



北京建筑大学

BEIJING UNIVERSITY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

分类号 P208

学 号 1108160213003

学 位 论 文

基于三维点云数据的管网自动建模研究

Research on Automatic Pipe Network Modeling Based on 3D Point Cloud Data

张岩岩

指导教师姓名 庞蕾 副教授 北京建筑大学

王晏民 教授 北京建筑大学

申请学位级别 硕 士 学位类别 工学硕士

专 业 名 称 摄影测量与遥感

年 级 2013 级 论文答辩时间 2016 年 6 月

学位授予单位和日期 北京建筑大学 2016 年 7 月

答辩委员会主席 职称

论文评阅人 职称、 职称

北京建筑大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了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，也不包含本人或他人为获得北京建筑大学或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签字：

日期： 年 月 日

北京建筑大学硕士学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于北京建筑大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文纸质版和电子版，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，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：

年 月 日

校内导师签名：

年 月 日

校外导师签名：

年 月 日

摘 要

管道是城市建设中重要的基础设施，它承担着物质传送以及废物排泄的功能，是保证人民正常生活的经脉。管网系统的建设与完善为城市的规划、建设、管理提供有力的决策支持。传统的二维管网空间表现力差、空间查询分析能力缺乏，无法有效表达复杂管网模型，已经不能满足现代城市中工厂管理及城市的规划建设需要。因此，管道的三维真实模型重建是一种迫切需求。相比于传统点测量获取管道数据进行三维重建，基于三维激光扫描手段能够全天候、高精度的获取管道数据。

三维激光技术是近几年来迅速发展起来的一项高新技术，已经成为一种获取真实三维坐标数据不可或缺的手段。激光雷达扫描系统能够在短时间获取高精度海量点云，数据量从几个 G 到几百 G，甚至达到 TB 级大小。因此如何快速高精度的处理扫描的点数据成为激光雷达技术发展及应用的关键。然而点云数据的无序性增加了处理难点，本文以现代化工厂及城市建设应用为出发点，基于扫描管道点云数据为研究对象，进行三维管网模型重建研究。

目前，管网建模技术主要是基于手工或标准连接件的半手工建模，而三维管网的全自动建模存在建模过程复杂、效率低、模型质量差等不足，针对以上问题，本文提出了一种直接基于点云数据进行三维管网自动重建的一套流程。主要通过分割复杂管网数据进行管道参数估计，然后将建模后的单个管道进行综合管道拓扑重建。本文算法过程主要分为四个步骤：管道点云数据分割、单个管道参数化、管道间拓扑分析、管网参数模型的重建。

首先，根据管道表面点特征相似的特点，本文提出了基于点云数据局部特征约束进行空间欧式聚类分割单个管道点云数据，去除非管道数据。将复杂管网模型建模简化为单个管道建模，有效的降低了建模的复杂度。单个管道参数化过程分为管道中心线特征点提取、管道参数拟合及突变检测。本文采用 L1-Mean 算法提取管道骨架线作为中心线特征点，沿着中心线方向做切片拟合管道数据，最后对于有突变的管道根据几何投影法进行突变检测。

在提取单个管道参数后，需要进行必要的管道拓扑分析，主要包括同一管道检测和交叉管道检测。

管网参数模型重建过程中，本文提出了一种基于管道路径扫略、形体放样及布尔运算的复杂三维管道模型自动生成算法。根据截面形状参数曲线，运用图形变换，沿路径确定内插截面法线实现管道路径扫略三维模型构建；形体放样则是以放样截面间以各自顶点组成三角形为基元的小平面，来构造管道表面，采用逼近方式拟合三维管道的整体形状；布尔运算的联合、交、差几何计算实现管网交叉贯通复杂模型的三维建模。

本文的算法和技术构成了一个可自动利用管道系统的大量激光雷达点云数据，生成

三维管网模型的完整处理流程。通过实例验证，表明了该方法具有一定的鲁棒性，能够准确、高效地实现复杂管网三维模型的构建。

关键字:三维管网；点云；模型重建。

Abstract

As the important urban infrastructure, pipeline bears people's daily life by material transformation and waste excretion. Construction and improvement of pipe network provide strong support for our decision in urban planning, construction and management. The traditional two-dimensional spatial network cannot satisfy our needs for city planning and construction management and factory management in the modern urban area because of its poor spatial performance, lack of spatial query analysis capabilities and ineffectively complex network model presentation. Thus, it is urgent to rebuild the real three-dimensional model of the pipe. The 3D laser scanning can acquire pipeline data in all-weather and high-precision means relative to traditional point measurement.

Developed rapidly in recent years, 3D laser scanning has become an indispensable means to obtain real three-dimensional coordinate data. Laser radar scanning system is capable of obtaining high precision massive point clouds in a short time. The amount of data arranges from several G to several hundred G, even to the level of TB size. So it is critical for laser radar technology development and applications in terms of how to proceed the scanned data precisely. However, the disorder of the point cloud data increases the processing difficulty. We study how to reconstruct the three-dimensional model of the pipe network from the perspective of the point cloud data for factories and urban modernization construction applications.

Currently, the network modeling technique is mainly based on manual or semi-manual modeling standard connectors, and the automatic three-dimensional pipe network modeling could be insufficient in modeling complex, inefficient, inadequate and poor quality of the model. To solve the above problem, we propose an automatic process of the pipe network reconstruction based on the point cloud data. In this process, we first estimate the parameter of a single pipe by dividing complex data of the pipe network, and then reconstruct the comprehensive pipeline with the modeling single pipe. In this paper, the process of the algorithm consists of four steps: pipeline point cloud data division, single pipe parameterization, analysis topology between the pipe networks, and reconstruction of the pipeline model parameters.

First, according to the similar characteristics of pipe surface points, this paper presents a method of splitting into a single pipeline and removing data other than pipeline by initial spatial clustering based on the local feature point cloud data space constraints. Complex pipe network is simplified into a single pipeline to model, effectively reducing the complexity of modeling. The process of parameterizing a single pipeline consists of three steps, feature point of pipeline centerline extraction, pipeline parameter fitting and mutation detection. In this paper, L1-Mean algorithm is used to extract the pipeline skeleton. Then, we slice the data to fit pipeline parameters along skeleton direction, and finally do the mutation detection for the pipeline with mutations based on geometric projection.

After extracting the parameter of the single pipeline, we need to make the necessary

pipeline topology analysis, including the same pipeline detection and cross detection.

In the process of reconstruction of the parameter model, an algorithm for the generation of complex pipeline model based on sweeping, lofting and Boolean operations was proposed. According to parametric curves of the sectional shape, we determine the normal of the cross-section using graphics transformation. Then we can realize the model construction based on sweeping along the path. Loft constructs the pipeline surface with triangle plane composed of vertices of the loft sections, using the method of approximation to fit the overall shape. the construction of three-dimensional model for the complex pipe network which cross through each other by using Boolean operations union, intersection and subtraction operation.

In this paper, the algorithms and techniques constitute a complete process .that can automatically use a large amount of point cloud data of pipeline system to generate three-dimensional model. By instance, our result show that the method has some robustness, and it can construct complex 3D pipeline model accurately and efficiently.

Keys: 3D pipe network, point cloud, model reconstruction.

目 录

北京建筑大学硕士学位论文原创性声明

北京建筑大学硕士学位论文使用授权书

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容及技术路线	4
1.4 论文的组织 and 安排	5
第 2 章 三维管网模型建模技术	7
2.1 三维管网建模技术概述	7
2.2 管道数据采集方式	8
2.3 常用的三维管网建模技术	9
2.3.1 基于传统测量手段三维管网建模技术	9
2.3.2 基于现代激光雷达测量手段的三维管网建模技术	10
2.3.3 常用的点云管网建模软件	11
2.4 本章小结	12
第 3 章 点云管道参数提取	13
3.1 数据预处理	13
3.1.1 管网点云数据滤波去噪	13
3.1.2 管道点云数据的分割	15
3.2 管道参数提取	18
3.2.1 管道数据骨架线提取	18
3.2.2 管道切片拟合半径与圆心	20
3.2.3 突变检测	22
3.3 本章小结	23
第 4 章 管网全自动建模方法	24
4.1 管网建模算法	24
4.1.1 形体沿路径扫略算法	24
4.1.2 形体放样算法	25
4.1.3 布尔运算	25
4.2 同一管道检测	26
4.3 交叉管道检测	26
4.4 管网模型重建	27
4.4.1 直线管道建模	27
4.4.2 弯曲管道建模	28

4.4.3 交叉管道建模	30
4.5 本章小结	32
第 5 章 管网建模实验的设计与实现	34
5.1 总体设计	34
5.2 管网自动建模流程	34
5.2.1 实验点云数据来源	34
5.2.2 管道点云数据分割	35
5.2.3 单个管道参数化	36
5.2.4 管网模型自动重建	38
5.3 实验结果分析与评价	39
5.4 本章小结	42
第 6 章 结论与展望	43
6.1 结论	43
6.2 展望	43
参考文献	45
附录	50
致 谢	51

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,随着现代城市的迅速发展,现代城市中工厂的管理及城市的规划建设中国工厂设备的整修及扩建越来越频繁。然而,在许多情况下整修的结果不一定记录在工厂的设计图上,从而导致管网的相关数据资料不完整或者与实际的现状出入较大。从这个角度来说,在工厂的发展建设阶段,现有的设备和设计部门的新创意之间的矛盾会日益突出,这无疑会导致额外成本和劳动力的增加与浪费,急需新的技术和方法来高效地管理工厂的设备。如图 1-1 左图所示现代化的工厂具有结构复杂、体积庞大的特点,传统的图纸无法直观地表现出工厂中各设备的空间关系,在工厂的设计、改建、检测过程中有很大程度的限制^[1]。而且对于工厂设备来说,管道系统占的比例最大。与二维管道相比,管道的三维模型能直观的描述管道间纵横交错、上下起伏的空间关系,具有较强的立体感和逼真感,有利于全面真实地反应工厂管网的分布状况,因此研究三维管道的建模对于管网资料的管理与实际应用具有重要的意义,三维管网数据的管理以及建模技术的研究也已经受到人们广泛的重视。



图 1-1 管网现场图
Fig.1-1 The pipe network site map

三维激光扫描是迅速发展起来的一项新的测量技术,作为一种获取真实三维坐标不可或缺的手段,激光雷达扫描系统具有在短时间内迅速获取海量的高精度三维点云数据的特性,这是其他测量技术所不具备的,其在三维模型重建方面有无可替代的优越性,因而近年来很多行业领域的三维重建工作都是采用三维激光扫描仪来完成(如图 1-1 右图所示)。此外,激光具有较强的方向性以及反射速度为光速等特点,因此现场光照条件等环境因素对它的影响较小,对于比较大型的物体或现场的测量效果很好,能够为建立大型管网的数字化模型提供了更加高效、准确的途径和方法。利用雷达扫描系统可以从不同视角获取大量的高精度的三维点云数据,根据点云数据的特点进行一些后续的模式重建操作,可以相对容易的快速完成工厂 3D 管网模型的重构过程。这与传统建模方法相比效率以及精度有很大提高。利用现有工厂的激光扫描点云,可以重建工厂设备的竣工模型,则在改建和管道设备的规划阶段可以预先检查以避免与旧设备发生冲突。

目前直接利用三维激光扫描数据完成三维管网模型的重建存在很多困难。首先激光

扫描数据具有数据量庞大的特点,而且当扫描比较复杂的物体时,经常会包含大量的噪声点,尤其在对工厂进行三维激光扫描数据采集时,由于工厂环境复杂导致的遮挡部分点云数据的缺失等都为管网模型的重建工作带来了不便和困难^[1]。采用手工建模的方法重建三维模型虽然可以人为的解决数据的不完善的问题,但是却是非常耗时和昂贵的。国内外的几项研究已经提出了基于激光扫描点云数据的管道建模系统。然而,这些算法中有些使用不规则三角网构建几何模型,转换成计算机图形学中最通用的三角网格模型,多为视觉意义上的展示,但不能提供模型的特征参数。有些对管道点云数据进行几何特征参数提取,利用三维符号库等功能将管道进行参数化,最终实现批量的三维管网模型的重建,但这种方法具有一定的局限性。

基于三维管网在实际生活中的重要性以及三维管网模型重建一系列的问题与困难,本研究的目的是把激光雷达技术的一系列优点与管网数据身具有的特点相结合提出一个可以从工厂的地面激光扫描数据重建三维管网模型的一套流程。重建的过程主要分为四个步骤:管道点云数据分割、单个管道参数化、管道间拓扑分析、管网参数模型的重建。该方法克服了由于原始点云数据不完整等质量问题,由于数据的缺失,导致无法直接提取出一根完整的管道为管网模型的重建。本论文结合国内外的研究现状就管网建模关键算法进行进一步的研究。并使用一个真实工厂的大规模激光点云数据对算法进行建模测试,并对点云数据与建成的管网模型的拟合精度进行残差分析。

1.2 国内外研究现状

在基于三维激光点云数据的管道模型重建方面,国外起步较早,近年来已经有不少学者对基于点云数据的管网建模方法做了大量的研究工作,并且取得了不错的研究成果。

Masuda 等人^[3]提出了一种能够从工厂的扫描数据识别平面和圆柱的方法。然而,它需要扫描点扫描仪的反射强度的组合。贝尔顿等^[4]和 Rabbani 等^[5]提出的方法是对扫描的点云数据进行分类,使用协方差分析和基于法向区域生长把工厂扫描数据分离到这些平面和圆柱面上,但是这种方法不能识别拐弯处和交叉处以及管道之间的连接处等。Kazuaki Kawashima^[6]等提出一种应用于石油钻井平台和化工厂的大规模扫描数据的算法,该算法可以自动识别管道元件中的直管及连接部件,其中包括拟合管道邻接激光扫描点云的连接关系系统。普通基于区域增长和圆柱曲面拟合可以提取管道的所有可能的地点,包括直管,弯管和交叉处。跟踪的管道系统的轴使这些元件和它们的连接关系的位置的识别。仅使用点云,识别算法可以以全自动的方式来执行。这些研究都提出了自己的对从激光扫描点云识别管道系统的方法,但一般只能用于简单管道的提取及建模工作。

Rabbani 等^[7]提出了根据从同一位置扫描的点云与拍摄的照片重建三维模型的方法。然而,该方法需要一对点云数据和与扫描仪相同位置拍摄的相片。由于管道系统占据工厂的广泛区域,多站扫描然后匹配点云覆盖工厂的整个形状。因此,这些算法不能应用

于配准后的点云和强度，也即这种算法不能应用于从多个扫描站生成的匹配点云。

Aurelien 等^[8]提出了一种使用先验 CAD 模型对工厂的点云数据进行圆柱拟合的方法。然而，对于具有相似半径和轴向的 3 维圆柱模型，必须人工手动放置到相对应管道点云处，工作量较大。约翰逊等^[9]提出了一种使用旋转图像对点云数据匹配数据库中的 CAD 模型方法。然而，由于管道的长度不固定，所以很难制备精确的三维直管模型。

Namatame 等^[10]提出一种基于曼哈顿世界语法假设下识别管道点云的方法。但该算法仅可以识别的管网的直管部分。El-Harawany 等^[11]提出了一种基于本征分割的线性特征提取、圆柱拟合来识别路边电线杆一样的圆柱的方法。这种方法如果应用到工厂设备的建模中也只能用于直线管道提取。

Vosselman 等^[12]提出了一种基于三维 Hough 变换的方法，但只可以识别管道系统直管数据。李某等^[13]提出了一种基于 Voronoi 图的识别直管，弯管和交叉管的方法。然而他们的算法要求输入的点云数据只能是管道数据，不可以包含除管道之外的任何其他如电线杆、墙或支撑部件等数据，所以不符合实际情况。

Marshall 等^[14]提出的非线性最小二乘的方法把扫描对象分割成球体、圆柱体、圆锥体和圆环。但是该方法只可用于比较简单的对象，对于互相缠绕的复杂管网数据是不适合的。Patil 等^[15]中提出根据原始点云数据估计三维管网中管段的圆柱参数，然后根据提取的参数构建计算机辅助设计（CAD）管道模型。建模过程分为三个阶段：（1）激光雷达点云的分割，（2）检测识别管道元件（3）圆柱匹配和参数估计。圆柱匹配阶段的最终输出给所估计的方向，位置，和每个检测的管元件的半径。此算法的重要贡献在于它能够在噪声存在情况下准确地估算出圆柱方向，而不需要较正确的源点。确定了圆柱轴向之后，接下来根据 3D 圆柱点云在垂直于圆柱轴线的平面上的投影确定其半径和圆心。确定了这些参数的近似值之后，使用每个检测到的管道段的估计参数生成管道系统的 CAD 模型，完成圆柱匹配。Qiu^[16]提出一种把点云数据投影到高斯球通过检测最大圆法向的方式估计圆柱的轴向，拟合圆柱重构直管模型，然后检测直管之间的连接，重构管件连接件，从而成完整的管道。

Lee^[17]提出一种采用圆环面管道面局部的点云数据、获得管道半径的方法，为了提取高密度的管道中心线特征点数据，沿着管道面的法向量的方向把管道面上的数据向管道的中轴线方向移动半径距离，拟合中心线，进而重建出管道模型。

在国内，对于基于三维激光扫描技术的管网模型三维重建工作虽然起步较晚，但是也取得了大量的研究成果，并且随着三维地理信息系统的发展，越来越多的研究者投入到三维重建的相关工作中，不断拓宽管网模型重建的思路、完善建模的方法。

文献[18]试图通过把管道的重建问题转化为成为探测圆的问题。然而，他们的工作是建立在假设管道对象是垂直于或者平行于地面的，这种假设不具有普遍性。

文献[19]对于从散乱点云数据中重建管网模型是采取对点云数据进行局部 RANSAC 检测，并使用标准件弯头连接管道生成管网模型。这种方法虽然实现了管件

的连接,但仅能处理某些预先定义的尺寸和形状的管件。

李岸等^[20]基于原始点云数据,直接提取管道面截面线及其半径,获得中心轴线的点列。但这种算法局限于对等半径管道点云数据进行处理,而且只提及了单个管道的建模方法,并没有涉及到复杂管网的建模研究。

孙亮^[21]龚友平^[22]等提出一种基于种子点的管道切片方法,种子点的选取根据管道方向而不断变化,通过切片的过程获取了管道截面轮廓线及中心线进而重建管网模型。

有很多三维点云数据处理软件也都加入了管道建模这个功能。现在大量的商业软件可以交互式的构建管道模型,有的软件投影点云到高斯球,通过投影圆来把具有相同方向的点云根据位置分成不同的基元、通过检测基元类型生成完整模型。但是这些软件经常需要大量的手工操作。部分软件如 Cyclone、RealWorks 等自动化建模对管道数据的质量要求也较高。

上述文献中,主要的建模方法大体分为两类,第一类是依据算法直接对点云数据进行三维圆柱拟合,这类研究比较普遍,一般都需要构建先验模型,第二类是先对点云数据进行分割,然后根据不同管道元件进行圆柱拟合完成模型的构建,这种管网重建的研究工作比较稀少,关于这种建模方式的现有研究基本上也仅是利用分割把不同的管道元件进行区分,后续的工作还是进行圆柱拟合,对于那种由于遮挡等引起的点云数据的缺失或数据稀疏的情况没有针对性的研究。而且国内大部分研究人员是针对单个管道进行建模研究,并没有对整个管网的建模进行研究。所以本文提出一种自动分割单个管道,提取单个管道参数进而完成管网自动建模的方法。本文的算法和技术构成了一个利用管道系统的大量激光雷达点云数据,自动构建三维管网模型的完整处理流程。

