



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

智能机器人技术课程作业

阻抗控制实验

姓名：董慧灵 | 高思涵

学号：2213321129 | 2193224570

学院：电信学部

2024 年 11 月 25 日

智能机器人技术课程作业实验

本次作业内容：

1. 实验：机器人的阻抗控制实验

一、机器人的阻抗控制

1.1 实验目的

- 1、学习阻抗控制算法
- 2、学习利用阻抗控制算法实现机器人的柔顺性

1.2 实验设备及软件

MATLAB 及 Simulink 软件

1.3 阻抗控制原理

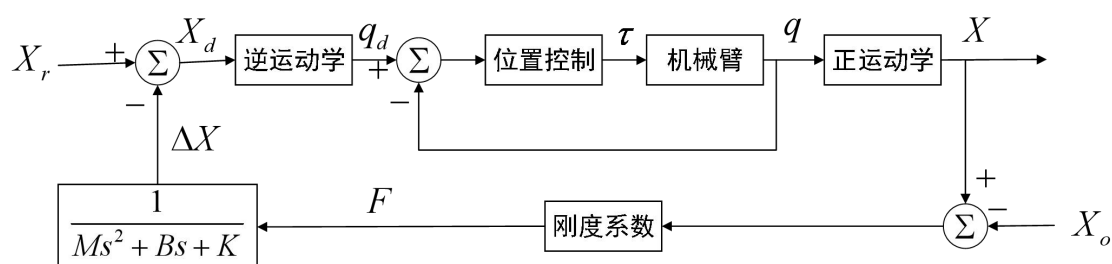


图 1 阻抗控制框图

阻抗控制的控制框图如图 1 所示，需要注意的是，该框图是仿真环境下所做的框图，因此其接触力 F 需要通过位置偏差（理想位置和实际位置之间的差值）经过刚度系数计算而得，实际环境下接触力 F 可以通过环境检测器检测而得；

阻抗控制的原理是通过建立机器人末端执行器位置偏差和环境间的接触力之间理想动态关系，从而计算位置调整指令，最后实现对外界环境的顺应。

为了达到这个目标，可以进行简单建模，将机器人末端执行器建模为弹簧阻尼系统，系统由三部分组成：物体&弹簧&阻尼器。从而，机器人末端执行器位置偏差 ΔX 和环境接触力 F 之间的动态关系可建模为：

$$M\Delta\ddot{X} + B\Delta\dot{X} + K\Delta X = F$$

其中 M 为物体质量， B 为阻尼系数， K 为弹性系数；

因而，对于给定的环境接触力 F （检测器测得/仿真模拟），可以逆向计算出想让 F 为 0 时所需要的位置调整量 ΔX ，并将 ΔX 反馈给机器人，实现对外界环境的顺应。

