

实验 1 物理建模及阶跃响应实验建模

SRV02 旋转伺服基本单元



物理建模及阶跃响应建模

实验目的：

- 通过经典力学、电工学原理的分析以及实验的方法，建立用于描述旋转伺服单元动力学模型的传递函数。

实验内容：

- 推导旋转伺服单元动力学方程和传递函数
- 通过阶跃响应测试获得旋转伺服单元的传递函数
- 通过系统实际响应实验，验证计算所得的传递函数

.

前期准备：

- 实验系统已经连接并通过“旋转伺服基本单元快速入门”的相关测试
- 具备传递函数基本知识，例如知道如何从微分方程获得传递函数
- 熟悉 MATLAB 和 SIMULINK 的基本操作
- 通过系统集成实验，已熟悉 QUARC 有关旋转伺服基本单元的基本操作。



注意：在本实验开始前，请确认实验系统已经正确连接并已通过“旋转伺服基本单元快速入门”的测试

1 背景

旋转伺服基本单元输出轴的旋转角速度与直流电机输入电压的关系可以近似描述为如下一阶传递函数：

$$\frac{\Omega_l(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

$\Omega_l(s)$ 是负载轴角速度 $\omega_l(t)$ 的拉普拉斯变换， $V_m(s)$ 是直流电机输入电压 $v_m(t)$ 的拉普拉斯变换， K 是稳态增益， τ 是时间常数， s 为拉普拉斯算子。

在本实验 1.1 节中，将对旋转伺服基本单元的传递函数进行解析推导，通过理论计算获得其中的 K 和 τ 参数。这些参数也可以通过实验的方法获得，尤其对于一些复杂系统，其系统动态特性未知时，实验的方法就显得非常有用。在 1.2 节中介绍一种重要的实验方法——阶跃响应法获得 K 和 τ 。最后，可将实验获取的模型参数与理论推导所得的参数进行比较。

1.1 物理建模

1.1.1 电气方程

直流电机电枢电气原理图和齿轮系结构如图 1.1 所示，在《旋转伺服基本单元用户手册》中课查询电枢电阻 R_m 、电枢电感 L_m 、反电势常数 k_m

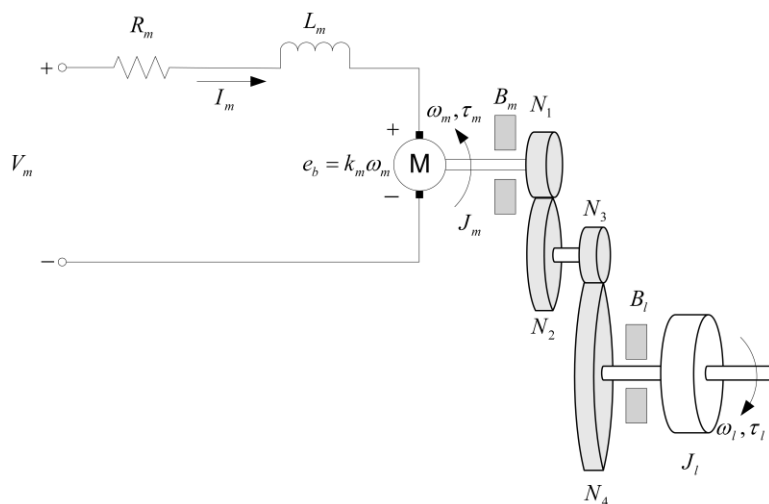


图 1.1 旋转伺服基本单元直流电机电枢电路和齿轮轮系构成

电机反电动势电压 $e_b(t)$ 的大小取决于电动机轴的速度 ω_m 和电动机的反电动势常数 k_m 。其方向与电流相反，大小由下式 1.2 给出：

$$e_b(t) = K_m \omega_m(t) \quad (1.2)$$

利用基尔霍夫电压定律，可得到如下方程：

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (1.3)$$

由于电枢电感 L_m 数值远小于其电阻，可忽略。式 1.3 可简化为：

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (1.4)$$

求解 $I_m(t)$ ，可得：

$$I_m(t) = \frac{V_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m} \quad (1.5)$$

