

第 1 章

绪 论

基于 NX MCD 的机电概念设计在工业生产中已经得到了广泛的应用，为缩短产品设计周期，提高产品的设计效率提供了有利帮助。本书以 NX MCD+TIA Portal+PLCSIM Advanced 作为软件系统，通过案例教学方式，将基于虚拟仿真的机电概念设计技术引入实践教学环节。

1.1 内容组成

本书共分为 5 个章节。第 1 章为绪论，概述本书包含的内容。

第 2 章为机电概念设计，包含机电一体化基本概念介绍和机电概念设计流程与功能介绍，内容还包含机电对象定义，运动副、执行器和传感器的定义，信号适配器的定义以及仿真序列等。通过本章学习，可以实现机电一体化模型在 MCD 中的对象定义以及仿真运动。

第 3 章为 PLC 编程基础，介绍 PLC 的相关知识，以及 TIA Portal 软件的使用。从 PLC 的起源、工作原理等开始，以西门子 S7-1500 PLC 为例，介绍 PLC 控制系统的硬件组成和梯形图编程语言，并结合 TIA Portal V17，介绍 PLC 编程的软件操作。通过本章学习，可以实现 PLC 控制系统的设计与编程。

第 4 章为基于 PLCSIM Advanced 的联合仿真，介绍虚拟 PLC 创建以及仿真应用。首先，结合 PLCSIM Advanced V3.0，介绍虚拟 PLC 实例的创建与管理；其次，通过 TIA Portal V17 与虚拟 PLC 的联合仿真案例，介绍 PLC 程序的虚拟仿真调试；最后，通过 NX MCD 与虚拟 PLC 的联合仿真案例，介绍机电一体化系统中，基于 PLC 的电气控制系统的联合仿真。

第 5 章为项目实操，通过综合案例，贯穿从 MCD 中机电一体化系统的模型定义到电气控制系统的设计与 PLC 编程，再到机电一体化系统的联合仿真调试，实现对全书内容的融会贯通。通过本章学习，学生可以全面掌握本书内容。

1.2 教学目标

(1) 熟练使用 NX MCD 软件。学生将熟练掌握 NX MCD 软件的界面操作、物理属性配置、传感器逻辑设计、仿真序列编排及信号设置等功能，能够独立完成机电系统的数字化建

模与仿真调试。

(2) 熟悉多平台协同开发。学生将了解 NX MCD + TIA Portal + PLCSIM Advanced 多平台协同开发的流程与方法，掌握跨平台信号映射与数据传递的技巧，能够进行虚实联动的实验操作。

(3) 完成机电系统全生命周期实验。学生将通过实际操作，完成机电系统从模型设计、控制到调试的全生命周期实验，能够独立进行机电设备的功能分析、运动分析和信号分析，并实现 MCD 仿真调试。

(4) 提升工程实践能力。通过参与综合案例的开发与调试，学生将提升解决实际工程问题的能力，培养系统思维与综合工程实践能力，为未来的职业发展积累实践经验。

第 2 章

机电概念设计

本章围绕机电概念设计展开，先介绍机电一体化基本概念、发展历程等，再详解机电概念设计流程、首选项设置、仿真功能，接着阐述刚体、碰撞体等基本机电对象，固定副、铰链副等基本运动副，位置控制等执行器，碰撞传感器等传感器，以及信号适配器、仿真序列和监视功能，还结合步进输送装置给出实操案例。

2.1 机电一体化基本概念

1. 定义与内涵

机电一体化是机械工程、电子技术、计算机科学及控制理论等多学科交叉融合的综合技术领域，其核心目标是通过智能控制实现机械系统的精准化、高效化与自动化。根据 ISO 标准定义，机电一体化系统由五大要素构成：机械本体（如机械结构与传动装置）、电子驱动（包括传感器、执行器与功率器件）、信息处理（控制器、算法与通信接口）、控制策略（如比例积分微分（proportional integral derivative, PID）控制、模糊逻辑）以及人机交互（human-machine interaction, HMI）（人机界面与远程监控）。其技术特征体现为智能化（嵌入式系统与人工智能（artificial intelligence, AI）算法）、模块化（标准化接口设计）、网络化（工业物联网与云端协同）和高精度（闭环控制与误差补偿机制）。

