

# 城市地下管线三维建模及其与城市轨道交通线路的空间冲突分析方法<sup>\*</sup>

吕希奎<sup>1,2</sup> 高崇文<sup>2</sup> 王奇胜<sup>2</sup> 聂良涛<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 050043, 石家庄;

2. 石家庄铁道大学交通运输学院, 050043, 石家庄//第一作者, 教授)

**摘 要** 城市地下管线的改移和空间冲突是城市轨道交通线路规划设计中的主要空间冲突之一。针对传统的二维地下管线表达方式难以直观表达管线的空间位置和空间冲突的弊端, 基于 Skyline 3D GIS 平台二次开发技术, 采用视觉分割和部件模型组合方法, 解决了多类异形、异径的管线段和连接件的三维自动建模难题, 建立了适合长带状线路特点的地下管线三维建模方法, 实现了直观的地下管线三维可视化效果。采用 3D GIS 的空间分析技术、立体缓冲区方法和射线法, 实现了地下管线与线路可视化空间冲突分析和改移计算。

**关键词** 城市轨道交通; 城市地下管线; 三维建模; 空间冲突分析; 可视化

**中图分类号** TU990.3; U231.2

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2020.10.005

## Three-dimensional Modeling of Urban Underground Pipeline and Analysis of the Spatial Conflict with Urban Rail Transit

LYU Xikui, GAO Chongwen, WANG Qisheng, NIE Liangtao

**Abstract** Relocation of urban underground pipelines and space competition are one of the main spatial conflicts in the planning and design of urban rail transit lines. Since the traditional 2D underground pipeline expression is difficult to directly express the disadvantages of the spatial position and space conflict of the pipelines, a combination method of visual segmentation and component model is adopted to solved the problem of three-dimensional automatic modeling of multi-type, different-diameter pipeline segments and connectors, based on the secondary development technology of Skyline 3D GIS platform. Then, a three-dimensional modeling method for underground pipelines suitable for the characteristics of long strip line is established, it achieves the intuitive 3D visualization of underground pipelines.

By using 3D GIS spatial analysis technology, stereo buffer method and ray method, the spatial conflict analysis and the relocation calculation of underground pipelines are realized.

**Key words** urban rail transit; underground pipeline; three-dimensional modeling; spatial conflict analysis; visualization

**First-author's address** State Key Laboratory of Structure Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, 050043, Shijiazhuang, China

为了减少对城市环境的影响, 城市轨道交通线路设计时大多采用地下隧道方式敷设线路, 因此会涉及大量的城市地下管线(以下简为“地下管线”)拆迁和改移。地下管线已成为城市轨道交通规划设计中需要考虑的重要问题。利用二维平面图表示管线位置的传统方式, 不能够充分表达管线的空间位置, 视觉效果不直观, 无法自动参与空间分析, 难以发现潜在的冲突, 这种方式使得设计人员需要花费较多的时间从大量的平面管线图资料中寻找和确定与线路冲突的管线, 效率低且易造成遗漏, 已严重影响了城市轨道交通线路设计的质量和效率, 也影响工程后续的建设施工进度。因此, 实现地下管线三维可视化、真实直观地展现地下管网场景, 以及进行可视化冲突分析和管线改迁成为解决问题的有效途径。

目前, 针对地下管线的三维建模方法, 主要有基于 3D GIS 软件(Skyline、ArcGIS 等) SDK 的二次开发<sup>[1-5]</sup>, 同时配合使用编程语言, 以及基于三维图形库(OpenGL、OSG 等)底层开发<sup>[6-10]</sup>两种主要建模方式。从建模效率、建模速度、渲染效果和开发难度上, 基于 3D GIS 软件 SDK 的二次开发成为目前地下管

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51278316); 河北省自然基金专项项目(E2016210133); 河北省引进留学人员项目(CL201720); 河北省自然科学基金青年基金项目(E2019210339)

线三维建模的主要方法。本文采用 Skyline 3DGIS 平台及其二次开发技术,从地下管线的基本数据结构出发,研究适合长带状线路特点的地下管线三维建模方法、地下空间冲突可视化分析方法,实现直观的地下管线三维可视化效果,解决地下管线与线路三维可视化空间冲突分析和地下管线改移计算的关键问题。在线路设计时,地下管线三维模型能够参与空间分析,满足城市轨道交通三维设计对地下管线可视化和空间分析要求,提高设计效率。

