考虑到季节对巡视作业的影响，即不同地区在不同的季节可用于巡视的天数不同。

综上，设计电力网络机巡智能调度编排系统整体结构，如图 1 所示。

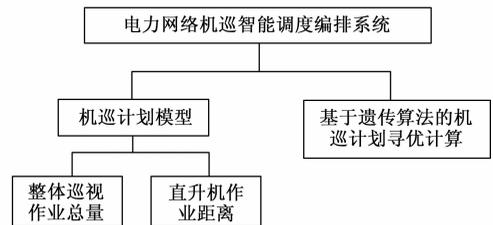


图 1 电力网络机巡智能调度编排系统整体结构

## 3 机巡计划模型搭建

在上述电力网络机巡智能调度编排系统整体结构下，

搭建机巡计划模型。主要设计了直升机精细化作业工作量模型, 整体巡视作业总量模型及直升机  $i$  在地级市之间调机作业距离模型, 得到其目标函数, 并基于遗传算法的实现目标模型寻优。

### 3.1 符号说明

- $DisCity_i^j$ : 地市  $i$  与地市  $j$  之间的距离。
- $w_i$ : 子目标函数  $i$  的权重比例。
- $HFL_i$ : 地市  $i$  需要直升机精细化巡视作业的线路长度。
- $HTL_i$ : 地市  $i$  需要直升机通道巡视作业的线路长度。
- $FTL_i$ : 地市  $i$  需要固定翼通道巡视作业的线路长度。
- $HFS_t_i$ : 直升机精细化巡视在地市  $i$  开始作业的时刻。
- $HTS_t_i$ : 直升机通道巡视在地市  $i$  开始作业的时刻。
- $FTS_t_i^j$ : 固定翼通道巡视在地市  $i$  第  $j$  次开始作业的时刻。
- $HR_i$ : 直升机  $i$  作业任务地市顺序集合。
- $FR_i$ : 固定翼作业任务地市顺序集合。
- $HFE$ : 直升机精细化巡视作业效率 (千米/天)。
- $HTE$ : 直升机通道巡视作业效率 (千米/天)。
- $FTE$ : 固定翼通道巡视作业效率 (千米/天)。
- $StCity_i^j$ : 地市  $i$  第  $j$  次巡视任务开始时间。
- $ADP_i^j$ : 考虑天气因素, 地市  $i$  在  $j$  月可用于作业天数与总天数比例。

$AppDay_i$ : 地市  $i$  指定运维时间段, 在该时段内需完成一次精细化巡视。

$ForbidDay_i$ : 地市  $i$  禁止运维时间段, 在该时段内不得有运维任务。

$TMinInvl$ : 最小机巡时间间隔。

$f_{bool}(x)$ : 布尔函数表达式, 当  $x$  为真时  $f_{bool}(x) = 0$ , 否则  $f_{bool}(x) = 1$ 。

### 3.2 目标函数的确定

直升机  $i$  精细化作业工作量:

$$HFWL_i = \sum_{j=1}^{HR_i} \frac{HR_i HFL_j}{HFE ADP_{HFS_{HR_i}}^{HFS_{HR_i}}} \quad (1)$$

直升机  $i$  通道作业工作量:

$$HTWL_i = \sum_{j=1}^{HTL_i} \frac{HTL_j}{HTE ADP_{HTS_{HTL_i}}^{HTS_{HTL_i}}} \quad (2)$$

固定翼通道作业工作量:

$$FTWL_i = \sum_{j=1}^{FTL_i} \frac{FTL_j}{FTE ADP_{FTS_{FTL_i}}^{FTS_{FTL_i}}} \quad (3)$$

整体巡视作业总量:

$$WorkLoad = \sum_{i=1}^n HFWL_i + \sum_{i=1}^n HTWL_i + \sum_{i=1}^n FTWL_i \quad (4)$$

