

# 基于最短路径的巡检线路排班优化研究

## 摘要

工厂巡检排班是生产计划中的重要一环,对能否保证正常生产有着决定性的作用。各个巡检点的耗时、周期固定的情况下,本文通过两点之间的连通关系构建了有权无向连通图,针对不同情形下的巡路线和排班问题,利用最小生成树、最优 Hamilton 圈算法、多旅行商问题等方法,综合分析了所需巡检工人数量、最优巡检路线以及排班计划,分别建立了数学建模。

**针对问题一**,不考虑巡检人员休息时间,采用固定上班时间情况下,首先根据附件中的连通及边权关系,采用 floyd 算法构建出巡检点之间的最短距离矩阵;通过 TSP 单旅行商(最优 hamilton 圈)方法, LINGO 编程求解得到最优 hamilton 巡检总时间为 135 分钟,结合各个巡检点的周期,得每班次巡检人数最少为 5 人,将巡检区域分为了 5 个区域;然后利用 MTSP 多旅行商模型和最小生成树两种模型算法,分别通过最小生成树 Prim 算法和 MTSP 多旅行商模型两种方法分别建立了数学建模,利用 lingo 编程求解,对最少巡检人数和巡检路线进行了求解,分别给出了不同的巡检路线与排班计划;最后引入工人在一周内的工作量均衡度  $T_i = \frac{|t_i - M|}{\max t_i}$ ,刻画两种模型巡检路线结果的均衡性对模型结果进行了对比研究,得到方法一、二两种模型结果的均衡度分别为 6.71%和 3.35%,说明 MTSP 方法模型结果更优。

**针对问题二**,考虑巡检员的休息时间和进餐时间情形,首先通过对 TSP 单旅行商模型进行改进,建立了最优 Hamilton 圈模型,利用 LINGO 软件求解得到单圈巡检最短时间为 183 分钟,结合巡检最小巡检周期得最少需要 6 人完成巡检任务;然后利用 MTSP 多旅行商模型,通过 lingo 编程软件求解出 6 组巡视最优线路,并给出巡检人员的巡检线路和巡检的排班时间表。并通过工人一周工作量的均衡度对各组工人在一周内的工作均衡度进行了分析优化。

**针对问题三**,采用错时上班,对于问题一情形,首先通过 MTSP 多旅行商(最优 hamilton 圈)方法进行,再通过 lingo 编程软件求解出 4 组巡视最优线路,即一班只有 4 个巡检员即可完成巡检任务即一天需要 12 名工人。对比原来采用固定上班时间,一班需要 5 个巡检员,即一天需要 15 名巡检员,这样大大节省了人力资源。采用错时上班,对于问题二情形,通过 MTSP 多旅行商(最优 hamilton 圈)方法进行,排班出 5 组巡视路线,在 11:40 分钟时为满足休息时间,加入一个巡检员,即对比原来采用固定上班时间每班 6 组巡视路线,采用错时上班时间一天需要 16 名巡检员,而采用固定上班时间一天需要 18 名巡检员,这样大大节省了人力资源。

**关键词:** 巡检线路; 旅行商问题; 最小生成树; Floyd 算法;

## 一、问题的重述

## 1.1 背景知识

某化工厂有 26 个点需要进行巡检，并且每个点每次巡检需要一名工人，巡检工人的巡检起始地点在巡检调度中心（XJ0022），工人可以按固定时间上班，也可以错时上班，在调度中心得到巡检任务后开始巡检。

现需在耗费的人力资源尽可能少的情况下，安排巡检人数和巡检路线，同时还应考虑每名工人在一时间段内（如一周或一月等）的工作量尽量平衡。各个点的基本信息及连通关系图附件中给出。

## 1.2 问题一

若采用固定上班时间，不考虑休息时间，采用每天三班倒。

- (1) 每班工作 8 小时左右，每班需要多少人。
- (2) 给出巡检人员的巡检线路和巡检的时间表。

## 1.3 问题二

若巡检人员每巡检 2 小时左右就休息一次，休息 5 到 10 分钟左右，并且在 12 点和 18 点时进餐，时间为 30 分钟。

- (1) 仍采用每天三班倒，每班需要多少人。
- (2) 巡检线路如何安排，并给出巡检人员的巡检线路和巡检的时间表。

## 1.4 问题三

如果采用错时上班，重新讨论问题 1 和问题 2，试分析错时上班是否更节省人力。

# 二、问题的分析

## 2.1.对问题一的分析

对于问题一本文首先利用 MATLAB 软件处理题目已给 Excel 中的数据，采用 Prim 算法（程序见附录）求解出图的最小生成树图，并且利用最小生成树图将之分为 5 个区域，每个区域将有一个巡检员负责巡检，最后确定每个巡检员的巡检路线。但是由于此模型均衡度过大，并且没有考虑到巡检点的巡检周期，存在误差过大，本文将该模型进行优化。

利用 MATLAB 软件采用 Floyd 算法（程序见附录）算出每两个巡检点之间最短时间矩阵（见附件），利用 LINGO 软件把最短时间矩阵进行编程（程序见附录）算出巡检的最优哈密顿圈，并且算出巡检完一圈的最短时间为 135 分钟，由于最短的巡检周期为 35 分钟，则  $135 \div 35 \approx 4$ （向上取整数），即每班最少需要 4 个人才能完成每个点巡检一次，但由于考虑到每个巡检点的巡检周期，若每班只需要 4 个人则将不能在每个巡检点的巡检周期到时完成巡检，最后将模型进一步优化，对最优哈密顿圈进行分区，最后分组确定每班人数的人数，并且安排出巡检路线和巡检时间表，最后通过均衡度分析，确定模型巡检路线的设计接近最优路径。

对哈密顿圈划分的区域进行分组要有如下原则：

- (1) 所有的点都必须包括在里面。
- (2) 对划分的组的工作量尽可能的均衡。

(3) 尽可能的走短路，并且避免走弯路。

## 2.2 对问题二的分析

基于问题一的基础上加入了巡检员的休息时间和进餐时间，首先利用 LINGO 软件编程（程序见附录），算出巡检完所有巡检点一圈的最短时间为 183 分钟，由于最短的巡检周期为 35 分钟，则  $135 \div 35 \approx 6$ （向上取整数），即每班最少最少需要 6 个人才能在按照规定完成巡检任务。然后建立起 0-1 线性规划模型，利用 LINGO 编程（程序见附录）算出 6 组巡检路线，并给出巡检人员的巡检线路和巡检的时间表。并通过均衡度分析，说明巡检路线的设计接近最优路径。

## 2.3 对问题三的分析

相对问题一，若将固定上班时间改为错时上班时间，根据已经算出的哈密段圈对哈密顿圈进行排班，第 1 位巡检员先开始巡检，从 22 出发巡检至 25，路线为 22-20-19-20-22-23-24-9-25，当巡检完第 25 个巡检点时，第 2 位巡检员从 22 出发，沿着第 1 位巡检员的路线巡检至第 25 个巡检点，第 1 为巡检员一直沿着哈密顿圈巡检，当第二位巡检员巡检完第 25 个巡检点时，第 4 位巡检员也接着从 22 巡检点出发，这样直至 4 为巡检员都沿着哈密顿圈循环巡检，这样就能够能够在每个点的巡检周期内完成巡检任务，相比固定上班时间，节省了人力资源。

相对问题二，根据哈密顿圈进行排班，从 0:00 开始到 11:40 划分 5 条路线，由 5 个巡检人员沿着这 5 条路线进行哈密顿圈循环，在 11:40 分时为了满足中午 30 分钟的休息时间，加入一个巡检人员，从 11:40 开始上班，到 6:40 下班，从 11:40 开始由三个人巡检全部点，另外三个人休息 30 分钟后，替换 11:40 巡检的三个巡检员，当所有巡视人员都休息完毕后，从 12:45 分开始根据哈密顿圈划分 6 条路线让 6 个上班人员沿着这 6 条路线进行哈密顿圈循环。到 18 点 40 分时由 3 个人巡检全部点其余人休息 30 分钟后替换 3 个没有休息的巡检人员，直到所有巡检人员都休息完毕后从 17:05 分开始按 0:00 到 11:40 的 5 条路线进行哈密顿圈循环。

## 三、模型的假设

- (1) 正常情况下，每个巡检员一天最多工作 8 个小时，即一天三个班次中只能上其中一个班次。
- (2) 假设每天第一班第一次巡检时间都是晚上 00:00 开始。
- (3) 假设每一个巡检员都不能缺勤。

## 四、名词解释与符号说明

### 4.1 名词解释

- (1) 均衡度：衡量每班各个巡检员巡检的总时间的均匀程度。

### 4.2 符号说明

表 1 主要变量符号及意义

序号	符号	符号说明
----	----	------

1	$t_i$	第 $i$ 组巡检路线一星期的总巡检时间
2	$T_i$	第 $i$ 组巡检路线的总巡检时间的均衡度
3	$T$	各组巡检路线的巡检总时间均衡度的最大差值
4	$S$	巡检所有点一圈最短总时间
5	$s_i$	每个巡检点停留耗时
6	$c_{ij}$	第 $i$ 个巡检点到 $j$ 个巡检点所用的时间

## 五、模型的建立与求解

### 5.1 模型的知识背景

给定一个连通的赋权图  $G = \{V, E\}$ ，设  $R$  是连接节点  $V_i$  和  $V_j$  的一条路，该路的权定义为路中所有各边权之和，如果路  $R$  在所有连接节点  $V_i$  和  $V_j$  的路中权最小，则称它为  $V_i$  和  $V_j$  间的最短路。本文将各个巡检点之间的时间长度转化为各巡检点之间的权。

