

管道流模块

简介

5.4

COMSOL

管道流模块简介

© 1998–2018 COMSOL 版权所有

受列于 cn.comsol.com/patents 的专利和美国专利 7,519,518、 7,596,474、 7,623,991、 8,457,932、 8,954,302、 9,098,106、 9,146,652、 9,323,503、 9,372,673 及 9,454,625 的保护。专利申请中。

本文档和本文所述的程序根据 COMSOL 软件许可协议 (cn.comsol.com/comsol-license-agreement) 提供，且仅能按照许可协议的条款进行使用和复制。

COMSOL、 COMSOL 徽标、 COMSOL Multiphysics、 COMSOL Desktop、 COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 公司的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 公司及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联，亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 cn.comsol.com/trademarks。

版本 : COMSOL 5.4

联系信息

请访问 “联系 COMSOL” 页面 cn.comsol.com/contact，以提交一般查询、联系技术支持或搜索我们的联系地址及号码。您还可以访问全球销售办事处页面 cn.comsol.com/contact/offices，以获取地址和联系信息。

如需联系技术支持，可访问 COMSOL Access 页面并填写在线申请表，位于：cn.comsol.com/support/case 页面。其他有用的链接还包括：

- 技术支持中心：cn.comsol.com/support
- 产品下载：cn.comsol.com/product-download
- 产品更新：cn.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客：cn.comsol.com/blogs
- 用户论坛：cn.comsol.com/community
- 活动：cn.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心：cn.comsol.com/video
- 技术支持知识库：cn.comsol.com/support/knowledgebase

文档编号：CM022802

目录

简介 5
应用 6
管道流模块接口 10
根据空间维度和研究类型排列的物理场接口 12
教学示例：池塘地热循环系统 14

简介

管道流模块是 COMSOL Multiphysics 为管道流专门开发的一个模块，主要功能是对管道和通道内的流体流动、传热和质量传递进行建模和模拟。其中还预置了**水锤**和**管道声学**接口，分别用于对可压缩水力瞬变和声波进行建模。**管道流模块**可以处理管道和通道内涉及流体速度、压力、温度及声波的问题。

将管道作为二维或三维中的曲线进行建模，可以极大地提高对有限直径的三维管道进行网格剖分和计算的效率。

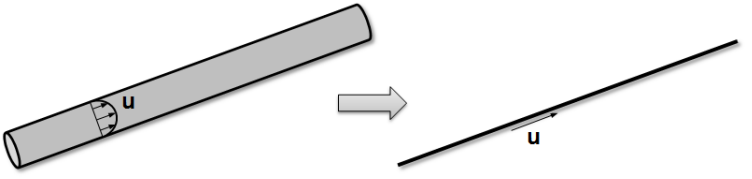


*图 1：**管道流**接口将三维流问题简化为二维或三维曲线。*

如果管道的长径比足够大，可以假设每一段管道中的流体都是充分发展状态，这种情况就适合使用**管道流模块**。

模块的物理场接口定义了管道内流动的动量、能量和质量守恒。流动速率、压力、温度和浓度场可作为横截面平均的量进行建模，使这些量只沿管道长度发生变化。可以利用摩擦因子来描述沿管道长度的压力损失。软件内置大量的描述 Darcy 摩擦因子和 Fanning 摩擦因子的表达式，可用于层流、湍流、牛顿流体和非牛顿流体，并可以选择不同的横截面形状，以及一系列的相对表面粗糙度。除了沿管道的连续摩擦压降之外，软件还可以根据工业标准损耗系数库来计算不同管道零件中由于不可逆损耗所引起的压降，例如弯管、收缩 / 扩张、T 接头、 Y 接头和阀等。此外，还可以使用泵作为流动诱导装置。

此模块中的特征旨在对管道和通道系统中的不可压缩和弱可压缩流体流动、可压缩水力瞬变和声波进行建模和模拟。典型的仿真应用包括计算管道系统的速度场、压强变化及温度场。也可以对水力瞬变进行建模，例如操作阀门时，将阀门迅速关闭经常会产生水锤现象。

应用

本模块可用于设计和优化复杂的涡轮机冷却系统、分析建筑物的通风系统、化工行业的管道系统，以及石油天然气输送管道等，这些只是众多应用中的一小部分。

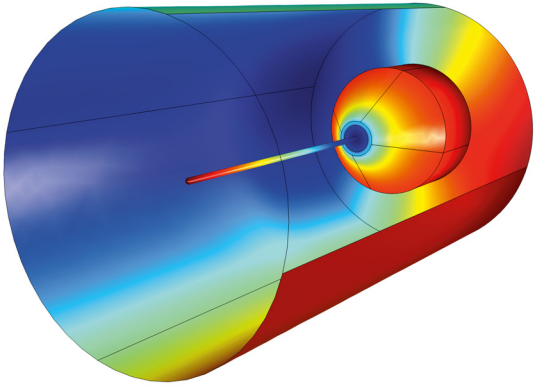


*图 2：使用**管道声学，瞬态**物理场接口建立的**针管式麦克风**模型。*

使用**管道流模块**，您可以模拟任何存在狭窄管道流动、波、质量或传热现象的设备。**管道流模块**非常适合求解弯管、阀门、储罐等设备中典型的压降和质量流计算。

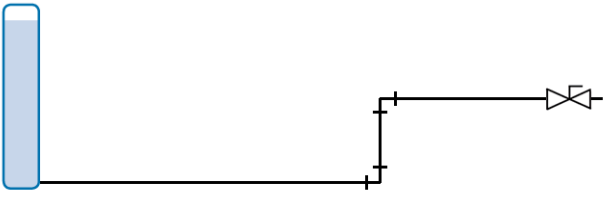


图 3：水罐系统放水模型，计算中考虑了管道系统的弯管和阀门等零件。

对于传热的研究，**管道流模块**包含多个可自动与周围的散热装置或热源进行耦合的功能；既可以使用强制对流和对流的半经验简便计算方法，也可以直接耦合到三维实体模型。

