

服务热线: 400-615-1233

★ 配套精品教学资料包

www.huatengedu.com.cn

数字孪生技术及应用



策划编辑: 刘子嘉
责任编辑: 高 宇
封面设计: 光大印艺



定价: 59.90元

高等职业教育智能制造系列精品教材

数字孪生技术及应用

主编 李 焱 谢金涛 史喆琼

北京邮电大学出版社



高等职业教育智能制造系列精品教材



数字孪生技术及应用

主编 李 焱 谢金涛 史喆琼

主审 李桂云

SHUZI LUANSHENG
JISHU JI YINGYONG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

高等职业教育智能制造系列精品教材



数字孪生技术及应用

主编 李 焱 谢金涛 史喆琼

主审 李桂云

SHUZI LUANSHENG
JISHU JI YINGYONG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



前言

党的二十大报告提出，要“加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国”。数字孪生（Digital Twin，DT）技术作为工业4.0和智能制造数字化转型的核心使能技术，正在深刻改变产品设计、生产制造和运维管理的模式。它通过构建物理实体的虚拟映射，结合实时数据驱动仿真，实现全生命周期的优化与预测，从而大幅提升效率、降低成本并增强系统可靠性。

西门子公司的NX Mechatronics Concept Designer（以下简称NX MCD）软件作为业界领先的机电概念设计与数字孪生工具，提供了从机械建模、电气逻辑设计到虚拟调试的完整解决方案。NX MCD不仅支持高保真仿真，还能无缝对接自动化控制系统（如PLC），使工程师能够在虚拟环境中验证和优化设备行为，再部署到物理世界，真正实现“虚实融合”的智能制造。

本书旨在系统介绍数字孪生技术的基本原理，并结合NX MCD的实际操作，通过丰富的案例和详细的操作步骤，帮助读者全面掌握数字孪生技术在工业自动化领域的应用方法，掌握NX MCD的核心功能，如机电系统建模、传感器配置、逻辑控制、运动仿真、虚拟调试技术以及如何通过NX MCD连接PLC进行自动化系统验证等。

本书可作为高等职业院校的电气自动化技术、机电一体化技术、机器人控制技术、过程控制技术、计算机控制技术等专业相关课程的教学与学习用书。本书按照“以学生为中心、以学习成果为导向、促进学生自主学习”的思路进行设计，将教学材料的特征和学习资料的功能完美结合，以项目为引领，结合模块化教学设计，构建深度学习的管理体系。

本书是校企合作背景下的工作手册式教材，助力分层教学，落实因材施教；遵循职业能力形成规律，采用模块化教学设计，巩固提高学习效果；创新“做、学、教”学习模式，突出学生主体地位；整合多种教学资源，实现教材多功能作用并构建深度学习的管理体系。把“企业岗位的典型工作任务及工作过程知识”

作为教材的主体内容，突出如何借助“项目实施”展开职业教育教学，提供丰富、适用和具有引领创新作用的多种类型立体化、信息化课程资源，实现教材多功能作用并构建深度学习的管理体系。

本书由天津工业职业学院李焱、谢金涛、史喆琼担任主编，由天津工业职业学院侯娅品、杨益梅及天津渤海职业技术学院白岩峰担任副主编，江苏汇博机器人科技有限公司陈强共同参与编写。全书由天津工业职业学院李桂云担任主审。在编写过程中，编者参阅了相关的教材及技术文献，在此向相关专家、工程师和作者致以衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者





目录

基 础 篇

项目一	工业机器人多功能工作站仿真模型搭建	2
项目描述		2
项目要求		2
项目目标		3
项目分组		3
项目预学		4
项目实施		4
一、NX MCD 项目的创建		4
二、模型导入		6
三、位姿调整		8
四、工作站布局		13
验收与评价		17
拓展提高		18
一、传输线模块的搭建		18
二、旋转供料模块的搭建		19
知识链接		19
一、数字孪生技术简介		19
二、西门子 NX 软件介绍		22
三、进入 NX MCD 软件环境		23
四、NX MCD 界面组成		27
五、文件菜单命令		27
六、工具栏命令		32

七、“带条”工具栏命令	35
八、装配模块	39
九、分析模块	42
十、视图及快捷键	43
学思园地	44

项目二 立体仓库模块数字孪生设计..... 45

项目描述	45
项目要求	45
项目目标	45
项目分组	46
项目预学	46
项目实施	47
一、模型的搭建	47
二、刚体的创建	47
三、碰撞体的创建	48
四、碰撞材料的创建	49
五、固定副的创建	50
六、碰撞传感器的创建	51
验收与评价	53
拓展提高	54
一、利用碰撞体功能将电机底座准确放入立体仓库	54
二、利用固定副功能将电机底座准确放入立体仓库	55
知识链接	55
一、刚体	55
二、碰撞体	57
三、碰撞材料	60
四、碰撞传感器	62
五、防止碰撞	65
六、固定副	67
七、传输面	69
学思园地	71

项目三 装配模块数字孪生设计..... 72

项目描述	72
项目要求	72
项目目标	73

项目分组	73
项目预学	73
项目实施	74
一、模型的搭建	74
二、滑动副的创建	74
三、位置控制的创建	75
四、速度控制的创建	76
五、限位开关的创建	77
六、限制副的创建	78
七、装配夹具的仿真运行	79
验收与评价	80
拓展提高	82
一、装配夹具的速度及限位设置	82
二、传送带的法兰运送	84
知识链接	85
一、滑动副	85
二、柱面副	87
三、球副	89
四、位置控制	91
五、速度控制	93
六、限制副	95
七、断开约束	97
学思园地	99

项目四 上料模块数字孪生设计..... 101

项目描述	101
项目要求	101
项目目标	102
项目分组	102
项目预学	103
项目实施	103
一、模型的搭建	103
二、平面副的创建	103
三、对象源的创建	104
四、距离传感器的创建	105
五、齿轮的创建	106

六、运行时察看器的添加	108
验收与评价	109
拓展提高	110
一、利用传输面完成物料的输送	110
二、传送带首端的循环上料	112
知识链接	114
一、平面副	114
二、齿轮	116
三、对象源	118
四、对象收集器	120
五、对象变换器	121
六、距离传感器	123
七、运行时察看器	125
学思园地	126

项目五 工业机器人数字孪生设计.....127

项目描述	127
项目要求	127
项目目标	128
项目分组	128
项目预学	129
项目实施	129
一、工业机器人各轴刚体的创建	129
二、工业机器人基座和快换主盘固定副的创建	133
三、工业机器人各轴铰链副的创建	134
四、工业机器人各轴位置控制的创建	137
五、工业机器人快换主盘反算机构的设置	139
六、弧口工具反算机构驱动的创建	140
七、工业机器人模型驱动接口的配置	140
验收与评价	143
拓展提高	145
一、机器人线性运动	145
二、吸盘工具反算机构驱动的配置	145
知识链接	146
一、工业机器人本体介绍	146
二、机器人运动学	147

三、铰链副	148
四、点在线上副	150
五、线在线上副	152
六、信号与信号适配器	154
学思园地	158

项目六 工业机器人仿真调试..... 159

项目描述	159
项目要求	159
项目目标	160
项目分组	160
项目预学	161
项目实施	161
一、模型的搭建	161
二、快换主盘握爪的创建	162
三、弧口工具模型驱动接口的配置	163
四、按钮信号的设置	165
五、弧口工具自动抓取的仿真序列的设计	166
六、仿真调试弧口工具的安装	170
验收与评价	172
拓展提高	173
一、电机底座抓取	173
二、单轴定点抓取弧口工具及电机底座	174
知识链接	178
一、仿真序列	178
二、运行时参数	181
三、运行时表达式	181
四、运行时行为	183
五、运行时按钮	185
六、握爪	187
七、胶合区域	190
学思园地	193

项目七 工业机器人虚实联调..... 194

项目描述	194
项目要求	194
项目目标	195

项目分组	195
项目预学	195
项目实施	196
一、PLC 环境的搭建	196
二、PLC 通信的配置	199
三、机器人环境的搭建	202
四、MCD 外部信号的配置	205
五、信号映射的创建	205
验收与评价	206
拓展提高	208
电机底座抓取虚实联调	208
知识链接	209
一、虚拟调试技术	209
二、外部信号配置	209
三、信号映射	211
四、虚拟调试	212
五、通信方式简介	212
学思园地	215

实 战 篇

实战一 绘图单元数字孪生仿真与虚实联调.....218

任务概述	218
任务目标	219
任务实施	220
一、模型布局的设计与导入	220
二、数字孪生模型的搭建	221
三、数字孪生模型驱动接口的配置	224
四、绘图模块的仿真测试	230
五、数字孪生的虚实同步	232
学思园地	233

实战二 涂胶单元数字孪生仿真与虚实联调.....234

任务概述	234
任务目标	236
任务实施	236

一、模型的布局设计与导入	236
二、数字孪生模型的搭建	237
三、数字孪生模型驱动接口的配置	238
四、涂胶模块的仿真测试	238
五、数字孪生的虚实同步	240
学思园地	241
实战三 码垛数字孪生仿真与虚实联调	242
任务概述	242
任务目标	244
任务实施	244
一、模型的布局设计与导入	244
二、数字孪生模型的搭建	245
三、数字孪生模型驱动接口的配置	251
四、码垛流程的仿真测试	259
五、数字孪生的虚实同步	266
学思园地	266
实战四 电机装配数字孪生仿真与虚实联调	267
任务概述	267
任务目标	269
任务实施	269
一、模型的布局设计与导入	269
二、数字孪生模型的搭建	270
三、数字孪生模型驱动接口的配置	274
四、电机装配的仿真测试	281
五、数字孪生的虚实同步	291
学思园地	294
参考文献	295



基础篇



项目一

工业机器人多功能工作站仿真模型搭建

项目描述

在现代制造业不断向智能化、自动化转型升级的趋势下，工业机器人在生产流程中的应用越发广泛。本项目旨在搭建一个工业机器人多功能工作站仿真模型，用以提高生产效率、降低生产成本、优化生产工艺以及保障生产安全。该模型能为企业在实际生产布局、机器人编程调试、工艺优化等方面提供可视化、可验证的虚拟环境，从而减少现场调试时间与错误，加速新产品的投产进程。工业机器人多功能工作站仿真模型主要由工业机器人、快换工具、立体仓库、井式上料、输送带、变位机、旋转供料等模块组成，融合当今工业机器人与智能制造、人工智能领域先进技术，包含虚拟调试、离线仿真、二次开发等软性支撑技术，为多种典型场景下编程操作工业机器人完成各种作业任务、充分学习工业机器人操作编程实训技能提供支持。

本项目包括机电概念设计软件概述、工作站模型导入和工作站布局三个任务。读者将通过学习 NX MCD 软件概述、NX MCD 软件界面、工作站组成、添加组件、移动组件、模块定位原理和装配约束等知识，掌握在 NX MCD 中导入模型及调整模型位姿的方法，完成工业机器人多功能工作站仿真模型的搭建。