直升机  $i$  在地级市之间调机作业距离:

$$HDI_s_i = \sum_{j=1}^{HR_i} DisCity_j^{j+1} \quad (5)$$

直升机总调机作业距离目标函数:

$$HDis = \frac{1}{\sum_{j=1}^n HDI_s_j} \quad (6)$$

直升机精细化巡视工作量方差:

$$HFS^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{\sum_{j=1}^n HFWL_j}{n} - HFWL_i \right)^2}{n-1} \quad (7)$$

直升机通道巡视工作量方差:

$$HTS^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{\sum_{j=1}^n HTWL_j}{n} - HTWL_i \right)^2}{n-1} \quad (8)$$

地市  $i$  相邻巡视任务开始时间的差值总和:

$$StD_i = \sum_{j=1}^{HR_i} |StCity_i^{j+2} - StCity_i^{j+1}| - |StCity_i^{j+1} - StCity_i^j| \quad (9)$$

所有地市巡视任务之间均匀分布目标函数:

$$StD = \sum_{i=1}^n StD_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{HR_i} |StCity_i^{j+2} - StCity_i^{j+1}| - |StCity_i^{j+1} - StCity_i^j| \quad (10)$$

地市  $i$  指定运维时间目标函数:

$$f_{bool}(HFS_t_i \in AppDay_i) \quad (11)$$

地市  $i$  禁止运维时间目标函数:

$$f_{bool}((HFS_t_i \cup HTS_t_i \cup FTS_t_i) \notin ForbidDay_i) \quad (12)$$

运维时间约束函数:

$$OperT = \sum_{i=1}^n f_{bool}(HFS_t_i \in AppDay_i) + f_{bool}((HFS_t_i \cup HTS_t_i \cup FTS_t_i) \notin ForbidDay_i) \quad (13)$$

地市运维最小时间间隔目标函数:

$$Tinvl = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{HR_i} f_{bool}(StCity_i^{j+1} - StCity_i^j \geq TMinInvl) \quad (14)$$

总体目标函数为:

$$Z = \min \cdot (w_1 HDis + w_2 HFS^2 + w_3 HTS^2 + w_4 StD + w_5 OperT + w_6 Tinvl) \quad (15)$$

## 4 基于遗传算法的机巡智能调度编排系统设计

因考虑到固定翼飞机数量足够, 因此在设计遗传算法时, 只考虑数量有限的用于精细化作业的直升机以及通道作业的直升机。在完成上述两种作业直升机的编排后, 根据直升机作业任务的间隔, 补充固定翼飞机完成剩余的通道巡视作业<sup>[16-18]</sup>。

在进行遗传算法的迭代过程中, 因作业性质不同, 只有同类的编码可以进行交叉、变异互换, 即对于作业地市顺序编码, 某地市的精细化巡视只能与其他地市的精细化巡视互操作, 某地市的通道巡视只能与其他地市的通道化巡视互操作; 直升机选择编码中用于精细化的直升机只能与其他精细化直升机互操作, 通道作业直升机只能与其他通道作业直升机互操作<sup>[19-21]</sup>。

表 2 作业地市顺序编码

地市 1		地市 2		地市 $n$	
精细化 巡视	通道 巡视	精细化 巡视	通道 巡视	精细化 巡视	通道 巡视
1	2	3	4	$2n-1$	$2n$

表 3 直升机选择编码

用于精细化作业的直升机				用于通道作业的直升机			
1	2	...	$n$	1	2	...	$m$
1	2	...	$n$	A	B	...	M

4.1 种群示例

表 4 作业地市顺序种群

顺序	1	2	3	4	...	$k$
个体 1 地市机巡顺序	13	6	17	10	...	$l$
个体 2 地市机巡顺序	21	8	11	16	...	$m$
个体 $n$ 地市机巡顺序	$a$	$b$	$c$	$d$	...	$p$

表 5 直升机选择种群

顺序	1	2	3	4	...	$2k-1$	$2k$
个体 1	3	C	4	A	...	2	B
个体 2	2	A	1	C	...	1	D
个体 $n$	3	B	2	D	...	3	A