1.3 研究内容及技术路线

本文根据管道的特点,以三维激光扫描的管网的点云数据作为研究对象,在对国内外管网建模方法研究的基础上,针对不规则三角网三维模型的自动重建以及切片法等拟合管道参数的半自动重建存在的不足,提出了一种基于管道参数提取的三维管网模型的自动重建方法。重点研究了单个点云数据的分割、骨架线提取、管道参数拟合、各类型管道模型的构建等。主要研究内容有以下几个方面:

(1) 单个管道点云数据的分割,根据管道点云数据的特点,基于点云数据局部特征约束进行空间欧式聚类分割单个管道点云数据。

(2) 管道骨架线提取研究,比较了水平集法、基于拉普拉斯微分算子的提取算法、L1-中值法等骨架线提取的算法,根据管道数据的特点选取了 L1-中值法完成骨架线的提取。

(3) 管道参数拟合,将管道面上的散乱点云数据垂直其骨架线进行切割,对切割后的数据块进行拟合圆柱,根据微分几何理论就可以得到拟合的圆柱面的半径以及管道的中心轴线的点。沿着骨架线的方向依次拟合圆柱面,就可以得到所有管道的半径以及中心轴线。

(4) 管网模型重建，对比了目前常见的三维自动构模的算法，结合骨架线提取，给出了一种根据拟合的管道的半径以及中心轴线，利用扫掠和放样的方式完成直管模型、弯管模型的重建方法，并且利用布尔运算解决了交叉管道的贯通等问题。

(5) 基于以上的研究成果，以 Visual Studio 2013 作为开发平台，利用 C++ 语言编写，结合 Direct3D 渲染技术实现管网模型的显示。最后以两个石化工厂的管网三维点云数据作为实例应用，对工厂内的管道进行了三维管网模型的重建，实现了管网的自动建模，验证了以上理论与方法的可行性与实用性。

根据本文的研究的对象以及研究的主要内容，本文的技术路线如图 1-2 所示。

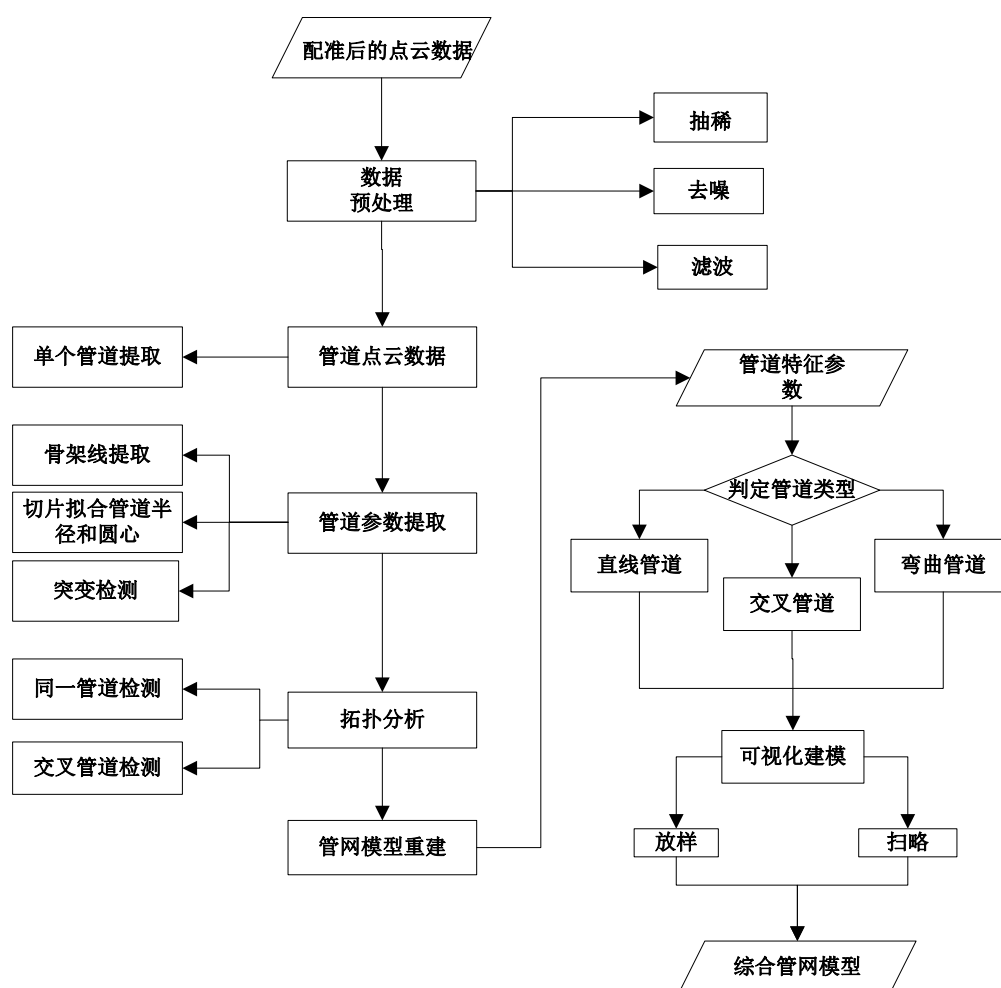


图 1-2 技术路线图

Fig. 1-2 Technology route

1.4 论文的组织 and 安排

本文是在分析当下三维管道特点和三维模型构建理论的基础上，针对基于地面激光雷达所获取的模型点云数据，对管网模型的自动重建技术进行了系统研究。为详细阐述管网模型重建算法，本文将配准后的点云数据作为输入数据，系统的讲解了算法的主要流程，包括点云数据滤波去噪、管道数据分割、点云管道参数提取、管网模型自动重建。

在进行了理论验证后，使用 C++ 语言编写实现该算法进行算法试验验证。下面介绍论文的主要章节内容与结构：

第一章是绪论。全面介绍了本篇论文的研究背景及研究意义，查阅国内外文献，对比了国内外研究的相关技术，提出了本文研究的主要内容与技术路线。

第二章是三维管模型建模技术概述。概略介绍了管道建模的技术以及管道数据的采集方式，重点介绍了基于传统测量方式管网重建的技术以及基于现代激光扫描的三维管网重建技术。

第三章是点云管道参数的提取。针对地面激光雷达获取的点云数据，分析了管道点云数据的特点，介绍了几种点云数据滤波与去噪方法，选择适合本文算法的滤波及去噪方法。对处理后的点云数据提出了一种简单高效的管道分割方法。对比几种骨架线提取算法，重点介绍了基于骨架线提取的单个管道参数化方法。

第四章是管网全自动建模方法。主要介绍了基于管道路径扫略、形体放样及布尔运算的复杂三维管道模型自动生成算法。详细介绍了单个管道间的拓扑分析，包括同一管道和交叉管道检测，最后重点介绍了直管、弯管和交叉管道的模型重建方法。

第五章是管网建模实验的设计与实现。基于 C++ 语言设计实现了本文提出的管网模型自动重建算法，并系统的进行了管网模型重建关键步骤的实验，介绍了该建模实验所需要的数据，展示了主要过程的实验效果图，最后，对该算法获得的管道模型进行重建偏差分析与评价。

第六章是结论与展望。对论文的研究内容与研究方法、研究过程进行了回顾与总结，阐述了研究取得的成果并对现存的问题与不足进行分析为下一步的研究做了展望。

第2章 三维管网模型建模技术

2.1 三维管网建模技术概述

管网是由各种元件组成，这些元件在三维管网模型中称为三维管件，在建模过程中首先要确定管件的类型，再对其建立三维模型。管件分为很多类，有弯头、三通、四通、法兰、弯管类、异径类等^[23]，在管网三维重建过程中，不能完全按照管件的分类来进行单独建模，因为有些形状比较复杂的管件可以看成是简单管件的组合，可以通过分别创建简单管件的三维模型来实现管网模型的构建。本文的研究中，归纳了这些管件的异同点，提出了一种通过直线管道、弯曲管道、交叉管道三种类型模型的重建完成综合管网模型重建的过程。

直线管道是管网中最常见的组件，具有形体简单、长度较长的特点，在进行数据采集的过程中，由于遮挡等问题会出现属于同一条管道的数据被误判为两条单独的管道数据的情况。所以，在直线管道建模的过程中会涉及到同一直管的检测问题，也即通过中心轴线和管道半径确定是否为同一条管道，如图 2-1 a)图所示。

本文的交叉管道指的是三通、四通等的多根管道汇集的地方。在建模的过程中涉及到交叉管道检测的问题，即判断管道交叉点的位置所在，如图 2-1 b)图所示。

管道从半径是否相同来分又可以分为等径管和异径管。异径管作为管网中常用的连接配件，在建模过程中涉及到突变检测的问题，即确定半径发生变化的位置，如图 2-1 c)图所示。

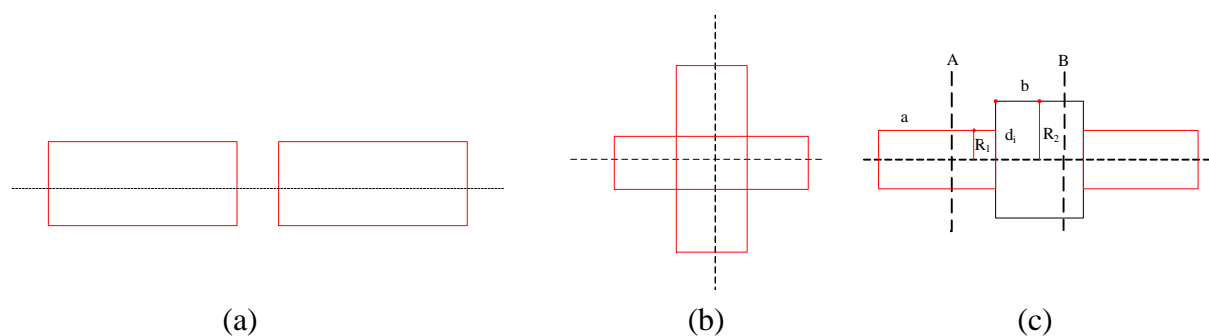


图 2-1 管件结构示意图
Fig. 2-1 Pipe structure diagram

管网的三维模型可视化相比于传统二维模型而言，其优势主要表现在空间位置关系能够进行立体表达，有利于管理与维护人员进行分析维护，有利于现代化工厂建设。目前对于管网的三维模型重建常用的方法主要分为三类：利用三维建模软件的手动交互式建模、基于 GIS 软件的自动建模、基于数据特点进行二次开发实现的模型重建^[24]。

(1) 基于三维建模工具的手动建模

基于三维建模工具的建模方式是当前很多工程项目中使用较为普遍的方法。现阶段常用的三维建模软件包括软件包括 MultiGen Creator、SketchUp、AutoCAD、3dsMax 等

^[25]。这些建模软件包括了多种专业的选项及插件，能高仿真的再现管网的模型结构。这种方法相对比较主流的原因还在于它可以以数据集的方式很方便的与 GIS 功能软件相结合。但是，基于三维建模工具的建模方式的不足之处在于它费时、费力，成本也相对较高。

（2）基于 GIS 软件的自动建模

传统 GIS 软件主要针对二维数据进行可视化浏览分析，面对三维数据分析的需求，逐渐支持对三维模型的重建及可视化分析，如 Google 的 Google Earth 、ESRI 的 ArcGIS、伟景行的 CityMaker、超图的 SuperMap 等 GIS 行业软件。但 GIS 软件的优势在于分析数据，对数据的表达较为粗犷，对场景的真实性表达较差。

（3）基于数据特点进行二次开发实现的模型重建

根据数据特点进行二次开发构建模型，需要开发人员对数据特点有一定了解，对不同数据类型进行不同形式的开发重建。此方法的好处是不需要进行底层开发，速度快。但对平台依赖性较大，需要熟悉开发平台环境，一般利用 auto CAD 、Microstation 等进行开发。

2.2 管道数据采集方式

管道的三维空间信息是管网模型建立的基础。随着测绘技术的进步，管道数据的采集方式越来越多样化，在实际的采集过程中可以根据测区的基础条件和实际情况选择合适的测量方式。目前管道数据主要的采集方法有以下几种：野外实地直接测量、数字摄影测量、原有数据源的数字化、三维激光扫描仪获取三维数据^[27]。在最初建立管道系统的时候，主要是通过数字化仪和矢量化软件对现有的纸质管道资料扫描进行数据采集。随着测量仪器和方法的进步，数据采集转到野外测量，一般通过全站仪、水准仪、GPS 等方法获取管道特征点的空间坐标，然后编辑属性导入到地理信息系统。这种基于传统测量手段的数据获取方法虽然能够进行三维模型重建，但无法避免其成本高、数据处理周期长的缺陷。

三维激光扫描技术是近几年来迅速发展起来的一项高新技术，作为一种获取真实三维坐标数据不可或缺的手段，激光雷达扫描系统具有在短时间内迅速获取海量的高精度三维点云数据的特性，这是其他测量技术所不具备的，其在三维重构方面有无可比拟的优越性。表格 2-1 是三维数据获取方法的对比：

表 2-1 三维数据获取方法的对比

Table 2-1 the method contrast of 3d data acquisition

获取方式	数据精度	测量速度	成本	采集数据难易程度	应用范围
野外测量	非常高	很慢	很高	困难	小区域范围
数字摄影测量	很高	比较快	比较高	容易	大工程项目
地图数字化	不能获取 三维数据	很慢	低	困难	中小比例尺 地形图
三维激光扫描仪	很高	很快	非常高	容易	各种范围

2.3 常用的三维管网建模技术

三维管网建模技术是热点也是难点，其技术根据数据获取手段的不同可以分为以下两种建模技术。

2.3.1 基于传统测量手段三维管网建模技术

随着用户对三维建模工具要求的增高，涵盖 CAD 在内的经典的建模软件已经得到了长足的发展。三维建模技术至今经历了，现在造型方法已然从仅从几何的角度出发、忽略尺寸、材料等非几何信息的线框模型、表面模型和实体模型发展到特征建模、行为建模^[26]。（如图 2-2 所示）。传统的参数化建模一般指对于形状结构可以用参数来确定的对象，赋予不同的参数值，可以驱动生成对象的模型参数化关键是几何拓扑关系的确定，一般采用半自动化人机交互式进行模型参数化，但有些三维模型的建模仍需借助三维建模软件进行。利用目前流行的三维建模软件将不同类型的管道对象（弯头、三通、四通）事先按照 1:1 的比例创建三维仿真模型，并且给每一类模型对应一个编号，保存为一般软件能够识别的格式。然后结合三维地理信息软件通过空间位置信息进行自动批量创建。例如基于 Skyline 的三维管网建模技术是在已知二维管道图层的前提下，批量提取图层中的每条管道的起始点，以此确定管道的位置以及管道的长度，然后根据管道的半径，对三维管道图层进行参数设置，完成三维管道模型的重建。瞿畅等基于 WTK 进行三维管网的虚拟设计，在 3DMax 平台上生成三维模型^[27]；这些研究一般只是对已建好模型的导入式建模，这种建模方法虽然提高了三维模型构造速度，但自动化程度低、灵活性较差，管道的显示过程中耗费大量的时间，而且随着数据量的增大，加载连接件的增多，程序运行缓慢。而事实上，也不可能创建足够多的模型以满足所有需求^[28]。

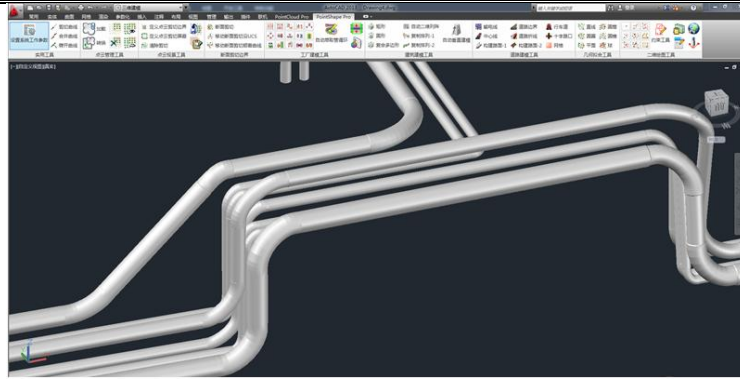


图 2-2 CAD 批量重建三维管网模型

Fig.2-2 Batch pipe network model reconstruction by CAD

国内近些年来一些专家学者对于三维管道的自动建模做了深入的研究。文献^{[29][30][31]}基于 OpenGL 函数对三维地下管道可视化进行了研究,提出了一种简单有效的分段推算模型的计算方法;中国农业大学杨冠军、陈洪等基于 ArcGIS Engine 进行二次开发,利用 Triangle Strip 来逼近圆柱体面,研究分析了三维管网设计与实现^[32]。朱合华^[33]从基于切片建立三维几何模型思路出发,采用了三角面片来构造类圆柱面,并采用 TIN 模型表达,灵活性较强。目前三维直线管道的模型构建算法已经相当成熟,而管道拐点处的平滑以及管道交叉处的贯通的问题却是三维空间管网模型需要特别处理的地方。左国成、王山东提出一种基于旋转矢量法的三维管道建模^[34],此方法是通过从原有二维管道中心线数据中计算提取出管道表面顶点的坐标,实现管道面的重构,能够构建出弯曲管道,这种算法直观易懂,但是需要逐点求解出空间坐标,不适合应用于大数据量管网的自动建模过程。王建明^[35]等普遍使用求相贯线解决交叉管道的贯通问题的算法计算复杂,过程繁琐。

目前的三维管网建模技术的自动化重建可靠性较低,主要手动建模与半自动建模相结合,管网自动建模方法计算复杂,尤其是管道数据量较大时,难以实现复杂管网模型的自动构建,在实际生产项目中推广难度较大。所以需要设计一种能够灵活、快速地实现直管建模、弯管建模、交叉管道建模问题的管网自动建模的方法。

2.3.2 基于现代激光雷达测量手段的三维管网建模技术

三维激光雷达扫描仪以其高精度、快速点云数据获取在管道数字化的应用方向已经非常成熟。区别于传统的点测量,扫描仪大大提高了外业效率、数据质量以及精度。结合三维激光扫描技术与地理信息技术,配合多元化的软件系统及专业化的管道模块,与 AutoPlant、Microstation、AutoCAD 等设计工具无缝集成,快速建立管网的 3D 模型,为管道的改建、扩建提供高效率以及高精度的解决方案。对于工厂等需要数字化较大的区域,一般采用扫描仪加全站仪的扫描方式。全站仪进行控制测量,可控制多站扫描仪的累计误差。通过多角度的全方位扫描采集工厂内的厂房、管道等三维信息。将采集的点

云数据进行多站拼接和去噪后，导入处理软件即可进行三维管道等模型重建。由于激光点云的诸多优点，必然取代传统点测量，但由于获取点云数据量巨大，对处理方式及速度也有一定的要求，点云的自动化处理成为必然的发展趋势。

随着新的激光扫描数据获取和处理方法的不断涌现，利用点云数据进行管道的几何测量的方式也越来越普遍。与其他建筑模型的重建方式一样，基于三维点云数据的管网模型重建也可以大致分为两类：实体模型组建和表面模型组建。实体模型组建是基于圆柱、圆锥、棱柱等基本几何体去逼近点云的基本体素，然后按照体素之间的空间关系的连通性把基本实体组合成三维管网的实体模型。在实际的应用中往往是通过人工或者半自动化法，是从原始点云数据中获取管道建模的必要参数，然后利用这些几何信息，将这些参数导入到现有的建模软件中构建三维模型，拟合平面和圆柱^[36]。这种方式是非常适合于工业场所，因为在工厂的设备大部分是由比较原始的形状如：圆柱、平面、长方体、正方体等组成。然而，这种方法很难提取出无缝的完整的管道模型。表面模型组建^[37]即是直接利用点云数据组建三维管网的表面模型，这种方法一般分为两种：一种是利用网格数据模型，比较典型的是三角网格曲面重构模型，即利用大量的细小的三角面片来线性逼近待重构的曲面，这种方法能够很容易的实现复杂实体模型的完整描述。较为经典的如零集法^[38]，利用近似切平面，使用 Mc 算法生成多边形网格。然而纯数据驱动三角网的方法，不能够简化或者去除输入数据的噪音，所以就会生成与原始扫描点云一致的表面比较粗糙而且有裂缝的三角网，更重要的是，所生成的三角网模型不具有拓扑结构，不能对管道属性进行编辑、管理。另一种是利用 NURBS 曲线、B_Spline 和 Bezier 等曲面函数进行曲面重构，这种方法对于局部曲面的形状具有较好的控制力，方便模型的编辑修改。但这种采用自下而上原始拟合的方法受噪声和异常值的影响非常大，并不稳健。