1.4 阻抗控制实验模型

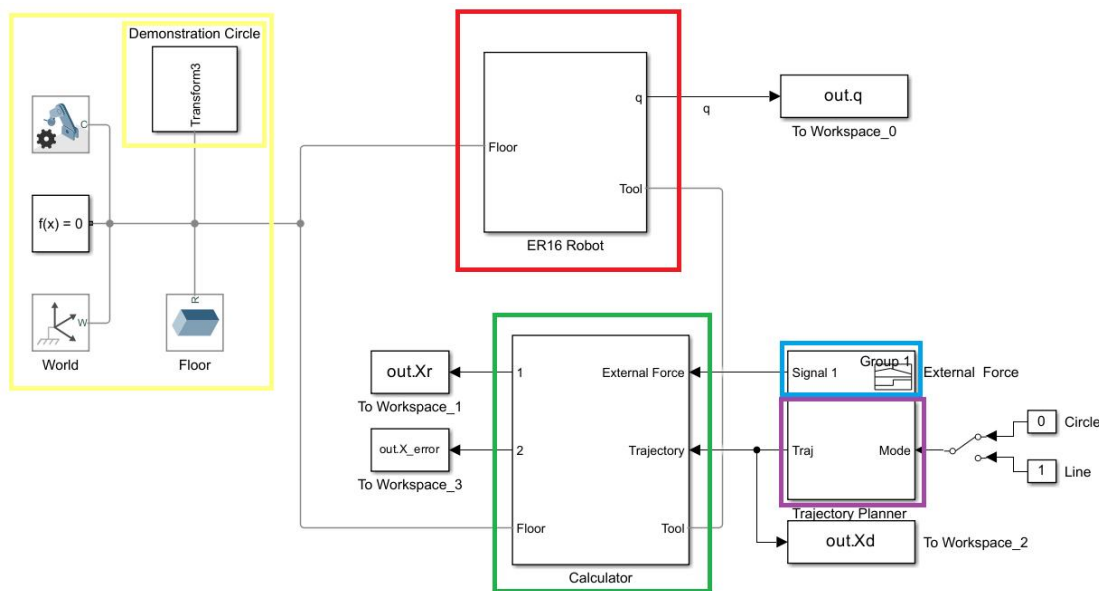


图 2 Simulink 整体框图

图 2 展示了实验用到的 Simulink 程序整体的框图，各功能模块通过不同颜色标识以便于区分：

- 黄色框：整体实现了 3D 环境下的基础场景设定功能，小黄色框（也就是 Demonstration Circle）展示了一个圆圈形的 3D 模型，用于实验演示。
- 蓝色框：给定了环境力。
- 紫色框：实现了机器人预设轨迹的设置（也就是理想轨迹 X_d ）的设置，其右侧的开关决定了其轨迹模式是 0（圆形轨迹）还是 1（直线形轨迹）。
- 绿色框：实现了机器人在环境力作用下的位姿调整计算，其以理想轨迹 Trajectory(X_d)和环境力为输入，以实际轨迹(X_r)，机器人各关节角度改变量（图中为 Floor，实际上是 q ）以及机器人末端执行器位置（图中为 Tool）为输出。
- 红色框：包含实验中所用到的机器人的三维模型，其接受绿色框的各关节角度改变量（图中为 Floor）以及末端执行器位置（图中为 Tool）来驱动 3D 机器人模型动作，最后把各关节角度量 q 输出至工作空间。

本次实验中，为了输出位置误差，在绿色框内部添加 **error** 如图 3 所示：

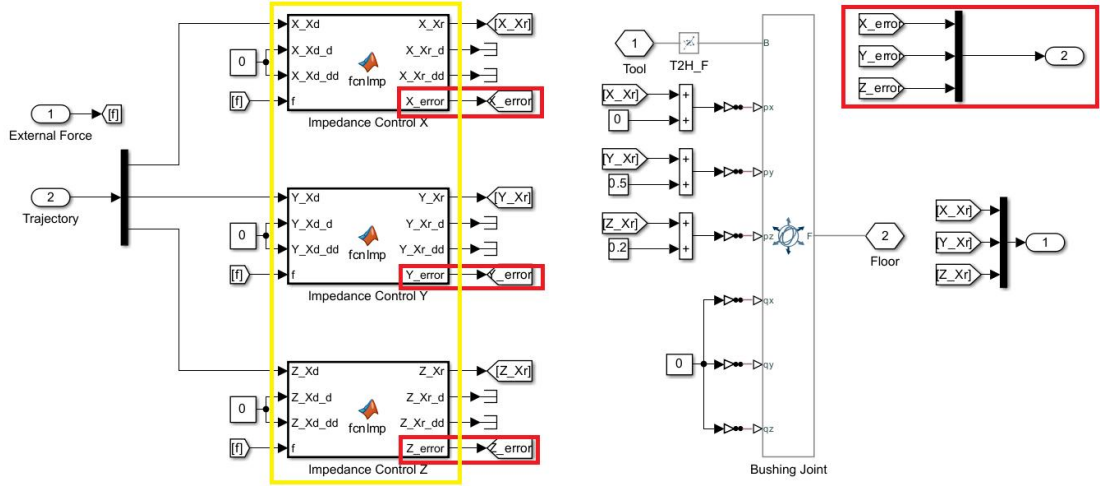


图 3 更改后的位姿调整计算框图

关于 X_error ，其计算方式为 $X_Xd - X_Xr$ ，本质是因为机器人末端满足：

$$f = m(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + b(\dot{x}_d - \dot{x}) + k(x_d - x)$$

同时为了满足仿真条件，将位置、速度、加速度离散化（使用了速度、加速度在很短的时间内近似不变的假设），最后给出三者的迭代更新公式：

$$\ddot{x}_r((n-1)T) = \ddot{x}_d(nT) + \frac{1}{m} \{ -f + b(\dot{x}_d(nT) - \dot{x}_r((n-1)T)) + k(x_d(nT) - x_r((n-1)T)) \}$$

