

硕士学位论文

**全自动喷浆机器人轨迹规划方案的设计
与研究**

**Design and Research of Trajectory Planning Scheme
of Fully Automatic Spraying Robot**

学 科 专 业： 工程

专 业 领 域： 控制工程

作 者 姓 名： 程清

指 导 教 师： 谢斌 副教授

中南大学
2021 年 6 月

中图分类号 TP391.4

学校代码 10533

UDC 004.8

学位类别 专业学位

硕士学位论文

全自动喷浆机器人轨迹规划方案的设计与研究

Design and Research of Trajectory Planning Scheme of Fully Automatic Spraying Robot

作者姓名：程清

学科专业：工程

专业领域：控制工程

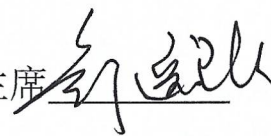
研究方向：工业机器人轨迹规划

二级培养单位：自动化学院

指导教师：谢斌 副教授

论文答辩日期 2021.5.27

答辩委员会主席



中南大学
2021年6月

学位论文原创性声明

本人郑重声明，所呈交的学位论文是本人在指导教师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

作者签名：程涛 日期：2021年6月2日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版；本人允许本学位论文被查阅和借阅；学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用复印、缩印或其它手段保存和汇编本学位论文。

保密论文待解密后适应本声明。

作者签名：程涛

日期：2021年6月2日

导师签名：谭建

日期：2021年6月2日

全自动喷浆机器人轨迹规划方案的设计与研究

摘要：目前隧道喷浆主要由机手遥控喷浆机来完成。这一项工作对机手的技术要求很高，并且喷浆的环境很恶劣，对工人的身体危害极大。隧道施工机械智能化是机器人未来发展的重要方向，目前对于隧道全自动喷浆机的相关研究内容较少，喷浆机喷枪的轨迹规划是实现全自动喷浆的重要环节。本文从实际喷浆场景出发，提出了一套喷浆机器人的轨迹规划方案，包括建立喷浆机的厚度累积模型、隧道点云信息的处理以及求解最优运行轨迹。其主要研究内容如下：

(1) 建立了平面上的混凝土厚度累积模型。为了分析混凝土在隧道壁面的增长情况，本文结合喷浆时的一些参数，利用常用的厚度分布模型建立混凝土的厚度累积模型，该模型可以表示喷浆时隧道壁面上混凝土的增长情况，在后文进行轨迹规划时参与目标函数的构建。为了求解模型中的一些参数以及验证该模型的准确性，进行了多次喷浆实验，随机选取采样点，计算理论厚度值与实际厚度值之间的差值，最终结果表明，厚度的平均误差不超过 1cm，证明了该模型的准确性。

(2) 提出了一种处理隧道点云数据的方法。通过激光雷达采集的隧道表面的数据是离散的，不能直接进行轨迹规划，本文提出了一种解决方法：一、使用移动最小二乘法将离散的数据拟合成曲面。二、将拟合的曲面栅格化。三、利用网格法计算出点云数据到拟合曲面中对应栅格的距离。利用移动最小二乘法四次基函数拟合精度达到 97%，可以很精准的反映隧道信息。本文选择的栅格边长为 1cm，相较于庞大的隧道面来说，栅格的精度很高，造成的细微误差可以忽略不计，从最终得到的栅格热力图来看，该方法是有有效的。

(3) 提出了一种隧道喷涂轨迹的规划方法。本文通过理论分析确定了光栅形轨迹路线优于其他轨迹路线，基于建立的混凝土厚度增长模型和栅格化的隧道信息，将喷浆问题构建成一个优化问题，以喷枪在轨迹上每个栅格中停留的时间为决策变量，以整个栅格面的平整度为优化目标，用建立的混凝土重力模型对喷涂时间加以约束。采用梯度下降法和自适应遗传算法对该问题进行求解，进行了两组仿真实验，第一组结果表明：梯度下降法的求解一条轨迹的时间平均为 74s、每个栅格的平均误差为 0.9cm、涂料利用率为 96.7%，自适应遗传算法求解一条轨迹的时间平均为 231s、每个栅格的平均误差为 2.3cm、混

凝土平均利用率为 95.4%。第二组结果表明：梯度下降法的求解一条轨迹的时间平均为 76s、每个栅格的平均误差为 1.2cm、混凝土平均利用率为 95.4%，自适应遗传算法求解一条轨迹的时间平均为 278s、每个栅格的平均误差为 2.0cm、混凝土利用率为 96.2%。从实验结果来看，梯度下降法可以有效的求解该问题。

(4) 建立了一套喷浆机器人轨迹规划仿真系统。将整篇文章的轨迹规划技术整合成一套系统，方便进行喷浆轨迹规划以及查看该轨迹的仿真结果，验证算法的有效性。该系统已经在本项目组中进行应用，具有一定的实用价值。

图 38 幅，表 15 个，参考文献 60 篇

关键词：喷浆机器人；喷涂模型；点云拟合；路径规划；仿真实验

分类号：TP391.4

Design and Research of Trajectory Planning Scheme of Fully Automatic Spraying Robot

Abstract: At present, Tunnel Shotcreting is mainly completed by workers controlling shotcreting machine. This work has high technical requirements for the workers, and the environment of spraying is very bad, which is very harmful to the workers' health. Intelligent tunnel construction machinery is an important direction of robot development in the future. At present, there are few researches on the tunnel automatic shotcrete machine. The trajectory planning of shotcreting machine is an important part of realizing automatic shotcreting. In this paper, a set of trajectory planning scheme of the shotcrete robot is proposed based on the actual shotcrete scene, including the establishment of the thickness accumulation model of the shotcrete machine, the processing of tunnel point cloud information and the solution of the optimal trajectory. The main research contents are as follows:

(1) Establish the concrete thickness accumulation model on the plane. In order to analyze the growth of concrete on the tunnel wall, this paper combined with some parameters during shotcreting, using the commonly used thickness distribution model to establish the concrete thickness accumulation model, the model can represent the growth of concrete on the tunnel wall during the shotcrete, and participate in the construction of the objective function in the trajectory planning later. In order to solve some parameters in the model and verify the accuracy of the model, several shotcrete experiments were carried out. Sampling points were randomly selected to calculate the difference between the theoretical and actual thickness values. The final results show that the average thickness error is less than 1cm, which proves the accuracy of the model.

(2) A method for processing tunnel point cloud data is proposed. Number of tunnel surfaces acquired by Lidar . Since the data is discrete, the trajectory planning cannot be carried out directly. In this paper, a solution is proposed. Firstly, the moving least square method is used to fit the discrete data into the surface. 2. Rasterize the fitting surface. 3. The

grid method is used to calculate the distance between point cloud data and the corresponding grid in the fitting surface. Using the moving least square method, the fitting accuracy of the fourth basis function can reach 97%, which can accurately reflect the tunnel information. The grid side length chosen in this paper is 1cm. Compared with the large tunnel surface, the grid has a high precision and the minor errors caused can be ignored. Judging from the final grid thermal map, this method is effective.

(3) A planning method of tunnel spraying trajectory is proposed. In this paper, the grating shape is determined by theoretical analysis Track route, based on the mathematical models of concrete thickness increase and rasterize tunnel information, build the shotcrete problem to an optimization problem, in each grid on the track in a spray gun time as decision variable, with the aim of the whole grid smoothness as the optimization goal, with concrete gravity model is set up on spraying time constraints. Gradient descent method and adaptive genetic algorithm were used to solve the problem. Two groups of simulation experiments were carried out. The results of the first group showed that: The average time of solving a track by the gradient descent method is 74s, the average error of each grid is 0.9cm, and the paint utilization rate is 96.7%. The average time of solving a track by the adaptive genetic algorithm is 231s, the average error of each grid is 2.3cm, and the average utilization rate of concrete is 95.4%. The second set of results show that the average time of solving a track with gradient descent method is 76s, the average error of each grid is 1.2cm, and the average concrete utilization rate is 95.4%, while the average time of solving a track with adaptive genetic algorithm is 278s, the average error of each grid is 2.0cm, and the concrete utilization rate is 96.2%. From the experimental results, the gradient descent method can solve the problem effectively.

(4) A simulation system for trajectory planning of shotcrete robot is established. The trajectory planning technology of the whole paper is integrated into a system, which is convenient to carry out the trajectory planning and check the simulation results of the trajectory, and verify the effectiveness of the algorithm. The system has been applied in this project

group and has certain practical value.

Figure 38, Table 15, Reference 60

Key words: Shotcrete Robot; Spraying Model; Point Cloud Fitting; Path Planning; The Simulation Results

Classification: TP39

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 喷涂厚度累积模型研究现状	3
1.2.2 喷涂机器人路径规划研究现状	4
1.3 研究内容及论文结构安排	5
第 2 章 混凝土厚度增长模型	7
2.1 引言	7
2.2 厚度累积模型介绍	7
2.2.1 β 分布模型	7
2.2.2 高斯分布模型	8
2.2.3 椭圆双 β 分布模型	8
2.3 混凝土厚度累积速率模型的建立	9
2.3.1 建立厚度累积速率模型的假设	9
2.3.2 平面喷浆模型	10
2.4 喷浆测试实验	13
2.4.1 水平面喷浆实验	13
2.4.2 混凝土单次喷涂厚度限制喷浆实验	16
2.5 本章小结	19
第 3 章 隧道面信息数据处理	20
3.1 引言	20
3.2 移动最小二乘法研究及隧道点云数据拟合	20
3.2.1 移动最小二乘法的原理	20
3.2.2 紧支撑权函数	22
3.2.3 紧支撑域的生成算法	23
3.2.4 待拟合点的邻域影响节点确认方法	24
3.2.5 隧道点云数据的移动最小二乘法拟合	25
3.3 标准曲面栅格化处理	26
3.3.1 曲面栅格化	26
3.3.2 超欠挖数据计算	28
3.4 总结	30
第 4 章 基于喷枪运行速度的轨迹规划	31
4.1 引言	31

4.2 栅格喷涂问题的构建.....	31
4.2.1 常用的轨迹规划方案.....	31
4.2.2 相邻轨迹之间间距的确认方法.....	31
4.2.3 栅格面上喷涂问题的描述.....	33
4.2.4 喷涂区域离散化.....	34
4.2.5 栅格内厚度累积模型.....	35
4.2.6 喷浆目标函数的建立.....	37
4.3 求解算法的介绍.....	38
4.3.1 梯度下降法.....	38
4.3.2 自适应遗传算法.....	40
4.4 喷浆仿真实验设计.....	42
4.4.1 隧道左边区域喷涂仿真实验.....	43
4.4.2 隧道顶部区域喷涂仿真实验.....	45
4.5 总结.....	47
第 5 章 喷浆机器人轨迹规划系统设计与实现.....	48
5.1 引言.....	48
5.2 喷浆机器人轨迹规划系统结构设计.....	48
5.3 喷浆机器人轨迹规划系统实现.....	49
5.3.1 软件开发平台.....	49
5.3.2 软件的架构.....	51
5.4 总结.....	52
第 6 章 总结与展望.....	53
参考文献.....	55
攻读学位期间主要研究成果.....	60
致 谢.....	61

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

近几年中国隧道交通事业飞速发展,无论是从数量、质量还是技术设备等都已达到世界领先水平^[1]。中国隧道大会报道,中国已经成为最大的地下隧道市场国家,2013年,中国建成世界上最大的高铁网,其中高铁隧道的占比超过50%。因为人口众多,而地铁的修建可以很好的解决地面交通拥堵问题,所以国内人口密集的城市都有修建高铁^[2]。据统计,截止2020年9月份,我国公路建设总投资达到17788亿元,同比增长12.8%。截止至2019年年底我国隧道数量共19067座,同比增长7.5%,隧道总长度达到了1896.66万米,同比增长10%。随着经济的发展,私家车越来越多,道路越来越拥挤,隧道的开发量也会越来越大。

国家对于隧道的需求越来越大,但隧道的开发过程是一个比较复杂的流程。隧道喷浆是其中一个比较核心的环节,最原始的喷浆方式如图1-1-a所示,主要由机手手持喷枪进行喷浆作业,这是一种最简单的喷浆方式,它的缺点很明显,即机手需要近距离靠近喷涂区域,喷涂隧道顶部区域需要搭建支架,喷涂的质量无法得到保证。目前隧道喷浆操作如图1-1-b所示,由机手手持遥控器,控制喷浆机机械臂的姿态进行喷浆操作,可以很轻松的喷涂弧顶区域,相比于人工喷涂,具有更好的稳定性,极大程度的保证喷涂的质量,同时能够提高喷涂的效率和混凝土的利用率,缩短了喷涂操作所需要的时间^[3]。它的缺点如下:一、喷浆的质量得不到保证,喷浆质量的衡量标准是附着在壁面上混凝土的平整度,混凝土喷涂过厚会导致混凝土的浪费,过少则会降低隧道的防护性能,喷涂的质量完全取决于机手的操作经验。二、机手使用遥控器操作机械臂,必须离机械臂和喷嘴很近,以观察喷涂效果和避免机械臂碰到壁面。在喷浆的过程中,混凝土颗粒会散落到空气中,严重影响操作机手的身体健康。



(a) 手持喷枪喷浆操作

(b) 遥控机械臂喷浆操作

图 1-1 隧道喷浆的两种方式

针对隧道喷浆领域的痛点，我们实验室旨在开发一套全自动隧道喷浆机器人。其大致方案如图 1-2 所示。目前市面上并没有成熟的全自动隧道喷浆机器人产品，其中的一个主要难点在于对隧道面的轨迹规划，轨迹规划的好坏对喷涂效果有重大的影响。



图 1-2 全自动隧道喷浆机器人工作流程图

目前主要通过人工示教法和离线编程法^[4]来对喷涂机器人进行轨迹规划。人工示教法是指让有经验的机手操作机器在待喷涂面前进行喷涂操作，同时用计算机记录机械臂的运动姿态，待喷涂操作完成后将各个关节的运动姿态连接起来，形成最终的喷涂轨迹^[5]。这种方法实施起来较为简单但其缺点显而易见，想要获得一条理想的轨迹需要机手反复的调试，最终选择一个最好的喷涂效果，记录它的轨迹，这个过程比较浪费时间，而最终的喷涂效果还是由机手的经验来决定^[6]。

由于示教方法的缺点不再能满足工业自动化的发展，高效编程法逐步替代了示教方法，其大致包括以下步骤：一、用视觉设备采集信息，对采集的信息进行处理；二、根据最终需要的效果规划出一条轨迹，使得在机械臂沿着这条轨迹工作可以取得好的效果；相较于示教方法，它可以自己获取场景信息，并且针对不同的场景，可以自动规划不同的运行轨迹，提高了工作效率。其难点是相关算法的设计，算法的效果决定了机器的智能化程度。

本文采用编程法进行喷浆机器人的轨迹规划，针对复杂的隧道面，提出了一种计算喷浆机轨迹路线的方法，该方法已经应用于全自动喷浆机器人的研发。可以大幅度节省人力，改善工人们的工作环境，提高隧道施工效率。该轨迹规划方法不仅可以应用于隧道施工领域，对于其他不规则的曲面也能进行轨迹规划，具有很高的实用价值。

1.2 国内外研究现状

国外从 20 世纪 60 年代就开始采用机械手臂进行喷浆。早期国内主要采用手持喷枪进行喷涂，这就导致了喷涂之前必须搭建脚手架，搭建脚手架是一个很耗时的操作，会严重影响施工效率。后来采用国外机械手臂设备，但是进口的设备十分昂贵，维修起来很困难。国内自主研发喷浆机械手臂开始于 70 年代，经过几十年的不懈努力，国内的喷浆机器人技术已经走在了世界的前列，很多喷浆机已经出口到世界的各个国家。但是全自动喷浆操作还处于探索阶段，到目前为止并没有一套完整的技术可以实现全自动喷浆，在减少人工干预、实现隧道自动喷浆的道路上，仍有很多问题等待被解决。

1.2.1 喷涂厚度累积模型研究现状

在进行轨迹规划之前，需要对附着在壁面上混凝土的厚度分布进行建模。目前国内还没有较成熟的混凝土厚度沉积模型，但国内外对喷漆沉积模型有大量的研究，经过调研发现，混凝土经过喷枪口时被高速气流打散成很细的颗粒，其直径不超过 5mm，所以混凝土厚度沉积模型可以借鉴喷漆沉积模型里面相关的技术。

国外的研究学者早在上世纪 80 年代就对喷涂累积模型进行了深入的研究。Balkan 等人^[7]建立了涂层沉积 β 分布模型，分析不同 β 值下不同的沉积模型分布，并通过实际的喷涂实验验证了该模型的准确性。W.Persoons 和 H.VanBrussel^[8]提出了大曲率场景下的漆膜厚度模型服从高斯分布，其漆膜厚度分布函数可以表示为：

$$F(x, y) = d_{\max} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right) \quad (1-1)$$

公式(1-1)中， $d_{\max}$ 表示喷涂区域中心的最大漆膜厚度值， σ_x, σ_y 分别是 x 轴方向和 y 轴方向的高斯参数。Antonio^[9]为了提高喷射混凝土的相关技术，通过不断调整喷浆机的喷涂轨迹，记录控制系统的各项系数信息，从而得到喷涂模型和各项参数的关系，并且通过数学关系推导该模型的准确性。Sahir Arikan^[10]针对曲面喷涂机器人的喷涂过程进行建模，设计了一套计算机程序，用户可以自己设置漆膜参数，喷涂路径参数等，得出拟合出的漆膜厚度，并且讨论了诸多影响因素对喷漆厚度模型的影响。Goodman^[11]利用相关实验得出待喷涂表面的厚度增长速率和喷涂距离、喷涂流量、压力等因素相关，并且根据这些数据建立了二次抛物线模型。Chen 等人^[12]建立了平面上的喷涂累积模型和任意自由曲面上的喷涂累积模型，并且通过实验验证模型中的相关参数。

国内对喷涂模型也有许多研究，王国磊等^[13]将喷涂的各种工艺参数当作变量，研究多个变量的喷涂模型建模方法，提出了一种基于 β 分布的涂层增长函数，建立了喷枪流量和喷涂距离对涂层增长函数的影响，并且用实验验证了该模型的实用性。刘洋^[14]针对累积模型，提出了一种双偏置模型，并且分析了此模型匀速喷涂所形成的涂层，推断出待喷涂面上某点的累积速率，最后结合实验数据验证了此模型的准确性，经过证明，这个模型更加符合实际喷涂情况。张永贵^[15]根据喷枪的实际情况提出了椭圆双 β 分布模型，并且不断改变 β 的值得到不同的拟合形状，该模型的组成比较简单，易于计算。武晨光^[16]还研究了在不同喷涂角度下的喷涂模型，建立了涂层增长函数与喷枪喷涂角度的关系。陈恩^[17-18]针对涂层分布问题，记录改变参数时涂层分布模型相应数据的变化，并且使用 BP 神经网络对采集的数据进行拟合，建立了各种影响因素与涂层分布的关系。

可以看出,国内外对于各种喷漆模型的研究众多,考虑的影响因素也十分广泛。但是对于混凝土喷浆增长模型还没有一个准确的描述,混凝土的沉积模型不同于喷漆模型,主要表现在喷漆一般是从上往下喷涂,所以只需要考虑涂料的附着情况即可,喷浆操作是从下往上进行喷涂,利用强大的气压把混凝土打在隧道壁面上,不仅需要考虑喷涂增长模型,还需要考虑混凝土因为重力掉落而造成混凝土的损失情况。混凝土的喷涂实验数据测量起来比较困难,精度也很难把控,因此目前还没有较为准确的喷浆累积模型。本文提出了一种测量混凝土厚度增长模型的方案,并且通过喷浆实验验证了模型的准确性。

1.2.2 喷涂机器人路径规划研究现状

在如今的工艺生产中,在产品表面覆盖一层保护膜是提高产品质量和性能的一种重要手段。当待喷涂的产品表面规整光滑时,可以直接固定待喷涂产品,让喷枪匀速移动,使喷漆均匀覆盖产品表面即可。如果待喷涂的物体表面形态复杂,单单的匀速喷涂并不能取得较好的喷涂效果,这时就要调整喷枪的运动轨迹。涂层的最终厚度受多种因素影响,主要包括涂料自身特性、环境因素、喷涂模型和对喷枪规划的路径等。

国外学者对待喷涂面的轨迹规划研究如下。**Sheng** 等人^[19]首次考虑了复杂待喷涂面的厚度和喷头运动轨迹之间的关系,测试了多种移动方式,考虑轨迹之间的间距,最终得出一条最佳的运行轨迹。针对表面较复杂的零件,喷涂路径规划一直是一个费时费力的过程,**Chen** 和 **Heping**^[20]提出基于 CAD 模型的自动路径规划技术,缩短了路径规划的时间,提高了工业生产的效率和喷涂的质量,并且讨论了这项技术的优缺点。他还提出了在任意曲面进行轨迹规划的一种方法,将任意曲面进行分割成一些标准曲面,再分别对其进行轨迹规划,求出对应的代价函数,并且对代价函数进行优化求解,最终通过仿真实验验证了其理论的正确性。**Antonio** 和 **Ramabhadran**^[21]为喷涂工艺应用中的最佳路径或者是参数选择提供了一个框架,通过优化框架来选择喷涂时的参数,讨论了不同曲面选用不同的喷涂参数的合理性,该模型十分适合离线模拟。卡耐基梅隆大学的 **Atkar**^[22]根据曲率不同将复杂的曲面分成若干个规则的平面,并且对每个平面分别进行轨迹规划,从而达到规划复杂曲面的目的。**M.V.Andulkar** 等^[23]提出了增量式离线轨迹规划方法,并且对影响目标喷涂厚度的因素进行了优化,提高了喷涂的均匀性。**Cho**^[24]等人在考虑力矩和冲力的影响条件下,以时间最优为目标对机器人的轨迹进行规划。**Peter**^[25]将最大速度和一些边界条件作为约束,提出了一种生成最优且光滑的轨迹的方法。**Lee** 等人^[26]提出了一种加快进化速度的方法,以时间最优为原则,取得了较好的轨迹规划方案。**Daniel**^[27-28]针对喷涂表面喷涂均匀度的问题,采用