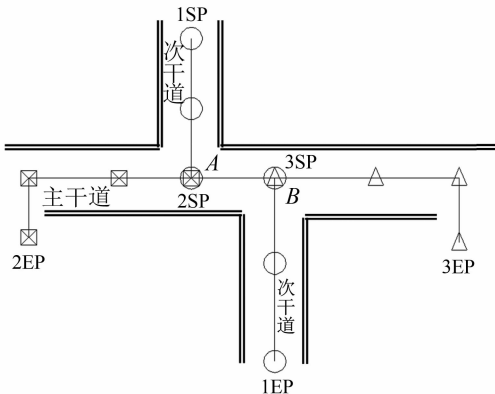
## 1 地下管线数据模型与数据预处理

### 1.1 数据模型

地下管线数据包括管线的平面位置、走向、埋深、规格、性质、材质等信息。城市地下管线虽种类繁多,但管点、管线段以及其他附属设备是组成管线的基本结构。根据管线建模的特点分析,两个管点构成一个管线段,多个管线段尾首相连便可形成一根完整的管线。管点要素作为建模的基础数据置于数据层的最底层,主要包括管线的起点和终点、管线段之间的中间连接点,以及管线的三连通、四连通甚至多连通连接点及附属设备的中心点。管点描述了空间位置的点,附属设备数据记录了其属性数据,如阀门、检查井等。

### 1.2 数据预处理

地下管线的连接关系复杂,管线的连接处可能存在着任意方向的三通、四通甚至更多连通<sup>[2]</sup>,还可能存在着阀门、消防栓等附属设施。为方便建模、减少数据冗余,需对管线数据进行处理。数据处理示意如图 1 所示,具体处理情况如下:



注: ○代表1号支管线节点; □代表2号支管线节点; △代表3号支管线节点; 1SP、2SP、3SP 分别代表1号管线、2号管线、3号管线的起点; 1EP、2EP、3EP 分别代表1号管线、2号管线、3号管线的终点

图 1 数据处理示意图

1) 将在同一线路上类型、管径、材质等关键属性一致且相互之间有顺序连接关系的多根管段视为一条管线,并存储唯一识别 ID。针对一条存在主、支管线的地下管线,主、支管线分别标识 ID 号。

2) 以相互垂直的两个道路路口作为地下管线主、支线路的分割节点。

3) 在确定线路起终点后,中间管点坐标从起点开始按顺序记录。管点的 ID 与所属管线的线路号 ID 一致。

4) 主、支管线的连接处(A、B)、两主要管线交叉处坐标需记录两次(A 点在 1、2 号管点数据中各记录一次,B 点在 1、3 号管点数据中各记录一次)。

## 2 基于 Skyline 的三维地下管线建模

### 2.1 三维地下管线系统总体框架

三维地下管线系统采用 Skyline 3DGIS API 二次开发技术进行开发,功能主要包括三维管线创建模块、三维显示与浏览模块、空间分析与统计模块。该系统的基本架构如图 2 所示。

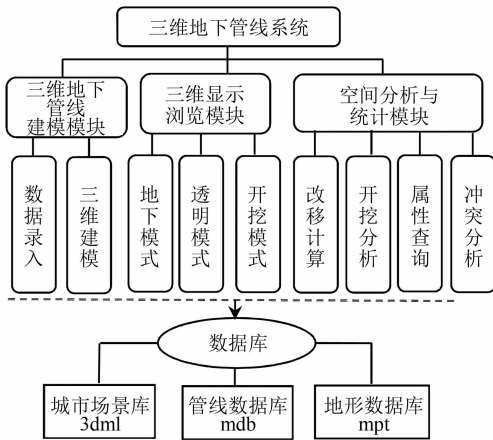


图 2 三维地下管线系统设计框架图

### 2.2 地下管线建模算法流程

根据地下管线的横断面形状,管线可分为圆形和方形两种。在 Skyline 3DGIS 平台中,分别可以用简单的圆柱体和四方体等几何对象显示。通过读取存储在管线数据表中管线的起终点的坐标(x,y)、起终点埋深、管径等数据,作为 Skyline 中 CreateBox() 和 CreateCylinder() 函数所需要的参数,根据坐标自动解算出管线的长度和空间姿态。地下管线建模算法流程如图 3 所示。

