巡检线路的排班调度模型及其仿真

## 摘要

本论文研究题目来源于2017年全国大学生数学建模竞赛题D题，要求建立数学模型并用合适的算法解决巡检线路的规划问题。化工厂巡检是一个非常重要的工作，在合适的时间内巡检各个检查点能够有效地降低化工厂出现意外危险的概率，因此设计一个合理的巡检线路非常必要，要求用尽量少的人力资源达到巡检目的。

本文将基于该化工厂问题展开研究，经分析可知，各个巡检点的巡检时间和巡检周期已定，所以只能考虑通过减少在各个巡检点之间移动的时间来达到减少人力资源的目的。由此分析建立数学模型，根据原始的稀疏图利用弗洛里德算法求得各点之间的最短路径，建立无向带权完全图，将问题转化为寻找一条或多条线路使得遍历各点的路径之和最短，并使得各个路线的工作量均衡，可知这是一个旅行商问题。本文解决旅行商问题使用了Java语言编写遗传算法，求得近似最优解，经过实践分析，本文所建立的数学模型非常有效地解决了此类旅行商问题，规划了更优秀的巡检路线。

最终本文规划的巡检线路使用了更少的人力，采用了三班轮换和线路轮换的策略，任务更加均衡，最终可在13天内实现每个工人的任务量相对均衡。在第一问不休息排班中，本文规划的路线每班4人，每天只需12人即可完成巡检任务，采用线路轮换让每个员工任务量更均衡；在第二问可休息进餐排班中，本文规划的路线每天只需14人，其中由于进餐需要1至2名替班工人，早班2点到10点需4人，安排中班10点到18点需6人，晚班18点至次日2点4人；在第三问错时上班排班模型中，经分析是一个最小哈密顿回路问题，属于旅行商问题的子问题，在不休息排班中每天需12人，可休息进餐排班中每天需13人。

**关键词：**旅行商问题，最小哈密顿回路，遗传算法，巡检线路，最短路径

**Abstract**

目录

[巡检线路的排班调度模型及其仿真 1](#_Toc7540316)

[摘要 2](#_Toc7540317)

[1. 绪论 5](#_Toc7540318)

[1.1 研究背景与意义 5](#_Toc7540319)

[1.2 国内外研究现状 6](#_Toc7540320)

[1.2.1 国内研究现状 6](#_Toc7540321)

[1.2.2 国外研究现状 7](#_Toc7540322)

[1.3 本文内容与组织架构 7](#_Toc7540323)

[2. 相关基础介绍 9](#_Toc7540324)

[2.1 弗洛伊德算法 9](#_Toc7540325)

[2.2 遗传算法 9](#_Toc7540326)

[2.3 数学建模 9](#_Toc7540327)

[2.4 Java编程 10](#_Toc7540328)

[2.5 IntelliJ IDEA 10](#_Toc7540329)

[3. 模型与解法 10](#_Toc7540330)

[3.1 问题描述 10](#_Toc7540331)

[3.2 问题分析 11](#_Toc7540332)

[3.3 数学模型 11](#_Toc7540333)

[3.3.1 模型假设 11](#_Toc7540334)

[3.3.2 模型建立 11](#_Toc7540335)

[3.3.3 模型求解 12](#_Toc7540336)

[3.3.4 模型分析 12](#_Toc7540337)

[3.3.5 模型校验 12](#_Toc7540338)

[4. 算法设计与实验仿真 12](#_Toc7540339)

[4.1 算法设计 12](#_Toc7540340)

[4.1.1 染色体编码 12](#_Toc7540341)

[4.1.2 适应度函数 12](#_Toc7540342)

[4.1.3 个体选择 13](#_Toc7540343)

[4.1.4 双亲交叉 13](#_Toc7540344)

[4.1.5 子代变异 13](#_Toc7540345)

[4.1.6 种群评估 13](#_Toc7540346)

[4.2 实验结果 13](#_Toc7540347)

[4.3 结果分析 13](#_Toc7540348)

[4.4 优化 13](#_Toc7540349)

