

1 系统模型

1.1 倒立摆模型

(这里在网络的plant中采用直线型一级倒立摆系统，将倒立摆模型近似线性化，得到如下控制公式：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (1)$$

在公式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b(J+mL^2)}{K} & -\frac{m^2L^2g}{K} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{mLb}{K} & \frac{mLg(M+m)}{K} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J+mL^2}{K} \\ 0 \\ -\frac{mL}{K} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， J 为转动惯量， M 为小车质量， m 为摆杆质量， l 为摆杆轴心到质心的长度， b 为小车滑动摩擦系数， c 为小车转动摩擦系数。

取 $M = 10$, $m = 2$, $J = 10$, $b = 0.1$, $c = 0.1$, $l = 0.3$ 该系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{8s^2}{448.1s^4 + 4.401s^3 - 960s^2 + 8s} \quad (3)$$

对于该连续系统存在两位于右半平面零点，该倒立摆系统不稳定。将该倒立摆系统接入网络模型中作为plant。

1.2 基于Truetime网络系统模型的建立

利用上一部分所介绍的Truetime工具，建立下图所示网络模型：

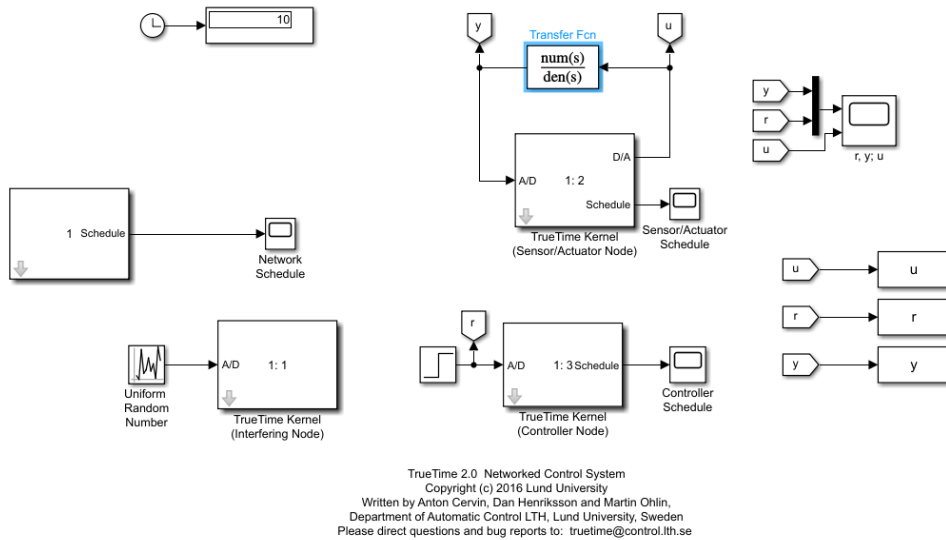


Figure 1: 基于Truetime的网络仿真模型

对各部分模块：

1. 对网络模块(Truetime Network)，采用CSMA/AMP(CAN)网络协议，设置传输率为80000bit/s，最小帧长为80字节。
2. 对plant的倒立摆部分，以传递函数模块接入闭环中。
3. 对控制器采用PID控制器，其传递函数：

