

复杂三维管网中流体实时可视化算法及其应用^①

张 越^{②*} 李 乾* 张世博^{**} 程 芳* 徐 华^{③**}

(* 北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)

(** 北京石油化工学院信息工程学院 北京 102617)

摘 要 为解决复杂三维管网中难以实现流体实时可视化的问题,对复杂三维管网内各类管线和路口进行分析和归纳,提出了一种复杂三维管网中流体实时可视化算法。通过管网建模及中线获取得到管网中线数据,并确定管线和路口类型;针对各类管线和路口分别采用求交运算、管网底面重构等方法建立流体表面模型,以减少实时流体建模计算量。基于由传感器网络或数值模拟得到的实时流体深度信息与管网模型类别实时更新流体表面和流体深度,实现实时流体建模;采用渲染技术最终实现复杂三维管网场景下的流体实时可视化。以矿井突水为实例,验证算法可行性并进行可视化分析。

关键词 复杂三维管网;重构;流体建模;流体实时可视化;矿井突水

0 引 言

复杂三维管网是城市生存和发展中的重要基础设施,如常见的输油输气管道、矿山矿井巷道以及城市地铁轨道、地下水管等。实时模拟三维管网内的流体运动状态,可有效帮助人们监测管网内的物质运输状态,以及在防灾避险时(如巷道、轨道突水)指导人们及时规避风险;三维管网内的流体模拟在三维地质模拟中可有效模拟地下暗河以及地面河流,也可应用于三维游戏和影视动画中。

复杂三维管网内流体模拟包括管网建模和流体建模及可视化,以及建模完成后的可视化。管网建模技术主要有基于 GPU 自动建模^[1],基于二维管网数据库构建三维管网^[2],基于共识算法建模^[3],扫描(Sweep)造型法^[4],扫描点云构建法^[5]等;流体建模及可视化主要方法有基于粒子系统插值的 SPH 方法^[6],基于物理的欧拉法^[7],以及基于耦合几何特征的高精度流体建模法^[8]等。但这些流体建模

方法普遍适用于简单场景,在大范围复杂场景中即使采用 GPU 并行计算加速^[9,10]也无法完成实时流体模拟^[11,12]。

为解决复杂三维管网场景下管线错综复杂,难以实时构建流体等问题,本文采用管网墙壁求交运算方法,根据不同类型管线和路口的特征重构整个管网底面作为流体表面,结合实时流体深度信息和管网模型类别,快速建立管网内流体模型,最后实现复杂三维管网中流体实时可视化。

1 算法流程

三维管网一般可分为矩形、拱形和圆形管网(图 1)。其中拱形管网最为复杂,由平坦的底面、垂直的墙壁、半圆形或弧形的拱顶组成,可以视为矩形管网和圆形管网上半部分的结合。当流体深度小于管网墙壁高度 h 时,矩形管网和拱形管网处理方式相同。当流体深度高于 h 时,拱形管网与圆形管网处理方式类似。

① 国家自然科学基金(41430318)和国家重点研发计划(2016YFC0801800)资助项目。
② 男,1993 年生,硕士生;研究方向:虚拟现实与计算机仿真;E-mail: ZhyBuct2016@163.com
③ 通信作者,E-mail: xuh@bipt.edu.cn
(收稿日期:2019-02-13)

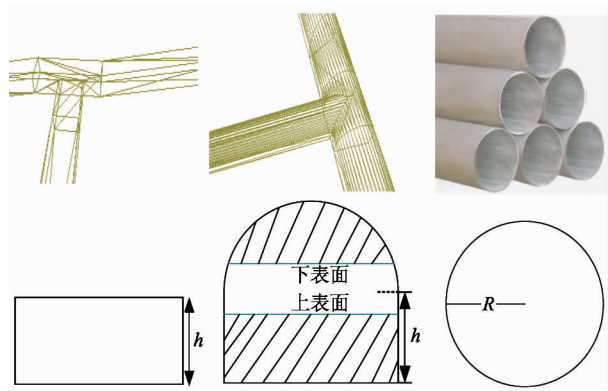


图 1 管网模型分类

管网系统中可能出现的流体主要有气体、烟雾、液体等。假设管网中已有空气,以空气密度作为临界值,不考虑流体与空气混合,则密度高于空气的流体表面为流体上表面,密度低于空气的流体表面为流体下表面,密度与空气相等的流体则直接取管网截面作为流体表面。

