硕士学位论文

隧道自动喷浆机器人喷浆轨迹规划研究 Research on Shotcrete Trajectory Planning of Tunnel Automatic Shotcrete Robot

学科专业 工程

专业领域 控制工程

作者姓名 林学斌

指导教师 谢斌 副教授

 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

隧道自动喷浆机器人喷浆轨迹规划研究 Research on Shotcrete Trajectory Planning of Tunnel Automatic Shotcrete Robot

作者姓名 林学斌

学科专业 工程

学 科 方 向 控制工程

研 究 方 向 喷浆机器人轨迹规划

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	答辩委员会主席

中南大学2020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导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:	日期:	年	_月_	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:			_	导师签名_	导师签名			
日期:	年	月	日	日期:	年	月_	E	

隧道自动喷浆机器人喷浆轨迹规划研究

摘要:目前,隧道初喷支护任务主要由操作手控制多自由度喷浆机完成。由于喷浆工作强度大和隧道施工环境恶劣,该工作对人体伤害极大。全自动喷浆代替人工喷浆是社会发展的必然趋势。然而,目前对于隧道面自动喷浆技术的研究极少。本文基于"隧道自动喷浆机器人研究与开发"项目,对隧道自动喷浆机器人的喷浆轨迹规划展开研究,主要内容如下:

- (1)混凝土喷射厚度累积模型是喷浆轨迹规划的基础。本文分析并建立平面和自由曲面两种情况的混凝土厚度累积模型,而后进行真机喷浆实验,运用最小二乘法拟合模型函数曲线,实验结果验证了混凝土厚度累积模型的实用性。
- (2)针对隧道喷浆任务,本文提出一种基于待喷厚度的分级喷浆 策略,根据优先级由高到低逐级喷浆。同一优先级数据依据连通规则 划分成多个子区域。针对不规则子区域,本文提出一种基于包络盒的 轨迹生成方法,对每个子区域建立相应的包络盒,进而采用一系列平 行平面切割包络盒内的子区域获取喷浆轨迹。最后,以实际厚度与期 望厚度差值最小为目标,求解喷枪移动速度和喷浆轨迹间距这两个关 键参数。
- (3)在子区域喷浆轨迹规划的基础上,为了获得完整的喷浆轨迹,需要将这些独立的子区域轨迹连接起来,并且连接路径最短。本文将子区域轨迹连接问题建模为广义旅行商问题模型,采用蚁群算法求解,并与最近点连接法和遗传算法进行对比实验,实验结果证明了蚁群算法解决子区域连接问题的有效性。
- (4)结合喷浆机 KC30 的参数建立简化三维模型,并完成了基于 ROS 的喷浆机器人仿真。喷浆机器人仿真包括三维模型显示与运行仿真、轨迹规划、喷浆仿真和隧道环境仿真等功能,用于测试轨迹规划算法的可行性和稳定性。

实验结果表明,本文的喷浆轨迹规划方案是可行的,能够满足隧道喷浆仟务要求。

图 50 幅,表 10 个,参考文献 63 篇

关键词:喷浆机器人;喷浆模型;轨迹规划;复杂自由曲面;蚁群

算法

分类号: TP391.4

Research on Shotcrete Trajectory Planning of Tunnel Automatic Shotcrete Robot

Abstract: At present, the primary shotcreting support task of the tunnel is mainly completed by the operator controlling the multi-degree-of-freedom shotcrete machine. Due to the harsh construction environment of the tunnel and the high intensity of the spraying work, this work is extremely harmful to the human body. Automatic shotcrete instead of manual shotcrete is an inevitable trend in social development. However, there is currently very little research on the automatic shotcreting technology for tunnel faces. Based on the "Tunnel Automatic Shotcreting Robot Research and Development" project, this paper researches on the trajectory planning of the tunnel automatic shotcreting robot. The main contents are as follows:

- (1) The cumulative model of concrete shot thickness is the foundation of shotcrete trajectory planning. This paper analyzes and builds the cumulative model of concrete thickness in two cases, the plane and free-form surface, and then carries out the real machine spraying experiment, and uses the least square method to fit the model function curve. The experimental results verify the practicality of the cumulative model of concrete thickness.
- (2) Aiming at the tunnel shotcreting task, this paper proposes a grading shotcreting strategy based on the thickness to be sprayed, and gradual shotcreting according to priority from high to low. Data of the same priority is divided into multiple sub-regions according to connectivity rules. Aiming at irregular sub-regions, this paper proposes a trajectory generation method based on an envelope box, establishes a corresponding envelope box for each sub-region, and then uses a series of parallel planes to cut the sub-regions in the envelope box to obtain the shotcrete trajectory. Finally, with the minimum difference between the actual thickness and the expected thickness as the goal, optimize the moving speed of the spray gun and the distance between the shotcrete trajectories.
 - (3) On the basis of the shotcrete trajectory planning of sub-regions, in

order to obtain a complete shotcrete trajectory, these independent subregion trajectories need to be connected, and the connection path is the shortest. In this paper, the subregion trajectory connection problem is modeled as a generalized TSP problem model, which is solved by ant colony algorithm, and compared with the nearest point connection method and genetic algorithm. The experimental results prove that the ant colony algorithm is effective in solving subregion connection problems.

(4) Combined with the parameters of the shotcrete machine KC30, a simplified three-dimensional model was established, and ROS-based shotcrete robot simulation was completed. The shotcrete robot simulation includes three-dimensional model display and motion simulation, trajectory planning, shotcreting simulation and tunnel environment simulation, which is used to test the feasibility and stability of the trajectory planning algorithm.

The experimental results show that the shotcrete trajectory planning in this paper is feasible and can meet the requirements of tunnel shotcrete tasks.

Keywords: shotcrete robot; shotcrete model; trajectory planning; complex freeform surface; ant colony algorithm

Classification: TP391.4

目 录

第1章 绪论.		1
1.1 研究	背景和意义	1
1.2 国内外	外研究现状	2
1.2.1	喷涂厚度模型研究现状	3
1.2.2	喷涂轨迹规划方法研究现状	3
1.2.3	机器人仿真系统研究现状	5
1.3 课题	来源与主要研究内容	5
第2章 混凝土	上喷射厚度累积模型的分析与建立	7
2.1 涂层层	厚度累积速率模型的介绍	7
2.1.1	无限范围模型	7
2.1.2	有限范围模型	8
2.2 涂层层	厚度累积速率模型的建立	8
2.2.1	平面上涂层厚度累积速率模型的分析	8
2.2.2	自由曲面上涂层厚度累积速率模型的分析	10
2.3 涂层层	厚度累积速率模型的拟合实验	12
2.3.1	喷浆实验	12
2.3.2	实验结果处理与分析	14
2.4 本章/	小结	16
第3章 基于分	}级分区的喷浆轨迹规划	17
3.1 喷浆(任务分析与决策	17
3.1.1	数据获取与喷浆任务分析	17
3.1.2	待喷面栅格化	18
3.1.3	分级喷浆策略	20
3.2 基于证	车通规则的区域划分	21
3.3 基于位	包络盒的子区域轨迹规划	23
3.3.1	常规轨迹规划方法	23
3.3.2	包络盒的建立	23
3.3.3	基于包络盒的轨迹规划算法	24
3.4 喷枪和	多 动速度求解	27
3.5 喷浆车	执迹间距求解	29

3.6 本章小结	32
第 4 章 基于蚁群算法的子区域轨迹连接优化	33
4.1 子区域喷浆轨迹连接问题建模	33
4.1.1 广义旅行商问题的介绍	33
4.1.2 连接问题的分析与建模	34
4.2 子区域喷浆轨迹连接问题求解	36
4.2.1 蚁群算法介绍	36
4.2.2 基于蚁群算法求解轨迹连接问题	37
4.2.3 仿真对比实验	39
4.3 本章小结	43
第5章 基于 ROS 的喷浆机器人仿真设计与实现	44
5.1 ROS 机器人操作系统介绍	44
5.1.1 ROS 节点间通信方式	44
5.1.2 ROS 框架特点	47
5.2 喷浆机器人模型建立	48
5.3 喷浆机器人仿真设计	49
5.4 核心功能模块实现	51
5.4.1 模型运动仿真实现	51
5.4.2 隧道环境仿真实现	53
5.4.3 喷浆过程仿真实现	54
5.5 喷浆仿真实验与结果分析	55
5.6 本章小结	58
第 6 章 总结与展望	59
6.1 论文总结	59
6.2 工作展望	60
参考文献	61
攻读学位期间主要的研究成果	66
新 谢	67

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

进入 21 世纪以来,随着国家高新技术的迅猛发展和综合实力的不断提升,我国各领域的隧道总长度和总数量都在飞速增长。我国已经发展为全世界上隧道及地下工程修建技术发展最快和总体规模最大的国家[1]。据统计,我国的公路隧道每年都在不断增加,且年均增长率接近 20%,近 10 年的年均公路隧道里程高达 555km^[2]。根据国家发布的《中长期铁路网规划》,预计到 2030 年,我国的铁路隧道的总规模超过 10000km^[3]。近年来,我国的城市轨道交通业在融资、运营等方面都取得了良好成效。我国大陆已经有 43 个城市获得国家批准修建地铁,预计总里程数将达到 12000km^[4,5]。随着国家的公路、市政、铁路等相关重点建设项目的实施,隧道的需求将会大幅度增多^[6]。

隧道建设需求在不断增加,随之技术需求也不断提高。在 2016 年的达沃斯世界经济论坛中,"第四次工业革命"的概念被提出,即智能机器人、云计算、大数据等高新技术引起的工业革命。目前,随着社会与科技的发展和劳动成本的增加,智能机器人在众多领域逐渐替代原有的人工,尤其是在工业领域,智能机器人的应用极为广泛。机器人在效率方面远远超过人类操作员,能够以更高的精度和更快的速度执行任务,而不需要休息。另外,机器人也能够胜任各种恶劣环境。



图 1-1 隧道喷浆现场图

喷浆机器人是一种广泛应用于公路铁路隧道和各类矿山的工业机器人。喷浆的意思是喷射混凝土,利用风压或者其他动力,将按一定配比搅拌混合好的混凝

土从喷枪口射出,以较高的速度喷射到工作面,形成混凝土支护层^[7]。在隧道工程中,喷浆机器人主要应用于隧道初喷,填补原始凹凸不平的壁面,使其变得较为光滑规则,并起到支护作用。然而,由于隧道工况的复杂和施工设备的智能化水平不高等因素,隧道初喷作业的完成极度依赖人工。操作手通过手柄操控喷浆机工作,并且人为判定壁面平整情况,导致施工质量和效率不一。同时,隧道环境封闭闷热且粉尘度高,如图 1-1 所示,对人体健康伤害极大,导致企业往往很难招聘到合适的操作手^[8]。

目前,市场上尚未出现能够全自动完成隧道喷浆任务的喷浆机器人。为了克服隧道工程支护作业对人工的依赖和提高隧道工程的质量和效率,众多重工企业加大力度自主研发全自动喷浆机器人。全自动喷浆机器人通过扫描设备获取隧道壁面数据,对隧道开挖面特征识别并提取待喷区域。喷浆机器人轨迹规划部分根据隧道待喷区域制定出喷浆策略,规划出喷浆轨迹。喷浆机器人通过运动学模型将喷浆轨迹转化成各关节的变化量,从而驱动各个关节完成喷浆支护任务。市场上没有出现成熟的全自动喷浆机器人产品的主要原因是缺乏合理有效的隧道喷浆轨迹规划方案和喷浆机机器人的真实测试场地。

因此,本文主要研究如何规划出高效合理的隧道喷浆轨迹,完成复杂隧道面的喷浆任务。同时考虑到隧道施工时间紧迫,能够进入隧道实验的机会有限且时间宝贵,本文基于机器人操作系统(Robot Operating System,ROS)开发出一套隧道喷浆仿真系统,验证规划算法的可行性和稳定性,提高开发效率,减少开发成本。

1.2 国内外研究现状

对于全自动喷浆机器人的开发,很少是以研究为目的的。因此,关于全自动喷浆机器人轨迹规划的论文也不多。澳大利亚的 Macmahon 矿业服务公司设计了一种自主式井壁机器人。将井壁机器人放入竖井,沿侧壁喷射混凝土。同时利用超声波测距系统比较喷射前和喷射后的测量值来估计喷射混凝土的厚度。Nabulsi等人[9]开发了一种半自动喷浆机器人。他们使用 AITEMIN 公司的 3D 激光雷达扫描仪 LIDAC-16 在喷射混凝土前后进行扫描对比。喷枪的轨迹是使用隧道的设计剖面而不是激光扫描来确定的,并且根据人工的控制输入实时估计喷射混凝土厚度。

以上关于喷浆机器人的研究工作在一定程度上依赖人工指导机器人喷浆并 判断任务是否完成,只是做到了减少工作量,未能够实现完全摆脱人力,自主完 成喷浆任务。全自动喷浆机器人研究的重难点正是规划合理高效的喷浆轨迹,无 需人为来判定混凝土的喷射量和壁面的平整度。喷浆轨迹规划同时需要考虑到混 凝土的喷射模型,结合壁面的不同凹陷情况规划喷枪轨迹。

1.2.1 喷涂厚度模型研究现状

在隧道喷浆机器人的喷浆系统中,需要建立相应的混凝土厚度累积数学模型,以确定混凝土在隧道壁面的厚度分布情况。目前对于混凝土的喷射模型研究甚少,但是混凝土喷射与传统喷漆具有很大的相似点,可以对其进行借鉴。国内外对于喷漆机器人的涂层厚度累积模型已有众多的研究分析。

Antonio 等 $^{[10]}$ 根据喷枪不同的位姿对涂层厚度累积的影响建立了约束喷涂模型,并通过数学理论推导证明了该模型的有效性。Hansbo 等 $^{[11]}$ 结合机械臂运动优化对喷涂厚度累积模型模拟,获取期望厚度。Arikan 等 $^{[12]}$ 采用 $^{\beta}$ 分布模型来表示涂层厚度累积模型,进而推导出涂层累积厚度与喷涂流量之间的数学关系,并实验分析了喷枪速度、喷涂偏移量和喷涂距离等参数组合选取的策略对涂层厚度分布的影响,为后期的轨迹规划问题打下基础。在 $^{\beta}$ 分布模型的基础上,Andulkar等 $^{[13]}$ 分析不同系数对 $^{\beta}$ 分布特性的影响,通过计算机仿真系统模拟运算,从而得到喷涂过程中喷枪速度的优化方案,提高了涂层厚度分布的均匀性。卡耐基梅隆大学的 $^{[14]}$ 对静电旋杯的喷涂问题展开了研究,提出采用高斯模型来表示涂层厚度分布情况,并且在此基础上衍生到了任意自由曲面或者有向平面问题,推导出了空间中任意表面上的涂层厚度数学表达式,最后在仿真系统上验证了其模型的适用性。

国内的江苏理工大学赵德安等[15-17]通过实验建立了喷枪漆雾流场分布的涂层厚度累积模型,并对此构建了目标函数进行评价。张永贵等[18]根据喷幅形状提出了椭圆双 β 分布模型,并通过具体的实验验证了模型的适用性。椭圆双 β 分布能够更精确的表示实际空气喷涂的喷幅形状和涂层厚度分布情况。陈伟等[19]首先求解出平面喷涂二次函数,而后根据此模型进行曲面分片用于后期轨迹规划。夏薇等[20]结合遗传算法和复杂神经网络对喷涂厚度累积模型拟合。

由上可知,目前对于涂层厚度分布模型已有一定的研究成果,对于不同场景 采用合适的数学模型。但是未有对混凝土喷射模型的进行分析建模的,本文将在 已有的模型理论基础上对混凝土喷射模型进行分析并建模。合理精确的喷涂模型 为轨迹提供重要理论指导。

1.2.2 喷涂轨迹规划方法研究现状

由于喷浆机器人和喷漆机器人在轨迹规划方面具有很大的相似性,加上目前针对隧道喷浆轨迹规划的研究甚少,我们可以吸取喷漆轨迹规划方法的优点,为喷浆轨迹规划做准备。目前 ABB、KUKA 等大型机器人制造企业都针对不同场合研发出适用的喷漆机器人并成功应用于实际生产中。喷漆机器人的应用关键部

分在于轨迹的生成和优化。轨迹的好坏不仅影响喷涂效果,也决定了喷涂效率。

国外在机器人喷涂系统方向作了广泛研究。Klein[21]根据 CAD 模型设计出一 套离线编程系统,这也是首次将路径规划与离线编程系统相结合。Arikan^[22]进一 步将涂层厚度分布情况加入到喷涂系统中,并参数化设计便于调整。Deng 等[23] 总结整理了在热喷涂离线编程上的喷涂轨迹规划方式。根据轨迹的不同方式, Chen 等[24-26]提出了光栅型和回字型的喷涂路径,并阐述了两种路径的优缺点。 而后,又针对复杂曲面提出了拓扑几何分片的方法,针对曲率较大的分片,采用 最大偏离交进行分割,为轨迹规划带来了遍历。卡内基梅隆大学的 Conner 等[27,28] 根据喷涂面的分割情况提出了基于曲面曲率的轨迹规划。在轨迹优化方面, Ramabhadran 等[29]以实际涂层厚度与期望涂层厚度的方差作为目标函数,并且完 成了平面问题的优化求解。Sheng[30]等人考虑到了物体表面体征,同时加入轨迹 重叠区间的影响,提出了以物体表面的拓扑结构为基础的轨迹规划方法,这也是 曲面轨迹优化的理论基础。Antonio等[31-33]对最优喷涂轨迹展开深入研究,并提 出了最优轨迹规划问题的概念。将喷涂面、喷枪轨迹和厚度累积模型集合,建立 优化目标函数。在目标函数可以微分的情况下,函数求解可采用梯度下降,也可 采用拟牛顿法。Andulkar等[34]提出新的增量式的规划方法,以涂层均匀性作为优 化目标、喷浆速度和轨迹间距作为优化对象、当时由于忽略掉曲面曲率的变化、 导致实际应用中效果不佳。Chen 等[35]对涂层厚度累积速率作了定量分析,采用 约束多目标优化方法得到喷涂时间和涂层厚度偏差最优。该方法适用于自由曲面 且性能较好,具有较强的可扩展性。Andreas Pichler 等^[36]提出了利用距离像数据 获取未知物体的几何信息和自动生成机器人绘制轨迹的方法。

国内的在喷涂轨迹规划方面也有不少研究。廖小平等[37]同时使用光栅型和回字型两种方法用于喷涂,然后进行轨迹组合。江苏大学陈伟等[38]提出自由曲面分片方法,并采用黄金分割法求得最优的速度与轨迹间距。对于不用分片的轨迹连接采用遗传算法获取最短路径。龚俊等[39-41]针对典型的大曲率曲面,研究喷涂机器人的轨迹生成和优化问题,并采用蚁群算法求解优化问题。缪东晶等[42]将数控加工的路径规划方法应用于喷涂路径的生成,还优化了喷枪的移动速度,提高了涂层厚度分布的均匀性。该方法性能稳定,在轮船、飞机等大型设备都具有良好的喷涂效果。王朝晖等[43]针对飞机的复杂表面,提出了根据特征区域形成路径节点的方法,并采用三次插值拟合出喷枪末端轨迹。随着计算机能力的提高,蔡明杰[44]运用机器视觉技术进行路径规划。

综上可得,目前对于较为规则的物体喷涂轨迹规划已有不少研究,但是缺乏对复杂隧道面喷浆轨迹规划的研究。本文将结合隧道面喷浆情况,规划出合理高效的轨迹,进而完成隧道喷浆任务。

