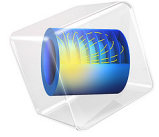


在 COMSOL Multiphysics 6.1 版本中创建



含装配缺陷的四杆机构

简介

本模型模拟平面四杆机构在其中一个关节有缺陷时的动态特性。由于这一缺陷，机构中存在面外运动。由于采用刚性连杆时机构会锁定，因此我们使用柔性零件对机构中的连杆进行建模。

使用“多体动力学”接口对机构进行建模，并将分析结果与[参考资料 1](#)中的结果进行比较。

模型定义

四杆机构的几何形状如[图 1](#)所示，由三个连杆组成。连杆之间的连接通过铰链关节建模。

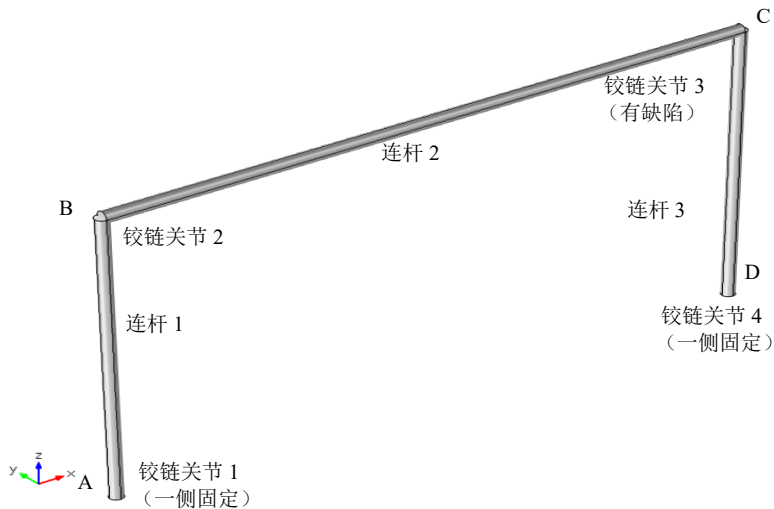


图1：几何形状。

连杆 1 和连杆 3 的其中一端都通过铰链关节连接到地面，另一端通过铰链关节连接到连杆 2。在没有缺陷的情况下，所有四个铰链关节的旋转轴都垂直于机构平面，因此机构仅在该平面内运动。而本例中，连杆 2 和连杆 3 之间的关节上存在缺陷。这个关节的旋转轴与平面法向成 5° 角。这模拟了机构中的装配缺陷。

连杆 1 和 3 的长度为 0.12 m，连杆 2 的长度为 0.24 m。所有连杆的横截面都是直径为 5 mm 的圆形。连杆的材料数据如下：

- 弹性模量：70 GPa

- 泊松比: 0.33
- 密度: 3000 kg/m^3

左曲柄（连杆 1）的角速度指定为 1 rad/s 。重力的影响忽略不计。

结果与讨论

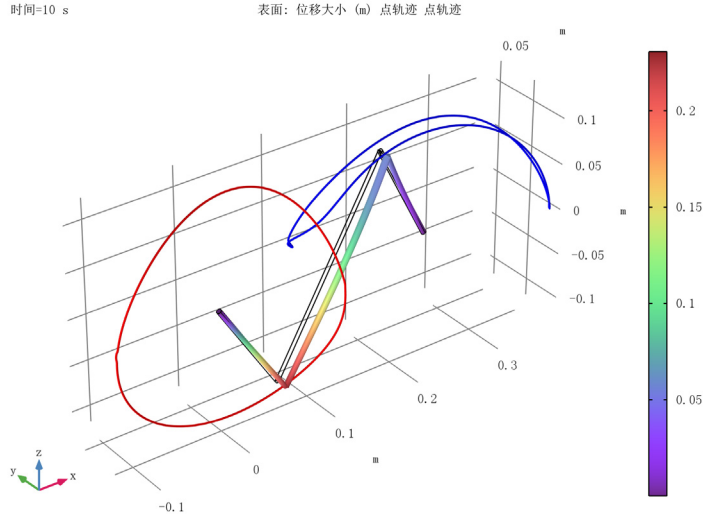


图 2: $t=10 \text{ sec}$ 时四杆机构的构型，还显示了 B 点和 C 点的轨迹。

我们将计算结果与参考资料 1 中的解进行了比较。比较表明，计算结果与参考资料中给出的结果非常吻合。

图 2 显示 $t=10 \text{ sec}$ 时四杆机构的构型。面外位移被缩放 20 倍，以获得更好的可视化效果。从图中还可以看出 B 点和 C 点的轨迹。

