

上海交通大学

学生实验报告

实验 2 直流调速系统实验

课程名称：运动控制系统

姓名：谢敬鱼

学号：516021910125

邮箱：xjy0104@sjtu.edu.cn

手机：13262935410

2019 年 5 月 4 日

1. 描述直流调速系统的基本结构和工作原理

直流调速系统的基本结构如图所示：

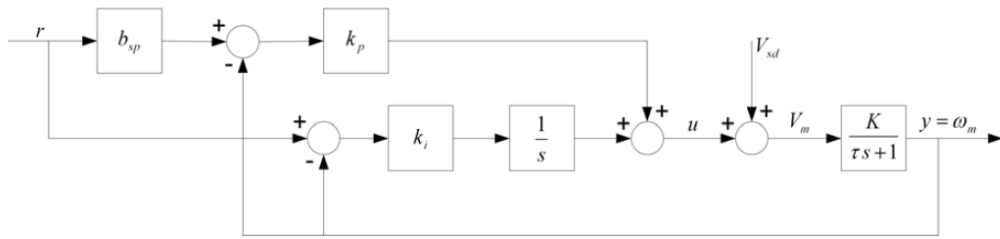


图 1 直流调速系统的基本结构

采用 PI 表达式表示直流电动机转速-电压的关系的传递函数实际 PI 控制器。其输入输出关系为：

$$u = k_p(b_{sp}r - y) + \frac{k_i(r - y)}{s}$$

其中 K_p 是比例系数， k_i 是积分系数， b_{sp} 是设定值权值。

2. 阶跃响应的稳态增益和时间常数

从转速基准 r 到角电机转速输出 w_m 的传递方程是：

$$G_{w,r}(s) = \frac{K(k_p s b_{sp} + k_i)}{s^2 \tau + (K k_p + 1)s + K k_i}$$

所要求的标准闭环特征多项式为： $s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2$

所以：

$$k_p = \frac{-1 + 2\zeta\omega_0\tau}{K}$$
$$k_i = \frac{\omega_0^2\tau}{K}$$

3. 分析 PI 控制下， k_i 和 k_p 对直流调速的影响

Exercise1:描述速度响应

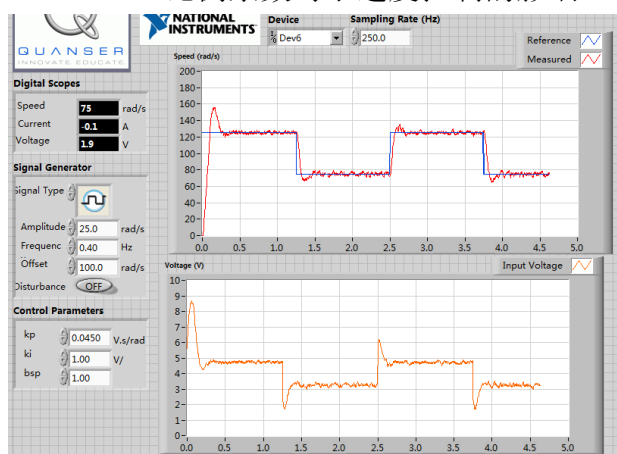
$$K_p = 0.05 \quad K_i = 1.00$$



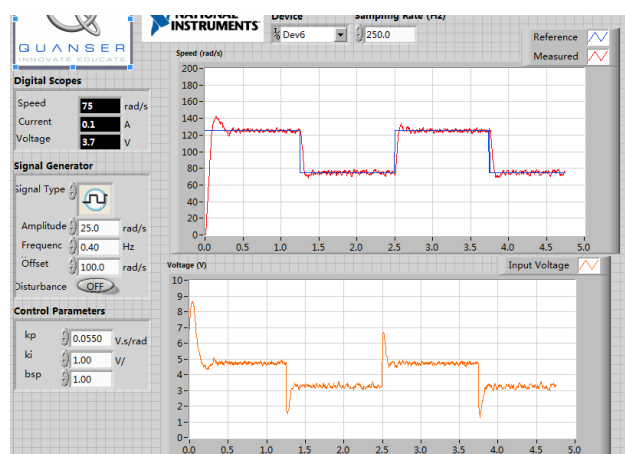
