

高尔夫球的冲击分析

本模型基于《COMSOL 软件许可协议》 6.3 版本授权。
所有商标均为其各自所有者的财产。请参见 www.comsol.com/trademarks。

简介

高尔夫球击球的结果在很大程度上受高尔夫球特性的影响，包括其空气动力学和力学属性。例如，后者决定挥杆过程中能量从杆头传递到球的效率。能量的传递在很大程度上取决于球芯材料的刚度，或者用高尔夫术语来说，是球的 “压缩”。击球过程中能量传递的程度对球能飞多远起着关键作用。“倒旋”是高尔夫击球的另一个关键方面，受球的力学属性影响。高旋转率会增加升力，延长击球的运球距离。此外，增加倒旋使球在落地时更快地停止。外壳和球芯材料的刚度对摩擦和旋转效果起着重要作用。当球与球杆面接触时，外壳较薄、球芯较软的球变形幅度较大，从而产生更大的摩擦力和更高的旋转速率。

本例研究球杆对高尔夫球的机械冲击。为了稳定这一动态事件，两部分之间的接触采用黏性罚函数公式来建模。为了正确地对大幅度变形进行建模，我们使用超弹性材料模型定义高尔夫球。此外，球芯材料是黏弹性的，这会导致冲击传递的弹性能量耗散。将结果与典型的高尔夫指标 （如球速和旋转速率）进行比较。

模型定义

本模型研究挥杆过程中动量和能量如何从球杆传递到高尔夫球。仿真的重点是两个物体之间的碰撞，只研究 2 ms 的时间段。

图 1 显示球杆和高尔夫球的几何形状。球杆的尺寸表示典型的 7 号铁杆，杆面倾角等于 34°。球杆头约 9 cm 宽，趾部 6 cm 高，靠近杆身处 3.5 cm 高。为了简化几何形状，图中仅包含部分杆身。假设球杆在击球时的*动态杆面倾角* 为 28°，这是击球时球杆面与垂直面的角度。

根据高尔夫球规则（参考资料 1），球直径为 42.67 mm。采用三件式设计：一个直径为 34.67 mm 的内芯，一个 3 mm 厚的外芯（覆盖层），以及一个 1 mm 厚的外壳。外表面还覆盖有 362 个凹坑。

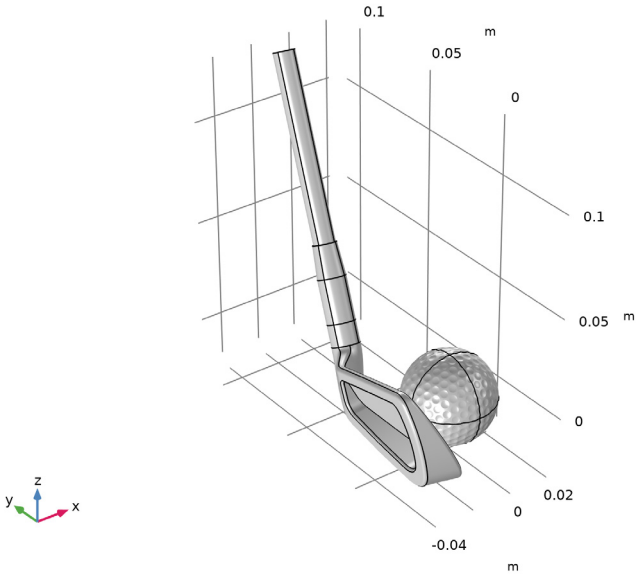


图 1：模型几何。

材料模型和属性

假设高尔夫球杆由钢制成，密度为 7850 kg/m^3，杨氏模量为 200 GPa，泊松比为 0.3。

根据参考资料 1，高尔夫球必须完全由弹性材料构成，也就是低刚度的黏弹性材料。因此，球的所有部分都使用 Neo-Hookean 超弹性材料模型来描述。假设外壳是可压缩的，而内芯和外芯被视为几乎不可压缩，并使用混合公式进行建模。 Hartmann–Neff 体积应变能密度与指定的体积模量 1 GPa 一起使用，以减少体积变形。此外，芯的两个部分被视为黏弹性材料，因此也包含一个具有三个分支的大应变广义麦克斯韦模型。