2. 发展历程与技术演进

机电一体化的发展可划分为三个阶段：20 世纪 60—80 年代的机械与电气简单结合阶段、20 世纪 80 年代至 2000 年微处理器驱动的数字化控制阶段，以及 2000 年后网络化与智能化深度融合的现代阶段。关键技术突破包括可编程控制器（programmable logic controller, PLC）技术的普及（如西门子 S7 系列）、现场总线（PROFINET、EtherCAT）、数字孪生技术及边缘计算的应用。以传统机电系统与现代系统的对比为例，控制核心从继电器逻辑升级为 PLC/工业 PC，通信方式由硬接线转向工业以太网，开发工具从物理样机调试演进为虚拟调试（如使用 NX MCD），维护模式则从故障后维修发展为预测性维护。

3. 核心组成与功能分析

机电系统的核心由机械、电子驱动与控制三大部分构成。机械系统需遵循轻量化与刚度优化准则，典型传动机构包括齿轮箱、丝杠与凸轮，动力学建模则基于拉格朗日（Lagrange）

方程或 ADAMS 仿真。电子驱动系统涵盖传感器（如 LVDT 位移传感器、光电编码器）与执行器（伺服电机、气动 / 液压缸）的选型与驱动技术。控制系统架构分为集中式与分布式，典型层级包括设备层（I/O 模块与现场总线）、控制层（PLC 与运动控制器）及监控层（监控与数据采集（supervisory control and data acquisition, SCADA）系统与制造执行系统（manufacturing execution system, MES））。

4. 技术特征与评价指标

机电一体化系统的性能评价涵盖静态特性（定位精度、重复精度）、动态特性（响应时间与超调量）、可靠性指标（平均故障间隔时间（mean time between failures, MTBF）、故障率）及能效比（能效比 η = 有效输出功率 / 输入功率 $\times 100\%$ ）。关键技术挑战包括多学科耦合参数匹配、微秒级实时控制周期实现，以及安全冗余设计（如双中央处理器（central processing unit, CPU）热备与安全 PLC 应用）。

5. 典型应用领域

在工业自动化领域，六轴工业机器人（如 KUKA KR AGILUS）与数控机床的协同控制是典型案例。智能装备如汽车焊装线与自动导引车（automated guided vehicle, AGV）导航系统则依赖节拍控制与调度算法。在新兴领域中，协作机器人的力控安全防护与医疗手术机器人的精度控制展现了机电一体化的前沿应用。

6. 与 MCD 设计的关联性

NX MCD 作为机电一体化概念设计的核心工具，通过虚拟样机开发与物理引擎仿真，实现机械模型、传感器配置与控制逻辑的无缝集成。例如，MCD 与 TIA Portal 的协同仿真可验证 PLC 程序逻辑，而碰撞检测与过载预警功能则用于故障模式模拟。此外，MCD 支持多学科协同设计，机械工程师可通过三维建模定义运动学，电气工程师可配置传感器与驱动器，自动化工程师可设计控制逻辑，最终通过开放式接口（如 PLCopen XML）导出至硬件在环调试。这种集成化设计方法显著缩短了开发周期，降低了实物样机开发成本，成为智能制造时代的关键技术支撑。

2.2 机电概念设计流程与功能

2.2.1 MCD 介绍与界面操作

1. 功能介绍

机电概念设计（Mechatronics Concept Designer, MCD）是西门子 NX 平台的机电一体化设计模块，专注于虚拟调试与概念设计。其核心功能包括：①机械建模，基于 NX 的三维建模工具，支持复杂装配体的几何设计与运动副定义；②物理仿真，集成刚体动力学引擎，可模拟重力、碰撞、摩擦等物理现象及行为；③控制集成，通过信号适配器与外部 PLC（如 TIA Portal）联动，实现虚实结合调试。

2. 界面布局

在 NX 软件中完成建模或模型装配后, 开始进行 MCD 的相关设置与仿真。MCD 模块的入口可以在选项卡区域的“应用模块”——“设计”——“更多”下拉箭头内找到, 显示为“机电概念设计”, 如图 2-1 所示。