4.2 交叉操作

作业地市顺序：采用两点交叉，随机生成两个位置，交叉两个基因在这个位置之间的基因，并删去重复，补全缺失。

直升机选择：互换任务基因的执行机器编码。

4.3 变异操作

作业地市顺序：随机生成两个位置，交换两个位置的任务编码。

直升机选择：随机生成位置，如果该任务编码可由多个机队中的任意一个执行，随机生成新的机器编码。

4.4 禁忌搜索

在年度计划优化中，可选参数多，搜索空间大，容易导致算法执行时间长，优化效率低，甚至陷入局部最优解。故进一步采用禁忌搜索算法，对个体进行搜索改进，以种群进化结合个体进化的方式，提升算法的求解性能。

禁忌搜索算法采用邻域选优的搜索方法，为了避免循环，算法将最近接受的一些移动放在禁忌表中，在以后的迭代中加以禁止。即只有不再禁忌表中的较好解（可能比当前解差）才能接受作为下一代迭代的初始解。随着迭代的进行，禁忌表不断更新，经过一定的迭代次数后，最早进入禁忌表的移动就从禁忌表中解禁退出，迭代直至得到符合条件的可行解或者达到结束条件。

4.5 整体算法流程

如图 2 所示。

5 实验结果与分析

5.1 实验对象

广东各地市的 2019 年输电线路运维需求如表 6 所示。

在制定的 2019 年年度计划中，共使用了 2 架直升机精细化巡视，1 架直升机快巡。

以百度地图为数据来源，以韶关市为原点，建立 19 个

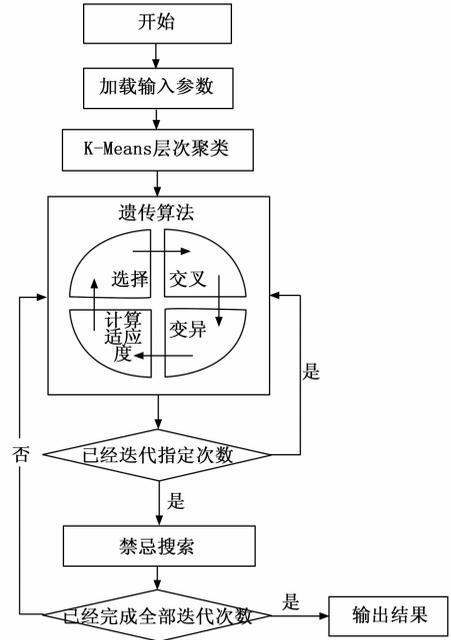


图 2 算法流程

地市的相对坐标如表 7 所示。

表 6 2019 年地市输电线路运维需求

(单位：千米)

	直升机精细化巡视	直升机通道巡视	固定翼通道巡视
韶关	1 161	3 663	2 383.12
珠海	693.4	699.9	164.94
汕头	639	801	199.25
佛山	806.9	2 370	87.69
江门	3 218	3 453.9	2 917.9
湛江	1 348	1 797.9	1 409.15
茂名	1 308	2 266.8	1 862.99
肇庆	1 008	1 986.9	1 637.79
惠州	3 609	3 484.8	2 221.77
梅州	1 523	2 823.9	1 187.96
汕尾	911.4	1 254.9	1 003.34
河源	1 258	2 499.9	1 405
阳江	1 410	1 852.8	1 182.97
清远	2 325	4 026	4 237
东莞	1 231	1 899.9	195.82
中山	819.6	1 020	239.06
潮州	272.7	681	270.74
揭阳	974.2	1 290.9	865.55
云市	607	2 037	883.22

以表 7 中的相对坐标数据，画出各地市的分布图如图 3 所示。

机巡任务受天气影响明显，在雨雪等天气无法正常执行任务。以下为各地市近年的历史天气数据，以月为单位，计算每个月中适合执行机巡任务的天气所在的天数，部分统计结果如表 8 所示。

根据历史运维经验，本文做如下假定：

1) 直升机精细化巡视的效率为 150 千米/天;