高尔夫球所用材料的力学属性是专有的，在文献中很难找到。因此，表格 1 中总结的材料属性只是实际估计值。例如，根据参考资料 1，密度的取值使得球的总质量等于 45.93 g。其他材料属性已调整，以提供真实的结果。

表格 1：高尔夫球的材料属性。

属性	符号	单位	外壳	覆盖层	内芯
密度	ρ	kg/m^3	1145	1145	1145
Lamé 参数	λ	MPa	1500	N/A	N/A

表格 1：高尔夫球的材料属性。

属性	符号	单位	外壳	覆盖层	内芯
	μ	MPa	250	6	12
能量因子	β_{v1}	1	N/A	0.26	0.26
	β_{v2}	1	N/A	0.19	0.19
	β_{v3}	1	N/A	0.22	0.22
弛豫时间	τ_{v1}	μs	N/A	10	10
	τ_{v2}	μs	N/A	100	100
	τ_{v3}	μs	N/A	1000	1000

约束和接触条件

高尔夫球杆以相当于 90 mph 的速度朝稍微向下的方向击球，该方向由与 *xy* 平面成 -4.3° 的攻角定义。在整个仿真过程中，杆身的端部被限制为该速度。这些速度和攻角都是职业男性高尔夫球员使用 7 号铁杆时的粗略估计值。

我们使用接触条件对球杆和高尔夫球之间的相互作用进行建模。动态效应非常重要，由于这是撞击事件的瞬态仿真，在接触相互作用过程中，线性动量和能量必须保持一致。为了确保这一点并稳定接触条件，我们为压力接触添加黏性罚函数公式。摩擦力对于正确捕捉球杆和球之间的相互作用也很重要；这是因为，正是摩擦力的作用导致高尔夫球在被球杆头击中后旋转。因此添加摩擦系数等于 0.15 的库仑摩擦模型。

结果与讨论

表格 2 给出高尔夫运动中用来衡量球员表现和装备性能的一些常用指标。这里，球杆速度和攻角是仿真的输入数据，其余指标由 COMSOL Multiphysics 模型计算。*起发角*是击球后球相对于地面的角度，*击球效率*是球速除以球杆速度。给定输入参数，所有计算出的指标都是真实的，接近职业男性高尔夫球员的平均典型值。

表格 2：球杆和高尔夫球的指标。

球杆速度 (mph)	攻角 (deg)	起发角 (deg)	球速 (mph)	击球效率	旋转速率 (rpm)
90	-4.3	18.7	116.1	1.29	6823

图 2 显示击球之前、期间和之后的四个仿真快照。我们可以清楚地看到高尔夫球被杆头击中后的大幅度变形，这可以增大球与杆面之间的接触区域，这在图 3 的截面图像中更为明显，其中还显示球内部的应变分布。图 3 显示最小主应变，其值在球的大部分区域都是 -20% 左右。

为了详细研究问题的运动学特性，在仿真过程中观察球杆和球的速度非常有趣。图 4 显示击球过程中的速度大小以及动量如何从杆头传递到球上。由于杆身的灵活性，即使杆身的速度被指定为一个常数值，杆头的速度在击球期间和之后也会略有降低。

图 5 显示仿真过程中高尔夫球总弹性和动能的变化。击球的持续时间在弹性和动能含量上都是一个明显的峰值。一个有趣的观察结果是，球芯的黏弹性属性如何有效地抑制击球后的弹性能。相比之下，球离开球杆面后，动能会立即达到一个常数值。