本文以等宽拱形管网中密度大于空气的流体可视化为例。主要流程(图 2)分为以下几个过程。

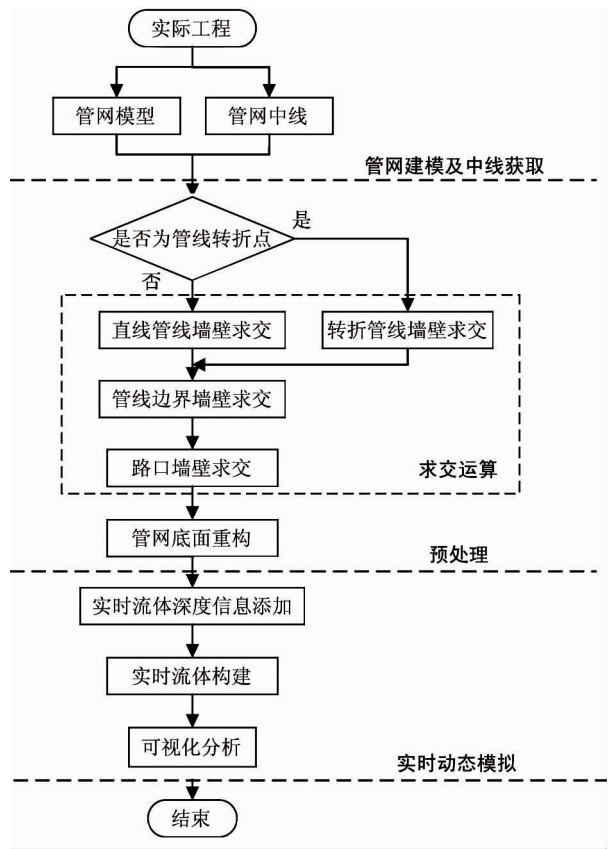


图 2 算法流程

(1) 管网建模及中线获取

管网由管线组成,包括直线管线、转折管线、管线边界,其中,管线交叉处为路口,包括三通、四通和多通路口。

管网建模和中线获取有 2 种方法:方法(1)根据实际工程图纸,选取图纸中管线边界、路口的中点作为管线路径的起点和终点,每条路径仅包含一组起、终点,标记路径中所有管网转折处的中点,连接路径上的中点即可获取管网中线,使用基于 Sweep 等方法构建完整的三维管网模型^[4];方法(2)采用三维激光扫描法,得到点云构建管网模型^[5],之后通过交互式方法,按方法(1)中获取中线方法在管网模型中标记中点连成中线。

对所有路径中线的起、终点出现次数进行统计:管线边界中点仅出现 1 次;三通路口中点出现 3 次;四通路口中点出现 4 次; n 通路口中点出现 n 次。不存在仅出现 2 次的起、终点。由此可在预处理时还原管网中线的拓扑结构,也可对管线和路口类型进行分类。

(2) 预处理

流体表面是三维流体的主要组成部分,复杂三维管网模型数据量庞大且路段环境多样,一次性生成准确的动态流体表面需要进行大量的计算,严重影响模拟实时性。由于管网模型底面与流体表面在三维空间底面的二维投影完全重合,可先预处理提取整个管网模型底面,将管网底面当做流体表面,再结合纹理和实时流体深度信息实现流体实时动态模拟,减少流体动态模拟时的计算量。

由于前文中 2 种方法建立的三维管网模型都由三角形网格组成,而基于复杂三角形网格的流体表面渲染易出现纹理扭曲和裂缝,需要将组成管网底面的三角形网格重构为四边形网格。方法(1)使用中线生成管网,底面重构较为容易;而方法(2)是在已有的管网模型中标记中点形成中线,中线本身就存在误差,以此中线直接生成的管网底面在路口及转折管线处必然失真。

为得到完整准确的管网底面,可使用管网中线垂线与管线墙壁求交的方法,根据不同的管线、路口类型,分别求出各中点处对应的墙壁交点,使用墙壁

交点重构管网底面。

为避免管网中线垂线与管网底面相交,可将管网中线向垂直于空间底面向上方向平移 k (k 小于管网墙壁高度),求得管网中线垂线与墙壁交点后再将交点向下平移 k ,即可求得重构管网底面所需墙壁交点。

(3)实时动态模拟

利用重构后的管网底面,结合管网模型特性和数值模拟或传感器得到的实时流体深度信息,实时更新流体表面和流体深度,即可快速有效完成管网内流体建模。建模完成后对流体模型进行纹理渲染或颜色填充,以满足不同的可视化需求。

2 预处理

2.1 基本方法

2.1.1 三角形平面方程

设三角形的3个顶点为三维空间中互不重合的3个点 $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, $C(x_3, y_3, z_3)$, 则平面方程如下:

$$x \times dx + y \times dy + z \times dz + e = 0 \quad (1)$$

根据克莱姆法则,其中:

$$dx = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, dy = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix},$$

$$d = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}, e = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