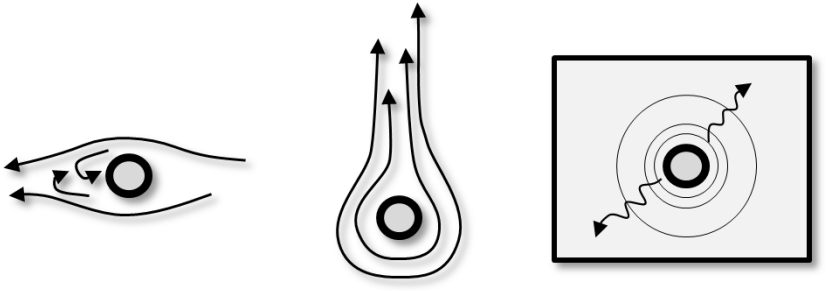


图 4：三种不同的传热方式，从左到右依次为：强制对流、对流和固体传导。

管道流 App 库中的**模具冷却**模型演示了如何通过管道流模块设置管道 - 实体的耦合。在聚合物材料加工工艺中，最终产品的结构完整性对模具的冷却历史非常敏感。

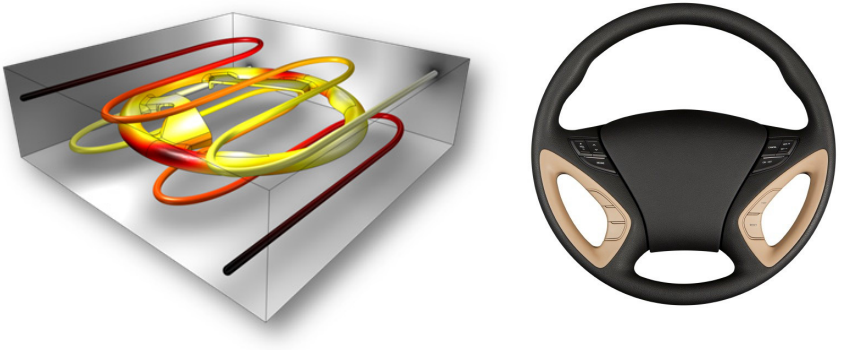


*图 5：模拟模具中冷却管道的传热过程，理解聚氨酯方向盘注塑模具的冷却过程。模型中使用了**非等温管道流**接口。*

管道流模块可对化学物质在溶液中的质量传递过程进行建模，并考虑复杂的化学反应。在同一模型中可以计算质量传递、化学反应动力学、传热和压降。

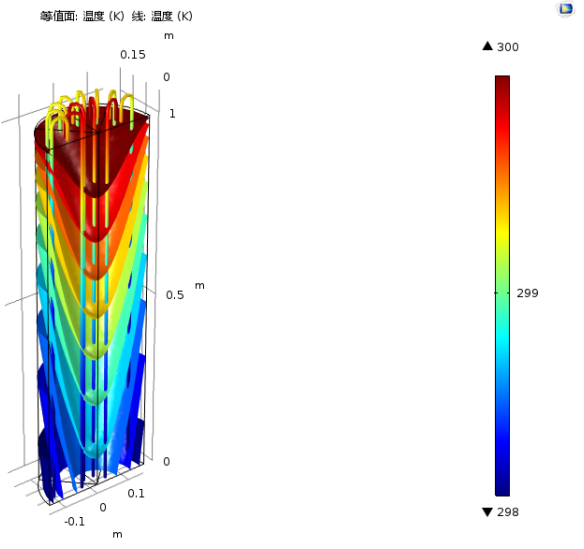


图 6：自发热化学反应器中的温度分布。模型中计算了传质、化学反应、传热、压降和流体流动。

由于 COMSOL 具有强大的处理非线性材料的功能，可以轻松地对石油、天然气应用进行建模，如非牛顿流体和具有高度温度相关属性的材料等。例如原油输送管道模型中，粘性热效应和温度相关的流体粘性对通过泵输送石油的能力