树是图论中的一种简单而重要的图，连通并且无圈的无向图称为树。最小生成树是网络优化中的一个重要问题，在网络设计中有广泛的应用。这些应用问题通称为最优连线问题，其实质是寻找图的最小生成树。

在图论中，经过所有顶点恰好一次的圈（路）称为哈密顿圈（路），简称 H 圈（H 路），存在 H 圈的图称为哈密顿图，简称 H 图。

旅行商问题是指在赋权图上经过每个顶点至少一次，且总长度（路径上权的总和）达到最小的闭通路。

### 5.2 模型一的准备

本文首先利用 MATLAB 软件运用 Prim 算法作出巡检点的最小生成树图，再采用 Floyd 算法算出最短时间矩阵，通过最短时间矩阵进行编程，作出最优哈密顿圈图，通过两种方法建立模型比较，再通过均衡度分析，使结果更接近最优解。

### 5.3 问题一模型的建立

#### 方法一：单旅行商模型求解

$$\min S = \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=1}^{26} (c_{ij} + s_i) x_{ij}$$

约束条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n, i \neq jn \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, j \neq i \\ x_{ij} = 0, 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, n, u_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, i = 1, \dots, n, j = 2, \dots, n, i \neq j \end{array} \right.$$

首先必须满足约束条件：对每个巡检点巡检一次且仅一次。从巡检点*i*出发到其他巡检点,表示为:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, j \neq i$$

从某个巡检点到达*j*一次且仅一次,表示为:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$$

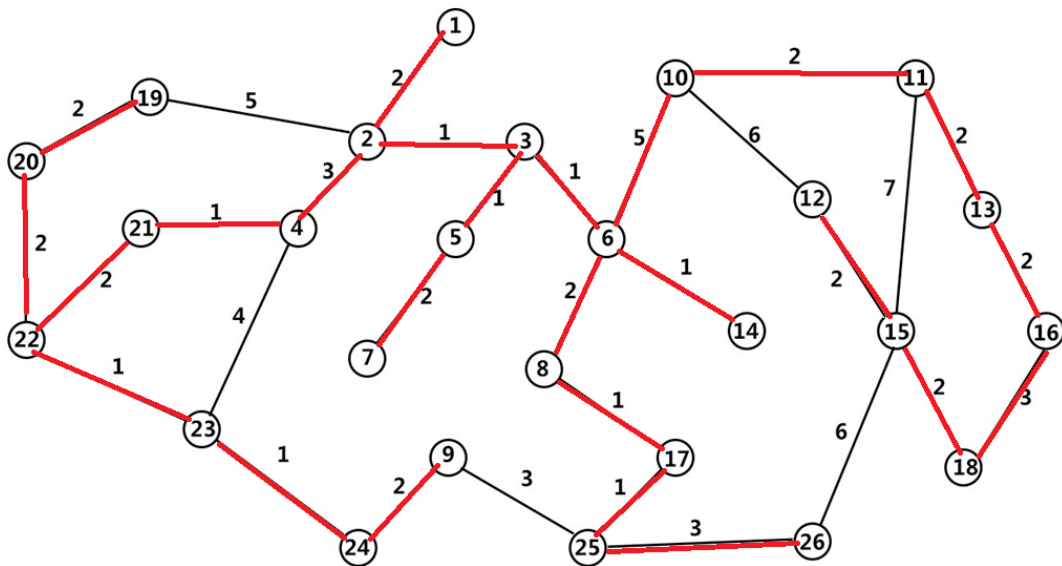
均衡度分析:

$$T_i = \frac{|t_i - M|}{\max t_i}$$

**方法二：最小生成树模型求解：**

首先利用 MATLAB 采用 Prim 算法作出巡检点的最小生成树, 如图所示:

图一：最小生成树图

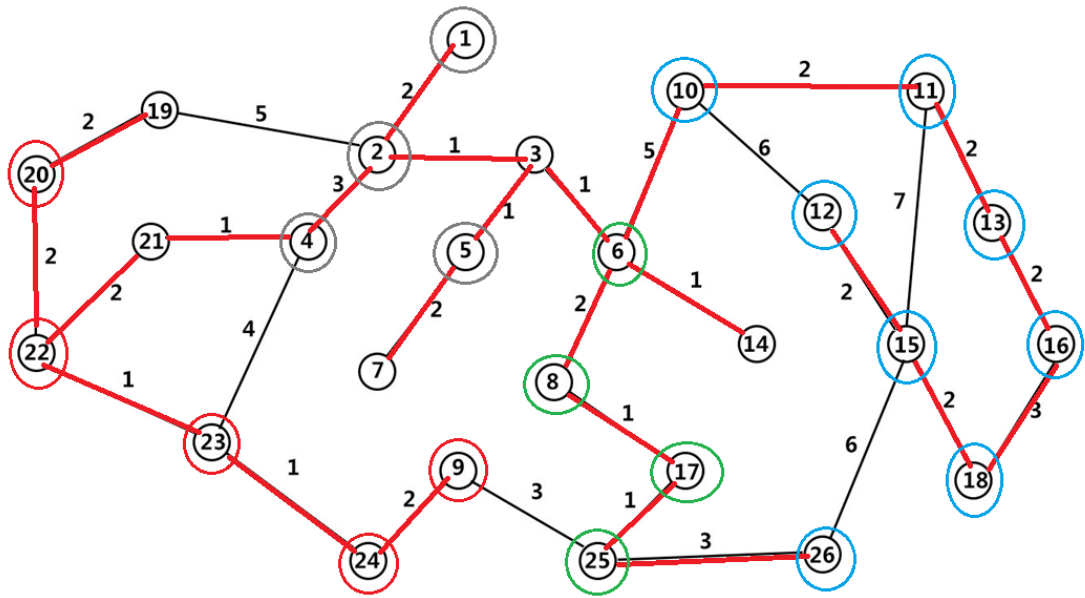


根据最小生成树图, 进行分区处理, 划分区域原则如下:

- (1) 对划分的组的工作量尽可能的均衡。
- (2) 尽可能的走短路, 并且避免走弯路。

如图二所示:

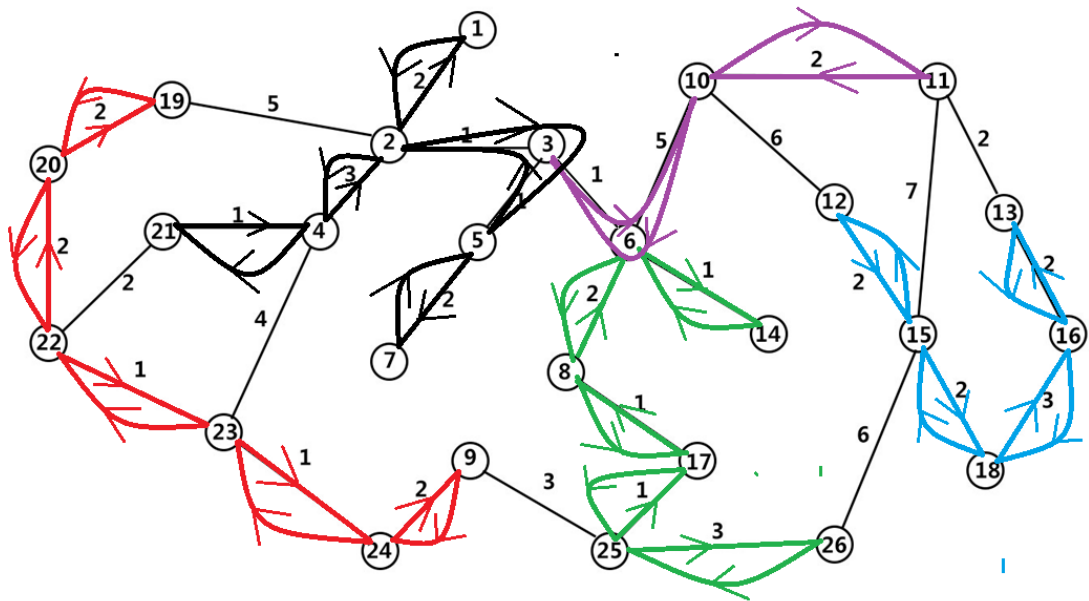
图二：最小生成树分区图



### 5.4 问题一的求解

根据分区的巡检图，红色圈代表 1 号区，灰色区代表 2 号区，蓝色代表 3 号区，绿色代表 4 号区，先把未被标圈的巡检点提取出来，把已经标圈的巡检点按区域进行分组，然后将未被标圈的巡检点按照各组尽可能巡检时间均衡的原则分入各组。最后可划分为 5 组巡检路线，每组每班有一个巡检员巡检，并且每组的巡检路线固定不变，作出巡检路线，如图三所示：

图三：最小生成树巡检路线



图三中红色代表第一组巡检路线，黑色代表第二组巡检路线，紫色代表巡检员第三组巡检路线，蓝色代表第四组巡检路线，绿色代表第五组巡检路线。巡检

员最初都是从巡检点 22 出发，经过巡检点时可选择停留与否，例如第五组巡检路线的巡检员如从巡检点 22 经过 23,34,9 可以选择不停留，到巡检点 25 才开始停留，并且各班的巡检员在沿着巡检路线循环巡检至换班。

