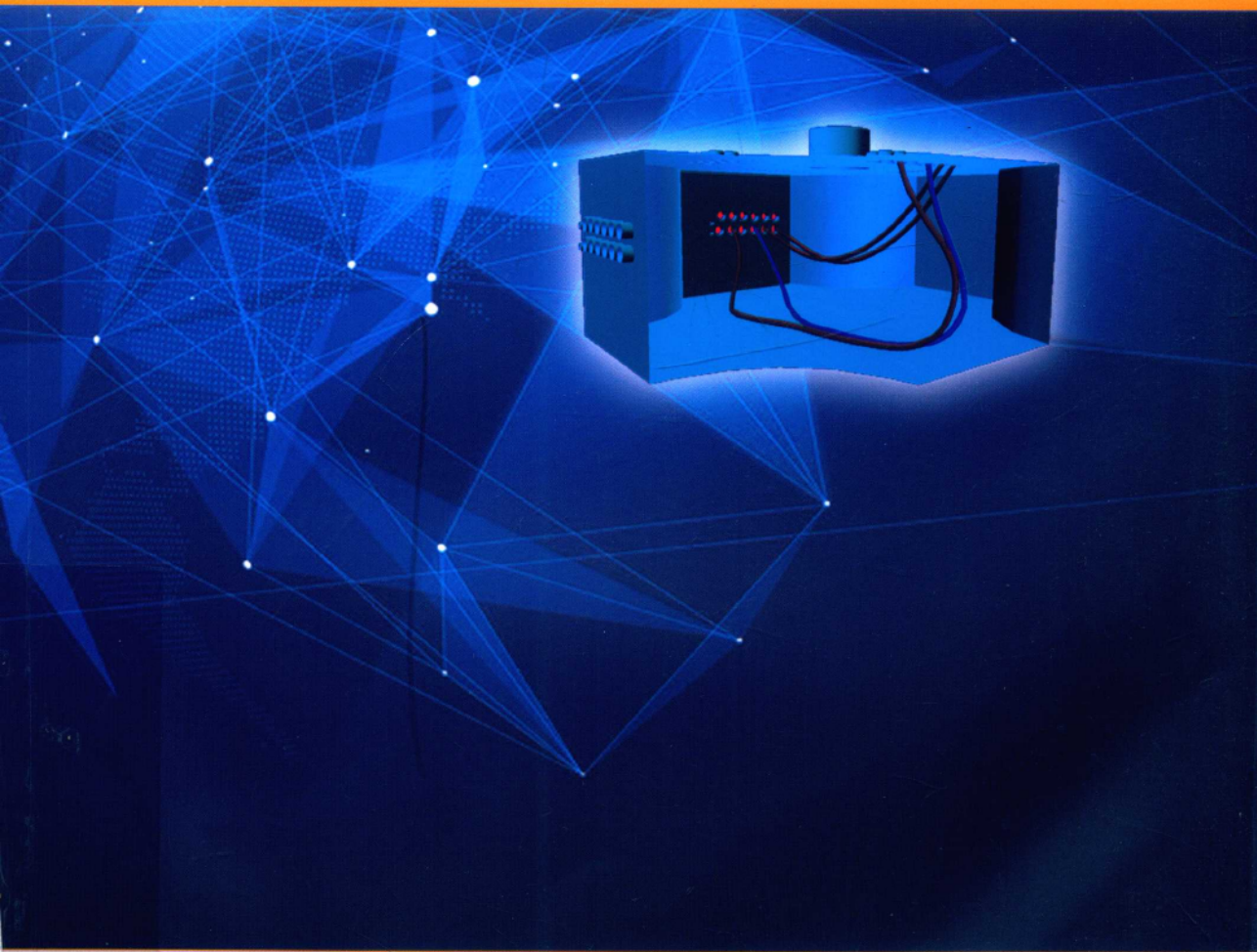


地下工程基础设施 三维建模及应用

赵江洪 杜明义 黄明 马思宇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

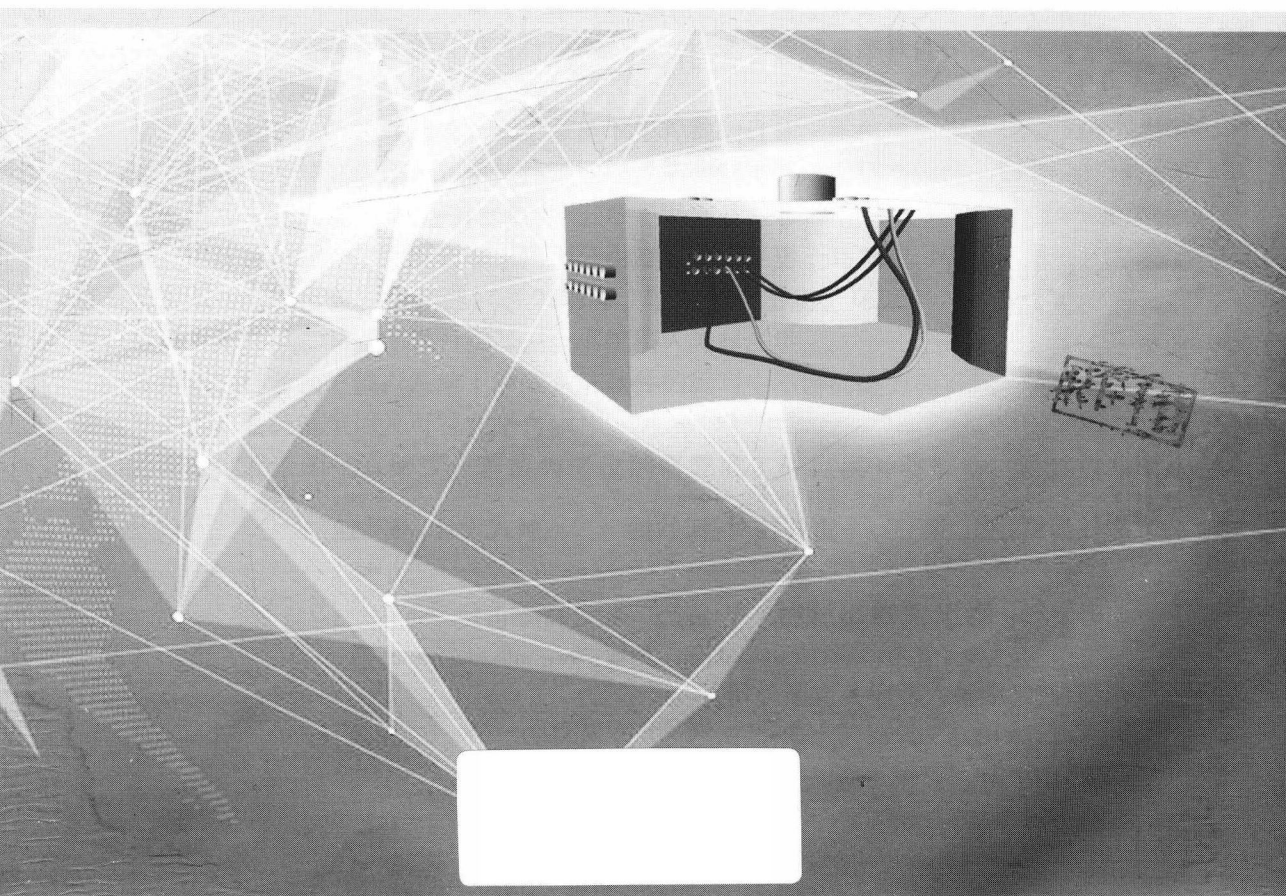
武汉大学出版社

课题研究受以下项目资助：

- 国家自然科学基金项目（41601409）
- 北京市自然科学基金项目（8172016）
- 建筑遗产精细重构与健康监测北京市重点实验室、北京市属高校高水平教师队伍建设支持计划长城学者培养计划项目(CIT&TCD20180322)
- 北京建筑大学高精尖项目（2019年）

地下工程基础设施 三维建模及应用

赵江洪 杜明义 黄明 马思宇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地下工程基础设施三维建模及应用/赵江洪等著. —武汉: 武汉大学出版社, 2019.7

ISBN 978-7-307-20937-4

I.地… II.赵… III.地下工程—基础设施建设—计算机辅助设计—研究 IV.TU94-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 103545 号

责任编辑:王 荣 责任校对:汪欣怡 版式设计:马 佳

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮箱: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 武汉中科兴业印务有限公司