有极大的影响。**管接头**多物理场耦合特征可以轻松地将管道无缝连接到三维流体域中。



*图 7：案例库中的**管段绝热**模型模拟了冷却过程中的粘性热效应，以及石油传输管道的属性。*

管道流模块接口

本模块包含以下物理场接口。另请参见图 8 中显示的**模型向导**中的图形。

管道流

管道流接口 () 计算等温管道系统中的压力和速度场。

管道传热

管道传热接口 () 计算管道系统中的热量平衡，需要输入已知的速度场，并包含壁对周围环境传热。

管道中稀物质传递

管道中稀物质传递接口 () 考虑扩散、分散、对流和化学反应等效应，求解管道中的质量守恒方程，计算稀溶液中的溶质浓度分布。

非等温管道流

非等温管道流接口 () 同时求解流动、压力和温度并完全耦合。

反应管道流

反应管道流接口 () 求解速度场、压力、温度和反应溶质传递并完全耦合。

水锤

水锤接口 () 求解管道系统中的快速水力瞬变，同时考虑流体和管道壁的弹性属性。

管道声学，频域

管道声学，频域接口 () 假设柔性管道系统中发生的简谐振动，可对声波进行建模。

管道声学，瞬态

管道声学，瞬态接口（）可对柔性管道系统中的声波进行建模，可以考虑任意的瞬态压强变化。

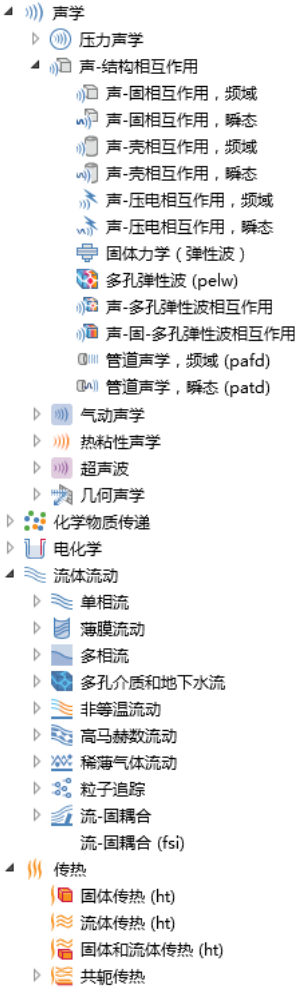


*图 8：**模型向导**中**管道流模块**的物理场接口，这些接口位于不同的组中。*

根据空间维度和研究类型排列的物理场接口

下表列出了 COMSOL Multiphysics 基本许可证提供的物理场接口和特定于此模块的物理场接口。

物理场接口	图标	标记	空间维度	适用的预设研究类型
声学				
声 - 结构相互作用				
管道声学，频域 [1]		pafd	三维，二维	特征频率 ; 频域
管道声学，瞬态 [1]		patd	三维，二维	瞬态
化学物质传递				
反应管道流		rpfl	三维，二维	稳态；瞬态
管道中稀物质传递		dsp	三维，二维	稳态；瞬态
流体流动				
单相流				
管道流		pfl	三维，二维	稳态；瞬态
水锤		whtd	三维，二维	瞬态
非等温流动				
非等温管道流		nipfl	三维，二维	稳态；瞬态

物理场接口	图标	标记	空间维度	适用的预设研究类型
传热				
管道传热		htp	三维，二维	稳态；瞬态
[1] 需要**管道流模块**和**声学模块**。				

教学示例：池塘地热循环系统

在地热行业中可以将池塘和湖泊作为热量储存器。在本例中，流体在封闭的聚乙烯管道中循环流动。在管道中，冷水流向池塘获得热量，流回来的水温比流入的温度略高。热泵 （该模型中未包含）会继续增加热量，供住宅中使用。水变冷后流回池塘中。管道卷成美观的形状并被固定住。**非等温管道流**接口可以设置并求解管道系统中的温度和流体流动的方程，其中的几何由三维直线表示。为了考虑外部冷却效果，模型中使用了强制对流修正 （请参见上述图 4）。