项目要求

学会主菜单命令、工具栏命令、“带条”工具栏命令的操作方法，并完成标准工作台和 ABB 机器人模型的搭建。

- (1) 学会 NX MCD 软件的基本操作；
- (2) 完成工作站模型的导入；
- (3) 完成工作站的布局。

 学习笔记

- (1) 理解 NX MCD 软件的功能和作用;
- (2) 熟悉工业机器人应用编程虚拟调试平台的组成;
- (3) 理解模块定位的原理;
- (4) 理解添加组件的功能和操作方法;
- (5) 理解移动组件的功能和操作方法;
- (6) 理解装配约束的功能和操作方法。

- (1) 能够创建 NX MCD 项目;
- (2) 掌握 NX MCD 界面定制方法;
- (3) 能够使用添加组件功能将工作站模型导入 NX MCD;
- (4) 能够使用移动组件功能对模型的位姿进行调整;
- (5) 能够使用装配约束功能将各模型按照工作站布局进行摆放。

- (1) 强化信息应用和分析能力;
- (2) 培养举一反三的能力;
- (3) 培养多角度解决问题的能力。

根据任务要求进行分组，并填写项目分组表（见表1-1），便于开展分层教学及分组学习。

表 1-1 项目分组表

任务分工

参考知识链接、微课、网络资源等，讨论并完成以下问题。

1. 模型导入有哪几种方法？

2. 添加组件有哪几种方法？

3. 任务中主菜单命令有哪些？

4. 任务中工具栏菜单有哪些指令？

5. 任务中“带条”工具栏有哪些指令？

6. 搭建工业机器人多功能工作站仿真模型给企业带来了哪些效益？

一、NX MCD 项目的创建

(1) 创建“工业机器人应用编程虚拟调试”文件夹，将工业机器人应用编程工作站的模型复制到该文件夹中，如图 1-1 所示。

名称	修改日期	类型	大小
 ABB-120-Base	2021/2/19 10:20	Siemens Part File	2,903 KB
 ABB-120-J1	2021/2/18 11:53	Siemens Part File	606 KB
 ABB-120-J2	2021/2/18 11:53	Siemens Part File	705 KB
 ABB-120-J3	2021/2/18 11:54	Siemens Part File	1,255 KB
 ABB-120-J4	2021/2/18 11:54	Siemens Part File	1,427 KB
 ABB-120-J5	2021/2/23 11:16	Siemens Part File	845 KB
 ABB-120-J6	2021/2/18 11:55	Siemens Part File	97 KB
 ABB机器人	2023/10/22 11:37	Siemens Part File	144 KB
 RFID模块	2023/10/16 10:14	Siemens Part File	513 KB
 变位机模块	2025/1/24 15:15	Siemens Part File	8,748 KB
 标准工作台	2023/4/17 11:26	Siemens Part File	79,473 KB
 电机工件	2023/10/22 11:40	Siemens Part File	234 KB
 法兰工件	2023/10/22 11:40	Siemens Part File	118 KB
 弧口手爪工具	2023/10/22 11:39	Siemens Part File	2,215 KB
 基座工件	2023/10/22 11:40	Siemens Part File	254 KB
 空文件夹	2023/10/22 11:41	Siemens Part File	211 KB
 快换主盘	2023/10/16 9:36	Siemens Part File	778 KB
 快换装置	2023/10/22 11:38	Siemens Part File	2,709 KB
 立体仓库模块	2023/10/22 11:38	Siemens Part File	3,263 KB
 平口手爪工具	2023/10/22 11:39	Siemens Part File	2,220 KB
 输送线模块	2025/1/24 13:22	Siemens Part File	12,329 KB

图 1-1 复制模型

(2) 双击“NX”图标，打开软件，如图 1-2 所示。



图 1-2 打开软件

(3) 单击主页中的“新建”按钮，如图 1-3 所示。



图 1-3 单击“新建”按钮

(4) 选择“机电概念设计”选项卡，选项卡中的“模板”选择“空白”选项，在“名称”文本框中输入“项目一 工业机器人多功能工作站仿真模型搭建”，文件夹选择“工业机器人应用编程虚拟调试”，单击“确定”按钮，如图 1-4 所示。



图 1-4 新建文件

(5) NX MCD 项目创建完成，如图 1-5 所示。

学习 笔记

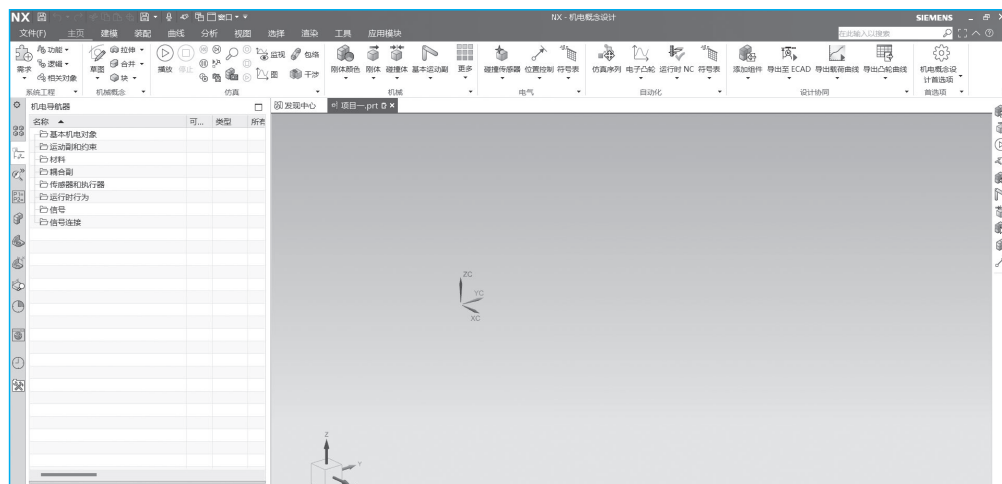


图 1-5 项目创建完成

二、模型导入

(1) 在机电概念设计的“导出至 ECAD”选项卡下的“设计协同”组中选择“MCAD 下拉菜单”选项，如图 1-6 所示。

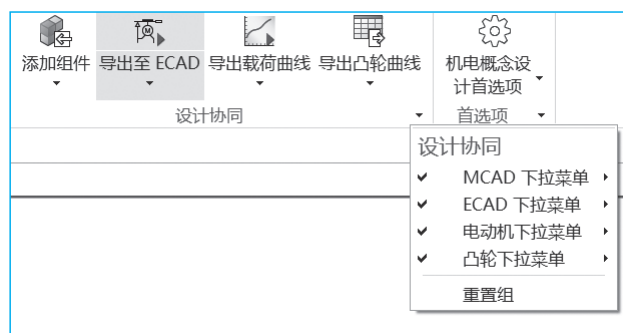


图 1-6 MCAD 下拉菜单 1

(2) 选择“添加组件”选项，如图 1-7 所示。

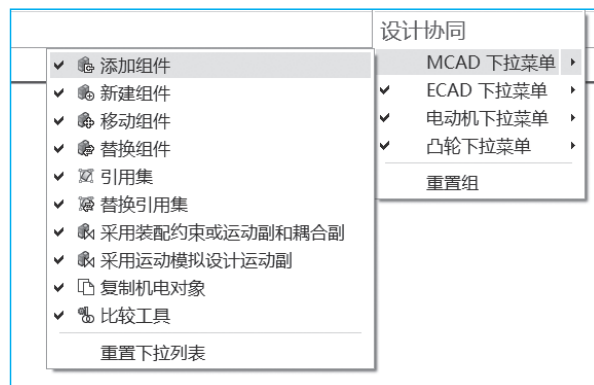


图 1-7 添加组件

(3) 在“添加组件”对话框的“位置”选项下的“装配位置”下拉菜单中，选择“绝对坐标系—工作部件”选项，其余参数按照默认设置，单击“打开”按钮，如图 1-8 所示。



