

引言：

伺服系统是电力拖动自动控制系统——运动控制系统的一个重要分支，其在生产实践中的应用领域十分广泛，如数控机床定位控制和加工轨迹、打印机、复印机、磁记录仪等，随着机电一体化技术的发展，伺服系统已成为现代工业、国防和高科技领域中不可缺少的设备^[1]。伺服系统又称位置随动系统，其主要任务是使输出量快速准确地复现给定量的变化。狭义上，伺服系统是一个带位置反馈的自动控制系统；广义上，伺服系统输出量可以是其它物理量，其共性在于输出量快速准确的复现给定量。伺服系统的目的是经由闭环控制方式达到对一个机械系统的位置、速度和加速度的控制。本文就是在给定条件下，设计三闭环控制的伺服系统的位置、转速、电流的调节器，并采用 MATLAB 仿真，从而使得系统的性能达到最优。

1 三闭环伺服系统控制原理

三环伺服系统采用 3 个串级控制环来完成控制。最外面为位置环、中间为速度环、最里面为电流环。这 3 个环的响应周期差别很大的，电流环响应最快，其次是速度环，最慢的是位置环。

1.1 电流环控制

电流环因为电流和扭矩成正比所以也叫扭矩环。电流环的输入是速度环 PID 调节后的输出，电流环的输出就是电机的每相的相电流。由于主电路电感的作用，电流不可能突变，按照反馈控制规律，采用某个物理量的负反馈就可以保持该量基本不变，电流环的反馈来自于驱动器内部每相的霍尔元件。因此，电流闭环控制可以抑制电流、制动电流，加速电流的响应过程。但单环控制是难以满足伺服系统的动态要求，一般不会只单独采用电流环。

1.2 速度环控制

在电流环的基础上加入速度环，就构成双闭环（转速环、电流环）直流调速系统，这是一种当前应用广泛，经济，适用的电力传动系统。它具有动态响应快、抗干扰能力强的优点。

1.3 位置环控制

在转速、电流双闭环调速系统的基础上，再外设一个位置控制环，就形成三环控制的伺服系统，一般是通过外部输入的脉冲的频率来确定转动速度的大小，通过脉冲的个数来确定转动的角度。

1.4 各调节器的作用

电流调节器 ACR：作为内环调节器，在速度环的调节过程中，其作用为使电流跟随给定电压变化；抗电网电压扰动；

速度调节器 ASR：使转速 n 很快跟随给定电压 U_n 变化，稳态时可减少转速误差，抗负载扰动；

位置调节器 APR：位置环的校正装置，它的类型和参数决定了位置随动系统的系统误差和动态跟随性能，其输出限幅值决定着电机的最高转速。

2 建模与设计

2.1 设计方法

从内环到外环，逐个设计各环的调节器。首先先设计电流调节器 ACR，然后将电流环简化成转速环中的一个环节，和其它环节一起构成转速调节器 ASR 的控制对象，再设计 ASR，最后再把整个转速环简化为位置环中的一个环节，从而设计位置调节器 APR。

2.2 设计思路

首先我们要知道许多控制系统的开环传递函数可表示为：

$$W(s) = \frac{K \prod_{j=1}^m (\tau_j s + 1)}{s^r \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}$$

据 $W(s)$ 中积分环节个数的不同，将该控制系统称为 0 型、I 型、II 型……系统。0 型系统在稳态时是有差的，而 III 型及 III 型以上的系统很难稳定。因此，通常为了保证稳定性和一定的稳态精度，多用 I 型、II 型系统，典型的 I 型、II 型系统其开环传递函数为