展开行列式,可计算得到平面系数表达式为:

$$dx = y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2)$$

$$dy = z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2)$$

$$dz = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)$$

$$e = -x_1(y_2z_3 - y_3z_2) - x_2(y_3z_1 - y_1z_3) - x_3(y_1z_2 - y_2z_1)$$

2.1.2 点与三角形位置关系判断

使用重心法,判断点 P 是否在三角形 ABC 内部。因为三角形的3个点在同一平面上,若选取其中1个点 A 作为起点,则点 B 和 C 相当于点 A 在 AB 和 AC 方向移动一段距离后得到(图3(a))。所

以对于平面内任意一点 P ,都可由如下方程得到:

$$P = A + u \times (C - A) + v \times (B - A)$$

令 $\mathbf{v}_0 = C - A$, $\mathbf{v}_1 = B - A$, $\mathbf{v}_2 = P - A$, 则 $\mathbf{v}_2 = u \times \mathbf{v}_0 + v \times \mathbf{v}_1$, 由于现在是1个方程,2个未知数,无法解出 u 和 v ,将等式两边分别点乘 $\mathbf{v}_0$ 和 $\mathbf{v}_1$ 得到2个等式:

$$(\mathbf{v}_2) \times \mathbf{v}_0 = (u \times \mathbf{v}_0 + v \times \mathbf{v}_1) \times \mathbf{v}_0$$

$$(\mathbf{v}_2) \times \mathbf{v}_1 = (u \times \mathbf{v}_0 + v \times \mathbf{v}_1) \times \mathbf{v}_1$$

这里 u 和 v 是数,而 $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1$ 和 $\mathbf{v}_2$ 是向量,可将点积展开解方程得到:

$$u = \frac{((\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2)(\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_0) - (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_0)(\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_1))}{((\mathbf{v}_0 \times \mathbf{v}_0)(\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_1) - (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_0)(\mathbf{v}_0 \times \mathbf{v}_1))}$$

$$v = \frac{((\mathbf{v}_0 \times \mathbf{v}_0)(\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_1) - (\mathbf{v}_0 \times \mathbf{v}_1)(\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_0))}{((\mathbf{v}_0 \times \mathbf{v}_0)(\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_1) - (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_0)(\mathbf{v}_0 \times \mathbf{v}_1))} \quad (2)$$

此时,唯有系数 u 和 v 满足 $u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1$ 时,点 P 才会在三角形内。

2.1.3 点与向量位置关系判断

有平面向量 $\mathbf{OH}$,设 $O(x_0, y_0)$, $H(x_1, y_1)$, 向量所在直线方程为 $A \times x + B \times y + C = 0$, 则有 $A = y_1 - y_0, B = x_0 - x_1, C = x_1 \times y_0 - x_0 \times y_1$ 。

这时可以通过计算 D ,来判断点 $P(p_x, p_y)$ 是在向量的哪一侧:

$$D = A \times p_x + B \times p_y + C \quad (3)$$

若 $D < 0$,则点 P 在向量的左侧;若 $D > 0$,则点 P 在向量的右侧;若 $D = 0$,则点 P 在向量所在直线上。

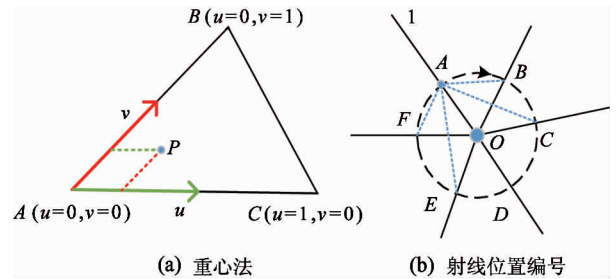


图3 基本方法

2.1.4 管线转折点判断

当管线内1条路径中连续3个中点的空间底面投影 $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$, $C(x_3, y_3)$ 符合如下关系:

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \neq \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \tag{4}$$

即认为点 B 为管线转折点。

2.1.5 平面上共点射线的相对位置编号

以平面上共用 1 点的 6 条射线为例,取其中任意一条编号为射线 1,需绕共用点 O 顺时针编号直到射线 6(图 3(b))。以点 O 为圆心做任意半径的圆与 6 条射线交于 6 个点,射线 1 上的点记为点 A ,按式(3)将其余 5 个交点分为在向量 OA 左侧、右侧和与向量 OA 共线 3 组,对位于向量 OA 右侧的交点按距点 A 由近到远记为点 B 和 C ,与向量 OA 共线的交点记为点 D ,对位于向量 OA 左侧的交点按距点 A 由远到近记为点 E 和 F ,将点 B 到 F 对应的射线编号为射线 2 到 6。

2.2 求交运算

2.2.1 直线管线墙壁求交

如图 4(a) 所示,实线为三维管网底面的空间底面投影,虚线为中线投影,点 O 为四通路口中点,点 T 为三通路口中点,点 C 和 D 为管线边界中点,点 M 和 N 为管线转折点,其他点为中线上的点。则图中共有 3 条完整路径,分别为路径 OEC 、 $OGFD$ 、 $OHKMSNT$ 。