图 3 显示连杆 1 和连杆 2 之间关节上位移的 y 分量。如果关节没有缺陷，面外位移会消失。

图 4 显示连杆 2 和连杆 3 之间关节上位移的 y 分量。

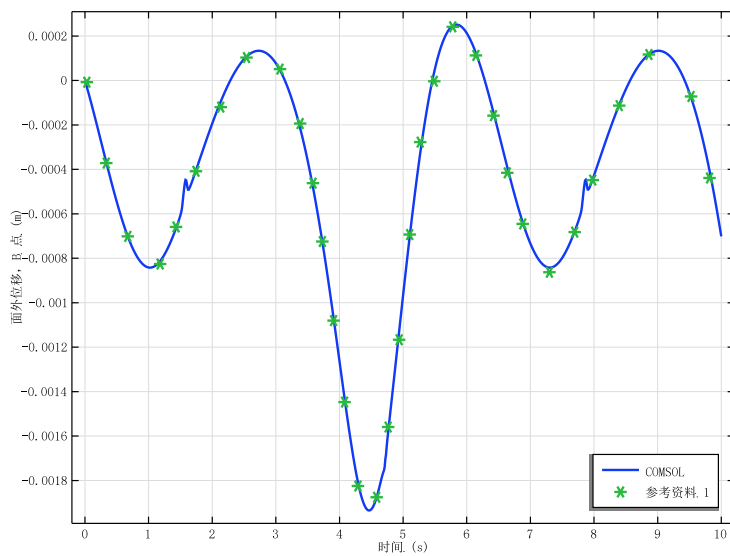


图3: B点的面外位移与参考资料1的比较。

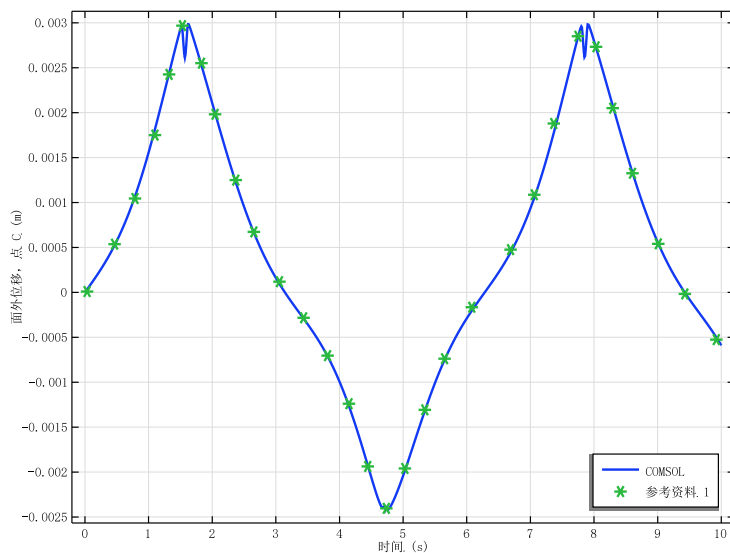


图4: C点的面外位移与参考资料1的比较。

COMSOL 软件功能实现说明

- 在本模型中，我们使用“线弹性材料”节点将连杆模拟为柔性零件，这是因为将连杆模拟为刚性会锁定装配。
- 通过将“源”选择为“固定”，“关节”的一侧可以是固定的。通过这种方式，您可以避免为“地面”创建额外的几何组件。
- 形函数阶次已增加到二次。“多体动力学”接口中的默认设置是对位移使用线性形函数。除非使用细化网格，否则使用线性形函数的这种仿真可能会产生过于僵硬的结构。

参考资料


1. J. Cuadrado, R. Gutiérrez, M.A. Naya, and P. Morer, “A Comparison in Terms of Accuracy and Efficiency between a MBS Dynamic Formulation with Stress Analysis and a Non-linear FEA Code”, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, vol. 51, pp. 1033–1052, 2001.