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

$$W(s) = \frac{K(\tau s + 1)}{s^2(Ts + 1)}$$

典型 I 型系统的特点：超调小，但抗扰性能差；

典型 II 型系统的特点：超调量相对要大一些，但抗扰性能却比较好。

能否抑制超调是设计电流环首先要考虑的问题，所以一般电流环多设计为 I 型系统；

而转速环主要考虑的是稳态无静差，所以转速环通常设计为 II 型系统。

2.3 参数确定

已知和自取参数

直流电动机： $U_n=220\text{V}$ ， $I_n=55\text{A}$ ， $n_n=1000\text{r/min}$ ，

$$U_{nm}^* = U_{im}^* = U_{cm}^* = 10\text{V}$$

电枢电路总电阻 $R=2.48\Omega$ ，

电枢电路总电感 $L=38\text{mH}$ ，

电流允许过载倍数 $\lambda=1.5$ ，

转动惯量 $J=0.114\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

PWM 功率放大器增益 $K_s=40$ ，滞后时间常数取 $T_s=0.001\text{s}$

电流反馈系数 $\beta=1.2\text{V/A}$

转速反馈系数 $\alpha=1\text{V}\cdot\text{min/r}$

位置反馈增益 1

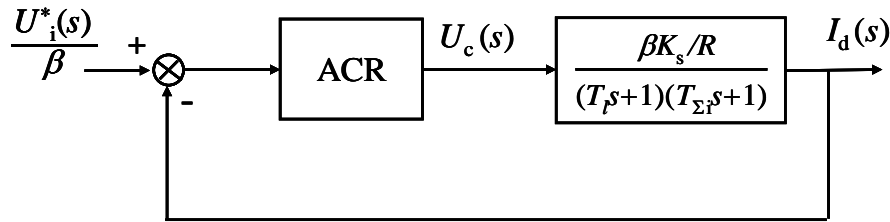
滤波时间常数取 $T_{oi}=0.001\text{s}$ ， $T_{on}=0.005\text{s}$

减速机构减速比 $N=108$

反电动势系数 $C_e=0.489\text{V/rad}\cdot\text{s}^{-1}$

2.4 电流调节器设计

用小惯性近似处理法，将电流环动态结构图化简为如下：



图一

2.4.1 相关参数计算:

电流环小时间常数之和 $T_{\Sigma} = T_s + T_{oi} = 0.001s + 0.001s = 0.002s$

电枢回路电磁时间常数 $T_l = L/R = 0.038/2.48 = 0.015$

电力拖动系统机电时间常数 $T_m = J \cdot 4gR/375C_e C_m = 0.013$

2.4.2 选择电流调节器结构

保证稳态电流无静差，可按典型 I 型系统设计电流调节器。电流环控制对象是双惯性型的，因此可用 PI 型电流调节器，其传递函数式为：

$$W_{ACR}(s) = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{\tau_i s}$$

检查对电源电压的抗扰性能： $m = \frac{T_l}{T_{\Sigma i}} = \frac{0.015}{0.002} = 7.5$ ，根据典型 I 型系统动态抗扰性能，各项指标都是可以接受的。

2.4.3 计算电流调节器的参数

1) 电流调节器超前时间常数：令调节其中的比例微分环节 $(\tau_i + 1)$ 对消掉控制对象中较大时间常数的惯性环节 $(T_l + 1)$

即
$$\tau_i = T_l = 0.015s$$

2) 电流环开环增益：因设计要求 $\sigma_i \leq 5\%$ ，取 $K_I T_{\Sigma} = 0.5$ ，则

$$K_I = \frac{0.5}{T_{\Sigma i}} = \frac{0.5}{0.002s} = 250s^{-1}$$

3) 电流调节器的比例系数 K_i 。校正后系统的开环传递函数为

$$W(s) = K_i \frac{\tau_i + 1}{\tau_i s} \times \frac{\beta K_s / R}{(T_l + 1)(T_{\Sigma i} + 1)} = \frac{\beta K_s K_i}{\tau_i R (T_{\Sigma i} s + 1)}$$

由于
$$K_I = \frac{K_i K_S \beta}{\tau_i R}$$

则
$$K_i = \frac{K_I \tau_i R}{K_S \beta} = \frac{205 \times 0.015 \times 2.48}{1.2 \times 55} = 0.14$$

2.4.4 校验近似条件

电流环截止频率: $\omega_{ci} = K_I = 250s^{-1}$

1) 校验晶闸管装置传递函数的近似条件:

$$\frac{1}{3T_s} = \frac{1}{3 \times 0.001} = 333.33s^{-1} > \omega_{ci}$$

满足近似条件。

2) 校验忽略反电动势对电流环影响的近似条件:

$$3 \sqrt{\frac{1}{T_m T_l}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{0.015 \times 0.013}} = 214.8s^{-1} < \omega_{ci}$$

满足近似条件。

3) 校验小时间常数的近似条件:

$$\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_s T_{oi}}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{0.001 \times 0.001}} = 333.33s^{-1} > \omega_{ci}$$