图 1-8 设置参数

(4) 选择“标准工作台”选项，如图 1-9 所示。

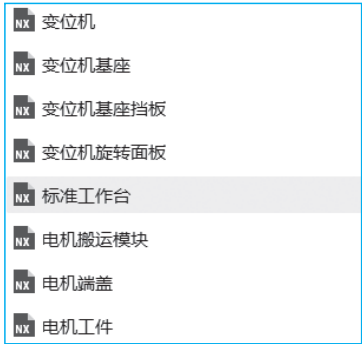


图 1-9 选择“标准工作台”选项

(5) 将“标准工作台”模型添加到 NX MCD 中，单击“应用”按钮，完成“标准工作台”模型的导入，如图 1-10 所示。

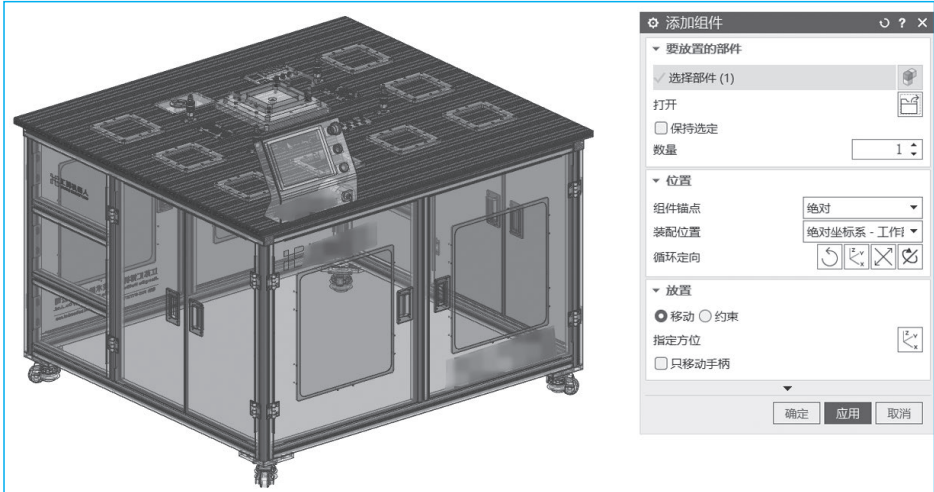


图 1-10 模型的导入

(6) 标准工作台模型导入完成，如图 1-11 所示。

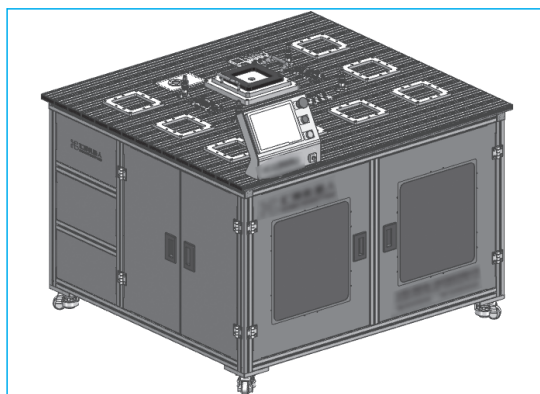


图 1-11 模型导入完成

(7) 参照上述步骤，依次完成工作站其他模型的导入，如图 1-12 所示。在选择要导入的模型时，也可同时选择多个模型文件一次性导入。

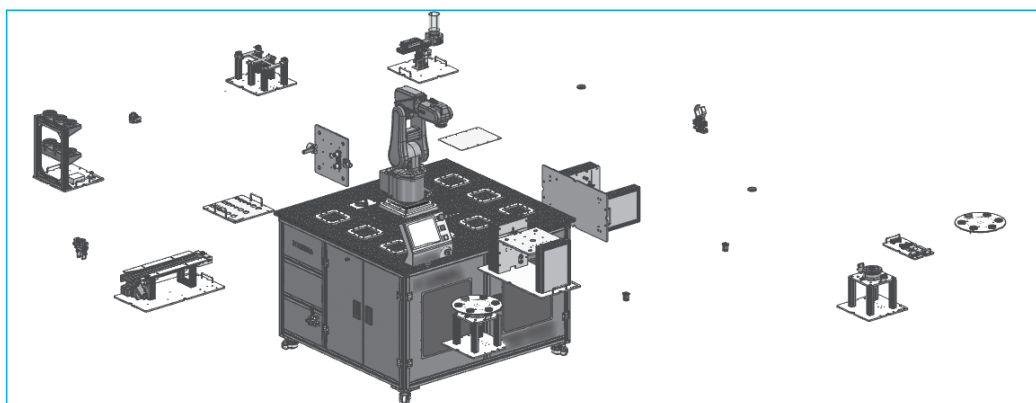


图 1-12 依次导入其他模型

三、位姿调整

(1) 在机电概念设计“导出至 ECAD”选项卡下的“设计协同”组中，单击“MCAD 下拉菜单”，如图 1-13 所示。

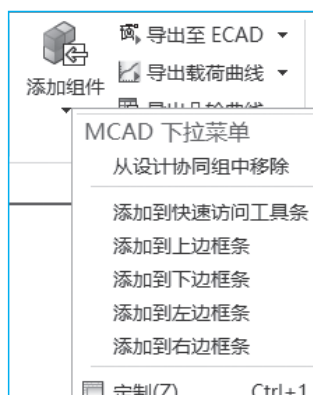


图 1-13 MCAD 下拉菜单 2

(2) 选择“移动组件”选项，如图 1-14 所示。

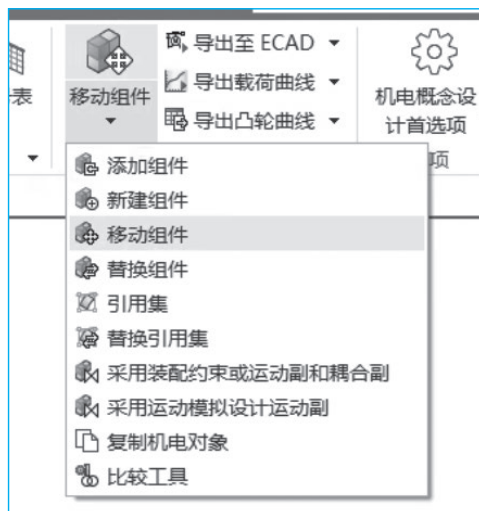


图 1-14 选择“移动组件”选项

(3) 在“要移动的组件”下的“选择组件”中，选择“快换工具支架”模型，如图 1-15 所示。

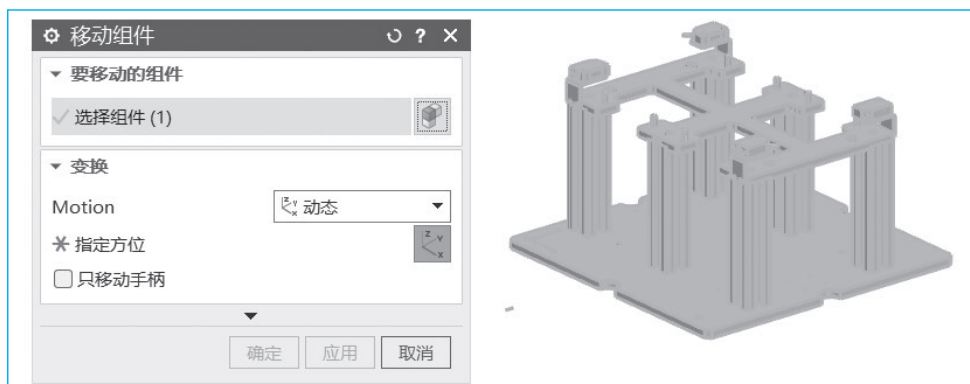


图 1-15 选择“快换工具支架”模型

(4) 单击“指定方位”，如图 1-16 所示。

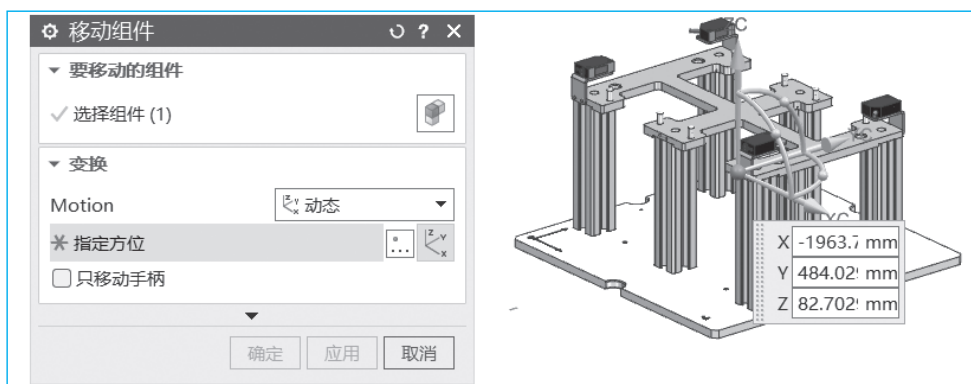


图 1-16 单击“指定方位”

(5) 将鼠标指针移至坐标系“YC”轴的箭头处，按住鼠标左键，可沿“YC”轴移动

学习笔记

“快换工具支架”模型，调整模型的位置，如图 1-17 所示。

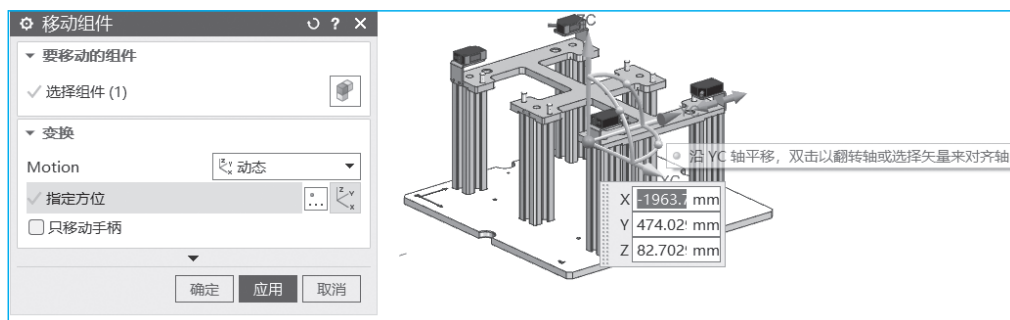


图 1-17 调整模型位置

(6) 在“绝对坐标系 ZY”面，通过移动“快换工具支架”模型的“ZC”和“YC”轴，将“快换工具支架”移动到如图 1-18 所示的位置。

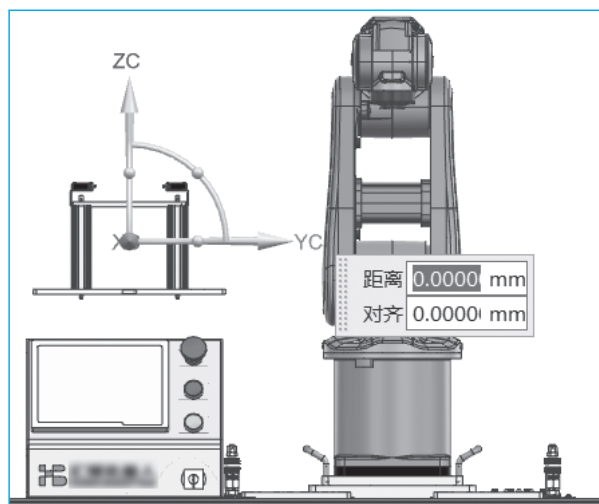


图 1-18 移动模型位置

(7) 在“绝对坐标系 YC”面，通过移动“快换工具支架”模型的“ZC”和“XC”轴，将“快换工具支架”移动到如图 1-19 所示的位置。

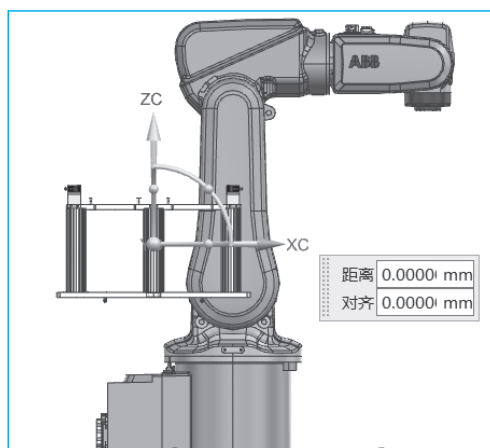


图 1-19 移动支架位置

(8) 单击“应用”按钮，完成“快换工具支架”模型的位置调整，如图 1-20 所示。

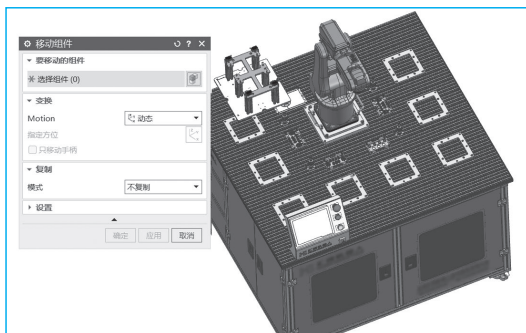


图 1-20 位置调整完成

(9) 参照上述步骤，将“弧口工具”模型移动到“快换工具支架”模型的上方，如图 1-21 所示。

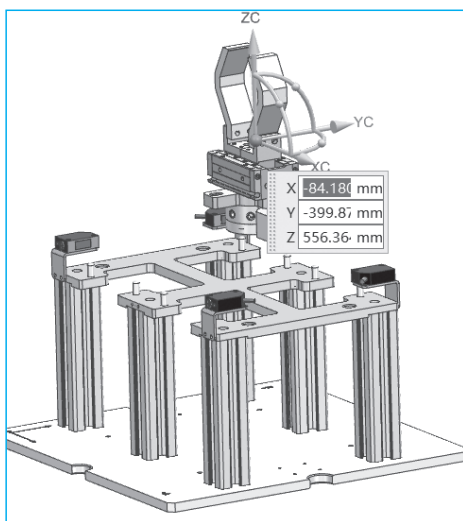


图 1-21 移动“弧口工具”模型

(10) 调整视角，在“要移动的组件”下的“选择组件”中，选择“弧口工具”选项，单击“指定方向”按钮，再单击“绕 XC 轴旋转”（ZC 面与 YC 面圆弧中间的点），如图 1-22 所示。