了一种变量式喷涂的方式来应对喷涂过程中喷涂表面的变化,采用一种非线性共轭梯度算法对运行过程中的轨迹参数进行求解,通过该算法求解的参数值可以有效地提高喷涂表面的平整度。

国内学者对于待喷涂面的轨迹规划研究如下:清华大学陈雁等人^[29]建立了抛物线喷涂模型,以待喷涂面喷涂后的厚度值和目标值之间的方差作为优化函数,对待喷涂的影响参数进行了优化。清华大学的缪东晶等^[30]提出了数控刀位的轨迹自动生成方法,并且优化了运行时的速度,提高了喷涂的质量。马淑梅^[31]建立了平面和曲面的涂层厚度累积模型,针对曲面喷涂轨迹规划问题,采用粒子群算法进行优化,优化了喷涂过程中的相关影响参数,例如喷涂速率,喷枪离喷涂面的距离,喷涂轨迹之间的间距等,取得了良好的喷涂效果。东南大学的邵振华等^[32]将大区曲率复杂曲面根据不同的曲率划分成若干个近似的光滑的曲面或者平面,然后对划分出来的子曲面逐一进行轨迹规划。邹继刚^[33]基于时间和能量最优为优化目标,对机器人进行了B样条轨迹规划。杨国军^[34]在充分考虑机器人的运动学模型和动力学模型后,利用遗传算法求出了一类机械臂的最优轨迹。孟正大^[35]对待喷涂物件的喷涂时间进行了相关研究,将多个喷涂轨迹问题定义为广义旅行商问题,并且使用遗传算法、进化算法、粒子群算法等对相关问题进行求解,最终通过仿真实验验证了该优化方案可以有效地减少喷涂时间,提升效率。

从以上调研来看,国内外研究轨迹规划的学者众多,大多数都是考虑在整齐的模具上进行喷涂,遇到复杂的曲面就进分片处理,转换成平面然后再进行轨迹规划,整体处理方案比较简单,不适合隧道这种复杂的曲面。本文提出了一种对隧道面进行轨迹规划的方案,并且通过仿真实验验证了该方案的有效性。

1.3 研究内容及论文结构安排

本课题来自于本实验室和科达公司联合研发的隧道自动喷浆机器人,主要的目的是实现隧道无人化自动喷浆,保证喷浆的质量符合工业要求的标准。本文主要解决隧道面喷浆轨迹规划问题,首先对遥控喷浆机器人KC30进行喷浆建模,构建出它的喷浆效果,讨论喷浆过程中的相关参数对喷浆效果的影响。接着对采取的隧道面信息进行处理,根据处理的信息对隧道面进行轨迹规划,使喷浆机沿着这条轨迹喷涂能取得很好的喷涂效果。隧道面喷浆轨迹规划的研究具有很大的应用价值,它是对喷浆质量的最好保证,本文的研究推进了全自动隧道喷浆机器人的研究进程,并且构建的系统可以用来验证各种喷涂算法,不需要在喷浆机上进行试验就得到喷涂效果,提高了开发的效率。

全文共分为五个章节,其每个章节部分的主要内容如下:

第一章介绍了本文的研究背景和研究意义,分析了喷浆机器人的国内外目前

研究现状,介绍了相关技术的国内外发展情况,确定了本文的研究内容,阐述了论文相关章节的安排。

第二章主要解决喷浆机器人的喷浆建模问题。首先阐述喷浆机器人的喷浆原理,介绍了目前比较常用的几种厚度累积模型。然后在平面上建立喷浆机器人的厚度增长模型,确定模型和影响参数的关系。接着从实际情况出发,讨论了混凝土在自身重力的作用下对喷浆模型造成的影响,建立函数关系式。最后通过真机进行喷浆试验,确定影响因素,采集相关数据,对拟合的喷浆模型进行参数矫正,验证建立喷浆模型的准确性。

第三章主要对采集的隧道面信息进行处理。通过激光雷达采集的隧道面信息称为点云数据,由于激光雷达自身的特性,所以采集的点云数据是离散的。本文采用移动最小二乘法对点云数据进行拟合处理,求出拟合曲面,然后对拟合曲面进行栅格化处理,最后进行点云数据的超欠挖计算。

第四章主要对轨迹规划问题进行求解。从现实喷浆经验出发,提出喷枪的运行轨迹方案,确定轨迹之间的合适间距,建立喷枪在移动过程中所形成的厚度模型,确定其影响参数,建立以整个隧道面的平整度为优化目标的函数表达式。运用自适应遗传算法以及梯度下降法对该目标表达式进行求解,计算最优的喷枪移动速度变化曲线,并通过仿真验证该轨迹的效果。

第五章主要介绍喷浆轨迹规划系统。为了方便进行喷浆实验仿真,结合本文提出的技术开发了一套喷浆轨迹规划系统。这一章介绍了该系统的架构、开发软件的选取和开发的流程。

第六章为工作总结和展望。总结本文所做的一些研究对于项目的实际推进意义,提出研究中存在的一些不足,最后结合项目的发展情况,确定下一步的研究方向和工作内容。

第 2 章 混凝土厚度增长模型

2.1 引言

喷浆最终的目的是在隧道壁面上形成均匀的混凝土护层，因此研究混凝土在隧道壁面上的沉积规律、建立合理的喷浆模型至关重要。在此之前，对混凝土均匀度控制主要依靠机手的喷浆经验，所以往往会导致最终形成隧道壁面平滑度不高，使得喷浆的质量降低。因此，根据经验来进行喷浆操作并不十分的可靠，必须根据实际喷浆情况，考虑影响最终喷浆效果的因素，进行相关实验，对影响因素进行参数化，建立混凝土厚度增长模型。本章介绍了影响喷浆效果的一些因素，建立了混凝土厚度增长模型，讨论了混凝土重力因素对喷浆效果造成的影响，最后进行了喷浆试验，利用最小二乘法求出混凝土的厚度增长速率模型，验证了建立混凝土厚度增长模型的准确性，为轨迹规划的分析提供理论基础。

2.2 厚度累积模型介绍

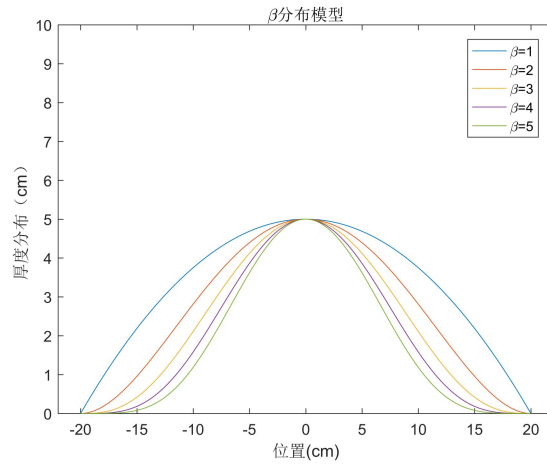
本章主要对一些典型的厚度模型进行介绍，这些模型应用广泛，可根据实际工况使用不同的喷涂模型。

2.2.1 β 分布模型

β 分布模型在喷涂领域是使用率最高的模型，它可以灵活的调节参数 β 的值来模拟不同的涂层分布场景， β 模型的具体函数形式如下^[36-37]：

$$T(x) = T_{\max} (1 - x^2 / w^2)^{\beta-1} (-w \leq x \leq w) \quad (2-1)$$

其中， $T(x)$ 表示在喷涂区域内任意一点的喷涂厚度， $T_{\max}$ 表示待喷涂区域中心的最大厚度值，它需要根据实际喷涂的一些参数来确定， w 是喷涂区域的半径，这个参数在实际喷涂的过程中也可以测量得出。可以看出， β 分布模型公式简单，易于计算，并且可以模拟出大多数分布形状。假设 $T_{\max} = 5$ ，半径 $w = 20$ ，则其分布示意图如下图所示，图中的曲线表示当参数 β 选取不同的数值时形成的累积图形。

图 2-1 不同 β 值下的涂层厚度分布图

2.2.2 高斯分布模型

高斯分布函数同样可以表示混凝土在空间中的分布状态，其具体函数形式为 [38-39]：

$$f(x) = e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (-3\sigma \leq x \leq 3\sigma) \quad (2-2)$$

其分布状态的峰值以及分布状态的范围取决于实际喷涂情况，可以通过调节 σ 参数来调节该函数的分布状况，以此来逼近任何分布情况。高斯模型的应用也十分广泛，其特点是在喷涂区域以外累积厚度为 0，符合实际情况，并且用 MATLAB 工具十分容易的绘出其函数分布状况。但是其对电脑配置要求较高，如果涉及运算量大的状况，运算速度较慢。其在 MATLAB 上模拟的厚度分布如下图所示：

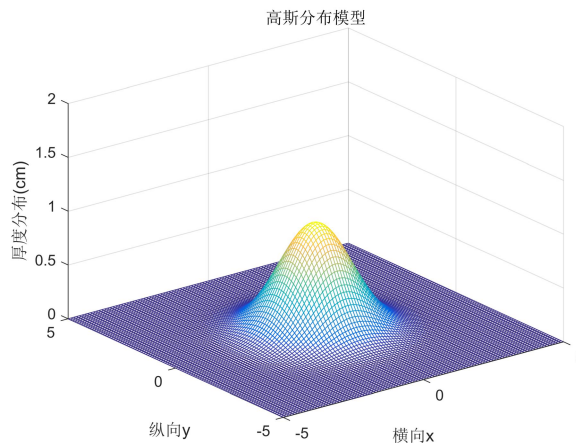


图 2-2 高斯函数涂层厚度分布模型

2.2.3 椭圆双 β 分布模型

前面介绍的两种模型的横向分布和纵向分布是一样的，并且底层附着形状为圆形。当喷嘴的形状是椭圆形，并且在横向和纵向上均符合 β 分布模型，就可以

用这种模型模拟喷口为椭圆形的场景。此时，用两个不同的 β 模型来表示椭圆的长轴和短轴方向上的分布，由 β 分布可以推出椭圆双 β 分布模型的公式为^[40-41]：

$$f(x, y) = f_{\max} (1 - x^2 / a^2)^{\beta_1 - 1} (1 - y^2 / b^2 (1 - x^2 / a^2))^{\beta_2 - 1} \quad (2-3)$$

其中 $f(x, y)$ 表示椭圆区域内任意一点的喷涂厚度， $f_{\max}$ 表示椭圆区域内最大的涂层厚度， a, b, β_1, β_2 参数根据实际情况得出，其中 a, b 分别表示椭圆喷涂区域的长轴和短轴，由椭圆分布信息可以得知椭圆空间中的点的分布范围为： $-a \leq x \leq a, -b(1 - x^2 / a^2)^{1/2} < y < b(1 - x^2 / a^2)^{1/2}$ ，其示意图如下图所示：

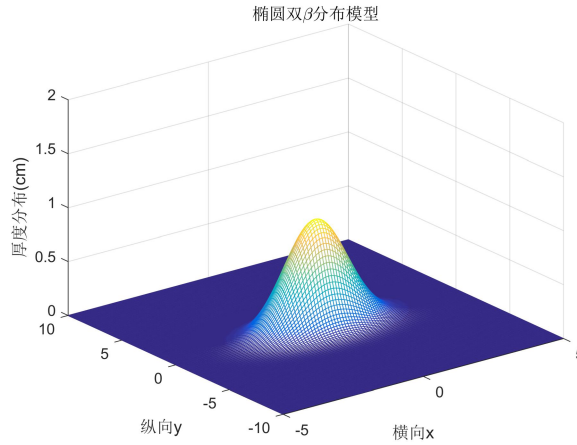


图 2-3 椭圆双 β 函数混凝土厚度分布模型

2.3 混凝土厚度累积速率模型的建立

本节主要建立隧道面喷浆模型，精准的喷浆模型可以准确的反映混凝土在隧道面的分布状况。抽象的喷浆模型与实际的喷浆模型有一定的区别，本节考虑了隧道的各种影响因素，但一些共性影响因素，本次建模过程中并不考虑。对于一些在喷浆过程中经常变化且对最终喷浆效果有很大影响的喷浆参数，需要详细研究它们和累积模型的关系^[42]。喷浆模型源于实际喷浆，但是对于其中的一些不可控因素，在建立模型的过程中也做出了一些理想化的假设。本节在平面上建立了厚度累积模型与喷浆参数之间的关系，探究混凝土的重力因素对喷浆效果造成的影响，最后通过实际的喷浆实验，测量相关参数，得出混凝土的厚度增长速率模型。

2.3.1 建立厚度累积速率模型的假设

喷浆机喷浆采用的是空气喷涂，主要原理是通过高压气体将混凝土打在隧道壁面上。混凝土在隧道壁面上的厚度分布和许多因素相关，我们将其称为喷浆参数。在喷浆的过程中，喷浆参数的选取至关重要。

在正式施工的过程中，隧道壁面上混凝土厚度的增长情况和很多因素相关，例如隧道里面的空气湿度、压强、喷枪喷射混凝土的速率、喷枪距离待喷浆面的

距离、喷枪的喷浆角度、喷枪的移动速度等。其中有一些因素不太好量化，影响因素也不是很大，例如空气湿度、压强等，因此为了构建出简洁有效的喷浆模型，做出如下几点假设：

1) 环境影响因素不变：假设在一个理想的状态下，空气湿度、压强等自然影响因素保持不变。

2) 喷枪喷出混凝土连续性假设：通过高速风力喷射出来的混凝土颗粒体积很小，因此可以认为它们在隧道壁面上是均匀分布的，并且在喷浆过程中喷浆机单位时间内喷射出混凝土的量是一定的，所以在喷浆过程中覆盖也是比较均匀的。

3) 喷浆方式假设：根据国家公路隧道施工技术规范，喷嘴在垂直隧道面喷浆时效果最好，因为倾斜喷浆会使喷浆的混凝土产生分离，并且会增加回弹，因此在喷浆过程中，垂直喷浆可以最大程度的使混凝土附着在隧道壁面上，所以假设在喷浆的过程中，喷枪都是垂直于隧道壁面，并且喷浆在壁面上的混凝土不会因为反弹而造成混凝土损失。

4) 喷浆机控制精度高：由于喷浆机是液压驱动，在运行过程中并不十分稳定，所以假设喷浆机在运行过程中控制稳定，相关参数的控制精度都能准确达到。

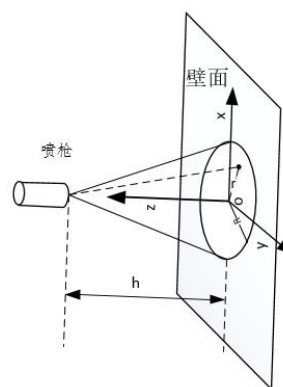
5) 隧道壁面上任意位置的混凝土厚度累积速率相等：在喷浆过程中，喷浆出的混凝土颗粒受重力的影响，导致颗粒在不同角度位置有不同的累加速率，由于喷浆的风压很大，因此可以忽略混凝土在不同角度的累积速率差别。

2.3.2 平面喷浆模型

基于前面做出的一系列假设，对喷浆这一操作建立数学模型。图 2-4-a 表示喷浆机正在施工的场景，可以看出，喷枪将混凝土通过高速风压喷出，成锥形状喷涂在隧道壁面上，由于整个隧道半径很大，而喷射出的混凝土的范围对于整个隧道面来说很微小，可以近似的认为它喷涂在一个平面上，其喷浆操作可以抽象为图 2-4-b 所示。



(a) 隧道实际喷浆场景



(b) 喷浆问题抽象的模型

图 2-4 隧道施工场景图和抽象喷浆模型

图 2-4-b 中 h 表示为喷枪离隧道壁面的距离, o 点表示喷枪垂直于壁面的点, 也即整个附着区域的中心, R 表示喷浆覆盖区域的半径, α 表示喷涂的张角。以 o 点为圆心建立三维坐标系, 使 Z 轴经过喷枪的中心。本文选择 β 分布模型来描述隧道壁面上的混凝土分布规律, 在某一时刻, 隧道壁面上的混凝土的分布函数为:

$$q(r) = \begin{cases} q_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{\beta-1}, & 0 \leq r \leq R, \beta > 1 \\ 0, & r > R \end{cases} \quad (2-4)$$

其中, $q_{\max}$ 表示喷浆中心 o 点的厚度, 也是整个喷浆区域最厚的地方, β 是选定的参数, 用来拟合实际混凝土的分布形状, 喷浆区域覆盖的半径 R 与喷枪离隧道壁面的距离 h 之间的关系为:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{R}{h} \quad (2-5)$$

对公式(2-4)求积分, 可以求出附着在壁面的混凝土的体积为:

$$V = \int_0^R q(r) 2\pi r dr \quad (2-6)$$

在喷浆过程中, 假设喷枪的喷浆速率恒定, 设喷枪的喷浆速率为 Q , 则在时间 t 内喷出混凝土的体积可以表示为:

$$V = Qt \quad (2-7)$$

在喷浆领域, 喷枪的喷浆速率的描述方式为单位时间内喷出多少方量, 联合公式(2-6)和公式(2-7)可得:

$$Qt = \int_0^R q(r) 2\pi r dr \quad (2-8)$$

将公式(2-4)带入(2-8)再求解积分可以得到:

$$q_{\max} = \frac{Qt\beta}{\pi R^2} \quad (2-9)$$

则混凝土在隧道壁面上的分布函数为:

$$q(r) = \begin{cases} \frac{Qt\beta}{\pi R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{\beta-1}, & 0 \leq r \leq R, \beta > 1 \\ 0, & r > R \end{cases} \quad (2-10)$$

在理想情况下, 混凝土会百分百附着在隧道壁面上, 但是在实际喷浆的过程中, 喷涂在隧道壁面上的混凝土会因为反弹或者重力原因而掉落, 这会造成混凝土的利用率下降, 所以在建立喷浆模型时把影响混凝土掉落的因素考虑进去是十分有必要的, 这也是和喷漆建模的主要区别。

如图 2-5 所示, 其中半圆弧的形状表示待喷浆面, 对其中的一点进行喷浆, 当喷涂时间为 t 时, 对其附着在隧道壁面上的混凝土进行受力分析, 在理想情况

下，它主要受到三个力，即自身重力 G 、混凝土和隧道壁面的黏性力 F 、静态摩擦力 f 。

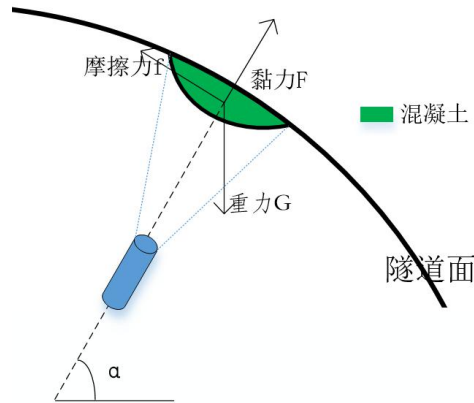


图 2-5 隧道面混凝土受力示意图

当喷浆区域中心点距离水平方向角度为 α 时，由受力分析可得混凝土的重力和黏性力之间的关系为：

$$\frac{F}{\sin \alpha} = G \quad (20^\circ < \alpha < 160^\circ) \quad (2-11)$$

在实际的喷浆过程中，喷枪一般最低只能喷到水平角度为 20° 左右的位置，再往下喷涂可能会发生机械臂触碰地面的风险，因此本文不考虑水平角度小于 20° 的区域和大于 160° 的区域。在实际喷浆过程中混凝土由于重力原因会掉落一部分，但是在喷浆前期，由于累积厚度不高，所以掉落部分可以忽略不计，随着在某一点喷浆时间的增加，累积的厚度会逐渐增高，这个时候会发生混凝土掉落现象，造成混凝土利用率下降。为了探究单次最长喷浆时间的分布规律，假设在时刻 t 之前，喷出的混凝土不会掉落，在时刻 t 之后，喷涂出的混凝土会发生掉落现象，造成混凝土利用率下降，因此喷涂的混凝土厚度应该限制在某一厚度值内。

利用公式(2-7)可以计算出时间 t 内喷涂的混凝土的体积，设混凝土的密度为 $\rho_{\text{混凝土}}$ ，则相应的混凝土的重力可以表示为：

$$G = Qt\rho_{\text{混凝土}}g \quad (2-12)$$

由公式(2-11)和公式(2-12)可以求出当喷涂位置的水平角度为 α 时的最大喷浆时间为：

$$t = \frac{F}{\rho_{\text{混凝土}}Qg \sin \alpha} \quad (20^\circ < \alpha < 160^\circ) \quad (2-13)$$

其中 t 表示不同位置单次可以喷浆的最大时间，代入公式(2-9)可以计算出在

不同角度位置单次可以喷涂的最大厚度值。隧道不同位置的单次可喷浆最大厚度值可以由公式(2-14)计算得出：

$$q_{\max}(\alpha) = \frac{\beta F}{\pi R^2 \rho_{\text{混凝土}} g \sin \alpha} \quad (2-14)$$

由公式(2-13)可得，喷浆点单次喷浆的限制时间跟其在隧道中的位置相关，与水平方向夹角越小，单次可以喷浆的时间越长，即隧道两侧的单次允许喷浆时间比弧顶区域要长。

2.4 喷浆测试实验

为了得出相对精准的喷浆模型，此次喷浆采用科达公司的 KC30 号喷浆机进行喷浆实验。本实验严格按照隧道施工规范，相关参数设定如下表所示：

表 2-1 喷浆实验相关参数设定

参数名称	隧道施工工艺要求	本次实验
系统风压	$\geq 0.5\text{Mpa}$	0.8Mpa
风量	$\geq 10\text{ m}^3/\text{min}$	$15\text{ m}^3/\text{min}$
喷头距离隧道壁面	0.6-1.2m	1m
喷头与壁面法线的角度	0-15°	0°
混凝土密度	$2400-2800\text{ Kg}/\text{m}^3$	$2600\text{ Kg}/\text{m}^3$
温度	20°C-30°C	23°C
混凝土喷射速度	$5-30\text{ m}^3/\text{h}$	$21\text{ m}^3/\text{h}$
混凝土粘度	400-550Mpas	485Mpas