开本: 787×1092 1/16 印张: 6.75 字数: 160 千字 插页: 1

版次: 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-20937-4 定价: 26.00 元。

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

本书主要对地下工程基础设施的逆向三维重建技术进行介绍。

近年来，随着三维激光扫描技术被引入到测绘行业，测绘工作者获取数据的手段和方式得到了极大的改变，数据源的改变带来了技术路线、处理技术、处理手段以及成果展示各个方面的巨大革新。本书正是基于这一技术背景，综合地下工程基础设施三维逆向重建的应用环境，一步步细化提炼而总结出本书的每个章节。

本书所述内容包括基础设施建筑的形态、三维逆向重建数据源、三维重建算法、可视化手段以及地下管线系统软件的设计。同时全书以地下电缆工井以及多个工井连接起来的地下电缆网络作为样例，穿插全书进行讲解。辅之以地下管线系统软件中在三维几何造型方面的代码，供读者进行学习参考。

全书分为七章。第一章绪论、第二章地下工程基础设施三维模型构建及数据组织、第三章地下电缆工井模型构建及几何拓扑重构以及第四章工井电缆模型构建由赵江洪、马思宇、张勇撰写，并提供部分参考代码；第五章工井间管线模型连接及外拓扑连接由黄明、马思宇、贾佳楠撰写；第六章模型三角剖分由赵江洪、张勇、马思宇、张建广撰写；第七章系统实践与应用由黄明、张建广、朱培源、李闪磊、王玥、马思宇、王成、贾佳楠撰写；结语由赵江洪、马思宇进行撰写。全书统稿人为赵江洪。