满足近似条件。

2.5 转速调节器设计

2.5.1 选择电流调节器结构

为了实现转速无静差，在负载扰动作用点前面必须有一个积分环节，它应该包含在转速调节器 ASR 中，现在在扰动作用点后面已经有了一个积分环节，因此转速环开环传递函数应共有两个积分环节，所以应该设计成典型 II 型系统，这样的系统同时也能满足动态抗扰性能好的要求。由此可见，ASR 也应该采用 PI 调节器，其传递函数为

$$W_{ASR}(s) = \frac{K_n(\tau_n s + 1)}{\tau_n s}$$

2.5.2 计算参数

由上面所求电流环可将电流环闭环传递函数表示为：

$$W_c(s) = \frac{1}{0.000008s^2 + 0.004s + 1}$$

忽略高次项，电流环在转速环中应该等效为：

$$\frac{W_c(s)}{1.2} = \frac{1/1.2}{0.004s + 1}$$

因为，由电流环参数可知 $K_I T_{\Sigma i} = 0.5$ ，则 $\frac{1}{K_I} = 2T_{\Sigma i} = 2 \times 0.002 = 0.004s$

又根据已知条件可知 $T_{on} = 0.005s$

所以，转速环小时间常数 $T_{\Sigma n}$

$$T_{\Sigma n} = \frac{1}{K_I} + T_{on} = 0.004 + 0.005 = 0.009s$$

则转速开环传递函数：

$$W_{op}(s) = \frac{K_n(\tau_n s + 1)}{\tau_n s} \frac{1/1.2}{0.009s + 1} \frac{1/J}{s} \times C_m$$

又 $C_m = 9.55C_e$

故转速开环传递函数化简为：

$$W_{op}(s) = \frac{K_N(\tau_n s + 1)}{s^2 (0.009s + 1)}$$

其中 $K_N = 34K_n/\tau_n$

按跟随和抗扰性能都较好的原则，取 $h=5$ ，则 ASR 的超前时间常数为：

$$\tau_n = hT_{\Sigma n} = 5 \times 0.009 = 0.045s$$

$$\text{又 } K_N = \frac{h+1}{2h^2 T_{\Sigma n}^2} = \frac{6}{2 \times 5^2 \times 0.009^2} = 1481s^{-2}$$

因此 $K_n = 1.96$

2.6 位置调节器设计

转速和电流双闭环的传递函数为:

$$W_{cn}(s) = \frac{\frac{K_N(\tau_n s + 1)}{s^2(T_{\Sigma n} s + 1)}}{1 + \frac{K_N(\tau_n s + 1)}{s^2(T_{\Sigma n} s + 1)}} = \frac{K_N(\tau_n s + 1)}{s^2(T_{\Sigma n} s + 1) + K_N(\tau_n s + 1)}$$