以路径 $OHKMSNT$ 为例,点 $O(x_0, y_0, z_0)$ 为路径起点,根据式(4)判断出路径点 H 、 K 、 S 都不是管线中的转折点,则路径点 H 、 K 、 S 对应管线为直线管线。从路径点 $H(x_1, y_1, z_1)$ 起,取点 H 处垂直于线段 OH 且平行于空间底面的垂线,垂线方程为:

$$a \times y + b \times x + d = 0 \tag{5}$$

其中, $a = -1.0$, $b = -a(x_0 - x_1)/(y_0 - y_1)$, $d = ay_1 - bx_1$, 该线上所有点的 z 坐标为 z_1 。

由式(1)和(5)可得到垂线与组成管网模型的所有三角形所在平面的交点集 Pn , 记其中 1 个交点为点 $P(p_x, p_y, p_z)$, 其中:

$$p_x = \frac{(d \times dx - b \times z_1 \times dz - b \times e)}{(a \times dx + b \times dy)}$$

$$p_y = -\frac{(py \times dy + z_1 \times dz + e)}{dx}$$

$$p_z = z_1$$

由式(2),可筛选出 Pn 中在管网模型上的交点。由于垂线可能会同时交于模型中多条管线,而

所有交点都在平面 $z = z_1$ 上,可先将向量 OH 和所有管网模型上的交点投影到三维空间底面,由式(3)将所有交点分为左、右 2 组,再分别取 2 组交点内距离线 OH 最近的 2 个点,即为路径点 H 对应管线墙壁的左交点 L_1 和右交点 R_1 。同理,可得到路径点 K 和 S 对应的 2 组墙壁左、右交点 L_2 、 R_2 和 L_3 、 R_3 (图 4(b))。

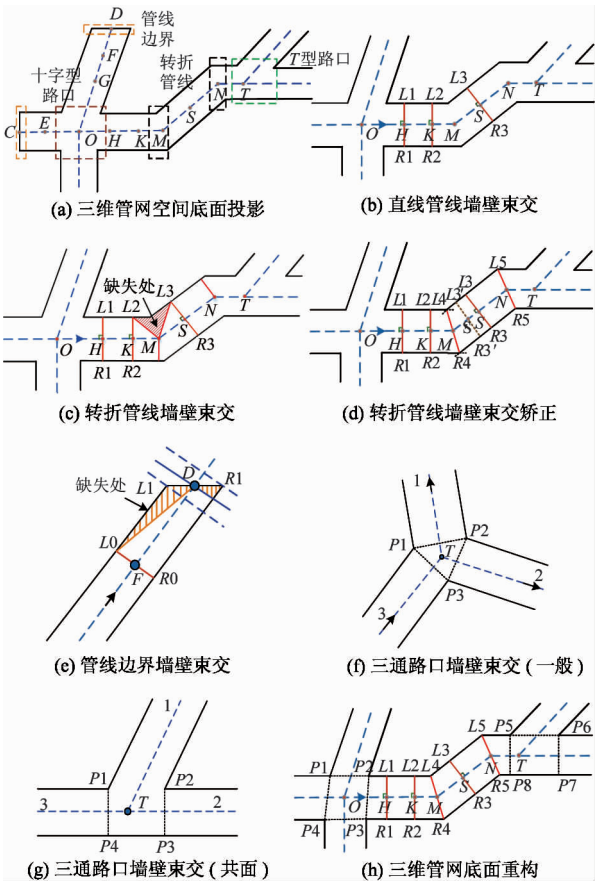


图 4 预处理过程

2.2.2 转折管线墙壁求交

根据式(4)可判断出路径 $OHKMSNT$ 中路径点 M 、 N 为管线转折点,则路径点 M 、 N 对应管线为转折管线,若采用求取直线管线墙壁交点的方式处理路径点 M 、 N ,有时仅可求得-侧墙壁交点(图 4(c))。

为求得准确的转折管线墙壁交点,可采用墙壁投影求交的方法,以管线转折点 M 为例,由于点 M 前有连续 2 个直线管线路径点 H 、 K ,点 H 、 K 对应的墙壁左交点所在直线 L_1L_2 必与管线左侧墙壁的底面投影重合,点 M 后只有 1 个直线管线路径点 S ,可在线段 MS 上插入 1 个直线管线路径点 S' ,求 S'

对应的墙壁左、右交点 L_3' 、 R_3' , 直线 L_3L_3' 与管线左侧墙壁底面投影重合, 取直线 L_1L_2 和直线 L_3L_3' 的底面投影交点记为 L_4 , 令 L_4 的 z 坐标与路径点 M 相同, 则 L_4 为管线转折点 M 对应的墙壁左交点, 同理可求出点 M 对应的墙壁右交点 R_4 。同样在线段 SN 和 NT 上分别插入 1 个、2 个直线管线路径点, 即可求出管线转折点 N 对应的墙壁左、右交点 L_5 、 R_5 (图 4(d))。