各组的巡检路线如表二所示：

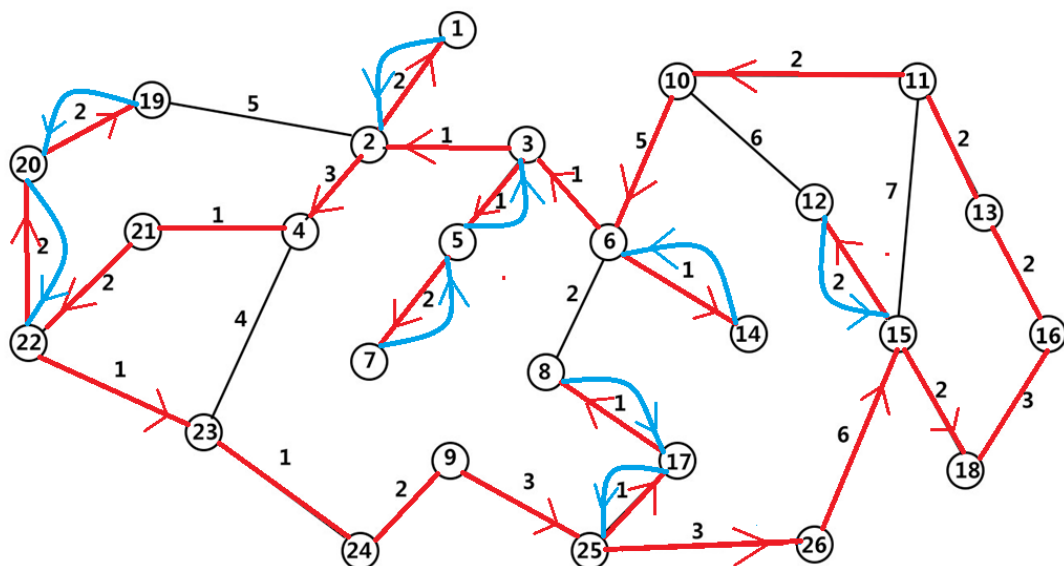
表二：各巡检员巡检路线，单位(min)

巡检组	巡检路径	不停留点	一周巡检时间
1	22-20-19-20-22-23-24-9-24-23-22		9408
2	21-4-2-1-2-3-5-7-5-3-2-3-21	3	9450
3	3-6-10-11-10-6-3	6	8361
4	15-12-15-18-16-13-16-18-15		8803
5	25-26-25-17-8-6-14-6-8-17-25		9023

根据均衡度分析： $T_i = \frac{|t_i - M|}{\max t_i} \times 100\%$ ，其中  $M$  为五个组一周巡检时间的均值。计算出各组巡检路线的均衡度分别为  $T_1=4.22\%$ ， $T_2=4.67\%$ ， $T_3=6.86\%$ ， $T_4=2.18\%$ ， $T_5=0.15\%$ ，由于各组巡检路线的巡检时间均衡程度最大差距过大，即  $T = \max t_i - \min t_i = 6.86\% - 0.15\% = 6.71\%$ ，所以将模型进行优化。

利用 MATLAB 软件采用 Floyd 算法算出每两个巡检点之间最短时间矩阵，利用最短时间矩阵进行编程作出巡检的最优哈密顿圈，如图四所示：

图四：最优哈密顿圈图



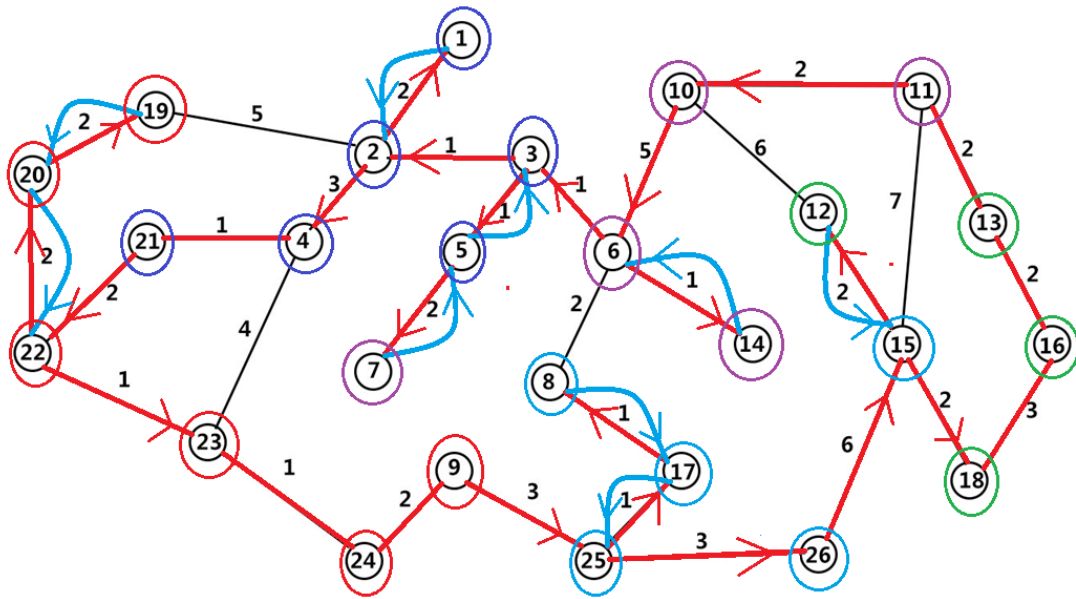
路线如下：

22-20-19—20-22-23-24-9-25-17-8-17-25-26-15-12-15-18-16-13-11-10-6-14-6-3-5-7-5-3-2-1-2-4-21-22

经过一次最优哈密顿圈的最短时间为 135 分钟，由于最短的巡检周期为 35 分钟，则  $135 \div 35 \approx 4$ （向上取整数），即每班最少需要 4 个人才能完成每个点巡检一次，但由于考虑到每个巡检点的巡检周期，若每班只需要 4 个人则在巡检点周期到时完成不了巡检任务，所以至少要需要 5 人才能完成巡检任务。最后根据最优哈密顿圈，进行划分区域处理，如图五所示，分区原则如下：

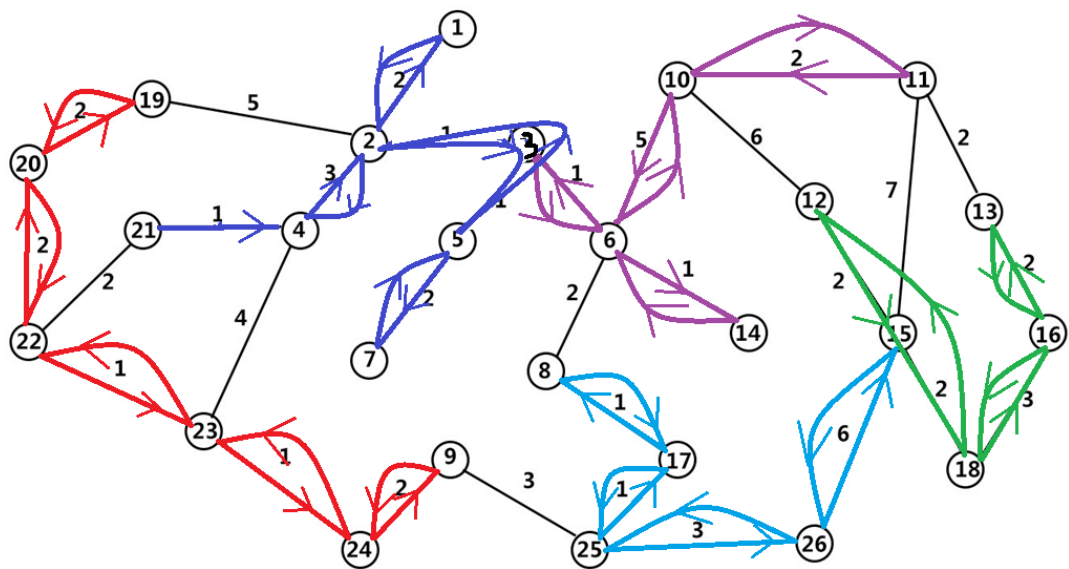
- (1) 所有的点都必须包括在里面。
- (2) 对划分的组的工作量尽可能的均衡。
- (3) 尽可能的走短路，并且避免走弯路。

图五：最优哈密顿圈分区图



根据图划分为 5 个区域，红色圈代表 1 号区域，蓝色圈代表 2 号区域，深蓝色为 3 号区域，紫色为 4 号区域，绿色为 5 号区域，这样，所有的点都分区完毕，每一个区可以分为一组，最后将分为 5 组巡检路线，每组每班有一个巡检员巡检，并且每组的巡检路线固定不变，作出巡检路线，如图六所示：

图六：最优哈密顿圈巡检路线图



图六中红色为第一组巡检路线，蓝色为第二组巡检路线，深蓝色为第三组巡检路线，紫色为第四组巡检路线，绿色为第五组巡检路线。巡检路线如表三所示：

表三：最优哈密顿圈巡检路线，单位（min）

巡检组	巡检路径	不停留点	一周巡检时间
1	22-20-19-20-22-23-24-9-24-23-22		9408
2	25-17-8-17-25-26-15-26-25		8575
3	21-4-2-1-2-3-5-7-5-3-2-4-21	3	9450
4	3-6-14-6-10-11-10-6-3		8806
5	12-15-18-16-13-16-18-15-12	15	8610

根据均衡度分析： $T_i = \frac{|t_i - M|}{\max t_i} \times 100\%$ ，其中  $M$  为五个组一周巡检时间的均值。计算出各组巡检路线的均衡度分别为  $T_1=4.64\%$ ， $T_2=4.20\%$ ， $T_3=5.08\%$ ， $T_4=1.73\%$ ， $T_5=3.81\%$ ，由于各组巡检路线的巡检总时间均衡度的最大差值较小，即  $T = \max t_i - \min t_i = 5.08\% - 1.73\% = 3.35\% < 5\%$ ，即有理由说明该模型安排的巡检人数及巡检路线的设计接近最优巡检路线。

第一组巡检路线的时间表如表四所示：

表四：第一组巡检路线时间表，单位（min）

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间
0:00	22 20 19 23 24 9	32
0:35	22 20 19 23 24 9	32
1:10	22 20 19 23 24 9	32
1:45	22 20 19 23 24 9	32
2:20	22 20 19 23 24 9	32