$$x_r(nT) = x_r((n-1)T) + \dot{x}_r((n-1)T) * T$$

$$\dot{x}_r(nT) = \dot{x}_r((n-1)T) + \ddot{x}_r((n-1)T) * T$$

通过上面三式即可实现位置、速度、加速度的迭代更新。

1.5 实验仿真结果

1.5.1 不同阻抗参数的实验

使用初始阻抗系数($m=1; b=200; k=300$)进行实验，得到轨迹跟踪曲线图、轨迹跟踪误差及环境接触力变化图、各关节角度变化图如图 5~7 所示：

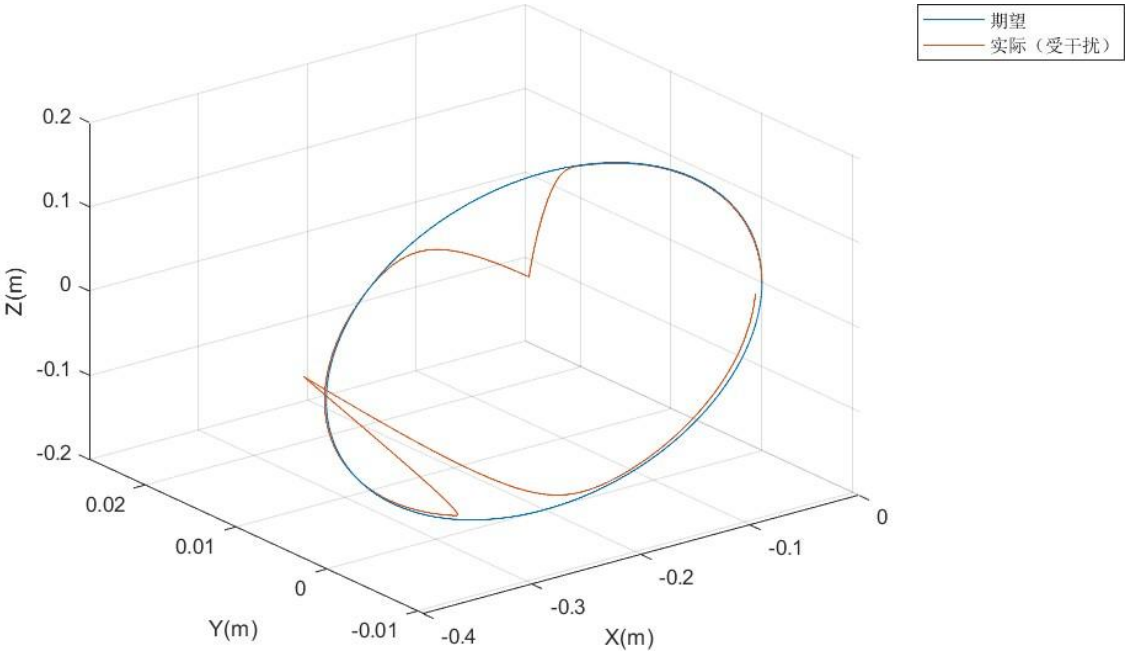


图 5 轨迹跟踪图