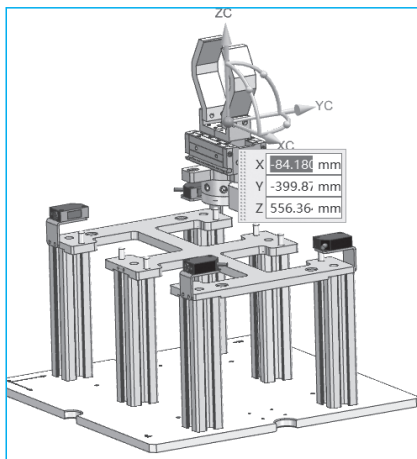


图 1-22 调整视角

学习笔记

(11) 在角度文本框输入 180，按 Enter 键，如图 1-23 所示。

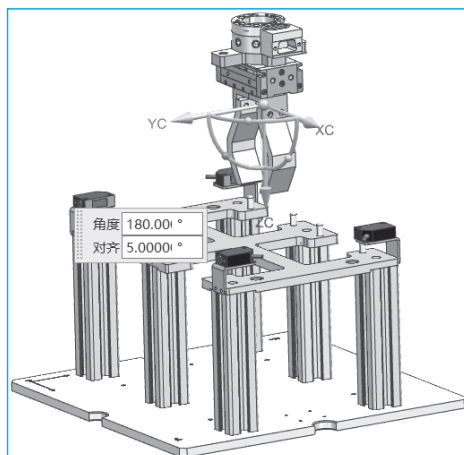


图 1-23 调整方向

(12) 单击“绕 ZC 轴旋转”，调整“弧口工具”模型角度，如图 1-24 所示。

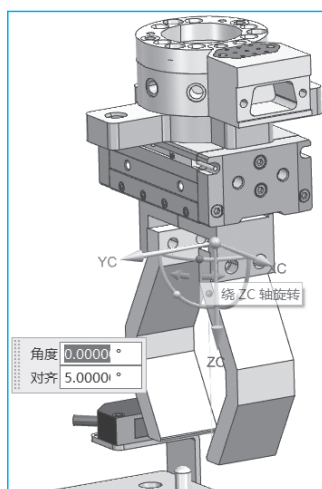


图 1-24 旋转角度

(13) 在角度文本框输入 90，按 Enter 键，如图 1-25 所示。

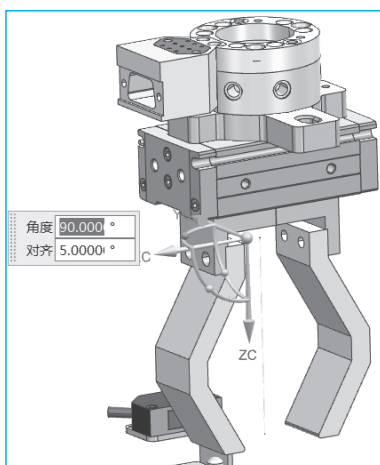


图 1-25 输入角度参数

(14) “弧口工具”模型位姿调整完成，单击“应用”按钮，如图 1-26 所示。

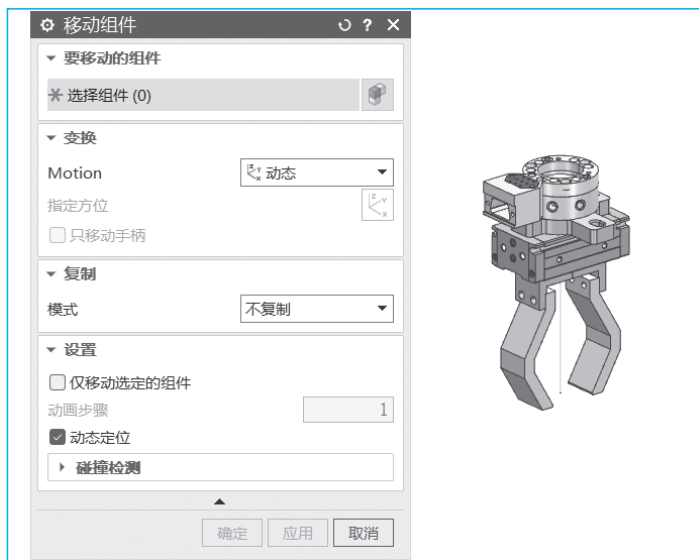


图 1-26 模型位姿调整完成

(15) 重复上述步骤，完成工作站模型的位姿调整。调整好的工作站模型如图 1-27 所示。

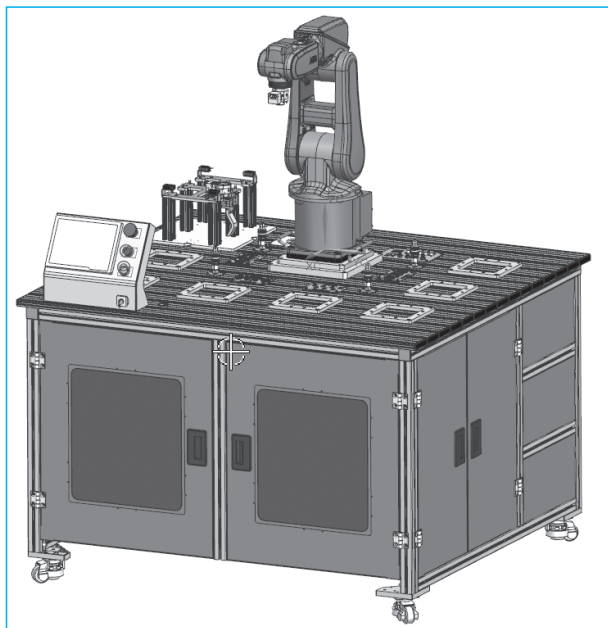


图 1-27 工作站模型

四、工作站布局

- (1) 单击“装配”选项卡，在“位置”工具栏中单击“装配”按钮。
- (2) 约束选择“接触”，方位选择“查找最接近”，如图 1-28 所示。

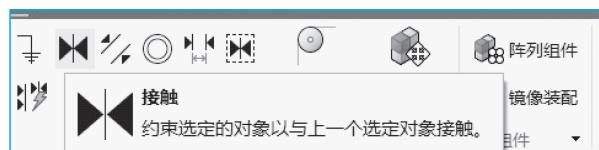


图 1-28 选择约束

(3) 选中快换工具支架靠外侧定位销的中心轴，如图 1-29 所示。

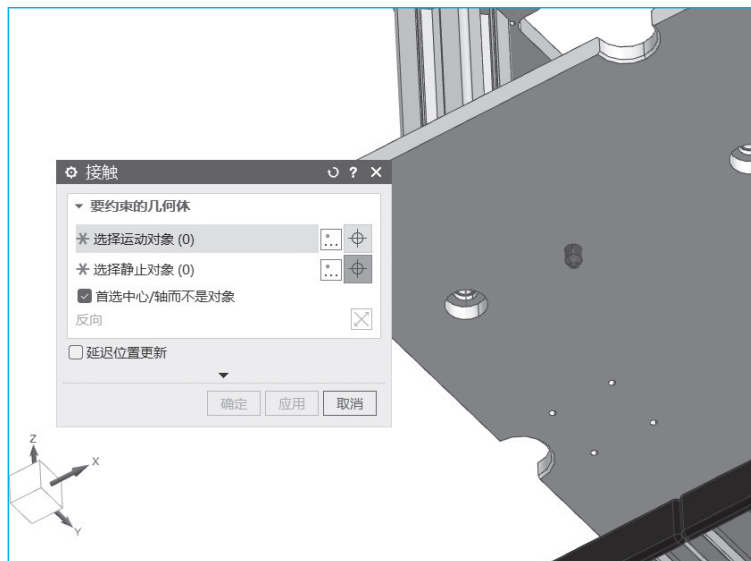


图 1-29 选中定位销中心轴

(4) 选中定位板的销孔的中心轴，如图 1-30 所示。

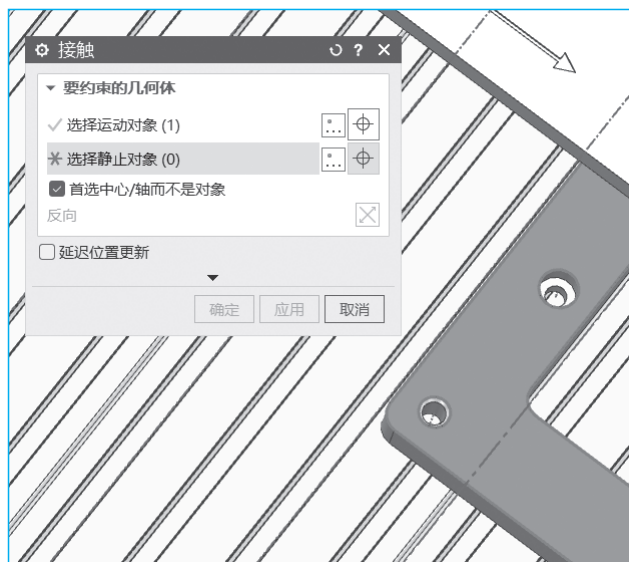


图 1-30 选中销孔中心轴

(5) 单击“应用”按钮，使快换工具支架上定位销的中心轴与定位板中销孔的中心轴同轴，如图 1-31 所示。

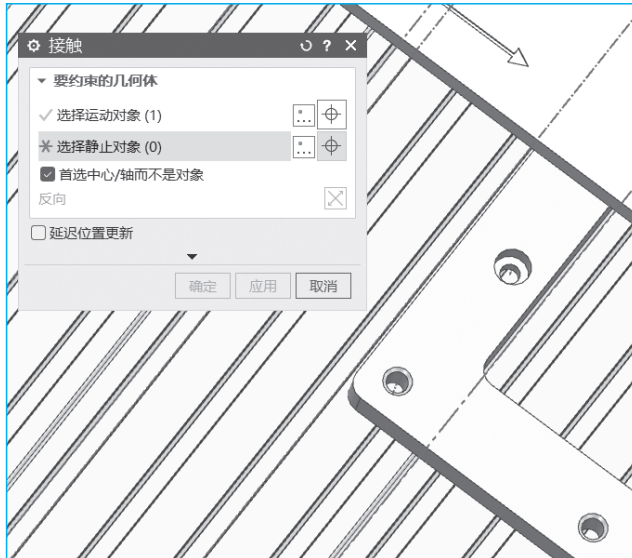


图 1-31 同轴设置完成

(6) 选中快换工具支架的底面，如图 1-32 所示。

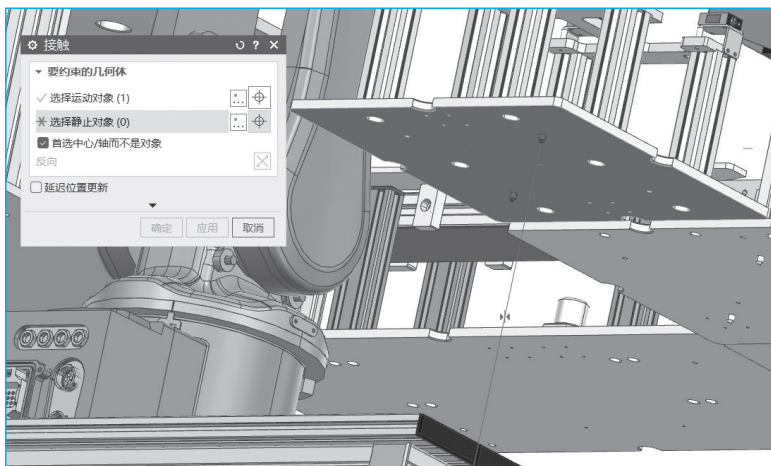


图 1-32 选中模型底面

(7) 再选中定位板的上表面，如图 1-33 所示。

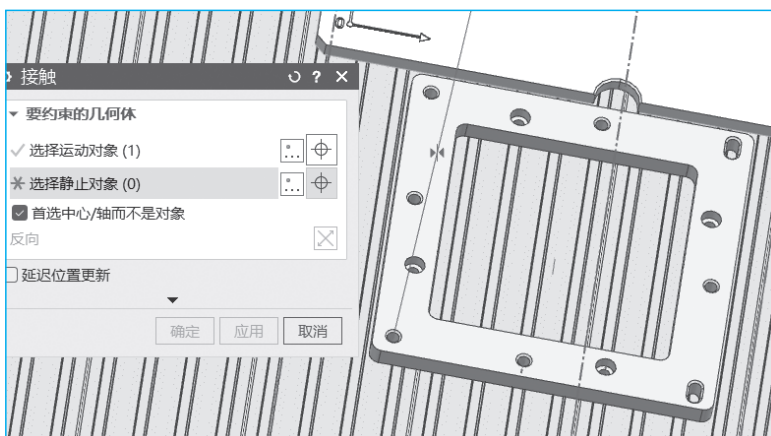


图 1-33 选中定位板上表面

学习 笔记

(8) 单击“应用”按钮，完成快换工具支架的装配约束，将快换工具支架安装到标准工作台相应位置，如图 1-34 所示。

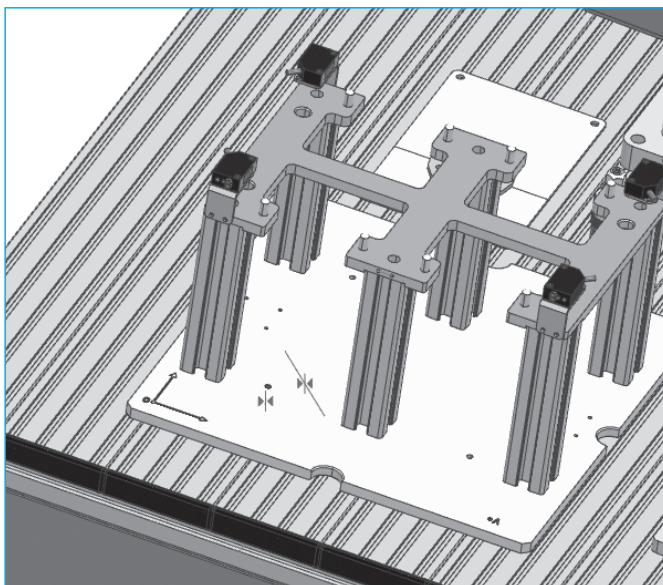


图 1-34 快换工具支架安装完成

(9) 参照上述步骤，通过装配约束完成其他模块的布局。完成布局后的工作站仿真模型如图 1-35 所示。

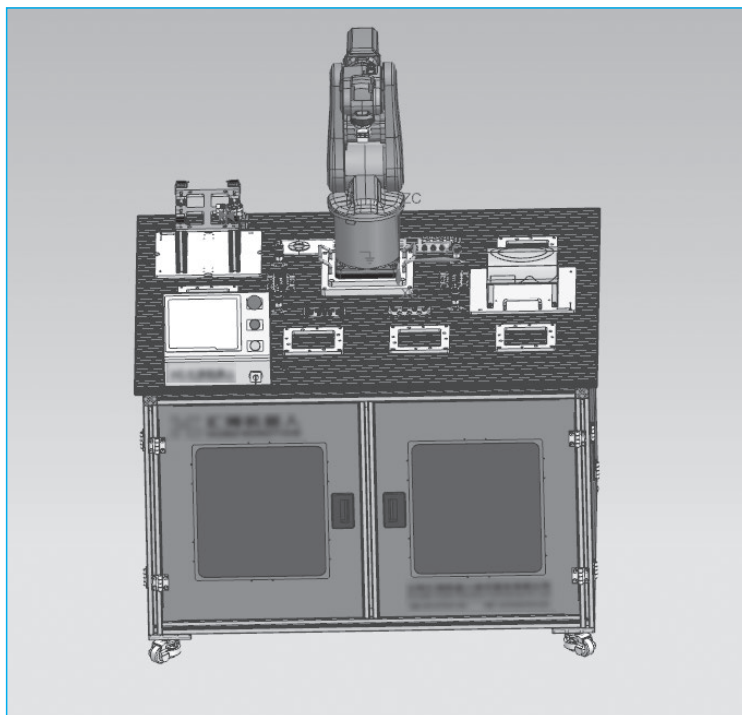


图 1-35 模型安装完成



微课
模型的搭建

验收与评价

学习笔记

1. 组内验收

根据分工完成项目自查并填写组内自查记录表（见表 1-2），再通过组内学习研讨推进整改。

表 1-2 组内自查记录表

项目名称			组名		
序号	验收项目	验收记录	整改方案		完成时间
1	标准工作台的搭建				
2	立体仓库的搭建				
3	ABB 机器人模型的搭建				

总结：

签字：时间：

2. 组间验收

提交项目全部资料，小组之间互相检查，找出问题后填写组间互查记录表（见表 1-3）。

表 1-3 组间互查记录表

项目名称		组名	
项目验收人		验收时间	
项目概况			
存在问题			
资料完整度	项目完成度	主观评价	

3. 展示评价

根据评价内容，开展自评与互评，并请教师进行评价，填写考核评价表（见表 1-4）。



表 1-4 考核评价表

序号	评价项目	评价内容	分值	自评 (30%)	互评 (30%)	师评 (40%)	合计
1	职业素养 (30分)	分工合理性, 制订计划能力, 严谨认真性	5				
		爱岗敬业、安全意识、责任意识、服从意识	5				
		团队合作、分享能力	5				
		行业规范、7S 标准	5				
		学习态度	5				
		解决问题能力	5				
2	专业能力 (60分)	标准工作台的搭建	20				
		立体仓库的搭建	20				