[4.5 线路规划 13](#_Toc7540350)

[5. 总结 14](#_Toc7540351)

[参考文献 15](#_Toc7540352)

# 绪论

## 研究背景与意义

本论文研究题目是2017年全国大学生数学建模竞赛题目D题。化工厂是一个比较危险的地方，为了减少事故发生的概率，安排人员定时巡检各个巡检点非常必要，可以有效降低事故发生率，提高化工厂安全生产水平。现有某个化工厂有26个巡检点，巡检周期和各个巡检点之间的连通图已在附件种给出，工人在调度中心XJ-0022上班接受任务后开始按照任务进行巡检，每个巡检点至少需要一名工人巡检，要求建立数学模型，设计出巡检路线，使每个巡检点能够按照要求完成巡检，并且耗费的人力资源尽量少，在固定时间不休息上班模式、可进餐可休息模式、错时上班模式三种情况下，分别求出每班最少需要的人数，给出每个巡检线路及其时间表。

巡检线路的规划问题，类似于车辆路径规划问题、物流配送问题，由于存在组合爆炸，我们人为规划的路线一般无法求得令人满意的结果，因此一般都会将原问题转化为旅行商问题。旅行商问题是一个NP困难问题，在巡检点过多的情况下使用传统的算法，比如穷举法，将无法在可允许的时间范围内求得最优解，而现实生活中我们可能并不需要使用最优解，我们只要一个合理的接近最优解的解。目前解决旅行商问题已经有多种算法，主要有两大类，一类是传统的算法，一类是启发式算法，例如遗传算法、蚁群算法、退火算法等。对旅行商问题的研究是非常有意义的，因为在很多场合，很多问题在本质上就是旅行商问题。

本文研究的化工厂巡检排班问题截止至目前，网络上已经有多种解决方案，经过研究分析，发现解决本问题的方案主要有以下几种：基于图形启发法的数学模型、基于最短路径的数学模型、基于最小生成树的数学模型、基于哈密顿圈分割的数学模型、基于蚁群算法的数学模型等，其中基于哈密顿圈和基于蚁群算法的两种数学模型有相似共同的地方，都是将问题转化为旅行商问题，而其他的数学模型则较为简单。根据这几种解决方案在最好的情况下，在固定时间不休息工作模式下每班最少需要5人，一天需要15人；在可休息可进餐工作模式下每天至少需要16人，因为进餐时间需要一名工人代替工作；在错时上班模式下，针对问题1，每天最少只需要12人，针对问题2，每天至少需要13人。

在研究多种解决方案时，发现现存解决方案都有一个共性，就是数学模型要么过于复杂，要么过于简单，解决方法和模型的关联程度较低，更多的方案是直接采用图形启发法设计巡检线路，由于巡检点数较少，采用此方法也无可厚非，但是如果有另一个化工厂也需要规划路径，那么，但是出于严谨的角度我们应该增强数学模型的普适性和解法的强逻辑性，让解法每一步都有理可循。因此，建立具有普适性的数学模型，设计更合理的求解方法非常必要。

在本文中，我将采用遗传算法和图形启发法相结合的方式规划出更加节省人力的巡检线路，既满足了化工厂安全的需求，又满足了节约人力资源的目的。通过参考文献，取各家之长结合自己的想法重新建立了数学模型，下面分析问题。该化工厂巡检线路规划中最核心的要求是使用尽量少的人力资源完成巡检任务，各个巡检点的带权连通图和各点巡检时间已给出，所有巡检点的最小巡检周期为35分钟，该类巡检点共有18个，其余8个巡检点周期均大于35分钟。由此分析可知，每条巡检线路的周期不能大于35分钟才能满足巡检要求。因此只要每个工人在35分钟周期内巡检更多的巡检点就可以了，而工人线路巡检消耗的时间有路程时间和节点巡检时间，节点巡检时间是一定不能省的，因此只能考虑节省路程时间。综上分析，我们只要能节省巡检26个节点路程消耗的时间就能使用更少的工人完成巡检任务，分析至此，可知原问题已经转化为旅行商问题或多人旅行商问题，需要计算所有巡检点两两之间的最短距离，这个任务可以使用弗洛伊德算法完成。最后，通过遗传算法编程解决旅行商问题，再计算每条巡检线路的巡检时间，结合图论启发的方式做轻微调整。