2.3.3 常用的点云管网建模软件

针对三维激光点云在城市建设与工厂中管道管理中的应用，三维扫描处理软件一般提供专业的模块完成管网模型的建立，虚拟测量，分析计算，属性编辑统计，以及真实的工厂现状模型。以一种全新的设计模式进行工厂的改建、扩建等方面的设计，以加快建设的进度以及建设的成本费用等。为以后管网的管理提供了方便。根据建模对象的形状的不同，基于三维点云数据的建模方式可分为规则形状建模和不规则形状建模，其中规则形状三维建模也叫传统三维建模。管道作为基本几何体之一的规则形状，其重建按方式不同主要分为三种：基于图像的建模法、参数法、模板法。

国内三维激光技术起步较晚，国外激光点云处理软件较为成熟，如 Cyclone、RealWorks、EdgeWise Plant 软件以及 PolyWorks、Imageware、Geomagic Studio 软件等，逆向工程领域的软件。这些软件一般都具有管网模型的重建功能。逆向工程侧重于表面模型的重建与模型精度比对。在模型重建功能方面，Cyclone 软件、RealWorks 软件、EdgeWise Plant 软件的三维重建是通过点云拟合二次曲面将管道模型参数化 PolyWorks

软件、Imageware 软件和 Geomagic Studio 软件等主要通过构建不规则三角网模型进行模型重建，将三维激光点云数据进行处理后，转换成计算机图形学中最通用的三角网格模型，多为视觉意义上的展示，并不能达到真正意义上的精确模型。可以表达精细纹理，但不能提供模型特征参数。

随着三维激光扫描技术在管道测量中的普遍应用，现代化的数据处理软件根据点云数据量比较大的特点等，很多软件如 Cyclone、RealWorks 都增加了自动处理与建模的功能。但由于工厂环境的复杂导致自动处理效果不是特别理想，后期需要人工的修改，建模的效率达不高。EdgeWise Plant 发布的新版本软件增强了钢结构在自动管道方面提取的功能。如今，EdgeWise 在短时间内可以自动提取大部分的管道数据，提取出的管道数据伴随有如长度、直径等关键智能元素，以文件形式保存，导出智能模型包含的所有信息到任意 CAD 平台的组件。然后针对每一条管道数据完成模型重建的过程。这种方法使用管道参数提取的方法把点云数据的管网建模转化为传统测量手段的管网建模方式，可以提高复杂模型项目的工作效率，但是后续的手动过程仍然需要大量的人工投入。

2.4 本章小结

本章简要介绍了管网中常见的管道类型及目前主要的国内外主流的管网建模方式。并对现在的管道数据的采集方式进行对比，说明了激光雷达技术取代传统点测量进行管道建模的必然性。根据数据的采集方式的不同分别介绍传统三维点测量与现代激光雷达技术三维测量进行管网模型重建的方式方法。基于管网结构的复杂性以及激光雷达数据海量性的特点，快速精确的自动化数据处理必然取代手动交互式的处理方式。

第3章 点云管道参数提取

近年来,三维激光扫描技术作为一项测绘技术上的新突破,取得了快速的发展,开辟了通向三维世界的新航道。随着三维激光扫描仪在测绘作业中的普及以及点云数据的采集、处理、存储等方面能力的提高,使得三维激光扫描技术在三维模型重建方面的应用越来越普遍。作为以三维激光扫描仪作为数据采集手段的复杂交错的管道系统目前所面临的主要问题在于如何通过扫描获取的散乱点云数据快速、精确地重建三维模型。

上一章已经对目前基于三维点云数据的管网重建方法进行了概述,其中涉及到基于散乱点云的三角网重建方法、先验CAD模型对点云数据进行圆柱匹配的方法、基于管道截面轮廓线及中心线的圆柱拟合方法等。本文针对上述方法的优缺点进行分析,探索出一条基于三维激光点云数据的管网模型重建流程。

3.1 数据预处理

由于激光扫描仪的工作原理和扫描范围等特性,使得点云数据具有数据量大、局部分辨率存在差异、点云数据残缺等特点,点云数据的这些特点会严重影响管网模型重建的准确性及稳健性。为了能够精确的表达基于三维激光点云数据重构的管网模型,所以在进行管道模型重建之前首先对点云数据进行预处理。数据预处理作为管网模型重建的第一步,处理结果的好坏会直接影响到管网模型重建的效果^[39]。一般对数据的预处理主要是指对点云数据的滤波去噪操作。通常使用三维激光扫描仪获得的点云数据,由于激光扫描仪本身特性的影响,都会或多或少的含有一些噪声点,如果不消除这些噪声点而直接在原始点云数据的基础上进行管网模型的重建,建模的效果有很大的影响。因此,为了比较准确的重建三维管网模型,必须提前对点云数据进行相应的去噪处理。

在数据去噪之前首先对点云数据进行简化。三维激光点云数据的简化就是减少三维点云数据的数据量,从中提取有效信息,同时简化后的数据看起来应该尽可能的接近原始数据,尽量减少对后续模型重建的影响,并为后续的重建过程提高速度和效率。目前针对三维点云数据的简化主要有三种方法,即基于曲面拟合的简化方法、基于网格拓扑信息的简化方法和直接对三维点云模型的简化方法^[40]。本文采用倍率缩减采样法对点云数据进行数据简化,得到分布相对均匀的简化后的点云数据。

3.1.1 管网点云数据滤波去噪

(1) 点云数据滤波

点云数据滤波的主要目的是将地面点云和非地面点云分离开。常用的点云数据滤波算法有渐进式三角网滤波和基于形态学滤波,其他的方法包括基于坡度的滤波法、基于伪扫描线以及基于多分辨率方向预测的方法等。这里只概略介绍常用的两种滤波算法:

- 1、渐进式三角网滤波是以局部区域的地面是平坦连续为假设的前提下,选择此局部区域内最低点作为种子点构建初始三角网^[41],根据构建三角网三角形内点到最近三角形顶点间高度夹角及点到三角面片距离为判断准则,确定是否为地面点;将新地面点加密到

三角网中,循环迭代上述过程直到没有符合准则的点为止。其优点主要是算法较为稳健,适应性强。主要缺点是对点云边缘及低矮灌木丛效果较差,且算法的时间复杂度和空间复杂度巨大,不宜处理密度较大且范围较小的站载地面激光雷达扫描的点云数据。2、基于形态学算法的点云数据滤波。该算法的滤波方式有两种:按离散点进行滤波、按格网进行滤波^[42]。按离散点进行滤波的方式是通过分别对每个激光点进行一次腐蚀和膨胀操作,滤波过程中按距离来量度结构窗口内数据的选取。按格网进行滤波首先将离散点云进行格网化,然后按 $w \times w$ 窗口大小进行腐蚀运算和膨胀运算,与设定阈值进行比较确定地面点和非地面点。该算法的主要优点是效率高,空间复杂度低,算法易实现。主要缺点是坡度阈值的设定和地形在细节处的方块效应。对地形较为平坦且灌木较多时,阈值太大,则对低矮灌木无法滤净;而对于地形起伏较大时,阈值太小,则可能削平地形。因此,在进行滤波处理的时候“参数”大小的确定非常重要。一般根据经验设定,或因地形特征设定,不具有普适性,不能考虑全局地形特征。当前解决这些问题的主要方法是根据地形的起伏大小和高程变化进行分块设定参数或者自适应的进行滤波窗口调整。

一般点云滤波常用在机载激光点云数据,这里本文使用滤波方法主要是为处理非地面点云数据中的管道数据。为保障本文提出的管道分隔算法效果,需要将非管道点云数据去除。本文处理的管道数据一般架设离地半米以上,因此形态学滤波算法完全适应管道数据去除地面点。

(2) 点云数据去噪

对管网点云数据进行滤波处理之后,地面点云和非地面点云已经区分开,得到了包含支架在内的三维管网数据。由三维激光扫描仪以及管网本身结构的特性的影响,在点云数据采集过程中必然存在各种误差,所以在扫描的点云数据中不可避免的会存在噪声点,在进一步的数据分割之前必须对其进行去噪处理。其目的是去除噪声数据对数据分割过程的干扰,尽可能的保持管网模型的几何特征,构建更逼真的三维模型。

对于孤立点、突起点等这些比较明显的噪声数据,一般是孤立于点云数据之外的,可采用手工删除的方法利用矩形或者多边形框选剔除这些点。但是由于三维激光扫描仪获取的数据量比较大,尤其是对于错综复杂的工厂数据等,如果全部采用手动处理的话,费时费力,也难免有所遗漏,我们可选择系统判断的方法进行自动去噪处理。目前常用的自动去除噪声的方法有曲率法、距离值法和悬高法等(如图 3-1 所示)。它们的共同思路是根据数据的质量等设定一定的阈值,大于阈值的点则确定为异常点;不同点是它们设定阈值的方式不同,曲率法是通过判断采用点与相邻点之间的矢量夹角作为标准,距离值法顾名思义是通过采用点与相邻点之间拟合的平面或者直线段之间的距离来判断,悬高法则是通过采用点与相邻点连线的距离来判断。

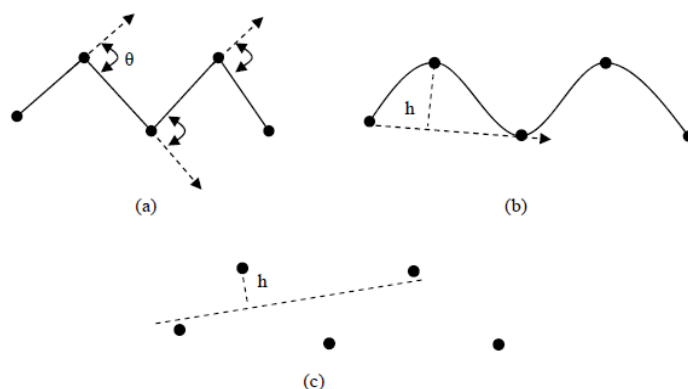


图 3-1 常用的去噪方法示意图
Fig. 3-1 Common denoising methods

在逆向工程的研究中，大多会涉及数据预处理，在基于点云数据的三维管网模型重建过程中，数据的前期处理与逆向工程中的数据预处理类似。一般的三维扫描系统都会自带数据的预处理功能，而且现在的预处理技术成熟、效果良好，可以为后续的处理过程提供良好的数据基础。

3.1.2 管道点云数据的分割

使用三维激光雷达技术扫描获取的点云数据量十分庞大，而且工厂中的管道十分复杂，直接对整个管网的点云数据进行建模效果很差，需要对点云数据实施分割处理。点云的分割可以通过人工手动分割或者经由计算机算法自动进行。考虑到人工提取的难度较大，且工作量较大。本文提出一种分割聚类算法可以实现可自动识别 90% 以上的管道数据，将复杂管网建模难度降低为单一管道建模，可极大提高后续建模复杂度，降低对骨架线准确性的依赖度。尤其在管道密布的区域，手工提取十分复杂的情况下，本章节提出的分割算法优势更是尽显无疑。而且整个过程的完全自动化，排除了人为控制的因素。本节主要从单个管道点云数据分割的意义及实现方法进行详细阐述。

(1) 单个管道数据分割的意义

受管道的自身形态结构以及扫描仪采样方式等因素的影响，点云数据会出现数据缺失（主要由扫描盲区造成）、含有噪音或者离群点等点云质量问题。一般情况下，离扫描仪近的点误差小，采样间距小而分辨率高；离扫描仪远的点误差大，采样间距大而分辨率低。点云的这些固有的特征在进行管道的骨架线提取时会造成骨架线不准确比如两个相邻较近的管道提取出一条骨架线等错误，并且当前骨架线算法无法有效提取复杂管网的骨架线，如图 3-2 所示为整体点云数据骨架线提取效果，可以看到骨架线不能准确表达管道的走势。而现代化工厂或输油、输气管道中不可避免的存在人工设施、构筑物等，管道参数化建模时需要将这些因素考虑在内。所以在进行管道建模的算法设计时要充分考虑如何处理并剔除这些不利因素的影响。由于点云数据量一般较大，尤其管道点

云一般是通过站载扫描仪获取。如果单纯的进行降采样，会造成单个管道点云数据稀少，对管道建模精度有影响。对点云数据进行分割消除了骨架提取过程中管道之间的干扰，有效提高了骨架的中心性。对于后续三维管网的建模具有重要的意义。

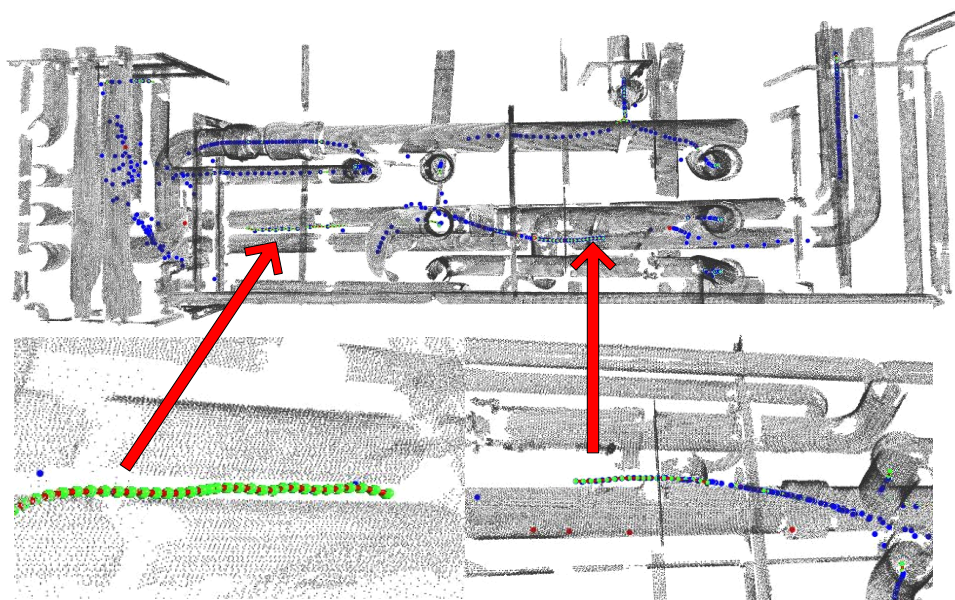


图 3-2 整体点云数据骨架线提取示意图

Fig.3-2 The result of the whole point cloud data skeleton line extraction

(2) 管道点云分割实现算法

本文提出了一种简单聚类法进行单个管道数据提取。根据管道圆柱体的特点，管道面上的点云局部特征是相似的，如协方差特征值，特征向量，曲率等。管道间的其他人工设施、构筑物等，包括管道支架，厂房墙壁，水泥墩等，一般表现为平面特征，区别于管道的曲面特征。

由于管道点云特点，同一管道上的点云法向量之间夹角趋于固定值，点之间曲率相近。因此针对管道细管和粗管可设定两个法向量夹角阈值：最大夹角阈值和最小夹角阈值，因为细管道法向一般会有一定夹角，而粗管道局部点云趋于平面，两邻近点法向量会趋近于相同，即法向夹角为零。首先基于点云法向特征和欧氏距离进行生长约束聚类，根据设定法向之间夹角阈值的设定的最小距离阈值进行点云簇聚类。在聚类的过程中，为了加速聚类并改善聚类的效果，本文对点半径范围内拟合的平面残差中误差进行排序，根据同一管道上点局部残差的相似性，可加速对排序后的点进行聚类。具体流程见图 3-3。首先对点云进行局部平面残差计算，并排序；然后遍历所有点进行聚类，将已分类点进行管道序号标记，对未标记点进行条件约束判别，如果聚类后的点数小于一定数目阈值，则标记为未分类，这样可有效降低错误聚类。直到未标记点数为零为止。

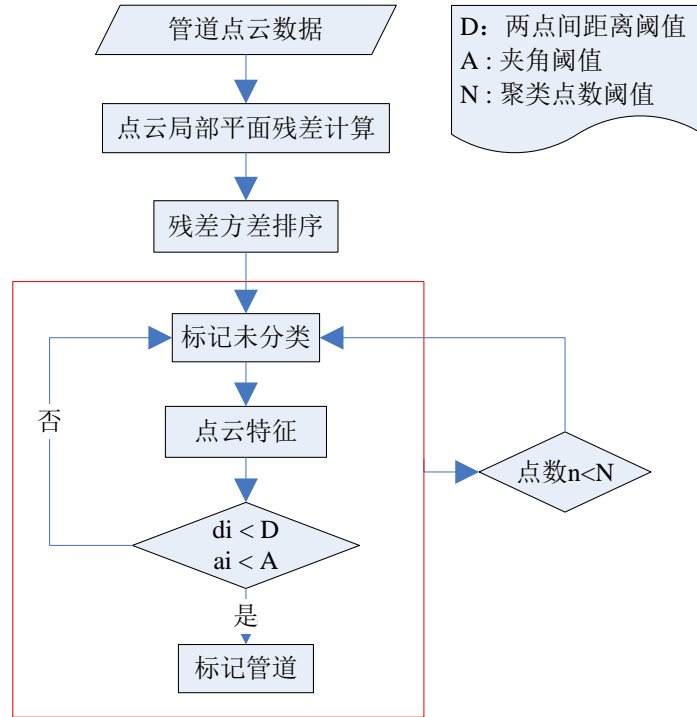


图 3-3 管道聚类算法流程图
Fig.3-3 The flow chart of pipeline clustering algorithm

管道点云分割距离算法中,对欧式聚类距离阈值的设定方式,通过实验验证采用 3-5 倍平均点间距作为距离阈值,分割效果较好。

对于本文算法中法向夹角阈值 ϵ 的设定方法,根据管道圆柱形的特点,夹角阈值可有点密度及管道半径估计出。通过大量实验验证,可通过以下公式 (3-1) 进行估计:

$$\epsilon = \frac{180}{pr} d \quad (3-1)$$

其中, r 为管道平均半径, d 为管道上点云平均点间距。

管道点云聚类后,相似点云聚类到一簇点集中。其中会包含平面点集等人工设施,根据平面特征可去除大部分人工设施,对其他非管道点集,可根据管道切片后拟合圆柱的圆度进行判别,这里只说明平面特征去除方法。根据点集协方差矩阵可计算点集特征特征 λ_1 , λ_2 和 λ_3 , 设 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ 。则平面特征可根据公式 (3-2) 计算:

$$planarity = \left| \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3} \right|, \quad 0 \leq planarity \leq 1 \quad (3-2)$$

根据上式可知,平面越平整,则平面特征越明显, $planarity$ 值越大,根据经验可设置阈值范围在 0.5~0.8 之间。

3.2 管道参数提取

3.2.1 管道数据骨架线提取

如前所述,本文之所以把点云的基本骨架提取作为三维管道建模的关键步骤,是因为用三维激光扫描设备快速获取的点云数据往往伴有大量的缺失,噪声和离群点等,直接拟合圆柱重建管网模型效果不好。正确的骨架图可以用来填补点云缺失辅助生成完整的管网模型,骨架图是表达三维模型拓扑特征的一种直观有效方式,骨架线可以很好的表达管道的走势方向^[43],据此可以进行管道切片,实现管道参数化建模。目前从点云中提取骨架线或者点云骨架化的算法的研究非常多,近年来研究者们试图提出一个从不完整的点云数据中提取曲线骨架的方法。如何选取合适的算法从含有高噪声的点云数据中快速提取出中心线良好的骨架线数据用于后续的管网建模,是需要解决的问题^[44]。本文通过阅读文献及实验对几种骨架线提取方法进行了比较:

(1) 水平集方法 (Level Set Method), 是一种用于界面追踪和形状建模的数值技术。水平集方法是在 1988 年由 Osher 和 Sethian^[45]最早提出的,它的基本思想是把曲线、曲面看成是更高维函数的零水平集,利用函数的演化与 Hamilton-Jacobi 方程^[46]的相似性,将曲线、曲面的演化,表示为更高维的超平面水平集的演化,用零水平集隐式地表达曲线、曲面^[47]。利用水平集方法从三维点数据中提取骨架线的方法是 Verroust^[48]等在 2000 年提出的。它给定种子点,根据最短路径算法从点云数据生成的邻近图计算最小生成树,距种子点具有相同距离值的点构成了水平集,水平集的中心点即为骨架位置。水平集方法不需要对曲线进行参数化,可以直接对演化中的曲线进行计算,适用于具有复杂拓扑结构的物体。但是水平集法对局部细节特征的处理不够理想,而且由于这个算法把三维空间的问题扩展到了四维,导致计算量太大、效率不够高,对于大数据量的管道点云数据的骨架线提取并不适用。

(2) 基于拉普拉斯微分算子的骨架线提取方面; Au^[49]等人基于拉普拉斯的几何性质,提出了一种针对网格模型的简单、健壮的骨架线提取方法。这种方法只适用于封闭的网格模型。Cao^[50]通过建立一种简易的基于 K 紧邻的点云连接关系,对 Au 等人的骨架线提取算法进行了改进,基于网络模型骨架提取中拉普拉斯收缩方法提出了一种基于拉普拉斯的点云模型骨架提取算法,该算法需要输入的点云相对比较稠密,因为该算法可以处理一定程度的点云数据的缺失,对于大面积数据缺失则效果不够理想。

(3) L1-中心骨架提取技术,即用一维空间曲线表示三维点云的几何结构。Daszykowski^[51]等通过实验得出结论 L1 中值不仅是给定点集唯一的全局中心,而且具有抗噪声干扰的优点,故该算法鲁棒性很强。此算法对于输入点云的质量没有严格的要求,可以直接应用到含有大量噪声、野点或者大面积缺失,没有任何法向量信息,并且未经任何预处理的原始扫描点云上,提高了生产效率,节省了前期的加工成本。而且这种算法只需要利用少量下采样点进行收缩,在增加邻域半径时,已得到固定的采样点不再参与骨架线提取运算,所以算法的收敛速度比较快^[52]。

该算法的主要步骤如下：从原始点云中随机选取一组样本点，作为初始中心点。比较点云中点到各个中心点的距离，使每个点划分到与其距离最近的类中，形成初始分类。通过迭代，重新分配，使每个点都分配到离其最近的中心的邻域内。邻域的大小是逐渐增加的，这样可以处理一些不同级别的细节，以便得到清晰并且连接效果良好的骨架线。L1-均值法骨架线提取流程图如图 3-4 所示：

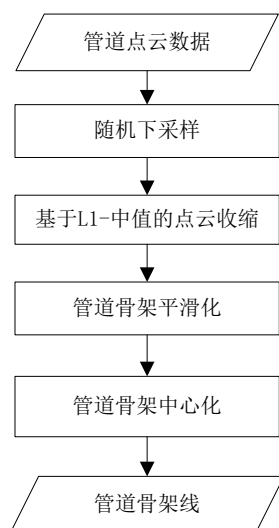


图 3-4 L1-均值法骨架线提取流程图

Fig. 3-4 The flow chart of skeleton line extraction by L1 Means

本文提取点云的骨架是为了基于骨架进行三维模型的重建，所以选择骨架线提取算法时旨在考虑算法的鲁棒性，尤其是对于含有噪声点与数据缺失的管道点云进行处理，如图 3-5 是骨架线提取效果图。

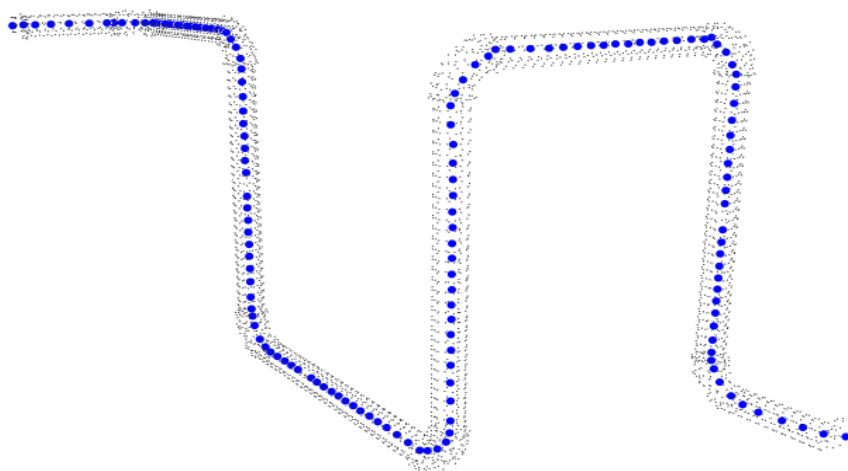


图 3-5 骨架线提取效果图

Fig. 3-5 The result of skeleton line extraction

3.2.2 管道切片拟合半径与圆心

管道模型重建首先需要将单个管道进行参数化,提取管道中心曲线及管道半径,而实测的管道点云数据通常由于盲区及环境因素,无法获得理想点云,提取的单个管道点云数据的骨架线一般不是理想的管道中心线,尤其是管道弯曲时,容易对拐弯处进行简化骨架。因此,提取的骨架线不能直接用来作为管道中心线。这就需要对管道中心线进行优化。本文采用沿骨架线方向按一定步长进行切片的方法对管道中心线进行优化。

点云切片法的关键在于切片方向的确定。本文在文献[53]中给出的点云切片算法的基础上,改进了点云数据的切片算法。与李岸等反求工程中确定切片的方向的方式不同,本文在进行切片时以提取的管道骨架线的方向作为切片的方向。沿着骨架线方向,根据一定的步长在曲线上各个位置生成垂直于该处曲线切矢方向的平面,用平面对点云进行切片,得到一组截面的轮廓数据,这些截面主要是为后续的模型的重建提供数据^[58],以拟合后的切片半径及圆心作为管道半径与中心线上的点。

拟合切片点云的方法常用的有两种:一种是拟合空间圆,主要步骤是将切片点云投影到切片平面上,将投影后的点利用最小二乘拟合圆曲线。在拟合圆曲线之前,首先对投影点进行坐标转换,X轴和Y轴的方向随意,固定Z轴的方向与切片方向一致。通过这种方式把投影面上数据点由三维格式转换为二维格式,这样便可以利用最小二乘法拟合圆曲线,得到圆曲线的圆心坐标和半径,然后反算出圆心所在的空间三维坐标作为管道中心线上的点;另一种方法是将切片获取的带状点云直接拟合获取圆面参数,将圆柱轴线的中心点作为管道中心线上的点,圆柱半径就是切片半径。第一种方法获取中心点的精度受投影平面法向影响较大,而投影平面的法向是由骨架线曲线方向决定的。因此,在骨架线提取效果不佳的情况下,该方法失效。而拟合圆柱曲面参数获得的轴线方向会纠正骨架线方向不准确情况,不会受到骨架线曲线方向影响,本文采用拟合圆柱法优化管道中心线及获取管道半径。

点云拟合圆柱曲面的方法有很多,但基本上是首先获取拟合初值,进而进行全局迭代参数优化。切片获取的点云数量较少,因此对初值的精度要求较高。本文采用高斯映射法提取柱面初值进而优化得到柱面参数。本文选取三段不同类型的数据进行圆柱参数拟合,实验效果图如图3-6所示,图3-6 a)是对三段点云提取骨架线的效果图,可以发现由于点云数据的缺失,骨架线偏向于点云数据密集的一侧。图3-6 b)是利用切片对骨架线进行优化,重新得到的管道中心线。图3-6 c)是骨架线与管道中心线的对比图,可以看出,切片拟合圆柱方法优化后可以得到准确的管道中心线,这也表明,该理论方法对于不完整的管道点云可行。

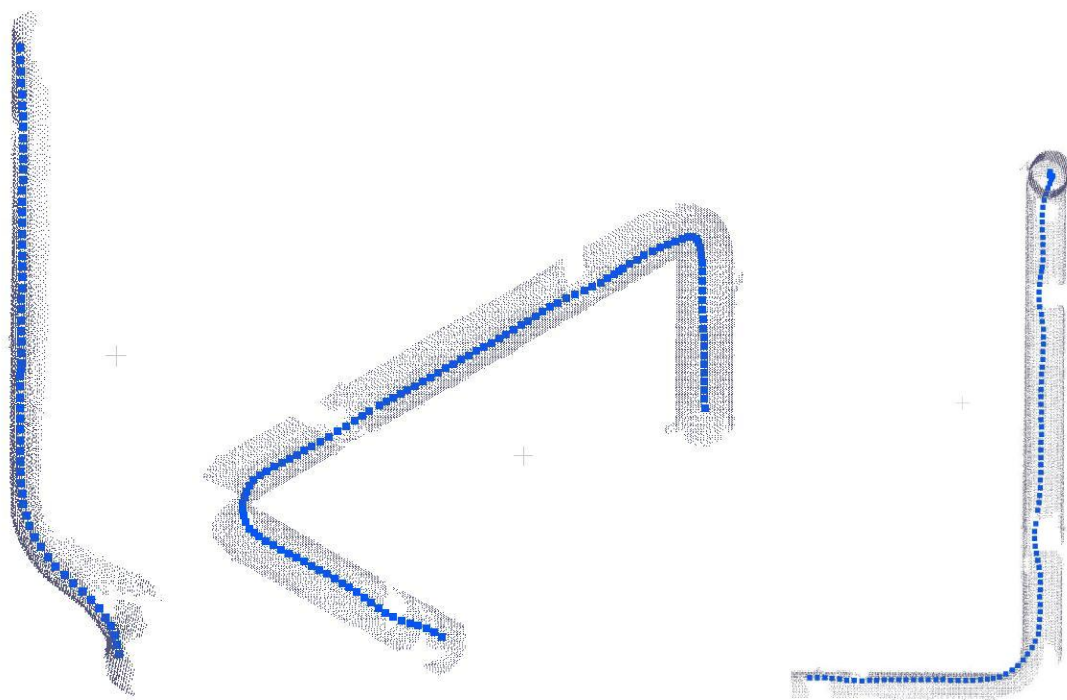


图 3-6 a) 三段点云数据的骨架线提取效果图

Fig. 3-6 a) The skeleton line of three sections of point cloud data

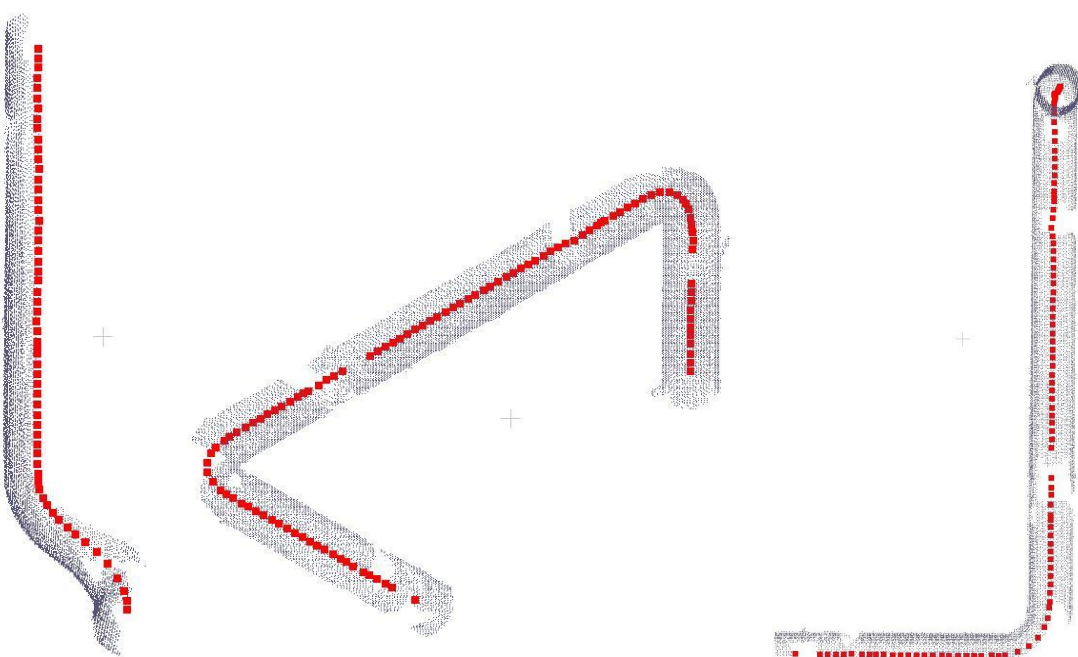


图 3-6 b) 优化的管道中心线

Fig. 3-6 c) Optimization of the center line of the pipeline

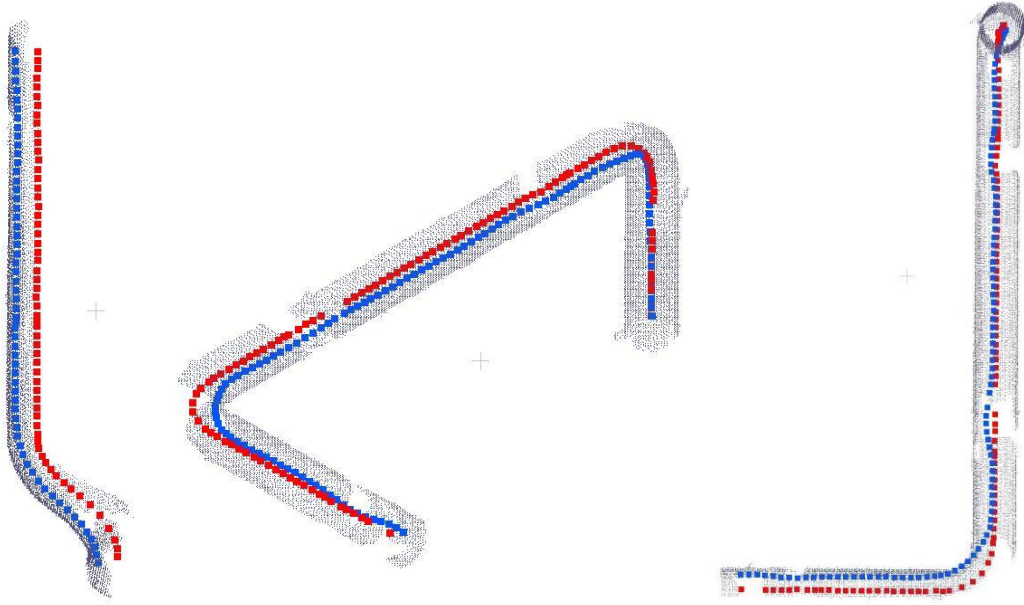


图 3-6 c) 骨架线与管道中心线的对比图

Fig. 3-6 c) The skeleton line and the center line of the pipeline contrast figure

3.2.3 突变检测

单个管道在半径不变时，本文以上方法便完成单个管道建模。但同一根管道存在管道半径突变的情况是很普遍的，如图 3-7 所示。对于突变管道需要准确计算出变半径的位置点，即突变点。因此，本文也研究了半径突变情况下的处理方法：

首先，找到突变管道的两切片位置。根据管道切片点云拟合的截面圆环，得到管道上有序的切片半径值，如图 3-8 所示，管道 a 半径为 R_1 ，管道 b 的半径为 R_2 。根据半径大小找到 A 和 B 两切片位置。

其次，判断切片之间点集归属的管道。找到突变两切片后，计算两切片之间点集到管道中轴线的距离。根据公式 (3-3)，计算点集中每个点与管道 a 与管道 b 的半径差值。

$$\begin{cases} D1 = |di - R_1| \\ D2 = |di - R_2| \end{cases} \quad (3-3)$$

则，根据以下判决公式 (3-4)，条件 (1) 成立时，该点属于管道 a，条件 (2) 成立则该点属于管道 b。

$$\begin{cases} D1 < \delta, D2 > \delta & (1) \\ D1 > \delta, D2 < \delta & (2) \end{cases} \quad (3-4)$$

式中—— $\delta = |R_1 - R_2|/2$ ；

最后，计算出准确的突变点。找到属于管道 a 和 b 上的点集后，根据数学中的点到直线上的投影可计算投影系数 (公式 (3-5))，找到点集投影到管道 a 上最大和最小的投影系数即为管道 a 的两端，同理可找到管道 b 的两端。

$$k = (P_i - P_2) * (P_i - P_2) / |P_1 - P_2|^2 \quad (3-5)$$

式中 P_1 、 P_2 ——管道中心线上两端点坐标；
 P_i ——该管道上的一点；

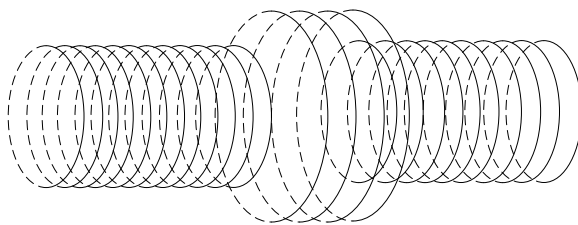


图 3-7 管道突变切片示意图
 Fig. 3-7 Pipeline mutation section diagram

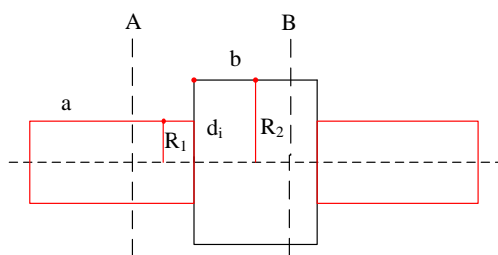


图 3-8 管道突变检测平面示意图
 Figure 3-8 The plan schematic diagram of pipeline mutation detection

3.3 本章小结

本文主要介绍了在管道建模之前的数据预处理及单个管道参数化。通常由激光扫描仪扫描出来的点云数据，由激光扫描仪本身特性的影响，都会或多或少的含有一些噪声点，如果不消除这些噪声点而直接在原始点云数据的基础上进行管网模型的重建，对建模的效果会有很大的影响。因此，为了比较准确的重建三维管网模型，必须提前对点云进行相应的去噪处理。而对于错综复杂的管道点云数据本身来说，相邻的管道由于遮挡等出现数据缺失的情况，同时对于比较临近的管道在建模的时候会出现互相干扰的情况，所以本文在研究了国内外基于三维点云数据的管网建模的基础上，提出了一种管道分割算法。对于单个管道参数化过程分为管道中心线特征点提取、管道半径参数拟合及突变检测。本文采用 L1-Mean 算法提取管道骨架线作为中心线特征点，沿着中心线方向做切片拟合管道数据，最后对于有突变的管道根据几何投影法进行突变检测。下一章将介绍如何完成管网模型的重建。

第4章 管网全自动建模方法

上一章在对管道数据预处理后，将分割出的单个管道数据进行参数化，得到了三维管网的中心线。如文献[59]中所述，中心线可以定义管道的位置和方向，是管网的几何性质和拓扑性质的抽象表示。后续需要根据管道之间的拓扑关系进行重构，合并同一管道、重构弯管及交叉管道。本章将重点介绍管网模型全自动重建的几种算法，检测同一管道和交叉管道，最后详细论述重构后的不同管道类型重建过程。