感谢诸位作者在书稿以及地下管线系统软件的编写中不懈的努力和贡献，同时感谢黄明老师提供的系统框架以及可视化平台。

感谢各位读者的认真阅读，若能为诸位的研究或工作提供一些思路，将感到非常荣幸。

作者

2019年5月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 地下工程基础设施三维模型构建及数据组织	4
2.1 地下工程基础设施三维模型构建	4
2.1.1 Open CASCADE 开源库	4
2.1.2 Open CASCADE 编译及使用	6
2.2 数据结构组织	9
2.2.1 CSG 模型	10
2.2.2 BRep 模型	11
2.2.3 CSG-BRep 拓扑模型内拓扑定义	11
2.2.4 CSG-BRep 拓扑模型外拓扑定义	19
2.3 应用于地下工程基础设施建筑	20
2.3.1 地下管网组成	21
2.3.2 地下管网数据结构	22
2.4 本章小结	24
第三章 地下电缆工井模型构建及几何拓扑重构	26
3.1 工井几何形态描述	26
3.2 工井三维模型的构建	33
3.2.1 点云抽稀	34
3.2.2 点云特征提取	34
3.2.3 点云分割	35
3.2.4 提取点云模型边界线	36
3.3 工井模型几何拓扑重构	41
3.3.1 工井模型几何拓扑重构	41
3.3.2 墙壁预处理	42
3.3.3 墙面投影点计算	45
3.3.4 墙面模型拓扑重构	48
3.4 本章小结	56

第四章 工井内电缆模型构建	57
4.1 电缆几何形态描述	57
4.2 地下工井电缆造型流程	58
4.3 Sweep 放样算法	59
4.4 多样地下电缆精细化三维造型	60
4.4.1 符合点云实际情况的连续 B 样条曲线轨迹线	60
4.4.2 折线形轨迹线	61
4.4.3 螺旋线型轨迹线电缆盘余	63
4.5 本章小结	64
第五章 工井间管线模型连接及外拓扑连接	66
5.1 管线分类及几何特征	66
5.2 工井、电缆及管线拓扑连接	67
5.3 井间管线模型连接及拓扑连接实现	69
5.4 本章小结	69
第六章 模型三角剖分	70
6.1 模型显示原理	70
6.2 Delaunay 三角剖分	74
6.2.1 三角剖分	74
6.2.2 Delaunay 三角剖分	75
6.3 CSG-BRep 拓扑模型查询分析	77
6.3.1 查询子级拓扑元素算法	78
6.3.2 查询父级拓扑元素算法	80
第七章 系统实践与应用	83
7.1 概述	83
7.2 系统功能设计	84
7.2.1 数据图层化管理	84
7.2.2 三维建模	85
7.2.3 场景交互	86
7.2.4 开发环境与工具	86
7.3 功能模块与界面	87
7.4 实验结果	89
结语	94
参考文献	95
附录	100

第一章 绪 论

城市地下管网是发挥城市功能和确保城市快速协调发展的重要基础设施。随着我国加大市政基础设施信息化建设的力度，依赖于施工设计图以及 CAD 图纸的传统城市地下管网已经不能满足设备监控查询的需要，因此，地下管线的逆向重建成为城镇现代化建设中不可或缺的基础资料，也成为城市决策的重要基础资源之一^[1]。由于工井内部环境复杂，各类管线纵横交错，井内存在积水、淤泥等情况，使用人工测量等方法难以获取全部的井内信息，并且施工存在一定的危险性。激光雷达技术具有快速性，不接触性，穿透性，实时、动态、主动性，高密度、高精度，数字化、自动化等优点，目前已经被应用于矿井模型的构建^[2-4]，采用三维激光技术获取基础数据提高了工井普查的安全性。故地下工程设施建筑依赖于三维激光点云数据的逆向重建成为当今的发展趋势。



图 1-1 城市地下管网示意图

地下管网数据主要由管线与工井两类组成。管线连接方面，卢丹丹等^[5]提出一套高精度自动三维建模的方法与思路，利用二维管线普查数据，按照管点和管线段的特点，驱动生成地下管线三维模型，并可同步更新其拓扑关系；毕天平等^[6]以二维管线数据为基础，建立三维管网模型数据标准，进行三维管网整体自动建模及可视化；李清泉等^[7]以 Polyvrt 拓扑结构以及空间实体模型相结合的方法对管网数据进行管理，生成管线模型并

记录其拓扑关系。但是在以上的研究中,管网在三维空间数据组织上,一般将地下管网抽象为管点和管线段两种实体,采用“两点一线”的静态层次结构,空间拓扑关系也仅是点与线,线与线之间的关系,缺少了管线数据与对应墙壁之间的线面关系以及管点与管井之间的点面关系。

工井作为多根管线的室内交汇处,井内墙壁上的管孔与电缆连接各有不同,管线交错关系复杂,但是工井可以清晰地反映出地下电缆的拓扑连接关系,对建立地下电缆工井网络模型有十分重要的意义。在工井建模方面,周京春^[8]将工井抽象化为井室主体以及井盖两个对象,对其进行 CSG 实体建模;刘军等^[9]基于 Skyline 提出建立城市地下管线三维系统的方法,将不同的工井抽象为不同的三维符号,采用 3ds Max 对其进行建模后导入管线系统;王舒等^[1]对工井抽象为点模型,赋予平面位置、高程、构筑物等信息;吴思等^[10]对地下管线井室进行分类,构建三维井室模型,并基于 DirectX 进行自动化建模。钟远根等^[11]在传统管线数据标准基础上,扩充了井室调查内容以满足井室自动建模需要。以上对于工井建模的方法在不同的场景具有不同的优势,但是在三维建模方面都只是将工井作为一个整体进行建模,在拓扑结构方面将工井抽象为一个点与管线进行连接。这些方法缺少工井模型以面为单位的建模方法,并且没有对工井墙壁上的孔洞进行建模。墙面上的孔洞是管线进出工井的渠道,在检测、维护以及新增管线时可通过对应孔洞找寻到需要处理的管线。综合以上原因,对工井进行以面为单位的精细化建模并且表现出墙壁上的孔洞,在施工、生产及维护时都具有重要意义。