图 2 速度响应图

电机的速度变化遵循方波命令。红色信号是电机的测量速度，跟踪是由信号发生器产生的蓝色参考信号。

Exercise2: 比例系数对于速度控制的影响



(1) $K_p = 0.045$ $K_i = 1.00$

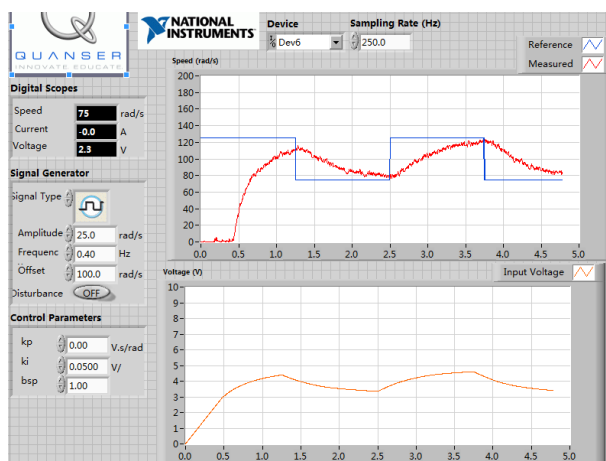


(2) $K_p = 0.05$ $K_i = 1.00$

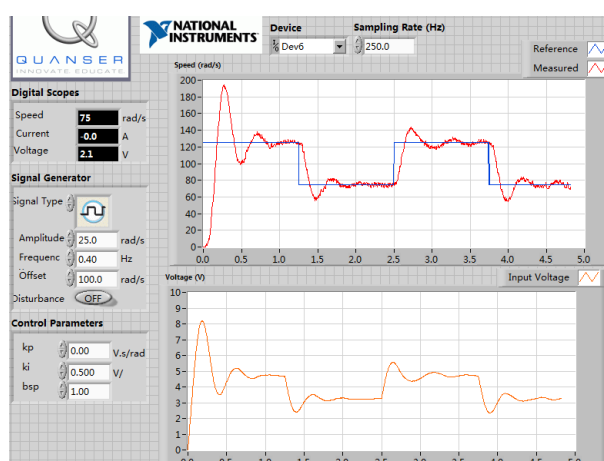
图 3 不同 k_p 条件下的控制效果

从图 2 和图 3 中我们可以看出随着 k_p 的增加，系统控制的超调量逐渐减小。

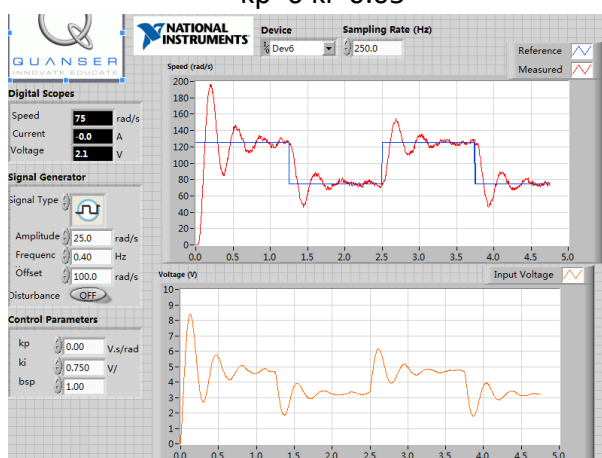
Exercise3: 积分系数对于速度控制的影响



kp=0 ki=0.05



kp=0 ki=0.5



kp=0 ki=0.75

图 4 不同 k_i 条件下的控制效果

从图 4 中对比观察可以发现，一般情况下，电机速度跟踪设定值时，没有稳态误差时使用纯积分控制。随着积分增益的增加，系统变得更加振荡。振荡频率也随着积分增益的增大而增大。

4. 比较仿真和实际的参数和曲线并分析

Exercise4: 计算超调和 peak time

$$\zeta = 0.75$$

$$\omega_0 = 16 \text{ rad/s}$$

计算 overshoot, peak-time

Overshoot 的计算公式:

$$PO = \frac{100(y_{\max} - R_0)}{R_0} = 100e^{-\left(\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} = 2.84\text{rad/s}$$

