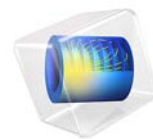


在 COMSOL Multiphysics 5.4 版本中创建



薄膜电阻

简介

在模拟薄层中的传导或物质扩散时，常常存在着不同域的几何尺寸之间差异很大的情况。对于夹层结构，当最薄的层与其他层的厚度相差很大时，可以使用薄层近似来模拟最薄层。

模型定义

此案例展示了直流传导问题中薄层近似的原理，其中比较了模拟包含实际三个夹层结构的模型与简化模型（中间的夹层域替换为薄层近似）的结果，并讨论了使用薄层近似这种替代方法的优点（见[图 1](#)）。

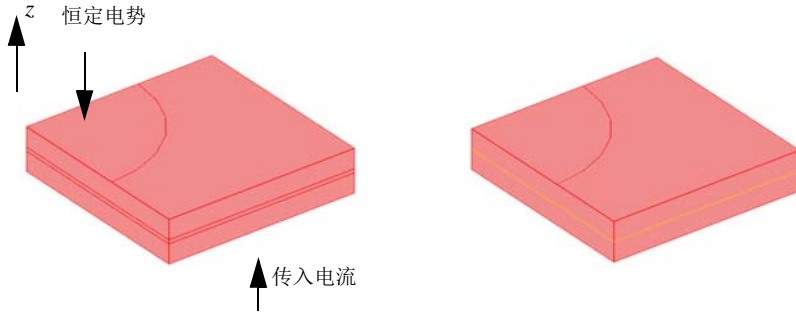


图1：实际模型的几何（左图）和使用薄层近似的几何（右图）。电流由底部边界流入，由上表面圆形板流出。

下面的[方程 1](#) 中描述了实际夹层结构中所有三个域的电流平衡：

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = 0 \quad (1)$$

在此方程中， σ 表示电导率， V 是电势。此案例中，模型结构的薄层和较厚层的电导率完全不同。边界条件为电流由底部流入，上表面圆形边界处电势恒定（见[图 1](#)），所有其他边界都为电绝缘边界。

简化模型基于以下假设：\$x\$ 和 \$y\$ 方向的电流密度矢量分量都非常小，薄结构中的传输主要在 \$z\$ 方向进行。对于中间层，这意味着可以将[方程 1](#)近似为一个一维方程

$$-\sigma \frac{d^2 V}{dz^2} = 0 \quad (2)$$

如果中间层的上下表面电势给定，则可以通过解析方式求解此方程：

$$V_{\delta=0} = V_1 \quad (3)$$

$$V_{\delta=\delta_1} = V_2 \quad (4)$$

对[方程 2](#)积分，得到：

$$V = az + b$$

其中，\$a\$ 和 \$b\$ 是积分常数。如果在中间层的较低边界处设置 \$z=0\$，则根据[方程 3](#)和[方程 4](#)的边界条件可以获得常数 \$a\$ 和 \$b\$ 的值：

$$V_1 = b$$

$$V_2 = a\delta + b$$

由此：

$$b = V_1$$

$$a = \frac{V_2 - V_1}{\delta}$$

推导出的电势方程为

$$V = \left(\frac{V_2 - V_1}{\delta} \right) z + V_1 \quad (5)$$

电流密度定义为

$$J_z = -\sigma \frac{dV}{dz} \quad (6)$$

结合[方程 5](#)和[方程 6](#)可以得到：

$$J_z = -\sigma \left(\frac{V_2 - V_1}{\delta} \right) \quad (7)$$

在进行薄膜近似处理时，膜边界处的电势不连续。在内部边界使用“接触阻抗”节点来对电阻材料的薄层建模。

通过使用薄层上的势差得到梯度近似，还可以根据[方程 7](#)推导出电流密度的表达式。此示例包含前述冗长的推导过程，以表明这一过程得到的解与根据[方程 2](#)得到的解完全相同。

本案例中展示的近似方法并不限于求解直流问题，还可用于模拟扩散、热传导、基于达西定律的多孔介质流以及其他可由梯度通量的散度描述的各类物理问题。

一般而言，这一简化方法适用于那些建模域厚度相差太大，以致网格生成器都无法对域划分网格的情况。有些情况下，即使网格生成器能够生成网格，也会产生大量的单元。

结果与讨论

[图 2](#) 显示对含三个传导层的问题求解得到的精确解以及通过薄膜近似处理得到解，对二者进行了比较。比较结果显示，尽管此研究中间层的膜相当厚，但电势和电流分布完全一致。随着上层域和下层域之间膜的厚度变小，采用近似处理得到解的精度变得更高。