图 9：未被水面覆盖的管道线圈。

问题描述

高密度聚乙烯管 （直径 20 mm）被卷成 16 圈，这些管道圈每八圈一组固定在两个橇上。每匝管道圈的半径是 1 m，长度约为 75 m。管道圈组与流入和流出

管道（直径 50 mm）相连（请参见图 10）。圈组的高度是 2.4 m，放置在 6 m 深的池塘底部。管道总长度为 1446 m。

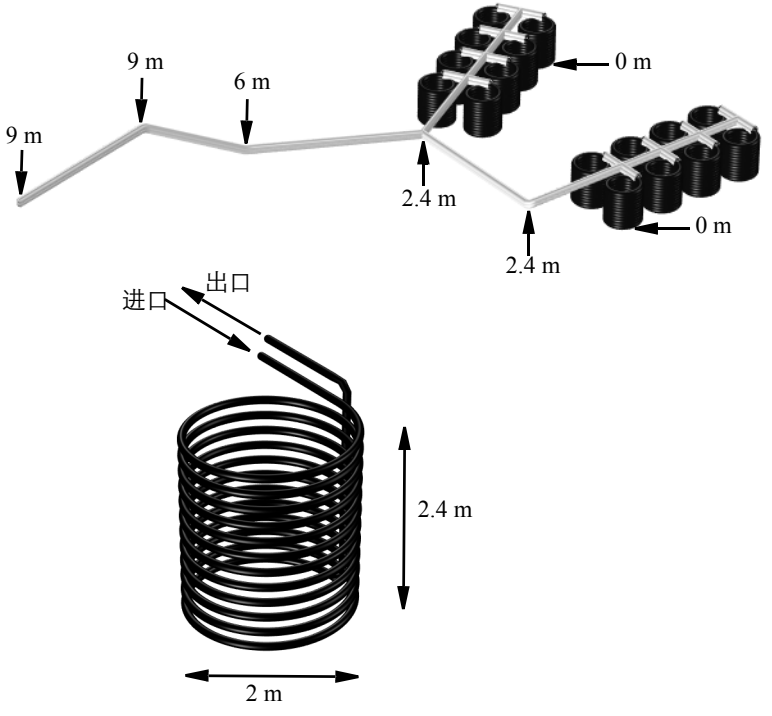


图 10：聚乙烯管道系统，图中标明了管道距离池塘底部的距离。流入和流出管道（灰色）的直径是 50 mm，管道圈（黑色）的直径是 20 mm。管道在水面上为绝热。

池塘水和管道内流体之间的热量交换决定于两者之间的温度差，管道内流体流动缓慢，使得传热更加有效。水池靠近表面附近的温度较高，如下表所示为温度数据。

池塘温度

高程 (M)	**温度** (K)
0	284
2	288
4	291
6	293

在软件中可以很方便地设置不同点之间的线性内插函数，因此可以在仿真中考虑池塘中不断变化的温度。

流动方程

以下的稳态动量方程和连续方程描述了管道系统内的流动，这些方程使用非等温**管流**接口求解：

$$0 = -\nabla p - f_D \frac{\rho}{2 d_h} \mathbf{u}|\mathbf{u}| + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (A \rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

其中，A（SI 单位：m^2）是管道的横截面积，ρ（SI 单位：kg/m^3）是密度，$\mathbf{u}$（SI 单位：m/s）是管道曲线切向的流体速度，p（SI 单位：N/m^2）是压力，$\mathbf{F}$（SI 单位：N/m^3）是体积力，例如重力。

模型中可以显式地考虑重力，但由于密度的变化微小，因此可以忽略，并且模型流动不是由压力驱动，重力的唯一效应是总压力水平的变化。因此，通常我们在这种建模中会考虑忽略重力的影响，并将压力的变量理解为约化压力值，$p_r = p - \rho g(z_0 - z)$，其中 z_0 是自由液面的基准高度。这样的处理方式可以减小模型的复杂度，得到同样精确的结果。对于要包含重力效应的模型，可以添加**体积力**节点。

达西摩擦因子表达式

方程 1 的最后两项描述了由于内部粘性剪切和重力产生的压降。其中一项包含达西摩擦因子 f_D，它是一个雷诺数和表面粗糙度除以管道直径 e/d_h 的函数。**非等温管道流**接口内置了一系列达西摩擦因子 f_D 的表达式。



图 11：从管道属性节点选择不同的摩擦模型。

本例使用了 Churchill 关系式 （参考文献 1），此公式可用于层流、湍流及层流湍流之间的过渡区域，其表达形式为：

$$f_{\mathrm{D}} = 8\left[\left(\frac{8}{\mathrm{Re}}\right)^{12} + (A+B)^{-1.5}\right]^{1/12} \tag{3}$$

其中

$$A = \left[-2.457\ln\left(\left(\frac{7}{\mathrm{Re}}\right)^{0.9} + 0.27(e/d)\right)\right]^{16} \tag{4}$$

$$B = \left(\frac{37530}{\mathrm{Re}}\right)^{16} \tag{5}$$

如上面的方程所示，摩擦因子是表面粗糙度除以管道直径的函数。表面粗糙度数据可以从**管属性**节点的预定义列表中获取。

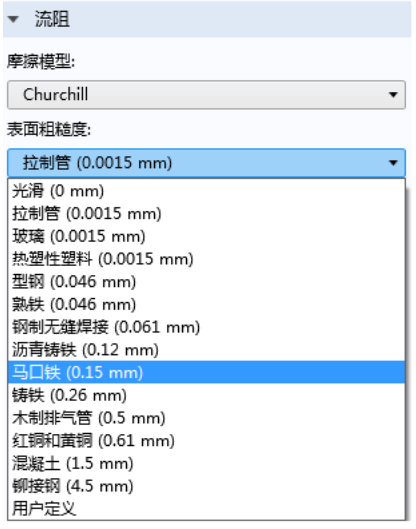


*图 12：在**管属性**节点中指定表面粗糙度。*

Churchill 方程也是流体属性的函数，通过雷诺数关联：

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u d}{\mu} \tag{6}$$

水的物理属性与温度相关，可以直接从软件内置的材料库中调用。观察方程 3 可知，对于低雷诺数 （层流），摩擦因子是 64/Re，而对于高雷诺数，摩擦因子与 Re 无关。

传热方程

管道流的能量方程式：

$$\rho A C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot A k \nabla T + f_{\mathrm{D}} \frac{\rho}{2 d_{\mathrm{h}}} |\mathbf{u}|^3 + Q_{\mathrm{wall}} \tag{7}$$

其中，C_p（SI 单位：J/(kg·K)）是等压热容，T 是温度（SI 单位：K），k（SI 单位：W/(m·K)）是热导率。方程 7 右边第二项相当于粘性剪切产生的摩擦耗散热。Q_{wall}（SI 单位：W/m）是管壁与周围热交换产生的源 / 汇项：

$$Q_{\mathrm{wall}} = hZ(T_{\mathrm{ext}} - T) \tag{8}$$

其中 $Z\,(\mathrm{m})$ 是管道湿周，h $(\mathrm{W/(m^2{\cdot}K)})$ 是总传热系数，T_{ext} (K) 是管道外部的温度。