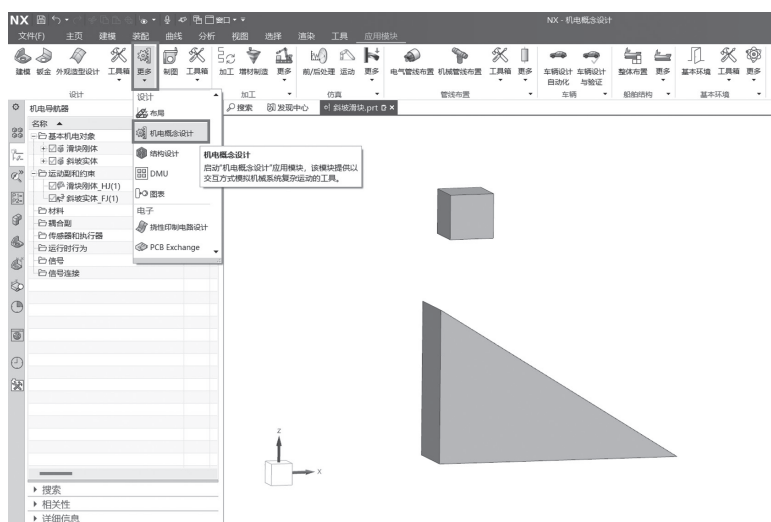


图 2-1 机电概念设计入口

进入机电概念设计页面后, 整体布局风格与 NX 其他部分保持一致, 如图 2-2 所示。界面主要有: ①功能选项区, 在此区域内选择不同的功能, 在下方选项卡区域会显示不同的功能菜单; ②选项卡, 根据选取的不同功能, 显示不同的选项卡, 如切换不同的应用模块等; ③视图显示区, 在此处进行所有的建模、编程和实体选取等操作; ④资源区, 包括常用的系统导航器、装配导航器、机电导航器、运行时察看器等, 记录操作过程, 对各类设置进行存放等; ⑤序列编辑器, 在此处进行仿真序列的编排等设置, 如无需要自行调出, 在后文将进行详细说明。

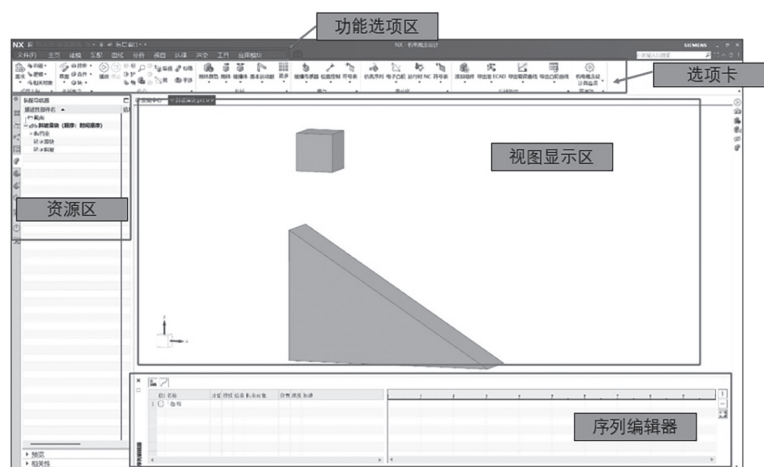


图 2-2 机电概念设计界面

2.2.2 机电概念设计首选项

机电概念设计首选项主要用于配置全局设计参数和基础交互规则。这一节点的设置将直接影响机电系统建模、仿真及跨学科协作的效率和准确性，其功能覆盖了从单位体系到文件管理的全流程细节。本小节主要讨论常规页面中的部件设置部分，设置入口如图 2-3 所示。