## 国内外研究现状

## 国内研究现状

目前本文所研究的题目已有了多种解决方案，下面我将分析各种解决方案的思路和存在的问题，对多种解决方案的理论依据在国内外的研究现状做一个综述，并提出自己的更优秀的解决方案。

谢晓敏、王正的《化工厂安全巡检线路的排班研究[1] 》一文中采用了弗洛伊德算法找出各个巡检点之间的最短路径，并按照巡检周期是否为35分钟将26个巡检点划分为两类，一类巡检周期35分钟的有18个巡检点，另一类是巡检周期大于35分钟的8个特殊巡检点，对两类巡检点分别采用蚁群算法求出最小哈密顿回路，其中第一类巡检点又划分为4个区域，最终规划的线路的路程消耗时间至少为105分钟。文中对问题一规划出的巡检线路每天需要15人；对问题二规划的线路是建立在第一问基础之上，将周期大于35的穿插到第一问线路中，需要16人或17人每天；对问题三，原有模型已不适合，重新规划后固定时间上班排班需要14人，可休息进餐排班需要15人。

《化工厂安全巡检线路的排班研究》一文中建立的模型采用了区域划分、分而治之的思想，对不同区域采用蚁群算法求解，虽然解决了问题，但是建立的模型和弗洛伊德算法、蚁群算法之间的关联程度有所欠缺，最后需要人为修正路径，因为该模型划分的不同区域之间路径重合过多，所以在路程上消耗的时间也就相对较多。

在《巡检线路排班优化模型》[2]一文中，作者采用了基于最小生成树建立多旅行商模型，利用弗洛伊德算法求最短路径，使用MATLAB工具求解模型，最后人为规划线路。对问题一规划的路线需要15人每天；对问题二规划的线路需要16人，替班工人在12点和6点先后顶替其他工人的工作，让其他工人进餐；对问题三采用错时上班，固定时间上班排班需要12人每天，可休息可进餐排班需要多一名替班工人，需13人每天。

该文中建立的模型和解法相对灵活，较好的解决了巡检线路的规划问题，同时巡检人员的数量相对较少。但是解法出现误差的可能性大，因为人为划分线路，数据的读入可能会容易出现不精确的情况。

在《“巡检线路的排班”问题解析》文中，作者首先采用了LINGO程序得到了精确的路程耗时68分钟和检查耗时67分钟，共135分钟，经计算得知至少需要4个工人，作者考虑增加一名工人，由此划分5条线路。作者采用TSP建立模型，由启发式方法根据TSP图形划分了5条路线。对第一问需要工人15人每天；第二问需要工人16人；第三问中，固时上班需要12人，可休息进餐需要13人每天。

该文中作者对排班调度分析较为详细，基于TSP建立的图形启发式模型简单有效，问题分析到位。在解决问题三时，作者提出7小时换班制，会出现每天换班时间不一样的情况，提前了三小时，这里可以优化。

旅行商问题具有非常久的历史了，最早出现类似的问题是1759年欧拉图提出的骑士环游问题。目前解决旅行商问题主要有两大类算法，一类是精确算法，如动态规划法、分支定界法等；一类是近似算法，如遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、神经网络等。

综合多方文献资料，现对各种解法做总结。多数解法都是围绕多旅行商问题划分为单旅行商问题建立模型，采用了不同的解法，因为巡检节点数只有26个，大多数使用了图论启发法，有的直接基于最短路径、最小生成树划分路径。多数建立的模型复杂，解法却比较简单。