		ABB 机器人模型的搭建	20				
3	创新意识 (10分)	创新思维和行动	10				
合计			100				
评价人签名:				时间:			

拓展提高

一、传输线模块的搭建

1. 任务要求

在前述任务的基础上完成传输线模块的搭建。

2. 分析设计

(1) 本任务与前述任务相比, 增加了哪个模块?

(2) 如何完成传输线模块的搭建? 请写出步骤。

3. 任务实施

利用添加组件、移动组件、装配约束等功能完成传输线模块的搭建。

(1) 完成模型的导入。

(2) 调整到合适的位姿。

(3) 完成传输线模块的搭建。



微课
传输线模块
的搭建

4. 小结

通过该拓展任务，你有什么新的发现和收获？写在下面。

二、旋转供料模块的搭建

1. 任务要求

在传输线模块搭建任务的基础上完成旋转供料模块的搭建。

2. 分析设计

(1) 本任务需要用到哪些命令？

(2) 利用所学到的指令完成仿真模型的搭建，并列出搭建步骤。

3. 任务实施

利用添加组件、移动组件、装配约束等功能完成旋转供料模块的搭建。

(1) 完成模型的导入。

(2) 调整到合适的位姿。

(3) 完成旋转供料模块的搭建。

4. 小结

通过该拓展任务，你有什么新的发现和收获？写在下面。



知识链接

一、数字孪生技术简介

数字孪生又被称作数字化双胞胎，这是基于工业生产数字化的新概念，是一种在虚拟空间映射物理实体的前沿数字化技术。数字孪生集成了机械、仿真、传感、通信、人工智能、大数据等先进技术，具有明显的跨学科特征。当今，以数字孪生等为代表的智能技术已成为世界各国工业智能化发展的主阵地，是新工业革命、未来技术发展的核心，这些智能技术被广泛应用于智能车间、设备控制等领域。当下，我国经济面临数字化转型，离不开以数字孪生技术为代表的智能技术，尤其是作为我国经济主战场的制造业更是对数字孪生技术提出了明确需求。2020年，我国发布了《数字孪生应用白皮书》，其分析了数字孪生技术在现代制造业等领域应用的路径、前景等，重点涵盖汽车、电力、航空航天、船舶航运、铁路运输等领域。

学习笔记



微课
旋转供料
模块的搭建

数字孪生技术的核心是基于虚拟模型与物理设备的实时双向数据交互，通过高精度的数据采集、建模与分析，实现对物理设备全生命周期的数字化模拟与优化。数字孪生技术的另一核心是仿真与预测算法，通过对历史数据与实时数据的分析，模型能够预测设备的未来状态。

工业数字孪生的发展是数字化技术与工业需求深度融合的产物，其演进历程可划分为几个关键阶段，反映了从概念萌芽到全面落地的技术突破和应用扩展。

1. 概念萌芽期（1960—2000年）

数字孪生的概念最早可追溯到 20 世纪 60 年代，当时对数字孪生的定义是产品数字孪生，是指产品物理实体的工作状态和工作进度在信息空间中的全要素重构和数字化映射。产品数字孪生不仅包括几何形状、功能和性能描述，还涵盖全生命周期中形成过程和状态的描述，远超数字原型和虚拟原型的范围，是一种集成的多物理、多尺度、超现实、动态概率仿真模型，可用于模拟、诊断、预测和控制真实环境中产品物理实体的实现过程。还有一些学者，则是将数字孪生定义为从微观原子层面到宏观几何层面全面描述复杂产品的潜在生产或实际制造产品的一组虚拟信息结构。不管如何定义数字孪生，它都将成为“人与机器深度沟通的中间桥梁”。

2. 技术积累期（2010—2015年）

随着关键技术的成熟，物联网传感器成本下降，工业设备数据采集能力提升；云计算提供大规模数据存储和计算能力，支持孪生体实时更新；仿真技术提供多物理场仿真（如 ANSYS、Simulink），实现复杂系统动态模拟。迈克尔·格雷夫斯最终在 2011 年确定了“数字孪生”这一概念。自 2014 年以来，美国空军组织了一系列应用研究项目，与多家公司合作，取得了显著成果，其中包括 F-35 中机身制造数字化线索项目。2015 年，美国通用电气公司计划通过 Predix 云服务平台，利用数字孪生技术实现发动机的实时监控、及时检查和预测性维护。

在制造业，一些企业开始尝试利用数字孪生技术对生产线进行模拟和优化。通过构建虚拟生产线，企业能够在实际生产前对生产流程进行测试和调整，提前发现潜在问题，减少生产过程中的错误和浪费。然而，早期的数字孪生技术应用存在明显的局限性。一方面，数据采集的范围和精度有限，很多数据仍依赖人工采集和纸质记录，难以实现全面、实时的数据收集，这使得数字模型无法准确反映物理实体的真实状态。另一方面，当时的建模技术和算法不够先进，虚拟模型对物理实体的模拟和预测能力相对较弱，无法为实际决策提供足够精确的支持。而且，不同系统之间的数据交互和集成存在障碍，形成了一个个“数据孤岛”，限制了数字孪生技术优势的发挥。