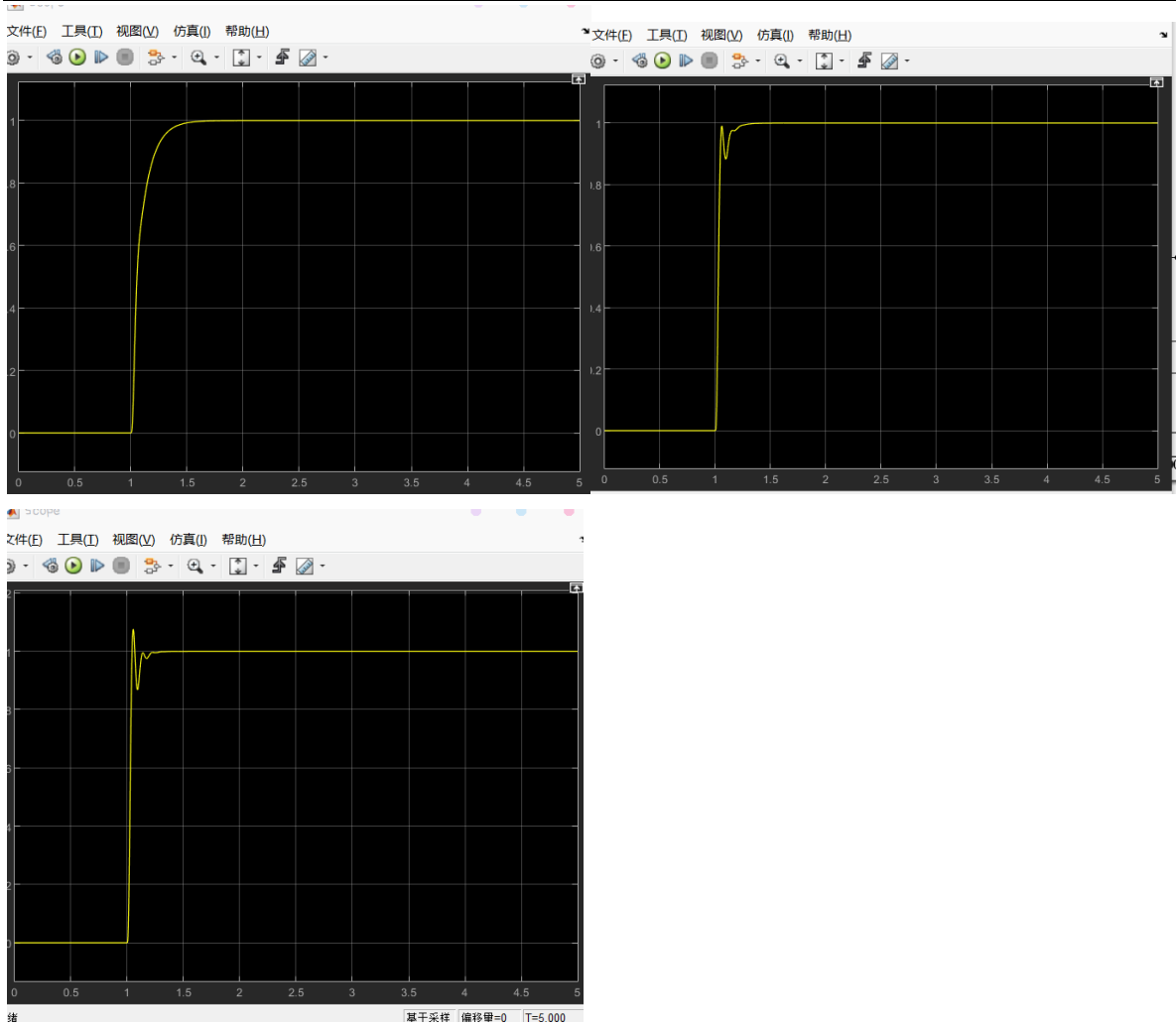
2.7 simulink 仿真

The block diagram illustrates a control system for a two-link robotic arm. The system consists of the following components and connections:

- Reference Input:** A step function is provided to the first summing junction.
- Feedback Loop 1:** The output of the system is fed back through a gain of 1 to the first summing junction.
- Controller 1:** The output of the first summing junction is processed by a PID controller, labeled $PID(s)$.
- Feedback Loop 2:** The output of the first PID controller is fed back through a gain of 1.2 to the second summing junction.
- Controller 2:** The output of the second summing junction is processed by a second PID controller, labeled $PID(s)$.
- Feedback Loop 3:** The output of the second PID controller is fed back through a gain of 0.489 to the third summing junction.
- Controller 3:** The output of the third summing junction is processed by a third PID controller, labeled $PID(s)$.
- Plant Dynamics:** The output of the third PID controller is fed into a transfer function block $\frac{55}{0.001s + 1}$. The output of this block is fed into a second transfer function block $\frac{1}{0.038s + 2.48}$, labeled "L, R".
- Control Signal:** The output of the "L, R" block is fed into a saturation block (labeled "Cm") and also through a gain of 0.489 to the third summing junction.
- Output:** The output of the saturation block is fed into a third transfer function block $\frac{108}{s}$, labeled "J". The output of this block is the system output, which is fed back to the first summing junction.