缆线作为地下管网中能源资源的运输核心,不同学者采用了不同的建模方式对缆线进行表达。Zhang 等^[12]对于管线进行了高精度符合实际造型的三维重建研究,模型精确度高但是建模耗时较长,不适合工程应用,并且无法建立管线间的拓扑关系。王舒等^[1]采用 Sweep 方法对地下管线进行重建,但未给出满足电缆实际走向的生成方法。扈震等^[13]提出管件设施曲面动态套合和模型动态变换两种三维模拟方法用于地下管线模型构建,但是构建的模型与实际有一定误差。王涛等^[14]对贯穿于复杂、狭小空间通路的管道设计方面提出了两种不同管道设计方案。谭仁春等^[15]与卢小平等^[16]对地下管道以及地面建筑进行了集成化的建模与显示,但是缺少对于管道段的分析。综合以上缆线建模现状,在满足缆线精细化建模的同时难以建立缆线间的拓扑关系,而能有效提供管线或者缆线间的拓扑连接关系时又无法满足精细化造型的需求,同时缺少对于堆积在井内的盘余缆线的表示,所以对缆线进行精细化三维模型构建的同时需要关注缆线与缆线之间的拓扑关系具有重要的意义。

在采用点云作为基础数据进行建筑建模方面,许多专家也对其进行了研究。基于三维激光点云数据进行三角网曲面建模是一种高精度逆向重建的方法。Edelsbrunner^[17]提出的 Wrapping 算法是一种基于隐式曲面的算法,基于尺度空间和多尺度分析的算法重建效果较好,但是对于大型曲面重建时重建效率较低^[18];对于点云数据采取渐进滤波的方式进行建筑物三维信息的提取,Vosselman^[19]利用 3D Hough 变换得到建筑物平面片,从而实现建筑物三维重建的目的。在异构建筑三维拓扑重建方面,贺彪等^[20]研究提出的自动拓扑重建算法可以有效解决多源异构建筑物三维拓扑重建,在建筑物内拓扑以及外拓扑方面重建效果良好。以上算法在模型曲面重建上都具有非常重要的参考价值,但是由于扫描数据

量大,采用点云直接进行曲面三角网重建效率非常低;由于扫描设备以及扫描条件的限制,使得扫描物体在特定区域或位置均有不同程度的数据缺失以及噪声,常规算法难以重建出此类数据的曲面模型,并且无法对墙面孔洞进行建模。

在三维模型拓扑运算方面,国内外专家也在不懈地探究。通过布尔操作对简单模型进行拓扑重构,可以被认为是塑造复杂模型中最重要并且有效的方法。在布尔运算方面,学者们对于交叉以及边界评估已经进行了很多的研究,从未止步。为了更优雅地对布尔运算进行表达,有些研究者尝试基于隐式表示的方法对布尔运算进行表达^[21],最典型的当属构造实体几何模型(constructive solid geometry, CSG)。采用这种隐式表达的方法,布尔运算显得十分简洁,没有冗余信息,数据量较小,修改容易。但是采用 CSG 这种隐式表达的方法存在着一定的缺点:隐式表达方法不能够生成明确的显示表达模型,所以无法支持对于几何元素及其拓扑关系的查询;CSG 难以表示包含自由曲面的;并且难以实现对形体的局部操作。为了克服以上隐式表达的缺点,一些基于体积的布尔表示方法变得更加流行,包括体素(voxel)和表面(surfel)网格等模型表示方法。基于这种表达方式,三维模型的布尔运算可以更加有效并且具有鲁棒性。Chen 等^[22]针对网格提出一种更为有效的模型布尔运算方法,采用 LDI(layered depth images)技术来加速三角形元素的分类;Bernstein 等^[23]提出了一种在交互式几何建模环境中计算三角网格拓扑变化的方法,可以应用于任意非实体、非流形、非封闭自交曲面,更具有鲁棒性;Schmidt 等^[24]摒弃了传统的对网格在交叉曲线上进行精确分割的方法,采用一种自适应的方法重新确定截面区域的输入网格,对于相交的部分三角形进行删除后采用高质量的三角形填充原有区域,能够处理大量面部略微相互穿透或接近重合的情况;Jiang 等^[25]在网格公共空间处采用八叉树对其进行划分,来减少交叉检测的时间,这种方式可以更加快速以及具有鲁棒性地对 BRep(boundary representation)网格进行布尔运算。在三维模型布尔运算上,国内外学者致力于不断提升运算的效率以及切割的准确性。

综合以上分析,本书提出一套针对地下工程基础设施进行真实化模拟的精细数字化表达方法,并且设计出适用于具有连接关系的地下建筑组群的拓扑数据结构,可以实现建筑内外的无缝连接。本书中的方法可以解决直接采用点云进行构网情况下模型不完整及速度较慢的问题,并且在拓扑结构上突破传统地下建筑群中单一的管孔与管线的点线连接关系以及管线之间的线线连接关系,添加管孔与墙壁的点面关系以及管线与墙壁的线面关系,在模型描述上更为准确。