4.1 管网建模算法

4.1.1 形体沿路径扫略算法

作为一个把二维图形转为三维图形的方法，由于其方便灵活的特点，扫略在图形的设计和生成中得到广泛应用。根据路径和截面的个数是不是单个，扫略面可以分为单路径或单截面线的回转面和拉伸面（如图 4-1 a），单路径多截面线（如图 4-1 b）、多路径单截面线、多路径多截面线的扫略面^[62]。在形体的生成过程中，输入路径曲线以及沿路径方向的截面形状曲线，通过获取路径曲线和封闭的截面曲线的位置和形状信息来生成沿路径方向的管状物体。

路径定义数据的获取：首先通过实体选择函数获取路径曲线，再通过实体对象函数来访问实体的数据库，迭代遍历整个数据库，检索出各个顶点子实体的空间位置坐标。在路径上的线段可能是直线段也可能是弧线段，因此要做出分别处理。对于弧线段需要重新参数化，即对弧段进行等分，求出等分点的坐标以及等分点的切线方向向量，作为沿路径方向截面的位置坐标以及截面的法向量^[63]。

截面形状曲线定义数据的获取：截面形状曲线是一个封闭的曲线。在计算得到这个截面的所有顶点数据之后，按照一定的顺序来存储这些顶点数据，然后求出这个多边形的中心点，作为以后进行形体变换的基点。

通过图形变换将截面形状曲线沿路径曲线进行扫略：图形变换一般是指对图形上的几何信息经过几何变换之后产生新的图形^{[62][63]}。图形变换可以看做图形不动，让坐标系发生变动后；也可以看成是变动，而坐标系保持不变，经过图形变化以后，图形的新坐标则以新坐标系做为参考。在扫略的过程中，我们利用图形变换把截面形状曲线的顶点坐标变换到路径上某一截面的顶点坐标，并且此截面的法线方向与该点的切线方向一致^[63]。利用变换后的坐标来构造物体。

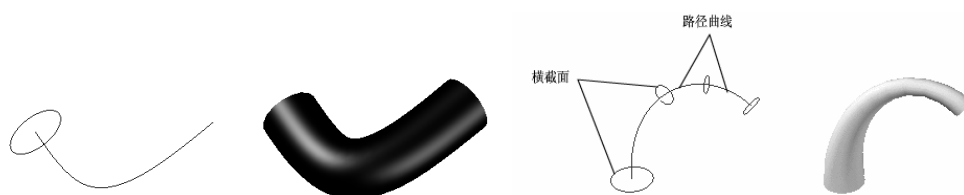


图 4-1 a) 单路径单截面线扫略图

图 4-1 b) 单路径多截面扫略图

Fig. 4-1 a) Single path single section line sweep

Fig.4-1 b) Single path multi-section sweep

4.1.2 形体放样算法

放样即在数个横截面之间的空间中创建三维实体或曲面。放样的横截面可以是开放或者闭合的平面或者非平面，也可以是边子对象开放的横截面创建曲面，闭合的横截面创建实体或曲面。而且可以为放样操作制定路径，以更好地控制放样对象的形状，放样的路径应该从第一个横截面所在的平面开始，到最后一个横截面所在的平面结束^[65]。

计算横截面的所有顶点数据，在得到这个截面的所有顶点数据之后，按照一定的顺序来存储这些顶点数据，相邻横截面的对应顶点组成小平面，小平面采用小三角形去填充。放样的过程就是以三角面片构造管道表面， N 个三角形相互连接构成一个棱柱体，随着三角形的增多逼近形成圆柱面^[66]，如图 4-2 所示。

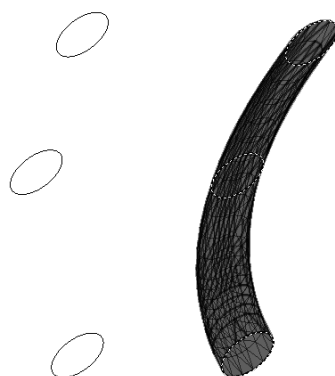


图 4-2 多截面放样生成三维实体

Fig.4-2 Generated 3D entity by multi-cross section lofting

4.1.3 布尔运算

布尔运算(Boolean operation)是处理二值之间关系的逻辑数学计算法，包括联合、相交、相减^{[62][67]}。布尔操作可以计算不同类型的布尔操作间的冲突。对于像管网模型等的三维图形来说，布尔运算即对两个或者两个以上三维形体进行并集(Union)、交集(Intersection)、差集(Subtraction，包括 $A-B$ 和 $B-A$ 两种)的运算生成新的三维形体^[67]。所谓的并运算是指保留在 A 之外或在 B 之外的所有拓扑元素，删除生成的新形体的冗余元素或内部结构，如图 4-3 所示。交运算是指保留那些同时属于 A 和 B 的元素，删除两形体之一外部元素^[68]，如图 4-4 所示。差运算是指即保留 A 中那些既在 A 中，又在 B 中的元素，并删除 B 中所有的元素或者保留 B 中那些既在 B 中，又在 A 中的元素，并删除 A 中所有的元素^[62] 如图 4-5 所示。

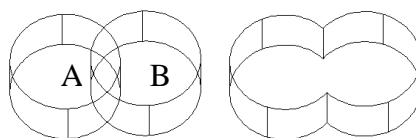


图 4-3 a)图 并运算的实体 A、B， b)图 并运算结果

Fig. 4-3 a) A and B of the union the entity, b) The results of union

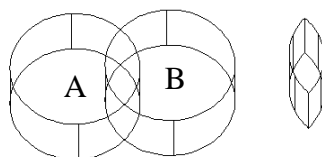


图 4-4 a) 图 A 为要从中减去对象实体, B 为要减去实体, b) 图 差运算结果
Fig. 4-4 a) A is subtracted object entities, and B is subtracted the entity, b) The results of subtract

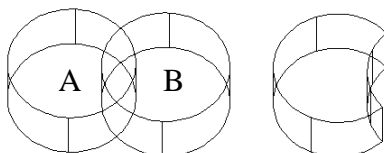


图 4-5a)图 A、B 为交运算的实体, b)图 交运算结果
Fig. 4-5 a) A and B to intersect entity, b) The result of intersect

4.2 同一管道检测

由于激光雷达在扫描过程中可能存在扫描盲区,造成同一管道点云数据部分点缺失等不完整情况存在。根据本文提出的分割单根管道点云算法,不完整的管道点云数据会被分割成两个甚至多个管道,如图 3-7 所示,常出现 a、b 两种情况,造成前一种情况出现的原因是管道被遮挡,后一种情况是在管道两侧进行扫描造成的。本文检测同一根管道的解决方案是基于碰撞检测的思想:首先计算管道最小包围矩形,这里要特殊处理弯管的包围矩形,将弯管分割成单个直管进行处理,然后合并包围盒;其次找到邻近的碰撞矩形,对于第一种情况设置最大遮挡物的长度阈值,即图 4-6 a)中 d 的长度,小于该阈值且两中心线在同一条空间直线上则认为是同一根管道,对于第二种情况,同一管道的中心线存在拟合误差,但不会超过管道半径,因此可据此进行判断。

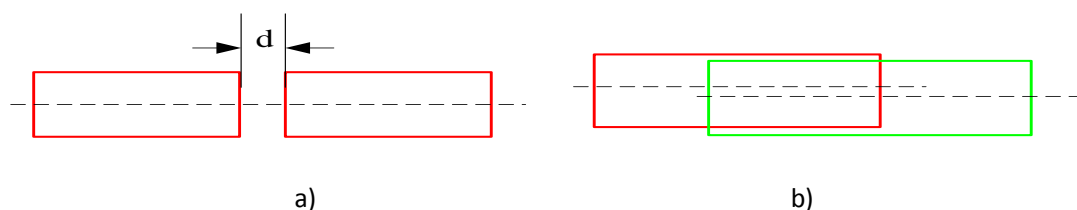


图 4-6 同一管道检测示意图
Fig. 4-6 The same pipeline detection schemes

4.3 交叉管道检测

本文使用扫略和放样方法进行管道建模算法时,只能对直管和弯管进行建模。因此,除了同一管道会被分割成两个或多个管道外,需要对于十字交叉管道或 T 字管道进行拓扑关系分析,如图 4-7 所示。图 4-7 a)为十字交叉管道示意图,本文的解决方案同样利

用管道包围盒进行空间碰撞检测，两管道中心线的空间距离小于最小管道半径时，且两中心线不平行，则认为两管道交叉。图 4-7 b) 为 T 字交叉管道示意图，同理检测两管道小于距离阈值 d ，且管道中心线在同一平面内，则认为是 T 字管道。进行拓扑关系记录。

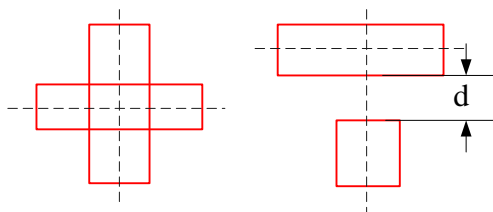


图 4-7 T 字交叉管道示意图
Fig. 4-7 T cross pipeline schematic diagram

4.4 管网模型重建

管道的空间几何位置包括：管道起点坐标、管道终点坐标、管径^[66]。管道中心线上点的空间坐标能够确定管道空间位置和方向。本文综合运用扫略算法与放样算法基于管道中心线数据开发一种快速进行直线管道、弯曲管道以及交叉管道等单一管道的建模方法。并且综合运用布尔运算中交、差、并等操作来实现由基本管道构建综合管网的过程。

4.4.1 直线管道建模

直线管道建模在管道建模中是最简单的。目前，三维直线管道的模型构建算法已经相当成熟，在这里我们使用扫略和放样两种方法来实现直线管道建模。使用扫略方法建立直线管道模型首先以管道的起点定义一个圆 C ，其次连接管道的起点与终点，定义一条扫描中心线 L ，再次对圆 C 沿着中心线 L 进行扫描，完成直线管道的建模过程。在通过放样方式建立直线管道模型的过程中，如果管道的截面为圆形则可以通过圆柱体来表示，其中管道的半径即为圆柱体的截面半径，管道中心线即为圆柱面的轴线。首先以管道的起点为圆心 O ，以管道的截面半径为圆的半径定义一个圆 $C1$ ，其次以管道的终点定义一个圆 $C2$ ，然后 $C1$ 、 $C2$ 放样生成管道。图 4-8 是生成的直线管道模型。

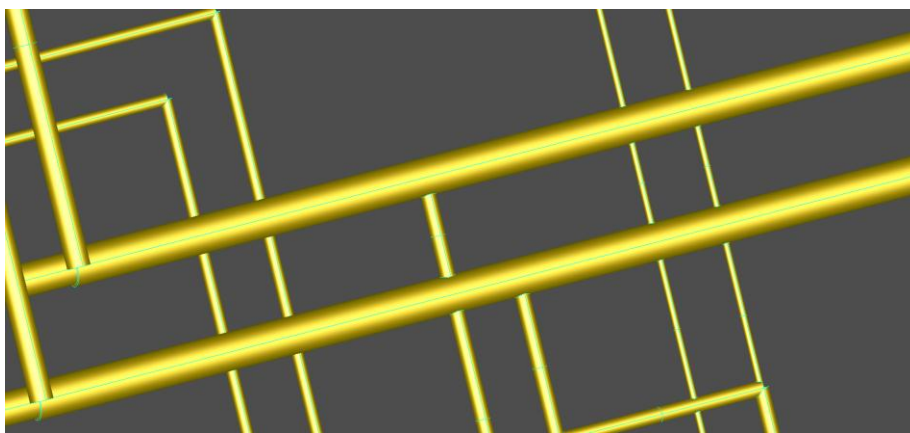


图 4-8 直线管道模型图
Fig. 4-8 Straight line model diagram

4.4.2 弯曲管道建模

管道网络系统中,一条管道是由若干管道段组成的,相邻的管道段由管点首尾相连,因此在平面图中,一条管道是由折线来表示的,如果也采用折线的方式来生成管道的话则会出现管道段连接处不闭合的情况,如图 4-9 所示。为使三维管道形象逼真,在管道转弯处需要圆滑处理。弯曲管道建模的关键技术是弯曲管道处的曲面三维的处理。弯曲管道处管道的边界发生变化,需要进行边界空间直线段的求交和插值光滑。我们通过构造起点断面、终点断面以及管道中心线,综合利用放样和扫略算法,实现弯曲管道模型构建。弯管类型众多,本文主要实现两种类型弯曲管道模型的构建。在构建过程中,通过相交处平滑模式实现弯曲平滑管道模型的构建,通过延长相交模式实现弯曲非平滑管道模型的构建。

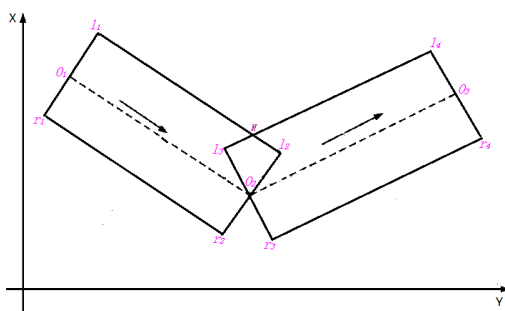


图 4-9 弯曲管道示意图
Fig. 4-9 Bending pipeline diagram

管道在弯曲管道处相对于中心线的左右两侧的平行线段，若一侧相交，则另一侧一定不相交。对于相交的一侧以交点作为边界特征点，对于不相交的一侧则以管道宽 L 的 $1/2$ 长度为半径 R ，而且在不相交的这一侧，过第二个、第三个特征点画一条圆弧生成完整的管道模型。

根据圆曲线元素及计算公式计算圆弧：如图 4-10 所示，以 O_2 为圆心，以 R 为半径，过 r_2 和 r_3 的圆弧计算过程如下：

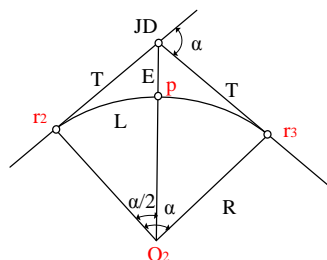


图4-10 弯曲管道求交以及平滑示意图
Fig. 4-10 Curved pipe line intersection and smooth diagram

①计算向量夹角

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{O_1O_2} \cdot \overrightarrow{O_3O_2}}{|\overrightarrow{O_1O_2}| |\overrightarrow{O_3O_2}|} \right) \quad (4-1)$$

② 计算切线长

$$T = R \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4-2)$$

③放样起终点 E、F 坐标计算

$$\begin{cases} X_E = X_B + \frac{T(X_A - X_B)}{l_{AB}} \\ Y_E = Y_B + \frac{T(Y_A - Y_B)}{l_{AB}} \\ Z_E = Z_B + \frac{T(Z_A - Z_B)}{l_{AB}} \end{cases} \quad (4-3)$$

通过编程实现上述过程中弯管部分放样与扫略参数的计算。过 r2、r3、p 三点放样圆弧，结果如图 4-11 所示。

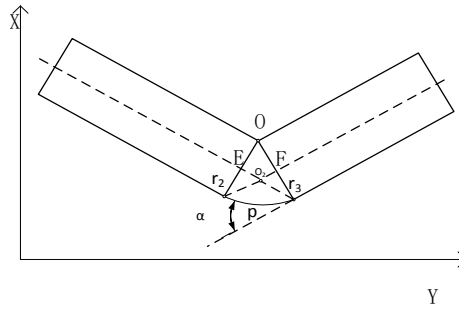


图 4-11 弯管光滑模型

Fig. 4-11 Bend pipeline smooth model

(2)管道在弯曲管道处相对于中心线的左右两侧的平行线段，对于相交的一侧以交点作为边界特征点，对于不相交的一侧则延伸管道以使管道在弯曲管道处的另一侧相交于一点。结果如图 4-12 所示。

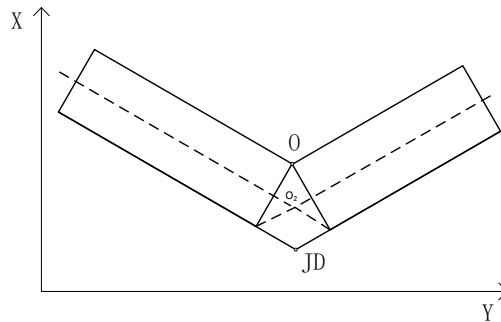


图 4-12 弯管模型交点

Fig. 4-12 Blend pipeline model intersection point

为了验证算法的可行性，我们选取一段数据如图 4-13 为处理之前与处理之后的弯管模型效果图，图 a)为未放样之前不闭合的弯管模型，图 b)为通过扫略与放样构建的闭合弯管模型。可以看出本文算法能够很好的处理弯管拐点连接问题，在管网自动构建的

过程中成功实现了弯管模型的创建。



图 4-13 a) 放样方法前弯管模型图
Fig. 4-13 a) The bend model before Lofting method

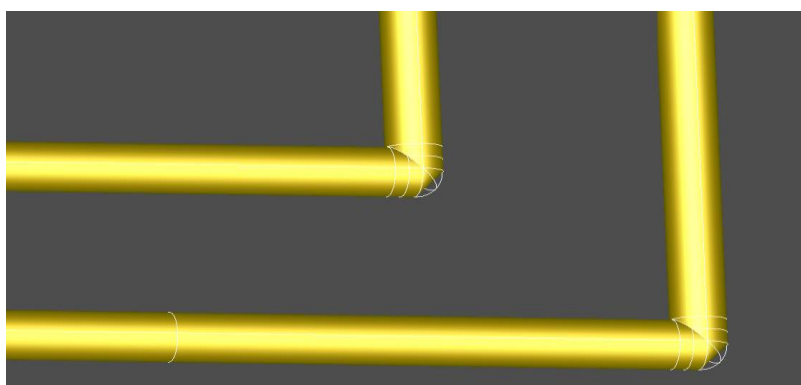


图 4-13 b)放样方法生成的弯管模型图
Fig. 4-13 b) Lofting method generated bend pipeline model

4.4.3 交叉管道建模

两条直线管道在其内部出现交叉，其中一个管道穿越另外一个管道的内部，在xoy投影图上，相对于节点的排序，可判断出管道边界的相交情况，其规律是当前管道的左帮与下一条管道的右帮相交^[70]。根据图形集合并运算可知，需要保留两条直线管道的外部图形，而删除两直线管道内部的元素。如图所示，两条管道相汇于中心点O，管道相邻的帮边界两两相交于A、B、C、D。那么，边AB、BC、CD、AD应该被删除。根据布尔差运算可以实现上述过程，但是经过管道求差处理之后，在管道的底部会出现空洞的区域，如图4-13中的多边形区域ABCD，为此，在节点处还必须补上这些缺失，对两条管道进行布尔交运算，则可以得到底部的空洞区域。

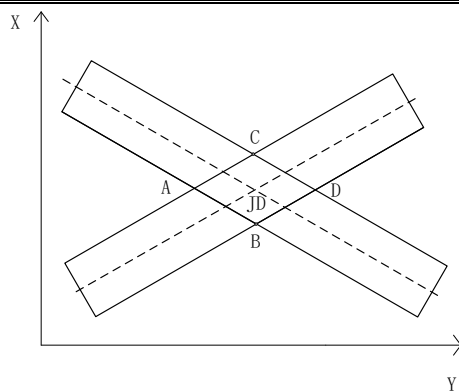


图4-13 交叉管道示意图（二维）
Fig. 4-13 Crossing pipeline diagram (2D)

