

膝关节外骨骼控制系统可视化编程与 控制仿真

《智能系统设计与仿真》实验报告

张恒硕 2212266



目 录

1	实验目的	3
2	实验原理	3
2.1	膝关节外骨骼系统	3
2.2	PID控制器	3
2.3	数值积分法	4
2.3.1	欧拉法	4
2.3.2	四阶龙格库塔法	4
3	实验结果与分析	4
3.1	界面设计	4
3.2	仿真结果展示	5
3.3	对比与分析	6
3.3.1	PID参数	7
3.3.2	数值积分方法	7
4	实验总结	7

1 实验目的

1. 实践MFC可视化编程，综合运用课程所学知识。
2. 设计PID控制器，掌握欧拉法和四阶龙格库塔法求解动力学模型。
3. 实现膝关节外骨骼控制系统的控制可视化设计，包括控制扭矩曲线、误差曲线、膝关节角度曲线和模拟动画。

2 实验原理

2.1 膝关节外骨骼系统

在考虑重力影响、摩擦力和阻尼效应时，可化简为二阶非线性系统，其状态空间表示如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1, x_2]^T = [\theta, \dot{\theta}]^T \\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\tau_e \\ \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} x_2 & \frac{1}{J}(-\tau_g \sin(x_1) - A \cdot \text{sgn}(x_2) - B \cdot x_2) \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{G}(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

2.2 PID控制器

$$\tau_e = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

离散化为：

$$\tau_e(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum e(j) \cdot \Delta t + K_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t}$$

其中 Δt 为采样时间间隔（仿真步长）。

- $e(t) = \theta_r(t) - \theta(t)$ ：角度误差。
- K_p ：比例系数，误差响应强度。

- K_i : 积分系数，消除稳态误差。
- K_d : 微分系数，抑制超调并提高系统稳定性。

2.3 数值积分法

2.3.1 欧拉法

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot \dot{x}(t)$$

计算简单但精度较低，在步长较大时会累积积分误差。

2.3.2 四阶龙格库塔法

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_n, y_n) \\ k_2 &= f\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot k_1\right) \\ k_3 &= f\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot k_2\right) \\ k_4 &= f(t_n + \Delta t, y_n + \Delta t \cdot k_3) \\ y_{n+1} &= y_n + \frac{\Delta t}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{aligned}$$