图 2：仿真过程中球杆和高尔夫球的快照。从上到下，计时时间分别为 0 ms、0.15 ms、0.30 ms 和 0.45 ms。



图 3：0.3 ms 时高尔夫球的变形和球内部的第三主 （压缩）应变的分布。

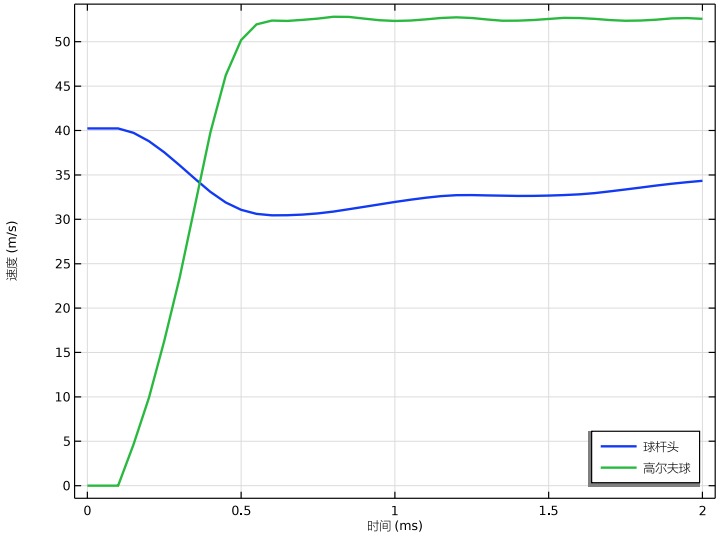


图 4：球杆头和高尔夫球的平均速度。

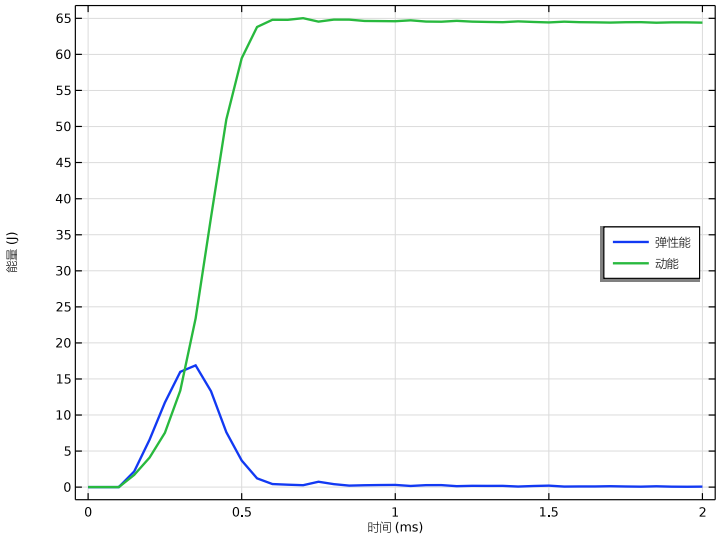


图 5：高尔夫球的总弹性和动能。

COMSOL 软件功能实现说明

自动时步控制使用的误差估计将迫使时步足够小，以求解固体中的波传播问题，这在本分析中并不重要。自动时步控制通常会导致不必要的小时步和较长的计算时间。因此，当关注点位于接触现象的运动学特征范围内时，使用手动时步控制通常是一种不错的做法。

高尔夫球的旋转速率通过在模型中添加**平均旋转**节点来确定，对于任意大速率的旋转，该节点可以计算最小二乘意义上一组点的平均旋转速率。

参考资料

1. *The Equipment Rules,* 1st edition, The R&A and USGA, 2019.

案例库路径：`Nonlinear_Structural_Materials_Module/Viscoelasticity/golf_ball_impact`

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** > **固体力学 (solid)**。

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**模型开发器**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
loft	34[deg]	0.59341 rad	杆头倾角
attackAngle	-4.3[deg]	-0.075049 rad	攻角
dynLoft	28[deg]	0.48869 rad	动态杆面倾角
vel	90[mph]	40.234 m/s	杆头速度
velx	cos(attackAngle)*vel	40.12 m/s	杆头速度， x 分量
velz	sin(attackAngle)*vel	-3.0167 m/s	杆头速度， z 分量

几 何 1

导入 1 (imp1)

1 在**几何**工具栏中单击 **导入**。

2 在**导入**的**设置**窗口中，定位到**源**栏。

3 单击 **浏览**。

4 浏览到该 App 的“案例库”文件夹，然后双击文件 golf_ball_impact.mphbin。

5 单击 **导入**。

击球时将高尔夫球杆旋转到正确的动态杆面倾角。

旋转 1 (rot1)

1 在**几何**工具栏中单击 **变换**，然后选择**旋转**。

2 选择 “对象” **imp1(1)**。

3 在**旋转**的**设置**窗口中，定位到**旋转**栏。

4 从**轴类型**列表中选择 **y 轴**。

5 在**角度**文本框中键入 “`loft-dynLoft`”。

形成联合体 (fin)