综上所述，交叉管道建模的实现过程如流程图 4-14 所示：空心管道交运算结果与空心管道、实心管道的差运算结果做一个并运算即可得到贯通管道。

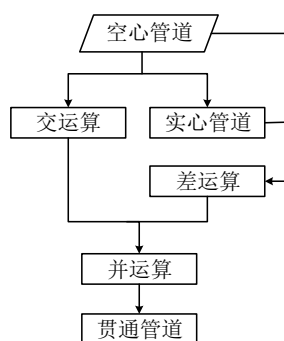


图4-14 交叉管道实现流程图

Fig. 4-14 Cross pipeline implementation flow chart

为了验证算法的可靠性，我们选取两个相互交叉的直线管道数据生成管网模型并进行布尔运算，图 4-15 为交叉管道贯通前后的对比，图 a) 是未处理之前的两条交叉管道的内部情况，两条管道分别阻碍了对方的贯通，不符合实际管网的内部结构。图 b) 为通过布尔运算之后的交叉管网图，实现了两交叉管道的贯通。

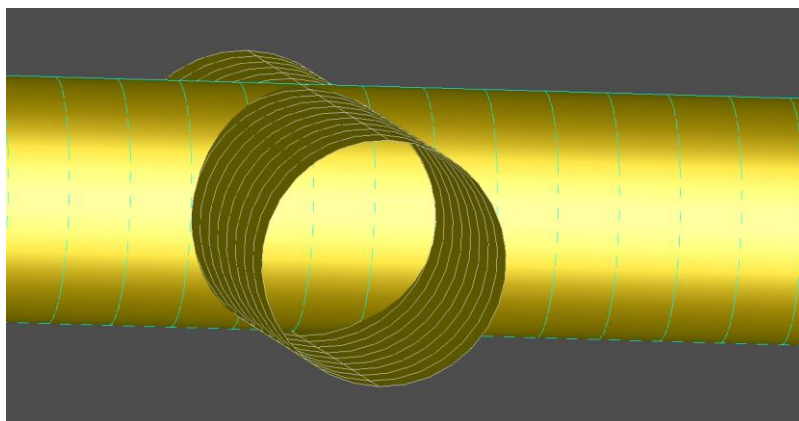


图 4-15 a) 未处理之前的两条交叉管道
Fig. 4-15 a) The pipeline through contrast figure

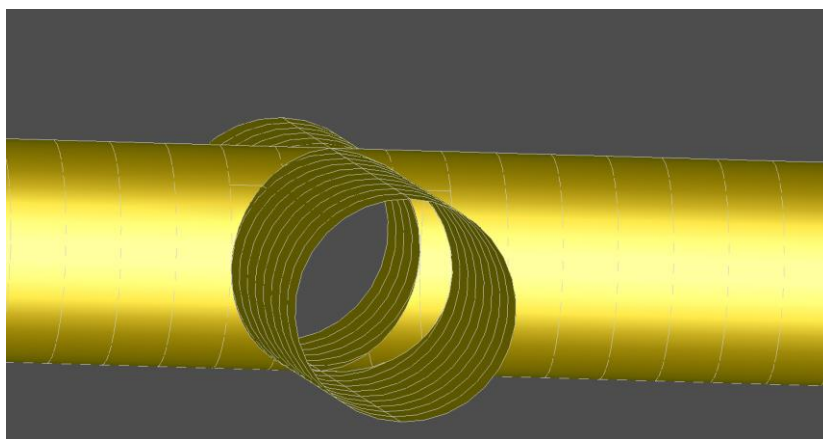


图 4-15 b)管道贯通后效果图
Fig. 4-15 b) The pipeline through contrast figure

根据放样和扫略的原理利用点云切片拟合的特征参数完成单根管道、交叉管道、弯管道模型的重建过程，图 4-16 为管网重建的流程图。

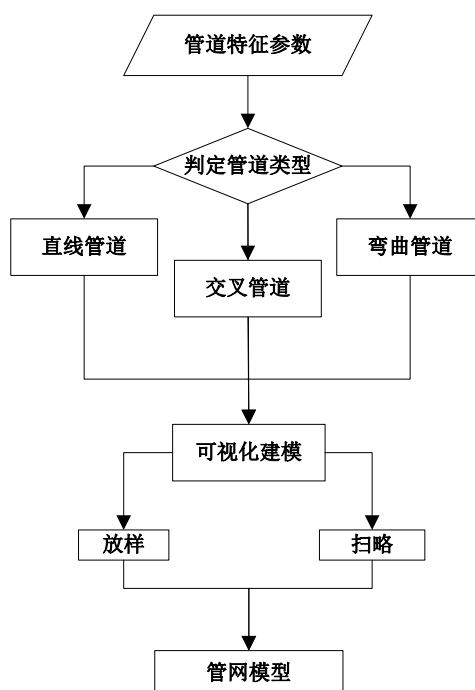


图 4-16 管网模型重建流程
Fig. 4-16 Pipe network model reconstruction process

4.5 本章小结

上一章阐述了点云数据的预处理及单个管道的特征参数提取，得到了每个管道数据的建模参数，本文的目的是为了生成完整的三维管网模型，故这一章主要是在上一章的基础上，利用生成的管道特征参数结合管网的建模方法完成三维管网模型的重建过程。

本章首先对管网的建模方法进行了介绍，通过比较形体扫略与放样的算法，针对直线管道、弯曲管道选择不同的建模方法，并使用布尔运算完成交叉管道模型的构建，成功实现三维管网模型的重建。

第 5 章 管网建模实验的设计与实现

为了验证本文前面几个章节所提出的理论与算法是否可行。在基于本文算法研究的基础上，结合管网模型重建的总体思路，设计并实现了基于点云的三维管网模型重建功能。本章首先对本文算法进行总体实现设计，然后对算法中主要步骤进行分步验证，最后通过具体应用实例进行算法验证。

5.1 总体设计

根据本文的研究目的，以激光扫描的点云数据作为输入数据源进行三维管网模型的重建。为了保证程序的可行性，按照本文设计的研究思路，将管网的三维重建过程分为三个部分，即数据的预处理、管道建模参数提取、综合管网模型重建。程序的整体设计如下图 5-1 所示：

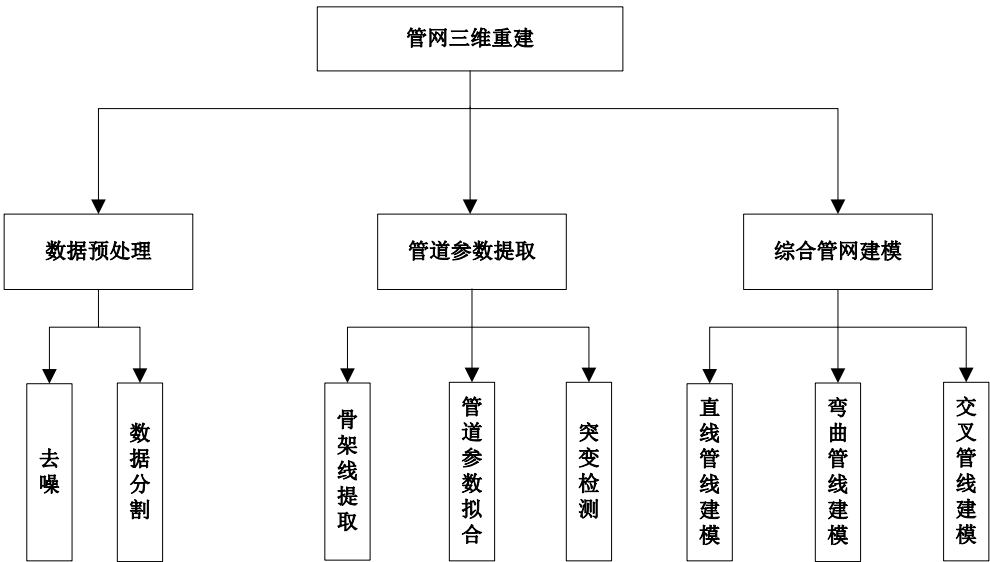


图 5-1 程序总体设计

Fig. 5-1 The program overall design

5.2 管网自动建模流程

本文算法基于 Visual Studio 2013 平台利用 C++语言编写实现。依据本文提出的相关理论和方法，对实测点云数据进行三维管网模型重建。

5.2.1 实验点云数据来源

本文采用某工厂提供的部分实测数据作为验证数据。如图 5-2 所示，为能清晰显示，使用 Eye-Dome-Lighting (EDL)显示效果进行展示。占地面积大概 12*4 米，点云数据量为 3500 多万。图中点云数据包含墙体及管道支架结构，因地面点为黑色对激光波段吸收较为严重，因此并无地面点云数据。由于扫描仪本身的特性以及工厂的管道分布结构导致数据存在噪点，图中可以明显看到点云噪点较多，因此需要进行必要的去噪平滑处理，为提高点云处理效率。本文将点云进行适当抽稀操作，为保证数据处理质量，设置

抽稀最小空间间距为 1cm。如图 5-3 所示为抽稀并去噪后的结果。

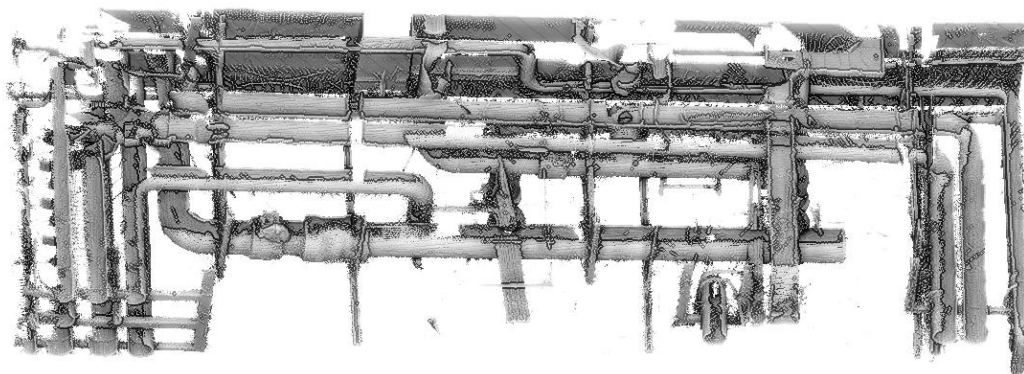


图 5-2 原始点云数据
Fig. 5-2 Original point cloud data

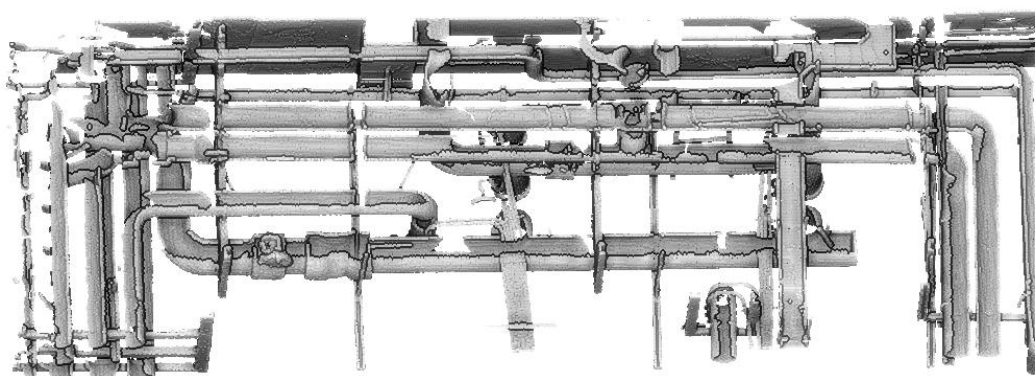


图 5-3 原始点云去噪后的效果图
Fig. 5-3 The effect picture after denoising

5.2.2 管道点云数据分割

第三章中已经有过介绍,由于用三维激光扫描采集点云数据的过程中存在噪声和遮挡是不可避免的,如果直接对点云数据进行骨架线提取,一般提出的骨架线并不能反应管道的大致走向。所以本文首先对点云数据进行去噪、分割,再对分割出的单个管道进行骨架线提取。程序设计如下图所示:对去噪平滑后的点云数据进行单个管道点云数据分割提取,以便进行本文提出的先分割单个管道后建模的思想。根据前文提出的分割算法,设定角度阈值为 3 度,距离阈值为 5cm。下面对两个石化工厂的管道点云数据进行分割处理,分割效果图分别如图 5-4 a)、b)所示。

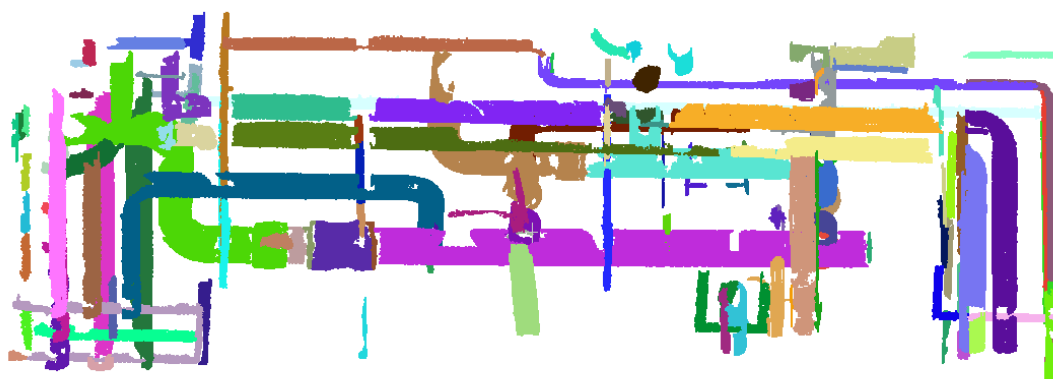


图 5-4 a) 第一个管道分割效果图
Fig. 5-4 a) The first pipeline segmentation diagram

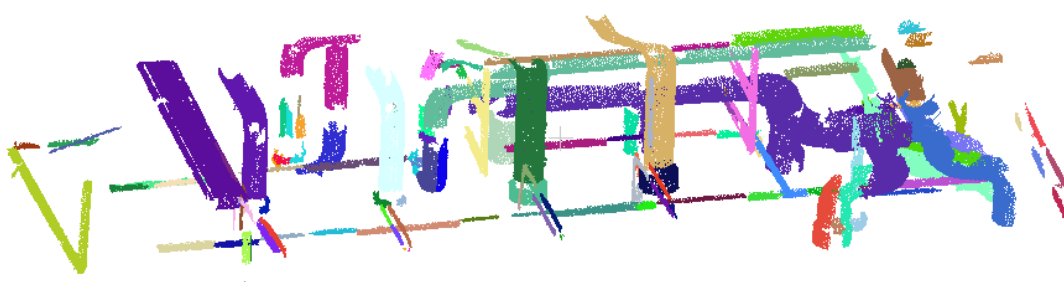


图 5-4 b) 第二个管道分割效果图
Fig. 5-4 b) The second pipeline segmentation diagram

5.2.3 单个管道参数化

分割后的管道点云数据，降低了管网建模复杂度，只需对每个单个管道进行参数化，最后进行综合管网模型重建即可。如前所述，骨架线提取是为管网的管道参数化提供切片的方向，所以骨架线提取的效果对后续管网模型的重建具有至关重要的作用。首先对单个管道点云数据进行基于 L1-mean 算法的提取骨架线。效果如图 5-5 所示。



图 5-5 单个管道点云数据骨架线提取效果图
Fig. 5-5 Single pipeline skeleton line extraction

针对分割后的工厂数据进行骨架线提取,图 5-6 a) 为需要做骨架线提取处理的点云数据,图 5-6 b) 为点云数据的骨架线提取的整体效果图,图 5-6 c) 为管道点云数据与其骨架线的叠加显示图。

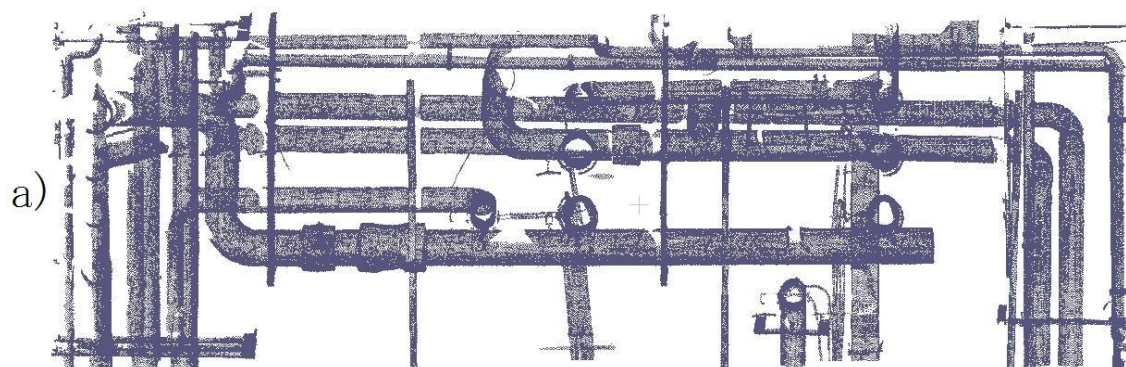


图 5-6 a) 点云数据
Fig. 5-6 a) Point cloud data

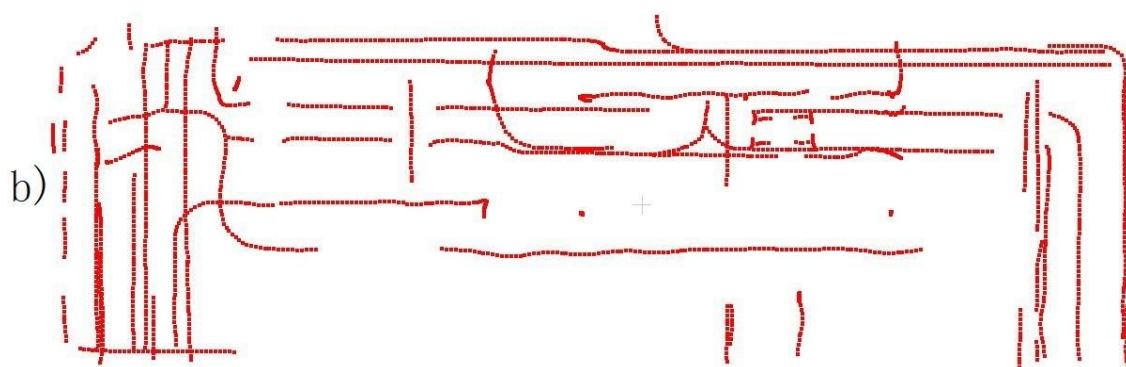


图 5-6 b) 骨架线整体效果图
Fig. 5-6 b) Integral effect of skeleton line

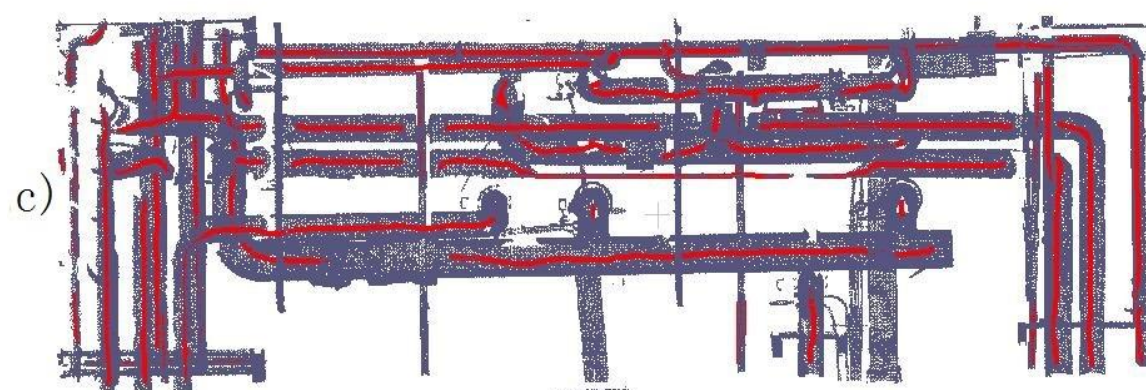


图 5-6 c) 为管道点云数据与其骨架线的叠加显示图
Fig. 5-6 c) The overlap of point cloud data with the skeleton line