1.2.3 机器人仿真系统研究现状

近年来,工业机器人顺应时代的需求,向系统化、智能化和模块化方向发展。机器人仿真系统可以提供机器人模型的可视化和良好的人机交互环境。西方一些工业发达国家从 70 年代便对机器人仿真技术展开探索。随着图形仿真技术的进步,相当一部分软件已经实现商用化^[45]。

工业机器人四大家族都会对各自公司生产的机器人开发专用的离线编程软件,并且相互之间是不通用的。ABB 的 RobotStudio 软件包只能在 ABB 出产的机器人上使用^[46]。RobotStudio 软件包可以根据需要导入对应的机器人模型,进而采用交互式方法规划喷涂轨迹。Fanuc 公司也有针对喷涂开发的 PaintPRO 软件包。另一方面,也存在一些通用的仿真软件包,适用于独立搭建的机器人。德国 SIEMENS 的 RobCAD 软件包^[47]能够快速搭建机器人仿真环境,同时其对应的喷涂专用软件包 RobCAD Paint 包含了喷涂路径生成、喷涂仿真和碰撞检测等功能。法国达索系统公司的 Delmia 软件包在汽车制造、飞机制造等领域广泛应用。

但是,以上这些软件都无法根据实际需要修改内置的轨迹规划算法。因此,在现有的软件基础上进行二次开发成为了研究热点^[48,49]。东南大学张盼盼、樊帅权等^[50,51]以 OpenGL API 为基础,开发了一套喷涂仿真系统。该系统利用几何分片的方法处理复杂自由曲面,然后基于种子曲线生成喷涂轨迹,并优化了轨迹关键参数,实现了复杂曲面的平整喷涂。江苏大学马兴荣等^[52]基于 CATIA 实现曲面分片处理、轨迹规划等仿真功能,还结合了 RobCAD 软件对汽车车架的高压静电喷涂仿真。

综上,国内外的机器人仿真技术正在处于飞速发展的阶段,各大机器人公司加大力度研发功能更加完善、性能更加稳定的机器人仿真系统,才能将机器人更好的应用在实际生产生活中。对于隧道自动喷浆情况的研究较少,所以目前尚未出现成熟的隧道喷浆领域的机器人仿真系统。本文将基于 ROS 实现隧道喷浆机器人仿真,便于相关喷浆轨迹规划算法的研究与测试。

1.3 课题来源与主要研究内容

本课题来源于某智能装备公司产品研发项目,项目名为"隧道自动喷浆机器人研究与开发"。项目的研究目标是以合作公司的喷浆机 KC30 为基本模型对象,进行智能化改造,使其能够摆脱对人工的依赖,实现隧道面的全自动喷浆。目前,市场上尚未有该类成熟产品出现,该项目具有一定的前沿性和社会价值。隧道自动喷浆机器人项目在前期已经完成机体的硬件改造、多关节的精确控制、运动学建模和隧道开挖面特征识别。本人主要负责喷浆机器人的隧道喷浆轨迹规划部分,

也是该产品关键的技术内容。本文的主要研究目的是结合喷浆机 KC30 制定一套可行高效的喷浆轨迹规划方案,并且在仿真系统下验证方案的可行性,为全自动隧道喷浆机器人产品的实现提供理论基础。

喷浆机器人的隧道喷浆轨迹规划首先需要结合公司喷浆机的混凝土喷射情况,建立厚度累积模型,然后结合混凝土厚度累积模型规划喷枪移动轨迹,最后,设计喷浆机器人仿真系统,并在仿真系统下模拟喷浆工作,测试轨迹规划方案的有效性和稳定性。基于以上涉及内容,本文主要结构安排如下:

第一章为绪论。首先,介绍喷浆机器人全自动隧道喷浆的研究背景和意义; 然后,根据研究内容分别介绍了喷涂厚度模型、喷涂轨迹规划方法和机器人仿真 系统的国内外研究现状;最后,介绍本文的课题来源和主要研究内容。

第二章为喷浆机混凝土喷射厚度累积模型的分析与建立。首先,介绍涂层厚度累积模型的分类及使用场景;然后,分析并建立平面喷浆和自由曲面喷浆两种情况的混凝土喷射厚度累积模型;最后,通过喷浆机 KC30 喷浆实验验证混凝土喷射厚度累积模型的实用性。

第三章为基于分级分区的喷浆轨迹规划。首先,分析隧道喷浆任务并提出分级喷浆策略,同时依据连通规则将同一优先级的隧道壁面数据划分成多个子区域;然后,针对不规则子区域,提出一种基于包络盒的轨迹规划方法;最后,分别对喷枪移动速度和喷浆轨迹间距进行优化求解。

第四章为基于蚁群算法的子区域轨迹连接优化。首先,分析子区域间轨迹连接问题,建模为广义 TSP 问题模型;然后,介绍蚁群算法的基本原理和解决子区域连接问题的过程;最后,通过仿真对比实验验证蚁群算法解决子区域连接问题的有效性。

第五章为基于 ROS 的喷浆机器人仿真设计与实现。首先,介绍 ROS 的工作原理和存在的优势点;其次,结合喷浆机 KC30 真实参数建立喷浆机器人简化模型;再次,介绍喷浆机器人仿真总体设计方案及各部分主要功能,并且详细阐述了模型运动、隧道环境、喷浆过程等核心功能模块的实现原理及过程;最后,进行喷浆仿真实验,验证本文轨迹规划方案的可行性。

第六章为总结与展望。对本论文所完成的工作进行了总结,并且提出喷浆轨迹规划研究过程中存在的不足,对未来隧道自动喷浆机器人的完善进行了展望。

第2章 混凝土喷射厚度累积模型的分析与建立

在隧道面的喷浆轨迹规划中,混凝土喷射厚度累积模型是重要基础。混凝土 涂层厚度累积模型指的是在单位时间内,喷浆机器人的喷枪向隧道面喷射混凝土 所形成的涂层在喷射范围内各个位置的厚度分布。涂层厚度累积模型建立的是否 准确,直接影响到隧道面平整喷涂和喷浆轨迹的优化。

本章针首先介绍涂层厚度累积模型的分类情况和使用场景,然后根据混凝土 喷射情况分析并建立平面和自由曲面两种情况下的混凝土厚度累积模型,最后通 过真机喷浆实验验证模型的实用性。

2.1 涂层厚度累积速率模型的介绍

对于涂层厚度累积速率模型的研究相对成熟,大部分模型也已经应用于实际生产中。在目前的研究中,涂层厚度累积速率模型主要分成两大类,分别是无限范围模型和有限范围模型^[53,54]。多数经典的模型都是根据实际应用从两者中扩展出来的。

2.1.1 无限范围模型

无限范围模型是一种极端假设,其定义待喷点与喷枪之间的距离趋近于无穷远的时候,喷涂材料无法到达物体表面,该位置的厚度值才是零^[55]。无限范围模的代表模型有柯西模型^[56]和高斯分布模型^[57]。

柯西模型的表达式如式(2-1)所示。

$$f(a(t), x, y, t) = \frac{Q}{(1 + (x - a_x(t))^2)(1 + (y - a_y(t))^2)}$$
(2-1)

式中, $a_x(t)$ 和 $a_y(t)$ 为喷涂中心点的坐标值;Q表示最大涂层厚度累积速率;t表示喷涂时间。

高斯分布模型的表达式如式(2-2)所示。

$$f(a(t), x, y, t) = Qe^{\left(-\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 - \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)}$$
 (2-2)

式中,Q表示最大涂层厚度累积速率;t表示喷涂时间; σ_x 、 σ_y 分别表示喷涂区域的长短轴,当 σ_x = σ_v 时,代表喷涂区域为圆形。

无限范围模型在求解厚度时计算简便、运算速度快,但是存在一定的限制,不适用于表面凹凸程度较大或者曲率较大的喷涂对象。因此,在实际的生产应用中,该模型应用场景有限,只能选择平整度较高的对象,不适用于复杂的隧道喷浆。

2.1.2 有限范围模型

实际情况下,喷枪与待喷点的距离不可能达到无限远。不同于无限范围模型,有限范围模型定义待喷点的涂层厚度由喷枪的距离和张角共同决定的,并且张角小于 90 度,待喷点与喷枪朝向的夹角超出喷枪张角则厚度累积值为零。有限范围模型的数学表达式如式(2-3)所示。

$$f(s, p(t),t) = \left(\frac{c(\theta, \delta)}{(x - p_x(t))^2 + (y - p_y(t))^2 + (z - p_z(t))^2}\right) \cdot \frac{(x - p_x(t))i + (y - p_y(t))j + (z - p_z(t))k}{\sqrt{(x - p_x(t))^2 + (y - p_y(t))^2 + (z - p_z(t))^2}} \cdot n(s)$$
(2-3)

式中,s 代表喷涂面上的某一点; $p_x(t)$ 、 $p_y(t)$ 、 $p_z(t)$ 表示喷枪的位置坐标;n(s) 代表s 点的单位法向量;i、j、k 分别表示X、Y、Z 轴的正向单位矢量; $c(\theta,\delta)$ 的的计算方式如式(2-4)。

$$c(\theta, \delta) = \alpha \frac{\cos(\theta) - \cos(\delta)}{\left(1 - \cos(\delta)\right)^2}$$
 (2-4)

式中, δ 代表喷枪的张角。则 $\theta < \delta$ 时, $c(\theta, \delta) > 0$; $\theta \ge \delta$ 时, $c(\theta, \delta) = 0$ 。

有限范围模型对于物体的平整度要求较低,涂层厚度反应更为准确,更加符合实际生产应用。但是,有限范围模型也存在明显的缺陷,复杂的模型公式导致计算量远高于无限范围模型。结合实际应用的话,计算时间便会大大增加,不是混凝土喷射模型的最佳选择。尽管有限范围模型不是通用的,但是一些经典的涂层厚度累积模型都是在此基础上推导,并加以改进而得到的。

2.2 涂层厚度累积速率模型的建立

基于实际混凝土喷射情况,本文采用 β 分布模型来描述喷浆涂层厚度分布情况。 β 分布模型也是基于有限范围模型推导出来的。 β 分布模型具有易于调节的参数,能够很好的适用不同的涂层厚度分布情况。

221 平面上涂层厚度累积速率模型的分析

喷浆机器人的喷枪姿态包括坐标信息和朝向信息,本文采用两个三维矢量函数来定义喷枪的姿态。其中坐标函数为 $p(t) = [p_x(t), p_y(t), p_z(t)]^T$,朝向函数为 $o(t) = [o_x(t), o_y(t), o_z(t)]^T$ 。基于实际喷浆情况,喷枪喷出的混凝土在空中形成一个锥形体,该种情况的喷浆涂层厚度累积模型可以用 β 分布模型表示。那么,在平面上喷浆机器人混凝土喷射情况如图 2-1 所示。

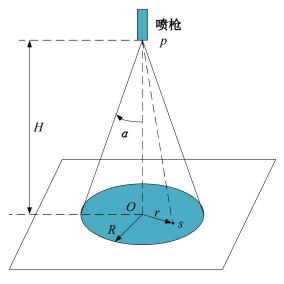


图 2-1 平面喷浆示意图

在图中,H表示喷枪末端距离平面的垂直高度,p(t)表示喷枪末端的位置,O点表示喷枪末端在平面上的投影,同时也是圆形喷浆区域的中心点。假设喷枪混凝土喷射张角为 α ,在单位时间内,喷枪在该位置连续喷浆,s(x,y,z)是圆形喷浆区域 S 内的一个位置,根据 β 分布模型可以得到 $s(x,y,z) \in S$ 的涂层厚度累积速率 q(s(x,y,z),p(t)) 为:

$$q(s(x, y, z), p(t)) = \begin{cases} q_{\text{max}} (1 - \frac{r^2}{R^2})^{\beta - 1}, 0 \le r \le R, 1 < \beta \\ 0, r > R \end{cases}$$
 (2-5)

其中,r 表示 s 点距离喷浆中心点 O 的距离,R 表示圆形喷浆区域的半径, q_{\max} 表示圆形喷浆区域中心位置的涂层厚度累积速率,也是最大涂层厚度速率;根据几何关系,喷浆高度与喷枪的喷射张角满足以下关系:

$$R = H \cdot \tan \alpha, 0 < \alpha < \pi / 2 \tag{2-6}$$

β 参数不同取值使得 β 分布模型具有较强的灵活性。在其他参数测定不变情况下,图 2-2 表示不同 β 值对 β 分布函数曲线的影响。

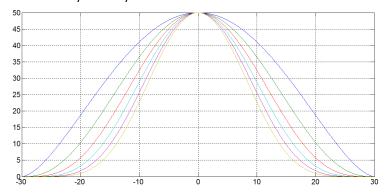


图 2-2 不同 β 取值对曲线分布的影响(从内到外 β 值逐渐减小)

那么,根据实际混凝土在平面上喷射厚度分布的数据,调节模型的曲线分布,使其符合真实的混凝土厚度分布情况,便可以得到喷浆机在平面上混凝土喷射的基本涂层厚度累积速率模型。

2.2.2 自由曲面上涂层厚度累积速率模型的分析

在实际的应用过程中,很难保证喷涂物体表面的都是平面的。对于隧道喷浆情况,隧道壁面绝大部分是存在一定的曲率的,因此对自由曲面上涂层厚度累积速率模型的研究也是必不可少的。平面喷浆与自由曲面喷浆存在一定的区别与联系。平面喷浆是自由曲面喷浆的基础。假设已知平面喷浆的基础上,进一步对自由曲面喷浆分析。结合平面喷浆情况,喷浆机在自由曲面上的混凝土喷射情况如图 2-3 所示。对于凹凸不平的自由曲面,每个喷涂点的曲率是不同的,与喷枪的垂直距离也是不一样的。

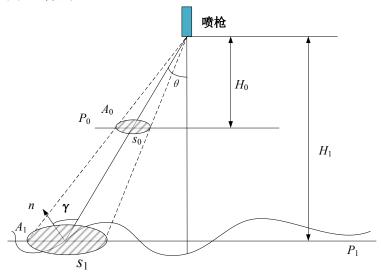


图 2-3 自由曲面喷浆示意图

图中, P_0 为已知的参考平面, H_0 为喷枪到参考平面距离,该参考平面的混凝土厚度累积模型是已知的。 s_1 为自由曲面上的任意一点,n为 s_1 点的法向量, P_1 为过 s_1 点的平面, H_1 为喷枪到平面 P_1 的距离, θ 为喷枪朝向与喷枪与 s_1 点连线的夹角, θ 为,与喷枪与 s_1 点连线的夹角。为了方便混凝土累积厚度的分析,设 d_0 与 d_1 两个微小区域,等效于喷浆过程中在两个位置点的累积情况。

假设喷枪在同一时间段内喷射到参考平面和自由曲面的混凝土量相等,与喷枪高度和自由曲面的曲率无关^[55],那么喷枪喷射到图中 4₀ 区域与 4₁ 区域的混凝土总量是相等的。同时可以根据图形相似性,得到两块区域的面积关系是:

$$S_{A_1} = \left(\frac{H_1}{H_0}\right)^2 S_{A_0} \tag{2-7}$$

 S_{A_1} 和 S_{A_0} 分别是 A_1 和 A_0 的面积。 A_0 所在平面的混凝土厚度累积模型是已知的,设 A_0 上的混凝土厚度速率为 A_0 ,根据总的混凝体体积相等,进一步可以得到 A_1 上的混凝土厚度 A_1 为:



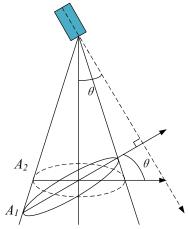


图 2-4 混凝土在喷枪方向垂直面的分量示意图

由于 s_1 所在的位置存在一定的曲率,需要将混凝土厚度转换到对应的法向方向上。首先将混凝土累积厚度转化到与喷枪喷射方向垂直的区域。设圆形面 A_2 与喷枪在 A_1 区域的喷射方向垂直,如图 2-4 所示,那么 A_1 与 A_2 之间的夹角为 θ , A_2 区域的混凝土厚度 q_2 为:

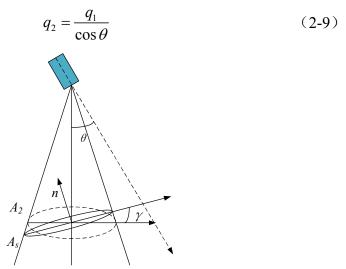


图 2-5 混凝土在目标区域的分量示意图

再把混凝土累积厚度分解到 s_1 所在位置的法向方向上。设 A_s 是过 s_1 且与 s_1 的法向量n垂直的圆形面,即为所求的目标区域,如图 2-5 所示,可得 A_s 与 A_2 之间的夹角为 γ ,所以 A_s 区域的厚度 q_s 为

$$q_s = q_2 \cos \gamma \tag{2-10}$$

结合式(2-8)~(2-10)可以得到自由曲面上混凝土喷射厚度表达式为

$$q_s = q_0 \left(\frac{H_0}{H_1}\right)^2 \frac{\cos \gamma}{\cos \theta} \tag{2-11}$$

由于喷涂点到喷枪位置的垂直距离不好直接得出,而两者的连线距离通过距离公式可以直接计算。设喷枪到曲面上的任意一点 s_1 的距离为L,那么

$$H_1 = L\cos\theta \tag{2-12}$$

当 $\gamma \ge 90^\circ$ 时,喷射面被遮挡住,则该位置的混凝土厚度为0。所以,自由曲面上任意一点 s_1 的涂层厚度累积速率数学表达式为

$$q_{s} = \begin{cases} q_{0} \left(\frac{H_{0}}{L}\right)^{2} \frac{\cos \gamma}{\cos^{3} \theta}, \, \gamma < 90^{\circ} \\ 0, & \gamma \ge 90^{\circ} \end{cases}$$
 (2-13)

其中, q_0 表示平面上已知的涂层厚度累积速率,与垂直距离 H_0 相对应。通过实验拟合得到平面上的混凝土厚度累积速率模型,便可以通过角度关系计算自由曲面上每个位置的厚度累积速率。

2.3 涂层厚度累积速率模型的拟合实验

根据以上的涂层厚度累积速率模型的分析,需要求解的参数有最大涂层厚度累积速率 q_{max} 、喷射半径 R 以及 β 。根据式(2-6)可知,喷射半径 R 是由喷枪的喷射张角和离壁面距离所决定。喷浆的喷射张角是喷浆机的固定属性,因此只要实验计算出喷射张角 α ,便可以根据实际喷枪距离壁面高度计算出喷射半径 R。

2.3.1 喷浆实验

本文以喷浆机 KC30 为研究对象,研究喷浆机的混凝土喷射模型。为了防止空喷,待喷浆机开机稳定工作后再进行实验。正常工作下,喷浆机 KC30 的混凝土喷射流量约为 5 m³/h,风压约为 0.5MPa。

(1) 平面喷浆实验

喷浆机正常工作后,喷枪以均匀的混凝土喷射流量沿着测试平面进行喷浆作业,喷枪与平面的垂直距离为1000mm,喷枪的移动速度为150mm/s,在移动过程中保持喷枪朝向与测试平面垂直。设定喷枪的移动方向为x轴,与之垂直的方向记为y轴。经过匀速喷浆后,在测试平面上将留下一条混凝土厚度分布带。沿着y轴做横截面,记录不同位置的混凝土厚度数据。本文在分布带上随机获取三个横截面,取三个横截面同一位置的平均混凝土厚度作为实验基础数据,用以喷