第二章 地下工程基础设施三维模型构建及数据组织

2.1 地下工程基础设施三维模型构建

近年来,随着三维激光扫描技术被引入到测绘行业,测绘工作者们获取数据的手段和方式得到了极大的改变。通过利用三维激光扫描仪来实地测量建筑物等空间模型,可以在短时间内获取到海量的点云数据,这些数据量往往都能够达到 GB 级甚至 TB 级,若采用点云数据直接进行显示或管理等操作,对于计算机来说负担十分巨大,为了减少这一负担,便需要对建筑点云进行逆向重建。而点云数据正是本书中地下工程基础设施逆向建模过程中的数据源。

为了进行点云数据的逆向建模,需要对点云进行一系列的预处理操作,提取得到建筑物的关键信息,如建筑的墙边的边界线、墙壁上的孔洞信息等等。提取得到的这一系列信息,使得我们可以采用参数或边界法进行三维模型的构建,使得三维模型与点云模型贴合。即通过少量的数据来替代大量的点云数据,减少大数据量的点云模型对计算机系统内存的消耗。

2.1.1 Open CASCADE 开源库

本书中,利用提取得到的建筑边界信息进行三维建模所用到的第三方库主要是 Open CASCADE,以下简称 OCC。OCC 平台是由法国 Matra Datavision 公司开发的 CAD/CAE/CAM 软件平台,可以说是世界上最重要的几何造型基础软件平台之一。开源 OCC 对象库是一个面向对象 C++类库,用于快速开发设计领域的专业应用程序。

OCC 主要用于开发二维和三维几何建模应用程序,包括通用的或专业的计算机辅助设计 CAD 系统、制造或分析领域的应用程序、仿真应用程序或图形演示工具。

OCC 库提供了如下功能:

(1) 2D 和 3D 几何造型工具箱,可对任何物体造型:

- 创建基本图元,如 prism, cylinder, cone, torus;
- 对实体进行布尔操作, addition, subtraction and intersection;
- 根据倒圆、倒角、草图拉伸出几何实体;
- 使用偏移 (offsets)、成壳 (shelling)、挖空 (hollowing) 和挤压 (sweeps) 构造几何实体;

- 计算几何实体属性，如表面积、体积、重心、曲率半径；
- 使用插值(interpolation)、逼近(approximation)、投影(projection)计算出几何体。

(2) 可视化功能提供对几何实体的显示、控制功能，例如：

- 三维旋转(3D rotation)；
- 缩放(zoom)；
- 着色(shading)。

(3) 程序框架提供如下功能：

- 将非几何数据与几何实体关联；
- 参数化模型；
- Java Application Desktop(JAD)。

OCC 通过有机组织的 C++ 库文件提供了 7 个模块。最小的模块 Foundation Classes 包含两个库，最大的模块 Modeling Algorithms，包含 8 个库。这些模块分述如下(图 2-1)：

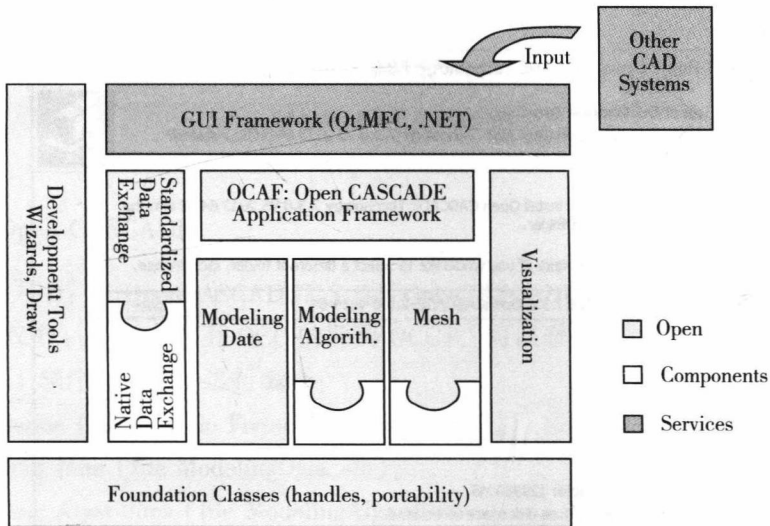


图 2-1 Open CASCADE 包含模块

(1) Foundation Classes 模块是所有其他 OCCT 课程的基础。

(2) Modeling Data 模块提供数据结构，以将 2D 和 3D 几何图元及其组成表示为 CAD 模型。

(3) Modeling Algorithms 模块包含大量的几何和拓扑算法。

(4) Mesh 模块实现对象的细分表示。

(5) Visualization 模块为图形数据表示提供了复杂的机制。

(6) Data Exchange 模块与流行的数据格式互操作，并依靠 Shape Healing 来提高不同供应商的 CAD 软件之间的兼容性。

(7) Application Framework 模块提供了即用型解决方案，用于处理特定于应用程序的数据(用户属性)和常用功能(保存/恢复，撤销/重做，复制/粘贴，跟踪 CAD 修改等)。