Peak-time 的计算公式:

$$t_p = t_{\max} - t_0 = \frac{\pi}{\omega_n(1-\zeta^2)^{0.5}} = 0.297s$$

Exercise5: 计算 K_p , K_i

根据公式可以计算得到:

$$K_p = \frac{-1+2\zeta\omega_0\tau}{K} = 0.0108$$

$$K_i = \frac{\omega_0^2 \tau}{K} = 0.533$$

Exercise6: 设计系统的控制

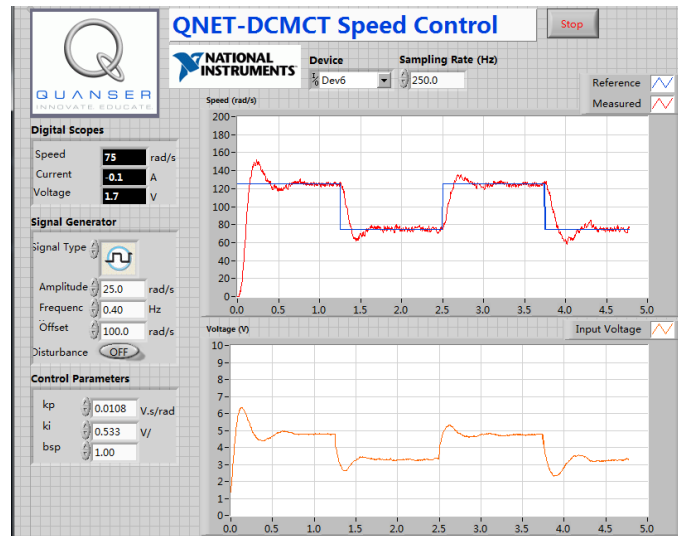


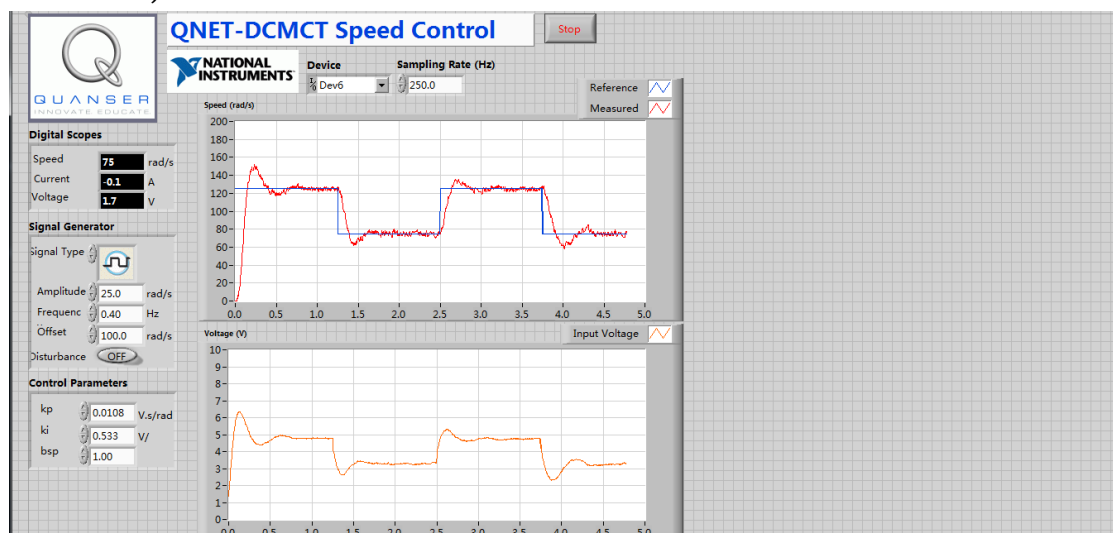
图 5 设计系统控制效果

Exercise7: 计算超调和 peak-time

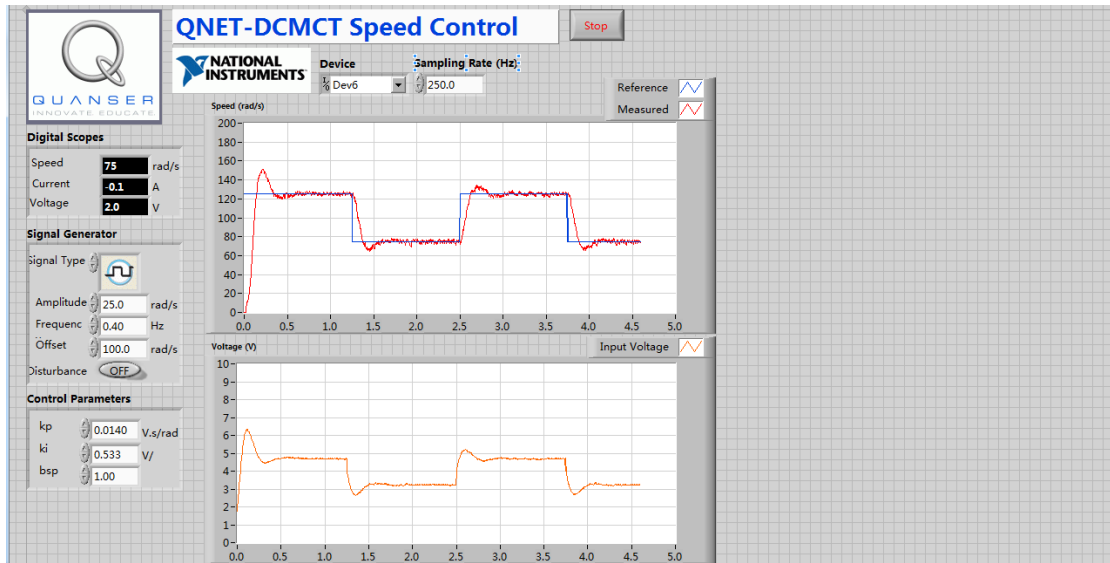
表 1 设计系统相关参数

| 描述 | y_max | y _{ss} | 超调量 | 峰值时间 |
|----|---------|-----------------|--------|-------|
| 速度 | 151.925 | 125 | 21.54% | 0.27s |
| 电压 | 6.35957 | 4.77 | 33.32% | 0.17s |