1.1.2 动力学方程

在本小节中，我们将建立描述负载轴速度 ω_l 相对于所施加的电动机转矩 τ_m 的动力学方程。

由于旋转伺服基本单元是一个单自由度的旋转系统，牛顿第二运动定律如下式 1.6 所示：

$$J \cdot \alpha = \tau \quad (1.6)$$

其中 J 为物体的转动惯量（绕其质心）， α 为系统的角加速度， τ 为施加扭矩之和。如图 1.1 所示，如考虑旋转伺服基本单元折算在电机轴及负载轴上的粘性摩擦系数 B_m 和 B_l ，负载的动力学方程为：

$$J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_l \omega_l(t) = \tau_l(t) \quad (1.7)$$

其中 J_l 是负载的转动惯量， τ_l 是施加在负载轴上的总扭矩，负载的转动惯量包含齿轮系和任何外部负载，如惯性盘负载或杆负载。

电机轴上的动力学方程可写为：

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + \tau_{ml}(t) = \tau_m(t) \quad (1.8)$$

其中 J_m 是电机轴的转动惯量， τ_{ml} 是折算到电机轴上的负载扭矩；

负载轴转矩和其折算到电机轴上的负载转矩的关系式如下：

$$\tau_l(t) = \eta_g K_g \tau_{ml}(t) \quad (1.9)$$

其中 K_g 为齿轮速比， η_g 为传动效率。

直接安装在旋转伺服基本单元直流电机上的行星齿轮减速器（详见旋转伺服基本单元用户手册）的齿轮安装于减速器内部，在图 1.1 中用 N_1 和 N_2 两个齿轮来表示，传动比可写为：

$$K_{gi} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1.10)$$

安装于行星减速器轴上的齿轮 N_3 和负载轴上的齿轮 N_4 直接啮合，在外部可见，根据 N_3 、 N_4 的不同，SRV02 旋转伺服基本单元可分为“高减速比”、“低减速比”两个版本，其传动比为：

$$K_{ge} = \frac{N_4}{N_3} \quad (1.11)$$

旋转伺服基本单元齿轮系总减速比可写为：

$$K_g = K_{ge} K_{gi} \quad (1.12)$$

于是，负载转矩通过齿轮减速机构后折算到电机轴上的转矩为：

$$\tau_{ml} = \frac{\tau_l(t)}{\eta_g K_g} \quad (1.13)$$

显然负载轴旋转一圈，电机轴需要旋转 K_g 圈

$$\theta_m(t) = K_g \theta_l(t) \quad (1.14)$$

通过对时间求导，可获得电机轴的角速度 ω_m 与负载轴的角速度 ω_l 的关系：

$$\omega_m(t) = K_g \omega_l(t) \quad (1.15)$$

为获得描述负载轴转速相对于电机转矩关系的微分方程，根据式 1.13、1.15、1.17、1.18 可

以得到下式：

$$J_m K_g \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_m K_g \omega_l(t) + \frac{J_l \left(\frac{d\omega_l(t)}{dt} \right) + B_l \omega_l(t)}{\eta_g K_g} = \tau_m(t) \quad (1.16)$$

整理得：

$$(\eta_g K_g^2 J_m + J_l) \frac{d\omega_l(t)}{dt} + (\eta_g K_g^2 B_m + B_l) \omega_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (1.17)$$

定义如下变量：

$$J_{eq} = \eta_g K_g^2 J_m + J_l \quad (1.18)$$

$$B_{eq} = \eta_g K_g^2 B_m + B_l \quad (1.19)$$

式 1.17 可简化为：

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq} \omega_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (1.20)$$