2.2.3 管线边界墙壁求交

在管线边界中点 D 处, 仅按直线管线墙壁求交方法处理, 得到的墙壁交点形成的管网底面会出现缺失 (图 4(e))。此时可在线段 FD 及其延长线上按一定步长依次插入靠近 D 的点, 按直线管线墙壁求交方法求插入点对应的墙壁交点, 直到取到最靠近管线边界的墙壁左、右交点 L_1 、 R_1 为止。取到的墙壁交点 L_1 、 R_1 会存在误差, 随插值步长减小而减小。

2.2.4 路口墙壁求交

通过对所有路径中线起、终点出现次数的统计, 可快速找出共用三通、四通、多通路口中点的 3、4、多条路径, 在完成直线、转折管线和管线边界墙壁求交后, 可分别求各种路口的墙壁交点。

以三通路口为例, 做三通路口底面的空间底面投影, 使用 2.1.5 节的基本方法, 对共用三通路口中点 T 的 3 条路径进行编号 (图 4(f)), 可知 3 条路径墙壁投影的交点 P_1 、 P_2 、 P_3 为三通路口对应的墙壁交点。可按照转折管线墙壁求交的方法, 求取路径 1 左侧墙壁投影和路径 3 左侧墙壁投影的交点 P_1 , 同理可求得 P_2 、 P_3 。令点 P_1 、 P_2 、 P_3 的 z 坐标与点 T 相同, 记为三通路口墙壁交点。四通和多通路口与三通路口墙壁交点求法相同。

共用三通路口中点的 2 条路径可能共线 (图 4(g)), 此时只能求出路口墙壁交点 P_1 、 P_2 , 无法构成路口管网底面。可分别作过点 P_1 、 P_2 垂直于路径 2 和路径 3 共用中线的垂线, 与路径 2 和路径 3 的共用墙壁投影交于点 P_3 、 P_4 。以点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 作为三通路口墙壁交点。

2.3 管网底面重构

在求得所有路径点对应的墙壁交点后, 按每条

路径由起点至终点, 每 2 个相邻路径点对应的 4 个墙壁交点为 1 组底面顶点重构管线底面, 在路口处以每个路口对应的墙壁交点构成四边形重构路口底面。以路径 $OHKMSNT$ 为例 (图 4(h)), 从起点 O 开始, 以四边形 $P_2L_1R_1P_3$ 、 $L_1L_2R_2R_1$ 、 $L_2L_4R_4R_2$ 、 $L_4L_3R_3R_4$ 、 $L_3L_5R_5R_3$ 、 $L_5P_5P_8R_5$ 重构除路口外的管线底面, 在路口中点 O 和 T 处, 以四边形 $P_1P_2P_3P_4$ 、 $P_5P_6P_7P_8$ 重构路口底面。其他路径、路口底面重构同理, 当完成所有路径的管线和路口底面重构, 即可获得完整的路网底面。

3 实时动态模拟

3.1 实时流体深度信息添加

通过在现实管网中添加流体深度信息传感器或在虚拟三维管网中数值模拟得到实时流体深度信息, 经插值处理, 使插值后的流体深度信息点和模型内标记的中线路径点一一对应, 在动态模拟时实时更新每个路径点的流体深度信息。

3.2 实时流体构建

在动态模拟时, 由于管网底面有时不平行于三维空间底面, 不同倾斜角处管网截面都不相同, 为保证动态模拟模型统一, 可按照垂直于管网底面取管网截面, 并使用垂直于管网底面的流体深度信息, 构建实时动态流体。常见的拱形管网可看作截面高为 h 的矩形管网和截面半径为 R 的圆形管网的结合 (图 5(a))。当流体深度 H 小于 h 时, 使流体表面 (重构的管网底面) 高度随 H 变化, 并对流体表面下的管网墙壁进行渲染, 即可达到三维流体可视化效果。当 H 大于 h 时, 流体表面将会溢出管网拱顶, 可根据各种类型管线和路口对应的管网截面, 通过更新流体表面顶点来更新流体表面, 具体步骤如下:

3.2.1 直线管线拱顶流体表面更新

直线管线的拱顶截面为半径为 R 的半圆, 通过预处理可得到直线管线底面的左端点 $A(x_1, y_1, z_1)$, 直线管线底面法向量为 $\mathbf{u} = (a, b, c)$, 当点 A 沿向量 $\mathbf{u}$ 方向移动距离 h 时, 可到达截面墙壁最高点 $B(x_2, y_2, z_2)$ (图 5(a)), 其中:

$$x_2 = x_1 + \frac{h \times a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 + \frac{h \times b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ z_2 &= z_1 + \frac{h \times c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \end{aligned} \tag{6}$$