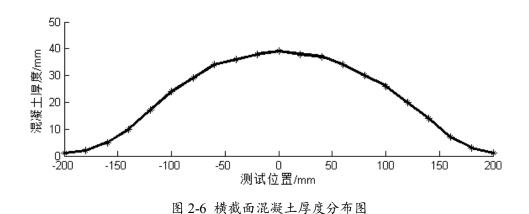
浆模型的拟合分析。

厚度测量方法:喷浆实验的混凝土累积厚度通过激光雷达精确扫描测量。在点云数据处理中厚度计算可采用三种方法:点与点的距离、点与面的距离和面与面的距离。本文采用点与面的距离求取指定位置的混凝土累积厚度。在喷射前和喷射后分别定点扫描喷涂区域,计算测试点到最初平面的距离,便可以求得每个位置的混凝土累积厚度。

由于毫米级数据精度对于大型机械的混凝土喷射已经足够,因此实验原始数据仅保留到整数。采集相应实验数据并求取平均值,结果表 2-1 所示。将数据在坐标轴上表示,如图 2-6 所示,星号点表示测试点的具体数据,将所有数据点依次连接。

测试位置/mm	混凝土厚度/mm	测试位置/mm	混凝土厚度/mm
-200	1	20	38
-180	2	40	37
-160	5	60	34
-140	10	80	30
-120	17	100	26
-100	24	120	20
-80	29	140	14
-60	34	160	7
-40	36	180	3
-20	38	200	1
0	39		

表 2-1 平面喷浆实验数据记录表



(2) 自由曲面喷浆实验

实验步骤与平面喷浆实验相同,唯一的区别是将喷射对象换成凹凸不平的壁面。此实验目的在于验证本文建立的自由曲面上涂层厚度累积模型的适用性。随

机找6个测试点,获取其混凝土厚度,实验结果如表2-2所示。

	.,	7 - 7 - 7 - 7 - 7	(= , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	00 00 00 00 00 00		
与中心点距离/mm	153	112	89	70	44	11
混凝土厚度/mm	9	21	25	30	34	37

表 2-2 自由曲面喷浆实验测试点数据记录表

2.3.2 实验结果处理与分析

(1) β分布函数曲线拟合实验

从式 (2-5) 可以看出,喷浆模型的数学表达式存在 β 、 q_m 和 R 是三个未知参数。本文采用最小二乘法拟合求解这个三个参数,以实验记录的数据作为标准的涂层累积厚度,那么拟合的目标函数为:

$$w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{i}^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (q_{i} - q(R, \beta, q_{m}))^{2}$$
 (2-14)

设置 R 的范围为 150-250,步长为 1, β 的范围为 0-10,步长为 0.1, T_m 的范围为 0-100,步长为 0.1。通过改变三个未知参数的值,可以改变 β 分布函数曲线,进而影响 w 值,当 w 值最小时,即认为该 β 函数分布曲线与涂层厚度累积速率模型拟合程度最好。

经过喷浆模型厚度累积模型的拟合实验,求解得到当R = 201, $\beta = 2.7$, $T_m = 39.6$ 时,拟合结果最佳,对应的w 值为 1.2,拟合结果如图 2-7 所示。

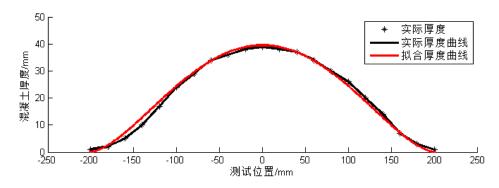


图 2-7 平面上β分布拟合厚度和实测厚度对比图

(2) 二次函数曲线拟合实验

二次函数作为有限范围模型中的一种,计算也较为简便。本文采用二次函数 拟合混凝土分布厚度,与 β 分布曲线拟合结果进行对比。二次函数的拟合结果如图 2-8 所示,求得的 w 最小值为 9.5。

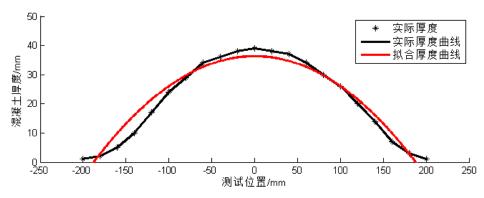


图 2-8 平面上二次函数拟合厚度和实测厚度对比图

根据以上拟合结果可以看出,β分布模型更加符合喷浆机 KC30 的混凝土喷射厚度分布情况。因此,可以得到当垂直距离为 1000mm,喷枪移动速度为 150mm/s 时,平面上涂层厚度累积模型数学表达式为

$$T(r) = \begin{cases} 39.6(1 - \frac{r^2}{201^2})^{1.7}, \ 0 \le r \le 201\\ 0, \qquad r > 201 \end{cases}$$
 (2-15)

喷浆半径的决定性因素是喷枪的喷射张角,根据已知条件可以计算出喷枪喷射张角 α 为

$$\alpha = \arctan(R/H_0) = \arctan(\frac{201}{1000}) = 11.4^{\circ}$$

那么,一般情况下设喷浆的垂直距离为H,平面上任意高度的混凝土厚度累积模型数学表达式为

$$T(r) = \begin{cases} 39.6(1 - \frac{r^2}{0.201H^2})^{1.7}, & 0 \le r \le 0.201H\\ 0, & r > 0.201H \end{cases}$$
 (2-16)

根据已知条件设定喷浆距离为 1000mm 的平面为参考平面,结合式(2-9)可得,喷浆机在自由曲面上任意一点 s 的混凝土喷射厚度累积模型数学表达式为

$$q_{s} = \begin{cases} 39.6(1 - \frac{r^{2}}{201^{2}})^{1.7}(\frac{1000}{L})^{2} \frac{\cos \gamma}{\cos^{3} \theta}, \gamma < 90^{\circ}, 0 \le r \le 201, 0 \le \theta \le 11.4^{\circ} \\ 0, & other \end{cases}$$
(2-17)

其中,L 是 s 点与喷枪之间的距离,r 是 s 点与喷枪所在直线与参考平面的交点到喷射圆心点的距离, θ 是 s 点与喷枪连接线与喷枪朝向之间的夹角, γ 是 s 点的法向量与 s 点与喷枪连接线之间的夹角。

自由曲面喷浆实验得到的测试数据与通过自由曲面的混凝土喷射厚度累积模型计算得到的数据对比情况如表 2-3 所示。

与中心点距离/mm 153 112 89 70 44 11 真实厚度/mm 9 21 25 30 34 37 理论厚度/mm 22.2 30.5 37.2 9.3 23.3 35.1

表 2-3 自由曲面上混凝土累积真实厚度与理论厚度对比表

从表 2-3 中可以得到,通过自由曲面混凝土厚度累积模型计算得到的厚度与喷浆实验的真实厚度的差值基本在 2mm 以内,该误差在大型隧道工程中是可以接受的。因此,本文的自由曲面上涂层厚度累积模型是可行的

2.4 本章小结

本章主要结合喷浆机 KC30 建立混凝土喷射厚度累积模型。首先,介绍了涂层厚度累积模型的分类情况及其适用场景;然后,分别从平面和自由曲面两种情况分析并建立混凝土厚度累积模型;最后,结合喷浆机 KC30 进行喷浆实验,通过实验数据分析及运用最小二乘法拟合模型函数曲线,求解出混凝土厚度累积模型相关参数。实验结果证明 β 分布曲线适用于喷浆机 KC30 混凝土喷射模型,并且求解出平面和自由曲面的涂层厚度累积模型数学表达式,为后续轨迹规划做铺垫。

第3章 基于分级分区的喷浆轨迹规划

在建立了混凝土涂层厚度累积模型后,就需要进一步对喷浆轨迹进行规划。 在隧道喷浆过程中,喷枪轨迹的规划是整个喷浆任务的核心。喷枪的移动速度、 轨迹间距和规划方式都对最终的喷浆效果和效率产生重大影响。因此,结合隧道 喷浆实际情况规划出合理有效的轨迹是极为重要的。

本章首先介绍隧道壁面数据获取方式并进行数据栅格化。其次结合实际喷浆 经验提出一种基于待喷厚度的分级喷浆策略。由于经过分级后同一优先级的隧道 壁面数据散乱不连续,本章依据连通规则将同一优先级的数据划分成多个子区域。 再次针对不规则喷浆子区域的性质,本章提出一种基于包络盒的轨迹规划方法。 最后对喷枪移动速度和喷浆轨迹间距进行优化。

3.1 喷浆任务分析与决策

3.1.1 数据获取与喷浆任务分析

本课题的喷浆机器人环境感知系统是由一种结合电控云台的二维激光雷达组成的^[8],该系统性价比高、受隧道环境影响小,能够精确完成隧道面的三维点云数据采集。

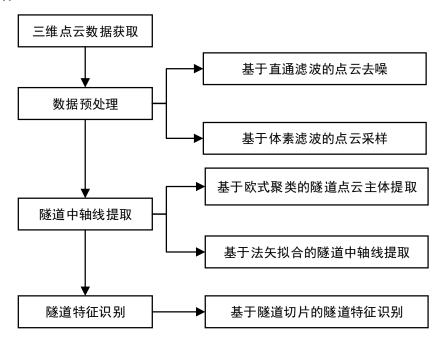
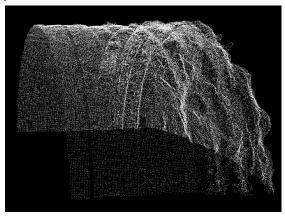
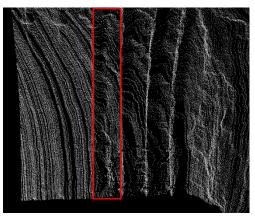


图 3-1 隧道结构识别流程图

将喷浆机器人移动到正在施工的隧道,利用施工方间歇时间进行数据采集,得到隧道三维点云数据。隧道三维点云数据需要经过如图 3-1 一系列数据处理^[58],

才能得到隧道主体、拱架和拱间面。隧道主体数据如图 3-2-a 所示。图 3-2-b 中明显条状凸起部分为拱架,拱架之间凹陷部分为拱间面,红色框内为其中一个拱间面。结合隧道特征,采用点云切割技术将图 3-2-b 中的三段隧道拱间面提取出来。





(a) 隧道主体

(b) 隧道拱间面

图 3-2 真实隧道点云图

隧道喷浆的任务就是在凹陷程度不同的拱间面填充混凝土,使得隧道壁面与 拱架基本齐平,达到隧道支护的作用。如图 3-3 所示的隧道结构,不规则曲线表 示隧道壁面,呈凹陷状态,真实情况如图 3-2-b 所示。拱架为人工设计的,呈现 标准的拱形状。拱架线为喷浆的最终标准线。隧道面与拱架线之间的深度差便是 混凝土的目标填充厚度。本文定义该厚度为待喷厚度。

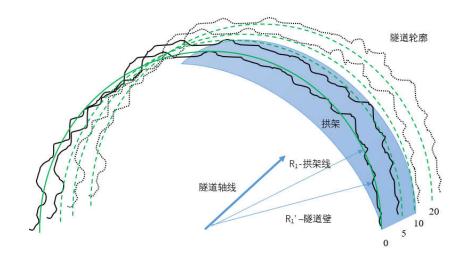


图 3-3 隧道结构示意图

3.1.2 待喷面栅格化

根据隧道施工安排,每次隧道初喷支护的任务量是 3~4 个拱间面,可以分解成每个拱间面单独喷浆。因此,本文将对单个待喷面(即拱间面)展开喷浆研究。

已知隧道中轴线,根据坐标关系可以计算隧道壁面每个位置到中轴线的距离。每个位置到隧道中心轴的距离都不一样,与表面凹陷程度相关。据此,本文将隧道三维点云数据从直角坐标系转换到柱坐标系中,便于数据处理与轨迹规划。柱坐标系指的是平面极坐标加上 Z 方向的距离所组成的坐标系。设隧道面的横向为 Y 轴,纵向为 X 轴,高度作为 Z 轴,进而可以得到以下关系

$$\begin{cases} R = \sqrt{z^2 + y^2} \\ \theta = \arctan(\frac{z}{y}) \\ d = x \end{cases}$$
 (3-1)

其中,d 表示隧道的深度。根据式(3-1)可以将拱形面展开,隧道面特征更加直观。在柱坐标情况下,隧道壁面每个位置与标准拱架线的 R 值差值便是混凝土的待喷厚度,进而判断对应位置的凹陷程度。

通过雷达扫描得到的隧道点云数据散乱不均,为了能够更好地进行喷浆轨迹规划,将隧道点云数据进行栅格化。设每个栅格的大小为 50mm*50mm。栅格化的依据主要是数据点与 y 轴正方向的夹角 θ 和隧道纵向深度 d。那么,深度 d 的步长便是 50mm,而角度 θ 需要进一步换算。圆形的弧长公式为

$$L = \frac{\theta R}{180^{\circ}} \tag{3-2}$$

那么将栅格长度代入公式,便可求得 θ 的步长

$$\theta = \frac{L}{R} \cdot 180^{\circ} \tag{3-3}$$

每个栅格都是一个单独的个体。栅格里的内容除了编码,还包含了内部所有数据点的平均三维坐标信息,平均待喷厚度 TD,如式(3-4)所示。

$$\begin{cases} x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_{i} \\ y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_{i} \\ z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} z_{i} \\ TD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} TD_{i} \end{cases}$$
(3-4)

栅格化后,展开的待喷面呈现效果如图 3-4 所示。凸起程度越高的位置表示 离隧道中心轴越远,真实隧道的超挖程度越大,待喷厚度值越大。本文将在柱坐 标情况下规划喷浆轨迹,再转化到直角坐标系下,进而指导喷浆机器人执行相应 的动作完成喷浆任务。

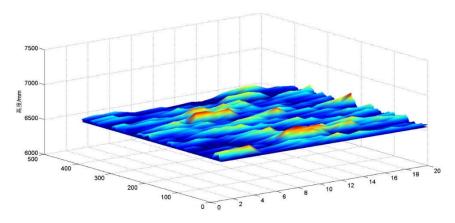


图 3-4 待喷面展开效果图

3.1.3 分级喷浆策略

在实际的隧道工程中,考虑到混凝土的回弹率因素,单次、单区域的混凝土喷射最大厚度尽量控制在 7~8cm, 若单次喷射混凝土过厚易造成脱落现象^[59]。同时,《地下铁道工程施工及验收规范》要求混凝土喷射平整度为 50mm,即隧道初喷任务的最后平整度要在 50mm 以内。因此,本文为了喷浆过程有序高效,提出分级喷浆策略。隧道待喷面依据每个栅格的待喷厚度划分优先级,具体分级规则如下:

$$n = \begin{cases} -1, TD < -50mm \\ 0, -50mm \le TD < 50mm \\ 1, 50mm \le TD \le 70mm \end{cases}$$

$$\left[\frac{TD}{70}\right], TD > 70$$
(3-5)

当待喷厚度 TD 绝对值小于 50mm 时,优先级为 0,说明该位置已经满足任务要求,无需再喷射混凝土。当优先级为-1 时,说明该位置已经超出待喷厚度需求。当优先级为 1 以及以上的位置则需要进行喷浆。本文将从一个优先级降级到下一个优先级所需的厚度定义为降级厚度。根据式 (3-5) 可知,2 级及 2 级以上区域的理论最大降级厚度为 70mm,而 1 级的理论最大降级厚度为 20mm。

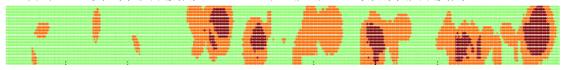


图 3-5 隧道待喷面分级效果图

经过分级后,隧道待喷面如图 3-5 所示。不同颜色代表不同的优先级,优先级越高,代表喷浆顺序排在更前面。依据分级喷浆策略,喷浆实施的具体要求如下:

(1) 整体采取多轮喷浆形式,每轮对最高优先级的壁面区域喷浆;

- (2) 每轮喷浆目的是使最高优先级区域降级, 而不是填充到最终厚度要求:
- (3)降级喷浆时以最大降级厚度为期望厚度进行喷浆,保证子区域内所有位置降级。

假设存在优先级为 1、2、3 的三种优先级的待喷面,那么首先喷浆级数为 3 的子区域,随着喷浆过程的进行,待喷厚度不断减小,等所有级数为 3 的位置都变成 2 后,再进行喷浆级数为 2 的位置,以此类推,直到所有的待喷厚度优先级为 0 时,说明该隧道待喷面已经满足任务要求。

在每个级别的子区域喷浆过程中采用的是最大降级厚度喷浆。隧道横截面的分级如图 3-6 所示, 虚线表示优先级的划分线, 边缘曲线表示隧道横截面的轮廓, 待喷厚度越大, 凹陷越深。图中的红色区域属于 3 级区域, 也是该待喷面的最高优先级, 因此首先对 3 级区域进行喷浆。为了使所有红色区域都能达到降级效果, 降到 2 级线以内, 以红色区域内最大降级厚度 T_{max} 为期望厚度进行喷浆, 保证所有红色能够降到 2 级线以内。

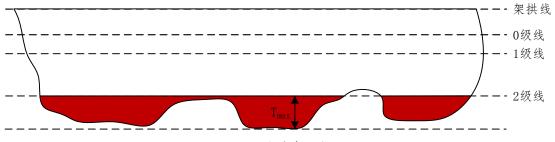


图 3-6 隧道横截面分级图

传统的自动喷涂大部分是喷漆,即在一个较为规整的物体表面镀上一层油漆, 平整度要求较高。与传统的喷涂任务不同,隧道喷浆任务是用混凝土将凹陷程度 不均的壁面平整填充,最后的平整度在 50mm 以内即可。

从整体上看,隧道壁面填充是一个复杂问题,每个位置的凹陷程度都是随机的、无法预测的。优先级的划分的目的是将复杂问题划分成多个小问题。经过划分后,整块喷浆区域被分解成多个子区域,每个子区域存在一定的凹陷范围,同时也有明确的填充目标。所有子区域按要求填充混凝土,那么整块喷浆区域便填充完成。

3.2 基于连通规则的区域划分

根据分级喷浆策略,每轮喷浆的对象是优先级最高的区域,填充混凝土使其降级。将图 3-5 中的最高优先级的数据单独提取出来,得到的数据是散乱、不连续的,如图 3-7 所示。为了喷浆过程有序高效,本文基于连通规则对该数据进行区域划分。



图 3-7 最高优先级数据分布图

一般情况下,连通区域指的是图像中像素值相同且位置相邻的像素点组成的 图像区域。相对于图像的像素值,喷浆任务采用优先级数值标记每个栅格。所有 优先级相同且位置相邻的栅格组成的喷浆子区域。根据栅格之间的连通性,将最 高优先级的数据划分成多个喷浆子区域。本文采用广度优先搜索算法划分子区域 和统计子区域的个数,详细步骤如下:

Step1: 初始化所有栅格的状态为未访问,记为 0,并建立一个空的访问队列。

Step2: 创建一个空的子区域数据容器,随机取一个优先级最高并且访问状态值为 0 的栅格索引,将此栅格索引加入到访问队列,访问状态值改为 1。

Step3:以访问队列的队首元素为中心,向四周搜索优先级相同的栅格,并将栅格对应的索引加入到访问队列的队尾和访问状态值改为1。搜索完成后,去除队首元素,并将队首元素加入子区域容器中。

Step4: 若访问队列不为空,重复 Step3;反之,子区域个数加一,将现有的子区域数据保存。转到 Step2,直到访问完所有的栅格。

将图 3-7 的最高优先级数据划分成多个子区域,划分情况如表 3-1 所示,总 共划分成了 11 个子区域,但是可以看到存在多个子区域包含的栅格数量是个位数。如果对这些包含栅格数量少的子区域单独划分,将会影响整体的喷浆效率。