1.1.3 电气方程和动力学方程相结合

在本小节中，将对 1.1.1 小节中电气方程和 1.1.2 小节中的动力学方程进行结合，求得电机电压与负载轴转速的关系表达式，电机转矩与输入电压关系如下：

$$\tau_m(t) = \eta_m k_t I_m(t) \quad (1.21)$$

其中 k_t 为直流电机转矩常数（单位：N.m/A）， η_m 为电机效率， I_m 为电枢电流。详见《旋转伺服基本单元用户手册》中有关电机规格的相关说明。

将第 1.1.1 节中的式 1.5 给出的电动机电枢电流代入电流-转矩关系式 1.21 中，可以得到输入电压 $V_m(t)$ 和负载轴速度 $\omega_l(t)$ 的关系式。

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m \omega_m(t))}{R_m} \quad (1.22)$$

将式 1.15 代入式 1.22 中得到：

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \omega_l(t))}{R_m} \quad (1.23)$$

如果将式 1.23 代入式 1.20，可得：

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq} \omega_l(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t (V_m(t) - k_m \omega_m(t))}{R_m} \quad (1.24)$$

整理可得：

$$J_{eq} \left(\frac{d\omega_l(t)}{dt} \right) + \left(B_{eq} + \frac{K_m \eta_g K_g^2 \eta_m k_t}{R_m} \right) \omega_l(t) = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t V_m(t)}{R_m} \quad (1.25)$$

可写为：

$$J_{eq} \left(\frac{d\omega_l(t)}{dt} \right) + B_{eq,v} \omega_l(t) = A_m V_m(t) \quad (1.26)$$

其中等效阻尼

$$B_{eq,v} = \frac{B_{eq} R_m + K_m \eta_g K_g^2 \eta_m k_t}{R_m} \quad (1.27)$$

执行机构增益

$$A_m = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t}{R_m} \quad (1.28)$$

1.2 阶跃响应实验建模

在第 1.1 节中介绍了物理建模的过程，此外系统的线性模型也可以通过实验方法进行确定。主要思想是通过实验观察系统对不同输入的不同响应，并据此得到系统模型的结构和参数，修改参数直到模型仿真结果和实验数据趋于一致。实验建模时系统输入多种多样，实验方法也各不相同。本次实验重点介绍阶跃响应法用于旋转伺服基本单元的实验建模，另外一种重要的实验建

模方法频率响应法实验建模将在后续课程实验中进行。

阶跃响应法是一种针对稳定系统的实验建模方法，当系统输入阶跃信号，系统的响应过程同时被记录。如考虑系统传递函数形式为一阶惯性环节，如下式 1.29；

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.29)$$

通过如图 1.2 所示的阶跃响应测试曲线，我们可以确定式 1.29 中的 $K = 5rad/V.S$ 和 $\tau = 0.05S$ 。

阶跃信号开始于 t_0 时刻，阶跃信号最小值 u_{min} 和最大值 u_{max} ，系统初值为 y_0 ，当阶跃信号输入时，系统响应并最终达到稳态值 y_{ss} 。