2:55	22 20 19 23 24 9	32
3:30	22 20 19 23 24 9	32
4:05	22 20 19 23 24 9	32
4:40	22 20 19 23 24 9	32
5:15	22 20 19 23 24 9	32
5:50	22 20 19 23 24 9	32
6:25	22 20 19 23 24 9	32
7:00	22 20 19 23 24 9	32
7:35	22 20 19 23 24 9	32
8:10	22 20 19 23 24 9	32
8:45	22 20 19 23 24 9	32
9:20	22 20 19 23 24 9	32
9:55	22 20 19 23 24 9	32
10:30	22 20 19 23 24 9	32
11:05	22 20 19 23 24 9	32
11:40	22 20 19 23 24 9	32
12:15	22 20 19 23 24 9	32
13:50	22 20 19 23 24 9	32
13:25	22 20 19 23 24 9	32
14:00	22 20 19 23 24 9	32
14:35	22 20 19 23 24 9	32
15:10	22 20 19 23 24 9	32
15:45	22 20 19 23 24 9	32
16:20	22 20 19 23 24 9	32
16:55	22 20 19 23 24 9	32
17:30	22 20 19 23 24 9	32
18:05	22 20 19 23 24 9	32
18:40	22 20 19 23 24 9	32
19:15	22 20 19 23 24 9	32
19:50	22 20 19 23 24 9	32
20:25	22 20 19 23 24 9	32
21:00	22 20 19 23 24 9	32
21:35	22 20 19 23 24 9	32
22:10	22 20 19 23 24 9	32
22:45	22 20 19 23 24 9	32
23:20	22 20 19 23 24 9	32
23:55	22 20 19 23 24 9	32
一天总时间		1344

其中表中给出的是停留巡检的点，如组内的路线为：22-20-19-20-22-23-24-9-24-23-22，使之形成一个循环圈。其余各组巡检路线时间表见附录四。

### 5.5 模型二的准备

基于问题一的基础上，利用 LINGO 软件编程，建立起 0-1 线性规划模型，

并且通过均衡度分析，使各组巡检路线的工作量尽可能的平衡。

### 5.6 问题二模型的建立

目标函数：

$$\min S = \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=1}^{26} (c_{ij} + s_i) x_{ij} + s_n + s_k, \text{ 其中 } s_n \text{ 为休息时间, } s_k \text{ 为进餐时间。}$$

约束条件：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n, i \neq jn \\ x_{ij} = 0, 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, n, u_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, j \neq i \\ u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, i = 1, \dots, n, j = 2, \dots, n, i \neq j \end{cases}$$

均衡度分析：

$$T_i = \frac{|t_i - M|}{\max t_i}$$

### 5.7 问题二的求解

基于问题一的基础上，利用 LINGO 软件算出 6 组初始巡检路线，所停留的点如表五：

表五：6 组初始路线停留的巡检点，单位(min)

组号	巡检停留的点	一周巡检时间
1	7 5 3 14	4081
2	17 8 25 26	3983
3	9 24 23 22	4284
4	11 10 6 1	6272
5	21 4 2 19 20	4949
6	13 16 18 12 15	4788

据均衡度分析： $T_i = \frac{|t_i - M|}{\max t_i} \times 100\%$ ，其中  $M$  为五个组一周巡检时间的均值。

计算出各组巡检路线的均衡度分别为  $T_1=10.29\%$ ， $T_2=11.85\%$ ， $T_3=7.05\%$ ， $T_4=24.65\%$ ， $T_5=3.55\%$ ， $T_6=1.5\%$ ，由于各组巡检路线的巡检总时间均衡度的最大差值较大，即  $T = \max t_i - \min t_i = 24.65\% - 1.50\% = 23.15\%$ ，说明各组路线安排比较接近最优解，但该模型需要进一步优化。

各组巡检路线时间表如表六所示：

表六：第 1 组巡检时间表，单位 (min)

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间	休息时间
0:10	7 5 3 14	15	
0:45	3 14	8	
1:20	7 3 14	13	
1:55	3 14	8	2:05---2:11

2:30	7 3 14	13	
3:05	3 14	8	
3:40	7 3 14	13	
4:15	3 14	8	4:25---4:31
4:50	7 3 14	13	
5:25	3 14	8	
6:00	7 3 14	13	
6:35	3 14	8	6:45---6:51
7:10	7 3 14	13	
7:45	3 14	8	
8:20	7 3 14	13	
8:55	3 14	8	
9:20	7 3 14	13	9:38---9:44
9:55	3 14	8	
10:30	7 3 14	13	
11:05	3 14	8	
11:40	7 5 3 14	15	
11:55	14 6 10 11 16 18 15 12	39	
12:34	休息 30 分钟		
13:04	11 16	10	
13:39	11 13 16	15	
14:14	11 16	10	
14:49	11 13 16	15	15:08---15:14
15:24	11 16	10	
15:59	11 13 16	15	
16:34	11 16	10	
17:09	11 13 16	15	17:28---17:34
17:44	11 16	10	
17:54	休息 30 分钟		
18:24	14 6 10 11 13 16 18 15 12	42	
18:59	13 16 18 15 12	23	
19:34	16 18 15 12	16	
20:09	13 16 18 15 12	23	20:39---20:45
20:44	16 18 15 12	16	
21:19	13 16 18 15 12	23	
21:54	16 18 15 12	16	
22:29	13 16 18 15 12	23	22:59---23:05
23:04	16 18 15 12	16	
23:39	13 16 18 15 12	23	
一天总巡检时间		583	

本文统一定义休息时间为 6 分钟，其余各组巡检时间表见附录七。

## 5.8 模型三的建立

目标函数:

$$\min S = \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=1}^{26} (c_{ij} + s_i) x_{ij}$$

约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \\ x_{ij} = 0, 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, n, u_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, j \neq i \\ u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, i = 1, \dots, n, j = 2, \dots, n, i \neq j \end{array} \right.$$

### 5.9 问题三的求解

若将固定上班时间改为错时上班时间,根据已经算出的哈密顿圈对哈密顿圈进行排班,相对原本问题一,即4个人便能完成巡检任务,相比以固定上班时间,节省了人力资源。相对原本问题二,根据哈密顿圈循环,在11:40分时为了满足中午30分钟的休息时间,加入一个巡检人员,从11:40开始上班,到6:40下班,从11:40开始由三个人巡检全部点,另外三个人休息30分钟后,替换11:40巡检的三个巡检员,当所有巡视人员都休息完毕后,从12:45分开始根据哈密顿圈划分6条路线让6个上班人员沿着这6条路线进行哈密顿圈循环。到18点40分时由3个人巡检全部点其余人休息30分钟后替换3个没有休息的巡检人员,直到所有巡检人员都休息完毕后从17:05分开始按0:00到11:40的5条路线进行哈密顿圈循环。

采用错时上班路线如表七所示:

表七: 错时上班问题一巡检路线

巡检时间	巡检停留点	巡检所用时间	休息时间
0:00	22 20 19 23 24 9	28	
0:35	25 17 8 26 15	29	
1:10	12 18 16 13	21	
1:45	11 10 6 14 3	29	2:14---2:20
2:20	5 7 2 1 4 21	28	
2:55	22 20 19 23 24 9	29	
3:30	25 17 8 26 15	21	
4:05	12 18 16 13	29	4:34---4:40
4:40	11 10 6 14 3	28	
5:15	5 7 2 1 4 21	29	
5:50	22 20 19 23 24 9	21	
6:25	25 17 8 26 15	29	6:54---7:00
7:00	12 18 16 13	28	
7:35	11 10 6 14 3	29	
8:10	5 7 2 1 4 21	21	
8:45	22 20 19 23 24 9	29	9:14---9:20

9:20	25 17 8 26 15	28	
9:55	12 18 16 13	29	
10:30	11 10 6 14 3	21	
11:05	5 7 2 1 4 21	29	11:34---11:40
11:40	休息 30 分钟		
12:10	22 20 19 23 24 9 25 17 8 26	43	
12:45	22 20 19 23 24	22	
13:20	9 25 17 8 26	19	
13:55	15 12 18	10	14:05---14:11
14:30	16 13 11 10	16	
15:05	6 14 3 5 7	16	
15:40	2 1 4 21	16	
16:15	22 20 19 23 24	22	16:37---16:43
16:50	9 25 17 8 26	19	
17:25	15 12 18	10	
18:00	休息 30 分钟		
18:30	22 20 19 23 24 9 25 17 8 26	43	
17:05	22 20 19 23 24 9	28	
17:40	25 17 8 26 15	29	
18:15	12 18 16 13	21	
18:50	11 10 6 14 3	29	
19:25	5 7 2 1 4 21	28	
20:00	22 20 19 23 24 9	28	20:28---20:34
20:35	25 17 8 26 15	29	
21:10	12 18 16 13	21	
21:45	11 10 6 14 3	29	
22:20	5 7 2 1 4 21	28	22:48---22:54
22:55	22 20 19 23 24 9	28	
23:30	25 17 8 26 15	29	

## 六、模型的评价

### 6.1 优点

- (1) 采用均衡度的概念定量的刻画了分组的均衡性。
- (2) 本文运用了对比的方法，使最优哈密顿圈和最小生成树两种方法间形成对比，通过改善模型使得误差更小，更接近最优解。
- (3) 灵活运用多种软件、编程代码，充分发挥各软件优势。

### 6.2 缺点

- (1) 本文求得的结果不是最优解，只是尽可能的达到均衡度趋向最小。

## 七、模型的改进与推广

### 7.1 模型的改进

本文利用最小生成树和最优哈密顿圈划分区域进行分组,但未能给出一个准确的原则定量地给出总巡检时间最短同时和各组均衡性最好的制约关系。

### 7.2 模型的推广

此模型不仅可以应用到巡检路线的安排,更可以应用于灾情巡视、网络通讯、货物运输、交通地铁、等实际问题中。

## 参考文献

- [1] 薛定宇,陈阳泉,高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M],北京:清华大学出版,2009.
- [2] 肖位枢,图论及其算法,北京:航空工业出版社[M],1993.
- [3] 吴东华,夏洪山,基于航空公司成本最小化的飞机排班问题模型与算法[J],2014,36-46.
- [4] 龚 劬,图论与网络最优化算法,重庆:重庆大学出版社[M],2009.
- [5] Douglas B.West,图论导引,机械工业出版社[M],2008.