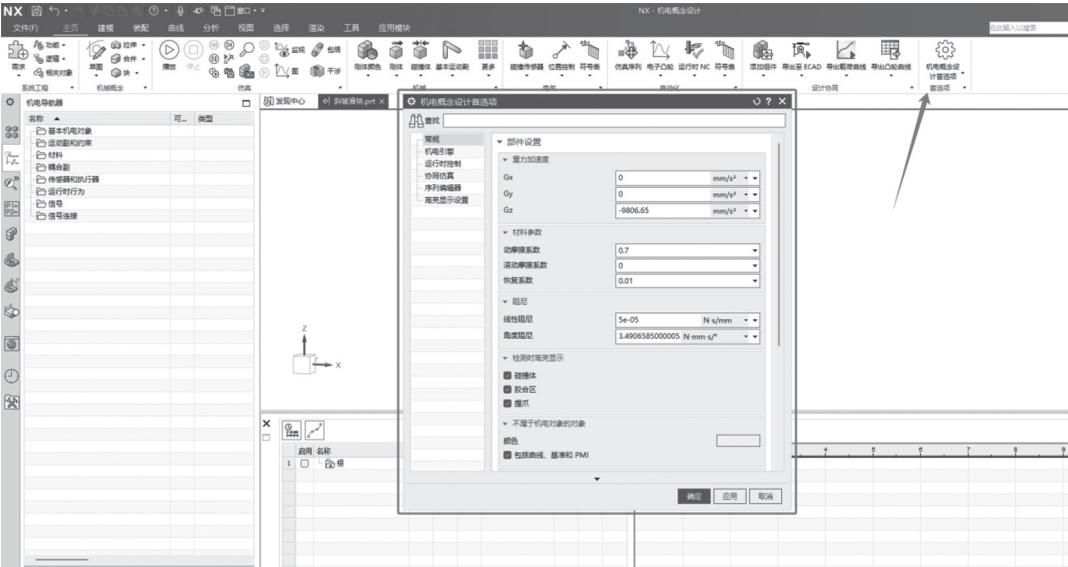


图 2-3 机电概念设计首选项入口与对话框

需要注意的是，在 NX 软件中，任意对话框中的设置都可以通过单击对应页面右上角的问号标志，跳转到 NX 的官方帮助文档，以获取详细的功能介绍与使用案例。

1. 重力加速度

定义全局坐标系下 X 、 Y 、 Z 方向的重力数值。例如，地球重力通常设置为 Z 轴 -9.81m/s^2 （根据预设单位的不同，数值可能有变化），若模拟月球环境可调整为 -1.62m/s^2 。此参数直接影响自由落体、悬挂系统等动力学行为的仿真结果，可以根据实际的机电产品应用环境进行详细设置。针对特殊场景（如太空模拟），可关闭重力或自定义多方向分量。此处重力加速度设置为： $G_x=0$ ， $G_y=0$ ， $G_z=-9806.65\text{mm/s}^2$ ，如图 2-4 所示。

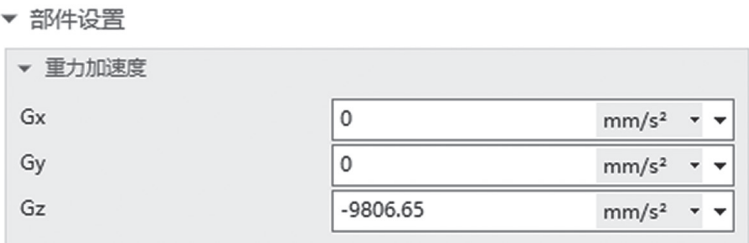


图 2-4 重力加速度设置

2. 材料参数

设置碰撞体的物理属性，包括动摩擦系数、滚动摩擦系数和恢复系数。例如，橡胶材料的恢复系数可设为 0.8，金属间碰撞的摩擦系数通常设为 0.15。这些参数决定了物体接触时的能量损耗与反弹特性。本部分设置为：动摩擦系数 0.7，滚动摩擦系数 0，恢复系数 0.01，如图 2-5 所示。

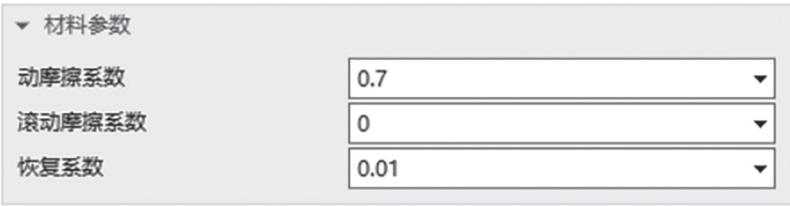


图 2-5 材料参数设置

3. 阻尼

设置线性阻尼（平动运动衰减）与角度阻尼（旋转运动衰减）的数值，用于抑制机械振动。例如，机床导轨的线性阻尼可设为 $0.2\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ ，以模拟实际润滑条件下的阻力。高阻尼值会快速消耗系统动能，适用于减震器建模。本部分设置为：线性阻尼 $5 \times 10^{-5}\text{N} \cdot \text{s}/\text{mm}$ ，角度阻尼 $3.4\text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}/(^{\circ})$ ，如图 2-6 所示。