当流体深度 $H > h$ 时,点 B 更新后的流体表面左顶点为点 $C(x_3, y_3, z_3)$, 设 $\angle CBO = \theta$, 通过几何关系求得:

$$\tan\theta = \frac{H - h}{R - \sqrt{R^2 - (H - h)^2}} \tag{7}$$

则向量 $\vec{v}$ 可表示为:

$$\vec{v} = \frac{H - h}{\sin\theta \times \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \times \vec{u} \tag{8}$$

使点 B 沿向量 $\vec{v}$ 平移即可得到点 $C(x_3, y_3, z_3)$:

$$\begin{aligned} x_3 &= x_2 + \frac{H - h}{\sin\theta \times \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \times a \\ y_3 &= y_2 + \frac{H - h}{\sin\theta \times \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \times b \\ z_3 &= z_2 + \frac{H - h}{\sin\theta \times \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \times c \end{aligned} \tag{9}$$

同理可更新流体表面右顶点。
3.2.2 其他位置拱顶流体表面更新

在转折管线、管线边界和路口位置的拱顶截面一般是长轴为 $2L$, 短轴为 $2R$ 的半椭圆 ($L > R$) (图 5(b)), P_1 、 P_2 为截面对应的一组底面顶点经式(6)得到的截面墙壁最高点, 设拱顶截面半椭圆坐标公式为 $x^2/L^2 + y^2/R^2 = 1 (y > 0)$, 令 $y = H - h$, 可求出 AO 和 BO 的距离 $x (x > 0)$, 通过插值可求出点 A 、 B 的三维坐标。根据式(6), 令其中 $h = H - h$, 即可求得流体深度 H 对应的流体表面顶点 $A1$ 、 $B1$ 。

在路口位置, 以三通路口为例 (图 5(c)), 三通路口中点对应的 6 个流体表面顶点构成的路口流体表面会溢出拱顶, 可过这 6 个顶点做其与对应墙壁投影的平行线, 交于路口内 3 个点, 分割出 a 、 b 、 c 、 d 构成路口流体表面, 其他类型路口同理。

3.2.3 流体深度信息可视化

模拟三维流体除渲染流体表面外, 还应实现流体深度信息的可视化, 当流体深度 H 不大于墙壁高度 h 时, 仅需对流体表面到管网底面间的墙壁进行渲染, 即可实现流体深度信息可视化; 当流体深度 H

大于墙壁高度 h 时, 则应对流体表面下的拱顶也进行渲染, 而弧面重构计算量较大, 可使用四边形代替 (图 5(d))。由于流体表面随流体深度升高而缩小, 可通过插值加密方法增加四边形个数提高弧面可视化精度, 弧面可视化精度与可视化效率成反比。在实际工程应用中, 可根据可视化精读要求决定四边形个数, 每增加 1 个四边形, 弧面可视化计算量增加 1 倍, 在对可视化精度要求不高的场景中, 使用单个四边形代替弧面即可实现流体深度信息可视化。

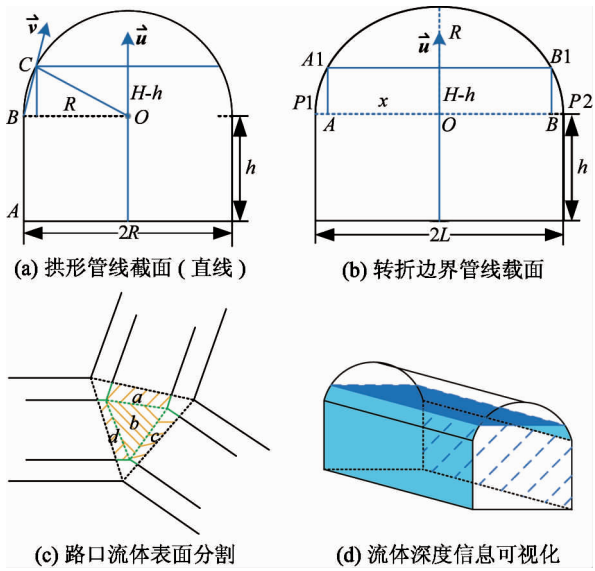


图 5 实时流体构建

4 应用实例

4.1 实例验证

为测试本文算法在复杂三维管网场景模拟流体的可行性, 以河北某矿井为例, 构建三维拱形巷道管网模型 (图 6(a))。

当该矿井巷道内发生突水事故时, 模拟水流流经该三维拱形巷道管网模型。算法采用 VC++ 语言实现, 在 CPU 主频 3.2 GHz、内存 4 G、Nvidia gtx1050ti 显卡的 PC 机上运行, 以 OpenGL 进行图形绘制实现可视化。该管网模型共包含 52 857 个三角形和 39 150 个点, 包含直线管线、转折管线、管线边界、三通路口 181 个和四通路口 30 个。经中线获取共得到 376 条路径中线和 8 279 个底面中点。通过数值模拟获得了这 8 279 个底面中点对应的 1 440