如果管道包含多层结构，总传热系数包括内部薄膜热阻、分层管壁热阻以及外部薄膜热阻。传热系数会考虑所有这些热阻自动进行计算。

在此模型中只有一层管壁，管道壁的属性如下表所示。

名称	值	描述
d_{wall}	2 mm	管壁厚度
k_{wall}	0.46 W/(m·K)	管壁热导率

结果

图 13 所示为 1446 m 管道系统中的压力 (Pa) 分布，入口速率假定为 4 l/s。

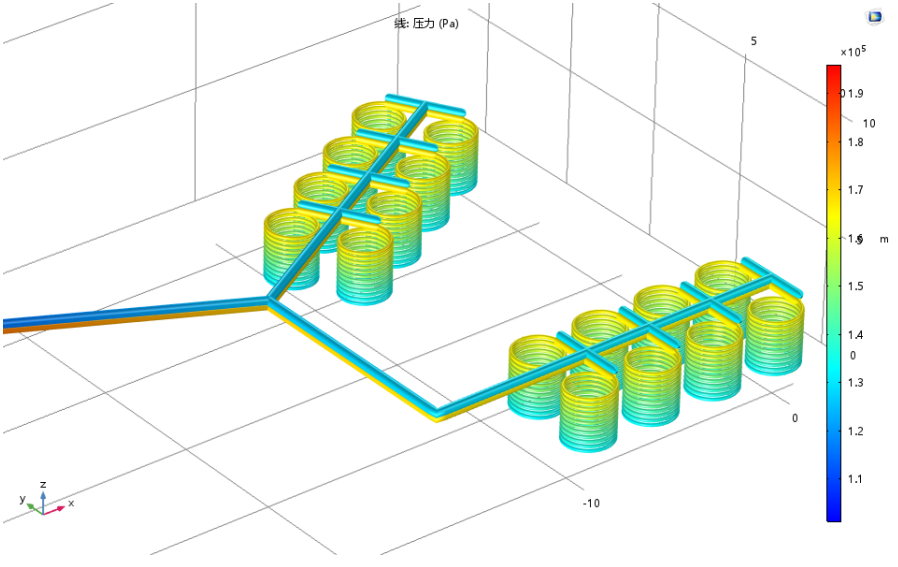


图 13：管道系统流动损耗产生的压降。

下图所示为管道内流体的温度 (K) 分布。流入流体的温度为 5 °C，流出流体的温度约为 11 °C。

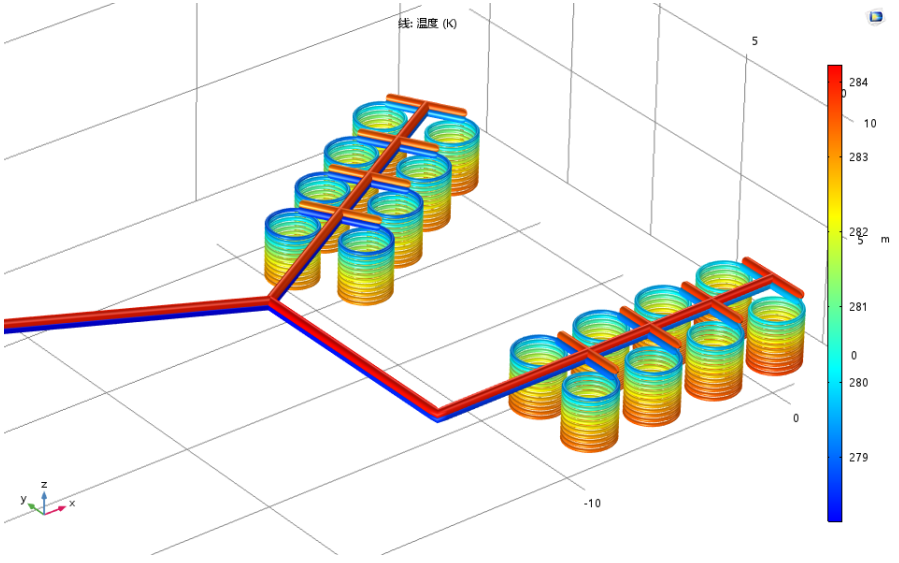


图 14：管道流体的温度。

环路中湍流条件对于管道与周围环境之间良好的热交换非常重要。图 15 所示为雷诺数分布，从中可知整个管道系统中都是湍流 (Re > 3000)。

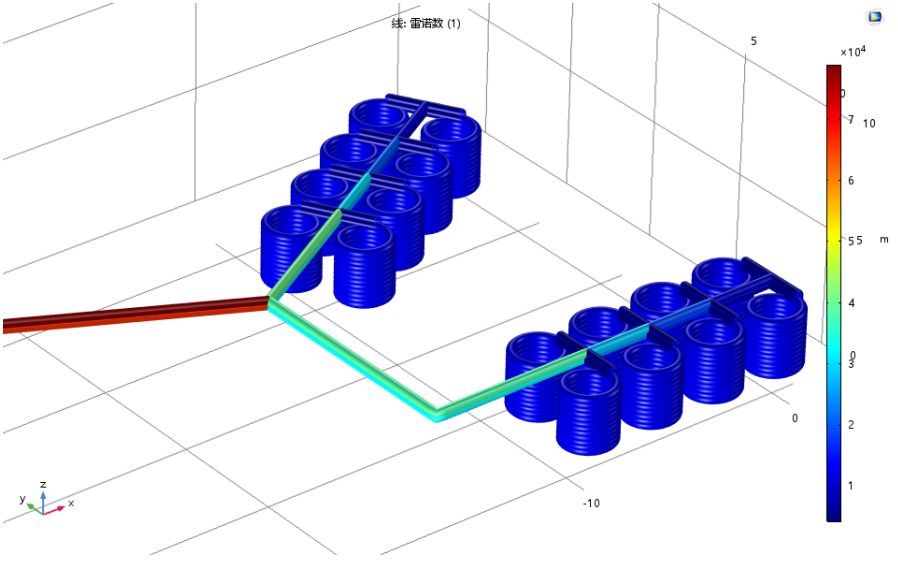


图 15：从环路的雷诺数分布可知管道内均是湍流。

参考文献

1. S.W. Churchill, "Friction factor equations span all fluid-flow regimes," *Chem. Eng.*, vol. 84, no. 24, p. 91, 1997.

2. F.P. Incropera and D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Wiley & Sons, 1996. Eq 8.62 and Eq 9.34, respectively.

3. V. Gnielinski, *Int. Chem. Eng.* vol. 16, p. 359, 1976.

4. S. W. Churchill, M. Bernstein, *J Heat Transfer,* vol. 99, p. 300, 1977.

模型向导

建模的第一步是打开 COMSOL 软件，然后选择物理场接口，并指定要执行的分析类型 — 在本例中为非等温流动稳态分析。

注意：这些操作说明基于 Windows 用户界面，但同样适用于 Linux 和 Mac，只是略有差别。

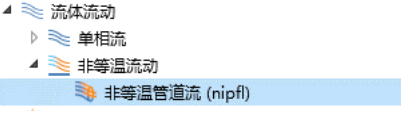
1 双击桌面上的 COMSOL 图标来启动软件。打开软件时，您可以选择使用**模型向导**来新建 COMSOL 模型或选择**空模型**来手动创建。对于本教程，单击**模型向导**按钮。

如果 COMSOL 已打开，您可以通过在**文件**菜单中选择**新建** 来启动**模型向导** 。