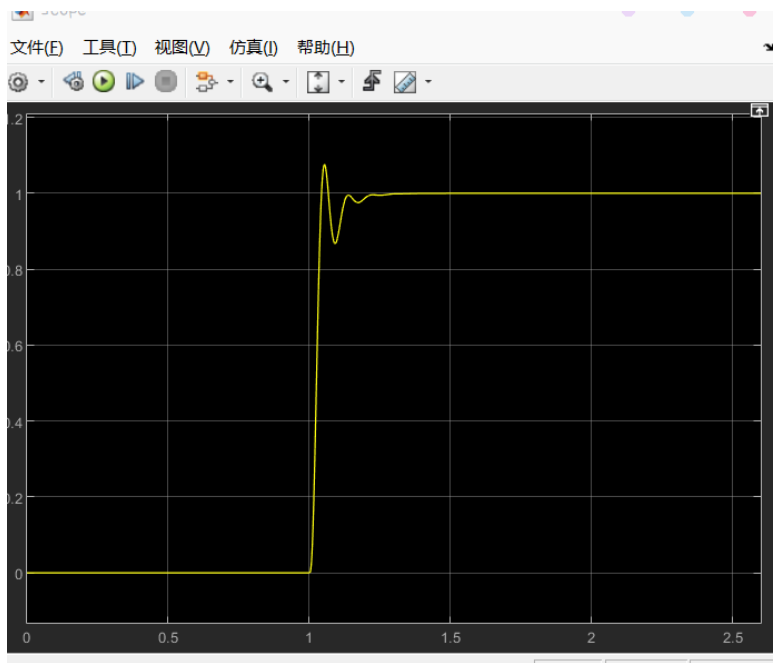
图二

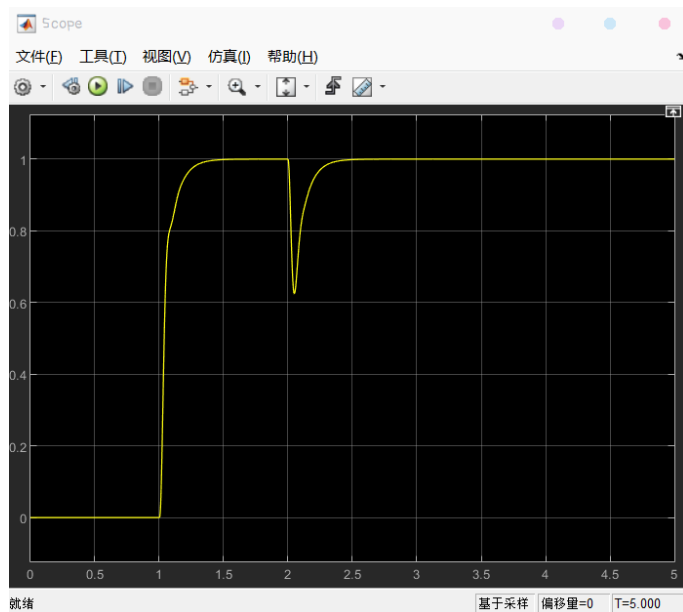
系统输入为单位阶跃信号，当位置调节器参数 K 分别取 0.1、0.2、0.3 时，得到的仿真结果如图三所示。