## 附录

### 附录一

最小生成树 Prim 算法程序:

```
function [T,e]=prim(a)
T=[]; e=0; v=1; n=size(a,1); c=2:n;
for j=2:n
    b(1,j-1)=1;
    b(2,j-1)=j;
    b(3,j-1)=a(1,j);
end
while size(T,2)<n-1
    [m,i]=min(b(3,:));
    T(:,size(T,2)+1)=b(:,i);
    e=e+b(3,i);
    v=b(2,i);
    t=find(c==b(2,i)); c(t)=[ ];
    b(:,i)=[ ];
    for j=1:length(c)
        d=a(v,b(2,j));
        if d<b(3,j)
            b(1,j)=v; b(3,j)=d;
        end
    end
end
end
```

### 附录二

最短距离矩阵的Floyd算法程序:

```
function [D,path,min1,path1]=floyd(a,start,terminal)
D=a;n=size(D,1);path=zeros(n,n);
for i=1:n
    for j=1:n
        if D(i,j)~=inf
            path(i,j)=j;
        end, end, end
    for k=1:n
        for i=1:n
            for j=1:n
                if D(i,k)+D(k,j)<D(i,j)
                    D(i,j)=D(i,k)+D(k,j);
                    path(i,j)=path(i,k);
                end, end, end, end
            end, end, end, end
        end, end, end, end
    end, end, end, end
```

```

if nargin==3
    min1=D(start,terminal);
    m(1)=start;
    i=1;
    path1=[ ];
    while path(m(i),terminal)~=terminal
        k=i+1;
        m(k)=path(m(i),terminal);
        i=i+1;
    end
    m(i+1)=terminal;
    path1=m;
end

```

### 附录三

TSP 问题最优哈密顿圈程序:

sets:

```

point / 1..26/: u;
xssj/1..26/:t;
link( point, point): dist, x;

```

endsets

```

n = @size( point);

```

data:

```

t=3 2 3 2 2 3 2 3 4 2 3 2 5 3 2 3 2 2 2 3 3
2 3 2 2 2;

```

```

dist =0 2 3 5 4 4 6 6 11 9 11 15 13 5 17 15 7 18 7
9 6 8 9 10 8 11
2 0 1 3 2 2 4 4 9 7 9 13 11 3 15 13 5 16 5 7 4
6 7 8 6 9
3 1 0 4 1 1 3 3 8 6 8 12 10 2 14 12 4 15 6 8 5
7 8 9 5 8
5 3 4 0 5 5 7 7 7 10 12 16 14 6 18 16 8 19 7 5 1
3 4 5 9 12
4 2 1 5 0 2 2 4 9 7 9 13 11 3 15 13 5 16 7 9 6
8 9 10 6 9
4 2 1 5 2 0 4 2 7 5 7 11 9 1 13 11 3 14 7 9 6
8 9 9 4 7
6 4 3 7 2 4 0 6 11 9 11 15 13 5 17 15 7 18 9 11 8
10 11 12 8 11
6 4 3 7 4 2 6 0 5 7 9 13 11 3 11 13 1 13 9 11 8
9 8 7 2 5
11 9 8 7 9 7 11 5 0 12 14 14 16 8 12 17 4 14 8 6 6
4 3 2 3 6

```

```

9 7 6 10 7 5 9 7 12 0 2 6 4 6 8 6 8 9 12 14 11
13 14 14 9 12
11 9 8 12 9 7 11 9 14 2 0 8 2 8 7 4 10 7 14 16 13
15 16 16 11 13
15 13 12 16 13 11 15 13 14 6 8 0 9 12 2 7 12 4 18 20 17
18 17 16 11 8
13 11 10 14 11 9 13 11 16 4 2 9 0 10 7 2 12 5 16 18 15
17 18 18 13 13
5 3 2 6 3 1 5 3 8 6 8 12 10 0 14 12 4 15 8 10 7
9 10 10 5 8
17 15 14 18 15 13 17 11 12 8 7 2 7 14 0 5 10 2 20 18 18
16 15 14 9 6
15 13 12 16 13 11 15 13 17 6 4 7 2 12 5 0 14 3 18 20 17
19 20 19 14 11
7 5 4 8 5 3 7 1 4 8 10 12 12 4 10 14 0 12 10 10 9
8 7 6 1 4
18 16 15 19 16 14 18 13 14 9 7 4 5 15 2 3 12 0 21 20 20
18 17 16 11 8
7 5 6 7 7 7 9 9 8 12 14 18 16 8 20 18 10 21 0 2 6
4 5 6 11 14
9 7 8 5 9 9 11 11 6 14 16 20 18 10 18 20 10 20 2 0 4
2 3 4 9 12
6 4 5 1 6 6 8 8 6 11 13 17 15 7 18 17 9 20 6 4 0
2 3 4 9 12
8 6 7 3 8 8 10 9 4 13 15 18 17 9 16 19 8 18 4 2 2
0 1 2 7 10
9 7 8 4 9 9 11 8 3 14 16 17 18 10 15 20 7 17 5 3 3
1 0 1 6 9
10 8 9 5 10 9 12 7 2 14 16 16 18 10 14 19 6 16 6 4 4
2 1 0 5 8
8 6 5 9 6 4 8 2 3 9 11 11 13 5 9 14 1 11 11 9 9
7 6 5 0 3
11 9 8 12 9 7 11 5 6 12 13 8 13 8 6 11 4 8 14 12 12
10 9 8 3 0;

```

```

enddata

```

```

    min = @sum( link: dist * x)+@sum(xssj(I) | I #le# 26: t);

```

```

@FOR( point( K):

```

```

@sum( point( I)| I #ne# K: x( I, K)) = 1;

```

```

@sum( point( J)| J #ne# K: x( K, J)) = 1;);

```

```

@for(point(I)| I #gt# 1: @for( point( J)| J#gt#1 #and# I #ne# J:

```

```

    u(I)-u(J)+n*x(I,J)<=n-1););

```

```

@for(point(I) : u(I)<=n-1 );

```

```

    @for( link: @bin( x));

```

```

end

```

## 附录四

### LINGO 编程:

sets:

```
point / 1..26/: u;  
xssj/1..26/:t;  
link( point, point): dist, x;
```

endsets

```
n = @size( point);
```

data:

```
t=3 2 3 2 2 3 2 3 4 2 3 2 5 3 2 3 2 2 2 3 3  
2 3 2 2 2;
```

```
dist =0 2 3 5 4 4 6 6 11 9 11 15 13 5 17 15 7 18 7  
9 6 8 9 10 8 11  
2 0 1 3 2 2 4 4 9 7 9 13 11 3 15 13 5 16 5 7 4  
6 7 8 6 9  
3 1 0 4 1 1 3 3 8 6 8 12 10 2 14 12 4 15 6 8 5  
7 8 9 5 8  
5 3 4 0 5 5 7 7 7 10 12 16 14 6 18 16 8 19 7 5 1  
3 4 5 9 12  
4 2 1 5 0 2 2 4 9 7 9 13 11 3 15 13 5 16 7 9 6  
8 9 10 6 9  
4 2 1 5 2 0 4 2 7 5 7 11 9 1 13 11 3 14 7 9 6  
8 9 9 4 7  
6 4 3 7 2 4 0 6 11 9 11 15 13 5 17 15 7 18 9 11 8  
10 11 12 8 11  
6 4 3 7 4 2 6 0 5 7 9 13 11 3 11 13 1 13 9 11 8  
9 8 7 2 5  
11 9 8 7 9 7 11 5 0 12 14 14 16 8 12 17 4 14 8 6 6  
4 3 2 3 6  
9 7 6 10 7 5 9 7 12 0 2 6 4 6 8 6 8 9 12 14 11  
13 14 14 9 12  
11 9 8 12 9 7 11 9 14 2 0 8 2 8 7 4 10 7 14 16 13  
15 16 16 11 13  
15 13 12 16 13 11 15 13 14 6 8 0 9 12 2 7 12 4 18 20 17  
18 17 16 11 8  
13 11 10 14 11 9 13 11 16 4 2 9 0 10 7 2 12 5 16 18 15  
17 18 18 13 13  
5 3 2 6 3 1 5 3 8 6 8 12 10 0 14 12 4 15 8 10 7  
9 10 10 5 8  
17 15 14 18 15 13 17 11 12 8 7 2 7 14 0 5 10 2 20 18 18  
16 15 14 9 6  
15 13 12 16 13 11 15 13 17 6 4 7 2 12 5 0 14 3 18 20 17
```

```

19 20 19 14 11
7 5 4 8 5 3 7 1 4 8 10 12 12 4 10 14 0 12 10 10 9
8 7 6 1 4
18 16 15 19 16 14 18 13 14 9 7 4 5 15 2 3 12 0 21 20 20
18 17 16 11 8
7 5 6 7 7 7 9 9 8 12 14 18 16 8 20 18 10 21 0 2 6
4 5 6 11 14
9 7 8 5 9 9 11 11 6 14 16 20 18 10 18 20 10 20 2 0 4
2 3 4 9 12
6 4 5 1 6 6 8 8 6 11 13 17 15 7 18 17 9 20 6 4 0
2 3 4 9 12
8 6 7 3 8 8 10 9 4 13 15 18 17 9 16 19 8 18 4 2 2
0 1 2 7 10
9 7 8 4 9 9 11 8 3 14 16 17 18 10 15 20 7 17 5 3 3
1 0 1 6 9
10 8 9 5 10 9 12 7 2 14 16 16 18 10 14 19 6 16 6 4 4
2 1 0 5 8
8 6 5 9 6 4 8 2 3 9 11 11 13 5 9 14 1 11 11 9 9
7 6 5 0 3
11 9 8 12 9 7 11 5 6 12 13 8 13 8 6 11 4 8 14 12 12
10 9 8 3 0;