模型向导可以指导您进行建模的几个初始步骤。接下来的窗口可供您选择建模空间的维度。

2 在**选择空间维度**窗口中单击**三维** 。

3 在**选择物理场**页面中选择**流体流动** > **非等温流动** > **非等温管道流 (nipfl)** 。



4 单击**添加**，然后单击**研究** 。

5 在**选择研究**窗口中，选择**一般研究**下的**稳态** 。

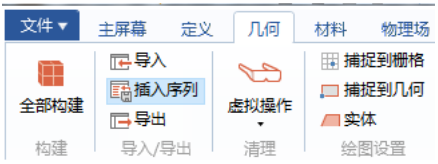
6 单击**完成** 。

几何

注意：本练习中使用文件的位置根据您的安装会有不同。例如，如果软件安装在硬盘中，文件路径类似于 `C:\Program Files\COMSOL\COMSOL54\Multiphysics\applications\`。

首先创建管道系统的几何模型，您可以直接导入已准备好的几何序列文件来简化建模过程。

1 在**几何**工具栏中，单击**插入序列** 。



2 浏览案例库文件夹，在 `Pipe_Flow_Module\Heat_Transfer` 下双击 `geothermal_heating_geom_sequence.mph`。

3 在**几何**工具栏中单击**全部构建** 。

如果希望从头开始学习如何构建此类几何，可以稍后自己尝试在**模型开发器**树中通过详细的几何序列来建模。

定义

现在，通过插值表和变量添加一些数据。

内插 1

池塘水有一定程度的分层，并沿深度方向有温度梯度。这些数据经过测量得到，可以通过内插表来添加到模型中。

1 在**定义**工具栏中单击**插值** 。

注意：在 Linux 和 Mac 下，**主屏幕**工具栏是指 Desktop 顶部附近的一组特定控件。

2 在**插值**的**设置**窗口的**定义**栏将以下信息输入表格：

T	F(T)
0	284
2	288
4	291
6	293



3 定位至**单位**栏。

- 在**变元**文本框输入 `m`。
- 在**函数**文本框输入 `K`。

变量 1

1 在**主屏幕**工具栏中单击**变量** a=，选择**局部变量** a=。

2 在**变量**的**设置**窗口中定位至**变量**栏。单击**从文件载入**。

3 浏览案例库文件夹，双击 `Pipe_Flow_Module\Heat_Transfer` 路径下的 `geothermal_heating_variables.txt` 文件。

变量

名称	表达式	单位	描述
T_pond	int1(z)	K	Water temperature
d_wall	2[mm]	m	Thickness of pipe wall
k_wall	0.46[W/m/K]	W/(m·K)	Thermal conductivity of high density polyethylene