通过多次评估导数来提高精度。

3 实验结果与分析

本次实验完成了要求的所有功能，并进行了界面美化和性能优化。

3.1 界面设计

以下图1 on the following page展示了主窗口的界面设计，图2 on the next page展示了三个设置窗口的界面设计。

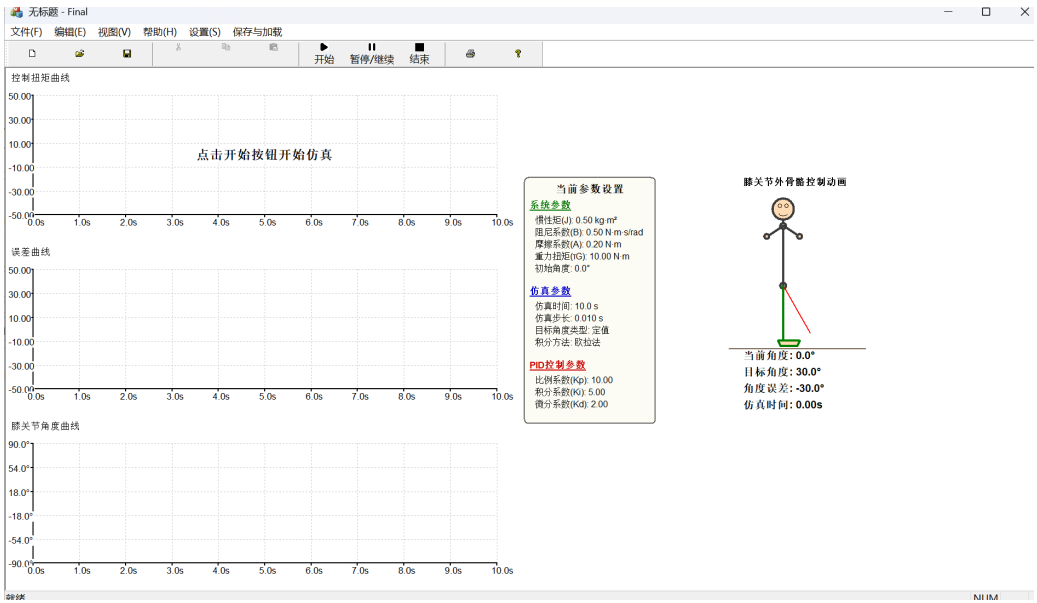


图 1: 主窗口界面设计



图 2: 设置窗口界面设计

3.2 仿真结果展示

以下图3 on the following page和4 on the next page展示了在定值和正弦情况下的仿真结果。

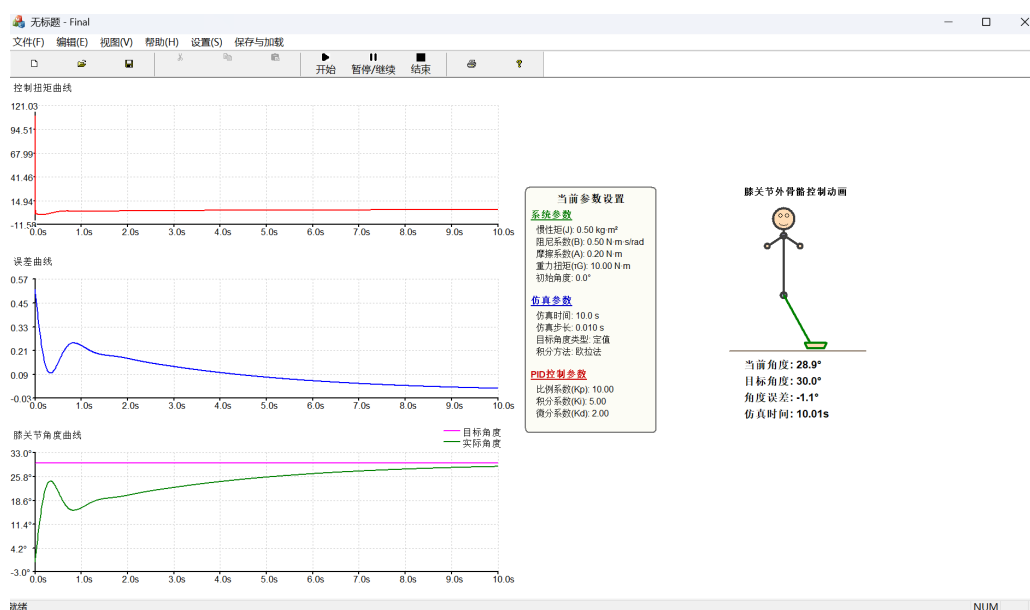


图 3: 定值仿真结果

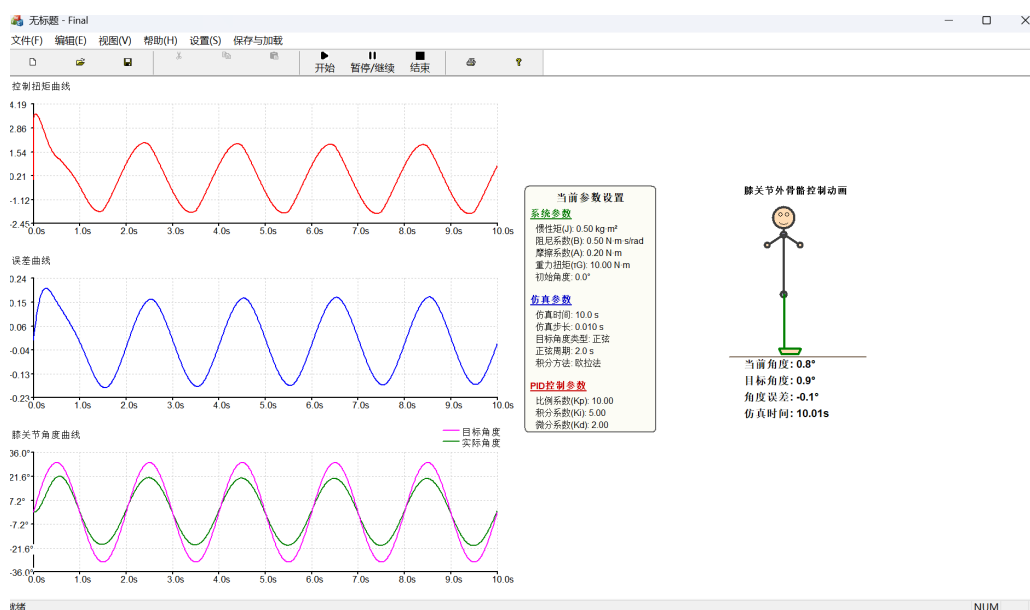


图 4: 正弦仿真结果

3.3 对比与分析

本次实验实践了各理论课讲过的诸多知识点，有很多可以作对照实验进行进一步学习，以下就对比结果进行说明，由于篇幅原因，就不逐个展示相应的仿真结果了。