1 在**模型开发器**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。

接下来创建用于物理场和绘图创建的选择。

定 义

球杆头

1 在**模型开发器**窗口中展开**组件 1 (comp1)** > **定义**节点。

2 右键单击**定义**并选择**选择** > **显式**。

3 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “球杆头”。

4 选择 “域” 1 和 2。

球杆杆身

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “球杆杆身”。

3 选择 “域” 5、 6、 8–12 和 14。

球杆头和杆身，边界

1 在**定义**工具栏中单击 **相邻**。

2 在**相邻**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “球杆头和杆身，边界”。

3 定位到**输入实体**栏。在**输入选择**下，单击 **添加**。

4 在**添加**对话框中，从**输入选择**列表中选择**球杆头**和**球杆杆身**。

5 单击**确定**。

小胶套

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “小胶套”。

3 选择 “域” 3、 4、 7 和 13。

小胶套，边界

1 在**定义**工具栏中单击 **相邻**。

2 在**相邻**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “小胶套，边界”。

3 定位到**输入实体**栏。在**输入选择**下，单击 **添加**。

4 在**添加**对话框中，从**输入选择**列表中选择**小胶套**。

5 单击**确定**。

球杆

1 在**定义**工具栏中单击 **并集**。

2 在**并集**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “球杆”。

3 定位到**输入实体**栏。在**要添加的选择**下，单击 **添加**。

4 在**添加**对话框中，从**要添加的选择**列表中选择**球杆头**、**球杆杆身**和**小胶套**。

5 单击**确定**。

高尔夫球

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “高尔夫球”。

3 在**图形**工具栏中单击 **选择框**按钮。

4 选择 “域” 15–38。

外壳

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “外壳”。

3 选择 “域” 15–18、 27、 28、 33 和 38。

覆盖层

1 在**定义**工具栏中单击 **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “覆盖层”。

3 选择 “域” 19–22、 29、 30、 34 和 37。

内芯

1 在**定义**工具栏中单击 **差集**。

2 在**差集**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “内芯”。

3 定位到**输入实体**栏。在**要添加的选择**下，单击 ＋ **添加**。

4 在**添加**对话框中，从**要添加的选择**列表中选择**高尔夫球**。

5 单击**确定**。

6 在**差集**的**设置**窗口中，定位到**输入实体**栏。

7 在**要减去的选择**下，单击 ＋ **添加**。

8 在**添加**对话框中，从**要减去的选择**列表中选择**外壳**和**覆盖层**。

9 单击**确定**。

球芯

1 在**定义**工具栏中单击  **并集**。

2 在**并集**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “球芯”。

3 定位到**输入实体**栏。在**要添加的选择**下，单击 ＋ **添加**。

4 在**添加**对话框中，从**要添加的选择**列表中选择**覆盖层**和**内芯**。

5 单击**确定**。

球杆面

1 在**定义**工具栏中单击  **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，定位到**输入实体**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 在**标签**文本框中键入 “球杆面”。

5 选择 “边界” 5。

果岭

1 在**定义**工具栏中单击  **显式**。

2 在**显式**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “果岭”。

3 定位到**输入实体**栏。从**几何实体层**列表中选择**边界**。

4 选择“边界”8–32、34–48、50–53、55、59–63、70–73、75、86–89、98、105–108 和 110。

亮钢

1 在**定义**工具栏中单击  **差集**。

2 在**差集**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “亮钢”。

3 定位到**几何实体层**栏。从**层**列表中选择**边界**。

4 定位到**输入实体**栏。在**要添加的选择**下，单击 ＋ **添加**。

5 在**添加**对话框中，从**要添加的选择**列表中选择**球杆头和杆身，边界**。

6 单击**确定**。

7 在**差集**的**设置**窗口中，定位到**输入实体**栏。

8 在**要减去的选择**下，单击 **添加**。

9 在**添加**对话框中，从**要减去的选择**列表中选择**球杆面**和**果岭**。

10 单击**确定**。

接触对 1 (p1)

1 在**定义**工具栏中单击 **对**，然后选择**接触对**。

2 在**对**的**设置**窗口中，定位到**源边界**栏。

3 从**选择**列表中选择**球杆面**。

4 定位到**目标边界**栏。选择 **激活选择**切换按钮。

5 选择 “边界” 136、 137、 139 和 141。

积分 1 (intop1)

1 在**定义**工具栏中单击 **非局部耦合**，然后选择**积分**。

2 在**积分**的**设置**窗口中，定位到**源选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**高尔夫球**。