系统稳态增益可以通过测量系统的输入输出信号获得，

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (1.30)$$

其中的 $\Delta y = y_{ss} - y_0$ ， $\Delta u = u_{max} - u_{min}$

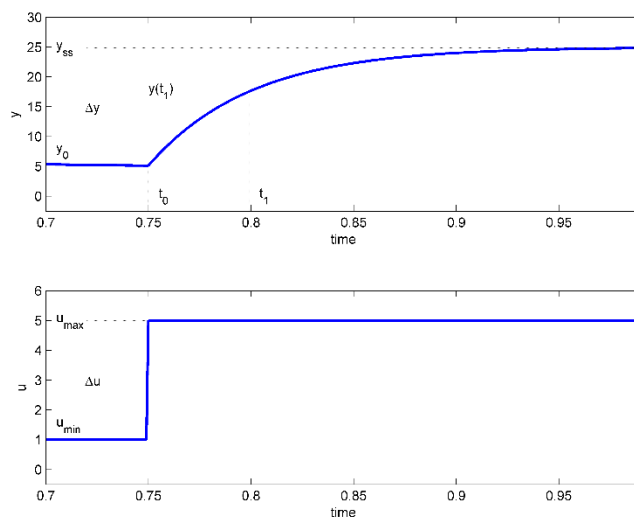


图 1.2: 阶跃响应法的系统输入输出信号

为获得系统的时间常数 τ ，可先计算出在时间常数 τ 时刻系统的理论输出值，

$$y(t_1) = 0.632y_{ss} + y_0 \quad (1.31)$$

然后在图 1.2 所示的系统阶跃信号输入输出响应实测曲线中，找到 $y(t_1)$ 对应的时刻 t_1 ，

由于

$$t_1 = t_0 + \tau \quad (1.32)$$

可得系统的时间常数为：

$$\tau = t_1 - t_0 \quad (1.33)$$

回到旋转伺服基本单元系统，一个延时 t_0 的阶跃信号 s 域表达式为：

$$V_m(s) = \frac{A_v e^{(-s t_0)}}{s} \quad (1.34)$$

其中 A_v 为阶跃信号幅值， t_0 为延迟时间（起跳时间）；

如果我们将该信号施加于式 1.1 所代表的系统，可得到系统输出为：

$$\Omega_l(s) = \frac{K A_v e^{(-s t_0)}}{(\tau s + 1)s} \quad (1.35)$$

将式 1.35 做拉普拉斯反变换，可得旋转伺服基本单元负载轴转速时域内的阶跃响应 $\omega_l(t)$ ，在这里，我们需要注意延迟时间 t_0 以及初始条件为 $\omega_l(0^-) = \omega_l(t_0)$ 。

$$\omega_l(t) = K A_v \left(1 - e^{\left(-\frac{t-t_0}{\tau} \right)} \right) + \omega_l(t_0) \quad (1.36)$$

2 实验预习

在进行第 3 节的实验前，请预习第 1 节的背景知识并完成本节中的任务。

1. **A-1, A-2** 在 1.1.3 小节中，式 1.26 可描述当电机输入电压时系统负载轴转速的动态过程，根据式 1.26，求得系统的传递函数。
2. **A-1, A-2** 用 J_{eq} 、 $B_{eq,v}$ 和 A_m 来表达式 1.1 中的稳态增益 K 和时间常数 τ 。
3. **A-2** 参考《旋转伺服基本单元用户手册》中有关系统参数，计算 J_{eq} 、 $B_{eq,v}$ 和 A_m 。这些参数的计算基于两种 SRV02 的配置，分别为高减速比配置、低减速速比配置的旋转伺服基本单元。
4. **A-2** 高速比版本的 SRV02 旋转伺服基本单元其电机轴的负载包括一个 24 齿齿轮、两个 72 齿齿轮和一个 120 齿齿轮以及连接到负载轴的外部负载；低速比版本的 SRV02 电机轴负载包含 3 个 72 齿齿轮及连接到负载轴的外部负载。请分别计算高速比版本和低速比版本的 SRV02 的齿轮折算到负载轴上的转动惯量 J_g ；

电机负载折算到负载轴上的总的转动惯量为 $J_l = J_g + J_{l,ext}$ 。 $J_{l,ext}$ 为外加负载的转动惯量。齿轮的转动惯量 J_g 参数见《旋转伺服基本单元用户手册》。

提示：盘状刚体的转动惯量 $J_{disc} = \frac{mr^2}{2}$ ；

5. **A-2** 假设 SRV02 负载轴上安装的外部负载如图 2.1 所示，由转杆、圆形负载盘组成，圆形负载盘可安装在转杆的不同安装孔上，请自己选择对称的安装孔（对称安装，圆盘负载直径 50mm，不要选用图中孔间距为 60、80mm 的四个安装孔，以免发生位置干涉），并计算对应外部负载的转动惯量 J_d ，以及外部齿轮系及负载折算到负载轴上的总负载转动惯量 J_l 。