通过以上一系列操作,可实现批量自动生成三维管线模型,如图 4 所示。

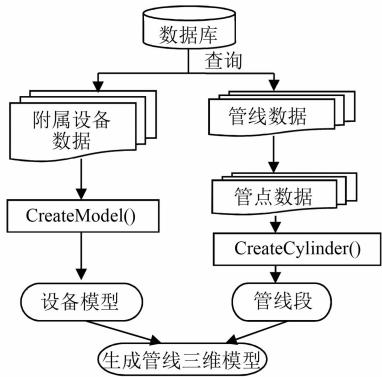


图 3 地下管线建模算法流程

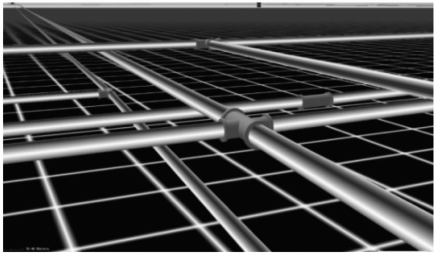
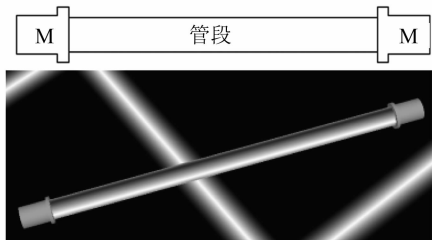


图 4 三维地下管线建模效果

2.3 管点建模

数量庞大的地下管线,由于走向各异,存在许多异径或异向的特殊管点,为管点的建模增加了难度。为了提高管点建模的通用性,本文提出的解决方法是:将管点连接模型在视觉上进行分割,分割为通用模型部件。“部件模型组合”即在管线段两端各放置一个轻量模型 M(见图 5)作为建模的“基本单元”,形成一个视觉效果上的三维模型,通过程序批量导入三维场景中,利用“模型部件组合”方法重新组合成复杂管点模型。



注: M 表示轻量模型

图 5 基本单元示意图

按照上述管点建模方法,三维管点模型效果如图 6 所示。

2.4 附属设施建模

地下管线除了通过三通、多通等管件进行连接外,还会在关键部位设置检查井和各种阀门、消防栓等附属设备来连接。这些设备属于复杂的 3D 对

象,本文采用三维建模软件抽象建模,建立资源模型库,同时存储模型的空间姿态信息。检查井等附属设施模型的导入和定位方法与管点相同,建模效果如图 7 所示。

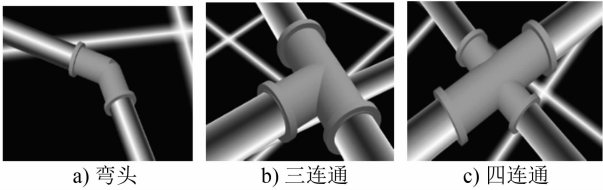


图 6 三维管点模型效果

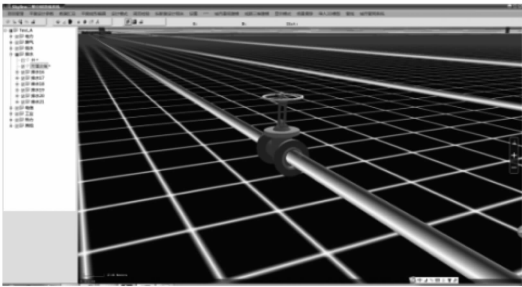


图 7 附属设施三维建模效果

2.5 地下管线三维漫游

地下管线位于地下,三维建模后不易被观察,基于 Skyline 平台开发了 3 种漫游模式,分别为地下模式、地表透明模式。

1) 地下模式。该模式可实现视角由地上进入地下环境,360°自由观察管线,可近距离观察三维管线。

2) 地表透明模式。该模式通过控制地表的透明度,透视地下管线,可观察大范围管线在地下的分布情况。

漫游模式效果如图 8 所示。

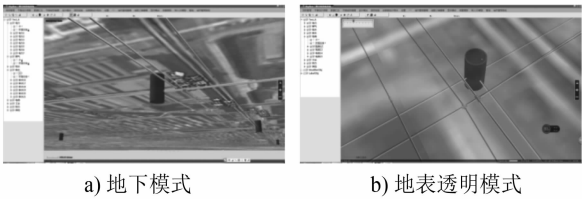


图 8 地下管线三维漫游

3 地下管线改移分析

在城市轨道交通线路设计中,建立三维管线模型是基础,应用三维管线模型更好地辅助和优化线路设计才是最终目的。因此,将 3DGIS 的空间分析功能与城市轨道交通线路设计结合起来,通过缓冲

区分析实现冲突分析可视化和管线改移量的统计,为设计人员提供直观的依据。

### 3.1 缓冲区建立

根据线路中心线数据形成绘制缓冲区的线几何语义,给定一段长度  $l$  作为缓冲半径  $R$  ( $l$  可取地下隧道的安全距离),使用 Linegeometry. Spatial Operator. buffer( double  $R$ ) 获取一个表示缓冲区边界的多边形几何语义,并以此为基础绘制一定高度的三维长方体,形成立体缓冲区。立体缓冲区效果如图 9 所示。