针对该种情况,本文采用设定阈值的方法。栅格数量小于阈值的子区域搜索最近的子区域,与其合并。如果栅格数量总和依旧小于阈值,则继续搜索及合并,直到子区域的栅格数量总和大于阈值。当阈值太小,会造成子区域数量过多,影响整体的喷浆效率;当阈值太大,轨迹规划中的包络盒会包含较多的非目标喷浆区域。本文设该阈值为 10。经过子区域合并后的子区域划分情况如表 3-2 所示。

表 3-1 最高级数据划分结果表

子区域编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
栅格数量	1	22	112	81	1	117	1	90	21	238	5

表 3-2 子区域合并结果表

子区域编号	1	2	3	4	5	6	7
栅格数量	22	113	82	117	95	22	238

3.3 基于包络盒的子区域轨迹规划

3.3.1 常规轨迹规划方法

喷枪在任务空间中的轨迹可以定义为喷浆在移动过程中的一系列点的集合,而轨迹规划便是设计一种方案,先确定好喷枪行走的路径,在根据任务的具体形式制定好路径的时间序列。喷浆轨迹规划可以简单理解为喷枪末端的路径规划加上时间戳。喷枪的路径是由待喷区域形状所决定的,路径的规划要保证能够覆盖全部的待喷区域。时间戳是由待喷厚度所决定的,待喷厚度越大,所需要喷浆时间越长,反映在喷枪移动速度上。

在物体喷涂路径规划中,光栅型和回字型是两种常用的规划方法,如图 3-8 所示。其中,光栅型路径规划方法呈现 S 型走向,该方法简单实用,但是边缘部分的喷涂均匀性相对较差;而回字形路径规划方法以物体边缘作为路径依据,环绕走向物体中心,边缘均匀性较好,但是规划方法较为复杂,且靠近中心位置的轨迹由于空间限制重叠区域难以控制,且易出现断点情况。因此,光栅型路径规划方法的应用范围相对较广,而回字型路径规划仅用在对边缘均匀性要求较高的对象上。

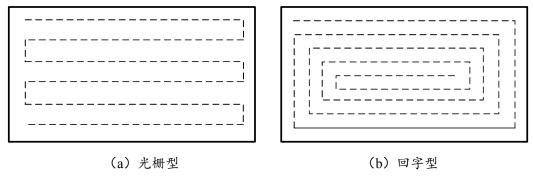


图 3-8 两种不同路径规划方法

3.3.2 包络盒的建立

常规的路径规划方法常用于规则物体或者是固定对象,比如汽车、家具等。 对一个已知对象研究喷涂路径,规划难度便小了不少。然而,每个隧道面的凹陷 情况都是不同的,并且喷浆区域都是不规则的曲面,规划难度较大。

面对复杂曲面,可以采用几何分片的方法分解成多个简单子曲面,进而解决 曲面曲率变化大对喷涂路径规划所造成的困难。隧道的不规则曲面理论上也是可 以采用几何分片的方法。如果根据曲率对隧道面进行分片的话,所分成的片段面 积将会非常小,与喷浆机混凝土喷射所覆盖的区域很难匹配。单点喷射所覆盖的 区域可能会包含多个片段,曲面分片便失去了意义。因此,通过几何分片来处理 隧道面是不可行的。 隧道壁面经过分级后,每轮喷浆对象都是优先级最高的区域。最高优先级的 区域是由大量散乱栅格组成的。根据连通域划分条件,将其分成多个子区域进行 喷浆。每个子区域都是不规则的,本文提出一种基于包络盒的喷浆轨迹规划方法, 对每个不规则的子区域单独规划喷浆轨迹。包络盒是一个能将不规则的子区域完 全包络的最小长方体。用长方体包络自由曲面的方式有很多,本文结合实际喷浆 中的喷枪姿态情况,对包络盒的姿态增加约束条件。

在柱坐标情况下,隧道面的情况如图 3-4 所示,喷浆时喷枪的方向与 R 轴的 正方向相同。因此,为了方便后续的轨迹规划,设定包络盒的前部法矢方向与 R 轴的正方向相同,如图 3-9 所示,蓝色的长方体为自由曲面的包络盒,其前方向、右方向和上方向分别对应柱坐标系的三个轴方向。

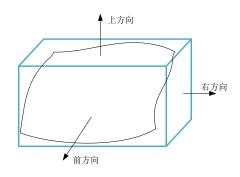


图 3-9 自由曲面的包络盒

3.3.3 基于包络盒的轨迹规划算法

根据不规则子区域建立完包络盒后,本文参考光栅型路径规划方法生成喷浆轨迹点。设喷枪运动轨迹间距为L和移动速度为v。基于包络盒的喷浆轨迹规划算法的流程图如图 3-10 所示,详细步骤及说明如下:

Step1:根据不规则子区域建立包络盒,满足约束条件的情况下确立包络盒的各个方向,具体包络盒的姿态如图 3-11-a 所示。

Step2: 采用一系列与包络盒的上方向平面平行的平面切割自由曲面,相邻平面的距离为L,具体的平面切割情况如图 3-11-b 所示。

Step3:由于子区域的自由曲面是大量栅格组成的点集,不是完整的曲面模型, 无法直接求出交线。通过栅格连线计算切割平面与自由曲面交线上的点,计算得 到的点如图 3-11-c 所示。

Step4: 将 step3 中计算的点沿着 R 轴负方向偏置距离 h 得到轨迹点,其中 h 为喷枪工作时的喷浆高度,本文取 1000mm,如图 3-11-d 所示。

Step5: 根据柱坐标与直角坐标的转换关系,将 step4 中偏置后的轨迹点转换到直角坐标系下,与实际喷浆情况相符,以便作运动学模型的输入求解喷浆机器人各个关节的变化量。

Step6: 相邻轨迹点插值,得到连续轨迹。

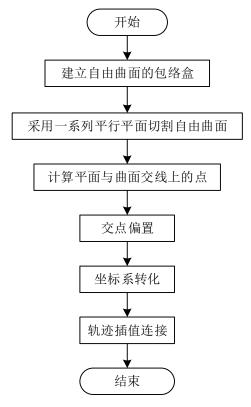


图 3-10 基于包络盒的轨迹规划算法流程图

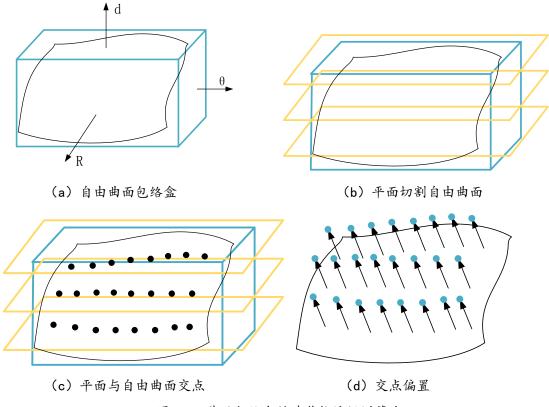


图 3-11 基于包络盒的喷浆轨迹规划算法

Step3 中采用点对匹配法计算切割平面与自由曲面的交点^[8]。点对匹配法的示意图如图 3-11 所示。 P_1 、 P_2 、 P_3 表示平行的切割平面,将子区域数据划分成 E_1 、 E_2 两个部分。分别计算 E_1 中每个数据点在 E_2 中的最近点和 E_2 中每个数据点在 E_1 中的最近点。若两个数据点互为最近点,则称这个两个数据点为点对。如图 3-12 将所有的点对连接,与切割平面相交,计算得到交点。

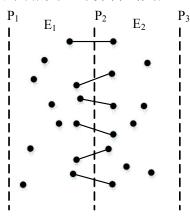


图 3-12 点对匹配法示意图

Step5 中将轨迹点从柱坐标系转回到直角坐标系后如图 3-13 所示。图中褐色部分为真实隧道点云数据,轨迹点为多条轨迹点中的一条。轨迹整体趋势沿着隧道壁面呈现弧形状。

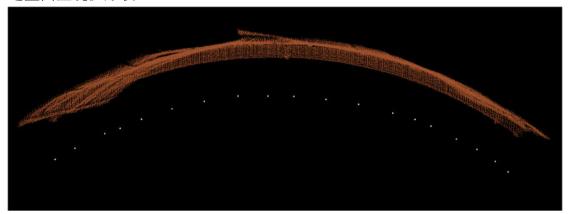


图 3-13 真实隧道单条轨迹点图

Step6 中采用三次样条插值得到连续轨迹。一般情况下,标准物体形成的末端喷枪轨迹点相对规整,在对应的轨迹点区间使用直线插值或者圆弧插值的方法获取完整的目标轨迹。然而,隧道面的每个位置凹陷程度不一,根据不规则隧道面所生成的轨迹点较为复杂,直接用直线和圆弧的连接会造成整体的曲线精度不佳,同时会耗费大量时间。

因此,本文采用三次样条插值方法对已生成的轨迹点进行插值,获取完整的喷浆轨迹。三次样条能够保证经过所有的轨迹样点,同时具有连续的二阶导数,

保证了运动轨迹的连续性和平滑性。

三次样条的基本含义就是连接 n 个轨迹点的 n-1 个 3 次多项式的函数。设 $P_i(t_i,s(t_i))$ 和 $P_i(t_{i+1},s(t_{i+1}))$ 是两个规划好的相邻轨迹点,那么连接这两个轨迹点的三次多项式函数为:

$$s_i(t) = a_i(t - t_i)^3 + b_i(t - t_i)^2 + c_i(t - t_i) + d, t \in (t_i, t_{i+1})$$
(3-6)

其所对应的一阶导数和二阶导数分别为

$$s_i'(t) = 3a_i(t - t_i)^2 + 2b_i(t - t_i) + c_{i,i}t \in (t_i, t_{i+1})$$
(3-7)

$$s_i''(t) = 6a_i(t - t_i) + 2b_i, t \in (t_i, t_{i+1})$$
(3-8)

依据一阶导数和二阶导数的连续性和三次样条插值条件,可以得到

$$\begin{cases} s_{i}(t) = s_{i+1}(t) \\ s'_{i}(t) = s'_{i+1}(t) \\ s''_{i}(t) = s''_{i+1}(t) \end{cases}$$
(3-9)

根据已经条件进行解算每个分段函数的系数,在解算过程中会发现总共有 n+1 未知量,然而只有 n-1 个方程。求解该方程组的话,需要再加入两个限制条件,组成 n+1 个方程。这两个限制条件可以从对两边的端点入手。常用的限制有自由边界、固定边界和非节点边界。本文采用固定边界的方式,指定首尾两个端点的微分值,即速度为指定值。那么,便可以通过 n+1 阶线性方程组求解 n+1 个未知量,得到每段函数的系数值。采用同样的方法可以分别求 X,Y 和 Z 关于时间 t 的三次样条曲线函数,进而组成整体的喷浆轨迹函数。

3.4 喷枪移动速度求解

对于不规则的隧道壁面,每个方向上都会存在曲率变化。如果以恒定的速度喷浆,会造成混凝土累积厚度都不均匀。因此,本文采用分段优化的方法,每条路径上的速度是不变的,然而不同路径的速度是不同。设自由曲面上有n条喷浆路径,各条路径上喷枪的移动速度不一样。n条路径上的速度用矢量 $V = \{v_i | i \in [1,n]\}$ 表示。

喷枪在运动时的喷浆情况如图 3-14 所示。设隧道曲面上一栅格点 S 的混凝土厚度为 T_s 。喷枪喷射点从 O_{start} 到 O_{end} 的过程,S 点能够接受到混凝土喷射。那么 S 点的混凝土累积厚度相当于从 S_{start} 到 S_{end} 的动态过程,v 表示喷枪在该条路径上的移动速度。

$$T_{s} = \int_{t_{end}}^{t_{start}} q(s)dt = \frac{1}{v} \int_{S_{end}}^{S_{start}} q(s)ds$$
 (3-10)

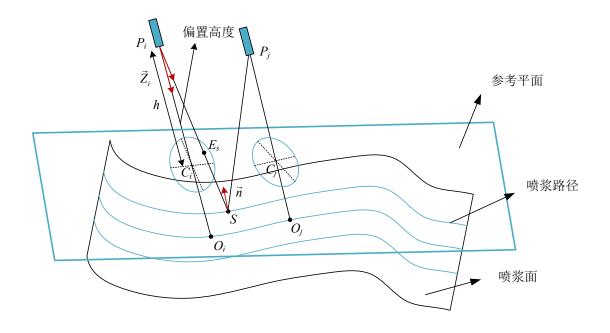


图 3-14 喷枪运动过程喷浆示意图

如图 3-14 所示,喷枪在该条路径的 P_i 处,对点S有喷浆作用,在喷浆面的投影点为 O_i 。 O_i 点沿该位置的法向量方向向上偏置一定高度即为喷枪的位置。喷枪到参考平面的垂直向量为 \vec{Z}_i ,垂直高度为h。由于自由曲面上的涂层厚度累积速率是通过平面上的涂层厚度累积速率推导得到的,高度值h为第二章节的测试实验的喷枪垂直高度,故h为定值。 L_i 为喷枪 P_i 到S的距离, \vec{n} 为S点的法向量方向, P_i S表示 P_i 到S的方向, C_i 为喷枪沿着垂直平面方向 \vec{Z}_i 在参考平面上的投影点, E_s 为 P_i S与参考平面的交点,喷枪在参考平面的喷浆区域是一个圆形。根据图中的几何关系可得:

$$|P_i E_s| = h/|\cos\langle \overrightarrow{P_i S}, \overrightarrow{Z_i}\rangle|$$
 (3-11)

$$|C_i E_s| = \sqrt{|P_i E_s|^2 - h^2}$$
 (3-12)

根据第2章节的混凝土厚度累积速率模型, E_s 点的混凝土厚度累积速率模型 $q_{i,p}$ 为:

$$q_{i,E} = \begin{cases} q(1 - \frac{|C_i E_s|^2}{R^2}), & \text{if } 0 < |C_i E_s| \le R\\ 0, & \text{other} \end{cases}$$
 (3-13)

其中 q, R 都是已知参数,根据第 2 章的涂层厚度累积速率模型可得到。那么,可推导出自由曲面上 S 点的涂层厚度累积速率为:

$$\begin{aligned} q_{i,S} &= \frac{h^2 \cos\left\langle \overrightarrow{P_iS}, \overrightarrow{n} \right\rangle}{L_i^2 \cos\left\langle \overrightarrow{P_iS}, \overrightarrow{Z_i} \right\rangle} q_{i,E} \\ &= \begin{cases} \frac{h^2 \cos\left\langle \overrightarrow{P_iS}, \overrightarrow{n} \right\rangle}{L_i^2 \cos\left\langle \overrightarrow{P_iS}, \overrightarrow{Z_i} \right\rangle} \cdot q(1 - \frac{|C_i E_s|^2}{R^2}), & \text{if } 0 < |C_i E_s| \le R \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$

$$(3-14)$$

在喷浆过程中,需要判断喷枪所处的位置 P_i 是否对S点是否存在喷浆作用。若满足式(3-15),则喷枪对S存在喷浆作用,反之,则对S点没有喷浆作用。

$$0 < |C_i E_s| \le R \tag{3-15}$$

如图 3-14 中的喷枪在 P_j 处时, P_jS 与参考平面的交点到 C_j 距离大于喷浆半径 R,在圆形喷浆范围之外,对S点没有喷浆作用。

设相邻轨迹点i 和轨迹点j 之间的距离为 Δd 。当 Δd 很小时,两个轨迹点之间的喷浆累积速率保持不变。那么这段时间S 点的混凝土累积厚度为

$$T_{i,j} = \frac{\Delta d}{v_i} q_{i,S} \tag{3-16}$$

用矢量 $M = \{m_j | j \in [1, n]\}$ 表示每条轨迹的轨迹点数。那么,栅格点S的混凝土累积总量为

$$T_s(V) = \sum_{i}^{n} \sum_{k=1}^{m_i} \frac{\Delta d}{v_i} q_{i,S}$$
 (3-17)

设该子区域的栅格总数为N,喷浆期望厚度为 T_a ,得到目标函数:

$$\min w = \sum_{S=1}^{N} |T_d - T_S(V)|$$
 (3-18)

通过优化参数 V,获取目标函数式(3-18)的最小值。本文采用 Powell 提出的 BOBYQA [60](bound optimization by quadratic approximation)搜索算法求解该问题。BOBYQA 算法使用二次近似和信赖域方法来解决约束优化问题。该算法每次迭代都用一个近似的二次函数替代目标函数,并不断缩小信赖域逼近最优情况。该算法无需用到目标函数的导数,而且可以对多变量优化。在求解式(3-12)目标 函数 时, 自变量是速度 $V = \{v_i | i \in [1, n]\}$ 。本文设定速度的范围是 $50mm/s \le v_i \le 1000mm/s$ 。

3.5 喷浆轨迹间距求解

喷浆过程中,通常无法保证单条轨迹能够完成混凝土填充任务。多条轨迹往 返喷浆的话,就会存在轨迹间重叠部分。为了保证喷浆厚度的控制,轨迹间距的

设定极为重要。如果间距过大,会导致重叠部分后厚度不够,后期需要进一步修补影响效率;如果间距过小,重叠部分厚度太厚,超过预期厚度。因此,本小节对轨迹间距如何合理设定展开探究。

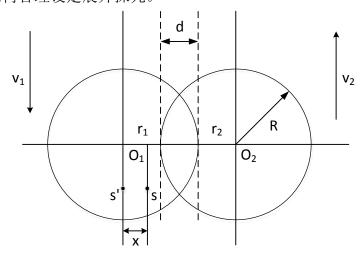


图 3-15 喷浆重叠区域俯视示意图

如图 3-15 所示,d 表示代表两条轨迹重叠部分宽度,s 表示两条轨迹间的任意一点,s'为s 在第一条路径上的投影,x 表示s 到第一条路径的距离,R 表示喷射半径。那么,s 点的混凝土累积厚度为:

$$T_s(x) = \begin{cases} T_1(x), & 0 \le x \le R - d \\ T_1(x) + T_2(x), & R - d < x < R \\ T_2(x), & R \le x \le 2R - d \end{cases}$$
 (3-19)

式中, $T_1(x)$ 、 $T_2(x)$ 分别表示在两条路径上喷浆时在s的混凝土累积厚度。两者的计算公式如下:

$$T_1(x) = 2 \int_0^{t_1} q(r_1) dt, 0 \le x \le R$$
 (3-20)

$$T_2(x) = 2 \int_0^{t_2} q(r_2) dt, R - d \le x \le 2R - d$$
 (3-21)

其中,相关参数的计算公式如下:

$$\begin{cases} t_{1} = \sqrt{R^{2} - x^{2}} / v_{1} \\ t_{2} = \sqrt{R^{2} - (2R - d - x)^{2}} / v_{2} \\ r_{1} = \sqrt{(v_{1}t)^{2} + x^{2}} / v_{1} \\ r_{2} = \sqrt{(v_{2}t)^{2} + (2R - d - x)^{2}} / v_{2} \end{cases}$$
(3-22)

式中, r_1 和 r_2 分别表示s到两个喷射中心 O_1 、 O_2 的距离; t_1 和 t_2 分别表示在两条路径上喷浆在s位置的喷浆时间的一半;t表示喷枪从喷射中心运动到s'位置所用的时间。 v_1 和 v_2 分别代表两条轨迹对应喷枪的运动速度,可根据单条轨迹的

期望厚度求解得到。那么,为了使重叠部分的厚度尽可能保持均匀性,以重叠部分的混凝土累积厚度与期望填充厚度之间的方差作为目标函数:

$$\min S(d) = \int_0^{2R-d} (T_d - T_s(x, d))^2 dx \,, 0 \le d \le R$$
 (3-23)

由于目标函数数学表达式存在复杂计算过程的嵌套,导致在积分求解过程中 无法求得原函数。因此,对目标函数采取离散化,取 1mm 作为步长。离散化后 的目标函数为:

$$\min S(d) = \sum_{d=0}^{2R-d} (T_d - T_s(x,d))^2, 0 \le d \le R$$
 (3-24)

根据目标函数表达式可知,优化变量只有相邻轨迹间距 d。由小到大遍历 d值,发现目标函数值呈现先下降后上升的趋势。通过分析得到轨迹重叠问题的目标函数是一个单峰函数。单峰函数即在函数自变量区间内存在一个极值点可以将该函数精确的分成两个具有单调性的函数。

对于具有单峰性质的目标函数,本文采用黄金比例搜索法求解最优值,加速求解过程,快速找到极值点。黄金比例搜索法的基本原理就是不断缩短搜索区间的长度进而获取到函数的极小值点。利用黄金比例搜索法快速求解轨迹重叠问题的具体步骤如下:

Step1: 设置自变量的初始区间 $[a_1,b_1]$,其中 a_1 =0, b_1 =R,精度要求为L=0.1。 计算试探点 λ 和 μ 以及所对应的函数值 $f(\lambda)$ 和 $f(\mu)$, λ 和 μ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 = a_1 + 0.382(b_1 - a_1) \\ u_1 = a_1 + 0.618(b_1 - a_1) \end{cases}$$
 (3-25)

Step2: 若 $b_k - a_k < L$,那么停止计算。否则,当 $f(\lambda_k) > f(\mu_k)$ 时,转到 Step3; 当 $f(\lambda_k) \le f(\mu_k)$ 时,转到 Step4。

Step3: 按如下公式更新值

$$\begin{cases} a_{k+1} = \lambda_k \\ b_{k+1} = b_k \\ \lambda_{k+1} = \mu_k \\ \mu_{k+1} = a_{k+1} + 0.618(b_{k+1} - a_{k+1}) \end{cases}$$
 (3-26)

计算函数值 $f(\mu_{k+1})$,进而转到 Step5.