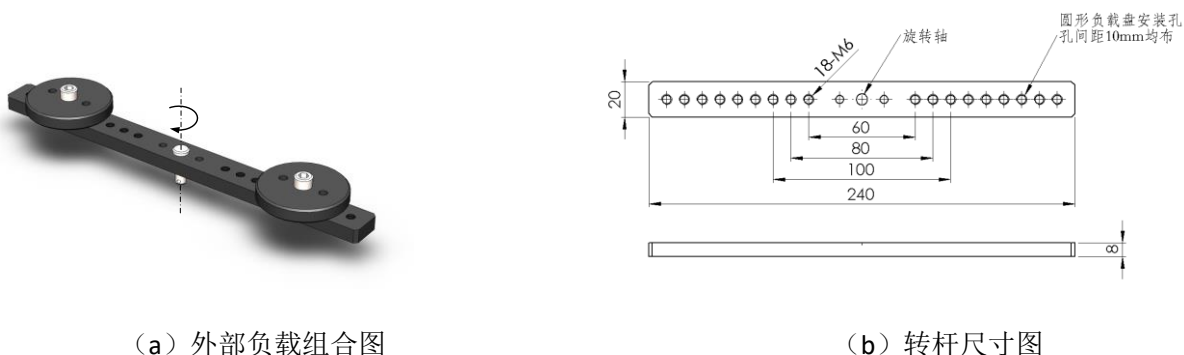


图 2.1 SRV02 系统外部负载

提示：在《旋转伺服基本单元用户手册》中查询圆形负载盘质量 m_b 和 r_b 的参数值；此处转杆总长度为 240mm，质量为 0.095kg。

6. **A-2** 评估系统等效转动惯量 J_{eq} ，它包含电机、齿轮系、惯性负载盘折算到电机轴的全部转动惯量，直流电机的转动惯量可以在《旋转伺服基本单元用户手册》中查询。请注意 SRV02 分为“高减速比”版和“低减速比”版，请分别计算。
7. **A-2** 计算旋转伺服基本单元的稳态增益 K 和时间常数 τ ，并与在后续实验中测试所得的系统参数进行对比。请给出高减速比版本和低减速比版本的不同结果。

8. **A-2, A-3** 参考 1.2.2 小节，找出阶跃响应下的系统稳态增益并和式 1.34 进行比较。提示：求取系统负载轴转速的稳态增益，先明确 $\omega_{l,ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t)$;
9. **A-2, A-3** 评估在 $t = t_0 + \tau$ 时刻由式 1.36 给出的阶跃响应的曲线方程，并和式 1.31 相比较。

3 现场实验

本实验研究对象为 SRV02 旋转伺服基本单元。采用阶跃响应法，确定可大致描述电机输入电压与负载轴转速之间的传递函数（数学模型）。

实验配置

实验所用名为“q_servo_modeling”的 Simulink 框图如图 3.1 中所示。旋转伺服基本单元实验系统包含 Quanser 提供的 QUARC 软件模块，该模块集成于 Simulink 中，完成对旋转伺服基本单元系统中直流电动机的驱动控制和传感器的检测。框图中的“Servo Model”是使用 Simulink 库中的 Transfer Fcn 块来模拟旋转伺服基本单元系统，采用名为“Speed”的 Scope 模块显示系统输入电压、负载轴实际转速和数学模型的瞬时状态。