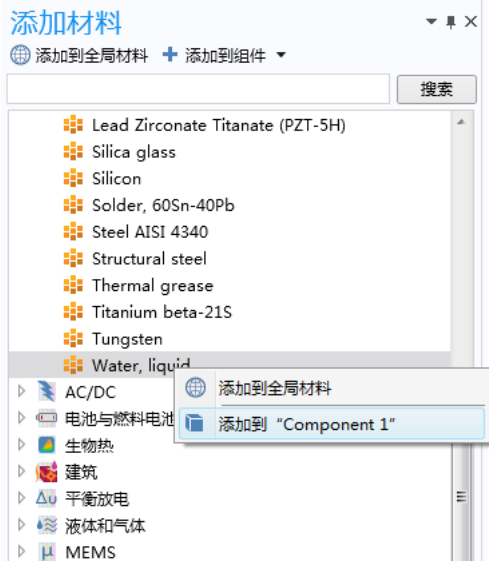
导入文件后变量列表应如上图所示。请注意， int1(z) 表示之前导入的内插表格， z 是高度坐标的名称。

材料

1 在**材料**工具栏中单击**添加材料** 。

2 在内置材料树中单击 **Water, liquid** 。

3 单击**添加到组件 1** 。



非等温管道流

接下来定义物理设置，其中包括流动和温度条件，以及管道中的压降。由于一般的管道包含大量不同的零件，您可以通过定义选择来快速获取一个易于管理的模型。

管属性 1

1 在**模型开发器**的**组件 1**> **非等温管道流**下单击**管属性 1**。



注意：在 COMSOL 的许多**设置**窗口中，可以展开***方程***栏，其中显示当前设置所使用的方程。在本例中，显示的是默认摩擦因子模型 *Churchill* 关系式。如果您对任何**设置**窗口的底层方程感兴趣，可以单击 **F1** 键或**帮助**按钮 ，以查看当前**设置**窗口的描述文档。

2 在**管属性**的**设置**窗口中定位至**管形状**。

- 从**形状**列表中选择**圆形**。
- 在 d_i 文本框输入 20[mm]。



温度 1

1 在**模型开发器**的**组件 1**> **非等温管道流**下单击**温度 1**。

2 在**温度**的**设置**窗口中定位至**温度**栏，*在* T_{in} 文本框输入 5[degC]。

管属性 2

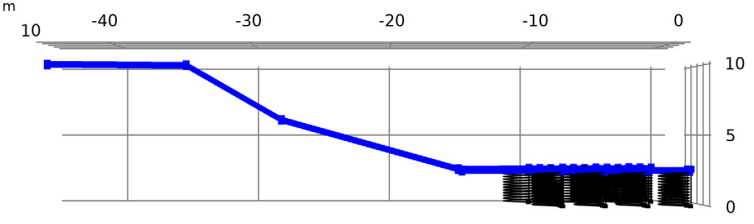
现在，为一组新管段指派其他属性设置。

1 在**模型开发器**中右键单击**非等温管道流** ，并选择**管属性**。

2 选择边 1–12、15、17–21、27–29、33–35、39、41–45、51–53、57–59、63、65–69、75–77、81–83、87、89–91、97、98、102 和 103。

这些选择表示管圈的流入管和流出管。通过以上列出的数字来选择会让人感到比较枯燥，但由于我们可以从图形中看出来每一个数字所对应的对象，也可以图形方式进行选择。

- 在**图形**窗口中，单击**切换到 ZX 平面视图** ，然后单击**选择框** 。



- 在**图形**窗口中，如上图所示，围绕以蓝色突出显示的管道绘制一个框。
- 单击**切换到默认三维视图** 按钮。

3 在**管属性**的**设置**窗口中，定位至**管形状**。

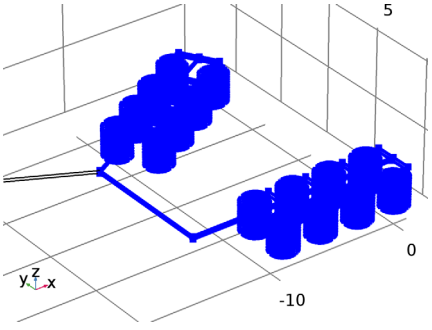
- 从列表中选择**圆形**。
- 在 d_i 文本框中输入 50[mm]。

壁传热 1

1 在**物理场**工具栏中单击**边** ，选择**壁传热**。



2 仅选择**边 7-104**，按照之前的操作使用**选择框**。与这些边相对应的部分以蓝色显示。



3 在**壁传热**的**设置**窗口中定位至**传热模型**栏，然后在 T_{ext} 文本框中输入 T_pond。



4 在**模型开发器**中右键单击**壁传热 1**，并选择**内部膜阻**。

壁层 1

在**壁传热**中添加壁层，设置聚乙烯管。

1 在**模型开发器**的**组件 1> 非等温管流**下，右键单击**壁传热 1**，然后选择**壁层**。

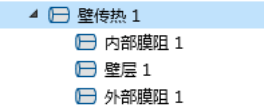
2 在**壁层**的**设置**窗口，定位至**明细**栏。

- 从 k 列表中选择**用户定义**。
- 在 k 文本框中输入 k_wall。
- 从 Δw 列表中选择**用户定义**。
- 在文本框中输入 d_wall。