本次实验的目的是为了求出 KC30 这台机器的厚度累积模型，以便后续进行隧道面轨迹规划。假设在实验过程中，喷浆机运行稳定，喷枪出料速率稳定。这一节进行两组实验，第一组计算混凝土厚度增长速率情况，所以只需要使喷枪朝着地面进行喷浆，喷浆完毕后使用厚度仪测量混凝土的厚度，记录喷涂时间；第二组计算在隧道不同的位置的单次喷浆厚度限制，通过在隧道壁面上的不同位置进行喷浆，记录混凝土的厚度累积情况。

2.4.1 水平面喷浆实验

首先给喷浆机送风，等风压稳定时，打开喷浆机，将喷枪调节到离地面 1m 的位置，将喷嘴垂直于地面，用挡板遮住喷枪口，然后输送混凝土和速凝剂，待

喷浆稳定时，迅速移开挡板，使喷枪朝着地面喷涂一段时间，然后用挡板挡住喷嘴，记录喷枪朝地面喷涂的时间。然后移动到另外一个位置，重复之前的操作，记录喷涂时间，最后移开喷嘴，关闭速凝剂计量泵，停止供料，待喷嘴里面少量混凝土和速凝剂完全喷完以后，停止供风。

由于 KC30 的喷嘴是圆形，所以喷出来混凝土的附着范围近似圆形，而喷浆机体型很大且工业要求不是特别高，所以喷浆实验中出现的一些供料不稳定和移动喷嘴带来的误差可以忽略不计。待喷浆完毕之后，采用厚度仪来测量喷涂在地面上混凝土的厚度分布情况。附着在地面上的混凝土厚度分布服从 β 分布，以其喷涂中心为坐标原点建立坐标系，喷涂中心位置厚度值最高，沿着 x 轴做横切面，记录采样轴上不同位置的混凝土厚度。

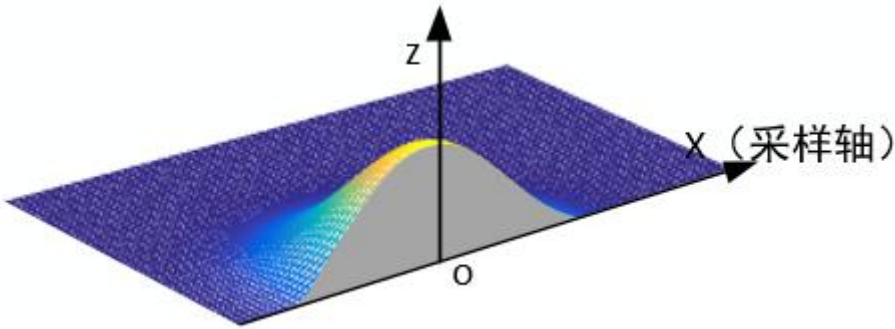


图 2-6 喷浆后混凝土厚度分布切面示意图

表 2-2 第一组喷浆实验数据采集(喷浆时间 $t=3.6s$)

测量位置	混凝土厚度	测量位置	混凝土厚度
(x 轴)/cm	(z 轴)/mm	(x 轴)/cm	(z 轴)/mm
-7	0	1	40
-6	4	2	37
-5	11	3	29
-4	21	4	22
-3	29	5	10
-2	36	6	3
-1	40	7	0
0	42		

表 2-3 第二组喷浆实验数据采集(喷浆时间 $t=5.4s$)

测量位置	混凝土厚度	测量位置	混凝土厚度
(x 轴)/cm	(z 轴)/mm	(x 轴)/cm	(z 轴)/mm
-7	0	1	61
-6	6	2	56
-5	19	3	47
-4	32	4	33
-3	46	5	18
-2	54	6	6
-1	63	7	1
0	64		

表 2-4 第三组喷浆实验数据采集(喷浆时间 $t=6.3s$)

测量位置	混凝土厚度	测量位置	混凝土厚度
(x 轴)/cm	(z 轴)/mm	(x 轴)/cm	(z 轴)/mm
-7	1	1	71
-6	8	2	64
-5	21	3	52
-4	37	4	38
-3	52	5	21
-2	64	6	6
-1	71	7	1
0	74		

表 2-5 第四组喷浆实验数据采集(喷浆时间 $t=7.8s$)

测量位置	混凝土厚度	测量位置	混凝土厚度
(x 轴)/cm	(z 轴)/mm	(x 轴)/cm	(z 轴)/mm
-7	1	1	88
-6	9	2	83
-5	27	3	66
-4	46	4	46
-3	64	5	27
-2	80	6	8
-1	87	7	2
0	92		

从以上四组实验数据上看,可以得出结论,测量位置离中心位置越近,混凝土的厚度越高,为了便于展示,将以上四组实验数据为混凝土厚度在 x 轴向上切面上的分布情况,将表格中的数据用 MATLAB 工具绘出图像,其曲线图如下图所示:

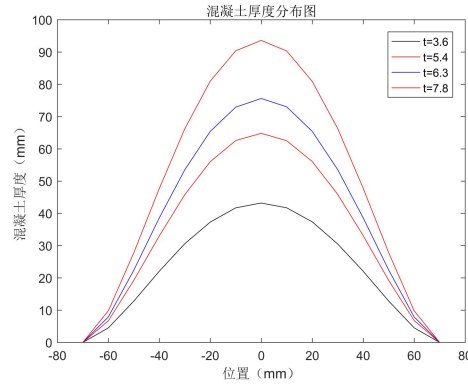


图 2-7 混凝土厚度分布曲线图

由图 2-7 可知，随着喷浆时间的增加，累积厚度稳定增加。分别用这四次喷浆对应测量位置的厚度除以对应的喷浆时间，然后求出一条最接近的曲线即为混凝土的速率增长曲线。本文采用最小二乘法来求解参数，目标函数可以表示为：

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - q(R, \beta, q_{\max}))^2 \quad (2-15)$$

其中 n 表示使用 n 个采样点进行计算， q_i 表示第 i 个采样点对应的单位时间内实际累积厚度， $q(R, \beta, q_{\max})$ 表示待求的增长速率模型，当 m 取得最小值时，相应的拟合程度最好。求得对应的解为 $\beta=2.7$ ， $R=6.5\text{cm}$ ， $q_{\max}=1.203\text{cm/s}$ ，则这台喷浆机在这一套参数下的厚度增长速率模型为：

$$f(r) = \begin{cases} 1.203t * (1 - r^2 / 42.25)^{1.7}, & 0 \leq r \leq 6.5 \\ 0, & r > 6.5 \end{cases} \quad (2-16)$$

根据上述记录的实验数据，可以求出拟合参数 β ，得出了厚度增长速率模型，为了验证模型的准确性，根据公式(2-10)，结合喷浆机自身设置的一些参数值，求出当喷浆时间 6.3 秒时一些随机测量位置的理论厚度值，并与真实测量值作对比，其对比结果如下表所示：

表 2-6 理论厚度值与真实测量厚度值对比表

测量位置(cm)	-5.3	-3.2	-2.8	2.1	4.3	4.7	5.4
理论厚度值(mm)	17.7	50.7	56.2	64.3	33.7	27.2	16.4
实际厚度值(mm)	13	43	60	59	28	21	10

由表格 2-6 可以看出，理论值和实际值之间的偏差很小，误差均小于 1cm，证明了建立的混凝土厚度累积模型的准确性。

2.4.2 混凝土单次喷涂厚度限制喷浆实验

上一组喷浆实验验证了在某个单点进行喷浆时混凝土的厚度增长速率模型，得出了在没有考虑混凝土掉落情况下的厚度累积模型。在实际喷浆过程中，混凝

土是由下往上通过风压打在隧道壁面上的。由于混凝土的粘度有限，单次喷浆过程中如果在某个点喷涂时间过长时，会产生混凝土掉落现象。结合实际的喷浆现象，进行了本次的喷浆试验，验证混凝土的重力因素对喷浆造成的影响。

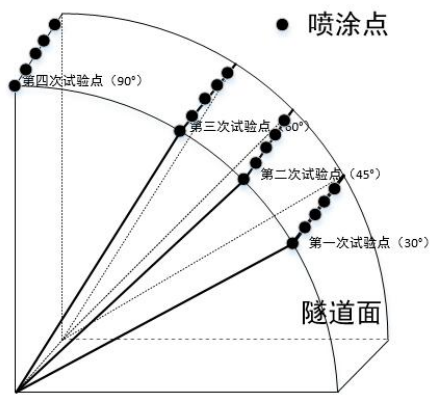


图 2-8 单次喷浆厚度限制实验示意图

本组实验采用与上一组实验相同的影响参数，由于本次实验是为了验证隧道不同位置的单次喷浆厚度限制，因此在隧道面上选取 4 个不同角度的位置做四次实验，每次实验在这个角度的隧道面上选 10 不同的位置进行喷浆实验，为了方便测量，本次实验在高度为 2.5m 的矿洞进行喷浆实验。记录在喷涂时间内的混凝土累积的最大厚度。其示意图如图 2-8 所示。

表 2-7 第一组喷浆实验数据采集(30°)

喷浆时间/s	3.2	3.7	4.6	5.7	6.3	7.1	7.5	7.8	8.2	8.3
最大喷浆厚度/mm	33	40	51	63	66	70	72	75	77	77

表 2-8 第二组喷浆实验数据采集(45°)

喷浆时间/s	2.7	3.3	3.6	4.5	5.2	6.4	6.6	6.9	7.5	8.0
最大喷浆厚度/mm	28	31	39	50	53	55	57	58	62	63

表 2-9 第三组喷浆实验数据采集(60°)

喷浆时间/s	3.2	3.5	4.0	4.2	4.6	4.9	5.3	5.6	6.7	7.2
最大喷浆厚度/mm	30	38	41	42	46	51	51	52	53	55

表 2-10 第四组喷浆实验数据采集(90°)

喷浆时间/s	2.5	3.4	3.7	4.1	4.6	5.1	5.2	5.8	6.2	7.1
最大喷浆厚度/mm	24	37	38	41	43	46	46	47	48	50

从以上四组实验数据上看，随着喷涂时间的增加，最大累积厚度都有所增加，但是可以从这四组实验数据看出，最大厚度的增长速度并不相同，为了更加直观

的观察其中的规律, 将其以增长图的方式展示。以喷浆时间为横坐标, 最大厚度值为纵坐标建立坐标系, 将四组实验数据在坐标系中绘出, 如图 2-9 所示。如果不考虑混凝土的掉落情况, 附着的混凝土厚度的最大值应该是以一个线性速度进行增长, 如图 2-9 中理论厚度值线条所示。对比四次实验的折线图来看, 第一次实验线条偏离理论厚度值线条发生的时间最晚, 第四次实验线条偏离理论厚度值线条的时间最早。随着喷浆时间的增长, 第一次实验点的累积厚度最高, 第四次实验点累积厚度最低, 第二次和第三次实验的厚度居中, 根据这四次实验的位置所对应的空间角度来看, 可以得出结论, 随着喷浆位置水平夹角的增加, 单次可喷浆的时间逐渐减少。

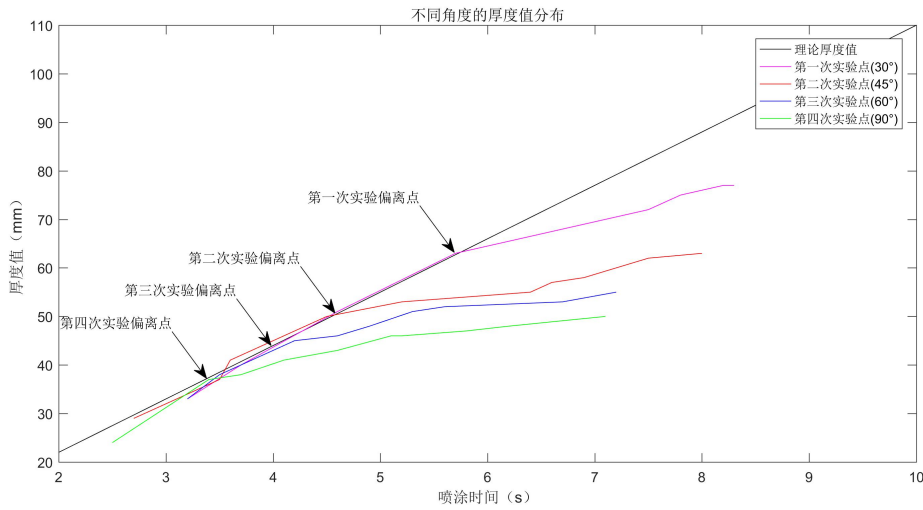


图 2-9 四次喷浆实验的最大厚度值随喷涂时间的分布

为了求出单次可喷浆的时间与喷浆位置的水平夹角之间的关系, 本文提出了一种求解方案:

(1) 在隧道面上选取不同角度的位置, 在同一角度的不同位置上进行多次喷浆, 采集喷浆时间和对应的最大喷涂厚度。

(2) 计算某一个喷浆时间下, 实际喷浆厚度值与理论厚度值之间的差值, 如果差值大于某一个设定的阈值, 则表示实际的喷浆厚度值偏离了理论厚度值, 记录这个偏离时间。如果差值还在设定的阈值内, 表明还没有发生混凝土掉落的现象, 则还需要进行更长时间的喷涂实验。

(3) 以角度作为横坐标, 偏离时间作为纵坐标建立坐标系, 然后用曲线拟合采集的实验数据即可求出单次可喷涂的时间与喷浆位置的水平夹角之间的关系。

最终通过实验求出的单次可喷涂的时间与喷涂位置的水平夹角之间的关系为:

$$t_{\max}(\alpha) = \frac{3.2}{\sin \alpha} (20^\circ < \alpha < 160^\circ) \quad (2-17)$$

为了验证公式 2-13 的准确性, 使用公式 2-13 计算的理论与真实测量值的对比结果如下表所示:

表 2-11 实际掉落时间与理论掉落时间对比表

角度值	30°	45°	60°	90°
理论时间值/s	6.0	4.3	3.8	3.0
实际时间值/s	6.4	4.6	3.9	3.2

表中的理论值是通过公式 2-13 计算出对应角度的最大喷浆时间, 可以看出实际值与理论值是比较接近的, 而且基本的变化规律是随着角度的增加, 喷浆时间逐渐减小, 可以证明单次最大可喷浆时间与喷浆位置的水平夹角之间的关系模型的准确性。

2.5 本章小结

本章主要建立了喷浆参数和混凝土厚度分布之间的关系, 分析了当这些影响因素变化时, 附着厚度的变化情况。相较于真实喷浆操作, 本章对喷浆操作中一些情况做了理想化处理, 忽视了一些不重要的因素和共性因素, 介绍了几种目前较为常用的厚度累积模型, 可以根据实际的需求进行选取。然后基于 β 分布建立了隧道混凝土厚度模型, 结合实际喷浆情况, 讨论混凝土的重力影响因素对喷浆模型的影响, 求出隧道面上单次可以喷涂的最大时间与喷涂区域水平夹角之间的关系。最后进行了两组喷浆实验, 第一组是为了求出相关喷浆参数以及拟合系数, 验证建立的喷浆模型的准确性。第二组是为了验证混凝土的掉落率及其所在隧道位置的关系, 验证了混凝土的重力对喷浆效果的影响。

第3章 隧道面信息数据处理

3.1 引言

本项目采用激光雷达采集隧道待喷涂面信息。激光扫描技术是非接触测量技术中的一种，它能快速扫描出物体表面的形状信息^[43]和三维坐标，其获得的数据具有密度高、精度高等特点。通过雷达扫描可以获取物体表面信息的离散点云数据，再对这些点云数据进行曲面拟合得到物体的表面信息^[44]。

雷达在隧道施工领域应用广泛，隧道具有空间大，表面粗糙等特点，一般测量工具无法便捷的反映出隧道的信息，而激光雷达作为一种主动传感器，它的工作原理是^[45-47]：向目标物体发射一束激光，计算反射或者散射信号到达接收机的时间、信号强弱以及频率变化等数据，从而可以计算出目标物体的位置，运行速度以及方位等信息。在隧道这样一个宽阔的空间里，固定雷达的方位，发射的粒子碰到隧道壁面后会被反射回接收器，从而可以得出隧道壁面的外表信息。但是得到的点云数据是离散的，无法直接获得隧道的超欠挖信息，所以本章节主要提出一种计算隧道超欠挖信息的方法，对点云数据进行栅格化处理，为后续进行轨迹规划打下基础。

3.2 移动最小二乘法研究及隧道点云数据拟合

曲面拟合技术在工业领域应用广泛，如航空航天领域、医疗器械成像领域等^[48]。采集的点云数据具有离散特性，相邻点云之间互不影响，为了计算超欠挖信息，需要求出其拟合曲面。本文采用移动最小二乘法(Moving Least Square,MLS)来求点云数据的拟合曲面。移动最小二乘法由P.Lancaster和K.Salkauskas提出^[49]，主要用于曲线和曲面的拟合。相较于传统的最小二乘法，MLS有三个主要的创新：(1)拟合函数不同，传统的最小二乘法是采用高阶多项式或者分段函数，而MLS则是由系数向量 $a(x)$ 和基函数 $p(x)$ 组成；(2)引入了紧支撑权函数，它认为点 x 处的值只受 x 附近节点的影响，因此它具有局部拟合的特点；(3)引入了权函数，改变基函数的阶数可以控制拟合的精度，改变权函数可以灵活的控制曲面的光滑度。因此，移动最小二乘法克服了很多最小二乘法的弊端，拟合的精度更高，效果更好且调节方便。

3.2.1 移动最小二乘法的原理

曲面拟合是对给出的一些离散数据集，求出一个函数，使其最接近于这个数据集，主要是采取逼近的方法。通过计算给定数据集与拟合函数之间的差值的平方和来衡量拟合函数的性能，这就是移动最小二乘法的基本原理^[50]。

空间中任意一点 x ，在其领域内，假设逼近数据集的近似函数为 $\psi(x)$ ，则此函数在散点数据 x 的局部近似函数 $\tilde{\psi}(x)$ 可以表示为：

$$\tilde{\psi}(x) = \sum_{i=1}^m p_i(\tilde{x})a_i(x) = P^T(\tilde{x})a(x) \quad (3-1)$$

式中 m 是基函数的个数， x 表示待拟合的点， $\tilde{x}$ 是 x 邻域内的点， $a_i(x)$ 是拟合系数，他与 x 的取值相关， $a(x)=[a_1(x), a_2(x), \dots, a_m(x)]$ ， $p_i(\tilde{x})$ 是基函数， $P^T(\tilde{x})=[p_1(\tilde{x}), p_2(\tilde{x}), \dots, p_m(\tilde{x})]$ ，基函数的形式如下：

$$\begin{aligned} \text{线性基: } & \begin{cases} P^T(x)=[1, x], m=2 & 1-D \\ P^T(x, y)=[1, x, y], m=3 & 2-D \end{cases} \\ \text{二次基: } & \begin{cases} P^T(x)=[1, x, x^2], m=3 & 1-D \\ P^T(x, y)=[1, x, y, x^2, xy, y^2], m=6 & 2-D \end{cases} \\ \text{立方基: } & \begin{cases} P^T(x)=[1, x, x^2, x^3], m=4 & 1-D \\ P^T(x, y)=[1, x, y, x^2, xy, y^2, y^3, x^2y, xy^2, x^3], m=10 & 2-D \end{cases} \end{aligned}$$

紧支撑权函数可以很好的解决分段函数拟合的某些间断点不连续的问题，很全面的考虑紧支撑域内所有节点对目标点的影响，紧支撑权函数需要满足一定的条件，并且和区域中的节点与待拟合节点之间的间距有关，通常用来做权函数的函数有：高斯函数，指数函数，样条函数等。

在利用 MLS 求拟合曲面的过程中，由加权最小二乘法得到的函数式为：

$$J = \sum_{l=1}^n w(x-x_l) \left[\sum_{i=1}^m p_i(x_l)a_i(x) - f_l \right]^2 \quad (3-2)$$

其中， n 表示 x 的邻域内对 x 产生影响的节点， $w(x-x_l)$ 是节点 x_l 的权函数，在 x_l 的邻域外， $w(x-x_l)=0$ ，即邻域外的点不会对目标点 x 的拟合产生影响，在 x_l 内， $w(x-x_l)>0$ ， f_l 是 x_l 处的函数值。 J 表示近似函数 $\tilde{\psi}(x)$ 在 x 的邻域内的误差加权平方和，而 $a(x)$ 即为待求的系数项，要想得到最好的拟合效果，则 J 需要取得最小值。则有：

$$\frac{\partial J}{\partial a_i} = 2 \sum_{l=1}^n w(x-x_l) \left[\sum_{i=1}^m p_i(x_l)a_i(x) - f_l \right] p_k(x_l) = 0 \quad (3-3)$$

其中， $i, k \in [1, m]$ 。

由公式(3-3)可以推出

$$\sum_{i=1}^m \left[\sum_{l=1}^n w(x-x_l) p_i(x_l) p_k(x_l) \right] a_i(x) = \sum_{l=1}^n w(x-x_l) p_k(x_l) f_l \quad (3-4)$$