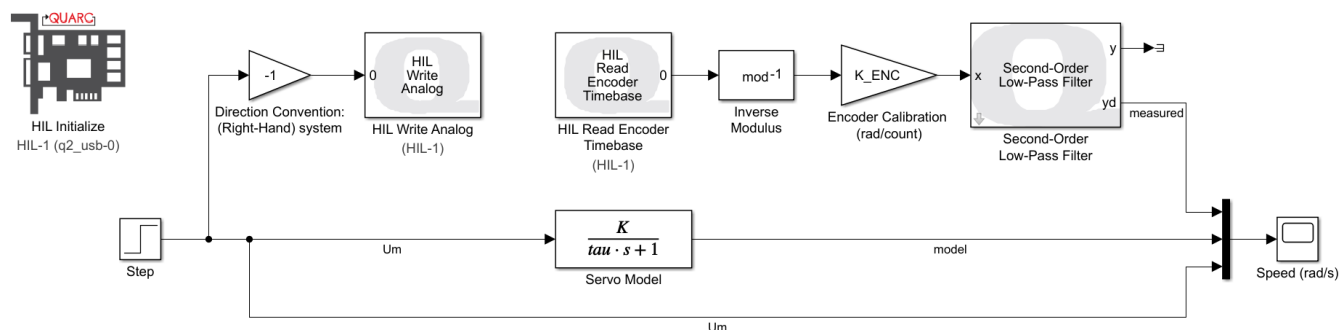


Figure 3.1: 旋转伺服基本单元 q_servo_modeling Simulink 实验框图

注意：正式开始实验前，请确认旋转伺服基本单元的相关实验文件配置完毕。如果尚未配置，请根据 4.2 小节中相关内容进行配置。

3.1 阶跃响应实验

在这种实验方法中，给 SRV02 旋转伺服基本单元输入一个阶跃电压，并对负载轴转速的响应过程进行记录，参考 1.2.2 小节所述内容，对记录的响应过程进行分析，从而得到系统传递函数（模型）的参数。



1. 双击“Step”模块，并将相应参数设定如下：

- 阶跃时间 : 1



- 初始值 : 0
- 终值 : 4
- 采样时间 : 0

⚠️ 请注意旋转伺服基本单元 SRV02 电机的输入标称电压为 6V，请注意以上“初始值”、“终值”参数的设置不可超过 6V，防止电机过压烧毁。

2. 双击 Scope “Speed (rad/s)” 模块，在窗口工具栏，单击 ，或者通过菜单“视图”——“配置属性”打开 Scope 模块的属性配置窗口；
3. 在该窗口中，单击“记录”标签，勾选“记录数据到工作区”复选框，并输入“变量名称”，当模型运行结束后，该示波器的相关图形数据，将以该变量名保存到 Matlab 工作区。在 Matlab 工作区右键单击该变量，可以将该变量导出为“mat”文件，或者在 Matlab 命令行窗口执行“xlswrite()函数”将变量导出为 excel 格式文件，该 excel 文件将保存在 Matlab 当前文件夹。
4. 返回 Simulink 界面，选择“硬件”标签，设置合适的“停止时间”后，单击  按钮，运行 Simulink 模型程序。
5. 根据设置的 Step 模块的阶跃时间参数，大约 1 秒钟后，电机开始转动；通过 Scope 模块，可以看到电机转速的实时数据。
6. 到达“停止时间”后，程序停止运行。
7. **B-5, K-2** 在 Matlab 的工作区中找到第 3 步中设置的变量，绘制实测曲线。

参考：可在 matlab 命令行窗口执行 plot(wl) 命令来绘制图形，或者在 Scope 窗口中执行“文件”——“打印到图窗”得到数据曲线。

8. **K-1** 测量阶跃响应的曲线参数，得到系统稳态增益，并填入表 3.2 中；

提示：使用 Matlab 的“ginput”命令可测量曲线上点的数值；

或者在 Figure 窗口菜单中的“工具”——“数据提示”功能。

或者在 Scope 窗口中使用游标测量工具直接进行测量。

9. **K-1** 通过测量实际响应曲线，得到系统时间常数并记录在表 3.2 中。

10. 结束实验，如无其他实验需要进行，则关闭旋转伺服基本单元驱动器电源。

3.2 模型的实验验证与矫正

在这部分实验中，将对之前通过实验获得的模型参数进行调整，以优化系统传递函数。实验目标是让所得的系统模型尽可能地接近实际系统的响应过程。

产生阶跃输入的步骤如下：

1. 将 3.1 小节实验获得的 K 和 tau 值代入图 3.1 的 Transfer Fcn 模块中；

提示：可在 Matlab 命令窗口输入命令为 K 和 tau 赋新值，然后在 Simulink 窗口中“建



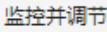
模”标签的菜单中，单击 按钮，将新的 K 和 tau 值传递至 Simulink 模型；