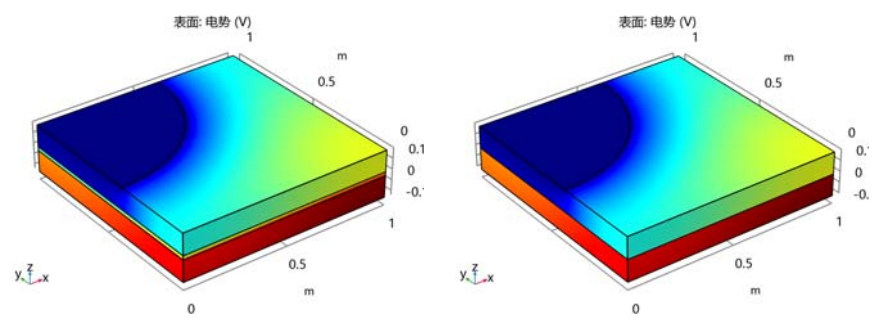


图2：模拟元件上的电势分布。电流为0.3 A 时两个模型元件上的电势损耗值几乎相同：全模型（左图）和薄膜近似后的模型（右图）。

图 3 显示通过全模型及近似处理模型的结构中心的电势截面图。图中显示这两个模型的电势完全相同。

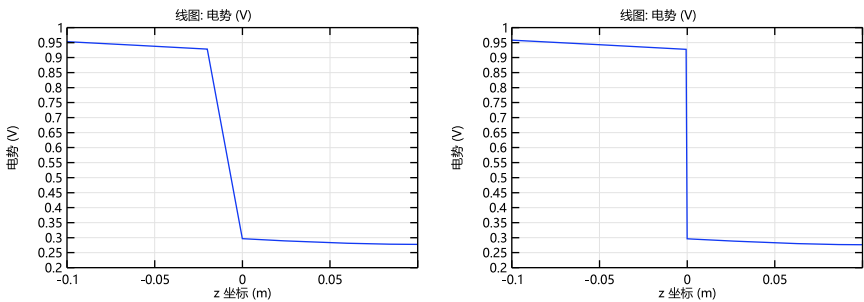


图 3：元件中间层沿 z 方向的电势分布。全模型的解（左图）及薄膜近似解（右图）。

案例库路径：COMSOL_Multiphysics/Electromagnetics/thin_film_resistance

建模操作说明

从文件菜单中选择**新建**。

新建

在**新建**窗口中，单击**模型向导**。

模型向导

- 1 在**模型向导**窗口中，单击**三维**。
- 2 在**选择物理场**树中选择 **AC/DC> 电流 (ec)**。
- 3 单击**添加**。
- 4 单击**研究**。
- 5 在**选择研究**树中选择**一般研究 > 稳态**。
- 6 单击**完成**。

几何 1

工作平面 1 (wp1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**工作平面**。

- 2 在工作平面的设置窗口中，定位到平面定义栏。
- 3 在 z 坐标文本框中键入 “0.1”。
- 4 定位到合并对象栏。清除合并对象复选框。
- 5 单击显示工作平面。

工作平面 1 (wp1) > 圆 1 (c1)

- 1 在工作平面工具栏中单击体素，然后选择圆。
- 2 在圆的设置窗口中，定位到大小和形状栏。
- 3 在半径文本框中键入 “0.6”。
- 4 定位到位置栏。在 yw 文本框中键入 “1”。
- 5 在工作平面工具栏中单击全部构建。

工作平面 1 (wp1) > 正方形 1 (sq1)

- 1 在工作平面工具栏中单击体素，然后选择正方形。
- 2 单击全部构建。
- 3 在图形工具栏中单击缩放到窗口大小按钮。

工作平面 1 (wp1) > 交集 1 (int1)