```

enddata

```
min = @sum(link: dist * x)+@sum(xssj(I) | I #le# 26: t)+48;
```

```
@FOR( point( K):
```

```
@sum( point( I)| I #ne# K: x( I, K)) = 1;
```

```
@sum( point( J)| J #ne# K: x( K, J)) = 1;);
```

```
@for(point(I)| I #gt# 1: @for( point( J)| J#gt#1 #and# I #ne# J:
```

```
u(I)-u(J)+n*x(I,J)<=n-1););
```

```
@for(point(I) : u(I)<=n-1 );
```

```
@for( link: @bin( x));
```

end

## 附录五

LINGO 编程:

SETS:

```
STATION/1..26/: JL,ZQ,t;
```

```
STEPX/1..4/:WX;
```

```
STEPLY/1..4/:WY;
```

```
STEPZ/1..4/:WZ;
```

```
STEPU/1..4/:WU;
```

```
STEPW/1..5/:WW;
```

```
STEPk/1..5/:Wk;
```

```
LINEX( STEPX, STATION): X;
```

```
LINEY( STEPLY, STATION): Y;
```

LINEZ( STEPZ, STATION): Z;  
 LINEU( STEPU, STATION): U;  
 LINEW( STEPW, STATION): W;  
 LINEk( STEPk, STATION): k;  
 LINKS(STATION,STATION):C;

**ENDSETS**

data:

JL=8,6,7,3,8,8,10 ,9,4,13,15,18,17,9,16,19,8,18,4,2,2,0,1,2,7,10;  
 ZQ=35,50,35,35,720,35,80,35,35,120,35,35,80,35,35,35,480,35,35,35,80,35,35,35,120,35;  
 t= 3,2,3,2,2,3,2,3,4,2,3,2,5,3,2,3,2,2,2,3,3,2,3,2,2,2;  
 C= @ole('C:\Users\Administrator\Desktop\10.xlsx',zdl);

**ENDDATA**

@FOR( LINEX : @BIN( X));  
 @FOR( LINEY : @BIN( Y));  
 @FOR( LINEZ : @BIN( Z));  
 @FOR( LINEU : @BIN( U));  
 @FOR( LINEW : @BIN( W));  
 @FOR( LINEk : @BIN( k));  
 M1=@SIZE(STEPX); M2=@SIZE(STEPY);M3=@SIZE(STEPZ);  
 M4=@SIZE(STEPU); M5=@SIZE(STEPW); M6=@SIZE(STEPk);  
 @FOR(STATION(I): @SUM(STEPX(N): X(N,I))+@SUM(STEPY(N): Y(N,I))  
 +@SUM(STEPZ(N): Z(N,I)) +@SUM(STEPU(N): U(N,I))+@SUM(STEPW(N):  
 W(N,I))+@SUM(STEPk(N): k(N,I))= 1);  
 @FOR(STEPX(N):@SUM(STATION(I):X(N,I))=1);  
 @FOR(STEPY(N):@SUM(STATION(I):Y(N,I))=1);  
 @FOR(STEPZ(N):@SUM(STATION(I):Z(N,I))=1);  
 @FOR(STEPU(N):@SUM(STATION(I):U(N,I))=1);  
 @FOR(STEPW(N):@SUM(STATION(I):W(N,I))=1);  
 @FOR(STEPk(N):@SUM(STATION(I):k(N,I))=1);  
 LX=@SUM(STEPX(N)|N#LT#M1: @SUM(LINKS(I,J):C(I,J)\*X(N,I)\*X(N+1,J))+@SUM(LINKS(I,J):  
 (t(I)+t(J))\*X(N,I)\*X(N+1,J)));  
 LY=@SUM(STEPY(N)|N#LT#M2: @SUM(LINKS(I,J):C(I,J)\*Y(N,I)\*Y(N+1,J))+@SUM(LINKS(I,J):  
 (t(I)+t(J))\*Y(N,I)\*Y(N+1,J)));  
 LZ=@SUM(STEPZ(N)|N#LT#M3: @SUM(LINKS(I,J):C(I,J)\*Z(N,I)\*Z(N+1,J))+@SUM(LINKS(I,J):  
 (t(I)+t(J))\*Z(N,I)\*Z(N+1,J)));  
 LU=@SUM(STEPU(N)|N#LT#M4: @SUM(LINKS(I,J):C(I,J)\*U(N,I)\*U(N+1,J))+@SUM(LINKS(I,J):  
 (t(I)+t(J))\*U(N,I)\*U(N+1,J)));  
 LW=@SUM(STEPW(N)|N#LT#M5: @SUM(LINKS(I,J):C(I,J)\*W(N,I)\*W(N+1,J))+@SUM(LINKS(I,J):  
 (t(I)+t(J))\*W(N,I)\*W(N+1,J)));  
 Lk=@SUM(STEPk(N)|N#LT#M6: @SUM(LINKS(I,J):C(I,J)\*k(N,I)\*k(N+1,J))+@SUM(LINKS(I,J):  
 (t(I)+t(J))\*k(N,I)\*k(N+1,J)));  
 LU<35;LX<35;LY<35;LZ<35;LW<35;Lk<35;  
 MIN=LU+LX+LY+LZ+LW+Lk;

END

## 附录六

问题一其余各组路线巡检时间表：

单位（min）

第二组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间
0:07	25 17 8 26 15	33
0:42	8 26 15	29
1:17	8 26 15	29
1:52	25 8 26 15	31
2:27	8 26 15	29
3:02	8 26 15	29
3:37	25 8 26 15	31
4:12	8 26 15	29
4:47	8 26 15	29
5:22	25 8 26 15	31
5:57	8 26 15	29
6:32	8 26 15	29
7:07	25 8 26 15	31
7:42	17 8 26 15	31
8:17	8 26 15	29
8:52	25 8 26 15	31
9:27	8 26 15	29
10:02	8 26 15	29
10:37	25 8 26 15	31
11:12	8 26 15	29
11:47	8 26 15	29
12:22	25 8 26 15	31
12:57	8 26 15	29
13:32	8 26 15	29
14:07	25 8 26 15	31
14:42	8 26 15	29
15:17	17 8 26 15	31
15:52	25 8 26 15	31
16:27	8 26 15	29
17:02	8 26 15	29
17:37	25 8 26 15	31
18:12	8 26 15	29
18:47	8 26 15	29
19:22	25 8 26 15	31
19:57	8 26 15	29
20:32	8 26 15	29
21:07	25 8 26 15	31
21:42	8 26 15	29

22:17	8 26 15	29
22:52	25 17 8 26 15	33
23:27	8 26 15	29
一天总时间		1225

第三组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间
0:02	21 4 2 1 5 7	34
0:37	21 4 2 1 7	32
1:12	21 4 2 1 7	32
1:47	21 4 2 1 7	32
2:22	21 4 2 1 7	32
2:57	21 4 2 1 7	32
3:32	21 4 2 1 7	32
4:07	21 4 2 1 7	32
4:42	21 4 2 1 7	32
5:17	21 4 2 1 7	32
5:52	21 4 2 1 7	32
6:27	21 4 2 1 7	32
7:02	21 4 2 1 7	32
7:37	21 4 2 1 7	32
8:12	21 4 2 1 7	32
8:47	21 4 2 1 7	32
9:22	21 4 2 1 7	32
9:57	21 4 2 1 7	32
10:32	21 4 2 1 7	32
11:07	21 4 2 1 7	32
11:42	21 4 2 1 5 7	34
12:17	21 4 2 1 7	32
12:52	21 4 2 1 7	32
13:27	21 4 2 1 7	32
14:02	21 4 2 1 7	32
14:37	21 4 2 1 7	32
15:12	21 4 2 1 7	32
15:47	21 4 2 1 7	32
16:22	21 4 2 1 7	32
16:57	21 4 2 1 7	32
17:32	21 4 2 1 7	32
18:07	21 4 2 1 7	32
18:42	21 4 2 1 7	32
19:17	21 4 2 1 7	32
19:52	21 4 2 1 7	32
20:27	21 4 2 1 7	32
21:02	21 4 2 1 7	32

21:37	21 4 2 1 7	32
22:12	21 4 2 1 7	32
22:47	21 4 2 1 7	32
23:22	21 4 2 1 5 7	34
23:57	21 4 2 1 7	32
一天总时间		1350