或者直接双击 Simulink 模型中的 Transfer Fcn 模块，在弹出的窗口中，将 K 和 tau 直接修改为所需数值；

2. 双击“Step”模块，并将相应参数设定如下：

- 阶跃时间 : 1
- 初始值 : 0
- 终值 : 4
- 采样时间 : 0



3. Simulink 界面，选择“硬件”标签，设置合适的“停止时间”后，单击  按钮，运行 Simulink 模型程序。。
4. 参考 3.1 中的方法记录实际响应曲线和仿真模型曲线，如果仿真模型曲线和实际响应曲线基本吻合，则模型可表达该系统。
5. 改变 Step 模块中的“终值”数值为 2 和 1。分别再次运行该程序，观察模型响应曲线和实际转速响应曲线是否依然吻合？如不吻合，说明了什么？
6. **B-9** 思考：稳态增益、时间常数的数值与系统的响应过程有什么关系？请简单描述
7. **B-9** 思考：请思考并列出可能是什么因素，导致预习计算所得的理论模型响应和实际模型响应不能高度吻合？
8. 如已经完成实验，则关闭功率放大器电源。

3.3 结果

1.

B-6

将模型参数结果填入表 3.2 中。

小节编号		描述	符号	数值	单位
Section 2	计算建模 (预习内容)	开环稳态增益	K		rad/(V.s)
		开环时间常数	τ		s
Section 3.1	阶跃响应实验建模.	开环稳态增益	$K_{e,b}$		rad/(V.s)
		开环时间常数	$\tau_{e,b}$		s
Section 3.2	模型校正	开环稳态增益	$K_{e,v}$		rad/(V.s)
		开环时间常数	$\tau_{e,v}$		s

表 3.2 旋转伺服基本单元建模实验数据汇总

4 文件描述和配置

4.1 文件概览

文件名	描述
setup_servo_modeling.m	该文件用于设置旋转伺服基本单元电机和传感器相关参数，在 Matlab 当前文件夹中右键单击该文件，选择“运行”，即可得到本实验 Simulink 模型运行所需的相关变量及数值。
q_servo_modeling.slx	该文件是本实验的 Simulink 模型程序，运行“setup_servo_modeling.m”脚本文件后，双击打开本文件。
config_servo.m	返回基于配置的旋转伺服基本单元的 R_m ， k_t ， k_m ， K_g ， η_{a_g} ， B_{eq} ， J_{eq} 和 η_{a_m} ，传感器校准常数 K_{POT} ， K_{ENC} ，和 K_{TACH} ，放大器限制 V_{MAX_AMP} 和 I_{MAX_AMP} 。
calc_conversion_constants.m	返回各种转换因子
d_model_param.m	通过实验装置的各种参数，如： R_m ， k_t ， k_m ， K_g ， η_{a_g} ， B_{eq} ， J_{eq} ，and η_{a_m} 等计算旋转伺服基本单元模型参数 K 和 τ

表 4.1 旋转伺服基本单元建模实验相关文件

4.2 旋转伺服基本单元和实验文件的配置

在现场实验开始前，必须首先“setup_servo_modeling.m”脚本，完成 Simulink 框图“q_sevro_modeling.slx”中各参数的配置。