表 7 地市相对坐标 千米

地区	X 坐标	Y 坐标
韶关市	0	0
珠海市	-3.563 79	-307.422
汕头市	348.896 3	-172.083
佛山市	-51.255 4	-214.093
江门市	-57.478 2	-269.324
湛江市	-359.494	-426.523
茂名市	-296.468	-377.675
肇庆市	-124.1	-208.852
惠州市	90.858 63	-204.655
梅州市	281.854 5	-60.658 3
汕尾市	197.977 6	-244.899
河源市	124.595 5	-126.995
阳江市	-180.054	-353.448
清远市	-61.636 2	-134.103
东莞市	18.809 98	-213.139
中山市	-19.191 6	-272.912
潮州市	337.923 1	-138.534
揭阳市	310.029 2	-152.282
云浮市	-171.823	-225.77

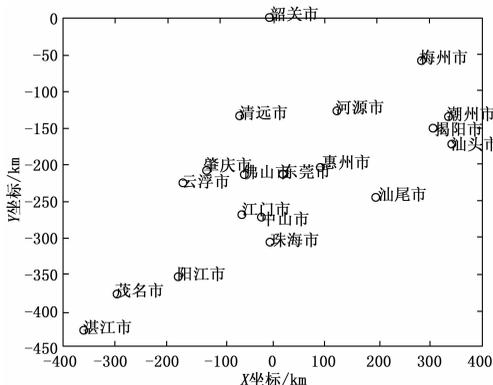


图 3 各地市相对位置

表 8 各月份适合执行机巡任务天数所占的比例

地名/月份	01 月	02 月	03 月	04 月	05 月
韶关市	0.684 588	0.610 236	0.440 86	0.425 926	0.347 67
珠海市	0.824 373	0.800 885	0.667 87	0.585 185	0.440 86
汕头市	0.838 71	0.791 339	0.726 619	0.633 333	0.483 871
佛山市	0.812 903	0.723 881	0.566 308	0.525 926	0.308 244
江门市	0.813 62	0.751 969	0.592 058	0.511 111	0.376 344
湛江市	0.792 115	0.720 472	0.618 705	0.611 111	0.369 176
茂名市	0.827 957	0.782 609	0.633 094	0.585 185	0.354 839
肇庆市	0.767 025	0.700 787	0.539 568	0.474 074	0.308 244
惠州市	0.817 204	0.775 591	0.627 24	0.533 333	0.358 423
梅州市	0.831 541	0.775 591	0.616 487	0.585 185	0.412 186
汕尾市	0.831 541	0.826 772	0.716 846	0.640 741	0.448 029
河源市	0.802 867	0.759 843	0.591 398	0.551 852	0.376 344
阳江市	0.813 62	0.708 661	0.548 387	0.514 815	0.365 591
清远市	0.867 857	0.850 394	0.849 462	0.785 185	0.738 351
东莞市	0.810 036	0.755 906	0.610 108	0.537 037	0.362 007
中山市	0.817 204	0.782 609	0.624 549	0.585 185	0.455 197
潮州市	0.792 115	0.758 893	0.666 667	0.596 296	0.476 703
揭阳市	0.802 419	0.767 717	0.665 09	0.607 407	0.433 692
云浮市	0.770 609	0.771 654	0.543 165	0.5	0.329 749

2) 直升机通道巡视效率为 450 千米/天;

3) 固定翼通道巡视的效率为 90 千米/天;

4) 受军事活动等其他用户占用空域影响, 一个月有 15 天能申请到空域, 执行巡视任务;

其他要求:

1) 湛江、茂名、阳江、江门中应该有一个地市的直升机精细化巡视是在 7~9 月; 惠州、汕尾、揭阳、汕头中应该有一个地市的直升机精细化巡视是在 7~9 月。

2) 禁止运维时间: 湛江 3~4 月禁止执行直升机巡视。

### 5.2 实验结果

本文采用 Matlab 编制求解算法, 迭代情况如图 4 所示。

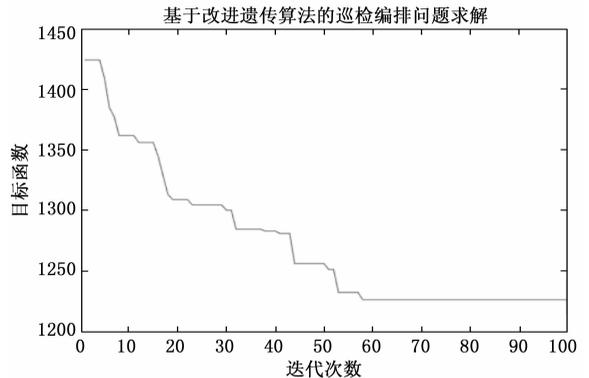


图 4 算法迭代结果

由图中可以看出在迭代大约 60 次之后, 遗传算法已经稳定找到最优解。

2 架精细化作业直升机以及 1 架通道作业直升机工作量分布图如图 5 所示, 各机队的巡视工作量如表 9 所示。

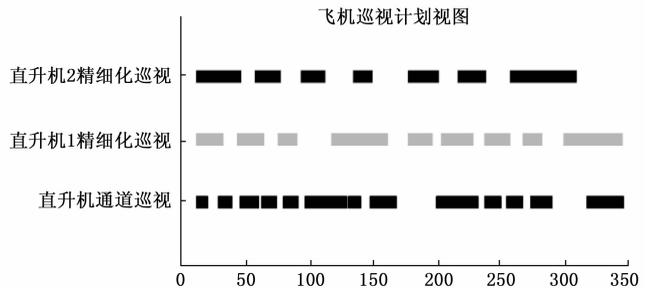


图 5 最优结果

表 9 各机队工作量

机队	工作量/天
精细化直升机 1	136
精细化直升机 2	150
通道直升机	131

分析上述实验结果可知, 其中精细化作业直升机工作量分别为 136 天, 150 天。精细化作业直升机 1 工作量达到了精细化作业直升机 2 工作量的 90.67%, 同类型机型之间, 工作量比较均衡。本文采用禁忌搜索算法结合遗传算法智能调度年检计划的实施, 能够通过最小迭代次数得出最优调度结果。

各地市机巡计划甘特图如图 6 所示。

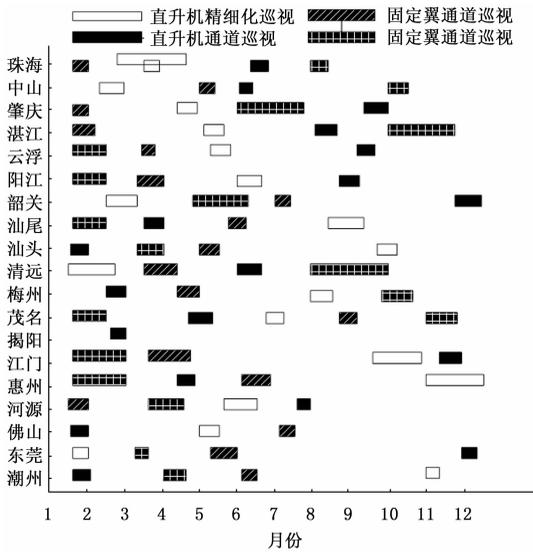


图 6 各地市机巡计划甘特图

如图 6 所示，每一地市输电线路均包含 1 次直升机精细化巡视，1 次直升机通道巡视，2 次固定翼通道巡视，且不同巡视任务应在这一年度计划中均匀分布。其中，阳江的直升机精细化巡视是在 7~9 月；揭阳的直升机精细化巡视是在 7~9 月，满足指定运维时间需求。湛江 3~4 月无直升机巡视计划，满足禁止运维时间需求。

本文所设计系统采用遗传算法时对直升机进行编排后，采用禁忌搜索算法求解符合各地巡视条件的最优机巡计划。为此所设计电力网络机巡智能调度编排系统能够满足各城市年检的个性化需求，具有一定的实际应用性。