图三

综合考虑超调和上升时间， K 取 0.3，仿真结果如下：

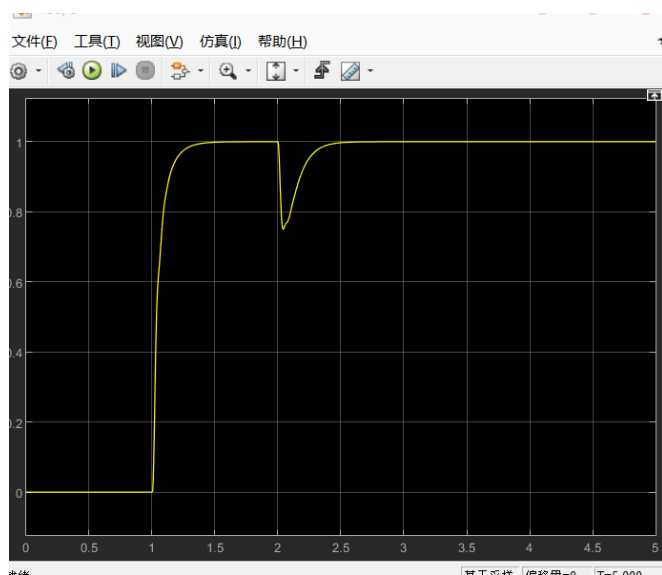




图七

可以看出，综合各项指标，系统抗扰能力还行。

适当调整 ASR 的参数值：P 设为 3



图八

扰动时间相对缩短，最大降落减少

4 考虑电流过载倍数

4.1 电流过载原因

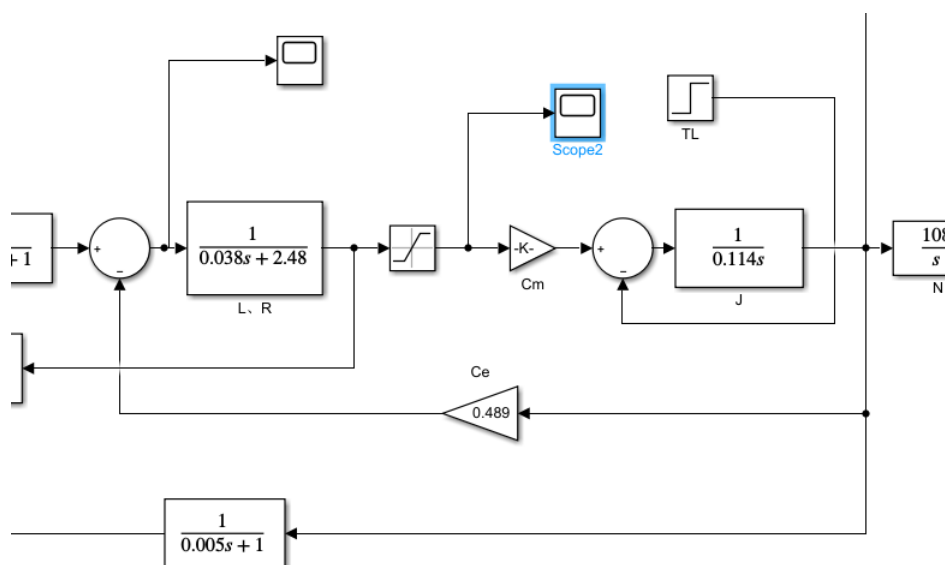
(1)在转速反馈控制直流调速系统上突加给定电压时，由于惯性的作用，转速不可能立即建立起来，反馈电压为零，相当于偏差电压 $\Delta U_n = U_n^*$ ，调节器的输出是

$K_p U^*$ 。这时，由于放大器和变换器的惯性都很小，电枢电压 U_d 立即达到它的最高值，对电动机来说，相当于全压起动，会造成电动机过电流，当然是不允许的。

(2) 当直流电动机被堵转时，也会遇到过电流问题。如挖土机由于机械故障或运行时碰到坚硬的石块，电动机会被堵转。根据系统的静特性，电流将远远超过允许值。如果只依靠过电流继电器或熔断器来保护，过电流时就跳闸，也会给正常工作带来不便。

4. 2 解决方法

为了解决转速反馈闭环调速系统起动和堵转时电流过大的问题，考虑到电流过载倍数，我在仿真模型中增加了一个饱和非线性模块（Saturation）对系统系统进行限幅，限制电压 U_{im} ，即电流给定电压的最大值，也就限制了最大过载电流，避免突加电压或负载导致电流过载对电机造成损害。如图九：



图九

5 考虑减速机构存在齿隙

5.1 齿隙的影响

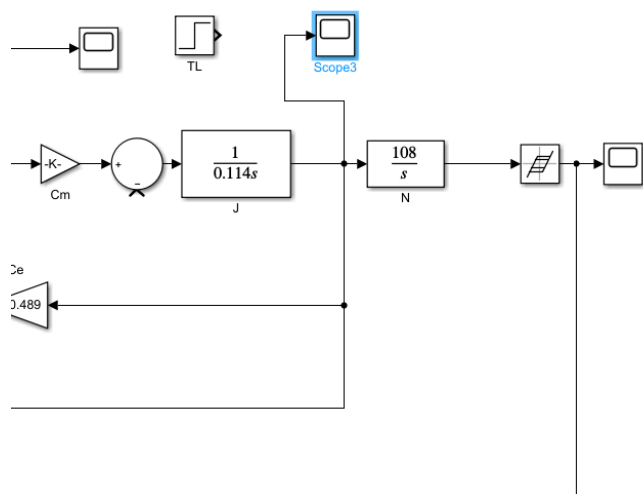
在伺服系统里，减速机扮演着四两拨千斤的作用，即由伺服电机输出的一个高转速、小力矩的信号经过减速器后成为一个低转速、大力矩的转速，从而能应用到各类大负载的机床，机器人等设备上。在一般的传动系统中减速机的齿隙反而是正常运行条件之一^[3]。