$$G(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (4)$$

通过调节传递函数参数 K_p, K_i, K_d 测试系统稳定性。

4. 对攻击分为丢包率与干扰信号。

2 仿真验证

2.1 无网络攻击下结果

无加入网络攻击前，通过调节PID参数为 $K_p = 1240, K_i = 1000, K_d = 100.01$ ，网络相应曲线如下：

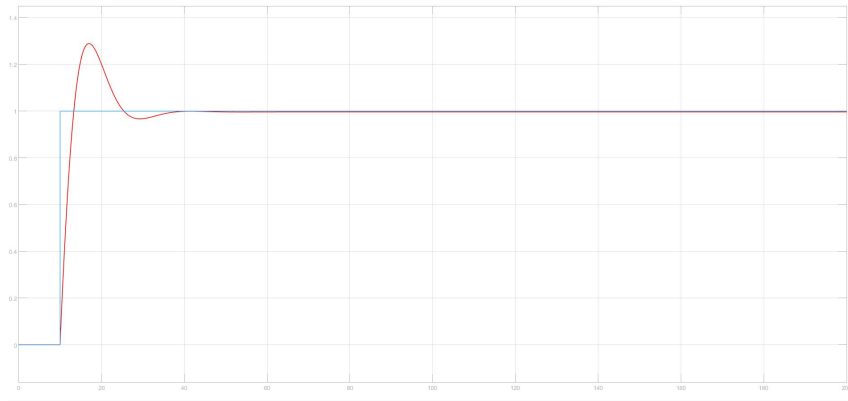


Figure 2: 无网络攻击下的阶跃响应曲线

如理论验证系统闭环函数，可得系统闭环函数为

$$G(s) = \frac{8s^3}{448.1s^5 + 805.3s^4 + 8960s^3} \quad (5)$$

通过劳斯判据可判定全系统稳定。

2.2 网络攻击下结果

当设置丢包率为0.5s时，并同时向系统施加干扰信号（通过Truetime在controller代码中创建干扰信号任务），网络响应曲线如下：

由图可得此时网络噪声过多且系统响应幅度过大，无法成功追踪传入的阶跃响应。

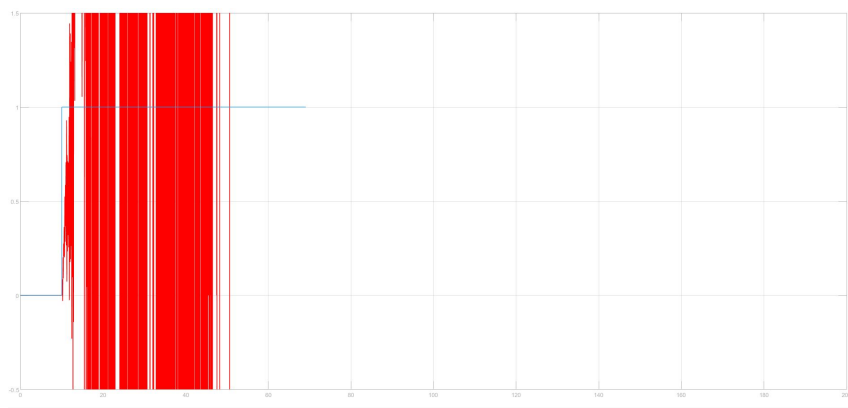


Figure 3: 网络攻击下阶跃响应

2.3 改正控制器后网络攻击下结果

通过调节PID参数，以使得系统在存在攻击时也能达到相对稳定，并减小波动1:

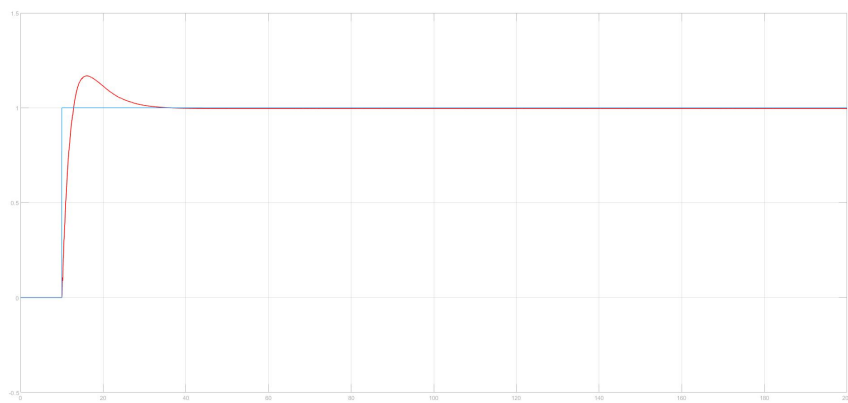


Figure 4: 改变PID控制器后的阶跃响应