此外, Open CASCADE Test Harness(也称为 Draw)提供了库的入口点,可用作其模块的测试工具。

2.1.2 Open CASCADE 编译及使用

1. 安装 Open CASCADE

可以从 Open CASCADE 的官网下载其安装包,可以选择最新的版本,下载网址为: <http://www.opencascade.org/getocc/download/loadocc/>, 下载时需要注意 VC++版本。

双击 opencascade-7.3.0-vc14-64.exe 安装包进行安装,本研究中将 OCC 安装在 D 盘的新建文件夹 OpenCASCADE7.3.0 中(图 2-2),随后不需要修改任何设置便可以安装,大约需要等待 3~5 分钟。

如果只用其库来编程已经够了,安装好下载的安装包即可。若想对其进行调试,必须先将其编译成功。

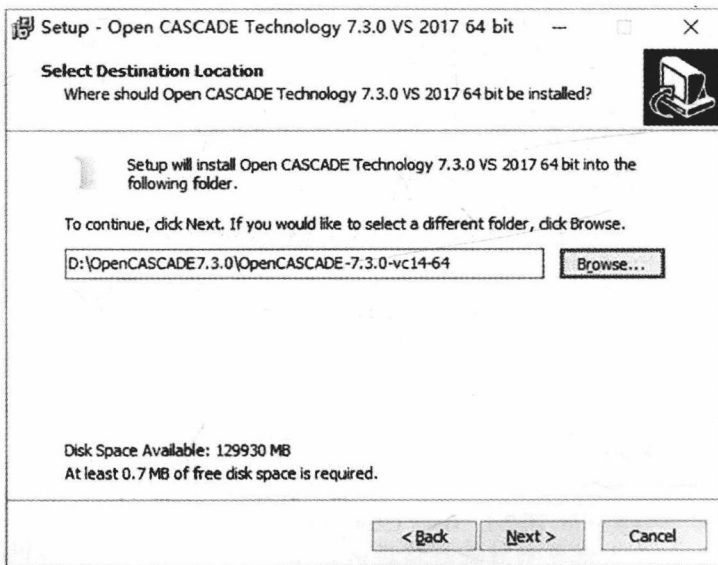


图 2-2 OCC 安装路径

本书采用的 OCC 版本为 7.3.0,该版本于 2018 年 5 月 29 日发布,相比于 7.2.0 版本,造型算法在以下几方面进行了优化:

- 优化模型的面去除算法;
- 优化曲面相交、形状偏移和布尔运算算法;
- 优化 OBB(oriented bounding box)包围盒;
- 布尔运算系列算法中添加更完整的历史记录;
- 提高了 BRep Proj_Projection 算法的稳定性。

除此以外,还进行了更多兼容性、应用框架、可视化、数据交换上的优化,详细可以

浏览官方网站 (<https://www.opencascade.com/content/open-cascade-technology-730-available-download>), 在此不一一进行赘述。

本书的编译环境为: Windows 10 (64), Visual Studio 2015, 安装包为: opencascade-7.3.0-vc14-64.exe。

安装好的 OCC 目录组织如图 2-3 所示。

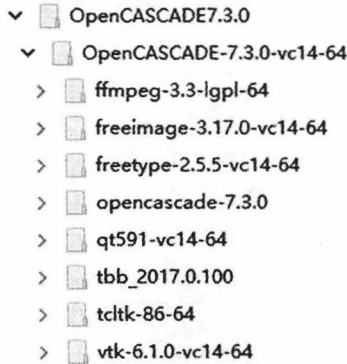


图 2-3 OCC 文件目录

2. 编译 Open CASCADE

安装后进入 D: \ OpenCASCADE7.3.0 \ OpenCASCADE-7.3.0-vc14-64 \ opencascade-7.3.0 目录, 双击 msvc.bat 打开 OCC 的源码 OCCT, 可以看到需要编译的 7 个大模块, 我们必须按照以下顺序对 OCCT 进行编译:

- (1) Foundation Classes (file FoundationClasses.sln)。
- (2) Modeling Data (file ModelingData.sln)。
- (3) Modeling Algorithms (file ModelingAlgorithms.sln)。
- (4) Visualization (file Visualization.sln)。
- (5) Application Framework (file ApplicationFramework.sln)。
- (6) Data Exchange (file DataExchange.sln)。
- (7) Draw (file Draw.sln)。

其实编译整个解决方案时, 会自动按照顺序来进行编译。

D: \ OpenCASCADE7.3.0 \ OpenCASCADE-7.3.0-vc14-64 目录中存放了 OCC 必须依赖的几个第三方库, 分为强依赖以及弱依赖两类:

(1) 强依赖(必须的):

- Tcl/Tk 8.5-8.6;
- FreeType 2.4.10-2.4.11。

(2) 弱依赖(可选的):

- TBB 3.x-4.x;