4 定位到**高级**栏。从**坐标系**列表中选择**材料　(X, Y, Z)**。

平均值 1 (aveop1)

1 在**定义**工具栏中单击 **非局部耦合**，然后选择**平均值**。

2 在**平均值**的**设置**窗口中，定位到**源选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**球杆头**。

4 定位到**高级**栏。从**坐标系**列表中选择**材料　(X, Y, Z)**。

平均值 2 (aveop2)

1 在**定义**工具栏中单击 **非局部耦合**，然后选择**平均值**。

2 在**平均值**的**设置**窗口中，定位到**源选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**高尔夫球**。

4 定位到**高级**栏。从**坐标系**列表中选择**材料　(X, Y, Z)**。

固体力学 (SOLID)

对高尔夫球使用线性位移场和减缩积分方案。

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**固体力学 (solid)**。

2 在**固体力学**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**线性**。

超弹性材料 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **域**，然后选择**超弹性材料**。

2 在**超弹性材料**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**外壳**。

4 定位到**正交设置**栏。选中**减缩积分**复选框。

超弹性材料 2

1 在**物理场**工具栏中单击 **域**，然后选择**超弹性材料**。

2 在**超弹性材料**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**球芯**。

4 定位到**超弹性材料**栏。从**可压缩性**列表中选择**几乎不可压缩**。

5 从**体积应变能**列表中选择 **Hartmann-Neff**。

6 在 κ 文本框中键入 “1[GPa]”。

7 定位到**正交设置**栏。选中**减缩积分**复选框。

黏弹性 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **属性**，然后选择**黏弹性**。

2 在**黏弹性**的**设置**窗口中，定位到**黏弹性模型**栏。

3 单击 **添加**。

4 单击 **添加**。

5 在表中输入以下设置：

分支	能量因子 (1)	弛豫时间 (s)
1	0.26	1e-5
2	0.19	1e-4
3	0.22	1e-3

接触 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)** 节点下，单击**接触 1**。

2 在**接触**的**设置**窗口中，定位到**接触方法**栏。

3 从列表中选择**罚函数，动力学**。

4 定位到**接触压力罚因子**栏。从**罚因子控制**列表中选择**仅黏性**。

5 在 τ_n 文本框中键入 “0.1[ms]”。

摩擦 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **属性**，然后选择**摩擦**。

2 在**摩擦**的**设置**窗口中，定位到**摩擦参数**栏。

3 在 μ 文本框中键入 “`0.15`”。

初始值 2

1 在**物理场**工具栏中单击 **域**，然后选择**初始值**。

2 在**初始值**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**球杆**。

4 将 d**u**/dt 矢量指定为

5 在表中输入以下设置：

`velx`	X
`0`	Y
`velz`	Z

指定位移 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**指定位移**。

2 选择 “边界” 131、 132、 134 和 135。

3 在**指定位移**的**设置**窗口中，定位到**指定位移**栏。

4 从 **x 方向的位移**列表中选择**指定**。

5 从 **y 方向的位移**列表中选择**指定**。

6 从 **z 方向的位移**列表中选择**指定**。

7 在 u_{0x} 文本框中键入 “`velx*t`”。

8 在 u_{0z} 文本框中键入 “`velz*t`”。

添加一个**平均旋转**节点来计算典型的高尔夫指标。

平均旋转 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **全局**，然后选择**平均旋转**。

2 选择 “点” 158、 161、 164、 166、 169 和 172。

3 在**平均旋转**的**设置**窗口中，定位到**旋转中心**栏。

4 从列表中选择**所选实体的质心**。

5 从**实体层**列表中选择**点**。

6 定位到**旋转模型**栏。从列表中选择**有限旋转，对称分离**。

旋转中心：点 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**旋转中心：点 1**。

2 选择 “点” 165。

材料

球杆头

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，在**标签**文本框中键入 “球杆头”。

3 定位到**几何实体选择**栏。从**选择**列表中选择**球杆**。

4 定位到**材料明细**栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
杨氏模量	E	200e9	Pa	杨氏模量和泊松比
泊松比	nu	0.3	1	杨氏模量和泊松比
密度	rho	7850	kg/m³	基本