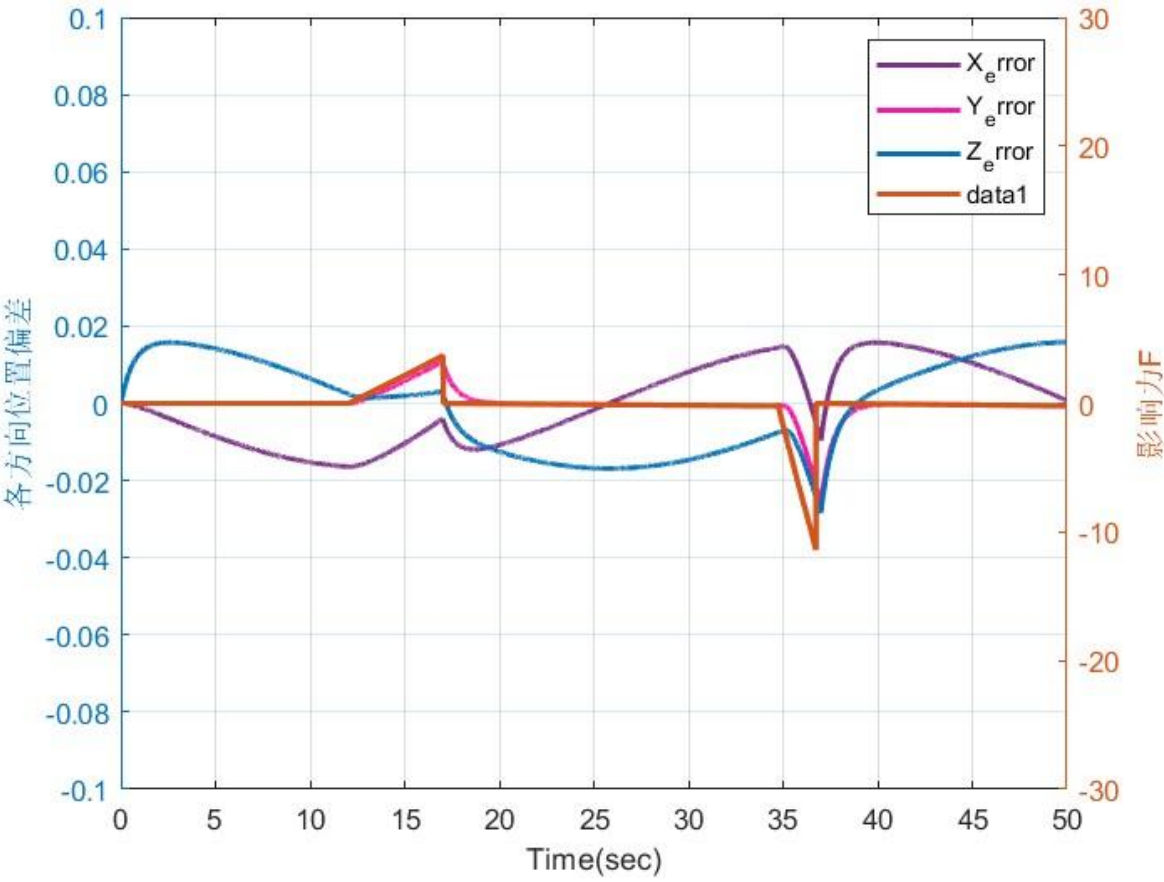


图 6 轨迹误差&接触力变化图

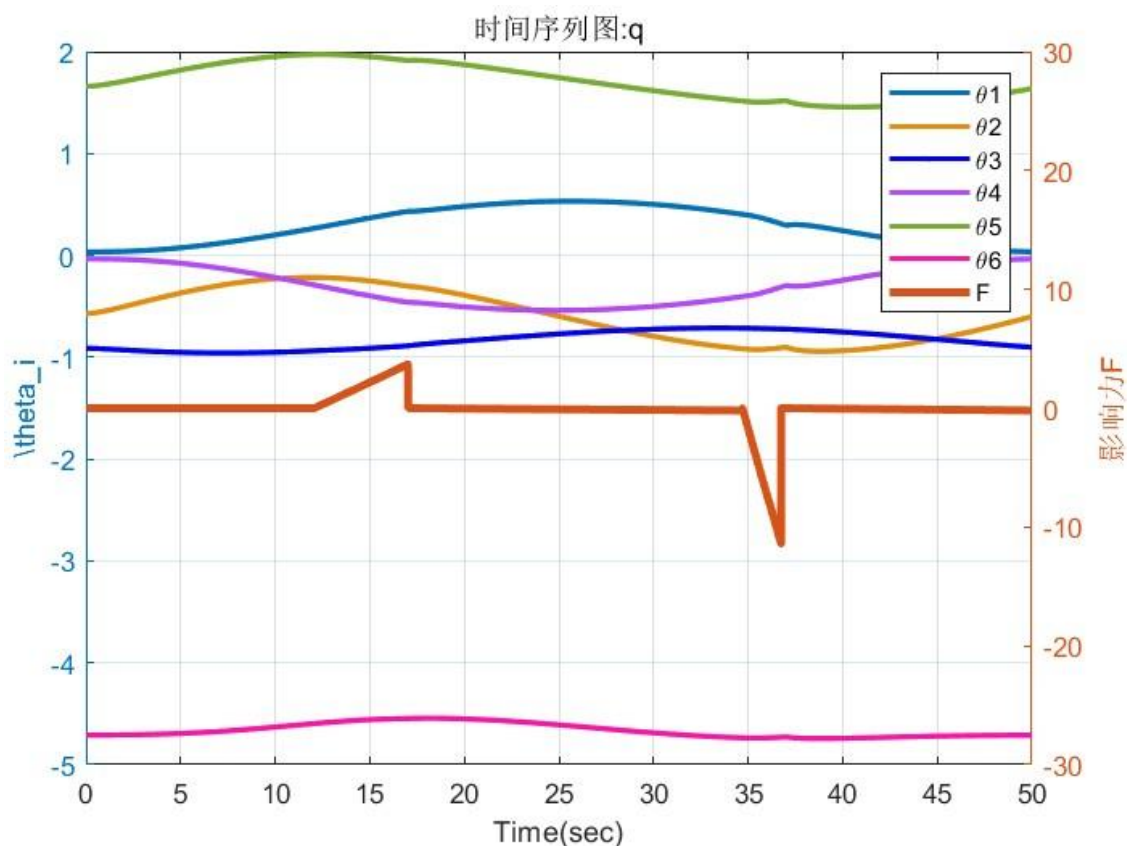


图 7 关节角度变化图

从图 5 和 6 中可以看出,在接触力增大的情况下,机器人的末端执行器在XYZ三个方向都做出了及时的应对措施,顺应了突然出现的接触力。从图 7 中可以看出,在接触力增大的情况下,关节角度因为末端执行器及时的顺应而没有出现较大的波动情况。在接触力突增时,虽然有一定的波动,但不会影响机器人整体的结构,说明阻抗控制起到了非常好的顺应效果。