本文将基于图论法建立TSP模型，使用遗传算法解决旅行商问题，基于任务均衡划分每条线路的巡检节点数量，期望使用更少的人力资源完成巡检任务。

## 国外研究现状

旅行商问题又称为旅行推销员问题，也称为货郎担问题，最早起源于1959年，由Dantzig等人提出。该问题可表述为图论里面的哈密顿回路问题，即给出一个带权完全图，找出一条权值之和最小的哈密顿回路。该问题已经被证明是一个NP难问题，因为要求权值之和最小的哈密顿回路，需要找出所有哈密顿回路分别计算权值之和，可知要对图中的所有的顶点做全排列，随着顶点数的增加，会产生组合爆炸，计算机将无法在可允许时间内得到结果。在上世纪50年代和60年代，国外一些生物学家尝试将生物进化理论应用于模拟计算，在70年代和80年代，Holland最先提出并发展了遗传算法的概念，将达尔文的生物进化理论转化为计算机语言，建立了计算机0和1的序列与染色体的联系，用计算机模拟实现了生物进化的选择、变异、交叉、优胜劣汰等理论。

在2010年，英国研究发现了蜜蜂这种生物能够轻而易举地解决旅行商问题的能力，蜜蜂每天都要在各个花丛之间采蜜，这相当于一个带权网络。英国学者的这项研究发现很快吸引了大批的数学研究者的注意，在此之前有很多国内外学者都曾研究过旅行商问题，取得了令人瞩目的成就。蜜蜂解决这个问题表现出的非凡的能力，如果能够理解蜜蜂解决这个问题的方法，那么对我们人类的生产和生活将会有非常大的帮助。因为旅行商问题应用的领域非常广阔，生活中很大部分的规划问题都属于旅行商问题，例如道路交通规划、物流配送、车辆路径、电路板设计等等。

美国在2006年的某次航空任务中需要设计一个天线，以满足本次航空任务要求，NASA（美国航空航天局）编写了一个遗传算法，利用遗传算法的进化本质，进化出了满足所有要求的天线设计，比如信号质量、天线重量、尺寸等要求。

## 本文内容与组织架构

本论文为了解决化工厂巡检线路的规划问题，参考了多方文献资料，研究了旅行商问题的应用场景和解决方法，研究了遗传算法在解决旅行商问题的有效性，以遗传算法为核心建立数学模型并求解、仿真测验。

下文介绍论文结构及其内容：

第一章：绪论，介绍选题背景及其研究意义，阐述国内外研究现状，以及介绍论文结构。

第二章：相关基础介绍，主要介绍本文使用的算法，数学建模等基础概念及使用范围等。

第三章：建立数学模型，描述化工厂问题，并为化工厂问题建立数学模型。

第四章：算法实验及其仿真，完成算法并测试仿真，测试结果的准确性，规划出线路并给出巡检时间表。

第五章：总结全文。

# 相关基础介绍

## 弗洛伊德算法

Floyd算法是由弗洛伊德创造的求多源点最短路径的算法，适用于稠密图，类似的求取最短路径的算法有迪杰斯塔拉算法，单源点，适用于稀疏图。

在本文中，原网络带权图是一个稀疏图，通过分析将问题转化为旅行商问题，需要求取各个巡检点之间的最短路径，假设工人从一个巡检点到另一个巡检点都是走最短路径。

在效率上，求取所有节点之间的最短路径这虽然可以通过n次调用迪杰斯塔拉算法，但是效率不如弗洛伊德算法。弗洛伊德算法通过三层循环，采用松弛技术，代码简单，代码核心在状态转移方程:

distance[i,j]=min{distance[i,k]+distance[k,j],distance[i,j]}，

本文中将编写Java代码实现弗洛伊德算法求最短路径。

## 遗传算法

遗传算法的研究于上世纪九十年代迅速兴盛起来，该算法是由达尔文的自然选择进化论得到启发创造出来的，模拟了自然界中生物选择进化的过程，在算法中表现为不断进化寻找最优解的过程。