- gl2ps 1. 3. 5-1. 3. 8;
- FreeImage 3. 14. 1-3. 15. 4。

这些第三方库的头文件 .h 以及 .lib、.dll 都存放在相应的文件夹下，在后面的使用中直接进行添加即可。

经过漫长的等待，7 个模块全部编译完成后，我们会获得大量的 lib、dll 存放在 D:\OpenCASCADE7.3.0\OpenCASCADE-7.3.0-vc14-64\opencascade-7.3.0\win64\vc14 目录下(R64 位)，可在此处进行添加依赖以及调用。所需要添加的 lib 如下：TKVrml.lib、TKStl.lib、TKBrep.lib、TKIGES.lib、TKShHealing.lib、TKStep.lib、TKXSBase.lib、TKShapeSchema.lib、FWOSPlugin.lib、PTKernel.lib、TKBool.lib、TKCAF.lib、TKCDF.lib、TKernel.lib、TKFeat.lib、TKFillet.lib、TKG2d.lib、TKG3d.lib、TKGeomAlgo.lib、TKGeomBase.lib、TKHLR.lib、TKMath.lib、TKOffset.lib、TKPCAF.lib、TKPrim.lib、TKPShape.lib、TKService.lib、TKTopAlgo.lib、TKMesh.lib、TKV3d.lib、TKOpenGL.lib、TKBO.lib。

除了编译的源码以外，OCC 还提供了很多例子 Demo，方便大家进行学习，这些内容都存放在 D:\OpenCASCADE7.3.0\OpenCASCADE-7.3.0-vc14-64\opencascade-7.3.0\samples 目录下，以 mfc 框架下的 Demo 为例，双击 D:\OpenCASCADE7.3.0\OpenCASCADE-7.3.0-vc14-64\opencascade-7.3.0\samples\mfc\standard 目录下的 msvc.bat 打开 VS，可以看到以下 11 个项目(图 2-4)，分别设为不同的启动项，可以展示出不同的功能。

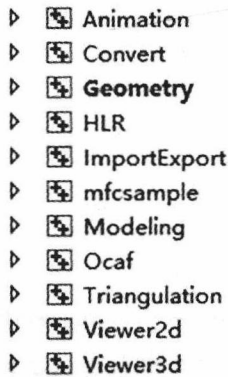


图 2-4 OCC 源码工程目录

例如，设置 Geometry 为启动项目(图 2-5)，介绍了非常多的几何造型算法，如图形偏移、剖分、曲面造型等，并且还附带提供了关键代码。

本书中的绝大部分模型造型算法都依赖 Open CASCADE 进行实现，在后续的讲解中会提供模型造型算法的关键代码，以供读者学习。



图 2-5 OCC 的 Sample 中 Geometry 模块

2.2 数据结构组织

城市地下管网是发挥城市功能和确保城市快速协调发展的重要基础设施。随着我国加大市政基础设施信息化建设的力度，二维化的管网 GIS 系统已经不能满足设备监控以及查询的需要。各专业管网权属公司的地下管网系统逐渐由 CAD 以及“点线”组成的二维时代转换为三维信息模型时代。由于不同部门对于地下管网有不同的应用需求，并且在地下管网的管理中存在标准多样化，所以在软件系统方面各个部门所采用的架构种类繁多；在数据方面，数据的功能性、时效性较差，同时各个部门所采用的数据格式、命名规范、数据组织结构等各不相同，这就导致花费大量人力、财力、时间所搭建的软件系统以及处理的数据无法通用。这些问题使得各类地下管网系统成为相互孤立的“信息孤岛”。

基于以上因素，一个优秀的地下管网大数据服务平台，需要满足可视化流畅、实时性动态的要求。为走通从管网数据探测→管网情况监测→管网事故治理→老旧管网养护→管网动态监管这样一个循环的管理流程，当前需要建立完善的、符合地下管网特性的三维空间模型数据结构，并结合地下构筑物 and 管线的拓扑关系、语义标签、几何形态等必要特征。地下管网的拓扑关系包含内拓扑与外拓扑，兼顾管线与构筑物之间外拓扑连接的同时仍要顾及到构筑物工井内部点线面等元素之间的拓扑连接关系与拓扑一致性。满足以上功能所建立的城市地下管网大数据服务平台，是可用于城市地下管网数据资源统一管理、建模以及共享使用的完善的框架模型。

本书中的三维模型采用一种特殊的混合型 CSG-BRep^[26] 模型数据结构，该数据结构可

以全面细致地记录模型内部的拓扑关系。这种数据模型分别汲取了 CSG 以及 BRep 这两种模型的优点。下文先逐一对这两种数据模型进行介绍。

2.2.1 CSG 模型

CSG^[27-29]模型为单一模型,该模型在建筑物的结构化表达以及建模中都得到了广泛的运用。CSG 的全称是构建实体几何法,是英文 constructive solid geometry 首字母的缩写。目前很多商业软件都引入了 CSG 技术,典型的有 Sketch UP Pro、3ds Max 等,都有通过 CSG 手段来构建和表达空间三维模型的功能。CSG 的实质很简单,就是将复杂的模型抽象成简单的模型,通过简单模型之间的一系列运算以及变换等操作,恢复出复杂模型的原貌^[30-32]。这是一种化繁为简的有效手段,因此在三维领域,CSG 发挥着不可估量的作用。CSG 模型本身具有很多优点,下面分别进行介绍。

首先,它能够大大地简化模型的数据量。在利用三维激光扫技术对一个六面体的建筑实体做扫描时,得到的是这个六面体的点云数据。如果采用直接在点云处理软件中三角网建模的方式构建实体,那么这个六面体建成所需要的点云量是很大的。如果利用 CSG 的思想来构建六面体的 CSG 模型,只需要六面体的 8 个角点,就足以推算出六面体各个边的参数,进而完成实体的创建。