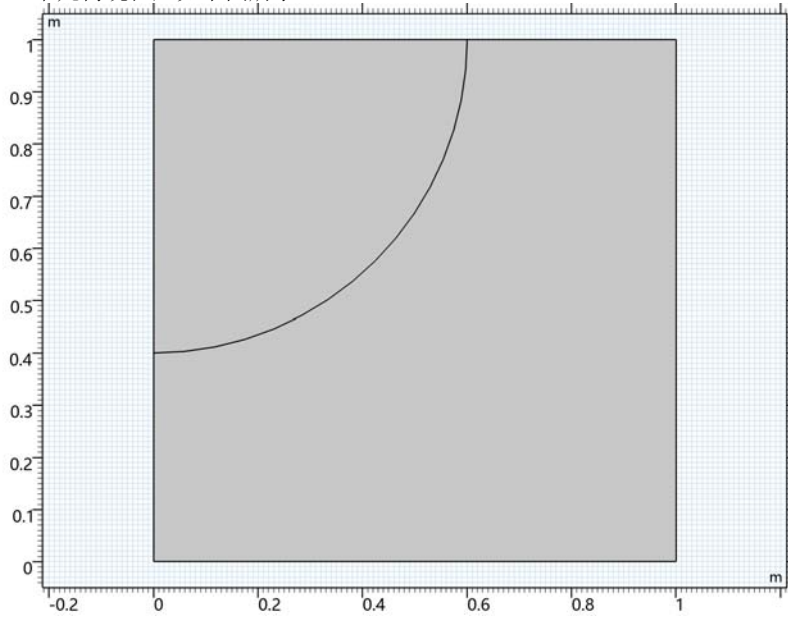
- 1 在工作平面工具栏中单击布尔操作和分割，然后选择交集。
- 2 单击图形窗口，然后按 Ctrl+A 选择这两个对象。
- 3 在工作平面工具栏中单击全部构建。

工作平面 1 (wp1) > 正方形 2 (sq2)

- 1 在工作平面工具栏中单击体素，然后选择正方形。
- 2 单击全部构建。

3 在图形工具栏中单击**缩放到窗口大小**按钮。

二维几何现在应如下图所示。



工作平面 1 (wp1)

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**> **几何 1** 节点下，单击**工作平面 1 (wp1)**。

拉伸 1 (ext1)

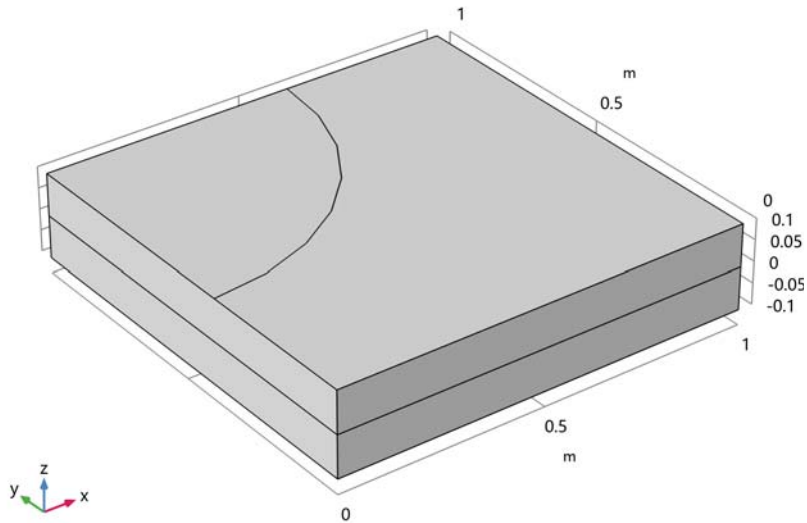
- 1 在**几何**工具栏中单击**拉伸**。
- 2 选择“对象” **wp1.sq2**。
- 3 在**拉伸**的**设置**窗口中，定位到**距离**栏。
- 4 在表中输入以下设置：

距离 (m)
-0.1

长方体 1 (blk1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**长方体**。
- 2 在**长方体**的**设置**窗口中，定位到**大小**和**形状**栏。
- 3 在**高度**文本框中键入“0.1”。
- 4 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入“-0.1”。

- 5 单击**构建所有对象**。
 - 6 在图形工具栏中单击**缩放窗口大小**按钮。
- 最终几何应如下图所示。



电流 (EC)

电流守恒 1

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)**>**电流 (ec)**节点下，单击**电流守恒 1**。
- 2 在**电流守恒**的**设置**窗口中，定位到**传导电流**栏。
- 3 从 σ 列表中选择**用户定义**。在关联文本框中键入“1”。

法向电流密度 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边界**，然后选择**法向电流密度**。
- 2 选择“边界”3。
- 3 在**法向电流密度**的**设置**窗口中，定位到**法向电流密度**栏。
- 4 在 J_n 文本框中键入“0.3”。

接地 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击**边界**，然后选择**接地**。
- 2 选择“边界”8。