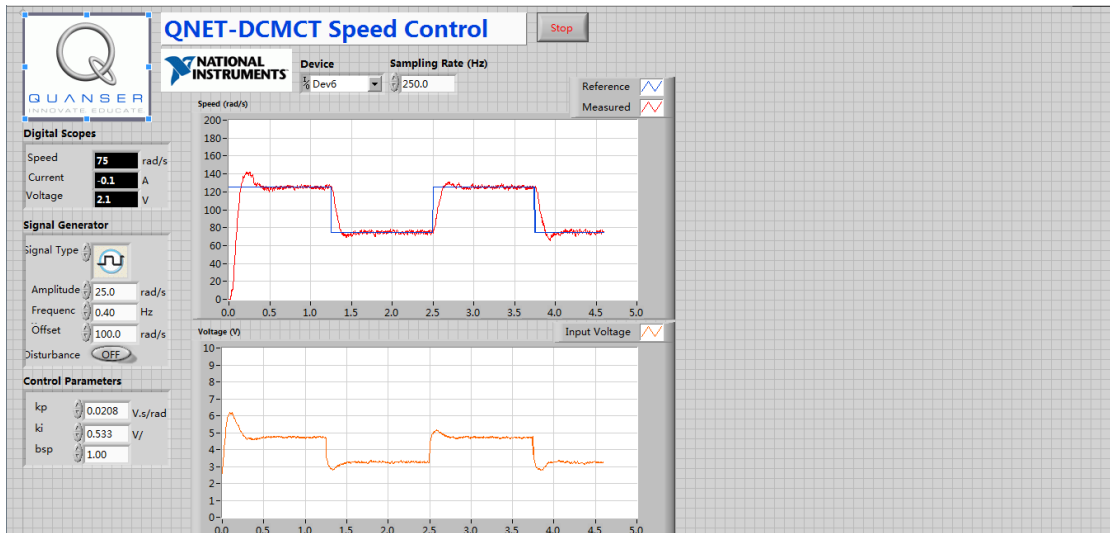
Exercise8: 调节 ζ 的影响



$$\zeta = 0.75$$



$$\zeta = 0.8$$



$$\zeta = 0.9$$

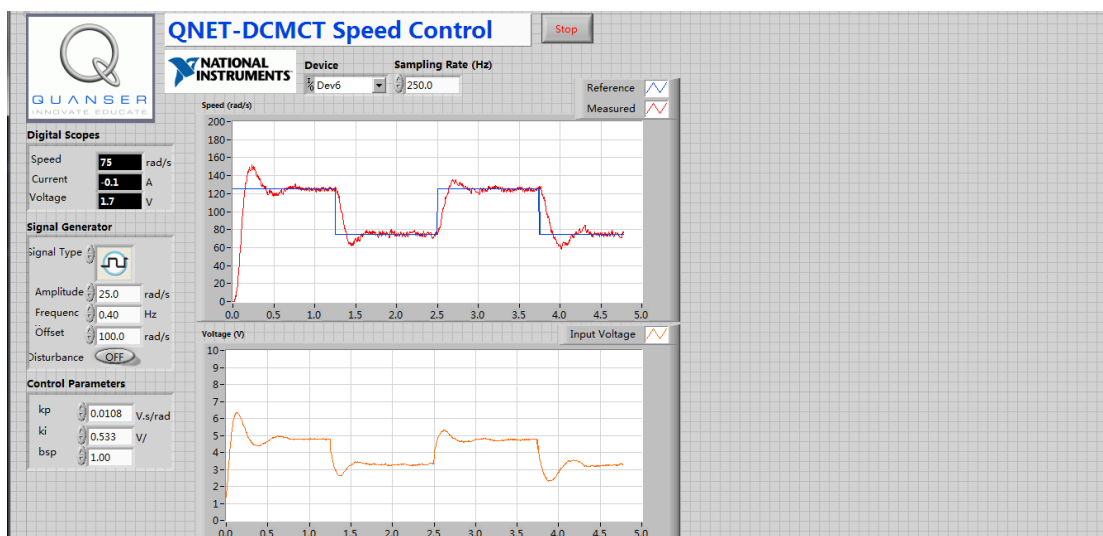
图 6 不同 ζ 值对应的系统响应

表 2 不同 ζ 值对应的系统响应

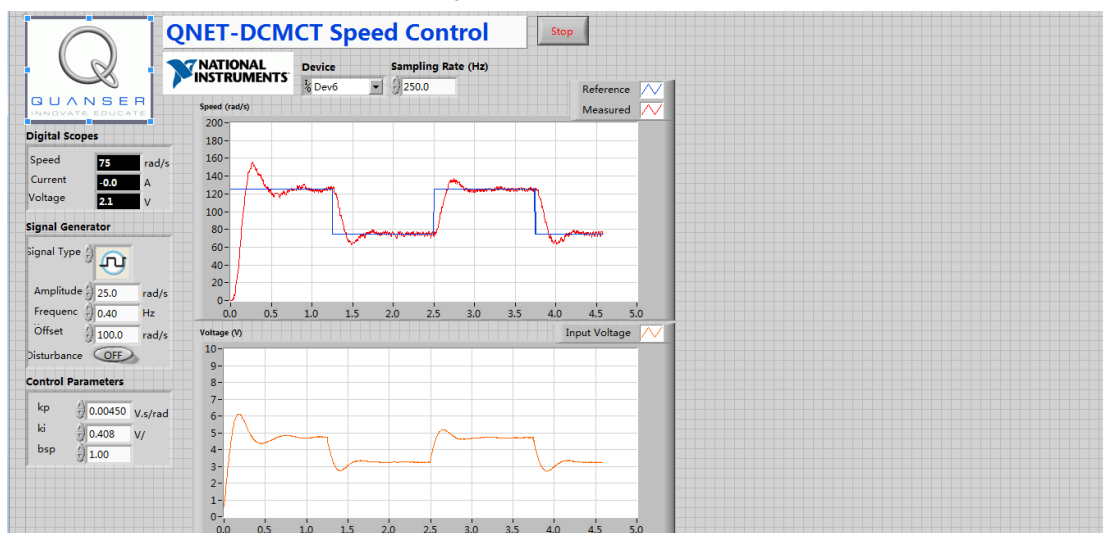
| 描述 | 速度 | | | | 电压 | | | |
|----------------|---------|-----------------|--------|--------|---------|-----------------|--------|--------|
| | y_max | y _{ss} | 超调量 | 峰值时间 | y_max | y _{ss} | 超调量 | 峰值时间 |
| $\zeta = 0.75$ | 151.925 | 125 | 21.54% | 0.27s | 6.35957 | 4.77 | 33.32% | 0.170s |
| $\zeta = 0.8$ | 151.321 | 125 | 21.05% | 0.263s | 6.32102 | 4.71 | 34.20% | 0.157s |
| $\zeta = 0.9$ | 141.893 | 125 | 13.51% | 0.257s | 6.18159 | 4.71 | 31.24% | 0.136s |