要理解遗传算法我们需要先理解达尔文的自然选择学说里面的相关基础概念，比如种群、个体、染色体、基因、表现型、基因型、选择、变异等。生物中的种群是由染色体类型相同的许许多多个体组成，每个个体都至少有一条染色体，染色体由多个基因组成，性状表现由基因决定，生物在产生后代时会发生基因的重组，变异等，更加适应环境的个体将会有更大的生存优势，产生后代的几率也更大，变现为优胜劣汰的大趋势，不断进化产生更加适应环境的个体。

遗传算法中许多概念与达尔文进化学说中的概念相同，算法中一个解集包含着许许多多的解，相当于种群中包含着许多个体，每个解就是一个个体，一个个体至少含有一条染色体。在本文巡检线路研究中，染色体就是一组巡检节点遍历序列，每个巡检节点相当于一个基因，这条染色体决定了该个体的表现型，即遍历巡检节点的顺序，以及该个体的适应度也由染色体的基因序列计算得到，后文将详细介绍如何计算。

## 数学建模

数学建模是对实际问题进行抽象建立数学模型，将实际问题符号化模型化，能够模拟抽象客观的现象或规律，并通过对模型进行求解达到解决实际问题的目的，是用数学语言描述实际问题的过程。数学建模有助于提高建模者的应用数学思维，提高解决实际问题的能力。

数学建模国外兴起于上世纪60年代和70年代，到了80年代，美国首先举办了大学生数学建模竞赛，我国在90年代首次举办并迅速发展，参赛人数逐年增加。随着计算机技术的迅速发展，数学建模抽象实际问题并通过计算机工具对模型进行求解，对问题的求解更加精确。建模过程需要使用多门学科知识，特别是数学这门学科，抽象、严密，应用非常广阔，计算机科学也是数学应用的一种形式。

数学建模的过程一般包括以下几个阶段：模型准备阶段、模型假设阶段、模型建立阶段、模型求解阶段、模型分析阶段、模型校验阶段。

本文中分析化工厂巡检线路建立的数学模型是基于旅行商问题的，后文将详细分析建立过程。

## Java编程

Java语言是一门面向对象的高级编程语言，没有C++语言的指针、多继承等复杂难懂的概念，一般不存在内存泄漏的风险。Java在上世纪90年代兴起至今不衰，通过Java虚拟机，Java语言实现了一次编译到处运行的理念。

Java语言具有很好的可移植性，跨平台，能在Windows环境和Linux环境等操作系统运行；具有安全性，由于没有指针，可以防止恶意修改内存指向；Java具有高性能的特点，由于是先编译后解释执行，为了提高执行效率，Java拥有将字节码转化为机器代码的程序……。

本文将化工厂巡检问题转化为旅行商问题，解决旅行商问题采用了遗传算法，实现遗传算法和求取各个巡检点之间的最短路径都采用了Java编程语言，程序代码在附录中给出。

## IntelliJ IDEA

IDEA是Java集成开发环境，由于它具有代码提示、支持git等版本工具、具有许多优秀的智能插件等优点，被业界公认为最好的Java开发工具之一。早期的Java集成开发环境如Eclipse、MyEclipse等，与IDEA比较各有特点，网络上对这两种IDE分两大派，争论各持己见，人云亦云，本人接触最多的Java IDE就是IDEA，使用起来比较习惯。

# 模型与解法

## 问题描述

题目见附录，来源于2017年全国大学生数学建模竞赛题目D题。大意为某化工厂有26个巡检点需要巡检，巡检时间、巡检周期和各巡检点之间的连通关系和路程耗时由附件已知，现需要规划巡检路线，要求使用尽量少的人力资源并按质按量完成巡检任务，分别给出在固时不休息不进餐三班倒模式、可休息可进餐三班倒模式、错失上班三班倒模式下巡检人员安排时间表。

## 问题分析

分析原问题：对26个巡检点进行线路规划，26个巡检点总共的巡检耗时68分钟，为了精确计算巡检人员的下限，可知应该尽量减少巡检线路的路程耗时，即遍历26个巡检点，耗费时间最少，由此分析得知此问题是旅行商问题。经过计算，遍历所有巡检点路程耗时最少为67分钟，加上巡检点耗时68分钟，一共135分钟，巡检点的最小巡检周期为35分钟，135/35=4，因此至少需要4人才能完成巡检任务。