第四组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间
0:07	3 6 14 10 11	32
0:42	3 6 14 11	30
1:17	3 6 14 11	30
1:52	3 6 14 10 11	32
2:27	3 6 14 11	30
3:02	3 6 14 11	30
3:37	3 6 14 10 11	32
4:12	3 6 14 11	30
4:47	3 6 14 11	30
5:22	3 6 14 10 11	32
5:57	3 6 14 11	30
6:32	3 6 14 11	30
7:07	3 6 14 10 11	32
7:42	3 6 14 11	30
8:17	3 6 14 11	30
8:52	3 6 14 10 11	32
9:27	3 6 14 11	30
10:02	3 6 14 11	30
10:37	3 6 14 10 11	32
11:12	3 6 14 11	30
11:47	3 6 14 11	30
12:22	3 6 14 10 11	32
12:57	3 6 14 11	30
13:32	3 6 14 11	30
14:07	3 6 14 10 11	32
14:42	3 6 14 11	30
15:17	3 6 14 11	30
15:52	3 6 14 10 11	32
16:27	3 6 14 11	30
17:02	3 6 14 11	30
17:37	3 6 14 10 11	32
18:12	3 6 14 11	30
18:47	3 6 14 11	30
19:22	3 6 14 10 11	32
19:57	3 6 14 11	30

20:32	3 6 14 11	30
21:07	3 6 14 10 11	32
21:42	3 6 14 11	30
22:17	3 6 14 11	30
22:52	3 6 14 10 11	32
23:27	3 6 14 11	30
一天总时间		1258

第五组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间
0:18	12 18 16 13	30
0:53	12 18 16 13	30
1:28	12 18 16 13	30
2:03	12 18 16 13	30
2:38	12 18 16 13	30
3:13	12 18 16 13	30
3:48	12 18 16 13	30
4:23	12 18 16 13	30
4:58	12 18 16 13	30
5:33	12 18 16 13	30
6:08	12 18 16 13	30
6:43	12 18 16 13	30
7:18	12 18 16 13	30
7:53	12 18 16 13	30
8:28	12 18 16 13	30
9:03	12 18 16 13	30
9:38	12 18 16 13	30
10:13	12 18 16 13	30
10:48	12 18 16 13	30
11:23	12 18 16 13	30
11:58	12 18 16 13	30
12:33	12 18 16 13	30
13:08	12 18 16 13	30
13:43	12 18 16 13	30
14:18	12 18 16 13	30
14:53	12 18 16 13	30
15:28	12 18 16 13	30
16:03	12 18 16 13	30
16:38	12 18 16 13	30
17:13	12 18 16 13	30
17:48	12 18 16 13	30
18:23	12 18 16 13	30
18:58	12 18 16 13	30
19:33	12 18 16 13	30

20:08	12 18 16 13	30
20:43	12 18 16 13	30
21:18	12 18 16 13	30
21:53	12 18 16 13	30
22:28	12 18 16 13	30
23:03	12 18 16 13	30
23:38	12 18 16 13	30
一天总时间		1230

## 附录七

问题二其余各组巡检时间表：

单位（min）

第二组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间	休息时间
0:08	17 8 25 26	15	
0:43	8 26	10	
1:18	8 26	10	
1:53	8 25 26	12	2:10---2:16
2:28	8 26	10	
3:03	8 26	10	
3:38	8 25 26	12	
4:13	8 26	10	4:28---4:34
4:48	8 26	10	
5:23	8 25 26	12	
5:58	8 26	10	
6:33	8 26	10	6:48---6:54
7:08	8 25 26	12	
7:43	17 8 25 26	15	
8:18	8 26	10	
8:53	8 26	10	9:08---9:14
9:28	8 25 26	12	
10:03	8 26	10	
10:38	8 26	10	
11:13	8 25 26	12	11:30---11:36
11:48	8 26	10	
12:00	26 9 24 23 22	23	
12:23	休息 30 分钟		
12:53	26 25 9 24	18	
13:28	26 9 24	16	
14:03	26 9 24	16	
15:38	26 25 17 9 24	22	16:08---16:14
16:13	26 9 24	16	
16:48	26 9 24	16	

17:23	26 25 9 24	18	
17:58	26 9 24 23 22	25	
18:23	休息 30 分钟		
18:58	14 6 11	17	
19:33	14 6 10 11	19	
20:08	14 6 11	17	
20:43	14 6 11	17	21:08---21:14
21:18	14 6 10 11	19	
21:53	14 6 11	17	
22:28	14 6 11	17	
23:03	14 6 10 11	19	
23:38	14 6 17 11	25	

第三组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间	休息时间
0:04	9 24 23 22	15	
0:39	9 24 23 22	15	
1:14	9 24 23 22	15	
1:49	9 24 23 22	15	2:08---2:14
2:24	9 24 23 22	15	
2:59	9 24 23 22	15	
3:34	9 24 23 22	15	
4:09	9 24 23 22	15	4:28---4:34
4:44	9 24 23 22	15	
5:19	9 24 23 22	15	
5:54	9 24 23 22	15	
6:29	9 24 23 22	15	6:48---6:54
7:04	9 24 23 22	15	
7:39	9 24 23 22	15	
8:14	9 24 23 22	15	
8:49	9 24 23 22	15	9:08---9:14
9:24	9 24 23 22	15	
9:59	9 24 23 22	15	
10:34	9 24 23 22	15	
11:09	9 24 23 22	15	11:28---11:34
11:44	9 24 23 22	15	
12:19	休息 30 分钟		
12:54	14 6 11 13 16 18 15 12	42	
13:29	18 15 12	10	
14:04	18 15 12	10	
14:39	18 15 12	10	14:53---14:56

15:14	18 15 12	10	
15:49	18 15 12	10	
16:24	18 15 12	10	
16:59	18 15 12	10	17:13---17:19
17:34	18 15 12	10	
18:09	18 15 12	10	
18:44	休息 30 分钟		
19:19	4 2 19 20 1 8 3	29	
19:54	26 25 9 24	18	
20:29	26 8 24	16	
21:04	26 25 9 24	18	21:30---21:36
21:39	26 8 24	16	
22:14	26 25 9 24	18	
22:49	26 8 24	16	
23:24	26 25 9 24	18	23:50---23:56
23:59	26 8 24	16	

第四组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间	休息时间
0:15	11 10 6 1	23	
0:50	11 6 1	20	
1:25	11 6 1	20	
2:00	11 10 6 1	23	2:34---2:40
2:35	11 6 1	20	
3:10	11 6 1	20	
3:45	11 10 6 1	23	
4:20	11 6 1	20	4:52---4:58
4:55	11 6 1	20	
5:30	11 10 6 1	23	
6:05	11 6 1	20	
6:40	11 6 1	20	7:12---7:18
7:15	11 10 6 1	23	
7:50	11 6 1	20	
8:25	11 6 1	20	
9:00	11 10 6 1	23	9:34---9:40
9:35	11 6 1	20	
10:10	11 6 1	20	
10:45	11 10 6 1	23	
11:20	11 6 1	20	
11:40	1 8 3 4 2 19 20	41	
12:21	休息 30 分钟		
12:51	1 8 3 4	24	
13:26	1 8 3 4	24	
14:01	1 8 3 4	24	

14:36	1 8 3 4	24	15:05---15:11
15:11	1 8 3 4	24	
15:46	1 8 3 4	24	
16:21	1 8 3 4	24	
16:56	1 8 3 4	24	17:25---17:31
17:31	1 8 3 4	24	
17:56	4 2 19 20 1 8 3	29	
18:25	休息 30 分钟		
18:55	1 8 3 4	21	
19:30	1 8 3 4	21	
20:05	1 8 3 4	21	
20:40	1 8 3 4	21	21:06---21:12
21:15	1 8 3 4	21	
21:50	1 8 3 4	21	
22:25	1 8 3 4	21	
23:00	1 8 3 4	21	23:26---23:32
23:35	1 8 3 4	21	

第五组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间	休息时间
0:02	21 4 2 19 20	23	
0:37	4 2 19 20	19	
1:12	21 4 2 19 20	23	
1:47	4 2 19 20	19	2:16---2:22
2:22	21 4 2 19 20	23	
2:57	4 2 19 20	19	
3:32	21 4 2 19 20	23	
4:07	4 2 19 20	19	4:36---4:42
4:42	21 4 2 19 20	23	
5:17	4 2 19 20	19	
5:52	21 4 2 19 20	23	
6:27	4 2 19 20	19	6:56---7:02
7:02	21 4 2 19 20	23	
7:37	4 2 19 20	19	
8:12	21 4 2 19 20	23	
8:47	4 2 19 20	19	9:16---9:22
9:22	21 4 2 19 20	23	
9:57	4 2 19 20	19	
10:32	21 4 2 19 20	23	
11:07	4 2 19 20	19	11:36---11:42
11:42	21 4 2 19 20	23	
12:17	休息 30 分钟		
12:52	26 25 9 24 23 22	25	
13:27	14 6	7	

14:02	14 6 10	14	
14:37	14 6	7	14:45---14:51
15:12	14 6 10	14	
15:47	14 6	7	
16:22	14 6 10	14	
16:57	14 6	7	17:05---17:11
17:32	14 6 10	14	
18:07	14 6	7	
18:42	14 6 10 11 13 16 18 15 12	42	
19:17	休息 30 分钟		
19:52	2 19 20	14	
20:27	2 19 20	14	
21:02	2 19 20	14	
21:37	2 19 20	14	21:58---22:04
22:12	2 19 20	14	
22:47	2 19 20	14	
23:22	2 19 20	14	23:43---23:49
23:57	2 19 20	14	

第六组巡检路线时间表

巡检时间	组所巡检的点	巡检所用时间	休息时间
0:17	13 16 18 12 15	23	
0:52	16 18 12 15	16	
1:27	13 16 18 12 15	23	
2:02	16 18 12 15	16	2:25---2:31
2:37	13 16 18 12 15	23	
3:12	16 18 12 15	16	
3:47	13 16 18 12 15	23	
4:22	16 18 12 15	16	4:45---4:51
4:57	13 16 18 12 15	23	
5:32	16 18 12 15	16	
6:07	13 16 18 12 15	23	6:39---6:45
6:42	16 18 12 15	16	
7:17	13 16 18 12 15	23	
7:52	16 18 12 15	16	
8:27	13 16 18 12 15	23	8:59---9:05
9:02	16 18 12 15	16	
9:37	13 16 18 12 15	23	
10:12	16 18 12 15	16	
10:47	13 16 18 12 15	23	11:19---11:25
11:22	16 18 12 15	16	
11:38	休息 30 分钟		
12:15	1 8 3 21 4 2 19 20	41	