案例库路径: Multibody_Dynamics_Module/Verification_Examples/
crooked_four_bar_mechanism




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**结构力学 > 多体动力学 (mbd)**。
- 3 单击**添加**。
- 4 单击  **研究**。
- 5 在**选择研究**树中选择**一般研究 > 瞬态**。
- 6 单击  **完成**。

全局定义


参数 1

- 1 在**模型开发者**窗口的**全局定义**节点下，单击**参数 1**。
- 2 在**参数**的**设置**窗口中，定位到**参数**栏。
- 3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	值	描述
d	5[mm]	0.005 m	连杆直径
l1	0.12[m]	0.12 m	垂直连杆长度
l2	0.24[m]	0.24 m	水平连杆长度
theta	5[deg]	0.087266 rad	偏移角

几何 1

圆柱体 1 (cyl1)

- 1 在**几何**工具栏中单击  **圆柱体**。
- 2 在**圆柱体**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“d/2”。
- 4 在**高度**文本框中键入“l1”。

圆柱体 2 (cyl2)



- 1 右键单击**圆柱体 1 (cyl1)** 并选择**复制粘贴**。
- 2 在**圆柱体**的**设置**窗口中，定位到**位置**栏。
- 3 在 **x** 文本框中键入“l2”。

圆柱体 3 (cyl3)

- 1 在**模型开发者**窗口的**组件 1 (comp1)**>**几何 1**节点下，右键单击**圆柱体 1 (cyl1)**并选择**复制粘贴**。
- 2 在**圆柱体**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“l2”。
- 4 定位到**位置**栏。在 **z** 文本框中键入“l1”。
- 5 定位到**轴**栏。从**轴类型**列表中选择 **x 轴**。

形成联合体 (fin)

- 1 在**模型开发者**窗口的**组件 1 (comp1)**>**几何 1**节点下，单击**形成联合体 (fin)**。
- 2 在**形成联合体 / 装配**的**设置**窗口中，定位到**形成联合体 / 装配**栏。
- 3 从**动作**列表中选择**形成装配**。

- 4 在几何工具栏中单击  全部构建。
- 5 在图形工具栏中单击  缩放到窗口大小按钮。

材料

材料 1 (mat1)


- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) 节点下，右键单击材料并选择空材料。
- 2 在材料的设置窗口中，定位到材料属性明细栏。
- 3 在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
杨氏模量	E	7e10	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	0.33	1	杨氏模量和泊松比
密度	rho	3000	kg/m ³	基本


多体动力学 (MBD)

- 1 在模型开发器窗口的组件 1 (comp1) 节点下，单击多体动力学 (mbd)。
- 2 在多体动力学的设置窗口中，单击以展开离散化栏。
- 3 从位移场列表中选择二次拉格朗日单元。


连接件 1

- 1 在物理场工具栏中单击  边界，然后选择连接件。
- 2 选择“边界”3。


铰链关节 1

- 1 在物理场工具栏中单击  全局，然后选择铰链关节。
- 2 在铰链关节的设置窗口中，定位到连接件选择栏。
- 3 从源列表中选择固定。
- 4 从目标列表中选择连接件 1。
- 5 定位到关节轴栏。从列表中选择来自选定坐标系。
- 6 从要使用的轴列表中选择 2。

连接件 2

- 1 在物理场工具栏中单击  边界，然后选择连接件。
- 2 选择“边界”4。


连接件 3

- 1 在物理场工具栏中单击  边界，然后选择连接件。
- 2 选择“边界”7。

铰链关节 2

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)>多体动力学 (mbd)**节点下, 右键单击**铰链关节 1**并选择**复制粘贴**。
- 2 在**铰链关节**的**设置**窗口中, 定位到**连接件选择**栏。
- 3 从**源**列表中选择**连接件 2**。
- 4 从**目标**列表中选择**连接件 3**。