式(3-4)可以写成

$$A(x)a(x) = D(x)f \quad (3-5)$$

则需要计算的系数 $a(x)$ 为：

$$a(x) = A^{-1}(x)D(x)f \quad (3-6)$$

其中,

$$A(x) = \sum_{l=1}^n w(x-x_l)p(x_l)p^T(x_l) \quad (3-7)$$

$$D(x) = \sum_{l=1}^n w(x-x_l)p(x_l) \quad (3-8)$$

$$f = [f(x_1), f(x_2) \dots f(x_n)]^T \quad (3-9)$$

由公式(3-6)可以看出, 系数 $a(x)$ 不仅与选取的基函数相关, 还和其选取的紧支撑权函数相关, 在其邻域内, 不同的点的权函数值不相同。由公式(3-1)可知, 近似函数 $\tilde{w}(x)$ 可以表示为:

$$\tilde{w}(x) = P^T(x)a(x) = P^T(x)A^{-1}(x)B(x)f \quad (3-10)$$

由公式(3-10)可知, 紧支撑权函数的引入使得 MLS 方法具有和分段函数一样的局部拟合能力, 由于权函数是连续的, 所以不用考虑分段问题。同时, 权函数只与邻域节点和待拟合节点之间的距离相关, 在选取不同的邻域节点时, 权函数计算的值也不相同, 因此, 移动最小二乘法比分段函数的拟合效果更好, 解决了分段函数在某些点不连续的问题, 参数调节也很方便, 拟合的连续性和光滑性更好。

3.2.2 紧支撑权函数

权函数在移动最小二乘法算法的设计中起着至关重要的作用, 是区别于其它拟合算法的主要标志。权函数必须具有紧支撑性, 正是由于这一特性, 使得 MLS 方法在拟合大型曲面时可以很方便的调节局部参数, 更加方便的调节拟合效果。权函数的选取需要遵循以下几个条件:

- 在紧支撑区域内, 每个点的权函数值必须是大于零的正数, 在紧支撑区域外或者边界上的权函数值为零。
- 必须具有单位可分解性。
- 权函数必须光滑连续可导。
- 在支撑域内, 权函数值和局域点与待拟合点之间的距离成反比。

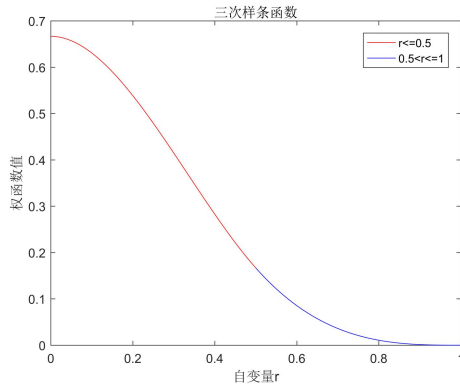
从以上紧支撑权函数的约束条件可以看出, 只有在待拟合点的紧支撑域范围内的点才会对待拟合点产生影响, 紧支撑域范围内权函数的取值为正数, 随着与待拟合点之间的距离增加而减小。拟合出来的函数会继承权函数的连续性特点, 所以拟合出来的曲面具有一定的光滑性, 如果权函数是 N 阶可导, 则拟合出来的函数也是 N 阶可导的。比较常用的权函数有多次样条函数和高斯函数。

三次样条权函数如下所示:

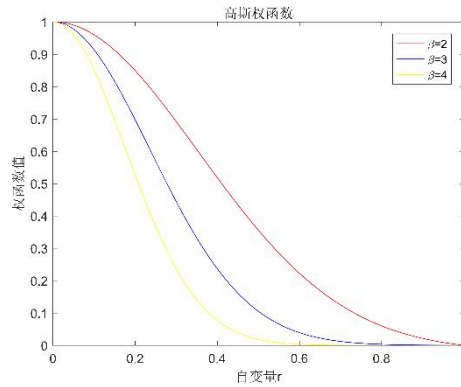
$$w(r) = \begin{cases} \frac{2}{3} - 4r^2 + 4r^3, & r \leq \frac{1}{2} \\ \frac{4}{3} - 4r + 4r^2 - \frac{4}{3}r^3, & \frac{1}{2} < r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases} \quad (3-11)$$

其中, $r = \frac{|x - x_l|}{h_j}$, $|x - x_l|$ 表示紧支撑域内的点与待拟合点之间的距离,

h_j 表示紧支撑域的大小。其函数图像如图 3-1-a 所示:



(a) 三次样条函数图像



(b) 不同 β 参数下的高斯权函数图像

图 3-1 三次样条函数与高斯权函数分布图像

高斯权函数形式如下所示:

$$w(r) = \begin{cases} \frac{\exp(-r^2\beta^2) - \exp(-\beta^2)}{1 - \exp(-\beta^2)}, & r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases} \quad (3-12)$$

其中 r 和式(3-11)中计算方式相同, 表示距离与紧支撑域的比值, β 表示高斯函数的拟合系数, 其权函数如图 3-1-b 所示, 可以看出其是符合紧支撑域条件的, 并且 β 的取值会影响权函数的取值, 它反映了支撑域内各点对待拟合点的影响程度, 由图 3-1-b 可以看出, β 的值选取的越大, 权函数衰减的越快, 它表示支撑区域内离待拟合点越近的点影响越大, β 需要根据实际需求选取。

3.2.3 紧支撑域的生成算法

由于紧支撑函数的引入, 使 MLS 具有局部拟合性能, 提高了拟合时的计算速度。从前面公式推导可知, 影响待拟合点节点的数量是由紧支撑域的大小决定的。在利用 MLS 方法对曲线或曲面拟合时首先要确定每个节点处的紧支撑域的大小。紧支撑域表示一块区域范围, 常见的有“圆”, “椭圆”, “矩形”等, 其中最常

用的是圆形，因此本文以圆形为例，介绍离散节点数据如何自动生成紧支撑域。

假设离散数据集中有 N 个节点，紧支撑域的运算流程总结如下：

- 1) 给每一个节点设置一个圆，表示紧支撑域，其初始大小 h_i 设置为 0；
- 2) 以第 i 个节点为圆心建立坐标系，求出四个象限内离圆心最近的点，分别记为 h_1, h_2, h_3, h_4 ，则 $h_i = \max\{h_1, h_2, h_3, h_4\}$ ，确定紧支撑域的半径为 h_i ，使其至少每个方向都包含有点，确保拟合的均匀性，如图 3-2 所示；
- 3) 循环 N 个节点，每个节点都进行相同的操作；
- 4) 如果想灵活的调节紧支撑域的大小，可以引入调节系数 d ，将每个节点的 h_i 都乘上 d ，这样会扩大紧支撑域的大小，会使局部拟合的效果更好，但是会增加计算量。

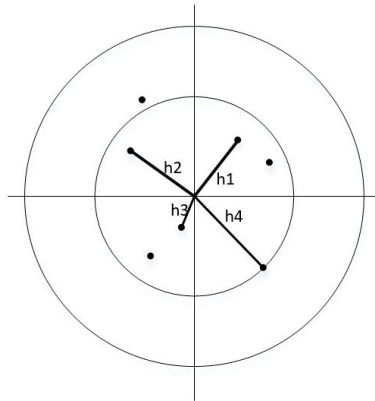


图 3-2 四象限示意图

在使用移动最小二乘法解决问题时，紧支撑域的范围设置十分重要，一个最基本的条件就是要确保所有离散点的紧支撑域必须要覆盖整个待拟合面，在进行曲线拟合时，影响的节点不得少于两个，当进行曲面拟合时，影响的节点不得少于三个，当影响节点为三个时，这三个节点不可以在同一条直线上。

3.2.4 待拟合点的邻域影响节点确认方法

待拟合点往往处于许多支撑域相交的区域，如图 3-3 所示，待拟合点 x 处于 x_1, x_2, x_3, x_4 的紧支撑域中，所以拟合 x 时需要考虑 x_1, x_2, x_3, x_4 四个点对 x 的影响。图中 x_5 的紧支撑域并没有包含 x ，所以不需要考虑 x_5 对 x 的影响，拟合 x 时不用参与运算。

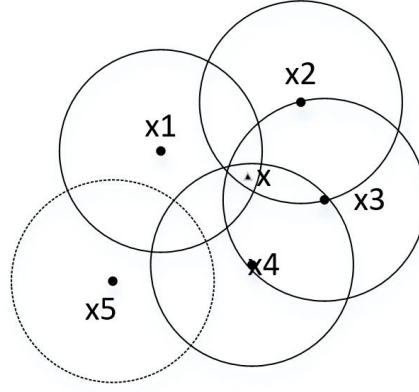


图 3-3 点 x 的影响点计算图示

3.2.5 隧道点云数据的移动最小二乘法拟合

采用激光雷达采集的点云数据是基于基坐标系下的，其中的 x, y, z 分别表示空间中点的纵向长度，横向宽度和高度。则其在基坐标系下的近似函数 $\tilde{\psi}(x, y)$ 可以表示为：

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}(x, y) &= a_1(x, y) + a_2(x, y)x + a_3(x, y)y + a_4(x, y)x^3 + \dots + a_m(x, y)y^{m-1} \\ &= \sum_{i=1}^m p_i(x, y)a_i(x, y) = P^T a\end{aligned}\quad (3-13)$$

其中 m 是基函数的项数， $p_i(x, y)$ 表示二维基函数， $a_i(x, y)$ 表示系数，按照前一节推导的公式可以得出

$$\tilde{\psi}(x, y) = P^T A^{-1}(x, y)B(x, y)f \quad (3-14)$$

其中的矩阵 A 、 B 和未知量 f 由公式(3-7)、(3-8)、(3-9)可以计算得出。

用 MATLAB 工具将点云数据绘出，如图 3-4-a 所示，除去中间极少的几个误差点，可以看出点云数据可以大致反映出隧道的形状。

观察点云分布的情况可以看出， x 轴方向符合线性分布， y 轴方向至少需要二次基及以上才可以很好的拟合出隧道点云。下图 3-4-b、3-4-c、3-4-d 分别为采用二次基，三次基，四次基的拟合效果图。当某个点云数据离拟合曲面最短的距离小于某一个阈值时，就可以认为这个点在拟合曲面上，因此，拟合效果可以通过在曲面上的点云数量和总的点云数量的比值来衡量，比值越高，表明拟合的效果越好。

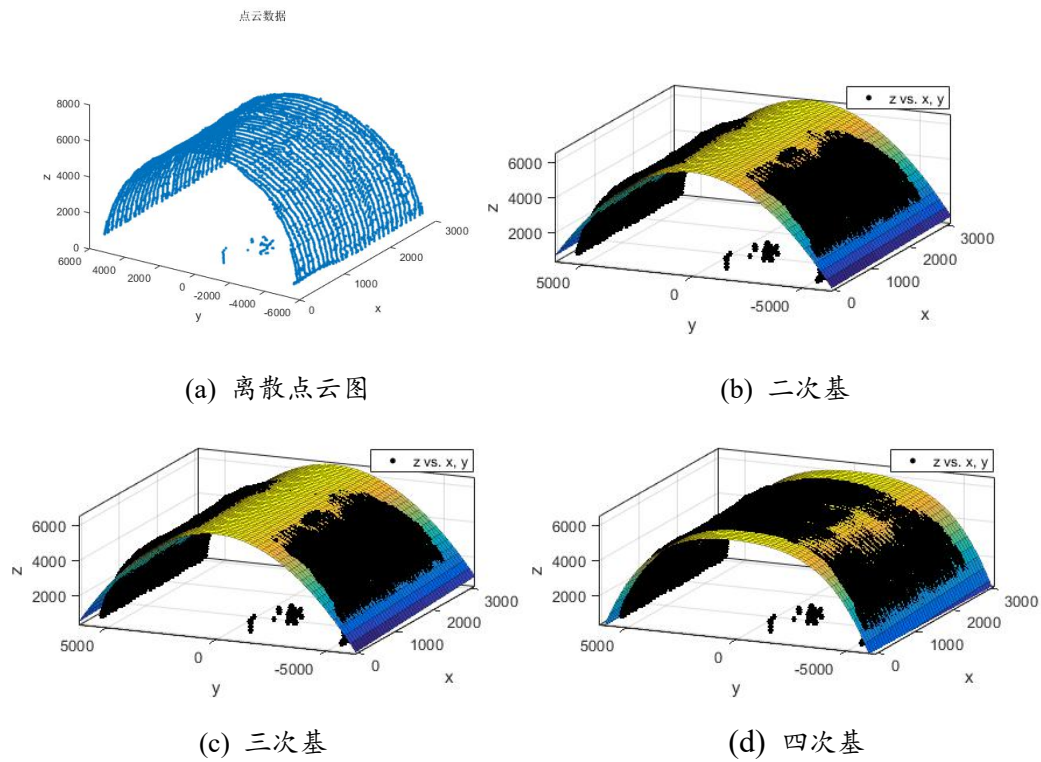


图 3-4 离散点云图以及不同基函数对拟合效果的影响图

其对应的拟合精度如下表所示：

表 3-1 不同基函数拟合精度表			
基函数	二次基函数	三次基函数	四次基函数
拟合精度	90.37%	93.42%	97.54%

比较拟合的结果可以看出，移动最小二乘法可以很好的拟合出隧道点云图像曲面，整体拟合的效果很圆滑，可以避免少许误差点的影响，整体拟合效果较为理想，可以反映整个隧道的基准面信息。

3.3 标准曲面栅格化处理

拟合出点云数据的标准曲面后，为了方便在标准曲面上进行轨迹规划及优化，需要对其进行栅格化处理。本节介绍了曲面栅格化技术，计算点云数据的超欠挖信息，再对栅格进行展平处理，方便进行隧道的轨迹优化。

3.3.1 曲面栅格化

点云数据可以反映出隧道的表面信息，但扫描的隧道点云数据过于密集，而且互相之间比较离散，逐个处理起来比较麻烦。另一方面，由于识别隧道信息的精度要求不是很高，所以本节将利用栅格化技术处理点云，将拟合的隧道曲面分

成若干个面积相等的栅格。栅格的大小根据需要的精度来确定，栅格越小，信息反映的越准确，同时，运行的计算量也会相应的增加。其示意图如图 3-5 所示，其中的箭头表示隧道的轴向，角度 α 表示每块栅格对应的夹角，图中红色区域表示一块栅格的大小，为了后续计算，本文将栅格分成正方形。

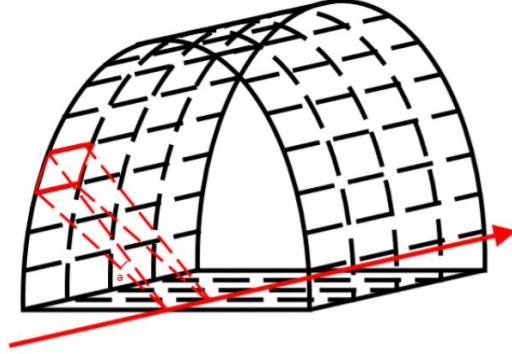


图 3-5 隧道栅格化示意图

已知拟合曲面的信息后，接下来要计算对应的点云数据属于哪一块栅格，由于一些点云数据不在拟合曲面上，所以不适合直接使用三维坐标进行计算，考虑使用极坐标来进行判断。如公式(3-15)所示，其中 R 表示极坐标的半径，它表示点云数据到轴线的垂直距离， θ 角表示点云数据与水平方向的夹角， d 表示点云在轴向上的距离。

$$\begin{cases} d = x \\ R = \sqrt{z^2 + y^2} \\ \theta = \arctan \frac{z}{y} \end{cases} \quad (3-15)$$

计算整块区域点云数据与水平方向的夹角，其中最左边的点与左右边的点之间的夹角就是待喷涂区域的夹角，设其为 φ ，设栅格的大小为 $l \times l$ ，则每块栅格对应的夹角为 $\alpha = \frac{\varphi l}{\pi R}$ ，每个栅格都对应着拟合曲面的一个夹角。空间中每一个点云数据都可以根据它与水平方向的夹角以及轴向距离确定它属于哪一块栅格，遍历整个点云数据，将同属于一个栅格的所有点云数据存放到一起，便于后续进行超欠挖计算。

由于在曲面上进行轨迹规划不方便，因此本文在计算完超欠挖信息后会将栅格面做展平处理，即沿着轴向，将每个栅格按照它在隧道所处的方位展开成平面，将下一节计算的超欠挖信息存入每个栅格中，这样每个平面上的栅格就包含了厚度信息，同时也利于轨迹规划的进行。

3.3.2 超欠挖数据计算

拟合出的隧道标准曲面只能反映隧道的整体形状,无法反映隧道的超欠挖信息,隧道的超欠挖示意图如图 3-6 所示,它对于轨迹规划来说是一个重要的影响参数,它反映隧道未喷浆之前的状态。上一节利用栅格化方法将整个拟合曲面划分为许多等面积的栅格,然后根据角度以及轴向信息将对应点云数据分配到对应的栅格之中。移动最小二乘法拟合出的曲面反映了点云的分布信息,可以作为点云的基准面,然后那些没有在基准面上的点就对应着超欠挖区域。一个栅格中包含许多点云数据,这些点与曲面之间都有一个最短距离,在栅格选取面积不是很大的情况下,将一整块栅格内部的点与曲面之间的最短距离相加取平均值,就可以表示这块栅格的超欠挖信息。

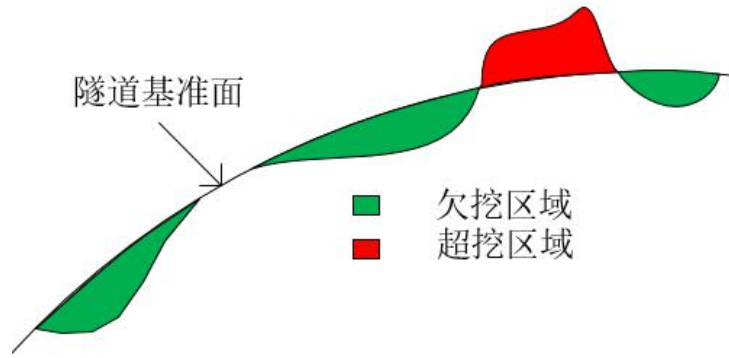


图 3-6 隧道超欠挖示意图

下面提出一种寻找最短距离的方案。其算法的原理为:对于点云数据中的任意一点,先确定其所在的栅格,然后在栅格的内部随机选取一个初始点,以该初始点为中心,在其周围再划分出多个网格,每个网格都有一个中心,然后计算点云中某一点到各个网格中心的之间的距离,求出最短的那一个距离所对应的中心点,它是这一组点之间最优的那一组,而且最短距离必定在这个方位,因此再以该点作为初始点,重复执行和上一步相同的操作,但是在周围建立网格的大小需要缩小,因为建立的网格过大虽然可以快速定位到最小距离的方位,但是由于网格过大,可能会在最小距离的左右振荡,从而影响求解效率。因此,在对中心点的周围建立网格时,网格的边长很重要,其示意图如图 3-7 所示。

设拟合曲面的参数方程为 $f(x, y)$, 其中 x, y 表示曲面的自变量,对于曲面上的任意一点,都可以计算出该点到曲面轴线的距离,设曲面上的点到轴线的距离为 $r(x, y)$, 假设空间中有一点 Q , 它离轴线的距离为 r_Q , 则该问题的数学模型可以表述为:

$$d_{\min}(x, y) = \min \{ \| r(x, y) - r_Q \| \} \quad (3-16)$$

对于建立的距离模型，设计的求解算法流程如下：

步骤1 对于曲面上的一块栅格，需要求这块栅格中任意一点 Q 到曲面的最短距离，在曲面上对应这块栅格内部中心选取一个初始点 P_0 ，设该点的坐标为 (x_0, y_0) ；

步骤2 由于 P_0 为整块栅格的中心，则可以将整块栅格分为四个区域，每块区域的边长为 L ，每个区域的中心可以表示为 $P_1:(x_0-0.5L, y_0+0.5L)$ ， $P_2:(x_0+0.5L, y_0+0.5L)$ ， $P_3:(x_0-0.5L, y_0-0.5L)$ ， $P_4:(x_0+0.5L, y_0-0.5L)$ ，如图3-7所示，由于离空间中的点 Q 最近的点一定在这块栅格区域内，因此分别计算点 Q 到 $P_i(i=0,1,2,3,4)$ 之间的距离，将其中的最小的距离值赋值给 $d_{\min}$ ，对应的中心点的值赋值给 $P_{\min}$ ；

步骤3 判断求出的 $P_{\min}$ 是否满足 $\frac{\|P_{\min}Q \times n_{P_{\min}}\|}{\|P_{\min}Q\| \|n_{P_{\min}}\|} \leq a$ 或者每个区域的边长

$L < b$ ，其中 $n_{P_{\min}}$ 表示 $P_{\min}$ 处的法向量， a 表示一个精度值， b 表示一个小的数值。第一个式子表示是否计算出距离的最小值，第二个式子是表示寻找最小值得一个步长。如果满足了上面两个要求中的一个，即可执行步骤4，如果不满足，将步长 $L = 0.5L$ ，将 $P_{\min}$ 赋值给 P_0 ，重新执行步骤2；

步骤4 输出空间中点 Q 离曲面最短的距离为 $d_{\min}$ ，且最近点可以表示为 $P_{\min}$ 。

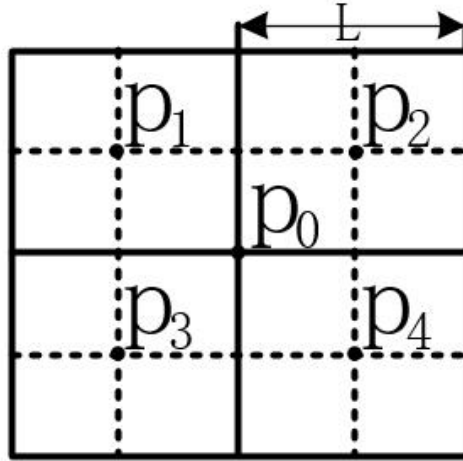


图 3-7 网格求解法示意图

由于栅格区域的面积不是很大，所以通过该方法可以确定最近点在哪个区域，然后再进一步缩小寻找区间，算法的收敛速度很快。

通过该方法可以寻找出空间中的点到拟合曲面的距离，将空间中的点代入到曲面方程 $f(x,y)$ 中，如果计算出的函数值大于零，则表示该点处于拟合曲面的上方，属于超挖区域，如果计算的值小于零，则表示点处于点云数据的下方，属于欠挖区域。计算出该栅格内部所有点云数据距离的和再除以栅格内点云的数量，