下面尝试将连通网络图的26个巡检点划分为4个区域，分别判断4个区域巡检时间是否满足要求，是否能做微调整使其满足巡检任务要求。在以下建立的模型中使用Java编写遗传算法求解得出线路划分，多次运行该算法程序尝试求得最优解，并对线路划分进行判断是否满足35分钟周期的约束，如果不满足应该再尝试是否能做调整。

## 数学模型

## 模型假设

## 模型建立

模型变量：

Z：巡检员工数量

MinZn：所有巡检线路路程耗时之和

D(i,j)：巡检节点i到巡检节点j的最小耗时

ak：表示某个化工厂巡检点标号

AREA(i)：化工厂部分巡检点的集合，集合元素为ak

模型建立：

AREA(i)={a1,a2,…,an}， (3.1)

i=1,2,…,Z；ak∈{1,2,3,…,26}；AREA(1)∩AREA(2)∩…∩ARAE(N)=Ф

F(k)=， (3.2)

k=1,2,…,Z；a1,an∈AREA(k)；

MinZn=，i∈1,2,…,Z (3.3)

H(k)=F(i)/MinZn，i,k∈1,2,…,Z (3.4)

公式（3.1）表示将26个巡检点划分为Z个区域，每个区域由一个工人负责巡检；公式（3.2）表示对划分的每个区域计算路程耗时，每条线路都是一个哈密顿回路；公式（3.3）计算了所有区域路程耗时之和，即每条哈密顿回路路程耗时之和；公式3.4计算了各条线路的路程耗时与各线路总路程耗时之和的比例关系，可以通过比较此值判断工作均衡程度。

针对化工厂巡检问题一和问题二，固定时间上班不休息不进餐的三班倒模式和固定时间上班可休息可进餐的三班倒模式，可以转化为多人旅行商问题，由之前的分析可知最少需要4人，那么尝试将巡检点划分成4个部分，若不考虑工作均衡的问题，由多人旅行商的解决方案划分的某些线路可能会无法完成巡检任务，有些路线每周期总工作时间超出35分钟，有些路线工作量则太少，导致有些超出预期的线路需要增加一名工人才能完成巡检要求，这显然不是很符合我们的目的，而网络上有些解决方案也确实是这样的。在此我们考虑工作的均衡，将每条线路的节点数量控制在5-7个，这样就能解决工作均衡的问题又能让每条线路巡检时间趋向于饱和，最后可以根据网络图适当的调整，就可以设计出更加优秀的路线。

## 模型求解

## 模型分析

## 模型校验

# 算法设计与实验仿真

## 算法设计

## 染色体编码

本文针对化工厂巡检的排班调度模型设计染色体编码，尽量使其具有更高的适用性和可移植性，在众多编码方式中，最终决定采用巡检点编号序列编码的方式，例如：

1 2 3 4 5 6 7……24 25 26，

表示从1号巡检点开始巡检，顺序巡检2号、3号……26号巡检点最后回到1号巡检点。

每个个体都含有一条染色体，染色体的基因序列表示访问巡检点的顺序。

## 适应度函数

每个个体都有适应度值，用来衡量该个体再群体中的适应程度，在本文中直接将线路耗时的倒数作为适应度函数值，路程耗时越小，适应值越大。

## 个体选择

## 双亲交叉

## 子代变异

## 种群评估

## 实验结果

## 结果分析

## 优化

## 线路规划

# 总结

# 参考文献

1. 谢晓敏,王正.化工厂安全巡检线路的排班研究[J].南通职业大学学报,2018,32(02):69-71+74.
2. 段振华,杨海铭,李循鹏,文雷华.巡检线路排班优化模型[J].南方职业教育学刊,2018,8(04):61-66.
3. 薛毅.“巡检线路的排班”问题解析[J].数学建模及其应用,2018,7(01):52-62+79.