## 6 结束语

在实际的机巡作业编排过程中，实际工作需求要比常规的 NP 问题更加多样化，各变量之间的关系也更复杂。而且随着输电网络不断扩展，人工编排已经完全不能满足机巡计划的要求。此时需通过借助算法将计划编排转化为 NP 问题，并在 NP 问题的基础上增加特性需求，例如指定运维时间、禁止运维时间等。传统算法通过枚举或者分支定界法理论上可以得出全局最优解，但是随着机队数量的增加，求解时间会呈现指数级增长，因此不能采用传统算法进行求解。遗传算法根据大自然的演变规律提出，用目标函数来体现优胜劣汰机制，在解决复杂的组合优化问题时，通常能够比传统算法更快地获得较好的优化结果。而禁忌搜索算法的引入，通过维护禁忌表，避免了遗传算法容易陷入局部最优解情况的发生。两者相结合达到了很好的收敛精度以及收敛速度。

### 参考文献:

[1] LI Y, MING K L, TAN Y, et al. Sharing economy to improve routing for urban logistics distribution using electric vehicles [J]. Resources Conservation and Recycling, 2020, 153 (2): 104585.  
 [2] EL-ABBASY M S, AHMED E, ZAYED T, et al. Multi-level

fleet size optimization for containers handling using double-cycling strategy [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 170 (1): 114526.  
 [3] LIN Y, LIU T, CHEN F, et al. An energy-efficient task migration scheme based on genetic algorithms for mobile applications in CloneCloud [J]. The Journal of Supercomputing, 2020, 11 (4): 5220-5236.  
 [4] MARTINEZ S, PÉREZ E, EGUÍA P, et al. Model calibration and exergoeconomic optimization with NSGA-II applied to a residential cogeneration [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 169: 114916.  
 [5] ASHTIANI A F, PIERRE S. Power allocation and resource assignment for secure d2d communication underlying cellular networks: a tabu search approach [J]. Computer Networks, 2020, 178 (12): 107350.  
 [6] 林 阳, 赵 欢, 丁 汉. 基于多种群遗传算法的一般机器人逆运动学求解 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (3): 1-8.  
 [7] 谢永盛, 曾箫箫, 冯文健. 改进布谷鸟搜索算法在多机器人任务分配及路径规划中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38 (2): 285-290.  
 [8] 赵丽娜, 刘培玉, 朱振方. 自适应遗传算法在特征选择中的改进及应用 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (7): 39-41, 64.  
 [9] 王 涛, 范晓波, 胥小波. 基于遗传算法的非监督摘要提取 [J]. 通信技术, 2021, 54 (5): 1120-1125.  
 [10] 宁桂英, 曹敦度. 混合差分进化算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2020, 38 (6): 101-106, 122.  
 [11] 刘 明, 索良泽. 基于遗传算法的流动车间作业调度 [J]. 新型工业化, 2018, 8 (5): 75-80.  
 [12] 张文霞. 遗传算法在港口集装箱装卸顺序中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39 (2): 144-146.  
 [13] 张 磊. 基于北斗卫星的狭窄路段交通拥堵智能控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 121-125.  
 [14] 李 鹤, 姜德文. 基于改进的蚁群算法 (ACO) 的混合多目标 AGV 调度 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (6): 209-212.  
 [15] PATHAK P K, YADAV A K. Design of battery charging circuit through intelligent MPPT using SPV system [J]. Solar Energy, 2019, 178 (1): 79-89.  
 [16] RUI X, ZENG Z, ZHANG Y, et al. Design and experimental investigation of a self-tuning piezoelectric energy harvesting system for intelligent vehicle wheels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69 (2): 1440-1451.  
 [17] KIM M G, LEE J I. Implication of LOCA characteristics of large PWR and SMR for future development of intelligent nuclear power plant control system [J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 127 (5): 237-247.  
 [18] 肖艳炜. 基于大电网的智能调度控制系统智能告警设计研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2019 (2): 29-32.  
 [19] 牛晓玲. 基于大电网的智能调度控制系统的智能告警设计 [J]. 微型电脑应用, 2019, 35 (7): 118-120.  
 [20] SOHET B, HAYEL Y, BEAUDE O, et al. Coupled charging and driving incentives design for electric vehicles in urban networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 31 (1): 42-53.  
 [20] 段燕茹. 基于智能电网的电力调度自动化与控制系统实现 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (4): 189-193.