管道数据的骨架线提取完成以后，为管道点云数据的切片的方向提供了依据，然后对点云数据进行切片，拟合圆柱，提取管道特征参数为下一步管网模型的重建工作提供数据。

5.2.4 管网模型自动重建

经过前面的几步，已经获得了管道建模所需要的数据，下一步是完成管网模型的自动重建。第四章已经有了介绍，管网参数模型重建过程中，本文提出了一种基于管道路径扫略、形体放样及布尔运算的复杂三维管道模型自动生成算法。根据截面形状参数曲线，运用图形变换，沿路径确定内插截面法线实现管道路径扫略三维模型构建；形体放样则是以放样截面间以各自顶点组成三角形为基元的小平面，来构造管道表面，采用逼近方式拟合三维管道的整体形状；布尔运算的联合、交、差几何计算实现管网交叉贯通复杂模型的三维建模。下面根据上一小节提取出的建模参数完成管网模型的重建。程序实现流程图如图 5-7 所示：

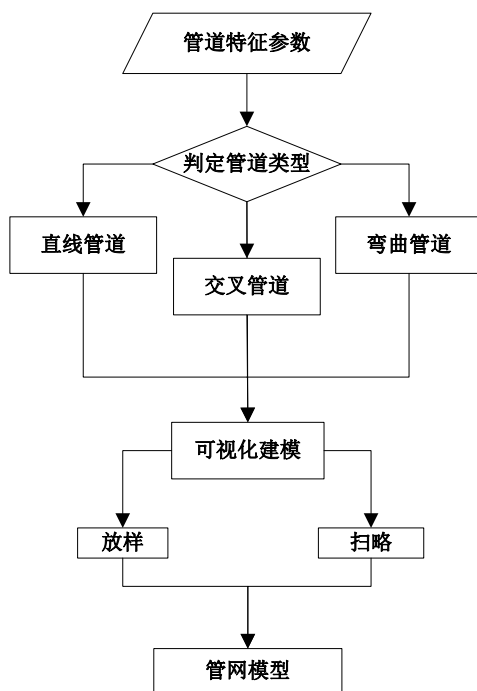


图 5-7 管网模型重建流程图

Fig. 5-7 Flow chart of pipe network model reconstruction

管网模型重建的结果如图 5-8 所示：图 a) 为第一个点云数据的管网模型重建效果图，图 b) 为第二个点云数据的管网模型重建效果图。

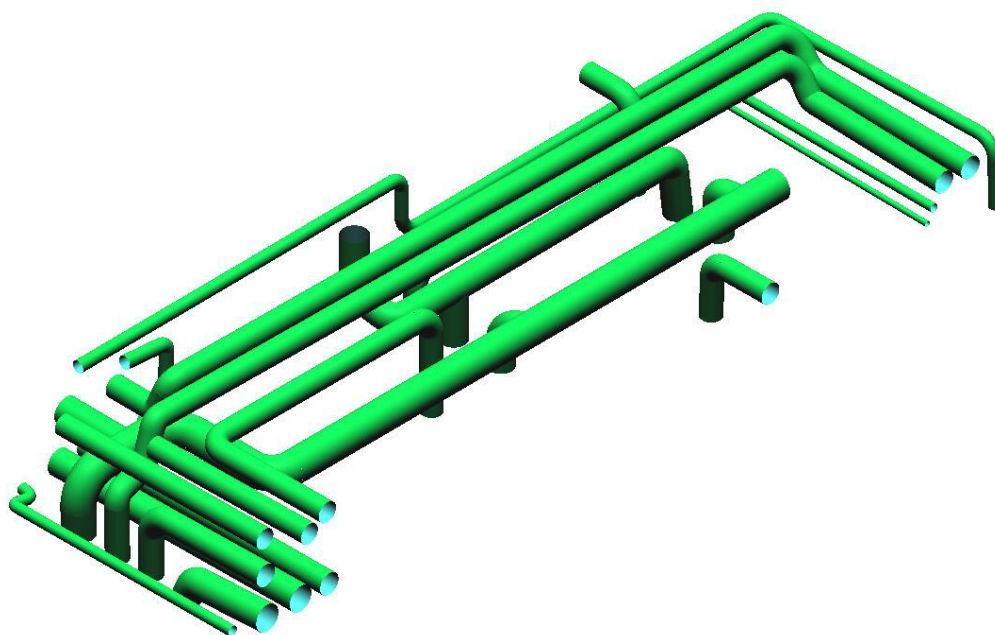


图 5-8 a) 第一个管网模型重建效果图

Fig. 5-8 a) The result of the first pipe network model reconstruction

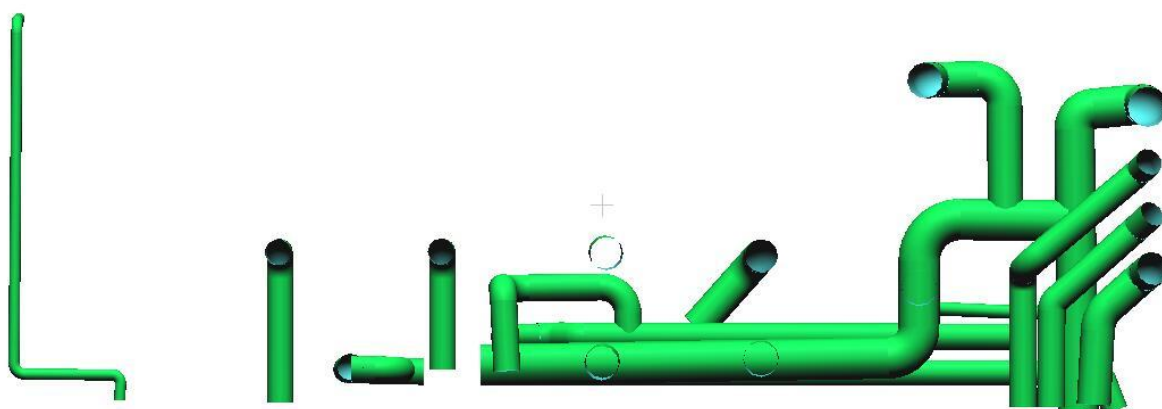


图 5-8 b) 第二个管网模型重建效果图

Fig. 5-8 b) The result of the second pipe network model reconstruction

5.3 实验结果分析与评价

经过数据的预处理、管道参数提取、综合管网模型重建之后实现了管网模型的三维重建，为了对管网模型做出评价，则需要对模型的重建情况及其误差情况进行分析。通过重建的管网模型与三维点云数据进行比较，对比图如图5-9 a)、b)所示，成功重建的管道模型所占的百分比，经对比发现90%的管网数据成功实现了模型重建。然后对模型与点云数据的拟合误差进行对比分析。误差分析结果如图5-10所示：右面的色码等级表示每一个颜色对应的误差大小，左面的彩色云图显示了每个点相对模型的的法向误差。

图5-11为二维横向剖面图的误差分析的彩色云图显示，图5-12为二维竖向剖面图的误差分析的彩色云图显示，图中的注释显示了某一特定点上的模型与点云数据的差距。

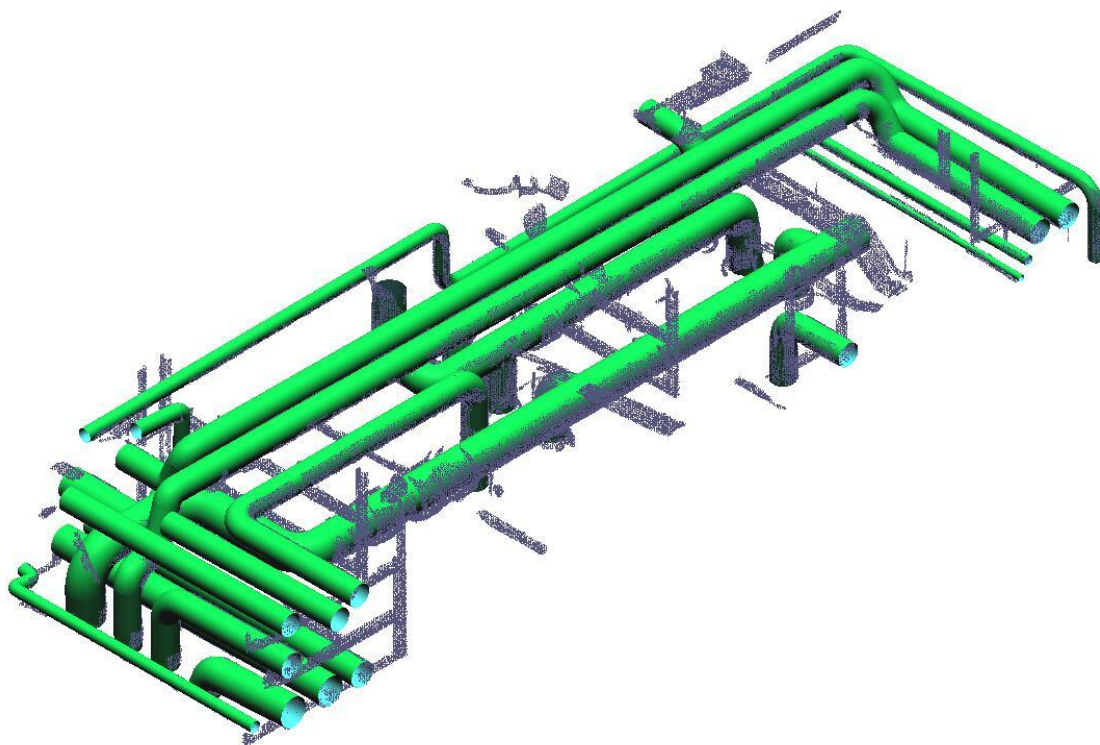


图5-9 a) 第一个管网模型与三维点云数据对比图

Fig. 5-9 a) The first pipe network model and the 3D point cloud data contrast figure

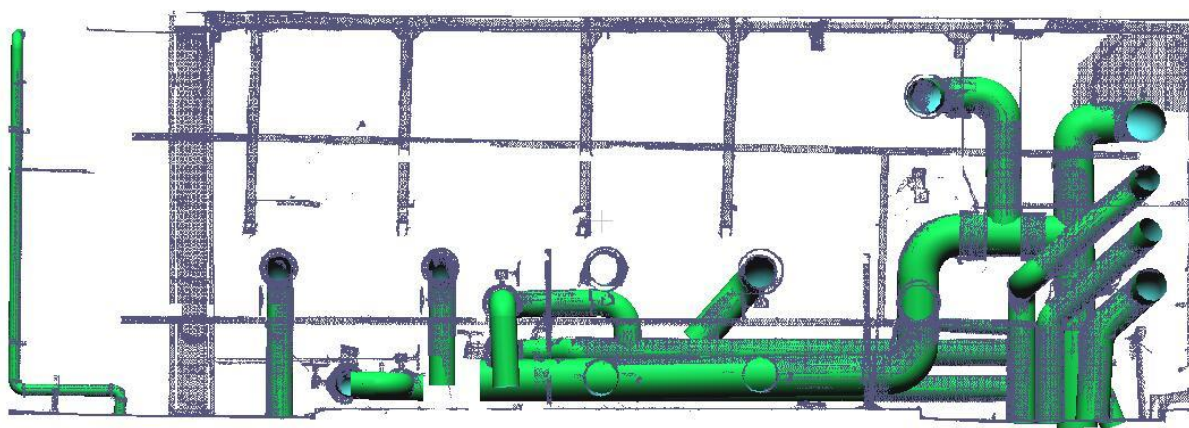


图5-9 b) 第二个管网模型与三维点云数据对比图

Fig.5-9 b) The second pipe network model and the 3D point cloud data contrast figure

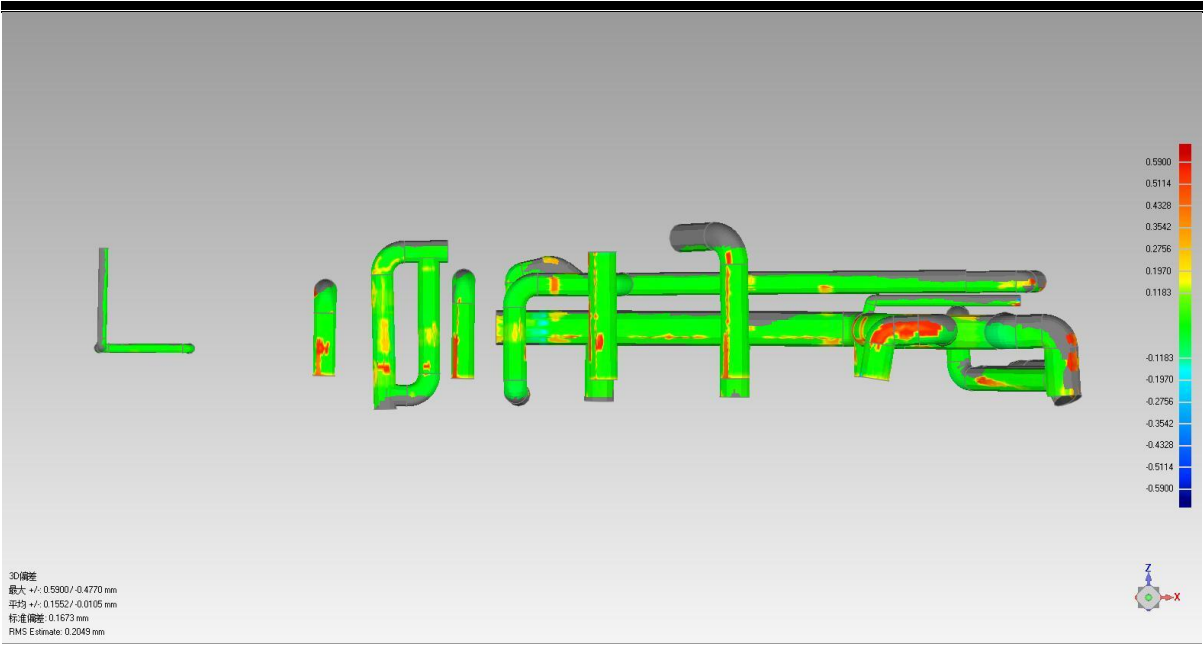


图 5-10 三维模型误差分析彩色云图显示
Fig. 5-10 Color cloud picture showing the 3d model error analysis

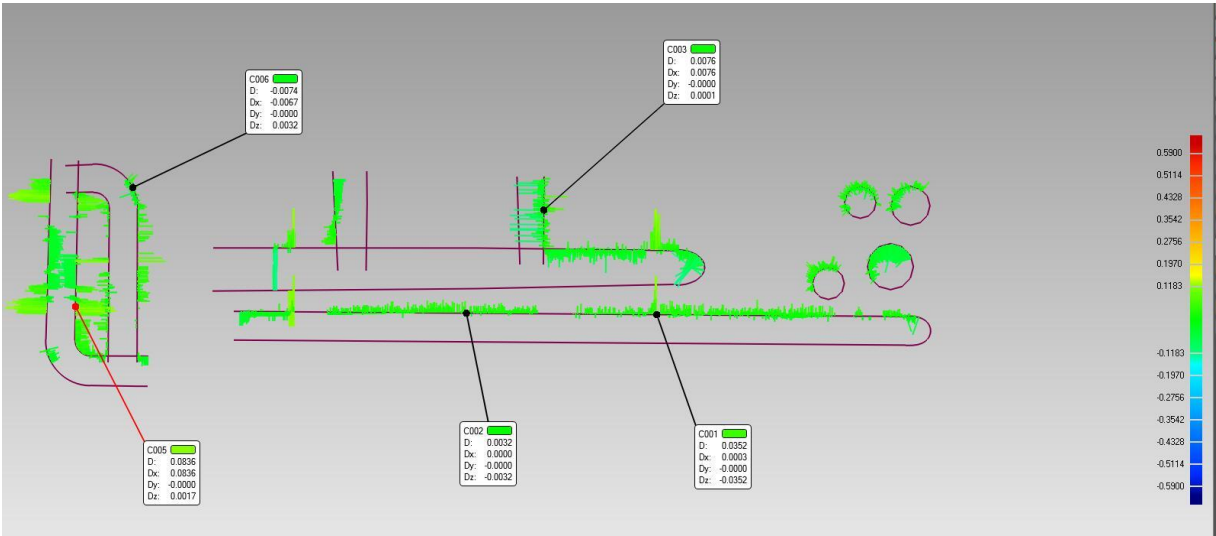


图 5-11 2D横向截面误差分析彩色云图显示
Fig. 5-11 Color cloud picture showing the 2d transverse section error analysis

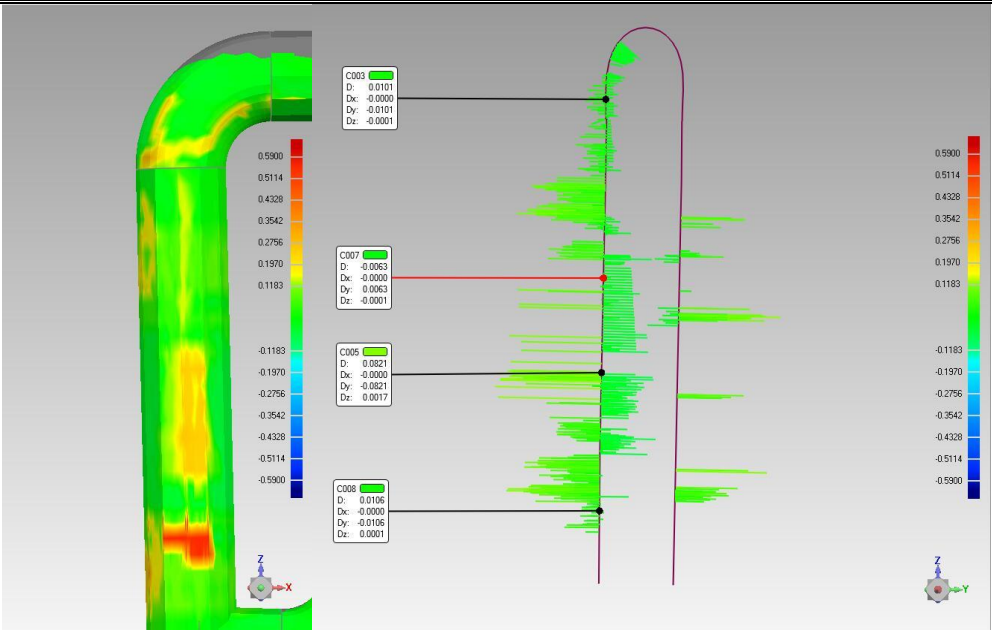


图 5-12 2D 竖向截面误差分析彩色云图显示

Fig. 5-12 Color cloud picture showing the 2d vertical section the error analysis

表格5-1为误差分析报告，其中包含了最大误差、平均误差、标准误差和残差估计。

表 5-1 误差分析表（单位：毫米）
Table 5-1 error analysis table

误差项	2D横向偏差	2D竖向偏差	3D 偏差
最大误差	0.0906/-0.0906	0.0906/-0.0906	0.5900/-0.4770
平均偏差	0.0021/-0.0160	0.0314/-0.0192	0.1461/-0.0085
标准差	0.0277	0.0334	0.1579
残差估计	0.0280	0.0375	0.1875