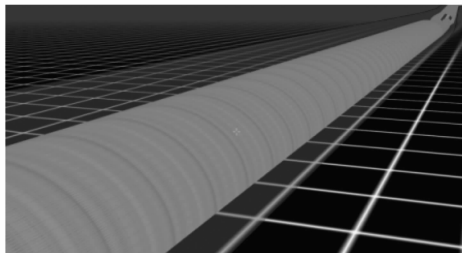


图 9 立体缓冲区效果图

### 3.2 地下管线与线路空间冲突分析

地下管线不仅数量庞大,而且具有各自的空间走向。在进行缓冲分析时,对管线段和线路段组合检测,程序需要多次遍历计算,耗费时间较长。为降低计算量,利用 Skyline 空间分析函数,将线路缓冲区与管线段 SHP 图层投影在同一参考系统进行平面检测,仅获取在投影平面上与线路缓冲平面存在交集的所有管线段。然后采用“射线法”判断管点是否在缓冲区内部,若管点构建的射线与缓冲区的交点数为奇数,则管点在缓冲区内部。检测完成后,存储所有与线路冲突的管线到数据库中。流程如图 10 所示。

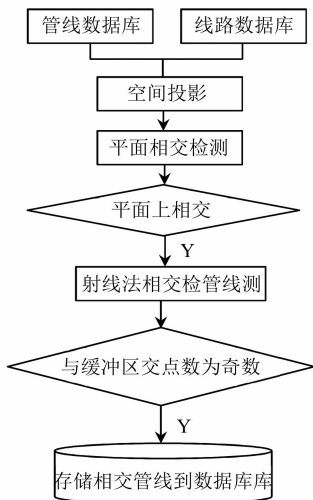


图 10 地下管线与线路空间冲突分析流程图

### 3.3 线路与地下管线三维交点坐标计算

为了计算管线改移量,管线段和线路交点的三维坐标计算是基础。设管线段为  $AB$ ,线路线段单元为  $CD$ ,  $ABCD$  4 点坐标分别为  $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $p_3(x_3, y_3, z_3)$ 、 $p_4(x_4, y_4, z_4)$ 。若两线段相交,设交点坐标为  $P(x, y, z)$ ,则  $AB$ 、 $CD$  满足下列方程式:

$$\begin{cases} x - x_1 = k_1(x_2 - x_1) \\ y - y_1 = k_1(y_2 - y_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x - x_3 = k_2(x_4 - x_3) \\ y - y_3 = k_2(y_4 - y_3) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $k_1$ 、 $k_2$  为任意不为零的常数。

#### 3.3.1 投影坐标

消去式(1)和式(2)中的  $k_1$ 、 $k_2$ , 变换为矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ y_4 - y_3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \\ x_3 - x_4 \end{bmatrix} y = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中常数项  $b_1$ 、 $b_2$  为:

$$\begin{cases} b_1 = (y_2 - y_1)x_1 + (x_1 - x_2)y_1 \\ b_2 = (y_4 - y_3)x_3 + (x_3 - x_4)y_3 \end{cases} \quad (4)$$

设系数行列式为  $D$ , 分别用  $b_1$ 、 $b_2$  替换  $x$ 、 $y$  的系数得到新的系数行列式  $D_1$ 、 $D_2$ , 则有:

$$|D| = (x_2 - x_1)(y_4 - y_3) - (x_4 - x_3)(y_2 - y_1) \quad (5)$$

$$|D_1| = b_2(x_2 - x_1) - b_1(x_4 - x_3) \quad (6)$$

$$|D_2| = b_2(y_2 - y_1) - b_1(y_4 - y_3) \quad (7)$$

因此,得到:

$$x = |D_1|/|D|, y = |D_2|/|D| \quad (8)$$

管线段与缓冲区边界的投影交点计算同样用上述方法求得。

#### 3.3.2 交点高程 $z$ 坐标计算

根据坐标求解  $AB$ 、 $CD$  的方向向量,方可列出空间线段的直线方程,带入交点的投影坐标即可求出其高程。 $AB$ 、 $CB$  的方向向量为:

$$\mathbf{AB} = (m, n, p) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \quad (9)$$

$$\mathbf{CD} = (m', n', p') = (x_4 - x_3, y_4 - y_3, z_4 - z_3) \quad (10)$$

列出空间直线对称方程:

$$\frac{x - x_1}{m} = \frac{y - y_1}{n} = \frac{z - z_1}{p} \quad (11)$$

因此,得到:

$$z = z_1 + \frac{p(x - x_1)}{m} \quad (12)$$

### 3.4 地下管线改移量计算方法

在计算出管线段和线路交点坐标后,即可计算管线的改移量,具体实现步骤如下:

1) 连接数据库,导入与线路冲突的管线数据和线路中心线数据,并存储到计算机内存。

2) 二次检测。①计算导入的管线段与线路线段单元的投影面交点:若交点在管线段内,则记录该点在管线段和线路上的插值高程  $z_1$ 、 $z_2$ ;若交点在管线段的延长线上,则记录离该交点较近管点的高程为  $z_1$ ,记录此交点在线路上的插值高程  $z_2$ 。②插值分别求取管线和线路的交点高程  $z_1$ 、 $z_2$ ,计算两者高程差  $\Delta h = z_1 - z_2$ ,若  $\Delta h < D_1$  ( $D_1$  为隧道顶底高度),或  $D_2 > -\Delta h$  ( $D_2$  为隧道底部限界至走行轨顶面高度),则判断地下管线与线路发生碰撞。

3) 管线改移长度计算。判断二次检测中管线段与线路缓冲区内的空间形态。若两管点都落在缓冲区内,则直接计算两管点距离;若仅有一管点落在缓冲区内,则计算管点与交点的距离;若两管点都不在缓冲区内,则计算两交点的距离。

4) 结束。记录交点的坐标和长度,求出管线改移量。

地下管线碰撞线路三维效果如图 11 所示。

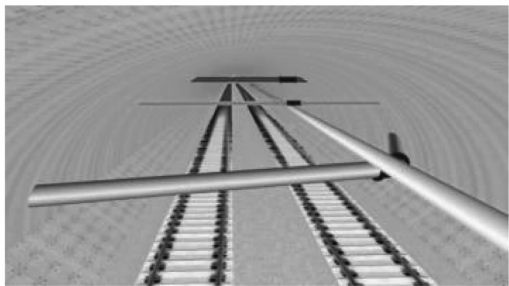


图 11 地下管线碰撞线路效果

### 3.5 地下管线改移量计算

判定地下管线与线路的相交形态和交点坐标后,便可计算两交点  $P_1$ 、 $P_2$  的距离;也可采用 Skyline API 函数传入交点参数直接获取。设  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ , 则改移管线距离  $L$  的计算如下:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (13)$$

## 4 结语

城市轨道交通线路属于长带状结构体,在规划设计中,地下管线的改移和空间冲突是主要空间冲突之一。针对传统的二维地下管线表达方式难以直观表达管线的空间位置和空间冲突的弊端,采用 Skyline 3D GIS 平台的 SDK 二次开发技术,基于管点坐标和属性数据库,采用视觉分割和部件模型组合方法,解决了多类异形、异径的管线段和连接件的三维自动建模难题,实现了地下管线三维快速批量建模。建立了适合长带状线路特点的地下管线三维建模方法。通过引入 3D GIS 的空间分析技术建立立体缓冲区,解决了地下管线与线路三维可视化空间冲突分析和管线改移计算的关键问题,实现了直观的地下管线三维可视化效果。在线路设计时,能够参与空间分析,满足了城市轨道交通三维设计对管线可视化和空间分析的要求。

## 参考文献

- [1] 李浩. 基于 CityMaker 的三维地下管线地理信息系统建设[J]. 城市勘测, 2014(2): 51.
- [2] 王海涛, 穆哈, 马海勇. 基于 ArcEngine 的城市地下管网三维建模方法研究[J]. 地理空间信息, 2017(3): 109.
- [3] 徐亚军, 陆培. 基于 Skyline 的地下三维管线自动生成技术研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016(2): 132.
- [4] 徐爱锋, 徐俊, 龚健雅. 基于 Skyline 的三维管线系统的设计与实现[J]. 测绘通报, 2013(6): 75.
- [5] 唐莉萍, 张浩. 一种基于 Skyline 软件自动批量创建三维管线的方法[J]. 工程勘察, 2012(4): 85.
- [6] 周京春, 李清泉, 施昆. 利用 Sweep 造型法进行管网精细化三维建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015(5): 661.
- [7] 卢丹丹, 谭仁春, 郭明武, 等. 城市地下管线三维建模关键技术研究[J]. 测绘通报, 2017(5): 117.
- [8] 杜国明, 龚健雅. 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.
- [9] 张鹏程, 丘广新, 陈鹏, 等. 城市地下管线三维建模工具开发及应用[J]. 地理空间信息, 2016(7): 85.
- [10] 郝埃俊, 贺军政. ObjectARX 技术在三维地下管线建模的应用[J]. 城市勘测, 2012(5): 57.

(收稿日期: 2018-12-20)