3.3.1 PID参数

- K_p : 增大可加快系统响应速度, 但可能导致系统振荡甚至不稳定。
- K_i : 增大可减小稳态误差, 但可能导致系统响应变慢, 甚至积分饱和。
- K_d : 增大可抑制系统振荡, 减小超调量, 但可能放大高频噪声, 导致波动。

找到的一组合适参数是 $K_p = 40, K_i = 20, K_d = 10$, 其仿真结果如下图5, 超调量和稳态误差都较小, 调节速度也较快。

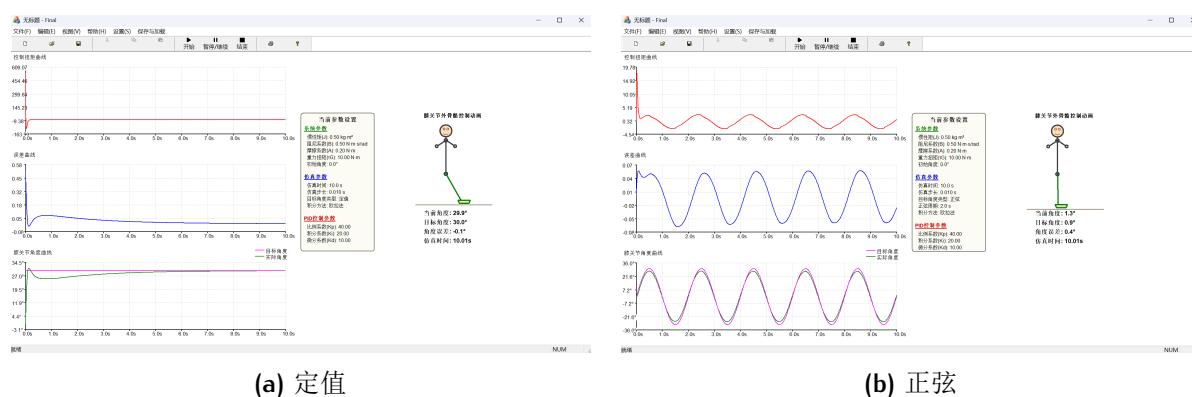


图 5: 优秀仿真结果展示

3.3.2 数值积分方法

- 较大步长: 欧拉法可能数值不稳定, 导致仿真结果发散; 而四阶龙格库塔法保持了良好的数值稳定性。
- 较小步长: 仿真结果差异不明显, 但四阶龙格库塔法计算量更大, 所需时间更长。

4 实验总结

本次实验成功实现了基于MFC框架的膝关节外骨骼PID控制系统的可视化仿真, 完成了三种曲线绘制、仿真动画、PID控制器、两种数值积分算法、三个设置窗口、参数保存与加载等功能, 是对本学期所有课程内容的一次综合实践。