个时刻的水位数据。经预处理,得到重构管网底面四边形 9 278 个,其中路口管网底面四边形 211 个。经水位信息添加和实时流体构建,最后通过 OpenGL

渲染实现了复杂三维拱形巷道内模型内突水事故的模拟和可视化。

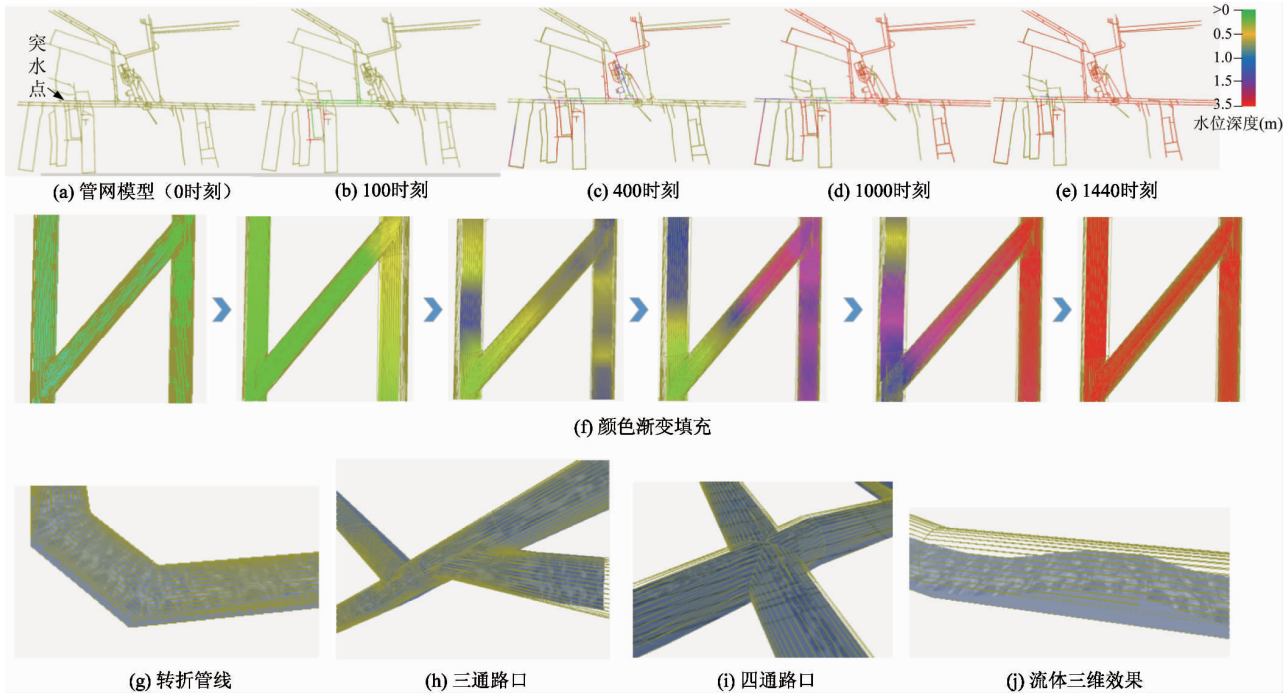


图 6 实例效果

4.2 可视化分析

在实际工程应用中,为了突出展现不同区域、时刻流体深度的差别,可采用颜色渐变填充方式渲染流体(图 6(a~f)),例如流体深度低的地方用绿色,随流体深度升高逐渐变为黄色、蓝色、紫色,当流体深度达到最高时使用红色,表示管网完全被流体充满,其中图 6(f)为局部区域流体随时刻动态变化的可视化图例。也可通过 DirectX、OpenGL 或 OSG 等图像引擎进行纹理光照等渲染(图 6(g~j)),增加流体表面的真实感,其中图 6(j)为局部区域流体三维效果图例。

对颜色渐变填充方式渲染效率进行统计(图 7),矿井突水前期新生成流体数量快速增多,渲染帧率下降较快;在 1 000 时刻后,管网内大部分区域已存在流体,新生成流体数量减少,渲染帧率下降也随之放缓,但始终满足实时可视化要求(> 25 fps)。在对流体表面精度要求不高的大范围复杂管网场景下,使用本文方法构建流体的渲染效率可达