5.4 本章小结

根据本文前面算法的理论研究结果，本章主要介绍了研究工作的程序设计与实现，对要实现的算法设计了工作流程图。在第三章、第四章中已经对三维管网建模技术的完整过程进行了详细的论述，在整个的建模过程中，涉及到了数据的处理、管道参数的提取以及管网模型的重建。每一部分包含的步骤也比较多，故本章就建模过程关键步骤的实现做了详细介绍，重点介绍了管网的数据分割、骨架线提取与三维重建部分。本章基于 Visual Studio 2013 平台利用 C++语言成功编写实现了三维管网的建模算法。最后以两个石化工厂的管网三维点云数据作为实例应用，对工厂内的管道进行了三维管网模型的重建，实现了管网的自动建模，验证了以上理论与方法的可行性与实用性。

第6章 结论与展望

6.1 结论

本文是在分析对比当前三维管网模型重建理论与方法的基础上,以工厂的管网为研究对象,对基于三维点云数据的管网模型的自动重建过程进行了研究。提出了一种从原始点云数据高效而又准确的建模方法对三维管网模型构建过程中的关键点如数据的预处理、参数的拟合、模型的生成等做出了详细的阐述,并依据本文的算法和技术利用管网系统的大量激光雷达点云数据,实现三维管网模型的自动构建。梳理整个研究过程,本文主要研究成果如下:

(1) 通过阅读文献根据管道表面点特征相似的特点,本文提出了基于点云数据局部特征约束进行空间欧式聚类分割单个管道点云数据,去除非管道数据。将复杂管网模型建模简化为单个管道建模,有效的降低了建模的复杂度

(2) 管道骨架线提取研究,比较了水平集法、表面收缩法、L1-中值法等骨架线提取的算法,根据管道数据的特点选取了 L1-中值法完成骨架线的提取。由不完整的管道点云数据提取出正确的拓扑表达,然后反过来修正由于原始数据的缺失在建模过程的影响。

(3) 管道参数拟合,将管道面上的散乱点云数据垂直其骨架线进行切割,对切割后的数据块进行拟合圆柱,根据微分几何理论就可以得到拟合的圆柱面的半径以及管道的中心轴线的点。沿着骨架线的方向依次拟合圆柱面,就可以得到所有管道的半径以及中心轴线。

(4) 提出一个适合管网模型重建的算法。对比了目前常见的三维自动构模的算法,对扫掠与放样的原理进行了详细阐述,根据拟合的管道的半径以及中心轴线,利用扫掠和放样的方法完成直管模型、弯管模型的重建。不仅解决了简单的直线管道的建模问题,而且解决了弯管模型的平滑处理以及交叉管道建模中存在的管道贯通问题,并且在理论的基础上利用 C++ 语言进行编程实现了混合管网的自动建模。

6.2 展望

地面三维激光扫描将激光雷达技术应用到三维管网模型的重建与管理中是一件极有意义的事情,这符合现代三维重建的发展方向。基于点云数据的管网模型重建在理论和实践方面都有着长足的发展,有着很好的发展前景和经济效益。很多公司和学者都相继研发了自己的管网建模模块,但功能上良莠不齐,对于管网三维重建的工作还有待于进一步的研究和实现。本文基于大量的理论研究与算法分析探索出一条可以从杂乱的并且有数据缺失的工厂点云数据中完成管网模型自动重建的较为合理的技术路线。通过设计、编写程序实现了管网模型的三维重建,而且经过实践检验,效果良好,为进一步的研究奠定了坚实的基础,尽管在管网模型自动构建技术的研究取得了一定的成果,实践应用还需要相当多的努力和大量的工作,还有许多的问题值得进一步的研究:

-
- (1) 在管道数据分割算法中, 使用预设距离阈值进行点云聚类, 容易受经验值限制, 因此考虑使用高斯能量函数进行欧式距离聚类。
 - (2) 虽然本文提出的建模算法在功能方面具有很好的稳定性, 并且在实际的管网数据建模中得到了很好的检验, 但本文提出的算法可以很方便的进行并行运算, 大大提高建模效率, 由于时间关系, 本文并没有进行效率优化, 后续的建模研究中会涉及到管网建模的并行运算。以适应大范围管网数据自动建模、管网三维分析功能的需求等。
 - (3) 三维激光扫描技术是人们获取空间信息的一种全新的技术手段, 在管网三维重建及可视化技术中的作用越来越突出, 其在三维重建方面具有无可比拟的优越性。但是数据采集方面, 由于管道的隐蔽性给管道数据的采集带来了很大的困难, 使采集管道数据不全面、不精确等。
 - (4) 随着城市管道系统中对于三维管网信息管理需求的增加, 三维管网建模技术必定可以在城市及工厂的规划、建设领域做出杰出的贡献。这种建模方法不仅是为管道准备的, 各种规则的线状模型例如: 巷道、地上地下管道都可以通过这种方法来实现。

参考文献

- [1] 宗敏. 基于三维激光扫描技术的复杂构件检测[D]. 南京信息工程大学, 2013.
- [2] Son H, Kim C, Kim C. Automatic 3D reconstruction of as-built pipeline based on curvature computations from laserscanned data[C] Construction Research Congress. Vol. 925934. 2014.
- [3] Masuda H, Tanaka I, Enomoto M. Reliable surface extraction from point-clouds using scanner-dependent parameters. Computer-Aided Design and Applications. 2012; 10(2): 265-277.
- [4] Belton D, Lichti D. Classification and segmentation of terrestrial laserscanner point clouds using local variance information. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006; 36(5): 44-49.
- [5] Rabbani T, Heuvel F, Vosselman G. Segmentation of point clouds using smoothness constraint. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006; 36: 248-253.
- [6] Kawashima K, Kanai S, Date H. As-built modeling of piping system from terrestrial laser-scanned point clouds using normal-based region growing[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2014, 1(1): 13-26.
- [7] Rabbani T, Heuvel F. 3d industrial reconstruction by fitting CSG models to a combination of images and pointclouds. In: Proceedings of ISPRS The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; 2004 July 12-23; IST, Turkey; 35(B3): p.7-12.
- [8] Aurelien B, Chaine R, Marc R, Thibault G, Akkouche S. Reconstruction of consistent 3d CAD models from point cloud data using a priori CAD models. In: ISPRS Workshop Laser Scanning 2011; 2011 Aug 29-31; Calgary, Canada; submission-26.
- [9] Johnson A, Hoffman R, Osborn J, Hebert M. A system for semi-automatic modeling of complex environments. In: Proceedings of IEEE International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling; 1997 May 12-15; Ottawa, Canada; p.213-220.
- [10] Namatame T, Mizoguti T, Kobayashi Y, Shirai K. As-build modeling using Manhattan-world assumption(in Japanese). In: Proceedings of the 2011 Japan Society for Precision Engineering Autumn meeting; 2011 Sep 20-22; Kanazawa, Japan; F06.
- [11] El-Halawany S, Lichti D. Detection of road poles from mobile terrestrial laser scanner point cloud. In: C2011 International Workshop on Multi-Platform/MultiSensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM); 2011 Jan 10-12; Xiamen, China; p.1-6.
- [12] Vosselman G, Gorte BGH, Sithole G, Rabbani T. Recognising structure in laser scanner point clouds. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004; 46: 33-38.
- [13] Lee J, Kim C, Son H, Kim C. Skeleton-based 3d reconstruction of as-built pipelines

- from laser-scanned data. In: Proceedings of the 2012 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering; 2012 Jun 17-20; Clearwater Beach, FL: p.245-252.
- [14] Marshall AD, Lukacs G, Martin RR. Robust segmentation of primitives from range data in the presence of geometric degeneracy. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2001; 23(3): 304-314.
- [15] Patil A K, Park S S, Holi P, et al. Automatic Pipeline Generation by the Sequential Segmentation and Skelton Construction of Point Cloud[J]. 2014.
- [16] Qiu R, Zhou Q Y, Neumann U. Pipe-Run Extraction and Reconstruction from Point Clouds[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 8691:17-30.
- [17] Lee I K. Curve reconstruction from unorganized points[J]. Computer Aided Geometric Design, 2000, 17(2):161-177.
- [18] Yong-Jin L, Jun-Bin Z, Ji-Chun H, et al. Cylinder detection in large-scale point cloud of pipeline plant.[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2013, 19(10):1700-1707.
- [19] Fu Y, Zhu X, Yang J, et al. Pipe reconstruction from unorganized point cloud data: U.S. Patent 8,605,093[P]. 2013-12-10.
- [20] 李岸, 柯映林. 点云数据的管道面重构[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(5):768-771.
- [21] 孙亮, 赵翠莲, 施晓磊,等. 基于切片法的管道重构算法及其应用[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(4):15-18.
- [22] 龚友平, 陈国金, 陈立平. 基于切片方法截面数据处理[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3):321-325.
- [23] 史敏. 城市管网三维模型的设计与实现[D]. 北京邮电大学, 2009.
- [24] 吴然. 校园地下管网三维可视化应用研究[D]. 北方工业大学, 2015.
- [25] 陈玉龙. 地下管网三维建模技术的研究与实现[D]. 北京建筑大学, 2014
- [26] 陈建国, 张玲. CAD三维建模技术的发展[J]. 机电技术, 2010, 33(4):141-145.
- [27] 瞿畅, 张小萍. 基于WTK的地下管网的虚拟设计[J]. 南通大学学报:自然科学版, 2008, 7(2):29-32.
- [28] 王秀玉, 毕雪杰, 戴金英. 论管道地理信息数据采集发展过程[J]. 城建档案, 2009(6):48-49.
- [29] 刘广社, 王浩. 基于 OpenGL 的管道三维显示方法研究[J]. 城市勘测, 2007 (1): 49-51.
- [30] 李清泉, 严勇, 杨必胜, 等. 地下管道的三维可视化研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2003, 28(3): 277-282.
- [31] 杜国明, 龚健雅, 熊汉江,等. 城市三维管网的可视化及其系统功能实现的关键技术[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2002(5):534-537.
- [32] 杨冠军, 陈洪, 朱德海. 基于ArcGIS Engine的三维管网设计与实现[J]. 微计算机信

- 息, 2007, 23(31):170-172.
- [33]朱合华, 吴江斌. 管道三维可视化建模[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 30-33.
- [34]左国成, 王山东. 基于旋转矢量法的三维管道建模[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(1): 118-120.
- [35]王建明, 苏永琳. 空间多管相贯计算机放样的新算法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2006, 35(6): 29-31.
- [36]吴海毓. 三维激光扫描技术在古建数字化保护中的应用[D]. 北京建筑工程学院, 2008.
- [37]刘焕彬, 余正生. 点云管道曲面的重构[J]. 杭州电子科技大学学报, 2011, 31(2):66-69.
- [38]Hoppe, Hugues, DeRose, Tony, Duchamp, Tom, et al. Piecewise smooth surface reconstruction[C]// Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, 1994:295-302.
- [39]梁群仙. 基于激光雷达三维点云数据曲面重构技术的研究[D]. 北京交通大学, 2012.
- [40]王丽辉. 三维点云数据处理的技术研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- [41]陈静, 陈仁喜. 基于TIN渐次加密的LiDAR点云数据滤波[J]. 测绘与空间地理信息, 2014(11):107-110.
- [42]隋立春, 张熠斌, 张硕,等. 基于渐进三角网的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2011, 36(10):1159-1163.
- [43]黄洪宇, 陈崇成, 邹杰,等. 基于地面激光雷达点云数据的单木三维建模综述[J]. 林业科学, 2013, 49(4):123-130.
- [44]孙晓东. 人体点云数据处理中若干问题的研究[D]. 北京工业大学, 2012.
- [45]Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1):12-49.
- [46]Sethian, J.A. Numerical algorithms for propagating interfaces: Hamilton-Jacobi equations and conservation laws. Journal of Differential Geometry, 1990,31(1):131~161.
- [47]赵平建. 基于三维散乱点云的曲面重构技术研究[D]. 大连理工大学, 2009.
- [48]Verroust A, Lazarus F. Extracting skeletal curves from 3D scattered data[C]// International Conference on Shape Modeling and Applications, 1999. Proceedings. Shape Modeling International. IEEE, 1999:194-194.
- [49]Oscar Kin-Chung Au, Chiew-Lan Tai, Hung-Kuo Chu, Daniel Cohen-Or, Tong-Yee Lee. 2008, Skeleton extraction by mesh contraction. SIGGRAPH '08 ACM SIGGRAPH 2008 papers Article No. 44.
- [50]Cao J J, Tagliasacchi A, Olson M, et al. Point Cloud Skeletons via Laplacian Based Contraction [C].Proceedings of the 2010 Shape Modeling International Conference, 2010: 187-197.
- [51]Daszykowski M., Kaczmarek K., Heyden Y., et al.. 2007. Robust statistics in data

- analysis - a review: Basic concept. *Chemometrics and Intelligent Lab. Sys.* 85, 2, 203-219
- [52] 伍世浩. 点云模型的L₁-中心骨架[D]. 华南理工大学, 2014.
- [53] 李岸. 反求工程中一类规则曲面特征提取关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, ZOOS, 2005.
- [54] 反求工程 CAD 建模中的特征技术研究 [D][D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [55] 冯发杰. 电缆隧道切片点云的自动提取及几何参数分析[J]. *工程勘察*, 2013 (12): 53-56.
- [56] 柯映林, 肖尧先. 反求工程 CAD 建模技术研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2001, 13(6): 570-575.
- [57] 孙亮, 赵翠莲, 施晓磊, 等. 基于切片法的管道重构算法及其应用[J]. *机械设计与研究*, 2010, 26(4): 15-18.
- [58] 刘云峰. 反求工程中的混合切片技术[J]. *计算机辅助设计及图形学学报*, 2003, 15(6): 741~ 745.
- [59] Svensson, S., Nuström, I., and Sanniti di Baja, G. (2002). "Curve skeletonization of surface-like objects in 3D images guided by voxel classification." *Pattern Recogn. Lett.*, 23(12), 1419-1426.
- [60] van Gosliga, R., Lindenbergh, R., and Pfeifer, N. (2006) "Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning." *Proc. ISPRS Commission V Symp. 'Image Engineering and Vision Metrology'*, Dresden, Germany.
- [61] Bauer, U., and Polthier, K. (2009) "Generating parametric models of tubes from laser scans." *Comput.-Aided Design*, 41(10), 719-729.
- [62] 孙家广, 杨长贵. *计算机图形学*. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [63] 钟华, 马德骏. 沿路径放样的算法设计及程序实现[J]. *武汉工业大学学报*, 1999, 21(1): 51-54.
- [64] 陈明, 胡世德. 基于数据挖掘的桥梁抗震分析结果可视化系统设计[J]. *计算机辅助工程*, 2004, 13(4): 46-50.
- [65] 洪斌, 爱民. *AutoCAD 2007 中文版实用教程*[M]. 人民邮电出版社, 2006.
- [66] 赖承芳. 三维建模技术及其在城市地下管网系统建设中的应用 [D][D]. 中国地质大学 (北京), 2013
- [67] 陈月凤. 基于虚拟环境的工程图学三维建模系统的开发[D]. 山东大学, 2010.
- [68] 肖明兴. 三维包装 CAD 中的几何造型系统[D]. 西安理工大学, 2003.
- [69] Wan Xianmei. Study and Realization of the 3D Pipe Network Geographical Information Systems [J]. *Shandong University of Science and Technology*, 2004
- [70] 章冲. 网络环境下煤矿三维建模及可视化关键技术研究[D]. 解放军信息工程大学, 2010.
- [71] 张煌, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用[J]. *中国图象图形*

- 学报,2001,6(03):285~290.
- [72]李建华,边馥苓.工程地质三维空间建模技术及其应用研究[J].武汉大学学报,2003,28(01): 25~30

附录

一、硕士研究生期间公开发表的论文

- 1、Wang Y, Shi H, Zhang Y, et al. Automatic registration of laser point cloud using precisely located sphere targets[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1).
- 2、张岩岩, 黄明. 耕地动态变化研究[J]. 黑龙江科技信息, 2015(18), 44-44.
- 3、黄明, 张岩岩. 三维管网自动建模研究[J]. 地理信息世界, 2016.

二、硕士研究生期间曾参与的科研项目

- 1、北京市北京建筑大学大兴校区数字化项目
- 2、文化遗产数字化保护的理论与方法-复杂几何高精度数字化重建理论与方法-国家重点基础研究发展计划 973 项目
- 3、多源数据融合精细三维重建系统;
- 4、基于三维激光点云数据重构古建筑三维模型的算法研究—现代城市测绘重点实验室开放课题项目。

致 谢

光阴似箭，三年时光如白驹过隙一般转瞬即逝，回首往昔，韶光如梦。即将告别美丽的北京建筑大学，踏进社会这个大熔炉，开启新的人生旅途。在论文即将付梓之际，回顾三年硕士生涯，给我提供帮助的人颇多。在此，谨向所有曾在我迷茫之际鼓励帮助、关心支持我的老师、朋友和家人表示深深的感谢。

首先要衷心地感谢我的一导师庞蕾老师，还未正式入学之前，她就曾给予我生活上的帮助以及学习上的规划。虽然在过去的三年中，我并没有跟着她做研究，但是每当我遇到困难时她就像一位妈妈一样尽全力给予我帮助与指导，让我感激涕零。

感谢王晏民老师、杜明义老师、赵西安老师、王振远老师、胡春梅老师、王国利老师、郭明老师、危双丰老师、张瑞菊老师、黄鹤老师、吕书强老师、侯妙乐老师、靖常峰老师、朱凌老师、霍亮老师、杨红粉老师等所有测绘院老师的培养与帮助，个人能力的提升离不开各位老师的教导。

特别感谢黄明老师，一位对工作兢兢业业、不分昼夜的导师，三年来对我的学习和科研悉心指导、劳心劳力。尤其是在本论文的选题及研究过程中，更是给予悉心的指导和不懈的支持。是他在迷茫的时候为我推开了通往计算机图形学领域的大门，正是黄老师的指引和推动，才使我从一个执行者蜕变位一个探索者。他多年的求学经历、丰富的教学经验及科研经验我来说都十分珍贵。每次跟黄老师讨论我对于进一步研究的一些想法时，他对研究方向的准确把握和在计算几何领域的独到见解都使我受益匪浅。黄老师精益求精的工作作风，实事求是的处事方式，严肃的科学态度，严谨的治学精神，都深深地感染着我、激励着我。

感谢石宏斌师兄、张晓彤师姐、王志良师兄、杨艳师姐、王天明师兄、张磊师兄、杨芳、秦强、张勇、高危、王月琴、朱谊林、郑少开、魏冠楠、彭江帆、翟聪聪、吴桂凯、张建广、马朝帅、纪超、张旭、叶梦轩等数字建筑研究所的所有兄弟姐妹，作为一个团队，我们一起学习，共同研究。怀念与你们一起渡过的快乐时光，这将是我一生的财富。特别要感谢我的师兄杨炳伟，他在我研究生的学习和生活中给了我很多的帮助和鼓励，总在我最需要的时候给予帮助。

感谢我亲爱的舍友—戚英、张冬梅、汤梦洁、艾丛、王昭娜，与你们在一起的日子是我最快乐的时光，我们彼此互相鼓励、互相帮助，一路走来感谢有你们与我同在。佛说前生五百次的回眸，才换来今生一次的擦肩而过。我们如此幸运，才能共度三年研究生生涯，我们一起度过的点点滴滴，我将永生不忘。

“谁言寸草心，报得三春晖”。感谢我的爸爸妈妈多年含辛茹苦的养育，舐犊之情，无以回报，你们的健康快乐是我最大的心愿。谢谢我的哥哥，与其说是我的兄长，不如说是我的良师益友，小升初、中考、高考、考研，每一次考验都有你的帮助与指导，没有你就不会有今天的我！还要谢谢我的闺蜜桑文文，作为医生的你总是能给我的不愉快

对症下药、药到病除，谢谢有你！请你们放心，我将在新的人生旅途中,义无反顾,勇往直前！

最后还要感谢在百忙之中评论我硕士学位论文和参加答辩的各位专家和学者！