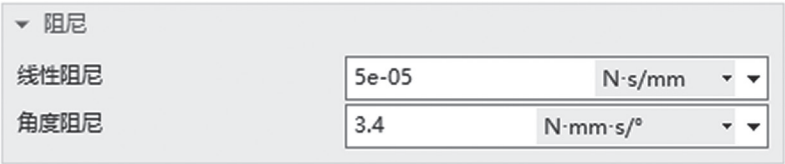


图 2-6 阻尼设置

需要特别指出，某些仿真中可能出现滑块滑动异常、旋转抖动等现象，可以考虑修改阻尼值进行调试。

4. 检测高亮

激活碰撞体、胶合区、握爪等对象在仿真中的动态高亮显示，如图 2-7 所示。例如，当设置碰撞体接触时，零件会进行高亮显示，便于观察接触状态，发现异常点并进行调试修改。

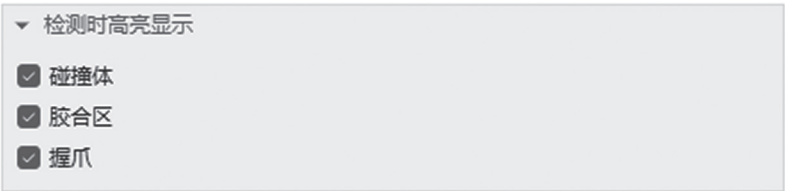


图 2-7 检测高亮设置

2.2.3 NX MCD 仿真功能与实时交互操作

NX MCD 模块提供了一套完整的机电一体化系统仿真工具，支持从概念设计到虚拟调试的全流程开发。其仿真功能可以实现实时交互与精准控制，其入口如图 2-8 所示。该模块可实现实时仿真控制的启停与调试，通过“播放”按钮启动实时仿真（进入运行时模式），“停止”按钮终止并返回编辑模式，“重新开始”按钮快速重置仿真环境，便于迭代验证。通过时间标度选项，调节仿真速度（慢动作或加速），实现变速仿真，适用于分析逆向运动学等复杂机械系统的动态细节。