到粒子流体模拟^[6]方法和物理建模^[7]方法的 3 倍以上,有利于确保流体模拟的实时性。

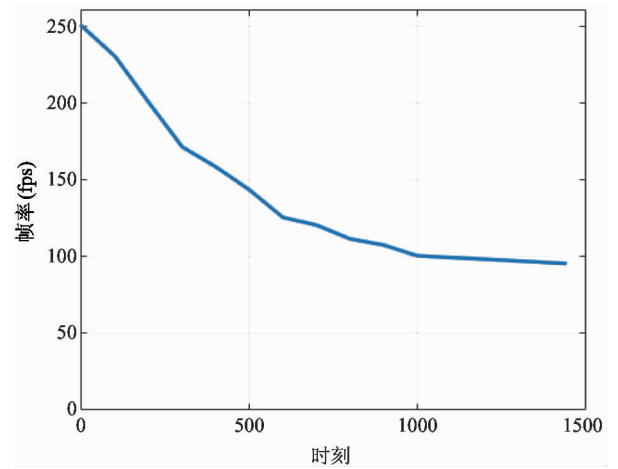


图 7 渲染效率

5 结 论

本文提出一种在复杂三维管网中流体实时可视

化算法。通过对三维管网中管线路径中线中点的统计识别管线和路口类型,在预处理中针对各类型管线和路口的特征求取中线垂线与管线墙壁的交点,以墙壁交点重构管网底面。利用重构后的管网底面结合实时流体深度信息和管网模型信息构建三维流体模型,减少实时流体建模计算量,最后渲染实现复杂三维管网中流体实时可视化。经实例验证,本文算法可行有效。

本文算法适用于对流体表面精度要求不高的大范围复杂管网场景如地铁、隧道、矿井突水,输油输气管道,城市供、排水系统及峡谷河流等场景模拟。后续可采用 GPU 并行计算等方法,进一步提升预处理和实时可视化效率,并提高可视化精度。

参考文献

[1] 李融,丁欣,郑文庭,等. 基于 GPU 的海量城市管线高效建模与实时绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(4):597-604

[2] 王国牛. 城市三维管网建库及高效可视化[J]. 测绘科学,2015,40(4):67-70

[3] Lee S J,Wu J,Suh J C,et al. Consensus algorithm-based approach to fundamental modeling of water pipe networks;

process systems engineering[J]. *Aiche Journal*,2017,63(9):449-451

[4] 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),2015,40(5):661-666

[5] 江记洲,郭甲腾,吴立新,等. 基于三维激光扫描点云的矿山巷道三维建模方法研究[J]. 煤矿开采,2016,29(2):109-113

[6] 谭诗瀚,段茗,杨红雨. 非均匀粒子流体模拟[J]. 计算机工程与设计,2011,32(8):2760-2763

[7] Boyland P. Dynamics of two-dimensional time-periodic Euler fluid flows[J]. *Topology & Its Applications*, 2012,152(1):87-106

[8] 张桂娟,陆佃杰,刘弘,等. 耦合几何特征的高精度流体动画建模方法[J]. 计算机学报,2015,38(6):1281-1295

[9] 杨扬,崔慧敏,冯晓兵. 面向 GPU 的循环合并[J]. 高技术通讯,2013,23(3):257-262

[10] 邵绪强,聂霄,王保义. GPU 并行计算加速的实时可视外壳三维重建及其虚实交互[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2017,29(1):52-61

[11] 方贵盛,潘志庚. 水虚拟仿真技术研究进展[J]. 系统仿真学报,2013,25(9):1981-1989

[12] Ren B, Li C, Yan X, et al. Multiple-fluid SPH simulation using a mixture model[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(5): 1-11

An algorithm for real-time visualization of fluid in complex 3D pipe networks and its application

Zhang Yue*, Li Qian*, Zhang Shibo**, Cheng Fang*, Xu Hua**

(* College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)
(** College of Information Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617)

Abstract

To solve the problem of real-time visualization of fluid in complex 3D pipe networks, the various pipelines and intersections in complex 3D pipe networks are analyzed and generalized, and an algorithm for real-time visualization of fluid in complex 3D pipe networks is proposed. The centerline data of pipeline network is obtained through pipe networks modeling and centerline acquiring, and the types of pipelines and intersections are determined. The fluid surface model is established by the intersection operation and reconstruction of the undersurface of the pipe networks for various pipelines and intersections to decrease the computational load of real-time fluid modeling. The real-time fluid modeling is realized by real-time updating of the fluid surface and fluid depth based on real-time fluid depth information and categories of pipe networks model obtained by sensor networks or numerical simulation;real-time visualization of fluid in complex 3D pipe networks is finally realized by rendering technology. Taking the mine water inrush as an example, the algorithm is analyzed and verified to be feasible.

Key words: complex 3D pipe network, reconstruction, fluid modeling, real-time visualization of fluid, mine water inrush