为了验证阻抗参数对顺应控制的影响,分别选用组 1: X 方向参数($m=1;b=100;k=300$)和组 2: X 方向参数($m=1;b=200;k=3$)进行实验,相应的实验结果如下:

组 1: 经过实验,整体的轨迹跟踪效果和角度变动图变化很小,这里暂不贴出。值得注意的是位置偏差变化图 8:

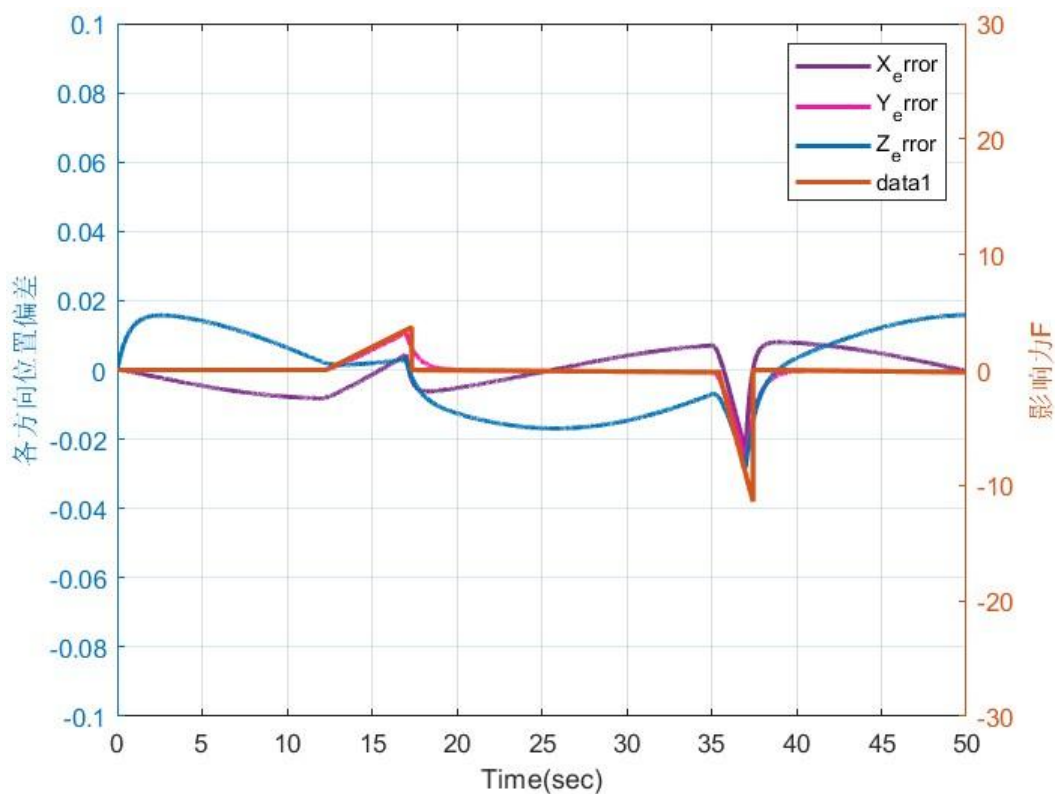


图 8 b 为原先的 1/2 倍时轨迹误差&接触力变化图

对比图 6 和图 8，可以发现，在将 X 方向轨迹误差参数放大为原始 1/2 倍的情况下， X 方向位置响应变慢，相应的轨迹误差变大，说明减小 b 有助于提升响应速度。