其次,它能够详细地体现模型的组建过程。利用 CSG 思想创建一个复杂的空间实体时,也正是体现出模型的分步组建过程。通常 CSG 被形容成一个二叉树,这个二叉树的结点通常是简单模型或者是布尔运算的算子。通过这个二叉树往往都能够详细地反映出最终的复杂模型是通过什么样的过程得来的。因此,相对于普通的三角网建模而来的模型,CSG 模型显得非常清晰明了,且具备模型组建过程中的拓扑不变性,这对于一些文物保护、数字化遗产的保护等都非常有现实意义。

CSG 模型的上述两大优点在三维空间模型的构建和表达中发挥着巨大的作用。但是同时,这种模型也有其自身的缺点。下面仍分两点进行介绍。

首先,它的最小单元只能抽象划分到最基本的体素,而这些最基本的体素一般为长方体、球体等。以一个基本体素长方体为例,如果这个长方体代表的是实际生活中一间房屋,那么这个长方体不在能够体现房屋内部的组成关系,此时,无法获得房屋内部的空间连接关系。因此,CSG 在处理三维空间模型内部链接关系的时候显得无能为力,这是 CSG 模型的缺点之一。

其次,CSG 模型往往只能处理那些现实生活中形状比较规则的实体。尽管布尔运算可以尽可能地在这个问题上发挥用来创建形状复杂的实体,但是往往还是有局限性的。CSG 模型在处理一些样条曲线或者样条曲面演变而来的复杂曲面模型时,也体现出了自身的不足之处。

通过分析可以知道,因为 CSG 模型属于单一模型,CSG 模型的优点和缺点都非常得清晰和明了。尽管其存在上述分析的两大缺点,但是 CSG 技术在三维拓扑中的运用已经成为了必不可少的手段。很多的专家学者都对这个模型做了大量的研究,该项技术为本文三维精细模型拓扑关系的构建和分析提供了十分重要的指导思想。

2.2.2 BRep 模型

BRep^[33-35]模型同样为单一模型,该模型同样在建筑物的结构化表达以及建模中都得到了广泛的运用,BRep是英文boundary representations首字母的缩写,BRep的核心思想体现在任何复杂的空间实体最终都可以通过参数方程的形式进行表示,其特点在于通过点的集合来表示边,边的集合来表示面,而面的集合来表示三维空间实体的边界。BRep模型的一个非常重要的特性是,该模型在表达空间实体时,可以同时表达模型的几何信息和拓扑信息,无论多么复杂的空间结构,都可以转化为参数方程这一数学表达式。一旦把空间物理问题转化成了数学问题,那么很多问题都能够迎刃而解。这就是边界表示法的核心思想内容。点、线、面构成了BRep最为基本的三大要素,点、线、面通过一定的变换或者演变,可以生成无论多么复杂的实体。因此,在三维领域,BRep也同样发挥着不可估量的作用。BRep模型有很多优点,下面分别进行介绍。

首先,它能够表达更小、更复杂的实体。如果CSG模型的最小单元只能抽象到一个基本体素长方体,那么BRep模型的最小单元足以抽象到一个几何点。这也是BRep最为明显的一个特点,点可以变化成边,边可以变化成面,面可以变化成体,同样是由小到大,由简单到复杂。在表示一个长方体形状空间的房屋建筑内部组合关系时,BRep可以轻而易举地解决这个问题。另外,对于CSG模型表达不了的那些非规则曲面模型,BRep都能够完美地表达。

其次,它具备详细的拓扑连接关系。正因为BRep能够表达比CSG更为具体化、细节化的空间实体,因此,其在表达模型构建过程的时候也显得更为详细。点、线、面、体之间存在某种不变的连接次序,这种连接往往不会随着实际模型的变形或者位置移动等发生变化,即BRep在某种变化之中保持着一种不变性,这一点正是拓扑关系的核心内容。

当然,任何单一模型都不是完美的。BRep自身也存在较为明显的不足,主要体现在表达模型的构建过程方面显得过于复杂和繁琐。点、线、面三大基本的BRep要素要想建建成复杂的空间三维模型,远远不是通过一个二叉树就能表示清楚的。一个小小的长方体就包含8个顶点和12条边,如果一个复杂的空间实体,最后拆分成点、线、面来表达建模过程,将是不切合实际的。因此,BRep往往最大限度地应用于描述模型内部的拓扑关系,却不用来描述空间模型的构建过程。因为其不够直接,更不够直观。

2.2.3 CSG-BRep 拓扑模型内拓扑定义

从三维拓扑重建的角度来讲,三维拓扑可以被分为内拓扑和外拓扑两种大关系,内拓扑关系是指单个三维实体的内部各个拓扑基元之间的层次组合关系,外拓扑关系指的是三维空间实体之间的不同种类的拓扑邻接关系。本章节的主要目的在于定义CSG-BRep拓扑模型的内拓扑。前面绪论中所提到的单一模型都只能够表达简单的目标对象的拓扑关系,对于复杂的空间目标对象而言,其局限性便显示出来。为了解决复杂空间目标对象之间的拓扑关系,本文结合CSG模型的宏观组合性和BRep模型的微观表达性,使得CSG与BRep相结合,对二者的优缺点进行取长补短,定义一种CSG-BRep的组合式模型来描述复杂的空间目标对象的空间关系。CSG-BRep模型是利用CSG(构建实体几何)的方法对复