从表 2 以及图 6 中的系统响应结果对比可以得到，随着 ζ 的增加系统速度超调量减小，其对应的达到峰值的时间增加。电压响应与速度相应结果相同。

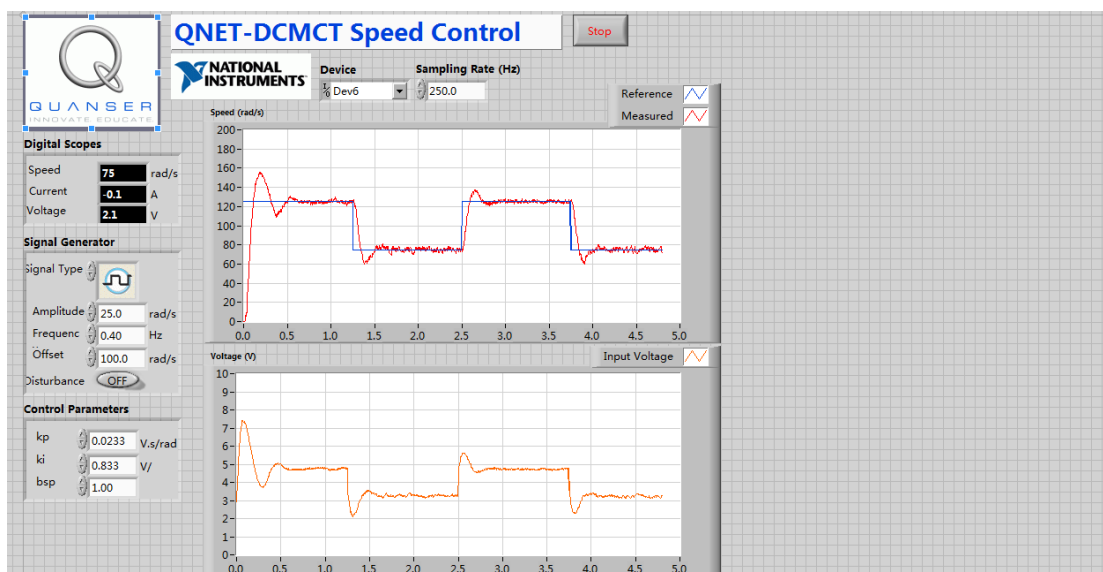
Exercise9: 调节 ω_0 的影响



$$\omega_0 = 16 \text{ rad/s}$$



$$\omega_0 = 14 \text{ rad/s}$$



$$\omega_0 = 20 \text{ rad/s}$$

图 7 不同 ω_0 对应的系统响应

表 3 不同 ω_0 对应的系统响应

| 描述 | 速度 | | | | 电压 | | | |
|-----------------|---------|-----------------|--------|--------|---------|-----------------|--------|--------|
| | y_max | y _{ss} | 超调量 | 峰值时间 | y_max | y _{ss} | 超调量 | 峰值时间 |
| $\omega_0 = 14$ | 155.989 | 125 | 24.79% | 0.325s | 6.11115 | 4.7 | 30.02% | 0.230s |
| $\omega_0 = 16$ | 151.925 | 125 | 21.54% | 0.27s | 6.35957 | 4.7 | 35.31% | 0.170s |
| $\omega_0 = 20$ | 155.789 | 125 | 24.63% | 0.22s | 7.41925 | 4.7 | 57.86% | 0.112s |

从表 3 和图 7 中，我们可以分析得到随着 ω_0 的增加 peak-time 减小，超调量增加大， k_p 增加， k_i 增加。

| 描述 | 变量 | 变化 | | 单位 |
|-------|-------|------------|---------------|---------|
| | | 改变 ζ | 改变 ω_0 | |
| 峰值时间 | t_p | 增加 | 减小 | S |
| 超调量 | PO | 减小 | 增加 | % |
| K_p | K_p | 增加 | 增加 | V.s/rad |
| K_i | K_i | 无影响 | 增加 | V/rad |

上述实验结果与理论分析一致！

5. 感想和建议

实验主要进行的是直流伺服电机的调速。通过设置不同的 k_i 和 k_p ，从超调量、峰值时间、稳态误差等方面研究 k_i 和 k_p 对直流调速系统的影响。根据 ζ 和 ω_0 的不同取值，计算得到不同的 PI 参数，进行系统的仿真。通过仿真结果比较这两个参数对于系统的影响。通过本实验我对于电机的组成和工作原理有了更加深入的了解，也体会到了不同的 P、I 参数设置对于调速系统的影响。

实验是对理论知识的实践，能够加深对于知识的理解。十分感谢老师在实验中的悉心指导和耐心解答，帮助我更好的完成实验，也十分感谢同组同学的合作，使实验进行的非常顺利。

实验建议：实验前可以先上传实验指导书，让同学预习一下相关实验操作，并复习一下相关的实验理论，这样实验的效果会更好！