组 2：经过实验，各关节角度变动图变化很小，这里暂不贴出。值得注意的是轨迹跟踪图 9 和位置偏差变化图 10：

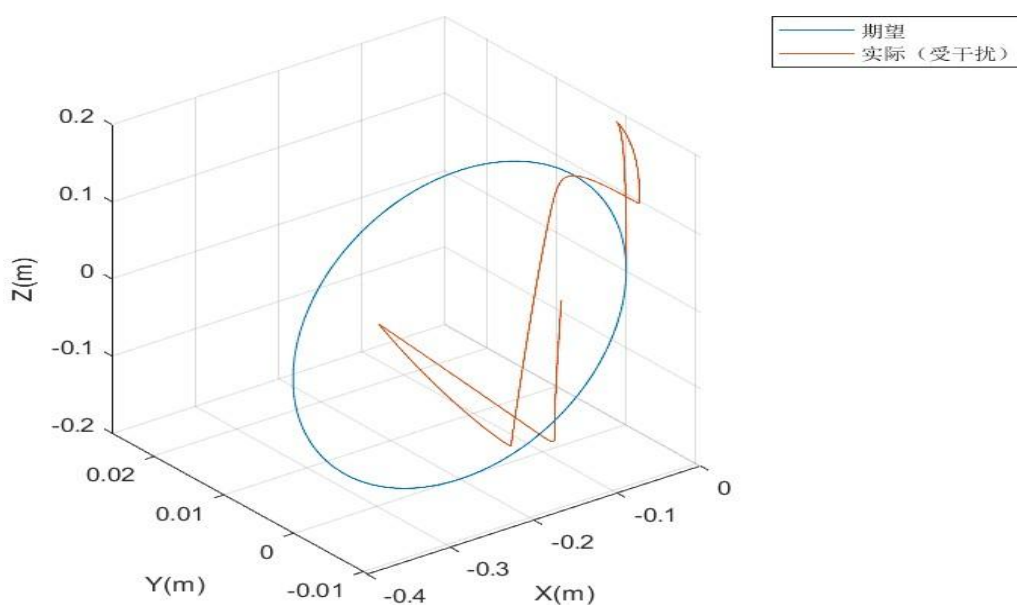
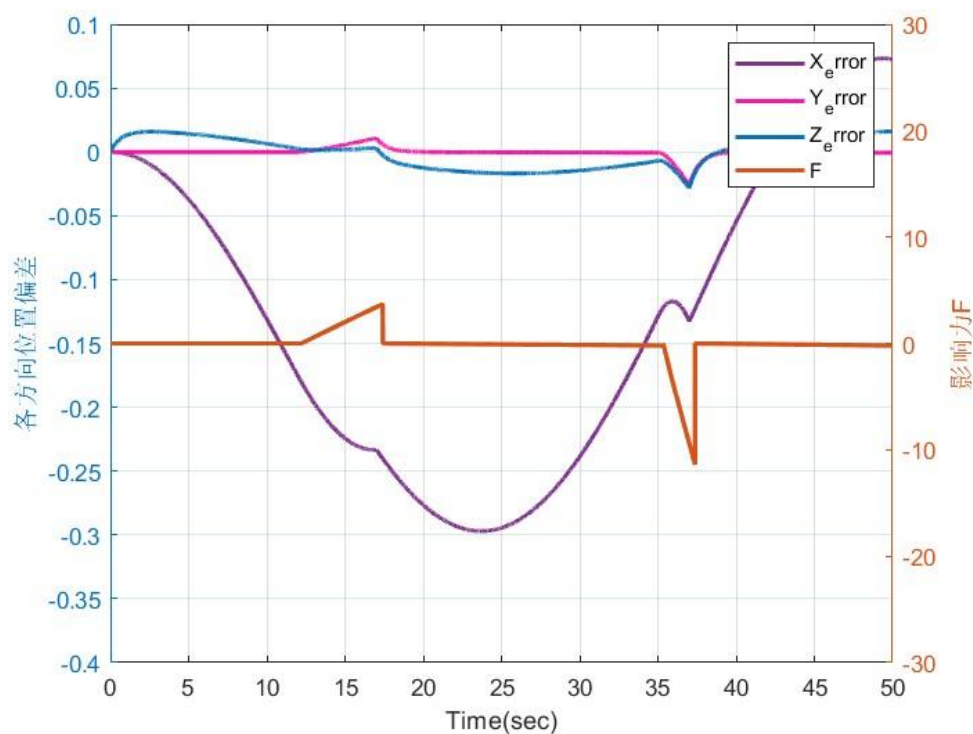