即可求出这块栅格的距离的平均值，这个平均值就代表这块栅格的超欠挖信息。

图 3-8 表示将一部分点云数据进行展平处理的结果图，其中栅格的边长设置为 1cm，使用热力图表示厚度的高低，颜色越深表示厚度值越高，相较于整个大的隧道曲面来说，该精度已经达到了很高的标准。所以本章节提出的计算点云超欠挖信息的方法是可行的，并不会因为栅格化处理而损失太多精度。

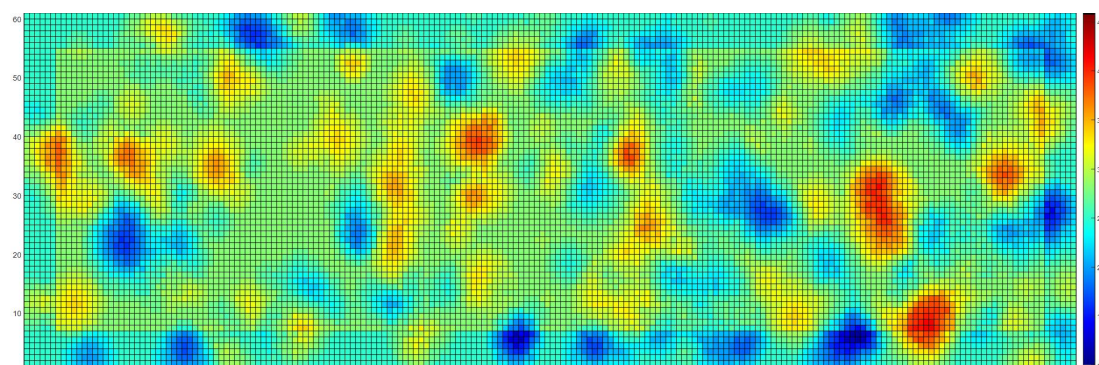


图 3-8 点云超欠挖分布图

3.4 总结

本章首先系统的介绍了移动最小二乘法，分析了其相较于传统方法的优势，并且详细分析了其组成原理，然后使用移动最小二乘法处理点云数据，拟合出点云数据的基准面，分析不同基函数的选取对于最终拟合效果的影响，得出高阶基函数的拟合效果更好。由最终的拟合结果来看，拟合出的曲面很好的反映了点云数据，求出目标曲面，对其进行栅格化处理，将零散的点云数据信息规整到若干块整齐的栅格中，将点云数据离目标曲面的距离分别求平均值存入栅格中，则可以用栅格中的数据来表示那一块区域的点云信息。

将点云数据的超欠挖信息整理到栅格中，为后续利用超欠挖信息进行路径规划打下基础。

第4章 基于喷枪运行速度的轨迹规划

4.1 引言

本章主要解决喷枪在移动过程中的速度规划问题，从第三章求出的隧道超欠挖光谱图来看，整个隧道并不是一个平面，所以在喷浆过程中需要做变速喷涂。可以通俗的理解为在超挖的场景，适当降低运行速度以达到多喷的效果，在欠挖区域可以提高速度以减少混凝土的附着，使其厚度达到均匀的效果。本章首先通过第二章建立的厚度模型，建立了相邻轨迹之间厚度的累积情况与相邻轨迹之间的间距的关系，基于第二章建立的厚度模型确定一个合理的轨迹间距。以喷枪在栅格面的喷浆厚度与目标厚度之间的差值为优化目标，以喷枪在轨迹上的每个栅格中运行的速度为求解对象，采用自适应遗传算法和梯度下降法对该问题进行求解并且比较效果。

4.2 栅格喷涂问题的构建

4.2.1 常用的轨迹规划方案

喷枪的轨迹规划即求出喷枪在喷涂过程中的运行轨迹，常用的运行轨迹如图4-1所示，其中(a)图表示光栅型喷涂轨迹，该方案实用且简单，可以一直连续喷涂，整体轨迹较为平直，缺点是边界区域的喷涂时间较少，可能会造成边界区域均匀性较差；(b)图表示回字形喷涂轨迹，它对于边界的喷涂较为均匀，缺点是转弯区域较多，中心位置的混凝土厚度累积情况较难控制；(c)图表示空间中的任意轨迹，该方案没有限制喷枪的运行轨迹，使得喷枪沿着某一目标自动进行轨迹路线的规划，由于喷浆操作是一个十分复杂的过程，任意轨迹喷涂的计算量十分复杂，而且机械臂沿着轨迹长时间做大范围的移动的话会给机器带来较大的负荷。综上所述，本文采用光栅型轨迹方案作为喷浆的运行路线。

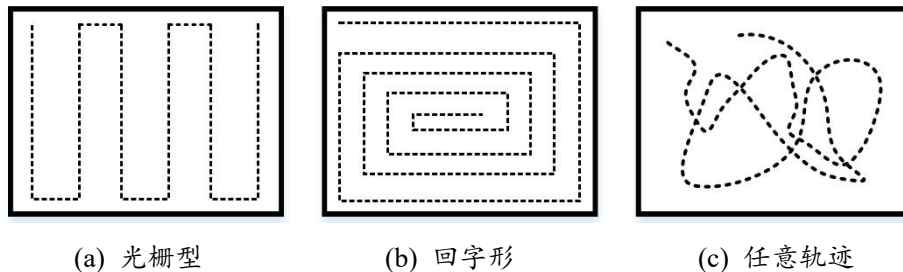


图 4-1 三种不同的轨迹方案

4.2.2 相邻轨迹之间间距的确认方法

在喷浆的过程中需要考虑两条轨迹之间的叠加部分，它对最终的喷浆质量起

着重要的作用。如图 4-2 所示，设两条相邻轨迹之间的位移距离为 L ，两个轨迹叠加的最大厚度值或者最小厚度值定义为 $q_{12,L/2}$ ，这个值在 $L/2$ 处可以取到，定义两个轨迹叠加在喷浆半径 R 处的高度为 $q_{12,R}$ 。

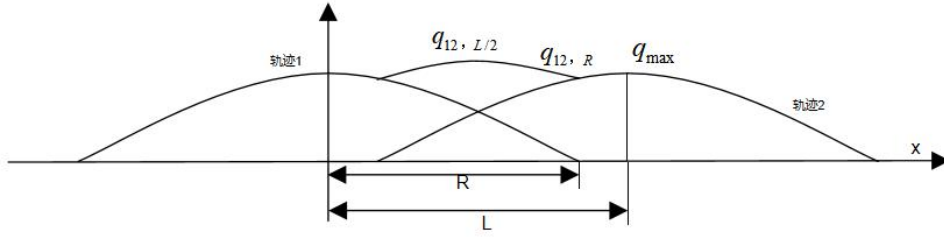


图 4-2 相邻轨迹重叠厚度分布图

两条轨迹叠加的峰值和叠加的最小值之间的差值是衡量隧道面喷浆质量的重要标准之一，这两个值之间的差距应该尽可能的小，保证整个叠加曲面的平滑。根据第二章求解的涂层厚度累积公式(2-7)，可以求出当偏移量为 L 时的叠加质量标准公式。

$$\frac{q_{12,L/2}}{q_{\max}} = \frac{2q_{\max}(1 - \frac{x^2}{R^2})^{\beta-1}}{q_{\max}} \bigg|_{x=L/2} = 2(1 - \frac{L^2}{4R^2})^{\beta-1} \quad (4-1)$$

$$\frac{q_{12,R}}{q_{\max}} = \frac{2q_{\max}(1 - \frac{x^2}{R^2})^{\beta-1}}{q_{\max}} \bigg|_{x=L-R} = (2\frac{L}{R} - (\frac{L}{R})^2)^{\beta-1} \quad (4-2)$$

由公式(4-1)和公式(4-2)可以得出：

$$\frac{q_{12,L/2} - q_{12,R}}{q_{\max}} = 2(1 - \frac{L^2}{4R^2})^{\beta-1} - (2\frac{L}{R} - (\frac{L}{R})^2)^{\beta-1} \quad (4-3)$$

要使叠加的曲面相对较圆滑，叠加的最大值 $q_{12,L/2}$ 应该和单条轨迹的最大值 $q_{\max}$ 近似相等，因此公式(4-1)可以表示为：

$$2(1 - \frac{L^2}{4R^2})^{\beta-1} = 1 \quad (4-4)$$

即

$$\frac{L}{R} = 2(1 - 2^{\frac{1}{1-\beta}})^{1/2} \quad (4-5)$$

由公式(4-5)可得，当偏移量 L 与喷浆半径保持一定的比例关系，则可以保证叠加的峰值和单条轨迹厚度最大值近似相等。当叠加的峰值和单条轨迹厚度的最大值相等时，就只需要保证叠加的峰值和在喷浆半径为 R 时的厚度之间的差值小于一定的范围即可使喷浆曲面趋向于平整，结合公式(4-1)和公式(4-2)可得：

$$2(1 - \frac{L^2}{4R^2})^{\beta-1} - (2\frac{L}{R} - (\frac{L}{R})^2)^{\beta-1} = 1 - [4(1 - 2^{1/(1-\beta)})^{1/2} - 4(1 - 2^{1/(1-\beta)})]^{\beta-1} \quad (4-6)$$

由公式(4-6)得，叠加出来的平整度最终和拟合出的参数 β 相关，其叠加厚度

随参数 β 的分布关系如图 4-3 所示, 当 β 取 3 与 4 之间的某个值时, 累积的厚度会将为最低值, 公式(4-6)对 β 求倒数, 可以得出当 β 等于 3.4 时, 叠加累积的厚度为 0。

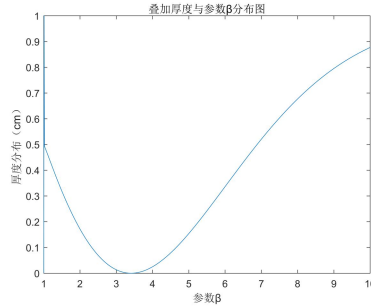


图 4-3 叠加厚度受参数 β 影响分布图

由公式(4-6)可以看出轨迹之间的间距和半径之间存在一定的比例关系, 第二章通过实验求得喷浆半径为 6.5cm, 则可以求出轨迹之间的间距为 $L=6.5110\text{cm}$ 。可以看出, 当相邻轨迹之间的间距为 6.5cm 左右时可以取得一个较好的叠加效果。

4.2.3 栅格面上喷涂问题的描述

结合第二章建立的喷浆模型, 和第三章对隧道壁面点云数据的栅格化处理, 整个喷浆操作可以表示为图 4-4 所示。将待喷浆区域栅格化成网格形状, 从第一列栅格开始, 根据建立的喷浆模型来确定相邻轨迹之间的间距, 从第一列栅格开始, 以固定距离的栅格规划轨迹, 如图 4-4 红色虚线所示, 喷枪沿着轨迹从起点运行至终点, 并且假设喷枪在运行时没有偏离轨迹, 即混凝土累积模型的中心始终落在轨迹线上。

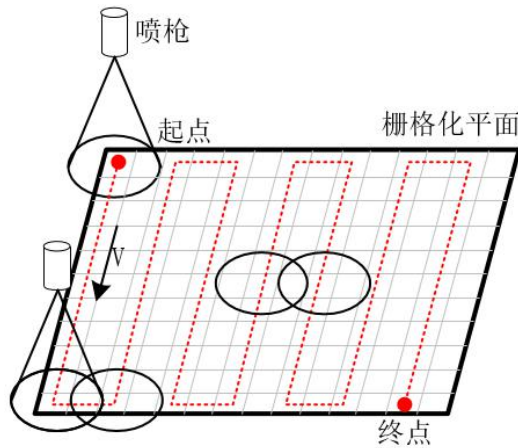


图 4-4 栅格化喷浆模型示意图

由第三章的内容可以计算出隧道点云数据到拟合曲面的距离, 计算每个栅格区域内距离的平均值即代表这一块栅格内的隧道点云信息, 栅格化平面中每个栅格内部存储的厚度信息是不一样的, 因此喷枪在每个栅格的运行速度也不一样,

如图 4-5(a)所示, 假设将曲面栅格化为一个 5×5 的矩形(为了表示方便), 每个栅格对应着一个厚度信息, 假设为 a_{ij} 。由于栅格区域的范围相对较小, 所以可以认为喷枪在经过每个栅格时都是匀速运行, 假设经过每个栅格的速度为 v_{ij} , 如图 4-5(b)所示, 每块栅格的宽度设置为 d , 则经过轨迹上每块栅格所消耗的时间可以表示为

$$t_{ij} = \frac{d}{v_{ij}} \quad (4-7)$$

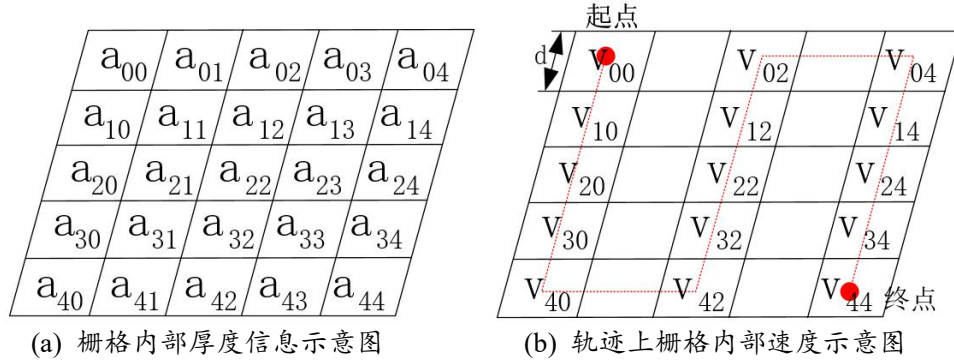


图 4-5 栅格化信息示意图

4.2.4 喷涂区域离散化

曲面经过栅格化处理后成为规整的矩形, 但是喷枪的覆盖区域为圆形区域, 如图 4-6(a)灰色区域所示, 它表示当喷枪移动到栅格 a_{22} 时的喷涂示意图, 可以看出当喷枪在栅格面上沿着轨迹移动时, 其喷涂区域会覆盖那些不在轨迹上的栅格。其喷涂时产生的作用在图 4-6(a)中的红色区域内, 考虑到方形栅格和圆形喷涂区域不匹配, 因此将喷涂区域按照栅格面积大小分割成矩形, 每块栅格中的面积与曲面栅格化形成的栅格的面积相同, 栅格中存放的数据为混凝土的单位时间累积速率, 它和离中心栅格的距离成反比关系。如图 4-6(b)所示(本文为了方便描述, 就用一个 3×3 的矩阵来描述喷涂速率模型), 它的方格中存放的数据分布类似于高斯分布, 即中心区域累积速度较快, 靠近边缘区域累积速度慢, 记栅格内累积速度为 p_{ij} 。将圆形喷浆区域转换成矩形喷浆区域, 在边界位置会造成一定的误差, 但由于边界区域混凝土的厚度累积速率很慢, 因此边界区域的误差可以忽略不计。

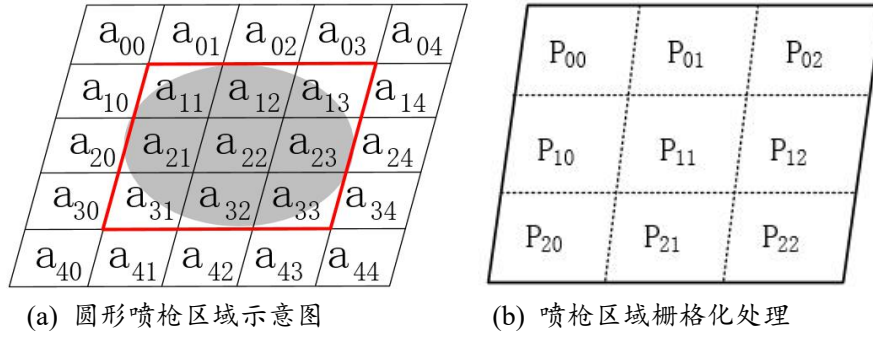


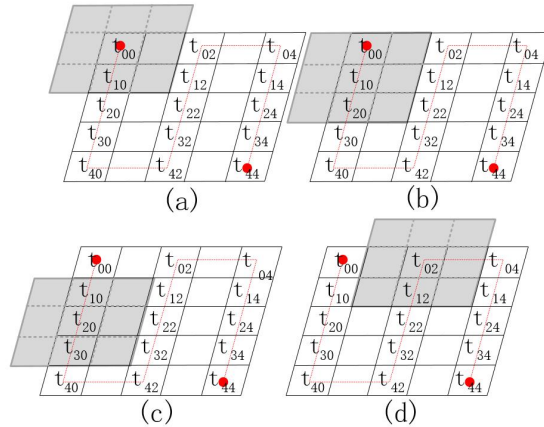
图 4-6 喷涂区域离散处理示意图

4.2.5 栅格内厚度累积模型

当喷枪沿着轨迹移动时，栅格区域内部的混凝土增长情况可以分为两种情况，第一种是运行轨迹上的栅格，第二种是非轨迹上的栅格，下面介绍一下这两种情况下栅格的增长情况。如图 4-7-a 所示，图中红色虚线表示运行轨迹， t_{ij} 表示喷枪在每块栅格区域喷涂的时间，灰色区域表示喷涂区域，它将沿着红色虚线移动。当喷枪在 a_{00} 处喷涂 t_{00} 时间时，由于喷涂中心在 a_{00} 处，则此处的增长速率为 P_{11} ，因此在这段喷涂时间内， a_{00} 处的厚度变化量为 $P_{11} * t_{00}$ ，它表示喷枪在第一个栅格内喷涂时对 a_{00} 产生的影响。

喷枪沿着轨迹向下移动，当喷枪在 a_{10} 处喷涂 t_{10} 时间时，由于此时二点喷涂中心在 a_{10} 处，则此处的增长速率为 P_{11} ，由于 a_{00} 在 a_{10} 的正上方，且喷涂中心在 a_{10} 处，对应着图 4-7-b 图可以看出，此时 a_{00} 处的增长速率为 P_{01} ，因此在这段喷涂时间内， a_{00} 处的厚度变化量为 $P_{01} * t_{10}$ ，它表示喷枪在轨迹上第二个栅格内喷涂时对 a_{00} 产生的影响。

当喷枪沿着轨迹继续喷涂时，由图 4-7-c、4-7-d 所示，并不会对 a_{00} 产生影响，因此没有必要考虑在这些栅格内的喷涂对 a_{00} 造成的影响。则经过一轮喷涂之后，栅格 a_{00} 内的厚度可以表示为 $a_{00} + P_{11} * t_{00} + P_{01} * t_{10}$ 。

图 4-7 轨迹上的栅格厚度增长示意图(a) 喷涂中心在 a_{00} ；(b) 喷涂中心在 a_{10} ；(c) 喷涂中心在 a_{20} ；(d) 喷涂中心在 a_{02}

上面讨论了喷涂轨迹上的混凝土增长情况，可以看出在喷涂轨迹上的点只受同一条轨迹上的栅格点的影响，不会影响相邻轨迹上混凝土的增长状况。接下来介绍非轨迹上的栅格上厚度是如何增长的。如图 4-8 所示，喷枪沿着轨迹进行喷涂，讨论在单次喷涂过程中 a_{11} 栅格的增长情况，当喷枪中心在 a_{00} 进行喷涂时，如图 4-8-a 所示， a_{11} 处于喷涂中心的右下方，对照图 4-8-b，因此增长速率为 P_{22} ，则在这段喷涂时间内 a_{11} 的增长情况为 $P_{22} * t_{00}$ 。

同理，当喷枪中心在 a_{10} 进行喷涂时，如图 4-8-b 所示， a_{11} 处于喷涂中心的右方，对照图 4-8-b，此时的增长速率为 P_{12} ，则在这段喷涂时间内 a_{11} 的增长情况为 $P_{12} * t_{10}$ 。

以此类推，当喷枪运动到 $a_{20}, a_{02}, a_{12}, a_{22}$ 时， a_{11} 分别处于右上、左下、左、左上方，则相应的累积速率为 $P_{02}, P_{20}, P_{10}, P_{00}$ ，在 a_{11} 处产生的增量依次可以表示为 $P_{02} * t_{20}, P_{20} * t_{02}, P_{10} * t_{12}, P_{00} * t_{22}$ ，其示意图如图 4-8-c、4-8-d、4-8-e、4-8-f 所示。除了上述的六个栅格内喷涂时会对 a_{11} 产生影响，其他任何栅格内喷涂不会再对 a_{11} 产生影响，所以这一次喷涂过程进行完毕时， a_{11} 处的厚度可以表示为： $a_{11} + P_{22} * t_{00} + P_{12} * t_{10} + P_{02} * t_{20} + P_{20} * t_{02} + P_{10} * t_{12} + P_{00} * t_{22}$ 。