设置用于绘图创建的材料外观数据。

5 单击以展开**外观**栏。从**材料类型**列表中选择**钢**。

外壳

1 右键单击**材料**并选择**空材料**。

2 在**材料**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “外壳”。

3 定位到**几何实体选择**栏。从**选择**列表中选择**外壳**。

4 定位到**材料明细**栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
Lamé 参数 λ	lambLame	1.5e9	N/m²	Lamé 参数
Lamé 参数 μ	muLame	0.2e9	N/m²	Lamé 参数
密度	rho	1145	kg/m³	基本

覆盖层

1 右键单击**材料**并选择**空材料**。

2 在**材料**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “覆盖层”。

3 定位到**几何实体选择**栏。从**选择**列表中选择**覆盖层**。

4 定位到**材料明细**栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
Lamé 参数 μ	muLame	6e6	N/m²	Lamé 参数
密度	rho	1145	kg/m³	基本

5 单击以展开**外观**栏。从**颜色**列表中选择**蓝色**。

内芯

1 右键单击**材料**并选择**空材料**。

2 在**材料**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “内芯”。

3 定位到**几何实体选择**栏。从**选择**列表中选择**内芯**。

4 定位到**材料明细**栏。在表中输入以下设置：

属性	变量	值	单位	属性组
Lamé 参数 μ	muLame	12e6	N/m²	Lamé 参数
密度	rho	1145	kg/m³	基本

5 单击以展开**外观**栏。从**颜色**列表中选择**洋红色**。

网格 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** 节点下，单击**网格 1**。

2 在**网格**的**设置**窗口中，定位到**物理场控制网格**栏。

3 在表格中，清除**几何分析，细节大小**的**使用**复选框。

4 定位到**序列类型**栏。从列表中选择**用户控制网格**。

大小

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **网格 1** 节点下，单击**大小**。

2 在**大小**的**设置**窗口中，定位到**单元大小**栏。

3 单击**定制**按钮。

4 定位到**单元大小参数**栏。在**最大单元大小**文本框中键入 “0.01”。

5 在**最小单元大小**文本框中键入 “0.001”。

6 在**最大单元增长率**文本框中键入 “1.4”。

7 在**曲率因子**文本框中键入 “0.2”。

8 在**狭窄区域分辨率**文本框中键入 “0.8”。

映射 1

1 在**网格**工具栏中单击 **更多生成器**，然后选择**映射**。

2 选择 “边界” 84、 85、 109、 128、 131、 132、 134 和 135。

分布 1

1 右键单击**映射 1** 并选择**分布**。

2 选择 “边” 168、 169、 203、 240、 244、 245、 254 和 258。

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 “3”。

扫掠 1

1 在**网格**工具栏中单击 **扫掠**。

2 在**扫掠**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**域**。

4 选择 “域” 3–14。

自由四边形网格 1

1 在**网格**工具栏中单击 **更多生成器**，然后选择**自由四边形网格**。

2 选择 “边界” 83。

扫掠 2

1 在**网格**工具栏中单击 **扫掠**。

2 在**扫掠**的**设置**窗口中，定位到**域选择**栏。

3 从**几何实体层**列表中选择**域**。

4 选择 “域” 2。

自由四面体网格 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**自由四面体网格 1**。

2 将该节点拖放到**扫掠 2** 节点下方。

3 在**自由四面体网格**的**设置**窗口中，单击 **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 “2e-3”。

修改瞬态求解器以使用手动时步控制。

解 1 (sol1)

1 在**研究**工具栏中单击 **显示默认求解器**。

2 在**模型开发器**窗口中展开**解 1 (sol1)** 节点，然后单击**瞬态求解器 1**。

3 在**瞬态求解器**的**设置**窗口中，定位到**常规**栏。

4 从**要存储的时步**列表中选择**求解器采用的步长**。

5 在**每 N 步存储一次**文本框中键入 “2”。

6 单击以展开**时间步进**栏。从**求解器采用的步长**列表中选择**手动**。

7 在**时步**文本框中键入 “2.5e-5”。

接下来增加允许的非线性迭代次数，并使用更严格的容差。

8 在**模型开发器**窗口中展开**研究 1** > **求解器配置** > **解 1 (sol1)** > **瞬态求解器 1**节点，然后单击**全耦合 1**。

9 在**全耦合**的**设置**窗口中，单击以展开**方法和终止**栏。

10 在**最大迭代次数**文本框中键入 “25”。

11 在**容差因子**文本框中键入 “0.1”。

生成数据集和默认绘图。

12 在**研究**工具栏中单击 **获取初始值**。

结果

应变 (solid)