3. 快速发展期（2016—2020年）

随着物联网、大数据、人工智能、云计算等新一代信息技术的飞速发展，数字孪生迎来了快速发展的黄金时期。

物联网技术的成熟，使得大量物理设备能够实现互联互通，实时采集各种数据，并将其传输到云端或本地服务器。这些丰富的数据为数字孪生模型提供了充足的“养分”，使其能够更准确地反映物理实体的状态和行为。

大数据技术则为海量数据的存储、管理和分析提供了有效的手段。通过对大规模数据的深度挖掘和分析，可以提取出有价值的信息和规律，为数字孪生模型的优化和决策支持提供有力依据。例如，在工业生产中，通过对设备运行数据、生产工艺数据等进行分析可以预测设备故障、优化生产流程，提高生产效率和产品质量。

人工智能技术的融入，进一步提升了数字孪生的智能化水平。机器学习、深度学习等人工智能算法能够对数字孪生模型进行自动优化和调整，使其能够自适应不同的工况和环境变化。例如，利用机器学习算法对设备的历史运行数据进行学习，建立故障预测模型，提前预测设备可能出现的故障，以便及时采取维护措施，降低设备停机时间。

云计算技术为数字孪生提供了强大的计算能力和灵活的资源配置。通过云计算平台，用户可以按需获取计算资源，快速构建和运行数字孪生模型，不必担心本地计算资源的限制。同时，云计算的分布式架构也有利于实现数字孪生系统的大规模部署和协同工作。

在这一时期，数字孪生技术在越来越多的领域得到应用和推广。在能源行业，数字孪生技术被用于智能电网的管理和优化。通过构建电网的数字孪生模型，可以实时监测电网的运行状态，预测电力需求和供应变化，优化电网的调度和维护策略，提高电网的稳定性和可靠性。在城市规划和管理领域，数字孪生技术可以创建城市的虚拟模型，对城市的交通、能源、环境等系统进行模拟和分析，为城市规划和决策提供科学依据，实现城市的智能化管理和可持续发展。

4. 深度整合期（2021 年至今）

如今，数字孪生技术已经广泛渗透到各个行业，成为推动产业升级和创新发展的力量。

在制造业，数字孪生技术贯穿于产品的设计、生产、测试、销售和售后服务的全生命周期。在产品的设计阶段，工程师可以利用数字孪生技术创建产品的虚拟模型，对产品的性能、结构、外观等进行模拟和优化，减少物理原型的制作次数，缩短产品研发周期，降低研发成本。例如，汽车制造商在设计新车型时，通过数字孪生模型可以模拟汽车在各种工况下的行驶性能，提前优化车身结构和动力系统配置。在生产过程中，数字孪生技术可以实现对生产线的实时监控和优化。通过将实际生产线映射到虚拟空间，企业能够实时掌握生产进度、设备状态、质量情况等信息，及时发现和解决生产过程中的问题，提高生产效率和产品质量。例如，富士康利用数字孪生技术对其工厂生产线进行实时监控和优化，实现了生产效率提升 30%，次品率降低 20% 的显著效果。在售后服务阶段，数字孪生技术可以帮助企业对产品进行远程监测和故障诊断。通过与产品的数字孪生模型进行实时数据交互，企业能够及时了解产品的运行状况，预测潜在故障，并为客户提供及时的维修服务和技术支持。

在医疗领域，数字孪生技术为个性化医疗和精准治疗提供了新的手段。通过对患者的生理数据、医学影像等信息进行采集和分析可以构建患者的数字孪生模型。医生可以利用这个模型对患者的病情进行模拟和预测，制订更加个性化的治疗方案。例如，在心血管疾病的治疗中，医生可以通过患者心脏的数字孪生模型，模拟不同治疗方案对心脏功能的影响，选择最适合患者的治疗方法。数字孪生技术还可以用于手术模拟和培训，提高医生的手术技能和操作熟练度，降低手术风险。

在智慧城市建设中，数字孪生技术发挥着至关重要的作用。通过构建城市的数字孪生模

 学习筆記

型，将城市的基础设施、交通、能源、环境、人口等各种信息进行整合和呈现，城市管理者可以实现对城市运行状态的全面感知和实时监测。基于数字孪生模型的数据分析和模拟预测，管理者能够提前制定应对策略，优化城市资源配置，提高城市的运行效率和管理水平。例如，在交通管理方面，通过数字孪生技术可以实时监测交通流量，预测交通拥堵情况，智能调整信号灯时间，优化交通疏导方案，缓解城市交通压力；在城市规划方面，数字孪生模型可以模拟不同规划方案对城市发展的影响，为规划决策提供科学依据，实现城市的可持续发展。

在能源领域，数字孪生技术助力能源企业实现智能化转型。以电网为例，数字孪生电网可以实时反映电网的运行状态，对电网设备进行实时监测和故障预测，实现电网的智能调度和优化运行。在新能源领域，如风力发电和太阳能发电，数字孪生技术可以对风力发电机、太阳能电池板等设备进行实时监测和性能优化，提高能源转换效率，降低运维成本。

此外，数字孪生技术在交通运输、农业、教育、军事等众多领域也都有着广泛的应用。例如，在交通运输领域，数字孪生技术可以用于智能交通系统的建设，实现对交通流量的实时监测和优化调度；在农业领域，数字孪生技术可以帮助农民实现精准种植和养殖，提高农业生产效率和质量；在教育领域，数字孪生技术可以创建虚拟实验室和教学场景，为学生提供更加丰富和真实的学习体验；在军事领域，数字孪生技术可以用于军事装备的研发、训练和作战模拟，提高军事作战能力和决策水平。总之，数字孪生技术已经成为推动各行业数字化转型和创新发展的关键技术，为社会和经济的发展带来了巨大的价值。

二、西门子 NX 软件介绍

2007 年，西门子公司收购美国 UGS 公司时，UGS 公司已经拥有一个比较完整的产品组合，覆盖制造业企业从设计到工艺的完整流程，旗下产品包括：3D 设计软件的三大顶级产品之一，集 CAD（计算机辅助设计）、CAE（计算机辅助工程）、CAM（计算机辅助制造）于一体的数字化产品开发系统 UX，制造仿真软件 Tecnomatix，制造业全价值链协同和数据管理软件 Teamcenter。收购完成后，西门子公司成立了西门子 PLM 软件（Siemens PLM Software）事业部，这一事业部成为西门子公司数字化布局和实施的重要力量，为西门子公司此后的数字化进程奠定了扎实的根基。

NX 软件是一个由西门子 PLM 软件事业部开发的数字化产品开发系统，它支持产品开发的整个过程，即从概念到设计再到分析与制造的完整流程。NX 软件将产品的生命周期阶段整合到一个终端到终端的过程中，运用并行工程 workflow、上下关联设计和产品数据管理使其能运用在所有领域。它为用户的产品设计及加工过程提供了数字化造型和验证手段，并且可针对用户的虚拟产品设计和工艺设计的需求，提供经过实践验证的解决方案。

MCD（mechatronics concept designer，机电概念设计）是西门子 NX 软件的一个重要数字化工具应用模块，也是数字孪生技术中的基石，可用于交互式设计和模拟机电系统的复杂运动。它融合了多个学科，包括机械、电气、流体和自动化方面，是一种将机器创建过程转变为高效机电一体化设计方法的解决方案。

MCD 是一种全新的机电设备工作过程仿真解决方案，可对包含多物理场以及通常存在于机电一体化产品中的自动化相关行为的概念进行 3D 建模和仿真。MCD 支持功能设计方法，可集成上游和下游工程领域，包括需求管理、机械设计、电气设计以及软件 / 自动化工程。

MCD 可加快机械、电气和软件设计学科产品的开发速度,使这些学科能够同时工作,专注于包括机械部件、传感器、驱动器和运动的概念设计。在进行数字化样机和产线研发过程中,利用 MCD 软件资源以虚拟的方式进行产品设计、仿真、调试,可实现创新性的设计,帮助机械设计人员满足日益提高的要求,不断提高机械的生产效率、缩短设计周期以降低成本,是产品开发过程中高效且环保的新型技术方案。

从 NX6.0 开始, NX 经过了数个版本的迭代发展,已经成为一款领先的集成化产品、工程和制造软件。本教材所有项目均基于 NX 2406 版本,该版本可以在很大程度上帮助用户更快、更好地开发产品,可以在更短的时间内交付更高质量的产品,为工程师提供强大的帮助。NX MCD 支持从产品开发的概念阶段到最终工程制造的各个环节,有效协调不同学科,致力于保证数据完整性,彻底实现设计者的设计意图,在实际过程中简化流程。

1. NX MCD 的特点

NX MCD 具有如下特点。

(1) 功能模块设计:功能模块是机电一体化设计的主要原则,这些模块构成了机电一体化系统跨学科设计的基础。以功能为驱动的设计强化了交叉学科之间的协作,也连接了实际需求和各种数据的管理,从而使设计人员能够跟踪客户需求,并把这种需求数据纳入设计过程中。此外,功能模块也提供了最初的概念设计结构,从而能够运作和评估可选择的设计方案。

(2) 逻辑模块设计与模块的重复使用:MCD 可以把功能模型分解为不同的、可在多个设计中重复使用的逻辑块,并通过设置具体的参数来实现设计过程的优化。在整个功能设计流程中,功能逻辑块的分割与设计是一项基础工作。

(3) 早期系统验证:在开发初期,MCD 提供了基于仿真引擎的验证技术,能够帮助设计人员获取电动机、伺服等驱动动力的仿真,初步验证概念设计的有效性。

(4) 支持多学科:MCD 是一种为多学科并行协作而设计的开发环境,涵盖了机械、电气伺服驱动、液压气动、传感器、自动化设计、程序编制、信息通信等诸多领域。

2. NX MCD 的功能

NX MCD 的主要功能如下。

(1) 支持机械、电气和软件等多个物理场的仿真,确保设计的全面性和准确性。

(2) 集成自动化工程,简化设计流程,提高设计效率。

(3) 能通过功能设计方法,将需求管理、机械设计、电气设计和软件工程有机结合,实现设计的协同和优化。

(4) 应用场景广泛,特别适用于机械设计、电气设计、软件/自动化工程等领域。它可以帮助工程师快速创建和验证机械部件的设计,支持电气设计工程师进行传感器、驱动器和运动部件的设计和仿真,还能集成自动化工程,简化软件和自动化系统的设计和调试过程。