齿隙会很大程度上限制系统的控制性能，产生很多负面影响，原本伺服系统的

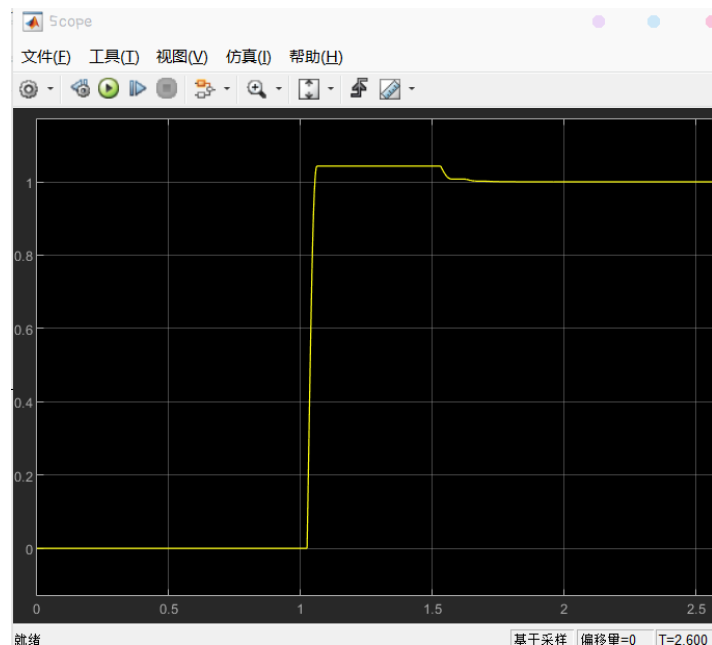
输入量和作用于负载的输出量是成正比的，即减速比，但由于齿隙的存在，它会使得给定转矩反向时齿轮分离，这不仅恶化了系统的动态过程，产生了速度振荡，加长了过度时间，还加速了硬件磨损。

5.2 仿真

在 N/s 后加入 backlash 模块，如图十所示：



仿真图，如图十一：



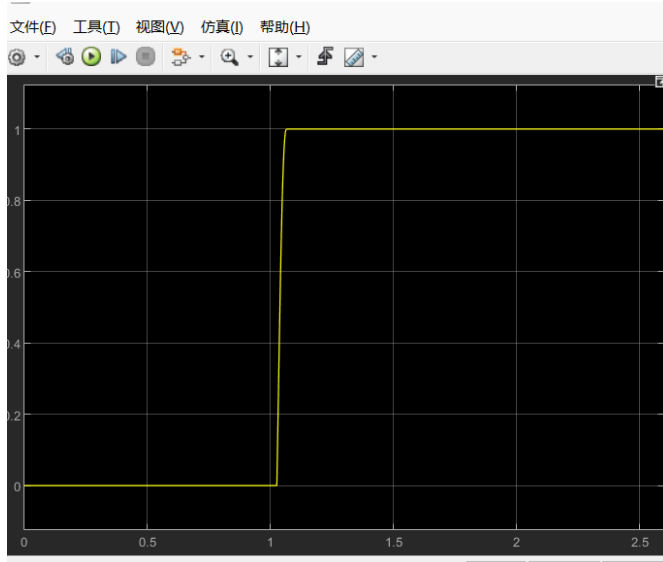
图十一

可见超调时间变长了。

5.3 解决方法

由于齿隙 backlash 作用在转速环之后，因此只能适当调节位置调节器来对系统性能进行调整。

经过尝试，位置调节器 K 取 0.28，仿真图如图十二：



图十二

满足要求。

6 总结与心得

本课程设计综合运用了自动控制原理、电力电子技术、运动控制系统，控制电机等多方面的知识，为了更好完成设计，我又重新将之前所学知识复习了一遍，不仅加深了我对控制知识的理解与掌握，提高了对知识的应用能力，也让我发现了我对一些方面知识的薄弱以及学习方法的不足之处，同时我也明白了控制课程之间的紧密联系，应该系统学习，而不应该割裂的学习。

具体来说，我了解了伺服系统的基本工作原理，了解了三闭环伺服系统的基本组成以及动态和静态特性，基本掌握了对 ACR、ASR、APR 的结构选择和参数的计算，除此之外，也进一步熟悉了 MATLAB 的相关功能，能够对伺服系统进行 simulink 仿真。

但由于时间的限制，有些知识掌握的还不是很好，因此可能还有很多缺点和错误，不过，还是要感谢这次设计，确确实实让我学到了很多知识，让我受益匪浅，当然也希望老师能够指正批评。

参 考 文 献

- [1]陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统. 北京：机械工业出版社，2007
- [2]赵竹青. 三环直流伺服控制系统的设计与仿真[J]. 自动化控制与仪表， 2017. 1001—9227.
- [3]李丹.传动装置齿隙位置对伺服系统的影响[J].重型机械科技，2004(2):26-31.