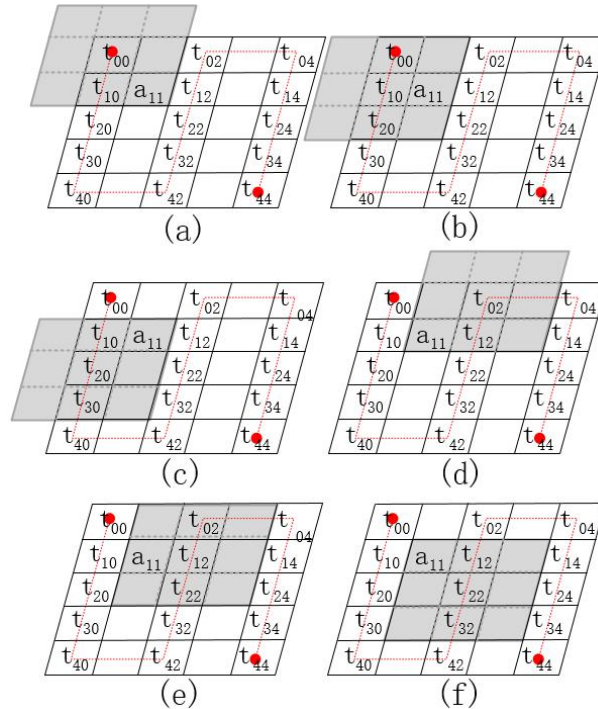


图 4-8 非轨迹上的栅格厚度增长示意图(a)喷涂中心在 a_{00} ；(b)喷涂中心在 a_{10} ；(c)喷涂中心在 a_{20} ；(d)喷涂中心在 a_{02} ；(e)喷涂中心在 a_{12} ；(f)喷涂中心在 a_{22}

上面的讨论了轨迹上与非轨迹处栅格内的累积情况，空间中的其它栅格都可以采用相同的方法计算出累积效果。推广到一般，设喷枪的累积模型用矩阵表示为 $P_{xy} (0 \leq x \leq m, 0 \leq y \leq m)$ ，其中 m 表示表示喷涂区域的直径除以栅格的边长，

即喷涂区域内包含栅格的行列个数。设待喷栅格用矩阵表示为 a_{ij} ($0 \leq i < i_{\max}, 0 \leq j < j_{\max}$), 其中 $i_{\max}, j_{\max}$ 表示点云栅格化的长宽上栅格的最大值, 设轨迹上每块栅格的喷涂时间为 t_{ij} , 假设当喷涂轨迹的列数都包含在数组 U 内部, 则点云栅格内部每一块栅格的厚度累积值可以表示为:

$$\Delta a_{ij} = \begin{cases} \sum_{x=i-\frac{m}{2}, y=\frac{m}{2}}^{x=i+\frac{m}{2}} P_{xy} * t_{xy}, j \in U \\ \sum_{x=i-\frac{m}{2}, y=\frac{m}{2}+j-j_{\text{前}}}^{x=i+\frac{m}{2}} P_{xy} * t_{xy_{\text{前}}} + \sum_{x=i-\frac{m}{2}, y=\frac{m}{2}+j_{\text{后}}-j}^{x=i+\frac{m}{2}} P_{xy} * t_{xy_{\text{后}}}, j \notin U \end{cases} \quad (4-8)$$

公式(4-8)第一行表示在轨迹上的栅格累积情况, 它只受一条轨迹的影响, 第二行表示非轨迹上的栅格的增长情况, 它受前后两条轨迹之间的影响, 公式(4-8)用 $j_{\text{前}}, j_{\text{后}}$ 表示非轨迹上的栅格的前一条轨迹和后一条轨迹, 它受这两条轨迹的影响。如果求和计算时发生 $i - \frac{m}{2} < 0$, 表示喷涂区域已经到了边界, 此时就把下限 x 赋值为 0; 同理, 如果求和计算时发生 $i + \frac{m}{2} > i_{\max}$, 时, 此时把上限 x 赋值为 $i_{\max}$ 。

4.2.6 喷浆目标函数的建立

根据第二章建立的单次喷涂时间限制与其水平角度的关系, 在某个栅格内单次喷浆的厚度受这个栅格所对应水平角度的影响。由上一节分析喷涂区域对每个栅格点的影响可以计算出每个栅格的厚度增量, 这个厚度应该在单次厚度增长范围内。由于单次喷浆厚度的限制, 因此需要进行多次喷浆, 使每一次喷浆都满足混凝土厚度的限制, 最终达到预计的喷浆效果。在每次喷浆的过程中, 都需要设定一个目标值, 使得所有栅格中的累积厚度都朝着这个目标值靠近。目标值设置的太高会使一些本身就是欠挖的区域单次喷涂过厚, 使得混凝土利用率下降; 目标值设置较低会使整个曲面的单次累积厚度过少, 从而使得喷浆次数增加, 增加了喷浆的时间, 降低了喷浆效率。在某个区域进行喷浆时, 可喷浆的时间随着栅格与水平面的夹角增大而减小, 因此单次喷浆的最大厚度就可以限制为角度最大的那一行栅格可以喷涂的最大厚度, 只要单次喷浆厚度增量不超过这个值, 就可以保证混凝土的利用率, 假设这个值为 H 。本文采取相对差值的方式来确定单次喷浆厚度, 设初始栅格面的最大高度与最小高度分别为 $d_{\max}, d_{\min}$, 某一栅格的当前厚度为 d , 则栅格面中任意一个栅格的目标值可以通过下面的公式确定:

$$obj = \frac{d_{\max} - d}{d_{\max} - d_{\min}} * H \quad (4-9)$$

这样设置每个栅格的目标值既保证了喷浆效率，又使得混凝土利用率不至于太低，可以使整个栅格面越来越平整。

目标函数的确定：在整个栅格面内目标厚度与喷浆后形成的实际厚度之间的差值就可以用来衡量喷浆质量，采用所有栅格的目标厚度和实际厚度之间的平方差的和来表示目标函数，如公式(4-10)所示，其中的 m, n 表示待喷涂面栅格的最大行列数， $T_{ij}(\text{actual})$ ， $T_{ij}(\text{target})$ 表示在某个栅格的喷涂时间 t 内，产生的实际厚度值和目标厚度值。可以看出，影响最终喷浆效果的就是在栅格内喷涂的时间，这个时间需要小于在单个栅格内部可喷涂的最大时间。只要找到一组解 t_{ij} ，使得目标函数的数值最小，表明此时的喷浆效果最好。因此上述喷浆问题可以转化为一个优化问题。由于 t_{ij} 表示在某个栅格的喷浆时间，因此每个 t_{ij} 的最大值应该由该栅格处单次能喷浆的最大时间来确定，最小值由机械的硬件来决定，即机械臂以最快运行速度经过一个栅格所消耗的时间。

$$Obj = \sum_{i=0, j=0}^{i=m, j=n} |T_{ij}(\text{actual}) - T_{ij}(\text{target})| \quad (4-10)$$

混凝土利用率：混凝土利用率是衡量喷浆的一项重要指标，是实际喷浆过程中着重考虑的问题。为了衡量喷涂混凝土利用率这一项指标，使用附着在栅格上的有效厚度除以单次喷涂的总厚度，其计算公式为：

$$\eta = 1 - \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} Q_{ij}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} T_{ij}(\text{actual})} \quad (4-11)$$

其中 Q_{ij} 的计算方式为：

$$Q_{ij} = \begin{cases} T_{ij}(\text{actual}) - T_{ij}(\text{target}), & (T_{ij}(\text{actual}) > T_{ij}(\text{target})) \\ 0, & (T_{ij}(\text{actual}) \leq T_{ij}(\text{target})) \end{cases} \quad (4-12)$$

Q_{ij} 表示每个栅格中的实际喷涂的量超过目标值设定值的量，它可表示为喷涂过程中的超喷量。

4.3 求解算法的介绍

根据上面的分析，每一条喷浆轨迹上都对应着一组最优解，对整个待喷涂面，这个运算量比较大，无法用相关计算公式进行求解，本文拟采用梯度下降法和自适应遗传算法对该问题进行求解。

4.3.1 梯度下降法

梯度下降^[51-52]：梯度下降法求解的过程类似于上山或者下山，上下山最快的方式就是找到最陡峭的方向，朝着这个方向就能够以最快的速度到达山顶或山谷。

本文的目标是找到使目标函数最小的那一组喷浆时间，朝着函数梯度的反方向可以使函数数值下降的最快。梯度下降的公式为：

$$\theta_i = \theta_i - \alpha \frac{\partial X(\theta)}{\partial \theta_i} \quad (4-13)$$

其中的 θ_i 表示函数的影响因子， $X(\theta)$ 表示函数式， α 是学习的学习率或者步长，它的取值对求解的效率有着很大的影响，一般情况下会采用学习率衰减的思想来确定学习率^[53-54]，其基本思想是学习率随着训练的进行而逐渐减小，即在刚开始的时候使用较大的学习率，此时初始值离目标值比较远，大的步长可以加快朝目标点前进的速度，随着迭代次数的增加，逐渐减小学习率，避免因学习率太大而错过最优值。

在本文的问题上，构建的梯度下降的公式为：

$$T_i = T_i - \alpha \frac{\partial J(T)}{\partial T_i} \quad (4-14)$$

其中的 T_i 表示喷涂过程 $m \times n$ 维的待喷面喷涂时间矩阵：

$$T_i = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4-15)$$

J 表示 $m \times n$ 维待喷面栅格的厚度代价函数，他可由 $m \times n$ 维的喷涂厚度矩阵 P 和目标喷涂厚度矩阵 G 求得：

$$J = (P - G)^2 = \left(\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} - \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & g_{m2} & \cdots & g_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \right)^2 \quad (4-16)$$

本文采用 NAG 算法来计算每轮迭代的步长 α ，NAG 算法利用了一种“超前梯度”的思想，可以加快梯度下降的速度，缩短求解最优运行速度的时间，其算法流程如表 4-1 所示。

表 4-1 使用 Nesterov 动量的随机梯度下降算法

使用 Nesterov 动量的随机梯度下降算法 (NAG)

Require: 学习率 ε , 动量参数 α Require: 初始参数 θ , 初始速度 v

While 停止条件没有满足 do

 从训练集中随机抽取 m 个样本 $\{x^{(1)}, \dots, x^{(m)}\}$, 其中 $x^{(i)}$ 对应的目标值为 $y^{(i)}$ 应用临时更新: $\tilde{\theta} \leftarrow \theta + \alpha v$ 计算梯度值: $g \leftarrow \frac{1}{m} \nabla_{\tilde{\theta}} \sum_i L(f(x^{(i)}; \tilde{\theta}), y^{(i)})$ 计算速度更新: $v \leftarrow \alpha v - \varepsilon g$ 参数值更新: $\theta = \theta + v$

End While

4.3.2 自适应遗传算法

遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型, 是一种模拟自然进化寻找最优解的方法^[55-56]。它的主要特点是直接针对需要求解的参数, 不同于梯度寻找最优解, 它没有求导和函数连续性的要求, 采用概率化的搜寻方式, 有较好的全局寻优能力^[57]。不需要确定太多的规格, 可以自适应的调节搜寻方向。

编码: 将需要求解的所有未知量封装成一个个体, 每个需要求解的未知量称为基因, 因此在本问题中, 将在轨迹上的所有栅格中喷涂的时间编码成基因;

初始化种群: 种群包含若干个个体, 每个个体都包含有一组基因, 在此处需要对基因附上初值, 这个初值往往是随机的, 一般会限制在某个区间内;

评估种群中个体的适应度: 循环遍历种群, 计算出每个个体的适应度, 这里的适应度规则需要根据自己的业务需求进行设计, 在本问题中, 使得最终的目标值 Obj 越小则适应度越高;

选择: 选择是确定如何从父代种群中选择出某些个体遗传到子代, 这些个体往往是适应度较高的, 在本次实验中采用的是轮盘赌方案, 即每个个体被选中的概率与其适应度函数值成正比, 假设种群大小为 m , 每个个体 i 的适应度值为 F_i , 则该个体被选中的概率为:

$$P_i = F_i / \sum_{i=1}^m F_i \quad (4-18)$$

交叉: 种群中每个个体有很长的基因片段, 为了提高种群的多样性, 随机选取两个父代个体, 遍历这两个个体, 每 10 个基因被划分为一个基因段, 在每个基因段中随机产生交叉概率和交叉位置, 当交叉概率小于自适应计算值 pc 时, 在交叉位置处进行单点交叉。

变异: 随机一个变异概率, 随机一个变异方向, 当变异概率小于自适应计算

值 pm 时, 检测随机出来的变异方向, 当变异方向为正时, 则通过以下公式进行变异:

$$nextPop(i) = Pop(i) + (T_{\max} - Pop(i)) * rand() \quad (4-19)$$

当变异方向为负时, 则通过以下公式进行变异:

$$nextPop(i) = Pop(i) - (Pop(i) - T_{\min}) * rand() \quad (4-20)$$

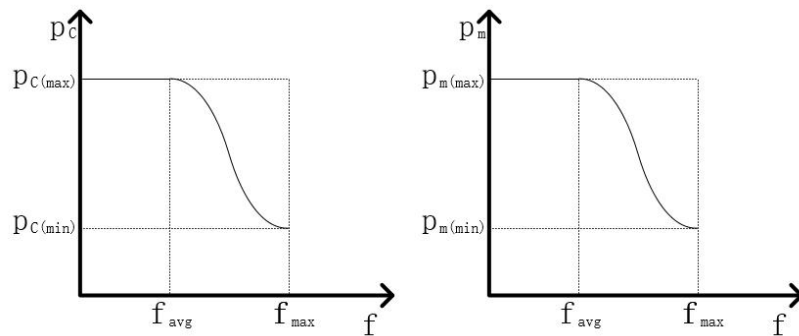
其中 $Pop(i)$ 表示个体第 i 个位置的原基因值, $nextPop(i)$ 表示个体第 i 个位置的新基因值, $T_{\max}$ 是基因允许的最大值, 其中 $T_{\min}$ 是基因允许最小值。

遗传算法中合理的选择交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 是影响遗传算法求解问题的关键。 P_c 值过小很难产生新的个体, 过大则会影响遗传算法的运算效率。 P_m 过小同样不利于产生新的个体, 过大则不利于保留一些优良个体, 会使算法的导向性变差[58]。由于 P_c 和 P_m 对遗传算法的求解效果有着巨大的影响, 所以这两个值的选取十分关键, 为了提高遗传算法的收敛速度同时又不至于使遗传算法陷入局部最优解, 所以使用自适应交叉概率和自适应变异概率, 其表达式为:

$$P_c = \begin{cases} \frac{P_{c(\max)} + P_{c(\min)}}{2} + \frac{P_{c(\max)} - P_{c(\min)}}{2} * \cos\left(\frac{f - f_{avg}}{f_{\max} - f_{avg}}\pi\right), & f \geq f_{avg} \\ P_{c(\max)}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (4-21)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{P_{m(\max)} + P_{m(\min)}}{2} + \frac{P_{m(\max)} - P_{m(\min)}}{2} * \cos\left(\frac{f - f_{avg}}{f_{\max} - f_{avg}}\pi\right), & f \geq f_{avg} \\ P_{m(\max)}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (4-22)$$

公式(4-21)和公式(4-22)分别用于计算自适应遗传算法的交叉和变异概率, 其中 $P_{c(\max)}$, $P_{c(\min)}$ 分别为初始设置的最大交叉概率和最小交叉概率, $P_{m(\max)}$, $P_{m(\min)}$ 分别为初始设置的最大变异概率和最小变异概率, 式(4-21)中的 f 表示两个交叉个体中较大的适应度值, 式(4-22)中的 f 表示变异个体的适应度, f_{avg} 表示种群的平均适应度, $f_{\max}$ 表示种群中最大的适应度, 可以通过下图来描述交叉和变异概率的变化:



(a) 自适应交叉概率随适应度变化曲线 (b) 自适应变异概率随适应度变化曲线

图 4-9 自适应交叉及变异概率分布

如图 4-9 所示, 其中(a)表示自适应交叉概率分布图, (b)表示自适应变异概率分布图, 可以看出, 当 f 接近 f_{avg} 时, 交叉和变异的概率比较大, 当其接近 f_{max} 时, 交叉和变异的概率较小。在使用自适应遗传算法搜索的前期, 随机初始化的个体的适应度比较分散, 其中适应度较高的个体的交叉和变异概率较低, 较低的概率可以很好的保存适应度高的个体, 对于初始化适应度较低的个体, 交叉和变异的概率很高, 这样可以促使适应度低的个体发生改变^[59]。在迭代搜索的后期, 适应度逐渐集中, 由图 4-9 可知, 当适应度趋向于种群的平均值时, 交叉和变异的概率增大, 在适应度高的个体被保存的同时, 增加种群的多样性, 可以降低在寻解过程中陷入局部最优解的可能性^[60]。

4.4 喷浆仿真实验设计

在实际隧道喷浆的过程中, 由于隧道面的空间范围很大, 机手在操作喷浆机时往往不会一次性全部喷涂完毕, 一般机手会将整个隧道面分为三个喷涂区域, 分别对这三个喷涂区域进行喷涂。本文将喷涂区域分为三个曲面, 如图 4-10-a 所示。在喷涂过程中, 一般优先喷涂两边的区域, 再喷涂顶部区域, 这样的喷浆方式可以保证机械臂在往返喷涂的过程中关节移动范围少。隧道面的左面和右面成对称关系, 因此本次喷涂仿真实验只进行左面和弧顶的喷涂仿真, 由第二章的喷涂实验可以得知喷涂的直径在 12cm-13cm 之间, 因此本文使用一个 13×13 的栅格代表喷枪的喷涂区域, 每个栅格的边长为 1cm, 并且这个栅格中的数值符合第二章建立的混凝土速率累积模型, 如图 4-10-b 所示, 中心区域的累积速率最快, 边缘区域累积速率最慢。由前文计算可知当相邻两条轨迹之间的间距为 6.5110cm 时相邻轨迹叠加的效果较好, 但此时轨迹不是经过栅格的中心区域, 为了便于计算, 将两条轨迹之间的间距设为 6cm。针对上述转化的喷涂轨迹优化问题, 采用梯度下降法和自适应遗传算法对其进行求解。

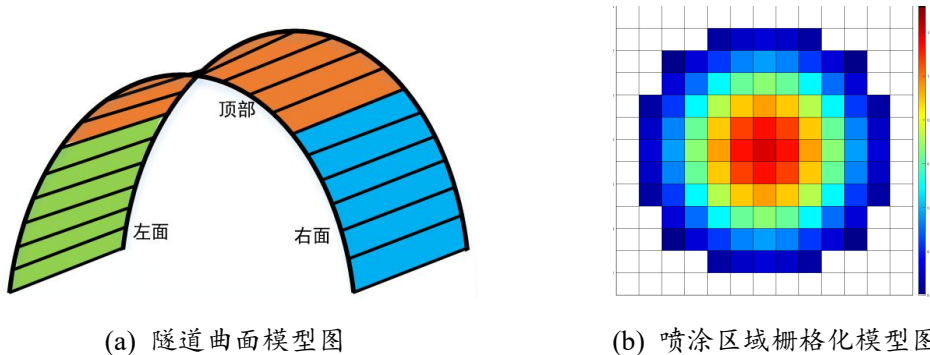


图 4-10 隧道曲面模型图以及喷涂区域栅格化模型图

针对相邻两个曲面, 规划出的两条轨迹之间的连接也仍要考虑, 如图 4-11-a 和 4-11-b 所示的两种不同连接方式, 可以看出, 图(a)的两条轨迹之间的连接线

比图(b)的要长很多, 并且不是水平或者竖直移动。在实际喷涂的过程中, 跨越相邻区域时耗费的时间越短越好, 这样可以较少涂料在移动时造成的损失, 因此实际喷涂规划方案中应该采用方案 b。

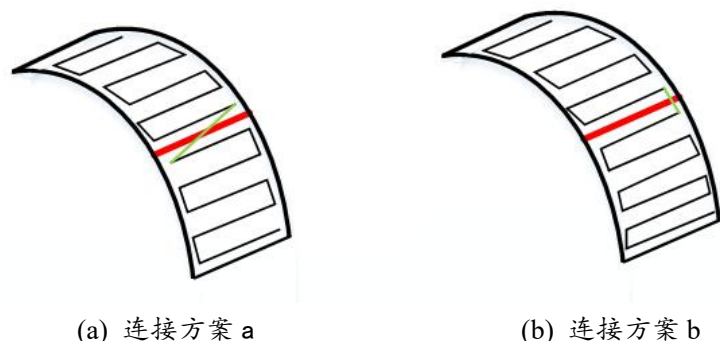


图 4-11 相邻曲面轨迹的两种连接方案

4.4.1 隧道左边区域喷涂仿真实验

图 4-10-a 表示将隧道分为三等份, 因此左边区域与水平方向的夹角最大为 60° , 根据第二章建立的最大喷涂时间与喷涂区域水平夹角的关系可知, 这块区域单次可以喷涂的最大厚度约为 4.8cm, 左边区域展开热力图如图 4-12 所示, 设置最终的喷涂厚度为 50cm, 采用自适应遗传算法及梯度下降法求解。

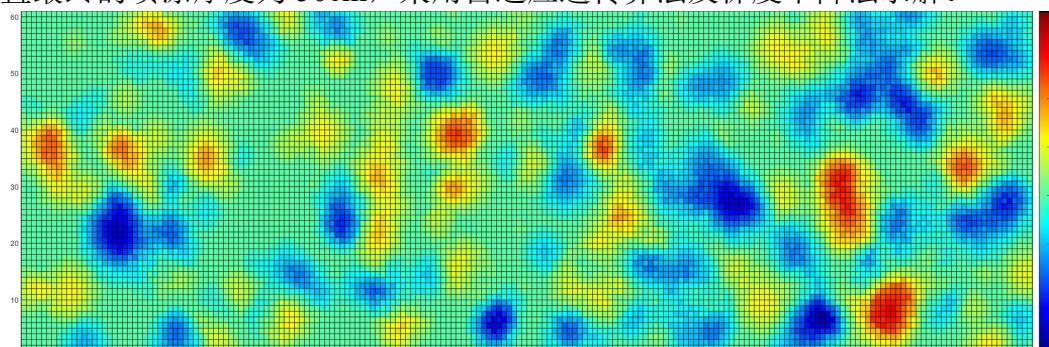
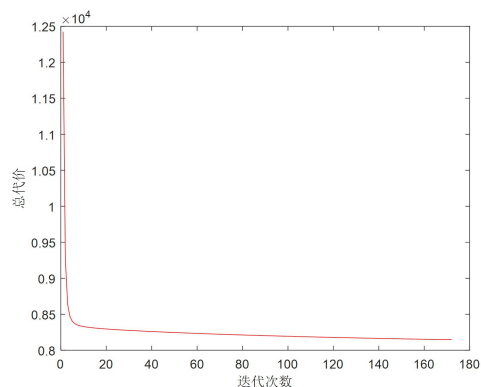
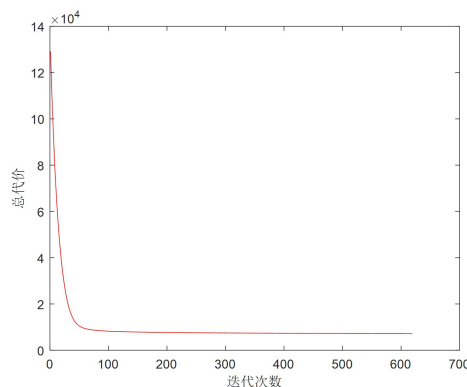