Step4: 按如下公式更新值

$$\begin{cases} a_{k+1} = a_k \\ b_{k+1} = \mu_k \\ \mu_{k+1} = \lambda_k \\ \lambda_{k+1} = a_{k+1} + 0.382(b_{k+1} - a_{k+1}) \end{cases}$$
(3-27)

计算函数值 $f(\lambda_{k+1})$,进而转到 Step5。

Step5: $\diamondsuit k = k+1$,返回 Step2。

当期望填充厚度为 70mm 时,通过黄金比例搜索法求解得到轨迹最优重叠宽度为 173mm,进而所对应的的子区域矩形宽度为 229mm。当轨迹间距设定为最优值时,各个位置的厚度情况分布如图 3-16 所示,整体厚度起伏不大,平整度较好,其中在重叠区域的厚度最大值为 71.8mm,最小值为 67.1mm,厚度的最大差值为 4.7mm。

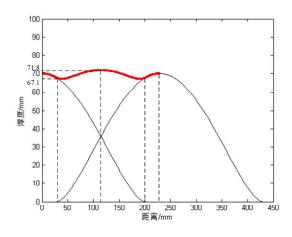


图 3-16 重叠部分厚度分布情况图

3.6 本章小结

本章针对隧道喷浆问题,提出一种基于分级分区的轨迹规划方法。首先,分析隧道喷浆任务并提出分级喷浆策略,同时依据连通规则将同一优先级的隧道壁面数据划分成多个子区域;然后,针对不规则子区域,提出一种基于包络盒的轨迹规划方法,通过切割包络盒的方法得到喷浆轨迹;最后,以喷浆厚度与期望厚度的差值最小为目标,分别对喷枪移动速度和喷浆轨迹间距优化求解。

第 4 章 基于蚁群算法的子区域轨迹连接优化

隧道待喷面经过优先级划分后,根据优先级从大到小喷浆。处于同一优先级的数据根据连通规则划分成多个独立的子区域。同一优先级的多个子区域的喷浆顺序决定了各个轨迹间的连接情况,同时也影响了多个子区域间的转移路径长度和最终的喷浆效率。连接的方法多种多样,可采用就近原则,寻找最近子区域连接。这方法简单可行,但不一定是最高效的连接方法。优化从一条轨迹过渡到另一个条轨迹的路径长度,进而可以缩短整个喷浆任务的轨迹过渡时间,提高整体喷浆效率。对于该种连接优化问题,可借鉴旅行商(Traveling Salesman Problem,TSP)问题的解决思路。对于经典的 TSP 问题,优化方法有很多种,如模拟退火算法[61]、蚁群算法[62]等智能算法[63]。本章采用蚁群算法对轨迹连接问题进行优化求解,通过信息素构建正反馈机制,进而使该算法具备较强的全局优化能力。

本章将每个子区域轨迹抽象成起点和终点两个点,不同子区域间通过起点或者终点相连接,将子区域轨迹连接问题建模为广义 TSP 问题模型,采用蚁群算法求解,并与最近点连接法、遗传算法进行对比实验,实验结果表明蚁群算法最适合解决子区域间轨迹连接问题。

4.1 子区域喷浆轨迹连接问题建模

子区域间喷浆轨迹连接问题,可以简单理解成每个子区域的喷浆先后顺序,按顺序连接便可以得到全局轨迹。对于子区域的连接顺序优化问题,与经典的旅行商问题类似。但是,两者也存在着一定的区别。传统的 TSP 问题优化模型只考虑到了点到点的顺序问题而忽略了前进方向,与本文的问题并不相符,不适用于对该问题的建模。因此,本文采用广义旅行商框架对子区域间轨迹连接问题进行建模。

4.1.1 广义旅行商问题的介绍

广义旅行商是基于经典的旅行商问题扩展出来的。广义旅行商问题的定义是给定一个加权图 G = (V, E, W),其中图的边有加权值并且为正值,在此图中寻找一个费用最小的 Hamilton 回路,其中 $V = \{v_1, v_2, v_3, ..., v_n\} (n > 3)$ 表示所有顶点的集合,即所有城市的集合, $W = \{w(x \to y) | w(x \to y) \geq 0, w(x \to x) = 0, \forall x, y \in V\}$ 表示权重值,即 G 图中任意两个地点之间的代价, $E = \{(v_i, v_j) | i \neq j, v_i, v_j \in V\}$ 表示所有城市间相连的边的集合,同时将所有的城市划分成 m 个非空的城市群 $V = \{C_j | j \in [1, m]\}$,且 $C_i \cap C_j = \emptyset$, $i \neq j$ 。与传统的旅行商问题不同,广义旅行商只要求经过每个城市群一次且仅一次就行,无须经过全部的城市。广义旅行商问

题可表示如图 4-1, 其中黑色顶点表示城市, 椭圆表示包含城市的城市群。

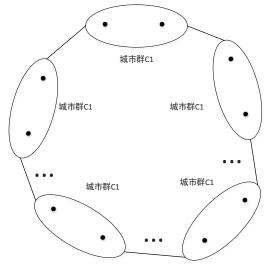


图 4-1 广义旅行商问题示意图

4.1.2 连接问题的分析与建模

本文采用广义 TSP 问题的框架对子区域间轨迹连接问题进行建模并且求解。结合本文的子区域轨迹连接问题,子区域类似于城市群,也是一个顶点集,不过该顶点集里面包含了每条轨迹的起点和终点。那么,所有的子区域可以表示为 $V=V_1\cup V_2\cup V_3\cup\cdots\cup V_n$,其中 $V_i=\{A_i,B_i\},i=1,2,3,\cdots,n$, A_i 、 B_i 分别表示子区域轨迹的起点和终点,子区域间的权值可表示为 $W=\{w(V_i,V_j),V_i,V_j\in V,i\neq j\}$,其中 $w(V_i,V_j)$ 表示子区域i轨迹到子区域j轨迹的权值。子区域间轨迹连接问题如图 4-2 所示,轨迹间采用虚线连接。

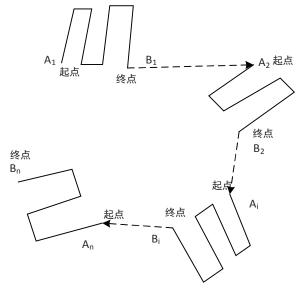


图 4-2 子区域间轨迹连接示意图

如图 4-2 所示,两个子区域间的连接情况可以根据连接方向不同、起点和终点不同而存在差异。假设存在子区域 i 和子区域 j,那么他们的连接情况存在以下 四 种: $A_i \to B_i \to A_j \to B_j$ 、 $B_i \to A_i \to A_j \to B_j$ 、 $B_i \to A_i \to B_j$ 、 $A_i \to A_j \to A_j$ 、 $A_i \to A_j \to A_j$ 。

为了解决上述提出的问题,则需要根据具体情况制定目标函数。假设子区域的数量为n,那么变量集可以表示为 $S=(S_1,S_2,S_3,...,S_n)$,其 S_i 表示喷浆过程中喷枪经过第i个子区域。由于区域间连接存在着方向性,定义变量集 $f=(f_1,f_2,f_3,...,f_n)$ 表示连接方向。 f_i 是一个逻辑变量,只能取值0或者1。当 $f_i=0$ 时,子区域i内部的轨迹方向是 $A_i \rightarrow B_i$;当 $f_i=1$ 时,子区域i内部的轨迹方向是 $B_i \rightarrow A_i$ 。由此,可以定义子区域i到子区域j的连接权值为 $w_{f_i,f_j}(S_i,S_j)$ 。通过以上分析,可以得到以下四种连接权值情况:

- (1)当 $f_i=0$, $f_j=0$ 时,子区域间的顶点连接方式为 $A_i\to B_i\to A_j\to B_j$,且连接路径为 $\left|\overline{B_iA_j}\right|$;
- (2)当 f_i = 1, f_j = 0 时,子区域间的顶点连接方式为 $B_i \to A_i \to A_j \to B_j$,且连接路径为 $\left|\overline{A_i A_j}\right|$;
- (3) 当 $f_i = 0$, $f_j = 1$ 时,子区域间的顶点连接方式为 $A_i \to B_i \to B_j \to A_j$,且连接路径为 $|\overline{B_iB_j}|$;
- (4) 当 f_i = 1 时,子区域间的顶点连接方式为 $B_i \to A_i \to B_j \to A_j$,且连接路径为 $|\overline{A_iB_j}|$ 。

那么,连接路径的权值 $w_{f,f}(S_i,S_i)$ 归纳表示为

$$w_{f_{i},f_{j}}(S_{i},S_{j}) = \begin{cases} \left| \overrightarrow{B_{i}A_{j}} \right| & f_{i} = 0, f_{j} = 0 \\ \left| \overrightarrow{A_{i}A_{j}} \right| & f_{i} = 1, f_{j} = 0 \end{cases}$$

$$\left| \overrightarrow{B_{i}B_{j}} \right| & f_{i} = 0, f_{j} = 1$$

$$\left| \overrightarrow{A_{i}B_{j}} \right| & f_{i} = 1, f_{j} = 1 \end{cases}$$

$$(4-1)$$

由此,可以得到喷浆任务全局路径的总长度为:

$$T(S,f) = \sum_{i=1}^{n} w(S_i) + \sum_{i=1}^{n-1} w_{f_i,f_{i+1}}(S_i, S_{i+1})$$
 (4-2)

其中, $w(S_i)$ 表示第 i 个子区域的喷浆路径长度,当子区域轨迹规划完成后,该项为定值。 S_i , S_{i+1} 表示任意两个子区域的路径。由于 $\sum_{i=1}^n w(S_i)$ 是常数,因此目标函数可以简化成:

$$\min T(S, f) = \min \sum_{i=1}^{n-1} w_{f_i, f_{i+1}}(S_i, S_{i+1})$$
 (4-3)

4.2 子区域喷浆轨迹连接问题求解

蚁群算法的原理是一种利用正反馈机制或者增强型学习系统,采用分布式优化方式,易与其他方法相结合。蚁群算法最早的应用场景便是 TSP 问题,它具有较强的全局搜索能力和较快的收敛速度。本文采用蚁群算法对子区域间轨迹连接问题求解及优化。

4.2.1 蚁群算法介绍

蚁群算法的想法来源于真实生活中蚂蚁群体的觅食行为^[62]。意大利学者 Dorigo M 等人总结归纳了蚁群算法,并于 1991 年最早提出。而后,在 1996 年 Dorigo 又针对该算法发表了一篇文章,详细阐述了蚁群算法的基本原理,以及相对于其他智能算法的优缺点。

自然界中的蚂蚁在群体觅食中,会在经过路径留下一种蚂蚁特有的信息素,用于其他的蚂蚁在经过此路径时能够察觉到他留下来的信息,进而影响其他蚂蚁的觅食行为。当一条路径上经过的蚂蚁越来越多,那么路径上留下来的信息素强度便会越来越大,依据此信息,进而导致更多的蚂蚁选择该条路径,从而更加增强了该路径的信息素强度,该行为是蚂蚁的自催化行为,也是一种正反馈机制。相反,一条路径经过的蚂蚁少,路径上留下的信息素便少,进而导致选择该条路径的蚂蚁越来越少。最终,蚂蚁群体便会根据信息素找到通往食物最优路径。

为了模拟蚁群觅食的过程,设蚂蚁的总数量为 m,TSP 中的城市数量为 n,蚂蚁随机分布在 n 个城市中,并且自由选择移动方向。 $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻时,城市 i 和城市 j 之间路径的信息素浓度。在初始时刻,每条路径上的信息素浓度相等且为常数,表示为 $\tau_{ij}(0) = const$ 。随着蚂蚁的自由活动,每条路径上的信息素浓度便会改变,蚂蚁的移动行为也会受到路径上信息素浓度影响。采用禁忌表 $tabu_k(k=1,2,3,\cdots,m)$ 记录蚂蚁 k 经过的城市顺序并实时更新。在蚂蚁的路径选择过程中,可以根据路径上信息素浓度和启发信息来计算状态转移概率,表示方法 如下:

$$p_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\alpha}(t) \cdot \eta_{ij}^{\beta}(t)}{\sum_{j \in allowed_{k}} \tau_{ij}^{\alpha}(t) \cdot \eta_{ij}^{\beta}(t)}, & \text{if } j \in allowed_{k} \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$

$$(4-4)$$

其中, $p_{ij}^k(t)$ 表示在城市 i 的蚂蚁 k 在 t 时刻选择去城市 j 的概率; $allowed_k$ 表示在城市 i 的蚂蚁 k 可以选择的城市集合; α 表示信息强度因子,表示信息素对蚂蚁的城市选择的影响程度,信息强度因子过大容易导致过早收敛进入局部最优。当 $\alpha \in [1,4]$ 时,综合求解性能较好; β 为启发函数因子,反映了启发信息在

蚁群搜索过程中的重要程度, β 值过大容易导致在某条路径选择局部最优。当 $\beta \in [3,4.5]$ 时,综合求解性能较好; η_{ij} 表示启发函数,其数学表达式为

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \tag{4-5}$$

式中, d_{ij} 表示城市 i 和城市 j 之间的距离。可见,启发函数与城市间距离呈现负相关,城市间距离越大,启发函数值越小。

为了防止信息素不断累积,浓度不断增大,影响其他因素的比重,蚂蚁每走 完一个循环,都要对路径上的信息素进行更新,更新方式如式(4-6)所示。

$$\tau_{ij}(t+n) = \tau_{ij}(t) \cdot (1-\rho) + \Delta \tau_{ij}(t)$$
(4-6)

式中, ρ 表示信息素的挥发系数, ρ 的取值范围在 0 到 1 之间; $\Delta \tau_{ij}(t)$ 表示城市 i 和城市 j 之间路径的信息量浓度总增量。依据信息素不同的更新方式,Dorigo M 总结出了 Ant-Cycle 模型、Ant-Density 模型和 Ant-Quantity 模型三种不同的蚁群算法模型,其具体情况如下:

$$Ant - Cycle$$
模型: $\Delta \tau_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_{k}}, 循环中蚂蚁k经过(i, j) \\ 0, 其他 \end{cases}$ (4-7)

$$Ant-Density$$
模型: $\Delta \tau_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} Q, 循环中蚂蚁k经过(i,j) \\ 0, 其他 \end{cases}$ (4-8)

$$Ant-Quantity$$
模型: $\Delta \tau_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}}, 蚂蚁k在t和t+1经过(i,j)\\ 0,其他 \end{cases}$ (4-9)

其中,Q为信息素常数,Q值的大小影响算法整体的收敛速度, L_k 表示蚂蚁 k 在该次循环中的路径总长度。

对比三种算法模型,Ant-Density 模型和 Ant-Quantity 模型只利用到了过程中的局部信息,而 Ant-Cycle 模型利用的是整体的信息,可以防止信息素的无限制累积,在求解时综合性能较好。因此,本文以 Ant-Cycle 模型作为信息素更新策略。

4.2.2 基于蚁群算法求解轨迹连接问题

基于 4.1 章节对子区域间轨迹连接问题的分析与建模,结合蚁群算法的求解思路,设蚂蚁的数量为 m,子区域的数量为 n,将 m 只蚂蚁随机分布在 n 个子区域。函数的目标是搜索出最短的路径,结合轨迹连接的具体情况可以拆分成两个部分,一个是子区域的连接顺序 $S = (S_1, S_2, ..., S_n)$,另一个是每个子区域所对应的

内部轨迹方向 $f = (f_1, f_2, ..., f_n)$,综合两个部分便可以得到一条完成的连接图。将蚁群算法应用到子区域间轨迹连接问题上步骤流程图如图 4-3 所示。

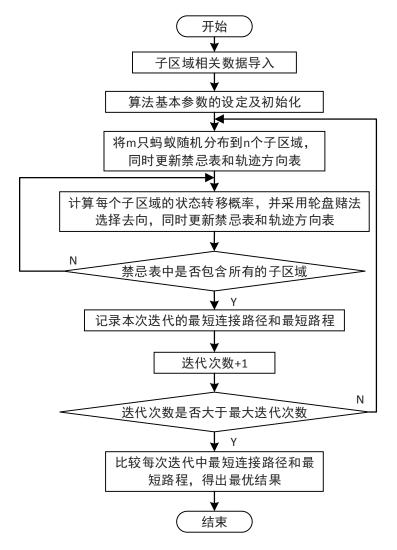


图 4-3 子区域连接问题求解流程图

在蚁群算法求解该问题的过程中,存在以下几个关键内容:

(1) 算法常规初始化

将迭代次数、蚂蚁个数、信息素的挥发系数等基本参数初始化,其中蚂蚁个数设置为子区域数量的 1.5 倍左右,迭代次数一般为 100~500。

(2) 蚂蚁的随机分布

采用子区域随机排列组合的方法: n 个子区域顺序随机打乱,由于蚂蚁个数是子区域数量的 1.5 倍,将两部分随机打乱的 n 个子区域拼接在一起,取前 m 个子区域,将蚂蚁对应放入。