通过 NX MCD,企业可以在产品开发过程中实现更高效的设计和制造,减少设计迭代次数,降低成本,提高产品质量。

三、进入 NX MCD 软件环境

安装 NX 之后,会在桌面上生成一个快捷启动图标。双击图标,正常情况下,系统将

弹出启动界面。

创建 NX 机电概念设计有三种不同的方法。

1. 直接创建新的 NX MCD

NX 软件启动后的界面如图 1-36 所示。



图 1-36 NX 软件启动后的界面

执行“菜单”→“文件”→“新建”命令，在弹出的对话框中选中“机电概念设计”选项卡，如图 1-37 所示。

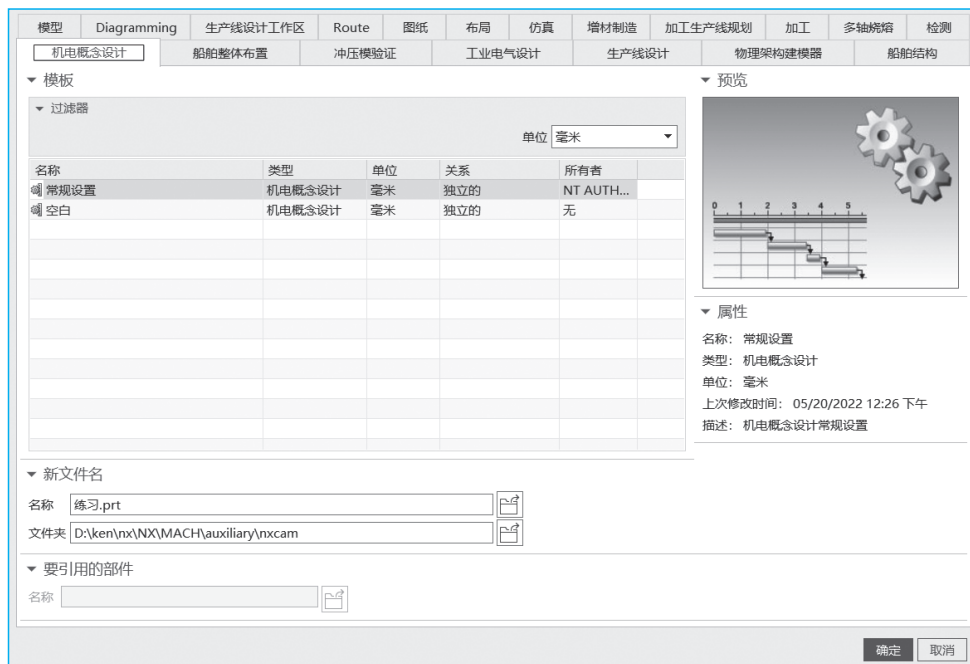


图 1-37 新建机电概念设计文件

“模板”选项区域中有两个选项，分别是“常规设置”与“空白”。其中，“空白”选项用于创建一个空白项目。若选择“空白”选项，输入文件名称后，单击“确定”按钮，进入空白机电概念设计界面，如图 1-38 所示。在该项目中，所需的一切几何体三维模型与 MCD 仿真组件均需要设计人员手动添加。

学习笔记

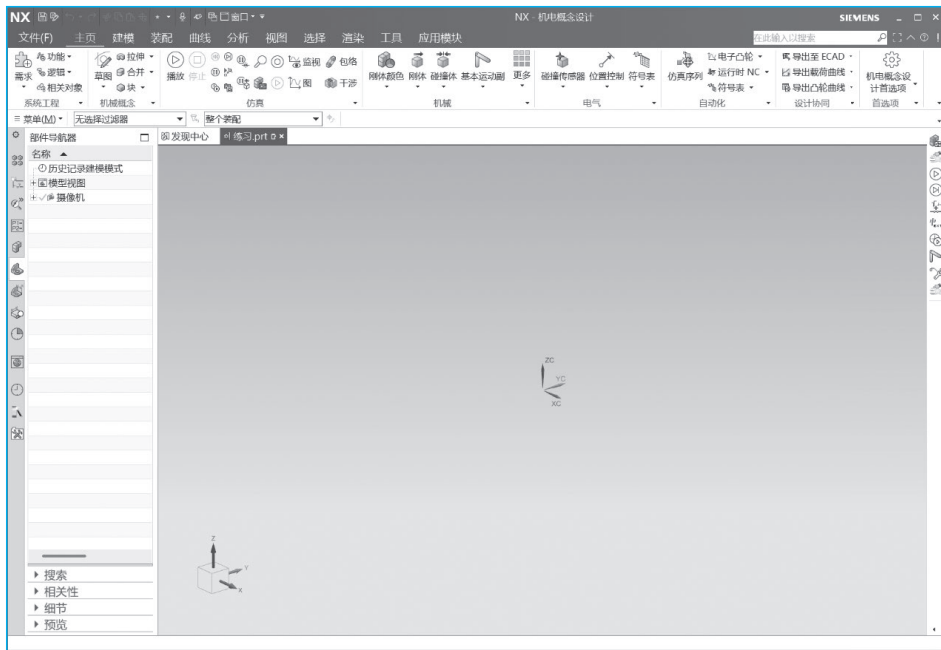


图 1-38 空白机电概念设计界面

若选择“常规设置”选项，输入文件名称后，单击“确定”按钮，进入常规设置机电概念设计界面，如图 1-39 所示。可以看到，系统自动生成了包含一个基本机电对象——碰撞体（collision body）的项目。

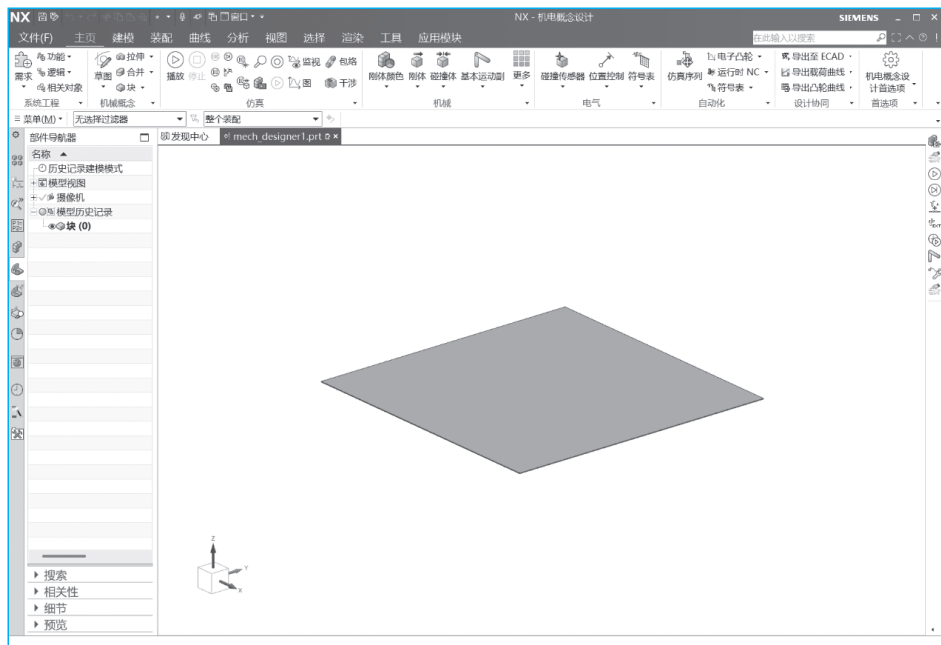


图 1-39 常规设置机电概念设计界面

学习笔记

2. 打开现有 NX MCD 文件

利用菜单命令，打开一个已经创建好的 MCD 项目的操作步骤：执行“文件”→“打开”命令，弹出如图 1-40 所示的“打开”对话框，选择一个已经创建的 MCD 工程文件（这里选择的是名称为“0_虚实联动平台”的工程文件）。