12:56	21 2 19 20 22 23	24	
13:31	2 19 20 22 23	21	
14:06	21 2 19 20 22 23	24	14:33---14:39
14:41	2 19 20 22 23	21	
15:16	21 2 19 20 22 23	24	
15:51	2 19 20 22 23	21	
16:26	21 2 19 20 22 23	24	16:53---16:59
17:01	2 19 20 22 23	21	
17:36	21 2 19 20 22 23	24	
18:03	休息 30 分钟		
18:33	26 9 24 23 22	25	
19:08	23 22	6	
19:43	24 22	6	
20:18	25 22	6	
20:53	26 22	6	
21:28	27 22	6	
22:03	28 22	6	
22:38	29 22	6	
23:13	23 22 5	6	
23:48	29 22	6	

## 附录八

问题三其余各组巡检时间表:

巡检时间	巡检停留点	巡检所用时间	休息时间
0:35	22 20 19 23 24 9	28	
1:10	25 17 8 26 15	29	
1:45	12 18 16 13	21	
2:20	11 10 6 14 3	29	2:49---2:54
2:55	5 7 2 1 4 21	28	
3:30	22 20 19 23 24 9	28	
4:05	25 17 8 26 15	29	
4:40	12 18 16 13	21	5:01---5:07
5:15	11 10 6 14 3	29	
5:50	5 7 2 1 4 21	28	
6:25	22 20 19 23 24 9	28	
7:00	25 17 8 26 15	29	7:29---7:35
7:35	12 18 16 13	21	
8:10	11 10 6 14 3	29	
8:45	5 7 2 1 4 21	28	
9:20	22 20 19 23 24 9	28	9:48---9:54
9:55	25 17 8 26 15	29	
10:30	12 18 16 13	21	
11:05	11 10 6 14 3	29	
11:40	休息 30 分钟	28	12:08---12:14

12:10	15 12 18 16 13 11	32	
12:45	9 25 17 8 26	19	
13:20	15 12 18	10	
13:55	16 13 11 10	16	14:11---14:17
14:30	6 14 3 5 7	16	
15:05	2 1 4 21	16	
15:40	22 20 19 23 24	22	
16:15	9 25 17 8 26	19	16:34---16:40
16:50	15 12 18	10	
17:25	16 13 11 10	16	
18:00	休息 30 分钟		
18:30	15 12 18 16 13 11	32	
17:05	25 17 8 26 15	29	
17:40	12 18 16 13	21	
18:15	11 10 6 14 3	29	
18:50	5 7 2 1 4 21	28	
19:25	22 20 19 23 24 9	28	
20:00	25 17 8 26 15	29	20:29---20:35
20:35	12 18 16 13	21	
21:10	11 10 6 14 3	29	
21:45	5 7 2 1 4 21	28	
22:20	22 20 19 23 24 9	28	22:48---22:54
22:55	25 17 8 26 15	29	
23:30	12 18 16 13	21	

巡检时间	巡检停留点	巡检所用时间	休息时间
1:10	22 20 19 23 24 9	28	
1:45	25 17 8 26 15	29	
2:20	12 18 16 13	21	
2:55	11 10 6 14 3	29	3:24---3:30
3:30	5 7 2 1 4 21	28	
4:05	22 20 19 23 24 9	28	
4:40	25 17 8 26 15	29	
5:15	12 18 16 13	21	5:36---5:42
5:50	11 10 6 14 3	29	
6:25	5 7 2 1 4 21	28	
7:00	22 20 19 23 24 9	28	
7:35	25 17 8 26 15	29	8:04---8:10
8:10	12 18 16 13	21	
8:45	11 10 6 14 3	29	
9:20	5 7 2 1 4 21	28	
9:55	22 20 19 23 24 9	28	10:23---10:29
10:30	25 17 8 26 15	29	

11:05	12 18 16 13	21	
11:40	休息 30 分钟		
12:10	6 14 3 7 2 1 4 21	41	
12:45	15 12 18	10	
13:20	16 13 11 10	16	
13:55	6 14 3 5 7	16	14:11---14:17
14:30	2 1 4 21	16	
15:05	22 20 19 23 24	22	
15:40	9 25 17 8 26	19	
16:15	15 12 18	10	16:25---16:31
16:50	16 13 11 10	16	
17:25	6 14 3 5 7	16	
18:00	休息 30 分钟		
18:30	6 14 3 7 2 1 4 21	41	
17:05	12 18 16 13	21	
17:40	11 10 6 14 3	29	
18:15	5 7 2 1 4 21	28	
18:50	22 20 19 23 24 9	28	
19:25	25 17 8 26 15	29	
20:00	12 18 16 13	21	20:21---20:27
20:35	11 10 6 14 3	29	
21:10	5 7 2 1 4 21	28	
21:45	22 20 19 23 24 9	28	
22:20	25 17 8 26 15	29	22:55---23:01
22:55	12 18 16 13	21	
23:30	11 10 6 14 3	29	

巡检时间	巡检停留点	巡检所用时间	休息时间
1:45	22 20 19 23 24 9	28	
2:20	25 17 8 26 15	29	
2:55	12 18 16 13	21	
3:30	11 10 6 14 3	29	3:59---4:05
4:05	5 7 2 1 4 21	28	
4:40	22 20 19 23 24 9	28	
5:15	25 17 8 26 15	29	
5:50	12 18 16 13	21	6:11---6:17
6:25	11 10 6 14 3	29	
7:00	5 7 2 1 4 21	28	
7:35	22 20 19 23 24 9	28	
8:10	25 17 8 26 15	29	8:39---8:45
8:45	12 18 16 13	21	
9:20	11 10 6 14 3	29	

9:55	5 7 2 1 4 21	28	
10:30	22 20 19 23 24 9	28	10:58---11:04
11:05	25 17 8 26 15	29	
11:29	22 20 19 23 24 9 8 26	43	
12:12	休息 30 分钟		
12:45	16 13 11 10	16	
13:20	6 14 3 5 7	16	
13:55	2 1 4 21	16	
14:30	22 20 19 23 24	22	14:52---14:58
15:05	9 25 17 8 26	19	
15:40	15 12 18	10	
16:15	16 13 11 10	16	
16:50	6 14 3 5 7	16	17:06---17:12
17:25	2 1 4 21	16	
17:41	22 20 19 23 24 9 8 26	43	
18:24	休息 30 分钟		
17:05	11 10 6 14 3	29	
17:40	5 7 2 1 4 21	28	
18:15	22 20 19 23 24 9	28	
18:50	25 17 8 26 15	29	
19:25	12 18 16 13	21	19:46---19:51
20:00	11 10 6 14 3	29	
20:35	5 7 2 1 4 21	28	
21:10	22 20 19 23 24 9	28	
21:45	25 17 8 26 15	29	22:14---22:20
22:20	12 18 16 13	21	
22:55	11 10 6 14 3	29	
23:30	5 7 2 1 4 21	28	

巡检时间	巡检停留点	巡检所用时间	休息时间
2:20	22 20 19 23 24 9	28	
2:55	25 17 8 26 15	29	
3:30	12 18 16 13	21	
4:05	11 10 6 14 3	29	4:34---4:40
4:40	5 7 2 1 4 21	28	
5:15	22 20 19 23 24 9	28	
5:50	25 17 8 26 15	29	
6:25	12 18 16 13	21	6:46---6:52
7:00	11 10 6 14 3	29	
7:35	5 7 2 1 4 21	28	
8:10	22 20 19 23 24 9	28	
8:45	25 17 8 26 15	29	9:14---9:20
9:20	12 18 16 13	21	

9:55	11 10 6 14 3	29	
10:30	5 7 2 1 4 21	28	
11:05	22 20 19 23 24 9	28	11:33---11:39
11:33	15 12 18 16 11	25	
12:00	休息 30 分钟		
12:45	6 14 3 5 7	16	
13:20	2 1 4 21	16	
13:55	22 20 19 23 24	22	
14:30	9 25 17 8 26	19	14:49---14:55
15:05	15 12 18	10	
15:40	16 13 11 10	16	
16:15	6 14 3 5 7	16	
16:50	2 1 4 21	16	17:06---17:12
17:25	22 20 19 23 24	22	
17:41	15 12 18 16 11	25	
18:08	休息 30 分钟		
17:05	5 7 2 1 4 21	28	
17:40	22 20 19 23 24 9	28	
18:15	25 17 8 26 15	29	
18:50	12 18 16 13	21	19:11---19:17
19:25	11 10 6 14 3	29	
20:00	5 7 2 1 4 21	28	
20:35	22 20 19 23 24 9	28	
21:10	25 17 8 26 15	29	21:39---21:45
21:45	12 18 16 13	21	
22:20	11 10 6 14 3	29	22:49---22:55
22:55	5 7 2 1 4 21	28	
23:30	22 20 19 23 24 9	28	

11:40	6 14 3 2 1 4	34	
12:14	休息 30 分钟		
12:45	2 1 4 21	16	
13:20	22 20 19 23 24	22	13:42---13:48
13:55	9 25 17 8 26	19	
14:30	15 12 18	10	
15:05	16 13 11 10	16	
15:40	6 14 3 5 7	16	15:56---16:02
16:15	2 1 4 21	16	
16:50	22 20 19 23 24	22	
17:25	15 12 18 16 11	19	
17:41	16 13 11 10	34	
18:15	休息 30 分钟		