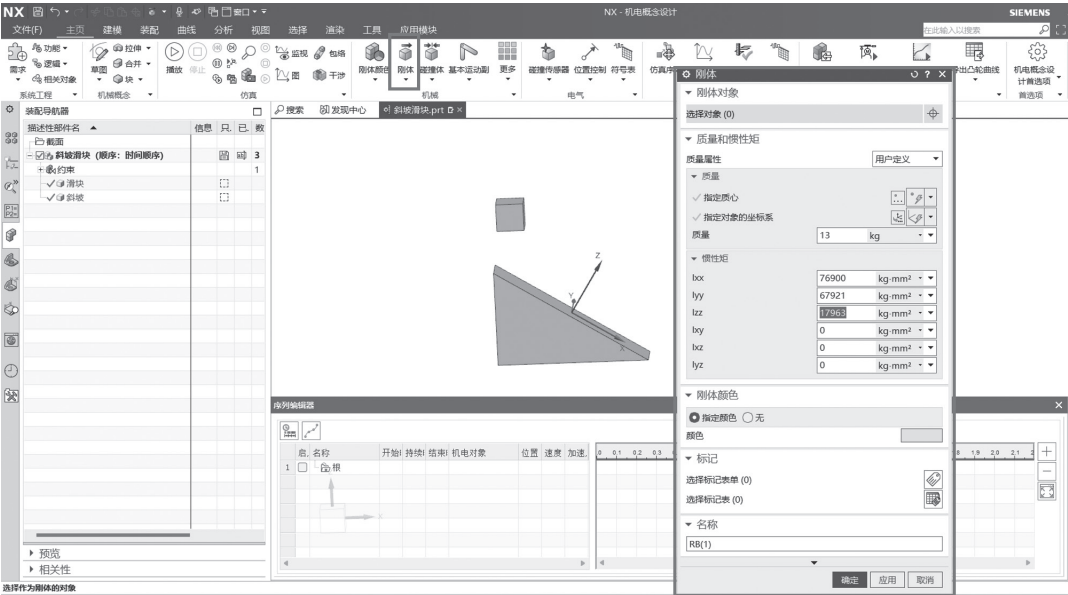


图 2-8 仿真功能区

2.3 基本机电对象

基本机电对象是 MCD 物理引擎仿真的基础。在 MCD 中，通过定义对象的刚体实现零件的交互、受力特征，通过碰撞体赋予物体的碰撞交互特性，将几何体的质量、惯性、摩擦、阻尼、弹性、变形、碰撞等物理性质进行仿真还原，实现模型机构的真实物理仿真，为机电概念设计仿真验证提供基础。

2.3.1 刚体

刚体是 NX MCD 中用于定义可移动组件的核心功能，其本质是一个具有质量属性并能响应仿真过程中物理力（如重力、碰撞力）的动力学对象。在仿真中，未定义刚体的组件将保持完全静止状态，而刚体可通过物理属性（如质量、惯性）和运动属性（如位置、方向、平移、角速度）参与动力学计算。

当组件被赋予刚体指令后，就表明它在物理系统中有了质量属性和运动属性。由于在机电概念设计首选项中设置了重力等属性，赋予刚体指令的组件自然会受到重力的作用，因此在设置完组件的刚体属性后可以单击仿真中的“播放”按钮，观察到组件在屏幕中向下方（重力加速度方向）落下，穿模通过其他组件；其他未赋予刚体指令的组件则保持完全静止，不与其他组件产生交互。

刚体指令的设置入口和设置界面如图 2-9 所示，在此处进行刚体参数的设置，简介如下。

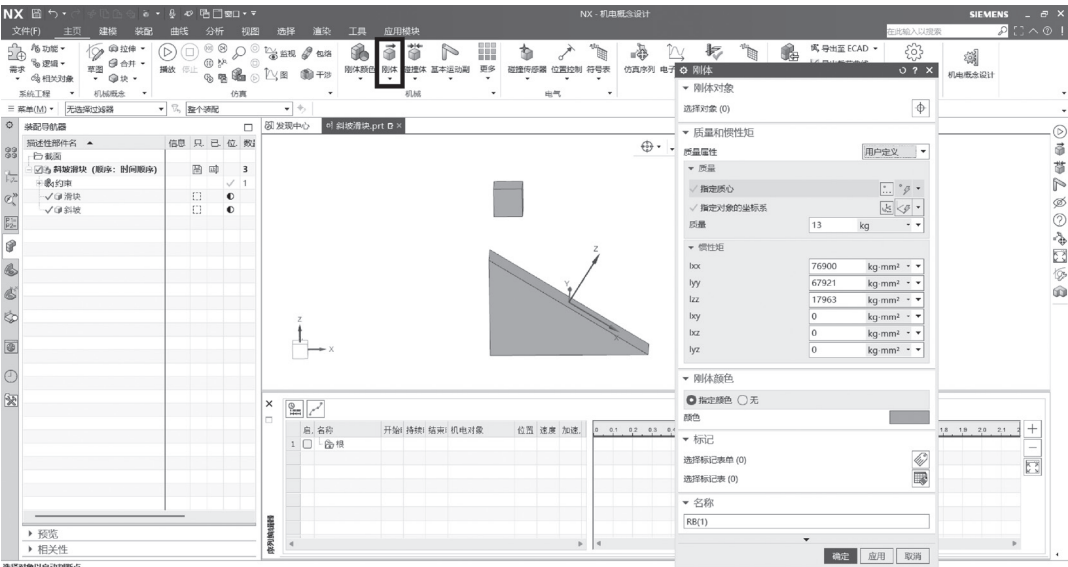


图 2-9 刚体的设置入口和设置界面

1. 刚体对象

选取本次设置刚体属性的组件，可以一次将多个几何体赋予同一个刚体，此时选择的多个对象将会成为一个刚体，作为整体受力、产生交互等。需要注意不同的刚体之间不能产生交集，且单个几何体上只能添加一次刚体。