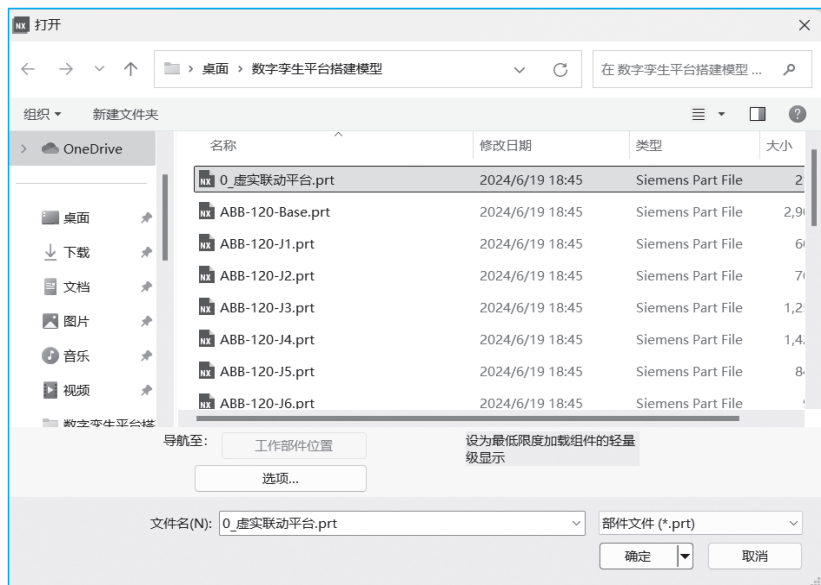


图 1-40 打开现有 NX MCD 文件

文件打开后，界面如图 1-41 所示。

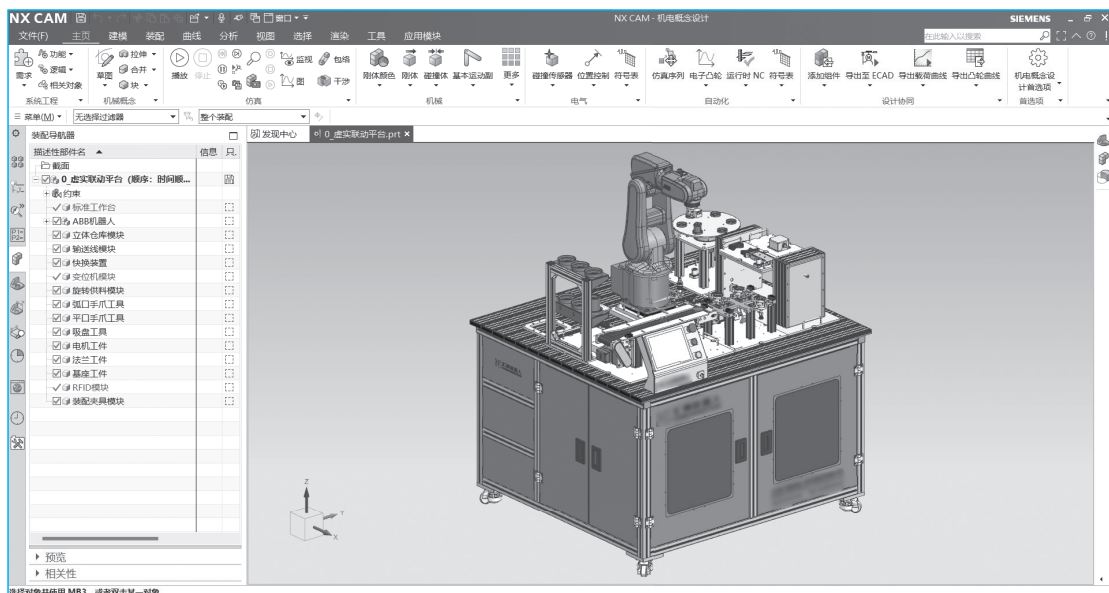


图 1-41 打开的已创建好的项目

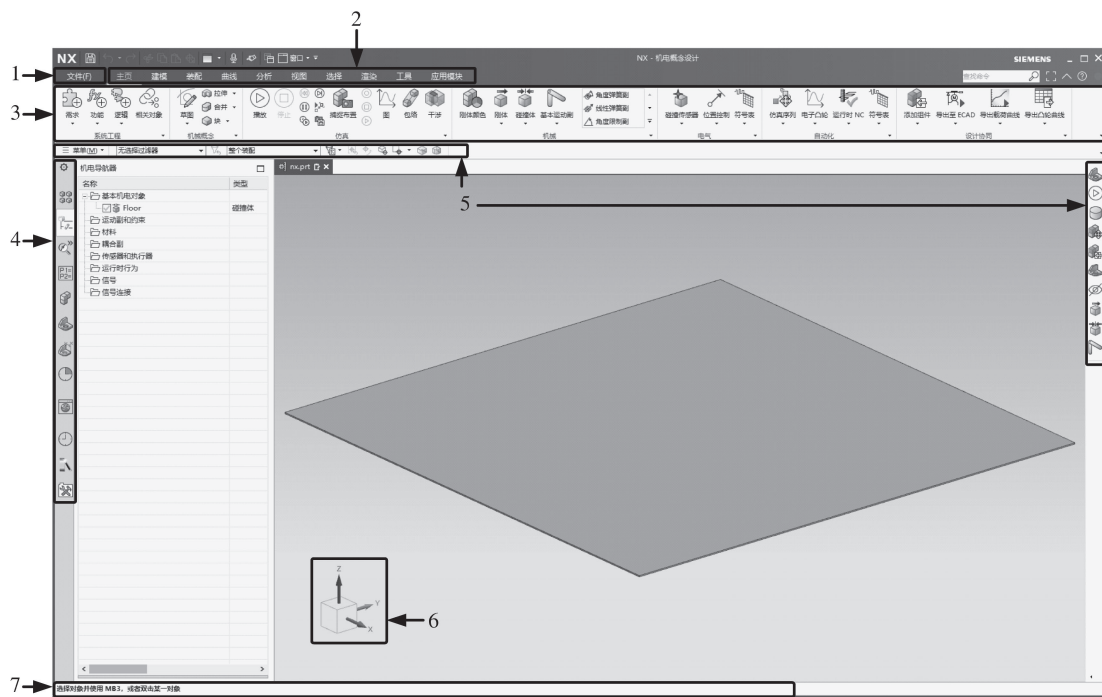
3. 导入 STEP 文件后打开 NX MCD

(1) 在打开的 NX 软件界面中，单击上方工具栏中的“打开”按钮，在弹出的“打开”对话框中，文件类型选择“所有文件 (*.*)”，然后选择所需的 STEP 文件，单击“确定”按钮打开文件。

(2) 在上方的菜单栏中选择“应用模块”选项卡，执行“更多”→“机电概念设计”命令，即可打开机电概念设计模块。

四、NX MCD 界面组成

NX MCD 界面组成如图 1-42 所示。



1—“文件”菜单；2—选项卡；3—命令栏；4—“带条”工具栏；5—上 / 右边框条；6—世界坐标；7—提示行。

图 1-42 NX MCD 界面组成

“文件”菜单：主要包含了对文件的操作、系统设置、导入 / 导出不同格式的文件等功能。

选项卡：由“主页”“建模”“装配”“曲线”“分析”“视图”“选择”“渲染”“工具”和“应用模块”十个选项卡组成。“主页”选项卡主要由 MCD 模块的命令组成，其他选项卡则包含 NX 中其他模块的命令。

命令栏：显示选项卡的命令，便于快捷操作。

“带条”工具栏：由不同的导航器组成，将完成的命令按功能进行分类。

上 / 右边框条：上边框条可自定义放置命令于此，右边框条显示最近使用的命令和预测可能会使用的命令。

世界坐标：系统的绝对坐标系，全局坐标系轴的方向与世界坐标三重轴的方向相同，也可通过单击此处变换不同视图。

提示行：显示当前的操作或运行状态。

五、文件菜单命令

采用上述方法新建 NX MCD 项目或者打开 NX 软件后，单击“文件”按钮，弹出“文件”菜单命令列表，如图 1-43 所示。



图 1-43 “文件”菜单命令列表

1. 首选项

“首选项”子菜单主要用于创建工程时的系统设置，包括各模块的设置、用户界面设置等。在此首选项设置的参数仅对当前 NX 有效，重启 NX 后参数将会恢复默认设置。“首选项”中主要的命令说明如下。

- (1) 装配：用于设置装配行为，例如是否以图形方式着重显示装配关联中的工作部件。
- (2) 用户界面：用于设置用户界面布局、外观、角色和消息首选项，并提供操作记录录制工具、宏和用户工具。
- (3) 可视化：用于设置图形窗口特性，如部件渲染样式，选择或取消着重颜色以及直线反锯齿等。
- (4) 测量：用于设置“面属性”“质量属性”以及“用曲线计算面积”测量命令的首选项。
- (5) 调色板：用于设置部件颜色特性。

上述设置将对系统产生全局性影响。

若要设置机电概念设计首选项，则执行“菜单”→“首选项”→“机电概念设计”命令，将弹出“机电概念设计首选项”对话框，如图 1-44 所示。该首选项设置仅对当前启动的 NX 有效，重启 NX 后将恢复默认设置；用户默认设置将对之后启动的 NX 一直有效。

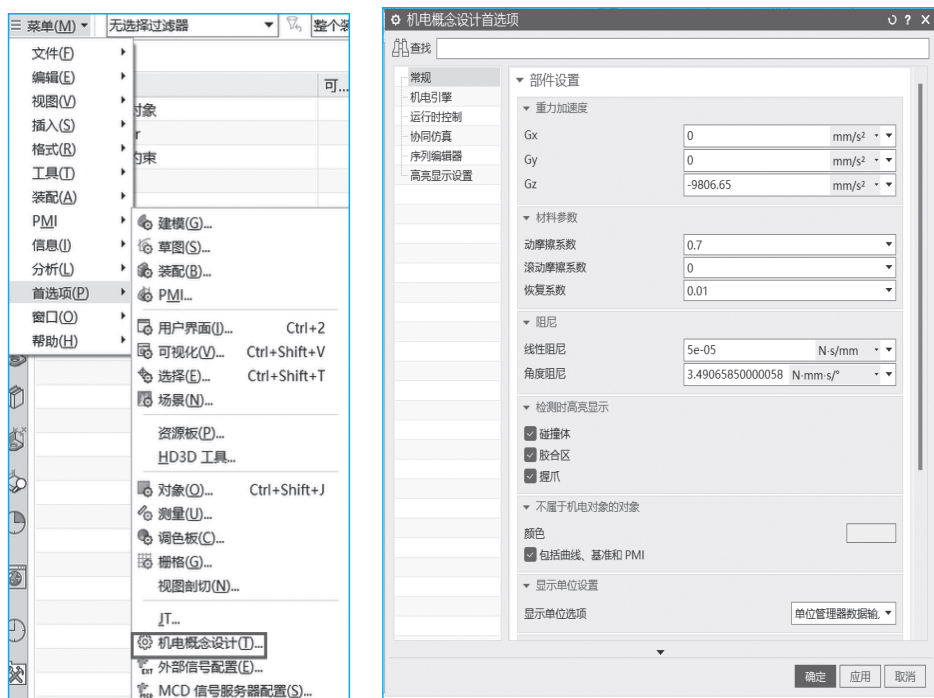


图 1-44 对当前启动的 NX 进行首选项设置

NX 不同功能模块之间的切换可通过主菜单的“文件”命令进行。例如，如果从当前的“机电概念设计”模块切换到“建模”模块，可以执行“文件”→“首选项”→“建模”命令，如图 1-45 所示。执行该命令后，工程功能就会由“机电概念设计”模块切换到“建模”模块，切换后的效果如图 1-46 所示。



图 1-45 从“机电概念设计”模块切换到“建模”模块

学习笔记

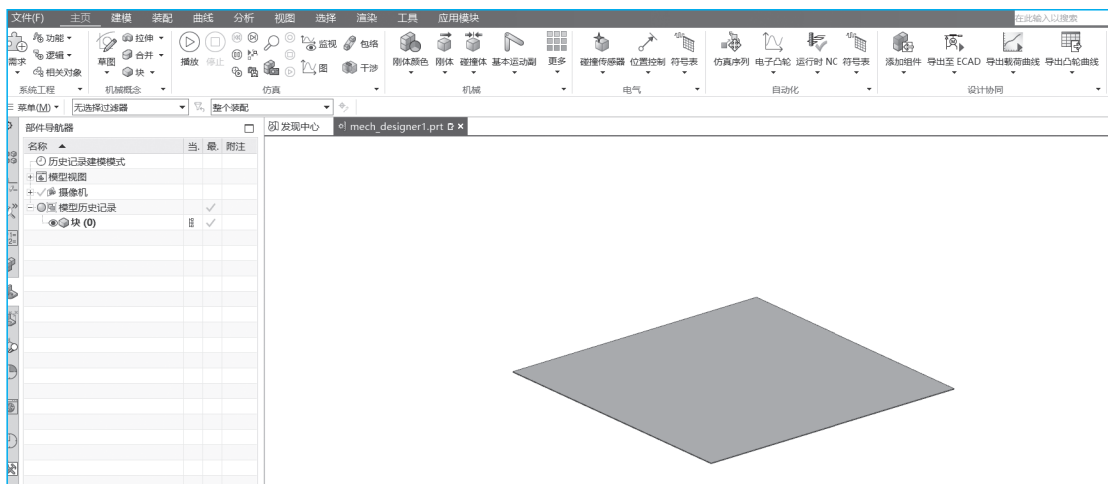


图 1-46 功能模块切换效果

2. 文件

针对文件的操作主要有新建、打开、关闭和导入等，分别用于创建一个新文件、打开已经创建的文件、关闭当前的文件和导入外部创建的输入文件。当创建或者打开一个 NX 工程文件后，单击工具栏处的“菜单”按钮，就会弹出如图 1-47 所示的子菜单。菜单中“文件”子菜单的许多操作命令与主菜单“文件”中的命令相同。

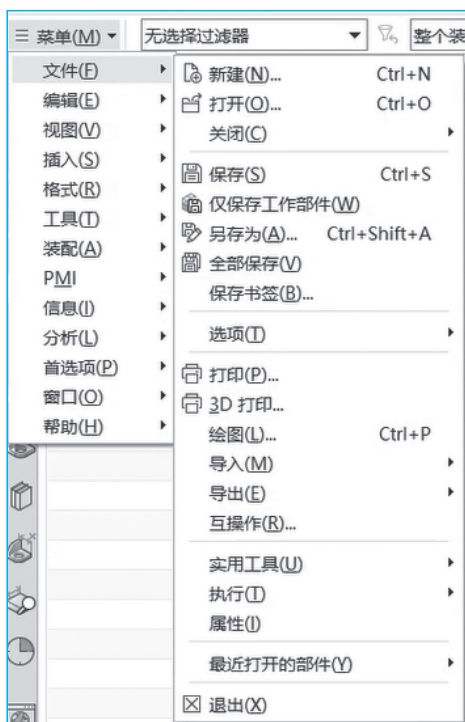


图 1-47 “菜单”中“文件”下拉子菜单

3. 实用工具

通过“实用工具”中的“用户默认设置”可以进行初始参数设置。一旦在此处完成设置，相关参数便会一直对 NX 有效，重启 NX 不会恢复默认设置。NX 对用户进行默认设置。