1 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “应变 (solid)”。

2 单击以展开**选择**栏。从**几何实体层**列表中选择**域**。

3 选择 “域” 17、 18、 21、 22、 25、 26 和 33–38。

体 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**应变 (solid)** 节点，然后单击**体 1**。

2 在**体**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “solid.ep3”。

4 定位到**着色和样式**栏。从**颜色表**列表中选择 **RainbowLight**。

5 从**颜色表转换**列表中选择**反转**。

6 单击以展开**质量**栏。从**平滑处理**列表中选择**所有位置**。

7 从**平滑阈值**列表中选择**无**。

体 2

1 右键单击**结果** > **应变 (solid)** > **体 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**体**的**设置**窗口中，单击以展开**标题**栏。

3 从**标题类型**列表中选择**无**。

材料外观 1

右键单击**体 2** 并选择**材料外观**。

研究 1

步骤 1：瞬态

1 在**瞬态**的**设置**窗口中，单击以展开**求解时显示结果**栏。

2 选中**绘制**复选框。

3 从**更新基于**列表中选择**求解器采用的时步**。

4 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

创建材料渲染图并制作动画。

结果

材料渲染

1 在**结果**工具栏中单击 **三维绘图组**。

2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “材料渲染”。

3 定位到**绘图设置**栏。清除**绘制数据集的边**复选框。

高尔夫球

1 右键单击**材料渲染**并选择**表面**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “高尔夫球”。

3 定位到**表达式**栏。在**表达式**文本框中键入 “1”。

4 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

变形 1

1 右键单击**高尔夫球**并选择**变形**。

2 在**变形**的**设置**窗口中，定位到**比例因子**栏。

3 选中**比例因子**复选框。在关联文本框中键入 “1”。

选择 1

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**高尔夫球**并选择**选择**。

2 选择 “边界” 136、 137、 161 和 163。

图像 1

1 右键单击**高尔夫球**并选择**图像**。

2 在**图像**的**设置**窗口中，定位到**文件**栏。

3 单击 **浏览**。

4 浏览到该 App 的 “案例库” 文件夹，然后双击文件 `golf_ball_impact_logo.png`。

5 定位到**映射**栏。从**映射**列表中选择**平面**。

6 从**平面类型**列表中选择 **xz 平面**。

7 找到**大小**子栏。在**宽度**文本框中键入 “0.03”。

8 找到**锚点**子栏。在 **X** 文本框中键入 “-0.015”。

9 在 **Y** 文本框中键入 “-0.03”。

10 在 **Z** 文本框中键入 “-0.002”。

11 找到**平铺**子栏。从**外推**列表中选择**固定到边**。

材料外观 1

1 右键单击**高尔夫球**并选择**材料外观**。

2 在**材料外观**的**设置**窗口中，定位到**外观**栏。

3 从**材料**列表中选择**外壳 (mat2)**。

4 定位到**颜色**栏。选中**使用图像颜色**复选框。

高尔夫球 1

1 右键单击**高尔夫球**并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，单击以展开**继承样式**栏。

3 从**绘图**列表中选择**高尔夫球**。

选择 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**高尔夫球 1** 节点，然后单击**选择 1**。

2 在**选择**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 “边界” 139、 141、 177 和 193。

图像 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**图像 1**。

2 在**图像**的**设置**窗口中，定位到**映射**栏。

3 从**平面类型**列表中选择 **zx 平面**。

4 找到**锚点**子栏。在 **Y** 文本框中键入 “0.03”。

5 在 **X** 文本框中键入 “0.015”。

6 在**材料渲染**工具栏中单击 **绘制**。

球杆头

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**高尔夫球**并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “球杆头”。

3 定位到**继承样式**栏。从**绘图**列表中选择**高尔夫球**。

选择 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**球杆头**节点，然后单击**选择 1**。

2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**亮钢**。

图像 1

在**模型开发器**窗口中，右键单击**图像 1** 并选择**删除**。

材料外观 1

1 在**材料外观**的**设置**窗口中，定位到**外观**栏。

2 从**材料**列表中选择**球杆头 (mat1)**。

3 定位到**颜色**栏。清除**使用绘图颜色**复选框。

球杆面

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**球杆头**并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “球杆面”。