2. 质量和惯性矩

提供自动计算（基于材料属性生成质量 / 惯性）和自定义两种模式。可手动输入质量值、质心坐标系及惯性矩，用于优化仿真精度（如解决关节刚度问题）。材料属性与质量分布直接影响物理响应，例如在 AGV 路径规划中需合理设置惯性参数以避免运动失稳。为了实现某些特定的仿真效果，也可以通过自定义质量等属性来实现。

3. 初始平移速度

设置初始位移方向与速率，需配合矢量方向定义。

4. 初始旋转速度

通过矢量轴定义旋转方向，常用于模拟飞轮、传送辊等旋转部件。

5. 刚体颜色

通过独立颜色区分刚体状态，在视觉检测场景中可结合颜色 ID 实现物体识别。

6. 标记

支持通过读写设备指令动态修改物性参数，实现与 PLC 的实时交互。

7. 名称

在 MCD 设置中，刚体会按照序号命名，后续的碰撞体、基本运动副等，会根据刚体名称进行命名，因此在对象比较多的 MCD 案例中，若不进行单个零件属性的命名会造成命名混乱，难以调试。在初始设置时建议对刚体或其他设置进行有序标准的名称设置。

2.3.2 碰撞体

碰撞体（collision body）是 NX MCD 中定义物体间碰撞交互规则的物理组件，通过简化几何形状（碰撞形状）实现高效稳定的动力学仿真。未定义碰撞体的对象将穿透其他物体，而碰撞体之间会根据物理规则产生接触响应。碰撞时的规则如粘连、摩擦、恢复系数等可在对话框中进行详细设置。典型的应用场景包括：①输送带堵料检测，在滚筒两侧设置碰撞体，当物料堆积触发碰撞时发送报警信号；②机器人抓取验证，使用网格形状匹配夹具轮廓，通过碰撞类别隔离无关物体干扰；③装配干涉分析，采用孔类型检测轴孔配合，结合刚体质量参数模拟压装过程阻力等。

碰撞体指令的设置入口和设置界面如图 2-10 所示，在此处进行碰撞体参数的设置，简介如下。

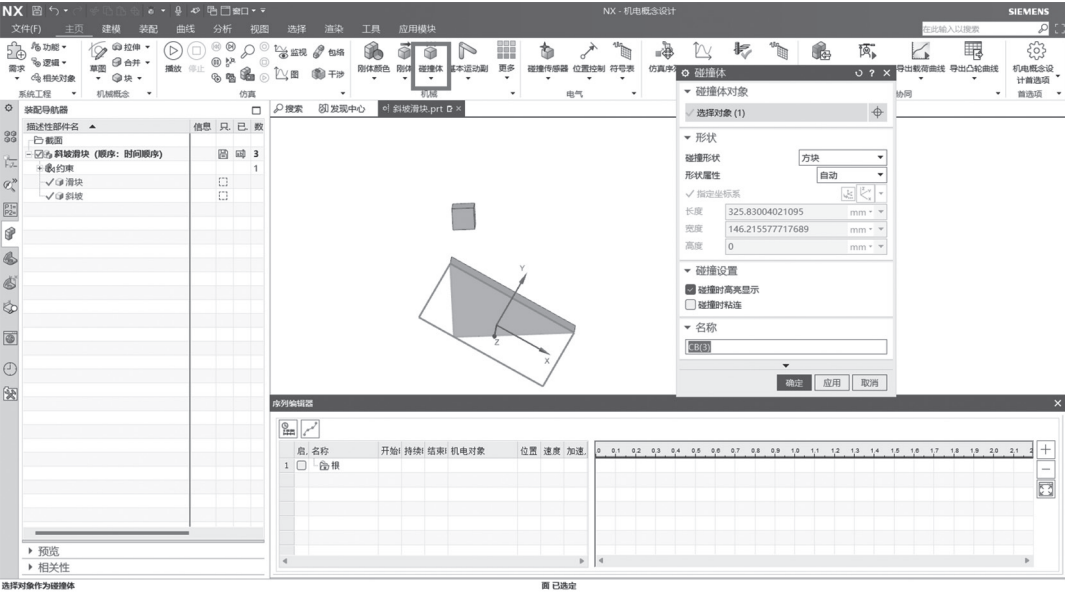


图 2-10 碰撞体的设置入口和设置界面