可通过如下步骤进行相关实验准备：

- 按照《旋转伺服基本单元用户手册》的指导，根据需要安装旋转伺服单元为“高速比”版或“低速比”版。

2. 打开 Matlab 软件；
3. 浏览 matlab 的当前文件夹窗口，在 Matlab 当前文件夹窗口中右键单击“setup_servo_modeling.m”文件，选择“运行”，以设置“q_servo_modeling”Simulink 模型参数。
4. 在 Matlab 当前文件夹中找到本实验的 Simulink 文件“q_servo_modeling.slx”；
5. 双击“q_servo_modeling.slx”文件，打开 Simulink 框图，如图 3.1 所示。
6. 如有必要，双击 Simulink 框图中的“HIL Initialize”模块，确认配置的 DAQ 数据采集卡设备与实际连接在计算机上的设备（比如 Q2-USB 或 Q8-USB）相同；如不相同，需要根据实际使用的采集卡对“HIL Initialize”模块进行相关设置。更多“HIL Initialize”模块的配置信息可参考“QUARC”软件文档。
7. 确认配置：确认配置和实际的旋转伺服基本单元相符合。例如确认旋转伺服基本单元高速比配置安装了何种负载，并且使用 Quanser 的 Volt PAQ-X1 功率放大器进行驱动，功率放大器电压放大倍数为 1。更多信息及配件请参考《旋转伺服基本单元用户手册》。
8. （本步可忽略）将建模方式“MODELING_TYPE”为“MANUAL”人工/手动方式。

```

%% Rotary Servo Configuration
% External Gear Configuration: set to 'HIGH' or 'LOW'
EXT_GEAR_CONFIG = 'HIGH';
% Type of Load: set to 'NONE', 'DISC', or 'BAR'
LOAD_TYPE = 'DISC';
% Amplifier Gain: set VoltPAQ amplifier gain to 1
K_AMP = 1;
% Power Amplifier Type: set to 'VoltPAQ', 'UPM_1503', or 'UPM_2405'
AMP_TYPE = 'VoltPaq';
%
%% Lab Configuration
% Type of Controller: set it to 'AUTO', 'MANUAL'
% MODELING_TYPE = 'AUTO';
MODELING_TYPE = 'MANUAL';
%

```

9. 运行“setup_servo_modeling.m”脚本文件后，在 Matlab 命令行窗口将显示如下信息，



Calculated servo model parameter:

$K = 1 \text{ rad/s/V}$

$\tau = 0.1 \text{ s}$

该参数并不准确，需要通过实验对 K 和 τ 值进行修正。

5 实验报告

请根据 5.1 的内容要点准备实验报告，在 5.2 节介绍有关实验报告的格式相关要求。

5.1 内容模板

I. 实验过程

I.1 阶跃响应实验

1. 简要描述这部分实验的主要目的和过程（3.1 小节）

I.2 模型的验证实验

1. 简要描述这部分实验的主要目的和过程（3.2 小节）

II. 实验结果

本节中只需提供数据结果即可，无需解释或分析。

1. 在第 3.1 小节（阶跃响应实验）中第 7、8 步的响应曲线，第 9 步的测量数据；
2. 在第 3.2 小节（模型的实验验证）中第 4 步的模型、实际响应曲线，第 5 步中调整后的多组实验数据；
3. 汇总本实验的数据（表 3.2）

III. 实验分析

提供如下内容相关的详细计算方法和过程。

III.1 阶跃响应实验

1. 在 3.1 小节中的第 8、9 步

IV. 结论及收获

对实验结果进行归纳，分析实验现象不理想的原因，总结实验收获。

5.2 实验报告格式要求

请提供更具认真且专业的实验报告，并以“pdf”格式准时提交至网络学堂。

- 每位同学均需要提交实验报告
- 包含封面，封面请标注必要信息（实验名称、学生姓名、学号、实验日期、同组学生姓名，同组学生学号、理论课教师姓名等）；
- 包含实验要求的所有内容（过程、结果、分析和结论）；
- 将实验中所产生、记录的原始数据、程序文件整体压缩为一个文件作为实验报告的一部分同时提交；
- 语句通顺无错别字；
- 布局清晰整洁美观；
- 请编写页码；
- 所有公式都有编号；
- 所有图形都有编号，具备描述性标题，坐标轴都有标签；
- 所有表格都有编号，具备描述性标题，表格内容具备恰当表头；
- 实验数据以合适的形式（图形、图表、数字、表格等）呈现；
- 图表、框图请勿手绘；
- 使用正确的格式进行参考和引用。