选择 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**球杆面**节点，然后单击**选择 1**。

2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**球杆面**。

材料外观 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**材料外观 1**。

2 在**材料外观**的**设置**窗口中，定位到**外观**栏。

3 从**外观**列表中选择**定制**。

4 从**材料类型**列表中选择**钢 （划痕）**。

果岭

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**球杆面**并选择**复制粘贴**。

2 在**模型开发器**窗口中，单击**球杆面 1**。

3 在**表面**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “果岭”。

材料外观 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**材料外观 1**。

2 在**材料外观**的**设置**窗口中，定位到**外观**栏。

3 从**材料类型**列表中选择**塑料**。

4 从**颜色**列表中选择**黑色**。

选择 1

1 在**模型开发器**窗口中，单击**选择 1**。

2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**果岭**。

小胶套

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**果岭**并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入“小胶套”。

选择 1

1 在**模型开发器**窗口中展开**小胶套**节点，然后单击**选择 1**。

2 在**选择**的**设置**窗口中，定位到**选择**栏。

3 从**选择**列表中选择**小胶套，边界**。

4 在**图形**窗口工具栏中，单击 **场景光**旁边的 ▾ ，然后选择**环境光遮蔽**。

5 在**图形**窗口工具栏中，单击 **场景光**旁边的 ▾ ，然后选择**地板阴影**。

6 在**图形**窗口工具栏中，单击 **场景光**旁边的 ▾ ，然后选择**室外环境**。

动画 1

1 在**材料渲染**工具栏中单击 **动画**，然后选择**播放器**。

2 在**动画**的**设置**窗口中，定位到**帧**栏。

3 从**帧选择**列表中选择**全部**。

能量

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“能量”。

3 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

4 定位到**绘图设置**栏。

5 选中 **y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入“能量 (J)”。

6 定位到**图例**栏。从**位置**列表中选择**右居中**。

全局 1

1 右键单击**能量**并选择**全局**。

2 在**全局**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
intop1(solid.Ws)		弹性能
intop1(solid.Wk)		动能

4 定位到 **x 轴数据**栏。从**单位**列表中选择 **ms**。

5 单击以展开**着色和样式**栏。从**宽度**列表中选择 **2**。

6 在**能量**工具栏中单击 **绘制**。

速度

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 “速度”。

3 定位到**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

4 定位到**绘图设置**栏。

5 选中 **y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “速度 (m/s)”。

6 定位到**图例**栏。从**位置**列表中选择**右下角**。

全局 1

1 右键单击**速度**并选择**全局**。

2 在**全局**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
aveop1(solid.vel)	m/s	球杆头
aveop2(solid.vel)	m/s	高尔夫球

4 定位到 **x 轴数据**栏。从**单位**列表中选择 **ms**。

5 定位到**着色和样式**栏。从**宽度**列表中选择 **2**。

6 在**速度**工具栏中单击 **绘制**。

计算典型的高尔夫指标。

高尔夫指标

1 在**结果**工具栏中单击 **计算组**。

2 在**计算组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “高尔夫指标”。

3 定位到**数据**栏。从**时间选择**列表中选择**最后一个**。

点计算 1

1 右键单击**高尔夫指标**并选择**点计算**。

2 选择 “点” 165。

3 在**点计算**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。

4 在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
atan(z/x)	deg	起发角

全局计算 1

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**高尔夫指标**并选择**全局计算**。

2 在**全局计算**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。

3 在表中输入以下设置：

表达式	单位	描述
solid.avgr1.disp_t	mph	球速
solid.avgr1.disp_t/vel	1	击球效率
solid.avgr1.totrot_t/(2*pi[rad])	rpm	旋转速率

4 在**高尔夫指标**工具栏中单击 **计算**。

最后，设置用于模型缩略图的绘图。

应变 (solid)

1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，单击**应变 (solid)**。

2 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**时间 (s)** 列表中选择 **3E-4**。

4 定位到**绘图设置**栏。从**视图**列表中选择**新视图**。

5 在**应变 (solid)** 工具栏中单击 **绘制**。

6 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**定制**。

7 找到**类型和数据**子栏。清除**类型**复选框。

8 清除**单位**复选框。

9 清除**描述**复选框。

10 在**应变 (solid)** 工具栏中单击 **绘制**。