接触阻抗 1

- 1 在物理场工具栏中单击**边界**，然后选择**接触阻抗**。
- 2 在图形工具栏中单击**线框渲染**按钮。
- 3 选择“边界”6。
- 4 在图形工具栏中单击**线框渲染**按钮还原渲染设置。
- 5 在**接触阻抗**的设置窗口中，定位到**接触阻抗**栏。
- 6 在 d_s 文本框中键入“0.02”。
- 7 从 σ 列表中选择**用户定义**。保留默认值。
- 8 从 ε_r 列表中选择**用户定义**。再次应用默认值。

研究 1

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 1**。
- 2 在**研究**的设置窗口中，定位到**研究设置**栏。
- 3 清除**生成默认绘图**复选框因为我们要手动添加所需绘图。
- 4 在**主屏幕**工具栏中单击**计算**。

结果

以下步骤显示如何重现电势表面图（图 2 中的右图）。

表面 1

- 1 在**主屏幕**工具栏中单击**添加绘图组**，然后选择**三维绘图组**。
- 2 在**模型开发器**窗口中，右键单击**三维绘图组 1**并选择**表面**。
- 3 在**表面**的设置窗口中，定位到**着色和样式**栏。
- 4 清除**颜色图例**复选框。
- 5 在**三维绘图组 1**工具栏中单击**绘制**。

执行下面的步骤，可视化元件中间层沿 z 方向的电势分布（图 3 的右图）。

三维截线 1

- 1 在**结果**工具栏中单击**三维截线**。
- 2 在**三维截线**的设置窗口中，定位到**线数据**栏。
- 3 在点“1”行中，将 X 设为 0.5， y 设为 0.5， z 设为 -0.1。
- 4 在点“2”行中，将 X 设为 0.5， y 设为 0.5， z 设为 0.1。

一维绘图组 2

- 1 在**结果**工具栏中单击**一维绘图组**。

- 2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**轴**栏。
- 3 选中**手动轴限制**复选框。
- 4 在 **x 最小值**文本框中键入 “-0.1”。
- 5 在 **x 最大值**文本框中键入 “0.1”。
- 6 在 **y 最小值**文本框中键入 “0.2”。

线图 1

- 1 右键单击**一维绘图组 2** 并选择**线图**。
- 2 在**线图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。
- 3 从**数据集**列表中选择**三维截线 1**。
- 4 单击 **x 轴数据**栏右上角的**替换表达式**。从菜单中选择**模型 > 组件 1 > 几何 > 坐标 > z - z 坐标**。
- 5 在**一维绘图组 2** 工具栏中单击**绘制**。

比较薄膜近似处理模型与全三维模型

对于本示例中供比较用的参考模型，要重现其全三维模型，请执行以下步骤：

几何 1

移动 1 (mov1)

- 1 在**几何**工具栏中单击**变换**，然后选择**移动**。
- 2 选择 “对象” **blk1**。
- 3 在**移动**的**设置**窗口中，定位到**位移**栏。
- 4 在 **z** 文本框中键入 “-0.02”。

长方体 2 (blk2)

- 1 在**几何**工具栏中单击**长方体**。
- 2 在**长方体**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。
- 3 在**高度**文本框中键入 “0.02”。
- 4 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入 “-0.02”。

电流 (EC)

电流守恒 2

- 1 在**物理场**工具栏中单击**域**，然后选择**电流守恒**。
- 2 选择 “域” 2。

- 3 在**电流守恒**的设置窗口中，定位到**传导电流**栏。
- 4 从 σ 列表中选择用户定义。在关联文本框中键入“0.01”。

接触阻抗 1

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 电流 (ec)**节点下，右键单击**接触阻抗 1**并选择**禁用**。

研究 1

在**主屏幕**工具栏中单击**计算**。

结果

三维绘图组 1

此绘图显示电势分布（[图 2](#) 的左图）。

一维绘图组 2

此绘图重现[图 3](#) 中的左图。

- 1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**一维绘图组 2**。
- 2 在**一维绘图组 2**工具栏中单击**绘制**。

下面，执行以下步骤，重置模型以使用薄膜近似技术。

几何 1

移动 1 (mov1)

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 几何 1**节点下，右键单击**移动 1 (mov1)**并选择**禁用**。

长方体 2 (blk2)

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 几何 1**节点下，右键单击**长方体 2 (blk2)**并选择**禁用**。

电流 (EC)

接触阻抗 1

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 电流 (ec)**节点下，右键单击**接触阻抗 1**并选择**启用**。

电流守恒 2

在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)> 电流 (ec)**节点下，右键单击**电流守恒 2**并选择**禁用**。

研究 1

在主屏幕工具栏中单击**计算**。