(3) 起点和终点的设定

蚂蚁 k 访问的第一个子区域内的起点和终点依据随机生成的 f_i 决定。当 f_i =0

时,起点为 A_i ,终点为 B_i ;当 f_i =1时,起点为 B_i ,终点为 A_i 。子区域内部轨迹的终点将作为与下一个子区域连接的起点 A_i 。

(4) 路径的存储

常规方法采用禁忌表记录每只蚂蚁所走过的顶点,顶点按顺序连接便得到所求的路径。本文除了需要记录所走过的子区域顺序,还需记录所对应的内部轨迹方向 f_i ,才能精确得出所有连接的点是 A_i 还是 B_i 。

(5) 状态转移概率的计算

根据式(4-4)可以计算得到每个子区域的转移概率。不同的是由于 f_i 的存在,每个子区域可以得到两个转移概率。本文选择两者中较大的概率作为本区域的转移概率,并同时记录所对应的内部轨迹方向 f_i 。

(6) 数据的更新

每完成一次迭代,记录本次迭代的最佳路径和最短路程,同时清空禁忌表 tabu 和轨迹方向表 f ,避免影响下一次迭代;根据式(4-6)并结合 Ant-Cycle 模型更新信息素浓度;多次迭代,直到达到最大迭代次数,比较得出最终的优化结果。

4.2.3 仿真对比实验

任意选取一个隧道拱间面,将处于最高优先级的子区域数据提取并完成子区域划分和相应的内部轨迹规划。然后,将实验所需的子区域编号1-n并以对应的轨迹起点和终点作为数据集输入,最后输出最短子区域连接方案和最短路径长度。为了方便表示,用红色直线简化代表子区域内的轨迹,连接起点和终点,小圆圈表示内部轨迹的起点和终点,如图 4-4 所示。实验目的是将所有的子区域(即两个小圆圈和一条线)依次连接,中间的连接路径长度最短。

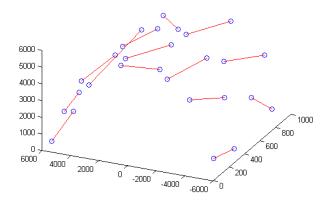


图 4-4 所有子区域示意图

(1) 最近点连接法

最近点连接法符合是施工人员喷浆的常规习惯,选择一个靠边位置,然后从 头到尾喷浆。本实验选择最靠边缘角的子区域作为起始位置,转移过程中搜索附 近子区域的起点和终点,通过比较找到最近点连接,依次搜索、连接,直到路径 集合里包含了所有的子区域。该方法操作简单,采用局部贪婪思维。实验连接结 果如图 4-5 所示,连接路径总长度为 26316mm。由于子区域的数据量不会太大, 该方法的耗时基本可以忽略。

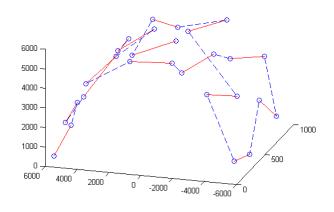


图 4-5 最近点连接法求解结果图

(2) 遗传算法

遗传算法是一种通过模拟自然生物进化过程,进而不断搜索获取最优解的方法。遗传算法的实现首先结合实际问题对每个个体进行编码,每个个体的具体特征相当于生物个体的外在表现,可以通过染色体遗传给下一代。然后,初代种群进行初始化,并采用适者生存、优胜劣汰的原理,依据每个个体的适应度进行选择,保留优势个体。进而对优势个体进行组合交叉、变异,产生新的种群。在不断迭代过程中,种群的特征越来越符合设定的要求。末代种群的最优解可以看做是该问题的近似最优解。

针对本文的子区域轨迹连接问题,遗传算法的应用做相应调整。种群初始化编码方法有二进制编码和实数编码。结合该问题的情况,本文采用实数编码。适应度函数的设计依据不同子区域间的距离。两个子区域距离越短,适应度函数越大。一般情况下适应度大的个体存在的机会更大,而适应度小的个体存在的几率也较小。选择操作采用轮盘赌法机制。交叉操作采用两个个体之间的随机调换子同一位置的子区域。变异操作随机调换个体内部的两个子区域连接位置。具体遗传算法相关参数的设定如表 4-1 所示。

参数类型	参数值
种群个数 m	100
交叉概率 Pc	0.9
变异概率 Pm	0.1
最大迭代次数 NC	400

表 4-1 遗传算法相关参数设定表

经过遗传算法优化求解后,最优子区域间轨迹连接情况如图 4-6 所示。虚线代表子区域间的连接路径。经过 400 代迭代后,最终的最优连接情况的总路程是 23724mm,算法的运行时间大约为 15s。遗传算法在实验中的收敛性如图 4-7 所示。从趋势上可见,算法大概迭代到 100 次左右收敛。总共实验 20 次,存在 8 次经过 400 代迭代仍然不收敛的情况。

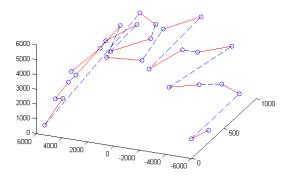


图 4-6 遗传算法连接结果图

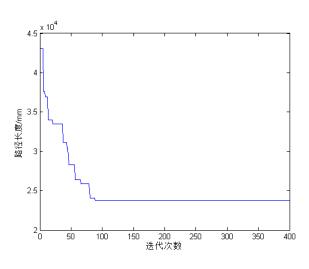


图 4-7 遗传算法收敛性结果图

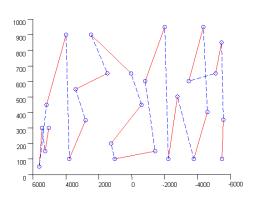
(3) 蚁群算法

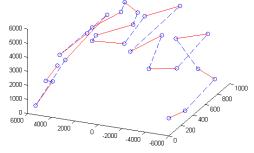
首先对蚁群算法的基本参数初始化及设定。相关参数的设定如表 4-2 所示。

表 4-2 蚁群算法相关参数设定表

参数值		
1.5n (n 为子区域数量)		
1		
5		
0.3		
200		
10		

经过蚁群算法优化求解后,最优子区域间轨迹连接情况如图 4-8 所示,虚线表示子区域间的连接路径。从连接路径俯视图可以清晰的看到子区域间的连接情况。另一方面,通过连接路径立体图可以了解到喷枪相对于隧道面的运动趋势。





(a) 蚁群算法连接路径俯视图

(b) 蚁群算法连接路径立体图

图 4-8 优化结果示意图

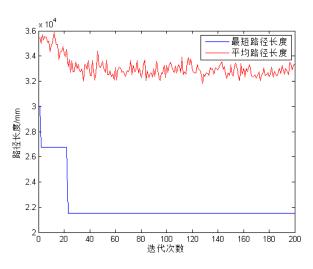


图 4-9 蚁群算法收敛性结果图

经过 200 代迭代后,最终的最优连接情况的总路程是 21515mm,算法的运行时间大约为 5s。蚁群算法在实验中的收敛性如图 4-9 所示,横坐标表示迭代的次数,纵坐标表示连接路径的总长度,红色曲线表示每一代的平均路径长度,蓝色曲线表示每一代的最短路径长度。从趋势上可见,算法大概迭代到 25 次左右便

稳定收敛,收敛速度较快。除此之外,采用蚁群算法对子区域间轨迹连接问题进行了 20 次求解,都在 100 次迭代内收敛,其中有 19 次的求解结果与上述结果一致。

综合以上三个仿真实验,三种算法求解子区域间轨迹连接问题的结果情况总结如表 4-3 所示。

		<u> </u>	
算法类型	最短路程/mm	收敛代数	消耗时间/s
最近点连接法	26316	无	<1s
遗传算法	23724	100	15s
蚁群算法	21515	25	5s

表 4-3 三种算法结果对比表

本文通过穷举法对该实验的所有连接情况进行对比,求解连接路径最短的方案。最终求解得到的最短路径为 21515mm。蚁群算法的求解结果与穷举法求得的最短路径相等,属于全局最优解。通过表 4-3 可以看出,常规的最近点连接法求解得到的最短路程最长,蚁群算法结果最优。相对于遗传算法,蚁群算法求解得到的最短路程较短,收敛较快、消耗时间较少。蚁群算法消耗时间虽然比最近点连接法大,但是最短路程少了将近 5m。假设喷枪移动速度为 200mm/s,5m 的路程所消耗时间为 25s。因此,蚁群算法的效率更高。实验结果表明,蚁群算法适用于子区域间轨迹连接该问题,缩短子区域间轨迹连接的路径长度,减少了喷枪在子区域间转移时间。

4.3 本章小结

本章主要采用蚁群算法解决子区域间轨迹连接问题。首先,分析子区域间轨迹连接问题,根据其特点与广义旅行商问题相结合,建立子区域连接问题的目标函数;然后,介绍蚁群算法的基本原理和解决子区域连接问题的过程;最后采用蚁群算法获取最短连接方案和最短路程,并与最近点连接法和遗传算法进行对比实验,实验结果证明了蚁群算法求解该问题的有效性。

第5章 基于 ROS 的喷浆机器人仿真设计与实现

由于隧道喷浆的特殊性,项目本身极难提供一个供测试开发用的真实隧道环境进行喷射实验。如果需要在真实隧道下进行数据采集和算法测试,那么只能联系正在施工的隧道,争取得到施工方的允许,在施工间歇期间喷浆机器人进入隧道测试,并且不能耽误正常的施工时间。因此,这种情况下实验时间短,并且机会也很难得。为此,本文基于 ROS 对喷浆机器人隧道喷浆进行仿真。喷浆机器人仿真能够为功能开发提供模拟实验环境和相关算法的测试条件,并且可以在模拟环境下反复测试,保证系统的稳定性以及有效避免在实际应用不确定性因素的影响,可以极大提高项目的开发效率,并且减少项研发成本。

本章首先介绍机器人操作系统的工作原理以及使用优点;其次根据喷浆机 KC30 实体参数建立 URDF 模型;再次阐述喷浆机器人仿真总体设计方案和各个模块的功能情况,并详细介绍模型运动仿真、喷浆模型仿真和隧道环境仿真三种模块的实现过程;最后,利用该仿真系统进行隧道壁面喷浆实验,验证本文轨迹规划算法的可行性。

5.1 ROS 机器人操作系统介绍

ROS 最早于 2007 年出现在 Willow Garage 公司,当时他们修改了最初在斯坦福人工智能实验室开发的软件。随着开发工作的进行,2009 年发表了关于 ROS 的第一篇论文,并发布了第一个教程。2010 年,第一个官方版本 ROS 1.0 发布,随后在未来 7 年内又发布了 11 个版本,并开发了下一代 ROS 2。截至 2017 年,共有 9395 个独特的软件包可供用户下载、实施、修改或以任何方式使用 BSD 许可证。

ROS 是专门为机器人设计的中间件。它是一个软件框架,允许用户用各种编程语言(如 C++、Python 和 Lisp)创建软件。ROS 编写的软件包可以包括节点、消息类型、配置文件和函数库。ROS 包最基础的是节点,但是存在 ROS 包可用并且不包括任何软件节点的情况。节点负责执行给定的任务并且可以相互通信。可以在一台计算机上运行多个节点,也可以在每台计算机上运行一个或多个节点时使用多台计算机。

5.1.1 ROS 节点间通信方式

节点是使用 ROS 框架发布消息和订阅主题来相互通信。图 5-1 展示了两个 ROS 节点如何相互通信的。在图 5-1 中,节点 1 是"发布服务器",并将消息发布到"Topic (话题)"。节点 2 是"订阅服务器",订阅发布到"话题"的所有消

息。节点执行发送和接收操作。当订阅服务器"Spin"时,它将查看订阅的所有话题,并使用话题消息中包含的数据执行回调函数。每当节点订阅话题时,必须定义回调函数。若从话题中检索到ROS消息则执行回调函数。

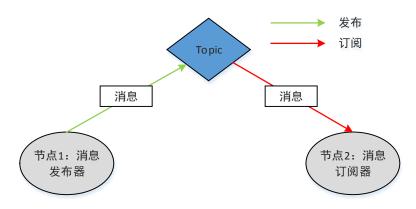


图 5-1 ROS 简单使用示意图

ROS 消息可分为四类数据:内置数据类型、其他消息类型、数组或头。内置数据类型是常用的数据类型,如布尔值、字符串、浮点数和各种精度的整数。"header"是一种常用的消息,通常包含在消息中,因为它们包含唯一的 ID、时间戳和帧 ID。帧 ID 在移动机器人技术中特别有用,有助于通过为每一个提供一个标识符。

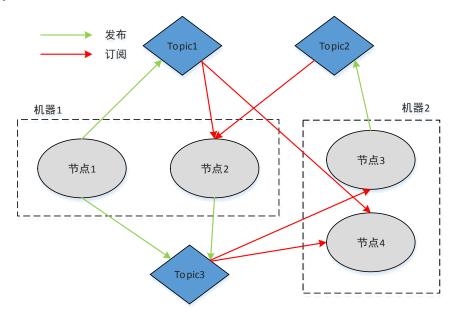


图 5-2 ROS 高级使用示意图

图 5-2 展示了对 ROS 框架更复杂的利用。在这个例子中,节点 3 和节点 4 运行在单独的机器上,但是 ROS 允许它们无缝地通信,就像它们在一台机器上一样。如图 5-2 所示,节点可以发布到一个或多个话题,如节点 1,订阅多个话题

如节点 4,或者同时发布和订阅一个或多个话题,如节点 2。这些话题只是被命名为节点发送和接收消息的通道。

ROS 的"Master"是一个特殊的节点,它支持 ROS 的核心功能。它从不被用户修改,必须在执行 ROS 节点之前运行。主节点允许节点相互查找、交换消息和调用服务。当需要在节点之间进行双向通信时,需要使用到 Service (服务),如图 5-3 所示。服务将通过 Master 节点公布其名称,节点可以使用请求、响应消息调用服务。当服务被调用时,传递一个请求消息;当它完成时,它返回一个响应消息。服务可以像节点一样创建,还可以发布和订阅话题以及执行它们发布的服务。操作与节点非常相似,但在执行时提供定期更新,并且可以被抢占。

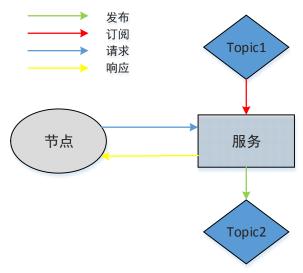


图 5-3 ROS 节点和服务双向通信示意图

服务可以应用于生成喷射混凝土的喷枪轨迹。节点将向轨迹服务发送隧道表面点云消息,该服务将发送发轨迹消息作为响应。一个节点发送目标机械臂轨迹,另一个节点可以用来执行机械臂并且完成该动作。当机械臂移动时,节点可以反馈机械臂实时位置。在完成操作,可以提供一个消息结果,如布尔值表示成功,触发另一个要执行的操作。如果用户需要停止喷射过程或执行不同的轨迹,则可以通过发送新目标来抢占操作。

Master 节点还用于在参数服务器上存储信息。参数服务器是 ROS 节点存储和检索数据的中心位置。存储在参数服务器上的数据通常是不经常更改的值。节点可以在参数服务器上放置或检索数据,该服务器通常用于各种配置设置。任何节点都可以检索此信息以供自己使用,或者修改此信息以供其他节点使用。

参数服务器可以与自定义喷射混凝土喷射模式相结合。喷浆流量、通过点距 离、喷浆速度和表面偏移量等值都可以存储在参数服务器上,并在启动时从磁盘 加载。当请求喷射混凝土轨迹时,服务可以从参数服务器读取相关规范。用户可 以直接更改参数服务器上的值,它可以从文件加载,也可以在运行时由另一个节点修改。配置文件用于保存参数,以备机器人重新联机时使用。

ROS 还可以使用 rosbag 函数记录话题内容。"rosbag"是一个扩展名为.bag 的文件,它保存通过给定话题发送的所有消息。此工具对于基于现有数据的仿真特别有用。喷浆机器人工作时,可以在激光扫描话题上记录 ROS 包文件。然后,可以在运行映射算法以生成映射时回放包文件。使用 bag 文件,可以在以前的实验数据上开发和测试许多不同的映射算法,而不必每次都启动机器。

ROS 包的执行经常从终端窗口开始。终端窗口是操作系统的命令行界面,从那里可以运行节点、启动服务、更改参数服务器值以及许多其他 ROS 特定的功能。launch 文件的扩展名为.launch,它提供了一种方便的 27 种同时启动多个节点和服务以及将多组配置参数加载到参数服务器或直接加载到节点的方法。使用启动文件,启动和配置 ROS 包的所有命令行条目都可以使用单个命令执行。启动文件的语法遵循可扩展标记语言(XML)格式规则,这使得文档对人和机器都可读。启动文件可以配置为在计算机系统启动时启动,因此操作员只需向系统提供电源,就可以开始运行任何已编程启动的软件包。

5.1.2 ROS 框架特点

ROS 整体框架是一种分布式的处理框架。ROS 的所有功能节点都是存在的,并且是一个可执行文件。在运行时,各个节点之间松散耦合,有利于系统功能的扩展。每个节点之间的通信方式有服务(service)和话题(topic)。ROS 内部的采用的是分布式组织与管理,保证所有的节点、堆和包等可执行文件能够高效运行不冲突。Master 节点是 ROS 的核心节点,它会记录所有发布节点的信息。当发布节点在某一个话题上发布信息时,Master 节点保证所有订阅该话题的订阅节点能够及时收到更新信息。

ROS 的目标就是提高机器人的开发效率和智能化水平。ROS 是开源免费的,为机器人开发者提高了丰富的工具包和交流共享的社区。综合 ROS 的框架与协议,ROS 可以总结为以下几个特点:

- (1) 点对点设计。与传统的机器人系统模块化设计结构不同,ROS 中所有的功能以节点的形式存在。核心节点 Master 节点负责管理所有其他的节点的通信过程。其他节点通过话题或者服务实现端对端通信,减少了数据存储与处理的压力,进一步提高了系统运行的稳定性。
- (2)免费开源且工具包丰富。ROS的所有源码可以通过官网下载得到。在ROS中也集成了多种开发工具,可以方便机器人开发者的测试与系统状态查看。
 - (3) 支持多种语言开发。ROS 节点间的通信采用 XML/RPC 协议,支持多

种开发语言,为熟悉不同语言的开发者提供了便利。

基于以上的 ROS 开发特点,通过节点来代替传统机器人系统中的复杂模块,避免代码模块对接的不一致,提高了整体的代码复用率和开发效率,为传统工业机器人的智能研发提供了极大便利。因此,本文基于 ROS 对喷浆机器人隧道喷浆进行仿真。

5.2 喷浆机器人模型建立

本课题研究的喷浆机器人是一个八自由度串联机器人结构,如图 5-4 由有六个旋转关节和两个伸缩关节组成。在隧道喷浆时,可以通过旋转关节和伸缩关节共同作用调节喷枪末端相对于隧道面的位置和姿态,达到混凝土喷射的目的。



图 5-4 喷浆机 KC30 真机图

喷浆机器人的三维模型是仿真系统可视化的基础。ROS 通常采用 URDF (Unified Robot Description Format)模型来表示机器人的形状、尺寸或其他硬件的位置。URDF 是一种机器人描述文件,采用 HTML 的标签格式来定义一个机器人,它包含的元素有:关节、连杆、动力学参数、碰撞检测参数、运动学参数等。URDF 文件是后期算法实现的基础,轨迹规划及运动学求解都离不开 URDF文件。

喷浆机器人的外观形状不规则,为了方便机体的表示,采用圆柱体来表示喷浆机器人机械臂,圆形体的尺寸大小依据最小包络法来制定,同时为了后期碰撞检测算法做铺垫。ROS中的喷浆机器人模型的描述主要由<robot>、、<joint>等标签组成。<robot>标签作为主体标签描述整个喷浆机器人,其包含和