图 4-12 左边区域展开栅格热力图

由于限制了单次的厚度, 因此两种算法都需要经过多次喷涂才可以将隧道栅格面喷涂平整。下面对两种算法的求解效果进行比较:



(a) 梯度下降法收敛结果图



(b) 自适应遗传算法收敛结果图

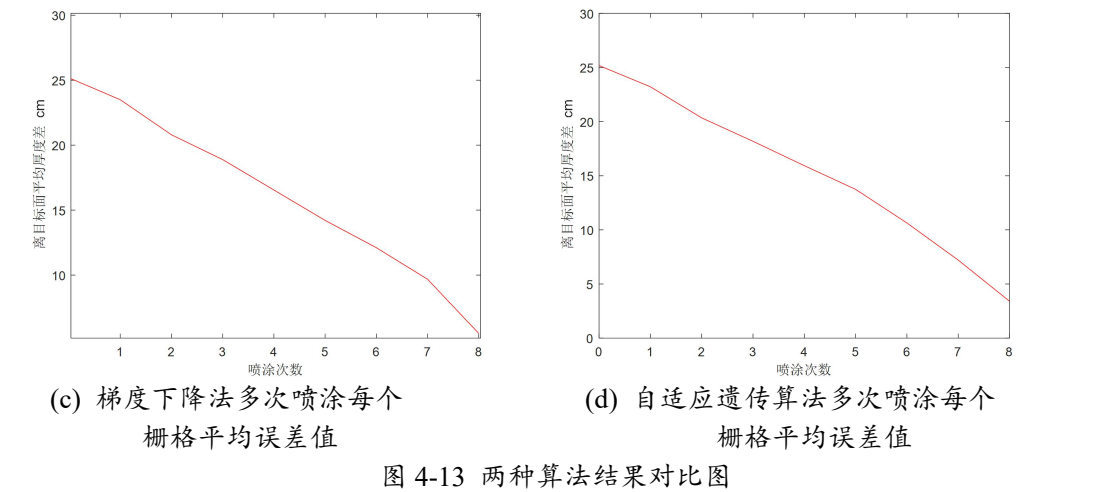


图 4-13 为两种算法的结果对比图，图(a)(b)中总代价表示每个栅格的厚度与目标厚度之间的差值的绝对值的和，它可以反映整体的喷涂效果，可以看出，随着迭代次数的增加，两种算法都能够很快的收敛。(c)(d)表示每次喷涂，每个栅格的平均误差值，可以看出，随着喷涂次数的增加，平均厚度差值逐渐减小。实验结果表明，这两种算法都能够求解该问题，下面对比一下两种算法的求解性能。

单次实验可能会出现偶然性，所以对该栅格面进行 100 次仿真求解实验，将最终的结果取平均值，记录的结果如下表所示：

表 4-2 两种算法求解对比表			
算法名称	平均求解时间(s)	每个栅格的平均误差(cm)	混凝土利用率(%)
梯度下降法	74	0.9	96.7
自适应遗传算法	231	2.3	97.1

通过表 4-2 可以对比出两种算法的求解性能，在本文这个问题上，喷涂相同的隧道面，梯度下降法的平均求解时间要快于自适应遗传算法。自适应遗传算法属于随机搜索算法，本文所构建的喷浆问题解空间很大，自适应遗传算法找解的过程很消耗时间。根据每个栅格的平均误差来看，最终梯度下降法求出解的效果要好，每个栅格的平均误差为 0.9cm，工业要求平均厚度误差最大值为 3cm，在工业允许的误差范围内。两种算法求出的解都保持了较高的混凝土利用率，工业要求的混凝土利用率应该在 93%以上，所以规划的轨迹符合工业要求。

图 4-14 为某一次左边区域喷涂之后的热力图，可以看出，喷涂区域的颜色基本一致，整体喷涂效果很好，边上的蓝色边框是仿真时加入的边界，没有进行喷涂。

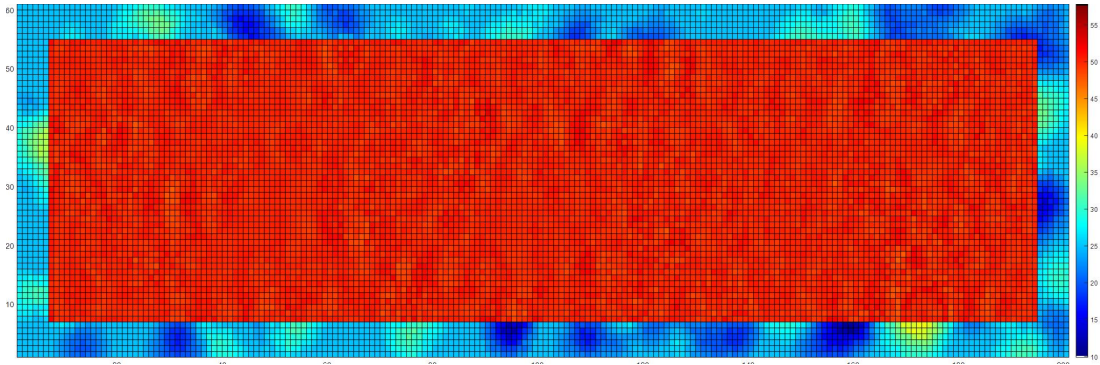


图 4-14 左边区域喷涂后栅格热力图

4.4.2 隧道顶部区域喷涂仿真实验

由第二章得出的单次喷涂时间限制与待喷涂区域水平夹角的关系可知，在弧顶区域喷涂时，可喷涂时间最少的位置出现在水平夹角为 90° 的位置，通过公式(2-17)可以计算出单次最少可喷涂时间为 3.2s，因此单次喷涂厚度应该限制在 3.84cm 以内，目标厚度设定为 50cm。其展开栅格热力图为图 4-15 所示。

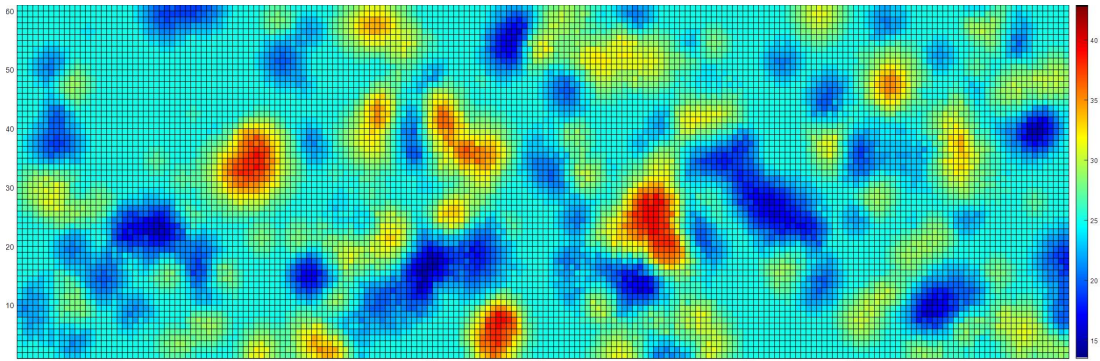
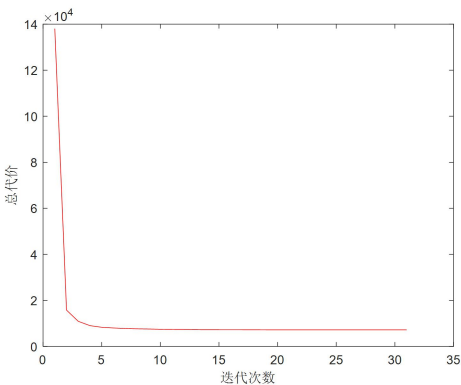
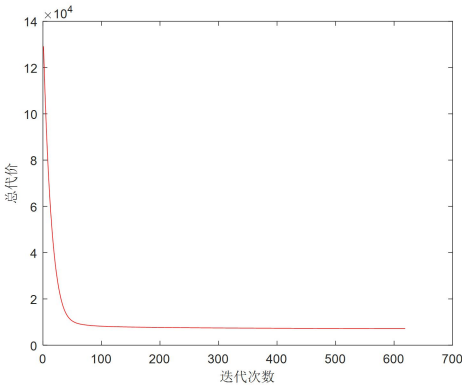


图 4-15 弧顶区域展开栅格热力图

采用梯度下降算法和自适应遗传算法对其进行求解，其结果如下：



(a) 梯度下降法收敛结果图



(b) 自适应遗传算法收敛结果图

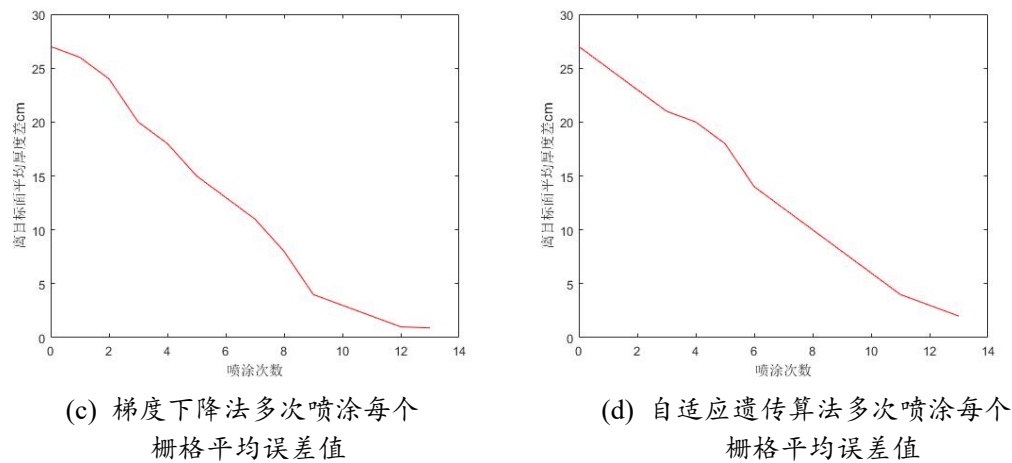


图 4-16 两种算法结果对比图

图 4-16 为两种算法的结果对比图，总共进行了 13 次喷涂，由总代价的变化曲线来看，两种算法都能够很快的收敛。(c)(d)表示每次喷涂，每个栅格的平均误差值，可以看出，随着喷涂次数的增加，平均厚度差值逐渐减小。

在栅格面弧顶区域进行 100 次仿真求解实验，将最终的结果取平均值，记录的结果如下表所示：

表 4-3 两种算法求解对比表

算法名称	平均求解时间(s)	每个栅格的平均误差(cm)	涂料利用率(%)
梯度下降法	76	1.2	95.4
自适应遗传算法	278	2.0	96.2

通过表 4-3 可以对比出两种算法的求解性能，在进行弧顶区域喷涂轨迹求解时，梯度下降法的平均求解时间要快于遗传算法。梯度下降法求出的解使得每个栅格的平均误差为 1.2cm，在工业允许的误差范围内，涂料利用率也满足工业要求的标准，所以规划的轨迹符合工业要求。

图 4-17 为一次顶部区域喷涂之后的热力图，可以看出，喷涂区域的颜色基本一致，整体喷涂效果很好。

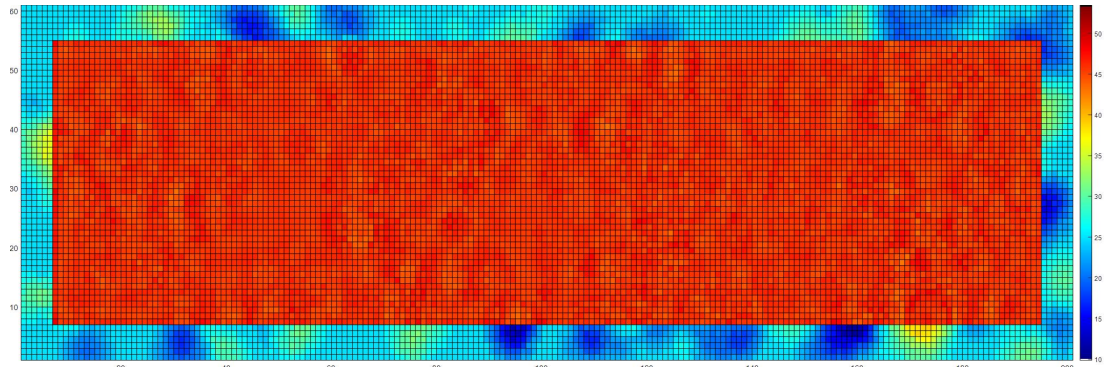


图 4-17 弧顶区域喷涂后栅格热力图

4.5 总结

本章针对展开的栅格面进行轨迹规划，使用相关算法进行求解分析。本章采用了光栅型轨迹作为机械臂的运动路线，确定了相邻轨迹的间距，在该路径下做变速喷涂运动，确定每个栅格的厚度增长情况，以整体喷涂的平整度为目标，每个栅格的喷涂时间为规划对象，将喷涂问题转换为一个优化问题。本文采用自适应遗传算法和梯度下降法对该问题进行求解，结果证明梯度下降求解的效果较好。这一章规划出喷枪在每个栅格中运行的时间，用栅格的边长除以这个时间即可计算出喷枪在每个栅格的运行速度，仿真结果表明规划出的轨迹效果很好。这种轨迹规划方法可以推广到很多场景下进行喷涂，适用性较广。

第 5 章 喷浆机器人轨迹规划系统设计与实现

5.1 引言

为了方便对各种隧道点云数据进行轨迹规划，本文设计了喷浆机器人的规划系统，只需要输入点云数据、选择喷浆模型、设置喷浆的目标值和求解算法即可得到一套轨迹规划方案。在没有该系统前，验证某条轨迹的有效性只能在真机上进行喷浆仿真实验，实际喷浆机进行一次喷浆实验代价很大，会消耗很多人力和造成混凝土的浪费，实验成本太高，这是造成目前还没有全自动喷浆机器人产品的一个主要因素。本系统最大的价值在于可以不依赖于喷浆机就能验证某条轨迹的效果，很方便验证求解算法的性能，极大的提升了全自动喷浆机的研发进程。

5.2 喷浆机器人轨迹规划系统结构设计

本文先对喷枪的喷涂问题建立模型，然后针对隧道点云数据，结合喷涂模型进行轨迹规划，并且通过仿真验证了基于这条轨迹的喷涂效果。为了能够方便的使用本文的相关技术，灵活的选取求解中的相关参数，因此本章设计了一套喷浆机器人轨迹规划系统，该系统的结构图如下图所示：

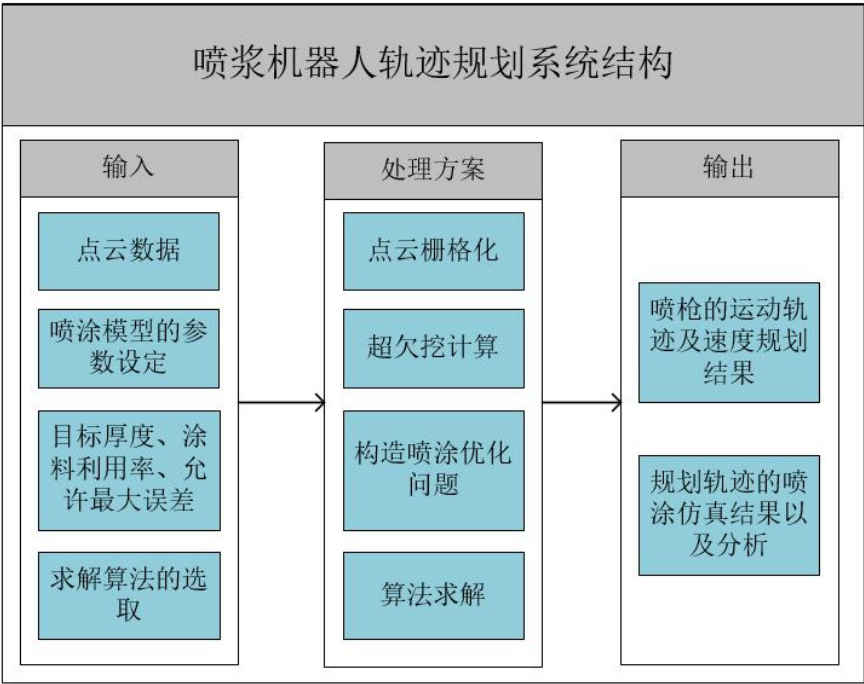


图 5-1 喷浆机器人轨迹规划系统结构图

整个系统可以分为三个部分，及输入的数据，中间的处理部分以及结果分析。输入部分主要包括点云数据、喷涂参数设定、目标喷涂厚度、混凝土利用率、最大允许误差值、求解算法的选取等。喷涂模型的参数选取是为了针对不同的喷浆

提供不同的喷涂模型,可以根据实际情况设置喷涂半径、拟合函数等,可用性较高。目标值等一些参数则需要根据实际工业需求来进行选取,本系统并不采取封闭式开发,可以自己选取合适的求解算法对该喷涂问题进行求解,如果日后出现了更好的求解算法,则也可以对该系统进行补充。

中间处理层是整个系统的核心部分,输入层输入的数据都需要在这里进行处理计算,其主要包括点云数据的处理,喷涂问题的构建以及对该问题的求解。点云栅格化主要是先采用移动最小二乘法对点云数据进行曲面拟合,然后利用点云到拟合曲面的距离进行超欠挖计算,并且通过设置的栅格的大小将整个曲面进行展开处理;然后结合选取的喷涂模型对栅格进行轨迹规划,首先根据选取的喷涂模型选取合适的轨迹间距,然后结合输入的目标厚度构建喷涂质量优化的目标函数,采用选取的求解方法对该目标函数进行求解。

系统的输出层首先输出的是喷浆机器人的运动轨迹以及在轨迹上的运行速度,然后会输出这条轨迹的喷涂仿真结果和对相关结果的分析。可以根据输出的仿真结果对该轨迹的实用性进行判断,从而可以避免直接在真机上进行喷涂测试,提高了开发效率。

以上就是对该系统的一个简介,输入层是整个系统的入口,可以设计成一个交互界面,中间处理层是整个系统的核心,决定了系统的好坏,输出层也可以展示在交互界面上,方便用户进行查看。

5.3 喷浆机器人轨迹规划系统实现

根据上一节突出的一个整体框架,本节根据实际的功能需求,选择合适的开发环境,然后在该平台上开发轨迹规划系统。

5.3.1 软件开发平台

由于本课题属于工程项目,经常需要处理关节传感器传输的数据,为了方便统一这套系统采用 Visual Studio2013 进行开发。Visual Studio 是由美国微软公司开发的工具包系列产品,是一个基本完整的开发工具集,它包括了整个软件生命周期所需要的大部分工具,如 UML 工具、代码管控工具、集成开发环境(IDE)等。其主要开发语言为c#,Visual Studio 通过功能齐全的代码编辑器、编译器、项目模板、设计器、代码导向、功能强大而易使用的调试器以及其他工具,实现了对 Visual c#的支持。

由于结构示意图上需要与用户进行交互,因此使用 Visual Studio 中的 MFC 模块进行交互界面的开发, MFC 是图形化界面语言,它所提供的类很多都是用来进行界面开发,关联窗口中控件的动作,在没有 MFC 之前,从零开始构建一个窗口一般都需要一定的代码量,使用 MFC 进行界面设计,只需要操作给定的

工具箱就可以进行界面设计，相关的窗口代码会自动生成，所以开发者只需要专注于功能的开发，十分的方便。

MFC 类库中的类是以层次结构的方式组合而来的，大多数的类都是从 CObject 中直接或者间接继承来的，其主要类的继承关系如下：

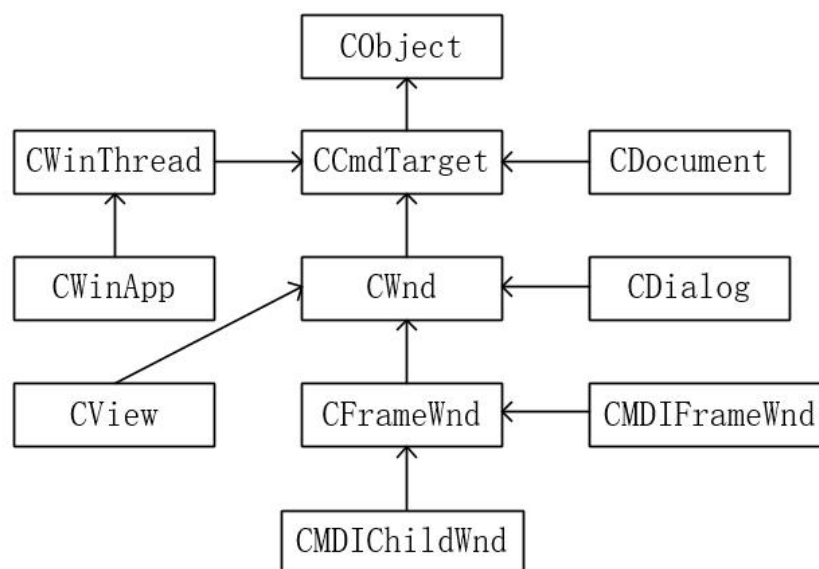


图 5-2 MFC 部分类继承图

CObject 是 MFC 的根类，它包含的是 MFC 类的一些最基本的公共特性，由于下面的子类都是继承于它，所以子类也有这些公共特性，其主要包括三种特性，即：(1) 串行化支持，串行化是将对象数据进行输入或者输出的进程，将其作为所有类的基本特性，因此可以很方便的创建可串行化的类，从而可以很方便的实现输入或者输出功能。(2) 运行时类信息的支持。(3) 断点调试和诊断支持，这是开发过程必备的功能，当编写的程序出现故障时可以进行单步调试以检测出问题的所在。