如果希望使用多层管壁，则可以添加多个壁层。

外部膜阻

1 在**模型开发器**中右键单击**壁传热 1**，选择**外部膜阻**。



2 在**外部膜阻**的**设置**窗口定位至**明细**栏。

- 在**外部膜传热模型**列表中，默认激活的是**外部强制对流**。
- 从**周围流体**列表中选择 **Water, liquid**。
- 在 u_{ext} 文本框输入 `0.2[m/s]`。

0.2 m/s 的外部流速是指池塘中的缓慢流动，也可以假设为管道外部的强制对流。水的材料属性是温度的函数，可以直接从之前添加的**材料**节点中获得。



入口 1

1 在**物理场**工具栏中单击**点**，并选择**入口**。

2 仅选择**点 1**。

3 在**入口**的**设置**窗口中，定位至**入口明细**栏。

- 从**明细**列表中选择**体积流率**。
- 在 $q_{v,0}$ 文本框输入 `4[l/s]`（表示升 / 秒）。

出口条件已在默认节点**压力 1** 中设置。

热流出 1

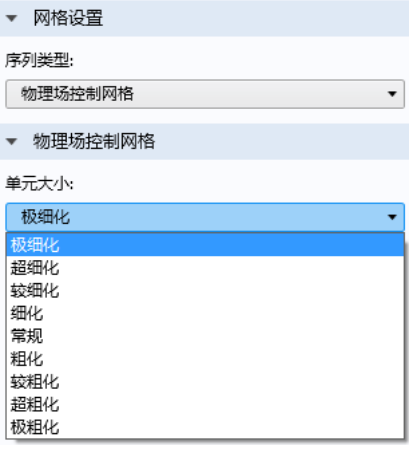
1 在**物理场**工具栏中单击**点** ，并选择**热流出** 。

2 仅选择**点 2**。

网格

1 在**模型开发器**中单击**组件 1** 下的**网格 1** 。

2 在**网格**的**设置**窗口中，定位至**网格设置**栏。从**单元大小**列表中选择**极细化**。



3 单击**全部构建**按钮 。

4 单击**图形**工具栏中的**切换到默认三维视图**按钮 。

求解

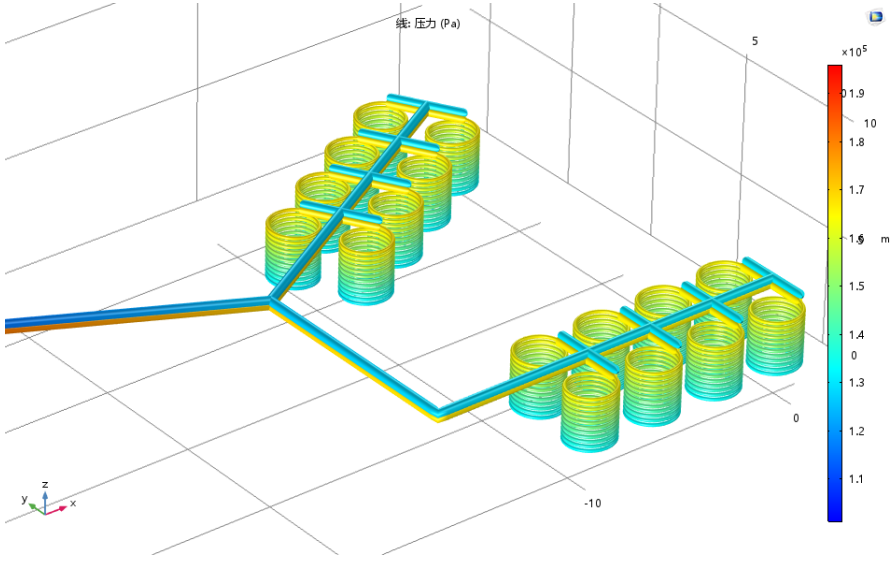
在**主屏幕**工具栏中单击**计算** 。

压力

默认绘图组显示了管道系统的压力 （图 13）、速度和温度 （图 14）。为得到更好的视图，请执行以下操作：

1 单击**图形**工具栏中的**缩放框**按钮 。

2 在**图形**窗口中绘制一个方框，放大两个管道圈组。

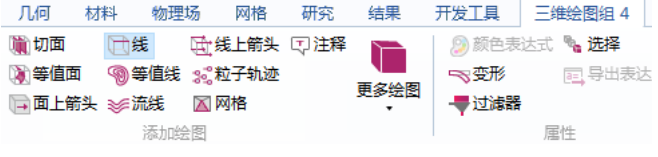


利用以下操作步骤，重现图 15 所示的**雷诺数**绘图。

三维会图组 4

1 单击**结果**工具栏中的**三维绘图组** 。

2 选择**模型开发器**中的**三维绘图组 4**，会出现一个额外的工具栏，其中包含**三维绘图组**的**绘图工具**。单击**三维绘组图 4** 中的**线** 。



3 在**线**的**设置**窗口中，在**表达式**栏右上角单击**替换表达式**  。

4 从菜单中，双击**非等温管流** > **雷诺数 (nipfl.Re)**。

5 定位至**色彩和样式**栏，从**线类型**列表中选择**管**。

6 单击**绘制**按钮  。

注意：本模型假定管道转角的弯曲部分对结果的影响不大，故而将其忽略。作为练习，您可以将弯管设置添加到模型中，并查看这种假设是否正确。