等标签组成。<robot>标签作为主体标签描述整个喷浆机器人,其包含和

与oint>标签。其中标签主要用于描述机器人机械臂的外观特性和物理属性,包括了形状、尺寸、颜色、惯性矩阵等;而<joint>作为连杆的连接部分,主要用来描述约束性信息和各关节的运动学属性。喷浆机器人完成模型的搭建后,为了检验模型的准确性,可以在终端输入 urdf_to_graphiz rob.urdf 命令,就会得到rob_robot.gv 和 rob_robot.pdf 两个文件,查看详细关节的连接情况,可以检验各

个关节的连接顺序以及父子杆之间的关系。

Rviz 是 ROS 兼容的一款三维模型可视化插件,需要撰写 launch 启动文件,并将喷浆机器人的 URDF 文件加载到 Rviz 的可视化平台,同时生成可滑动控制关节数值的控制台,以便调节各个关节,达到特定的姿态,如图 5-5 所示。

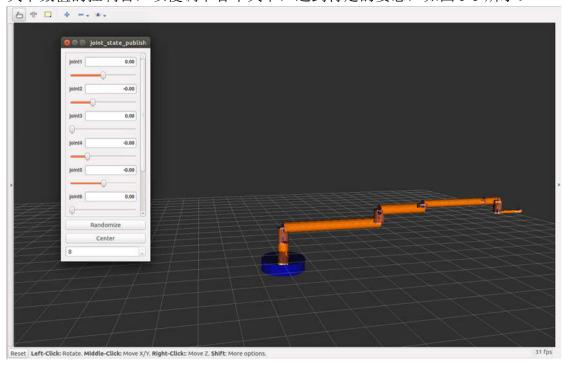
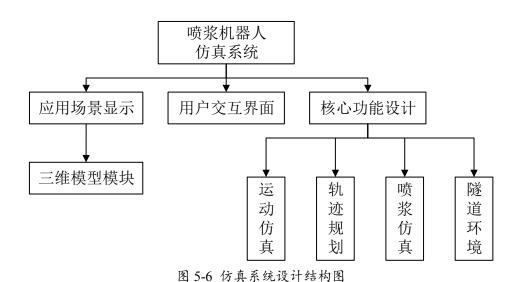


图 5-5 Rviz 平台中喷浆机器人简化模型



5.3 喷浆机器人仿真设计

根据项目的需要,本文的喷浆机器人仿真的主要功能包括:喷浆机器人在三维空间的运动学仿真、喷浆机器人喷浆过程仿真、结合隧道面的喷枪轨迹规划。 因此,本文喷浆机器人仿真设计结构如图 5-6 所示,主要功能划分成以下几大模 块:

(1) 三维模型模块

三维模型模块主要是负责仿真系统的可视化部分,其包括喷浆机器人各个关节和连杆和隧道壁面情况的显示。该可视化部分不仅仅代表各个模型的静态显示,还需要动态显示喷浆机器人的每个关在移动过程中的位置和姿态变化,同时实时显示隧道面的变化。

(2) 运动仿真模块

在仿真系统环境下,用户操控喷浆机器人在最大可达空间进行任意运动,包括单关节运动和多关节同时移动,也可以设定任务所需的关键位置一键到达,如机器人所有关节归零等。仿真系统中的所有模块是联合运行的,因此,该模块也支持接收其他模块的轨迹文件信息,通过逆运动学解算得到每个关节的变化量,或者直接接收各关节目标值,使喷浆机器人按照目标信息运作。

(3) 轨迹规划模块

轨迹规划模块中包括笛卡尔空间轨迹规划和关节空间轨迹规划。笛卡尔空间轨迹规划也是任务空间的轨迹规划,也是本文的主要内容。笛卡尔空间轨迹规划主要根据隧道面的情况和喷浆任务规划出特定的轨迹,保证喷浆范围能够覆盖所有的待喷区域的同时控制混凝土的喷射厚度。笛卡尔空间轨迹规划还包括中间点的插值,使喷浆机械臂运动连续。关节空间轨迹规划是保证关节运动的平滑性,在关节变量序列中采用三次多项式插值、五次多项式插值等算法。轨迹规划模块的输入是隧道壁面的数据。轨迹规划模块作为上层决策部分,将轨迹信息生成,供执行单元使用。

(4) 喷浆仿真模块

喷浆仿真模块包括两个部分,喷浆模型构建和喷浆面的数据更新。喷浆模型 采用适合本项目喷浆机 KC30 的 β 分布模型的。模型的基本参数采用参数化可 调。开启喷浆模式后,结合喷浆机器人喷枪末端的位置和姿态情况,计算喷射范 围内的隧道表面的混凝土累积厚度。由于混凝土的累积会影响隧道表面数据变化,根据累积厚度的大小同时更新隧道的数据。

(5) 隧道环境模块

隧道环境数据主要有两个来源:真实隧道数据导入和创建隧道表面数据。在 真实隧道进行数据采集机会有限并且总的数据量也不大。为了保证算法的稳定性, 需要一定量的隧道表面数据进行测试。那么,可以根据隧道壁面特征,模拟创建 隧道表面数据,并且隧道的凹凸程度和位置也可以根据需要设定,更加灵活。

5.4 核心功能模块实现

本小节将详细介绍每个核心功能的实现方法。由于前面章节已经详细介绍了 轨迹规划的算法具体实现过程,接下来主要介绍模型运动仿真、喷浆过程仿真和 隧道环境仿真三个部分的实现。

5.4.1 模型运动仿真实现

为了用户能够更好更方便的进行机器人研究开发,ROS 支持一种集成化的机器人研发平台——MoveIt!。MoveIt!包含了众多机器人常用的基础功能包,并提供丰富的开发接口,极大减少了开发工作量。move_group是MoveIt!的核心节点,所有的指令和服务都是通过它承接、处理和转发的。

move_group 可以从 ROS 参数服务器里面获取喷浆机器人的 URDF 模型以及 config 中的相关配置信息。move_group 与机器人之间存在着信息交流,主要的通信方式有 topic 和 action。move_group 可以获取到机器人的基本信息,包括各个关节的实时状态以及之间的转换关系,同时可以将规划信息发送给执行器。move group 作为核心节点,支持插件形式扩展功能,如图 5-7 所示。

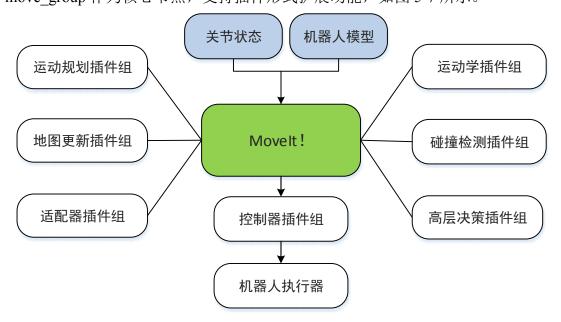


图 5-7 MoveIt! 插件机制示意图

本文基于 MoveIt!研究喷浆机器人运动控制仿真,主要步骤如下:

Step1: 配置 MoveIt!包: 使用 ROS 系统中的 Setup Assistant 工具可以生成一个默认的 MoveIt!配置包。配置过程中将喷浆机器人 URDF 模型导入,进而对相关属性进行设置调整,其包括机械臂碰撞矩阵的加载、虚拟关节的设定、运动规划组群的配置、特殊位姿的设定等。根据实际情况配置完成后,则可生成本项目特有的 MoveIt!包的配置。

Step2:编写驱动文件:根据机器人关节情况创建 controllers.yaml 控制器配置文件,用于与机器人直接交互。控制器配置文件里面包含了控制器名称、通信方式、数据类型以及各关节定义。配置完成后,创建 launch 文件将配置文件加载到 move group 节点,并启动控制器。

Step3:添加控制包:添加一个新节点叫做 rob_control,主要用于接收 move_group 产生的运动规划消息,并发送给机器人;同时接收机器人的关节实际数据,并将关节数据发送到话题/joint_states 上。机器人便可以会根据规划消息在可视化界面完成相应的动作,实现仿真测试。

结合以上的开发流程,喷浆机器人运动控制仿真软件框架如图 5-8 所示。

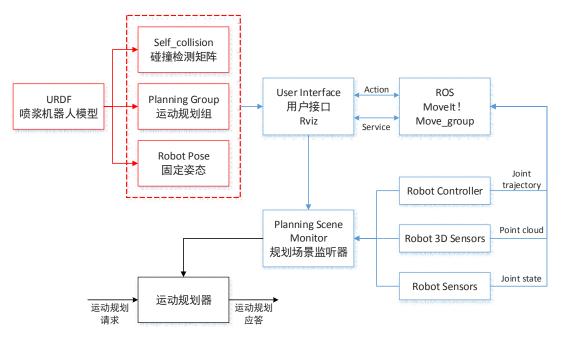


图 5-8 运动控制仿真软件框架

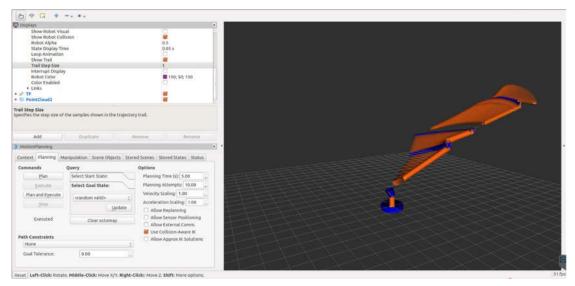


图 5-9 仿真系统喷浆机器人运动

在用户界面随机生成一个喷浆姿态,通过逆运动学解算和空间轨迹插值得到喷浆的动作序列和动作趋势,如图 5-9 所示。

5.4.2 隧道环境仿真实现

隧道环境属于规划场景的一个应用实例。隧道表面数据可以通过喷浆机器人上的激光雷达扫描真实隧道获取。然而,由于实际情况的限制,正在施工的隧道不可能随意进去扫描获取数据,导致真实隧道表面的数据往往是有限的。因此,本文的隧道环境数据来源有两个:真实隧道表面数据和模拟创建隧道表面数据。真实隧道表面数据通过激光雷达扫描正在施工的隧道并导入三维点云数据即可,便不多做介绍。接下来主要介绍模拟的隧道表面数据创建过程。

隧道表面呈现不规则的凹凸状,且隧道整体为半圆柱形状。那么通过逆向思维,将一个半圆柱面随机"挖坑",模拟隧道表面的不平整情况,获取模拟隧道表面,甚至可以人为制造特殊情况检验算法的适用性和稳定性。本文采用式(5-1)作为"挖坑"函数。

$$\Delta T = T_{\text{max}} \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^{\alpha} \tag{5-1}$$

式中, ΔT 表示某隧道表面某一位置的凹陷深度, T_{\max} 代表最大凹陷深度,d表示离凹陷中心点的距离,D表示最大凹陷范围, α 为可调参数,调整凹陷的形状,如图 5-10 所示。

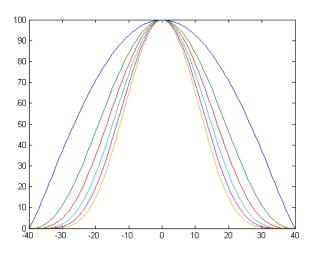


图 5-10 不同 α 值对函数形状的影响

根据需要的凹陷形状调整函数参数,达到所需的测试目的。那么,就可以根据测试需要,预设隧道的宽度。根据应用情况的不同,隧道的半径一般在在 5~8m。根据隧道的宽度来生成一个标准的半圆柱面。最初的半圆柱面是表面光滑的。本文首先根据柱坐标转换公式将将半圆柱面展开,进而对其进行"挖坑"处理。然

后合理设定"挖坑"函数的基本参数,对初始的半圆柱面进行处理。处理的方式可以随机位置或者根据特定需要在特殊的位置进行挖坑。重复挖坑操作,操作次数越多,整体凹陷的程度越大。最后,将处理完的数据根据柱坐标与直角坐标转换关系恢复到直角坐标系下,得到所需的隧道壁面数据。

5.4.3 喷浆过程仿真实现

喷浆过程仿真主要包括喷浆模型的设定和隧道表面数据的更新。喷浆机 KC30 的混凝土喷射数学模型由本文第二章可得,并且采用参数化形式,提高系统的灵活性。隧道表面数据的影响因素有喷浆机器人喷枪末端的位置和朝向以及混凝土的喷射模型。本文采用的隧道数据不是完整的模型,而是三维点云数据。所有的位置都是一个数据点,而不是一个完整的面。当喷浆机器人开启混凝土喷射时,隧道面的点云数据会随着喷枪的移动而发生变化。喷浆机器人隧道喷浆过程仿真实现步骤如下:

Step1: 喷射模型初始化: 开启混凝土喷射模式前, 初始化混凝土厚度累积模型的基本参数, 建立具体的喷射模型数学表达式。

Step2: 统一坐标系: 将隧道工作面的坐标信息和喷枪末端的位置姿态统一转换到基于喷浆机模型自身的坐标系,以模型的原点坐标系作为参考坐标系。喷枪末端基于原点的变换矩阵可根据正向运动学模型得到,变换表达式如式(5-2)所示。

$${}_{8}^{0}T = {}_{1}^{0}A {}_{2}^{1}A {}_{3}^{2}A {}_{4}^{3}A {}_{5}^{4}A {}_{5}^{6}A {}_{7}^{7}A {}_{8}^{7}A$$
 (5-2)

其中,%T表示第八个关节末端相对于原点的变换矩阵,;iA表示相邻关节之间的变换关系矩阵。由于项目前期已经完成了喷浆机器人的运动学建模及真机验证,各个关节直接的坐标转换关系可以直接通过运动学模型得到。

Step3: 混凝土厚度计算: 喷浆机械臂在不断移动,喷枪末端的位置和朝向都在不断变化。根据喷枪末端的实时位姿和隧道面数据点之间的空间几何关系,以及喷枪张角的大小,确定隧道表面被喷区域。在计算混凝土累积厚度时需要隧道壁面每个位置的法向量信息。隧道壁面凹凸不平,每个位置的法向量都不同。采用 K-邻近法可以得到每个点的法向量。K-邻近法的原理为结合最近的 k 个点,拟合成一个面,进而求出该点的法向量。已知待喷点和喷枪的位置关系、待喷点的法向量和喷枪朝向,结合本文第二章节的自由曲面上的厚度累积模型,求得被喷区域内每个位置对应的喷浆厚度。

Step4: 隧道壁面每个位置将 step3 中计算得到的混凝土厚度根据累积厚度沿着法向量方向分解到三个坐标轴上,改变对应的坐标值。更新话题/Point cloud 的点云数据的坐标值大小,同时订阅该话题的可视化平台将同时更新显示画面。

根据以上相关步骤实现喷浆机器人喷浆过程仿真,隧道表面数据随着喷浆机器人机械臂移动喷射而实时更新。图 5-11 为喷浆机器人工作图。由于该仿真主要对数据点操作,喷浆过程中不能很好的观察到表面的具体变化。因此,喷浆完成后,将喷浆后的隧道点云数据保存并导出,可供后续进一步分析。

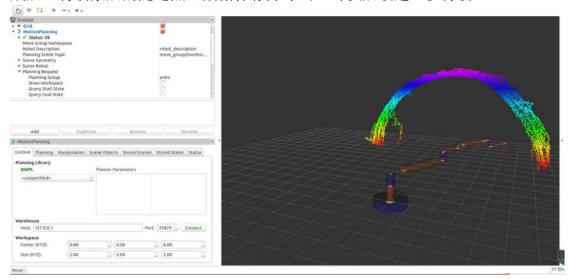


图 5-11 喷浆机器人工作图

5.5 喷浆仿真实验与结果分析

本文的喷浆机器人仿真系统主要用于测试轨迹规划算法的可行性。系统的输入是未喷浆的隧道面数据,输出是喷浆后的隧道面数据。将一个未喷浆的隧道面导入系统,展开下凹陷情况如图 5-12 所示,图中 Z 值越大表示距离隧道的中心轴越远,表面凹陷程度越大,需要填充的混凝土厚度也越大。本文对该隧道拱间面进行喷浆仿真实验,设混凝土的回弹率为 8%。具体实验步骤流程如图 5-13 所示。实验采取多轮喷浆,每轮喷浆后对喷浆面进行分析。

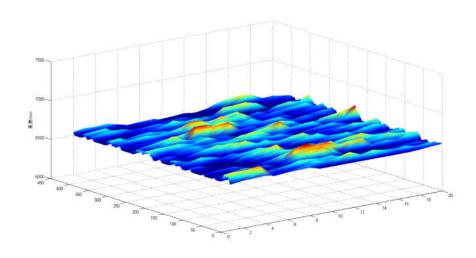


图 5-12 未喷浆的隧道面展开图

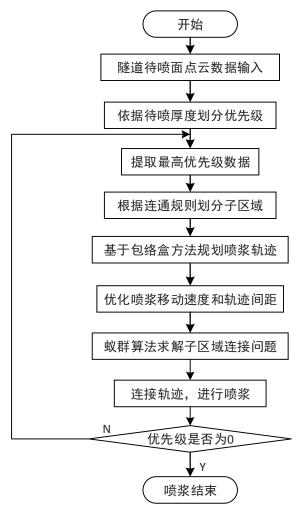
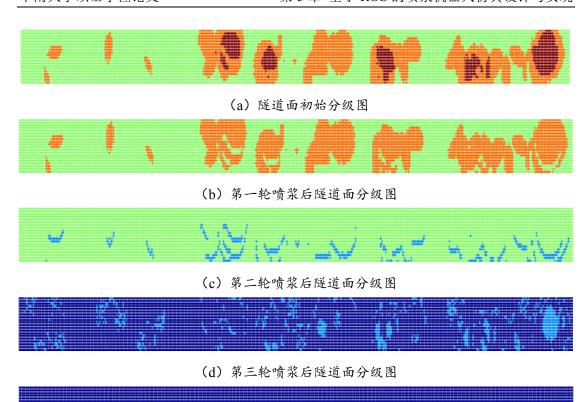


图 5-13 隧道整体喷浆流程图

隧道拱间面的点云数据输入到隧道仿真系统。根据隧道壁面每个栅格的待喷厚度划分优先级,并依据连通规则划分子区域。然后基于包络盒的方法生成每个子区域轨迹,按照规划好的轨迹进行喷浆。每轮喷浆优先级最高的区域,优先级逐级递减,直到所有的数据点都处于0级情况,完成隧道喷浆任务。

实验过程中每轮喷浆后的隧道面分级情况如图 5-14 所示,图中不同颜色代表不同优先级,具体表示情况如表 5-1 所示。从图中可以看到在喷浆过程中会对目标区域以外的地方造成喷浆作用,影响其优先级情况。由于最后一轮的期望喷浆厚度不会超过 20mm,而 0 级的允许范围达到 100mm,容许一定范围的混凝土厚度增加。因此,喷浆后的隧道面仍然满足喷浆任务要求。