连接件 4

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **边界**, 然后选择**连接件**。
- 2 选择“边界”12。

连接件 5

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **边界**, 然后选择**连接件**。
- 2 选择“边界”16。

铰链关节 3

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)>多体动力学 (mbd)**节点下, 右键单击**铰链关节 2**并选择**复制粘贴**。
- 2 在**铰链关节**的**设置**窗口中, 定位到**连接件选择**栏。
- 3 从**源**列表中选择**连接件 4**。
- 4 从**目标**列表中选择**连接件 5**。
- 5 定位到**关节轴**栏。从列表中选择**指定方向**。
- 6 将 e_0 矢量指定为

$\sin(\theta)$	x
$\cos(\theta)$	y
0	z

连接件 6

- 1 在**物理场**工具栏中单击  **边界**, 然后选择**连接件**。
- 2 选择“边界”15。


铰链关节 4

- 1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)>多体动力学 (mbd)**节点下, 右键单击**铰链关节 1**并选择**复制粘贴**。
- 2 在**铰链关节**的**设置**窗口中, 定位到**连接件选择**栏。
- 3 从**目标**列表中选择**连接件 6**。

铰链关节 1

在**模型开发者**窗口中，单击**铰链关节 1**。



指定运动 1

- 1 在**物理场**工具栏中单击  属性，然后选择**指定运动**。
- 2 在**指定运动的设置**窗口中，定位到**指定旋转运动**栏。
- 3 从**指定穿越运动**列表中选择**角速度**。
- 4 在 ω_p 文本框中键入“-1”。

网格 1

由于几何由细长的组件组成，因此使用扫掠网格。


自由三角形网格 1

- 1 在**网格**工具栏中单击  边界，然后选择**自由三角形网格**。
- 2 在**图形**工具栏中单击  切换到默认视图按钮。
- 3 选择“边界”3、7和16。

大小

- 1 在**模型开发者**窗口中，单击**大小**。
- 2 在**大小**的**设置**窗口中，定位到**单元大小**栏。
- 3 从**预定义**列表中选择**细化**。

扫掠 1

在**网格**工具栏中单击  扫掠。

分布 1


- 1 右键单击**扫掠 1**并选择**分布**。
- 2 选择“域”1和3。
- 3 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。
- 4 在**单元数**文本框中键入“10”。

分布 2

- 1 在**模型开发者**窗口中，右键单击**扫掠 1**并选择**分布**。
- 2 选择“域”2。
- 3 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。
- 4 在**单元数**文本框中键入“20”。
- 5 在**模型开发者**窗口中，右键单击**网格 1**并选择**全部构建**。

研究 1

步骤 1: 瞬态

- 1 在模型开发器窗口的研究 1 节点下，单击步骤 1: 瞬态。
- 2 在瞬态的设置窗口中，定位到研究设置栏。
- 3 在输出时步文本框中键入 “range(0,0.01,10)”。
- 4 在主屏幕工具栏中单击  计算。

结果

位移 (mbd)

两个默认绘图显示四杆机构的位移和速度分布。按照说明在第一个绘图中添加 B 点和 C 点的轨迹，如图 2 所示。

- 1 在模型开发器窗口中展开位移 (mbd) 节点。

表面

将面外位移缩放 20 倍，以获得更好的可视化效果。


变形

- 1 在模型开发器窗口中展开结果 > 位移 (mbd) > 表面节点，然后单击变形。
- 2 在变形的设置窗口中，定位到表达式栏。
- 3 在 Y 分量文本框中键入 “20*v”。



位移 (mbd)

在模型开发器窗口的结果节点下，单击位移 (mbd)。



点轨迹 1

- 1 在位移 (mbd) 工具栏中单击  更多绘图，然后选择点轨迹。
- 2 在点轨迹的设置窗口中，定位到轨迹数据栏。
- 3 在 Y 表达式文本框中键入 “Y+20*v”。
- 4 选择 “点” 11。
- 5 定位到着色和样式栏。找到线样式子栏。从类型列表中选择管。