图 9 k 取 3（原始参数 1/100）时轨迹跟踪图

图 10 k 取 3 时轨迹误差&接触力变化图

从图中可以看出， k 值降低极大影响了轨迹稳定性。在遭受环境里扰动后，机器人末端工作物件难以回到原先预设轨迹。说明适当增大 k 可以减少陡震。

1.5.2 不同外界干扰力的实验

使用锯齿波函数（幅值 6，周期 0.15Hz， y 偏移量 1）进行实验，得到轨迹跟踪曲线图、轨迹跟踪误差及环境接触力变化图、各关节角度变化图如图 11~12 所示：

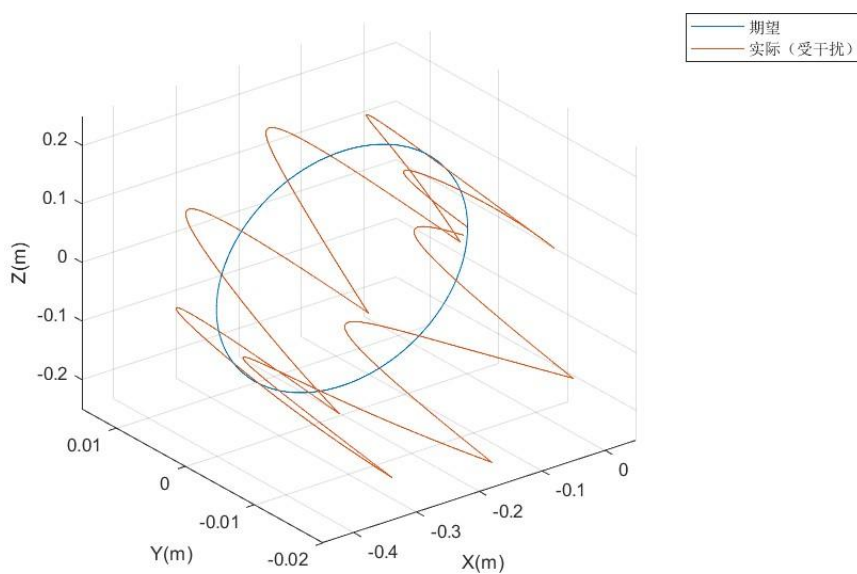


图 11 锯齿波函数接触力轨迹跟踪图

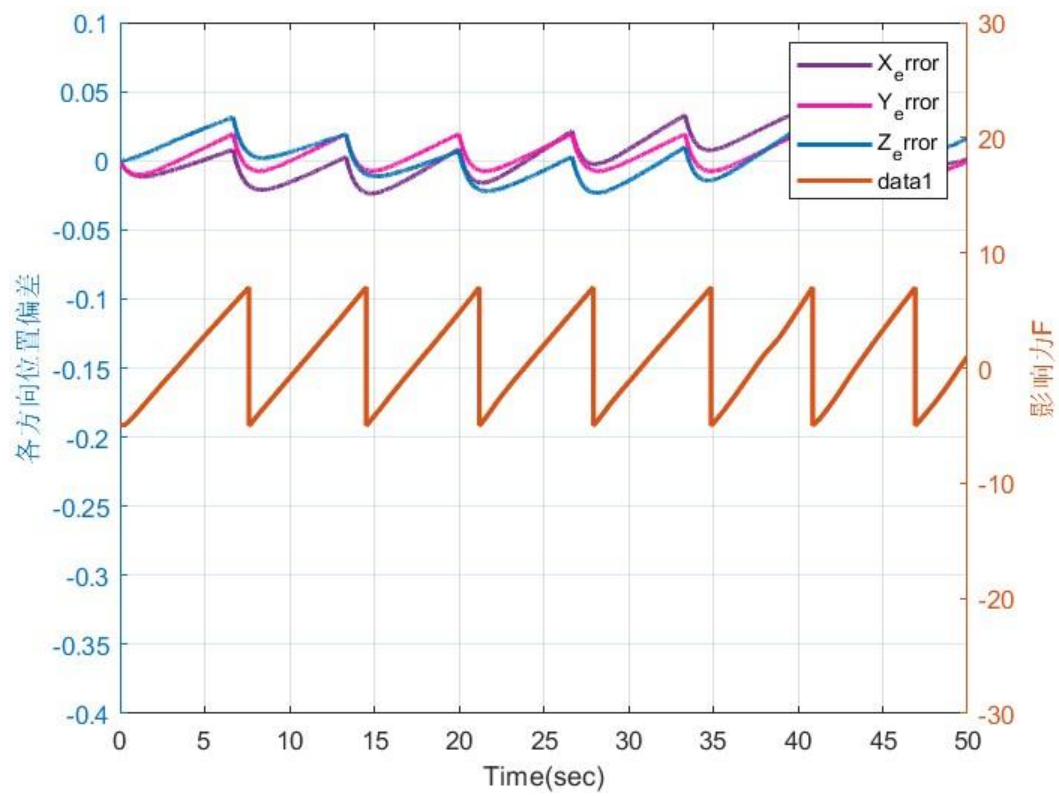


图 12 锯齿波函数轨迹误差&接触力变化图

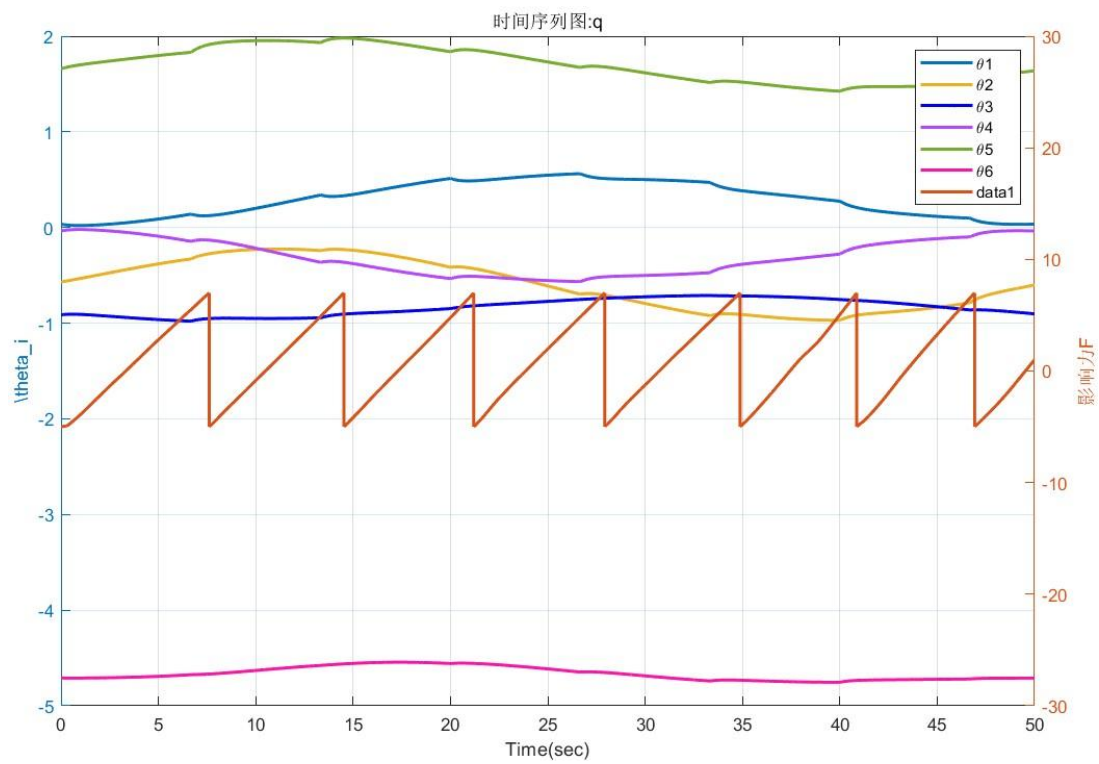


图 13 锯齿波函数关节角度变化图

综合对比可以看出，在阻抗控制的情况下，即使有很大的不规则力输入，仍然可以保证机器人主体各关节角度不发生陡变，增强了机器人的稳定性。

1.6 实验结论

实验结果表明，阻抗控制能够有效应对环境接触力的突然变化。在接触力增大的情况下，机器人末端执行器通过动态调整位置偏差，实现了对环境力的顺应。轨迹跟踪图和轨迹误差变化图显示，末端执行器能够及时调整轨迹，并尽量维持在接触力扰动后的稳定状态，表明阻抗控制具有较高的顺应性和适应能力。

阻尼系数 b 的减小虽然有助于提高响应速度，但会影响轨迹误差。说明需要权衡阻尼系数的设置，以在响应速度与轨迹误差之间取得平衡。

弹性系数 k 过小时显著影响了轨迹的稳定性，在外界干扰下，末端执行器无法回到预设轨迹，表明适当增大弹性系数有助于提升系统的稳定性和抗扰能力。

在使用锯齿波函数模拟复杂环境力时，即使受到不规则力的持续扰动，机器人关节角度变化依然保持稳定（如图 13），没有出现剧烈的波动。这表明阻抗控制能够显著增强机器人在复杂环境中的稳定性。