(e) 第四轮喷浆后隧道面分级图

图 5-14 每轮喷浆后的隧道面分级情况图

 优先级
 颜色
 优先级
 颜色

 0 级
 ■
 3 级
 ■

 1 级
 ■
 4 级
 ■

 2 级
 ■

表 5-1 分级颜色指示表

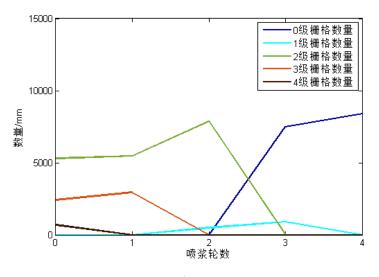


图 5-15 不同优先级的栅格数量变化图

优先级	0	1	2	3	4
喷浆前栅格数量	0	0	5293	2418	689
喷浆后栅格数量	8400	0	0	0	0

表 5-2 喷浆前后不同优先级的栅格数量对比表

根据优先级的划分,每个栅格都存在一个优先级大小。不同优先级的栅格每轮喷浆数量变化情况如图 5-15 所示。喷浆前的栅格最高优先级为 4,喷浆后所有的栅格优先级都降到了 0,具体数值如表 5-2 所示。

喷浆后的隧道面情况如图 5-16 所示。此时,隧道面整体相对平整,平均待喷厚度为 12.4mm,最大待喷厚度为 38.4mm,最小待喷厚度为-26.3mm(超出期望厚度 26.3mm),均在优先级为 0 的要求范围内,符合喷浆任务要求。在真实隧道喷浆施工中,人工操控喷浆机喷射混凝土完成一个拱间面的喷浆任务所花费时间为 1.5h。本实验对一个拱间面喷浆,总共喷浆时间为 4303.3s,符合正常隧道施工的时间要求。实验结果表明,本文的喷浆轨迹规划方案是可行性,符合隧道喷浆任务的要求。

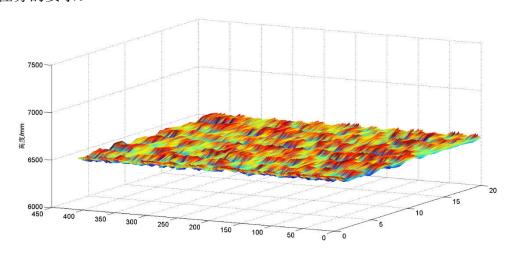


图 5-16 喷浆后的隧道面展开图

5.6 本章小结

本章主要基于 ROS 实现喷浆机器人仿真,并通过实验验证本文轨迹规划算法的可行性。首先,介绍了 ROS 系统的开发模式以及存在的优点; 其次,根据喷浆机真机参数建立 URDF 模型,供仿真调用; 再次,介绍了喷浆机器人仿真总体设计方案和和各个模块的主要功能,并详细描述了如何基于 ROS 的 MoveIt!平台实现模型运动仿真、隧道环境仿真和喷浆过程仿真; 最后,利用该系统进行隧道壁面喷浆仿真实验,实验结果验证了本文的喷浆轨迹规划方案是可行的,符合隧道喷浆任务的要求。

第6章 总结与展望

6.1 论文总结

目前,市场上尚未出现能够全自动隧道喷浆的喷浆机器人产品。喷浆轨迹规划作为隧道自动喷浆机器人的关键技术,对此问题研究具有一定价值和社会意义。本文以"隧道自动喷浆机器人研究与开发"项目为课题背景,对隧道自动喷浆机器人的喷浆轨迹规划展开研究,完成了复杂隧道壁面的喷浆轨迹规划方法研究与实现,并在仿真系统下验证了轨迹规划方案的可行性。本文主要工作总结如下:

- (1)结合喷浆机 KC30 建立混凝土喷射厚度累积模型。目前对于混凝土喷射厚度累积模型的研究极少。本文结合喷浆机 KC30 的混凝土喷射情况,分析并建立了平面喷浆和自由曲面喷浆两种情况的混凝土厚度累积模型。最后通过真机混凝土喷射实验,验证了混凝土涂层厚度累积模型的实用性,为喷浆轨迹规划做铺垫。
- (2)针对隧道喷浆任务,提出一种基于分级分区的轨迹规划方案。隧道喷浆任务实质是在凹陷程度不一的隧道壁面填充混凝土,使其与拱架基本齐平。首先,针对隧道壁面的混凝土填充问题,本文结合实际喷浆经验提出一种基于待喷厚度的分级喷浆策略,根据优先级由高到低逐级喷浆。同一优先级的数据依据连通规则划分成多个子区域。其次,针对不规则子区域,提出一种基于包络盒的轨迹规划方法。根据子区域的曲面建立相应的包络盒,进而采用平行平面切割曲面生成喷浆轨迹。再次,以期望厚度与实际厚度的差值最小为目标,优化求解喷枪移动速度和喷浆轨迹间距两个关键参数。最后,利用喷浆机器人仿真系统进行喷浆仿真实验,验证了本文轨迹规划方案的可行性。
- (3)基于蚁群算法的子区域间轨迹连接优化。在子区域喷浆轨迹规划的基础上,为了获得完整的喷浆轨迹,需要将这些独立的子区域轨迹连接起来,并且连接路径最短。本文将子区域轨迹连接问题建模为广义旅行商问题模型,采用蚁群算法求解,并与最近点连接法和遗传算法进行对比实验,实验结果证明了蚁群算法解决子区域连接问题的有效性。
- (4) 完成了基于 ROS 的喷浆机器人仿真。由于真实隧道环境实验需要结合施工方进度情况申请,存在一定的限制。为了提高开发效率和减少开发成本,本文完成了基于 ROS 的喷浆机器人仿真。该仿真采用 ROS 规定的基本通信方式,将功能模块分解成节点模式,代码复用率高且具有较好的拓展性。喷浆机器人仿真包含了三维模型显示与运动仿真、轨迹规划、喷浆仿真、隧道环境创建等功能,为算法功能和稳定性测试提供了极大的便利。

6.2 工作展望

本文主要介绍了隧道自动喷浆机器人喷浆轨迹规划方法,并结合喷浆模型开发了一套基于 ROS 的喷浆机器人仿真系统。目前喷浆轨迹规划研究所提出的一些方法和结论仍然存在些许不足和考虑不全面的地方,需要进一步深入研究,实现真实隧道下自动喷浆。

- (1)本文所采用的基于包络盒的轨迹规划方法,在喷浆时除了目标区域的混凝土填充,还会影响目标区域以外位置混凝土厚度。虽然本文采用分级策略作为弥补,但没有从根本上解决这个问题,会导致最终整体的平整度不佳,后期需要在轨迹规划方面做更深入更细致的研究。
- (2)在实际隧道工程中,喷浆效率是重要指标。由于目前缺乏相关实验条件,本文没有定量比较人工喷浆与自动喷浆的效率。后期可对同一个隧道壁面做测试,对比自动喷浆和人工喷浆的效率。
- (3)在实际的隧道喷浆中,混凝土的回弹率是一个重要因素。不同的隧道环境以及不同的位置的混凝土回弹率是不一样的。由于实验条件限制,本文没有把该因素加入到轨迹规划中,而是设置成了定值。在条件允许的情况下,在轨迹规划的同时要考虑混凝土的回弹率。优化混凝土回弹率可以极大减少相关材料的损耗以及提高喷浆效率。
- (4)目前项目中的隧道面数据不是实时扫描记录,而是首次采集后经过处理 输入到规划器,缺少反馈。后期真实隧道实验的话,每轮喷浆后进行一次扫描, 与理论数据做对比,并校正相关参数,将会使喷浆轨迹规划方案更加稳定有效。

参考文献

- [1] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.
- [2] 马建, 孙守增, 赵文义. 中国隧道工程学术研究综述[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.
- [3] 赵勇, 田四明, 孙毅. 中国高速铁路隧道的发展及规划[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 11-17.
- [4] 韩静. 中国 43 个城市加入地铁俱乐部[J]. 小康旬刊, 2017(14): 24-27.
- [5] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123-134.
- [6] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
- [7] 薄少军. 中型喷浆机器人动力学研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006.
- [8] Lin X, Xie B. An Automatic Tunnel Shotcrete Robot[C]. 2019 Chinese Automation Congress (CAC), Hangzhou, China, 2019, pp. 3858-3863.
- [9] Nabulsi S, Rodriguez A, Rio O. Robotic Machine for High-Quality Shotcreting Process[C]. Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). VDE, 2010.
- [10] Antonio J K. Optimal trajectory planning for spray coating[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994. Proceedings. IEEE, 1994: 2570-2577 vol.3.
- [11] Hansbo A, Nylen P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects[J]. Surface&Coatings Technology, 1999, 122(2-3): 191-201.
- [12] Arikan M A. Process modeling, simulation, and paint thickness measurement for robotic spray painting[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(9): 479-494.
- [13] Andulkar M V, Chiddarwar S S. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015, 42(3): 228-241.
- [14] Conner D C, Greenfield A, Atkar P N. Paint deposition modeling for trajectory planning on automotive surfaces[J]. IEEE Transactions on Automation Science and

- Engineering, 2005, 2(4): 381-392.
- [15]徐呈艺. 工业机器人作业路径规划和离线编程研究[D]. 南京: 南京林业大学机械设计及理论, 2006.
- [16]土鼓, 赵德安, 土振滨. 喷漆机器人喷枪最优轨迹规划的研究阴[J]. 江苏理工大学学报, 2001, 22(5): 55-59.
- [17]刁训娣, 赵德安, 李医民. 喷漆机器人喷枪轨迹离线优化方法[J]. 农机化研究, 2004(1): 93-97.
- [18] 张永贵, 黄玉美, 高峰, 等. 喷漆机器人空气喷枪的新模型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 226-233.
- [19]赵德安, 陈伟, 汤养. 面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 江苏大学学报, 2007, 28(5): 425-429.
- [20]夏薇, 杜铮, 于盛睿. 喷涂机器人油漆沉积率优化建模与仿真[J]. 表面技术, 2010, 39(3): 29-33.
- [21] Klein A. CAD-Based off-line programming of painting robots[J]. Robotica, 1987, 5(4): 267-271.
- [22] Arikan M A, Balkan T. Process Simulation and Paint Thickness Measurement for Robotic Spray Painting[J]. Cirp Annals Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 291-294.
- [23] Deng S H, Cai Z H, Fang D D, et al. Application of robot offline programming in thermal spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(19-20): 3875-3882.
- [24] Chen H, Xi N. Automated tool trajectory planning of industrial robots for painting composite surfaces[J]. Journal of Advanced Technology, 2007, 35(7-8): 680-696.
- [25] Chen H, Xi N, Sheng W, et al. Optimizing material distribution for tool trajectory generation in surface manufacturing[C]. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2005.
- [26] Chen H, Xi N, Sheng W, et al. General Framework of Optimal Tool Trajectory Planning for Free-Form Surface Manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Science&Engineering, 2005, 127(I): 49-59.
- [27] Atkar P N, Greenfield A, Conner D C, 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, ICRA 2005, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain. IEEE, 2005.
- [28] Atkar P N, Choset H, Rizzi A A. Towards optimal coverage of 2-dimensional

- surfaces embedded in IR3: choice of start curve[C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2003: 3581-3587 vol.3.
- [29] Antonio J K, Ramabhadran R. A framework for optimal trajectory planning for automated spray coating[J]. International Journal of Robotics&Automation, 1997, 12(4): 124-133.
- [30] Sheng W, Xi N, Chen H, et al. Surface partitioning in automated CAD-guided tool planning for additive manufacturing[C]. International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2003: 2072-2077 vol.2.
- [31] Antonio J K. Optimal trajectory planning for spray coating[C]. International Conference on Robotics and Automation, 1994. Proceedings. IEEE, 1994: 2570-2577 vol3.
- [32] Ramabhadran R, Antonio J K. Planning spatial paths for automated spray coating applications [C]. Robotics and Automation, 1996. Proceedings. 1996 IEEE International Conference on. IEEE, 1996.
- [33] Ramabhadran R, Antonio J K. Fast solution techniques for a class of optimal trajectory planning problems with applications to automated spray coating[C]. Decision and Control, 1995. Proceedings of the 34th IEEE Conference on. IEEE, 1997: 1612-1617.
- [34] Andulkar M V, Chiddarwar S S, Marathe A S. Novel integrated oflline trajectory generation approach for robot assisted spray painting operation[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 37: 201.
- [35] Chen W, Zhao D. Path Planning for Spray Painting Robot of Workpiece Surfaces[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 831-842.
- [36] Pichler A, Vincze M, Andersen H, et al. A Method for Automatic Spray Painting of Unknown Parts[C]. Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on. IEEE, 2002, 1: 444-449.
- [37]Xia W, Wei C, Liao X. Surface segmentation based intelligent trajectory planning and control modeling for spray painting[C]. International Conference on Mechatronics & Automation. IEEE, 2009.
- [38]赵德安, 陈伟, 汤养, 等. 基于遗传算法的喷涂机器人喷枪路径规划[J]. 中国机械工程, 2008, 19(7): 777-779.
- [39] 曾勇, 龚俊. 面向自然二次曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 中国机械工程, 2011, 22(3): 282-290.
- [40]张鹏, 龚俊, 曾勇, 等. 面向大曲率曲面的喷涂机器人喷枪轨迹规划研究[J].

- 机械科学与技术, 2015, 034(011): 1670-1674.
- [41]李翠明, 龚俊, 牛万才, 等. 基于改进隶属云模型蚁群算法的喷涂机器人喷枪轨迹组合优化[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(3): 387-391.
- [42]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.
- [43]王朝晖, 陈恳, 吴聊, 等. 面向飞机表面喷涂的多层次控制程序结构[J]. 航空学报, 2013, 34(4): 928-935.
- [44] Tsai M J, Lee H W, Ann N J. Machine Vision Based Path Planning for A Robotic Golf Club Head Welding System[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2011, 27(4): 843-849.
- [45]林义忠, 刘庆国, 徐俊. 工业机器人离线编程系统研究现状与发展趋势[J]. 机电一体化, 2015, 21(7): 8-10, 57.
- [46] 张利梅. ABB RobotStudio 的技术与应用[J]. 机器人技术与应用, 2011(1): 33-36.
- [47] 马兴荣. 高压静电喷涂机器人曲面变量喷涂的研究和应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [48] Neto P, Mendes N. Direct off-line robot programming via a common CAD package[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2013, 61(8): 896-910.
- [49]Bo Z, Xi Z, Meng Z, et al. Off-line Programming System of Industrial Robot for Spraying Manufacturing Optimization[C]. Control Conference. IEEE. 2014:8495-8500.
- [50]张盼盼. 面向复杂自由曲面的喷涂机器人作业规划方法研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [51]樊帅权. 喷涂机器人离线轨迹规划系统的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [52]马兴荣. 高压静电喷涂机器人曲面变量喷涂的研究和应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [53]陆保印. 喷涂机器人喷枪轨迹设计与优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [54] Antonio J K, Ramabhadran R, Ling T L. A Framework for optimal Trajectory planning for automated spray coating[J]. International Journal of Robotics and Automation, 1997, 12(4): 124-134.
- [55]陈伟. 喷涂机器人喷枪轨迹优化研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- [56] Zhou B, Zhang X, Meng Z, et al. Off-line Programming System of Industrial Robot

- for Spraying Manufacturing Optimization[C]. Chinese Control Conference, Nanjing, China, 2014: 8495-8500.
- [57] Antonio J K. Optimal Trajectory Planing for Spray Coating[J]. IEEE international conference on Robotics and Automation, San Diego, USA, 1993, (3): 2570-2577.
- [58] Zhang W, Qiu W. Automatic Tunnel Steel Arches Extraction Algorithm Based on 3D LiDAR Point Cloud[J]. Sensors 2019, 19, 3972.
- [59]熊小锋. 隧道工程初支湿喷混凝土回弹率控制施工技术研究[J]. 价值工程, 2020, 39(01): 148-150.
- [60] Powell M J. The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization without derivatives, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics[R]. Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, Cambridge England. Technical report, 2009.
- [61]谢云. 模拟退火算法的原理及实现[J]. 高等学校计算数学学报, 1999(3): 212-218.
- [62]段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 科学出版社, 2005: 25-45.
- [63]高海昌, 冯博琴, 朱利. 智能优化算法求解 TSP 问题[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 241-247.

攻读学位期间主要的研究成果

- 一、发表的学术论文
- [1] Lin X, Xie B. An Automatic Tunnel Shotcrete Robot[C]. 2019 Chinese Automation Congress (CAC), Hangzhou, China, 2019, pp. 3858-3863.
 - 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, 2017.10-至今, 项目组主要成员.
 - [2] 智能医疗辅助诊断系统, 2018.5-2018.10, 项目组主要成员.
 - [3] 无人车底层开放平台, 2017.04-2017.11, 项目组主要成员.
 - 三、硕士期间获得奖励情况
 - [1] 2018 年第十五届中国研究生数学建模竞赛三等奖.
 - [2] 2018 年第四届中国"互联网十"大学生创新创业大赛全国总决赛银奖.

致谢

岁月如梭,转眼之间三年的硕士生涯即将结束。三年虽短,对于我而言可以说是人生的重大转折点。从本科的生物工程方向跨越了大类学科转向人工智能方向,新的领域,新的知识,受益匪浅,同时也对以后的工作起到了决定性作用。在这三年内,身边的人不管在生活上,还是在学习上都给予我莫大的帮助。我很幸运能够与你们一起度过这美好充实的硕士研究生生活。在这里,我想真诚的感谢这一路陪伴我成长的师长和同学们,感谢自动化学院,感谢中南大学。

首先,我要感谢我的研究生导师——谢斌老师!能够成为谢老师的学生,我为自己感到庆幸。导师严谨务实的治学态度、渊博的学识和广阔的视野深深的影响了我。导师常常教导我做事情要有大局观,要有长远的目标,不能仅仅满足于现状,要争取做到行业领先,做有意义的事,为社会进步贡献自己的一份力。不管遇到什么问题,谢老师总是会尊重我的想法,并提出自己的看法,让我能够做出更好更正确的选择。感谢的话说不尽,在此,再次向我的导师致敬,同时希望谢老师未来的路越走越好,团队的实力不断提升,成为人工智能与机器人领域的领先团队。

感谢蔡自兴老师、王勇老师、余伶俐老师、陈白帆老师、刘丽珏老师、李仪 老师、邹逸群老师、雷琪老师、唐琎老师、高琰老师、肖晓明老师等老师在研究 生期间给我的指导和帮助,谢谢各位老师,衷心祝愿老师们工作顺利,身体健康!

感谢宋迪师兄、何小宇师兄、梁照栋师兄、尤作师兄一行一行的代码将一个 刚接触该领域的我慢慢培养起来。在 104 实验室一起测试、一起通宵、一起写代 码日子真的很珍贵。感谢李沁师姐,生活学习都给我了许多指导。

感谢同门同届的张文婷和秦觅,有缘从三个学院聚集到一起,组成林秦张吐槽小组。三年来,一直在同一个项目中共同成长,不管遇到什么困难,我们共同克服。感谢你们,希望你们以后的路越来越顺利,不管在哪个领域,都能风生水起。

感谢同届的其他同学,朱立军、陈春蓉、林剑清、王润宇、何志远、吴喆、王艳东、谭世洋、赖普建、朱湘源、覃若彬、邵玄雅、肖志红、严孝鑫、袁典、张泳祥,我们正儿八经的17智能所小伙伴一起参加秋招,一起组织和参加智能所活动,非常感谢能够遇到你们这群好伙伴。感谢师弟丘文杰、程清、徐勇、彭哲、赵新宇、吴迪、孙铭蔚、万思远,项目拼命赶,桌游无限玩,有你们在,一切皆有可能。

还有,特别感谢我的父母,在我漫长的求学之路上给予我持之以恒的鼓励与 支持。感谢你们多年来的关心与爱护,很快我也要告别学校的生活,踏入社会, 我将不会辜负你们的期望,闯出自己的一片天。

最后,感谢论文审阅老师,是你们用辛勤的汗水为我们的论文把最后一到关,再次向老师们致以最诚挚的谢意!