CCmdTarget 是 CObject 的子类，主要负责将系统的消息或者交互窗口的消息发送给相应这些事件的对象，负责程序运行时消息的发送工作，实现程序对象之间的沟通任务。

CWinApp 是程序的主线程类，它继承于 CWinThread 类，主要用来对线程的创建、运行、阻塞和终止等进行控制。

CDocument 是文档类，主要负责文档的卸载和维护。

CWnd 是 MFC 中的窗口类，它提供所有类的窗口显示功能，继承于 CWnd 的类就可以拥有自己的窗口，并且可以使用提供的一些控件进行开发

以上介绍了 MFC 的几个常用的类，这些类能够提供很方便的函数方法，促进了系统的开发。

5.3.2 软件的架构

该系统使用 MFC 进行界面开发，采用模块化的思想开发喷浆机器人轨迹规划系统，其软件架构如下图所示，该系统依赖于 windows7 操作系统。



图 5-3 喷浆机器人轨迹规划系统架构

资源层是整个系统的基础，为整个系统提供各种库函数支持和平台支持。算法层是整个系统的核心部分，首先是曲面拟合算法，当用户输入点云数据后，曲面拟合算法就可以将点云数据拟合成一个相对较光滑且精度高的曲面。超欠挖计算算法则是利用网格法求出点云离拟合曲面之间的距离，整个在一起就可以反映隧道的超欠挖信息。轨迹规划算法则是对抽象出的优化问题进行求解，在开发的过程中我们使用了参数化的思想开发，即事先包装好各种优化算法，然后在调用算法时直接将算法的名字以一个参数的形式调用方法，这样的开发流程使得整体代码结构更加整洁。功能层主要处理系统中间的一些业务，首先是生成喷涂模型，根据用户的参数选择，自动组合成用户需要的厚度累积速率模型。然后进行点云栅格化处理，根据设定的栅格的边长将整个拟合曲面分成若干个大小相等的栅格，然后按照角度信息将栅格展开成一个平面。通过相邻轨迹的叠加计算公式求出相邻轨迹之间的间距，然后从第一条轨迹开始，确定整个栅格面的轨迹路径。结果分析就是将轨迹求解算法求出的解展示到界面层的一个过程，主要包含将生成的一些图片和数据展示到界面层。界面层是用户用来和整套系统交互的，包括输入一些必要的参数，控制轨迹规划的流程和展示规划以及仿真的结果。

如下图 5-4 所示，它是系统的交互界面，如图所示，用户可以喷涂模型参数设定来确定选用何种喷涂模型，可以根据目标值来设定最终喷涂的厚度，可以根

据允许误差来确定最终的喷涂效果，并且可以灵活的选取喷涂优化问题的求解算法。操作区表示用户可以在这个地方进行整个轨迹规划流程的控制，选择点云数据表示输入点云文件，点云数据处理则包括点云数据拟合、超欠挖计算以及展开等操作，求解则是调用选用的算法对轨迹进行求解，结果展示则是将求解的结果展示到右边的结果展示区。如图 5-4 所示，左边表示选取的各项参数，点击结果展示之后可以输出相应的结果。

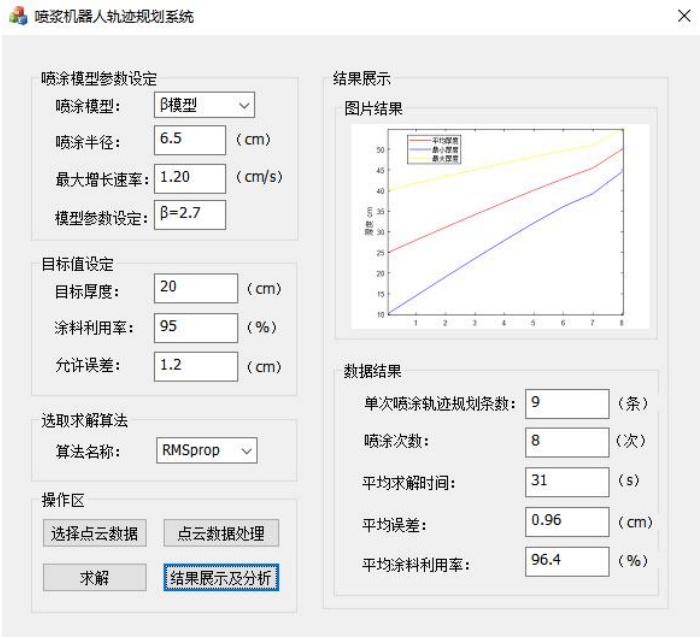


图 5-4 喷浆机器人轨迹规划系统交互界面

5.4 总结

本章主要设计了喷浆机器人的轨迹规划系统，首先讲述了该系统的主要结构，即整个系统主要分为输入层，中间处理层和输出层。然后介绍了选取的开发平台及开发软件，visual studio 是一个免费开源的软件，整体入手难度不高，适合作为长期开发的工具，再加上它提供的 MFC 界面编程技术，可以很方便的编写出实用的控制系统。最后采用模块化编程的思想开发这一套系统，明确各个模块的任务，最终实现了交互系统的设计。

整套系统依托于论文的第 2 章、第 3 章和第 4 章的知识，整体设计不是特别难，但是有一定的实用价值。首先它可以脱离真机而存在，即不需要在真机上进行喷涂我们就可以验证轨迹的喷涂结果。然后它还可以验证各种求解算法的求解性能，以便及时进行算法的优化。

第6章 总结与展望

总结：

本文研究了隧道喷浆机器人的轨迹规划技术，首先对喷浆机进行喷涂建模，求出混凝土累积速率和喷涂相关参数之间的关系，并且通过真机喷涂试验验证参数的准确性；然后将离散的点云数据进行曲面拟合，再对拟合曲面进行栅格化处理，求出每块栅格的超欠挖和角度信息；最后建立了运动过程中的累积模型，优化了轨迹之间的间距使喷涂效果更好，并且详细讨论了喷枪在运行过程中速度的变化对喷涂效果产生的影响，通过相关优化算法求得最优的速度曲线。论文的主要工作及内容如下：

(1) 根据已有的喷涂模型建立出喷浆机的喷涂模型，讨论了喷涂参数与模型之间的关系，并且结合实际情况，建立了受重力影响的累积模型，求出其相关影响参数，并且通过相关喷涂试验验证了参数的准确性。

(2) 针对点云数据离散，无法很好的获取点云的超欠挖信息，本文提出了拟合隧道基准面的解决方案。采用移动最小二乘法求解出隧道点云数据的贴近曲面，计算点云数据离拟合曲面的距离并求其平均数，作为对应栅格内的超欠挖信息。

(3) 建立了喷枪在运动过程中的厚度累积模型，计算出轨迹之间的间距对累积厚度的影响。根据每个栅格记录的超欠挖信息不同，提出了变速运动来保证最终的喷涂效果，首次提出将喷涂问题转换成矩阵之间的计算，将速度变化曲线离散为很小的时间段，确定空间中每个栅格所受到喷枪的影响，并以隧道面喷涂最为平整为优化对象，优化小时间段。同时在优化的过程中，考虑混凝土的利用率，在保证混凝土利用率的前提下提高喷涂质量。

(4) 开发一套喷浆机器人轨迹规划系统，使得可以离线进行喷涂实验仿真，验证求解算法的好坏。

展望：

本课题提出了一套理论上较为完整的喷浆机规划方案，在研究隧道自动化喷涂方面具有一定的实际意义，但是理论和实际还是有一定的差别，要想真正应用于隧道施工行业，仍有几个需要提升的地方：

(1) 实验采集的隧道点云数据处理难题。本实验采用的点云数据还是一个比较均匀的曲面，拟合效果较好。但是有一些隧道是类似于三岔口的大隧道，所以在曲面拟合时就不能指用一种单独的曲面去拟合，需要针对不同的组合曲面，进行曲面分割，然后对分割区域进行拟合。

(2) 本文求出了规定轨迹上的运行速度变化曲线，但是要想真正应用于真实

的喷浆机喷涂上，就需要把规划的速度根据机械臂自身的结构进行速度分解，由于速度为矢量并且喷浆机的机械臂关节过多（8 个），因此这个课题仍需要做进一步的研究。

(3) 喷涂数据采集问题。由于数据采集时间有限，再加上进行一次试验消耗成本过大。因此要多和合作公司沟通，多采集几组数据进行拟合，提高模型的准确性。

参考文献

- [1] 郭陕云.我国隧道和地下工程技术发展与展望[J].施工技术,2018,55(2):1-14.
- [2] 李芳芳,孙乾.我国工业机器人发展现状的调查分析[J].机械传动,2019,43(6):172-176.
- [3] 李旭.机器人技术在整车油漆喷涂领域的运用分析[J].汽车工艺与材料,2008,(5):33-38.
- [4] 莫怀训.喷涂连续工艺中机器人喷枪最优轨迹规划的研究[D].华南理工大学,2007.
- [5] Zeng Y, Zhou H, Zhang C W, et al. Spray technology planning of spray painting robot for complex free surface [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2016, 31(4): 321-328.
- [6] 张宪民, 杨丽新, 黄沿江.工业机器人应用基础[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [7] Tuna Balkan, M. S. Sahir Arikan. Surface and process modeling and off-line programming for robotic spray painting of curved surface[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(9):479-494.
- [8] Persoons W, Brussel H. CAD-based Robotic Coating of Highly Curved Surfaces. International Symposium On Industrial Robots, 1993, 14: 611-618.
- [9] Antonio J K, Ramabhadran R, Ling T L. A framework for optimal trajectory planning for automated spray coating[J]. International Journal of Robotics & Automation, 1997, 12(4):124-133.
- [10] M. A. Sahir ARIKAN, Tuna BALKAN. Process Simulation and Paint Thickness Measurement for Robotic Spray Painting[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1):291-294.
- [11] Goodman E D, Hoppensteradt L T W. A method for accurate simulation of robotic spray application using empirical parametrization[C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation. 1991. 2(2): 1357-1368.
- [12] Chen Y, Chen W Z, Chen K, et al. Motion planning of redundant manipulators for painting uniform thick coating in irregular Duct[J]. Journal of Robotics, 2016, 13.
- [13] 缪东晶, 王国磊, 吴柳, 等.自由曲面均匀喷涂的机器人轨迹规划方法[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(10):157-159.
- [14] 刘洋, 赵臣, 王旭浩, 等.喷涂机器人静电旋杯的新模型[J].中国机械工

- 程,2019,30(6):709-715.
- [15]张永贵.喷漆机器人若干关键技术研究[D].西安理工大学,2008.
- [16]武晨光.喷涂机器人倾角喷涂模型建立与轨迹优化研究[D].安徽理工大学,2016.
- [17]王国磊, 陈恳, 陈雁,等.变参数下的空气喷枪涂层厚度分布建模[J].吉林大学学报(工学版),2012,42(1):188-192.
- [18]王国磊, 伊强, 缪东晶,等.面向机器人喷涂的多变量涂层厚度分布模型[J].清华大学学报(自然科学版), 2017,57(3):324-330.
- [19]Sheng W, Chen H, Xi N. Tool Path Planning for Compound Surfaces in Spray Forming Processes[J], IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2005, 2(6): 240-249.
- [20]Chen H, Xi N. Automated Robot Tool Trajectory Connection for Spray Forming Process [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering.2012, 134(2): 1-9.
- [21]Antonio J K, Ramabhadran R, Ling T L. A framework for optimal trajectory planning for automated spray coating[J]. International Journal of Robotics & Automation, 1997, 12(4):124-133.
- [22]Atkar N Prasad, Greenfield Aaron, Conner C David, et al. Hierarchical Segmentation of Surfaces Embedded in R3 for Auto-Body Painting[C]. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Spain: Barcelona, 2005:574-579.
- [23]Andulkar M V, Chiddarwar S S. Incremental Approach for Trajectory Generation of Spray Painting Robot. The Industrial Robot. 2015, 42(3): 228-241.
- [24]Bmg-HY Cho, Byoung-Suck Choi, Jang-Myung Lee. Time-optimal trajectory planning for a robot System under torque and impulse constraints[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2004, 4(1): 259-264.
- [25]Peter A. Muller, Ryad Boucherit, Steven Liu. Smooth and time-optimal trajectory planning for robot manipulators[J]. American Control Conference.2012:5466-5471.
- [26]Young Dae Lee, Beora Hee Lee, Han Gyoo Kim. An evolutionary approach for time optimal trajectory planning of a robotic manipulator [J]. Information Sciences, 1999,113(3):245-260.
- [27]Mayur V, Andulkar, Shital S C. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot [J]. Industrial Robot, 2015, 42(3): 228-241.
- [28]Andulkar M V, Chiddarwar S S, Marathe A S. Novel integrated offline trajectory

- generation approach for robot assisted spray painting operation [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 37(10):201-216.
- [29]陈雁, 颜华, 王力强, 等. 机器人匀速喷涂涂层均匀性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 8(1): 1210-1213.
- [30]缪东晶, 吴聊, 徐静, 等. 飞机表面自动喷涂机器人系统与喷涂作业规划[J]. 吉林大学学报(工), 2015, 45(2):547-553.
- [31]马淑梅, 罗曦, 李爱平, 等. 船舶工业机器人曲面喷涂喷枪轨迹离线规划[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 289-295.
- [32]邵振华, 周波, 孟正大, 等. 针对规则化工件曲面的喷涂轨迹规划研究[J]. 计算机技术与发展, 2015(3): 6-10.
- [33]邹继刚, 曾昭龙, 张锐. 机械手时间-能量综合最优轨迹规划[J]. 应用科学学报, 2002, 20(4):346-349.
- [34]杨国军, 崔平远. 机械手时间最优轨迹规划方法研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(20):1715-1717.
- [35]周波, 邵振华, 孟正大, 等. 基于高斯和模型的喷涂机器人涂层生长率建模[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 463-466.
- [36]马淑梅, 罗曦, 李爱平, 等. 基于 AMPSO 算法的船舶工业喷涂机器人喷涂参数优化[J]. 中国工程机械学报, 2016, 14(2):125-130.
- [37]Kachiashvili Kartlos Joseph, Kachiashvili Kartlos Joseph, Melikdzhanjan David I. Estimators of the parameters of beta distribution.[J]. Sankhya B, 2019, 81(2):350-373.
- [38]Toufik Zaïmi. On the distribution of powers of a Gaussian Pisot number[J]. Indagationes Mathematicae, 2020, 31(1):177-183.
- [39]Leonardo Bianchi, Nicolás, S Quesada. Training Gaussian boson sampling distributions[J]. Physical Review A, 2020, 102(1):012417.
- [40]Chen H P, Sheng W H. Transformative CAD based industrial robot program generation [J]. 2011, 27(5):942-948.
- [41]安洁. 基于椭圆 β 分布模型的喷涂问题分析[J]. 价值工程, 2018, 37(13): 222-225.
- [42]刘铁成. 喷涂机器人轨迹规划研究[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2015.
- [43]王敬艳. 基于三维激光扫描技术的非接触测量框架模型的构建与研究[J]. 数字技术与应用, 2014, 7(73):1007-1010.
- [44]Ni Hui, Li Zhong, Song Hongxing. Moving least square curve and surface fitting with interpolation conditions[J]. International Conference on Computer Application and System Modeling, 2010, 13(1):13300-13304.

- [45]蒙庆华, 林辉, 王革, 等.激光雷达工作原理及发展现状[J].现代制造技术与装备,2019,10(1):155-157.
- [46]You Li, Javier Ibanez-Guzman. Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems[J]. IEEE Signal Processing Magazine,2020,37(4):50-61.
- [47]Joshua Rapp, Julian Tachella, Yoann Altmann. Advances in Single-Photon Lidar for Autonomous Vehicles: Working Principles, Challenges, and Recent Advances[J]. IEEE Signal Processing Magazine,2020,37(4):62:71.
- [48]曹萍萍. 基于 T-S 模糊神经网络和曲面拟合算法的水质检测方法研究[D].淮北师范大学,2020.
- [49]Sober Barak, Aizenbud Yariv, Levin David. Approximation of functions over manifolds: A Moving Least-Squares approach[J]. J Comput Appl Math.2021,383: 113140.
- [50]Yao Lin-Quan, Wang Fan, Huang Juan. The modifying generalized moving least squares approximation meshless method and application on plane piezoelectric problem[C]. Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications , 2008.
- [51]王丹.随机梯度下降算法研究[D].西安建筑科技大学, 2020.
- [52]Le Khoa, Ghaffari Fakhreddine, Declercq David, et al. Efficient Hardware Implementation of Probabilistic Gradient Descent Bit-Flipping[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems. Part I: Regular Papers,2017,64(4):906-917.
- [53]Nagihan Yagmur, Baris Baykant Alagoz. Adaptive Gradient Descent Control of Stable, First Order, Time-delay Dynamic Systems According to Time-Varying FIR Filter Model Assumption[C]. International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium,2019.
- [54]Baocong Jiao, Jing Han, Lanping Chen. A Modified Conjugate Gradient Algorithm with Sufficient Descent[C]. 第四届计算科学与优化国际大会,2011.
- [55]徐力, 刘云华, 王启富.自适应遗传算法在机器人路径规划的应用[J],计算机工程与应用,2020,56(18):36-41.
- [56]Sarma, A.K .Introduction to Genetic Algorithm with a Simple Analogy(Book Chapter)[J],Modeling and Optimization in Science and Technologies,2020,16(1): 27-34.
- [57]Qu Zhijian, Wang Shasha, Xu Hongbo, et al. Self-adaptive mechanism based genetic algorithms for combinatorial optimization problems[J]. The Journal of

- China Universities of Posts and Telecommunications,2019,26(5):11-21.
- [58]Nino E, Ardila C, Perez A. A Genetic Algorithm for Multiobjective Hard Scheduling Optimization[J].International Journal of Computers, Communications and Control,2010,5(5):825-836.
- [59]Phatpicha Yochum, Liang Chang, Tianlong Gu, et al. An Adaptive Genetic Algorithm for Personalized Itinerary Planning[J]. IEEE Access,2020,8:88147-88157.
- [60]Hussain Azham, Manikanthan S V, Padmapriya T ,et al.Genetic algorithm based adaptive offloading for improving IoT device communication efficiency [J]. Wireless Networks,2020,26(4):2329-2338.

攻读学位期间主要研究成果

一、申请的专利

- [1] 谢斌, 程清.一种基于全自动隧道喷浆机器人的路径规划方法[P].中国: 2021101326446。

二、硕士期间参与项目

- [1] 企业合作研究课题: 隧道自动喷浆机器人研究与开发, 2018.6-至今, 项目组主要成员.
- [2] 企业合作研究课题: 全自动焊接机器人, 2020.9-至今, 项目组主要成员.

三、硕士期间获奖情况

- [1] 2018 年第十五届中国研究生数学建模竞赛三等奖
- [2] “英特尔杯”第一届中国研究生人工智能创新大赛百强团队

致 谢

时光飞逝，三年研究生生涯即将结束，现在回想起来，三年期间自己收获颇多，有喜悦，有悲伤，有憧憬，也有迷茫。自己也从当时进入学校的青涩变得成熟，从刚开始的胆怯、内向变的开朗，自信。在这期间，陪伴我成长的老师，同学给予我很大的帮助，使我的三年研究生生涯变得绚丽多彩。

在此首先感谢我的导师谢斌教授，从入学的第一天开始，他一直用他博学的知识和严谨的治学态度教育着我，他不仅教授了我课堂上的理论知识，更教我如何处理实际的工程项目，如何与他人之间的关系。虽然他平时很忙，但是一有时间，他就会来关心我们的项目进度，讨论技术难点，和他的每一次交流都会使我学习到很多。他是一个以学生为第一的老师，始终想着如何为学生提供更好的试验条件。我的这篇硕士论文从开题的选题、研究内容、试验设计一直到论文的撰写，导师都一直支持着我，引导着我的前进方向，对我的论文提出了许多宝贵的修改意见，在此我对谢老师表示由衷的感谢。

感谢含辛茹苦供我读书的父母，感谢我的哥哥，是你们的支持与鼓励让我有动力学习。

身在我们实验室我感觉到很快乐，整个实验室的凝聚力很强。在此感谢何小宇、宋迪、林学斌、张文婷、秦觅师兄师姐，你们在我的学习路上给予了莫大的帮助，无论是在项目上还是在日常生活中都对我十分关心，在此对你们表示感谢。感谢与我同级别的丘文杰、徐勇、彭哲、赵新宇，三年时间和你们一起学习十分开心，感谢在学习和生活上的帮助，今年轮到我们毕业，在此祝愿你们前程似锦。感谢我的师弟师妹吴迪，万思远，孙铭蔚，后国炜，李旭辉，邝逸灵，谢振南，聂海涛，感谢你们一直以来的陪伴。

最后，向百忙之中抽出时间审阅论文的各位专家、老师们表示诚挚的谢意。