点轨迹 2


- 1 右键单击点轨迹 1 并选择复制粘贴。
- 2 在点轨迹的设置窗口中，定位到选择栏。
- 3 单击  清除选择。
- 4 选择 “点” 15。
- 5 定位到着色和样式栏。找到线样式子栏。从颜色列表中选择蓝色。
- 6 在图形工具栏中单击  切换到默认视图按钮。

位移 (mbd)


- 1 在图形工具栏中单击  缩放到窗口大小按钮。
- 2 在模型开发器窗口中，单击位移 (mbd)。
- 3 在位移 (mbd) 工具栏中单击  绘制。

接下来导入从中获得的数据进行比较。

vB


- 1 在结果工具栏中单击  表格。
- 2 在表格的设置窗口中，在标签文本框中键入“vB”。
- 3 定位到数据栏。单击导入。
- 4 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 crooked_four_bar_mechanism_vB.txt。

vC

- 1 在结果工具栏中单击  表格。
- 2 在表格的设置窗口中，在标签文本框中键入“vC”。
- 3 定位到数据栏。单击导入。
- 4 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 crooked_four_bar_mechanism_vC.txt。

按照以下操作说明绘制 B 点的面外位移，如图 3 所示。

y 位移: B 点

- 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，在标签文本框中键入“y 位移: B 点”。

点结果图 1

- 1 右键单击 y 位移: B 点并选择点结果图。
- 2 选择“点”4。
- 3 在点结果图的设置窗口中，定位到 y 轴数据栏。
- 4 在表达式文本框中键入“v”。
- 5 单击以展开着色和样式栏。从宽度列表中选择 2。
- 6 单击以展开图例栏。选中显示图例复选框。
- 7 从图例列表中选择手动。

8 在表中输入以下设置：


图例
COMSOL

表图 1

- 1 在**模型开发器**窗口中，右键单击 **y 位移：B 点** 并选择**表图**。
- 2 在**表图**的**设置**窗口中，定位到**着色和样式**栏。
- 3 找到**线标记**子栏。从**标记**列表中选择**星号**。
- 4 找到**线样式**子栏。从**线**列表中选择**无**。
- 5 单击以展开**图例**栏。选中**显示图例**复选框。
- 6 从**图例**列表中选择**手动**。
- 7 在表中输入以下设置：

图例
参考资料 1

y 位移：B 点


- 1 在**模型开发器**窗口中，单击 **y 位移：B 点**。
- 2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**图例**栏。
- 3 从**位置**列表中选择**右下角**。
- 4 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。
- 5 定位到**绘图设置**栏。
- 6 选中 **x 轴标签**复选框。在关联文本框中键入“时间 (s)”。
- 7 选中 **y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入“面外位移，B 点 (m)”。
- 8 在 **y 位移：B 点**工具栏中单击  **绘制**。

按照以下操作说明绘制 C 点的面外位移，如图 4 所示。

y 位移：C 点

- 1 右键单击 **y 位移：B 点** 并选择**复制粘贴**。
- 2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“y 位移：C 点”。

点结果图 1


- 1 在**模型开发器**窗口中展开 **y 位移：C 点**节点，然后单击**点结果图 1**。
- 2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。
- 3 选择  **激活选择**切换按钮。

4 选择“点”13。

表图 1



- 1 在**模型开发器**窗口中，单击**表图 1**。
- 2 在**表图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。
- 3 从**表格**列表中选择 **vC**。

y 位移: C 点

- 1 在**模型开发器**窗口中，单击 **y 位移: C 点**。
- 2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**绘图**设置栏。
- 3 在 **y 轴**标签文本框中键入“面外位移, 点 C (m)”。
- 4 在 **y 位移: C 点**工具栏中单击  **绘制**。

最后，按照以下操作说明生成四杆机构的动画：

动画 1

- 1 在**结果**工具栏中单击  **动画**，然后选择**播放器**。
默认场景包含要设置动画的位移，因此无需更改该设置。
- 2 在**动画**的**设置**窗口中，定位到**帧**栏。
- 3 在**帧数**文本框中键入“100”。
- 4 在**图形**工具栏中单击  **播放**按钮。