

# 双臂单腿弹跳机器人 控制系统研究

**Control System Research of An One-Leg  
Hopping Robot with Two Actuated Arms**

答辩人： 梁 聪 慧

导 师： 陆 震 教授

自动化科学与电气工程学院机电系

2007年12月20日

# 目 录

1. 课题研究现状与研究内容

2. 控制系统的建模及控制算法研究

3. 机器人的鲁棒控制算法研究

4. 控制算法仿真，系统需求性分析

5. 控制系统的设计与实现

6. 控制系统的实验研究

# 1.国内外研究现状及研究内容

## 单腿跳跃机器人：

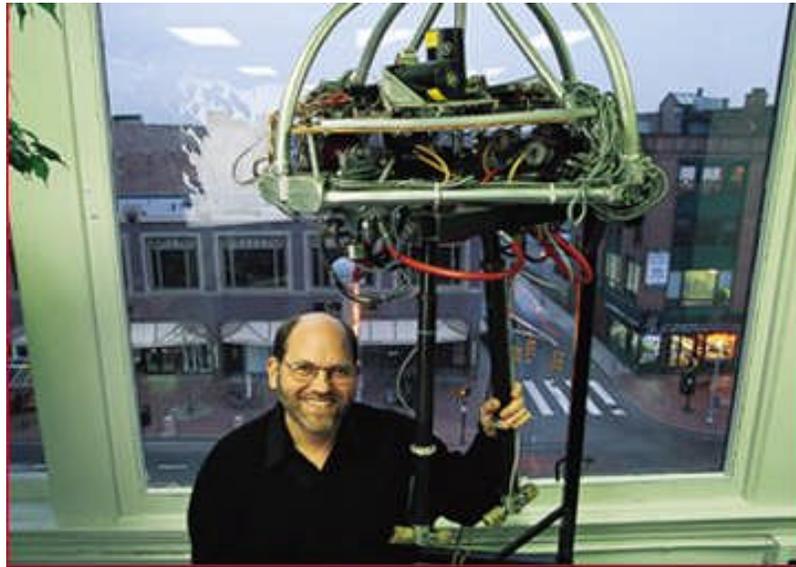
单腿跳跃机器人是模拟袋鼠、麻雀等生物运动方式的一类仿生机器人。相比于轮式、履带式、爬行或步行机器人，单腿跳跃机器人具有更强的越障能力和机动性以及更高的运动效率和速度。在诸如勘探、搜救以及行星探测等太空探索领域具有重要的应用价值。

有助于深入理解步行机器人的动态平衡和稳定原理，为步行机器人的动态步行、跑步和跳跃控制奠定基础。

同时由于单腿跳跃机器人为一个静态不稳定，变约束的多体动力学系统，具有较强的动力学耦合效应以及非线性特性，是验证先进控制算法的一个很好的平台。

## 国内外研究现状:

开创者: MIT Leg laboratory 的 **Marc Raibert** 教授 80年代  
研制了2D, 3D, 双足, 四足机器人 (Boston Dynamic)



此后出现了各种形式的单腿跳跃机器人:

Mcgeer Univ. **Matin Buehler** : ARL Monopod

Carnegie Melon **Ben Brown** : Bow—Leg

UC berkly **Matthew D.Berkemeire** : Acrobot

ATR JAPAN **S.H.Hyon** : Kenken

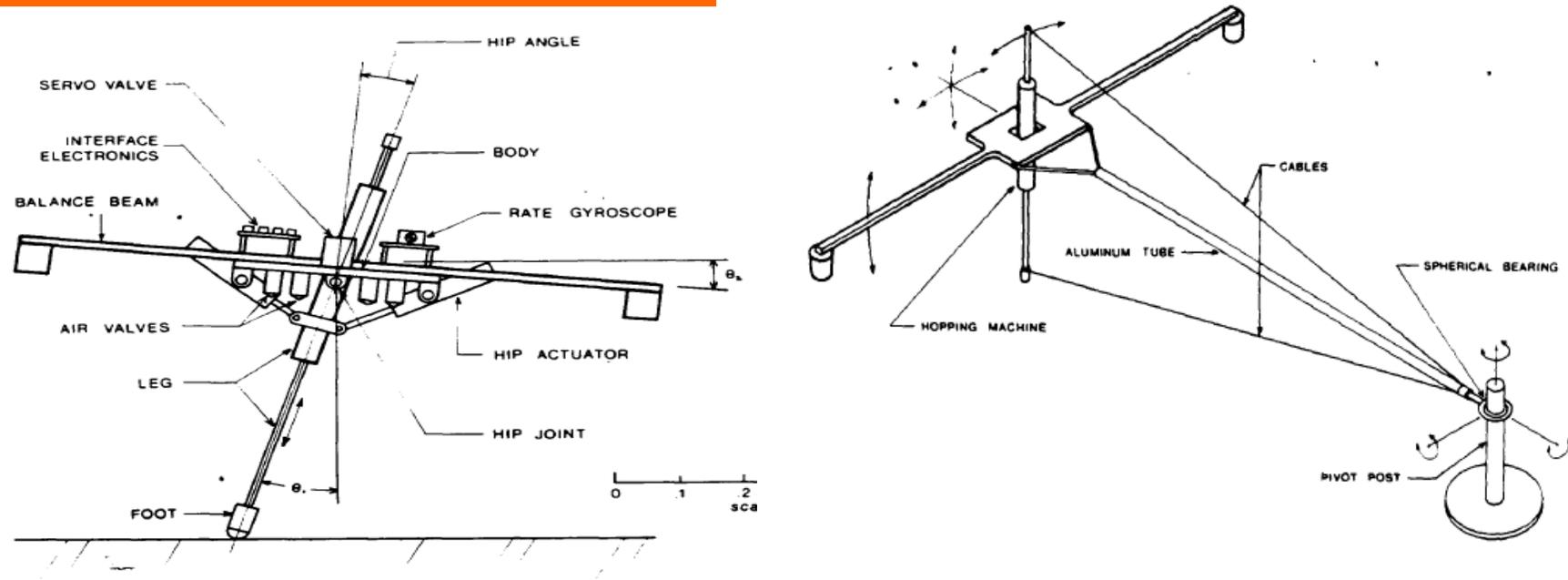
电机驱动

高效自治

杂技机器人

仿生腿

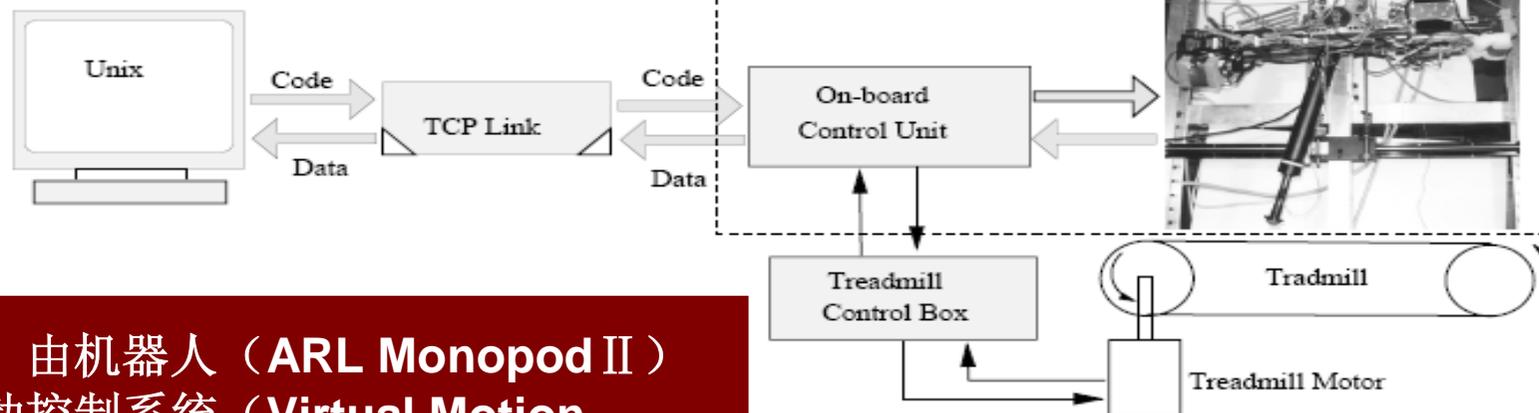
## 2D Hopper MIT Leg Lab USA



**结构：** 机器人的腿内装有**气动**的**弹簧**及驱动器,身体和腿之间的夹角通过比例伺服阀控制的**气缸**进行调节。身体和腿之间的夹角、腿与地面的夹角以及腿的长度通过**电位计**进行测量,机器人脚底的压力开关用来判断与地面接触的状态,机器人的姿态则通过**光纤陀螺**进行测量。

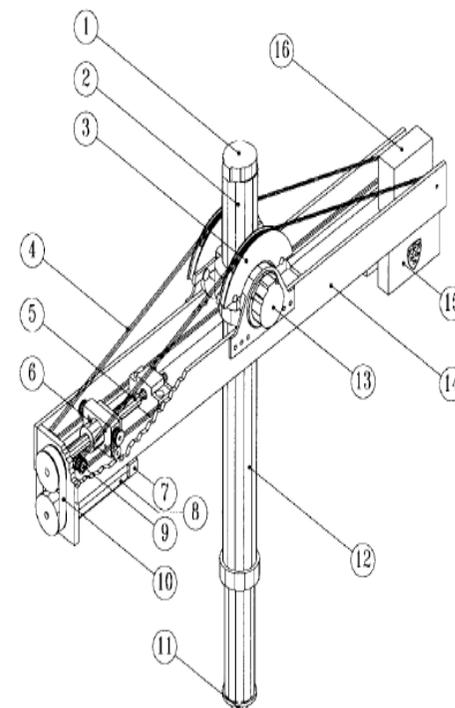
**控制：** 通过“**三步控制法**”利用**PD**控制器分别对机器人跳跃高度、前向速度和姿态进行解耦控制。基于“**电动磁带模型**”(Motor Tape Model)的控制算法即事先将机器人的控制信号存储起来,通过传感器检测得到机器人实际的状态,再通过**查表**的方法将控制信号输出给驱动器。

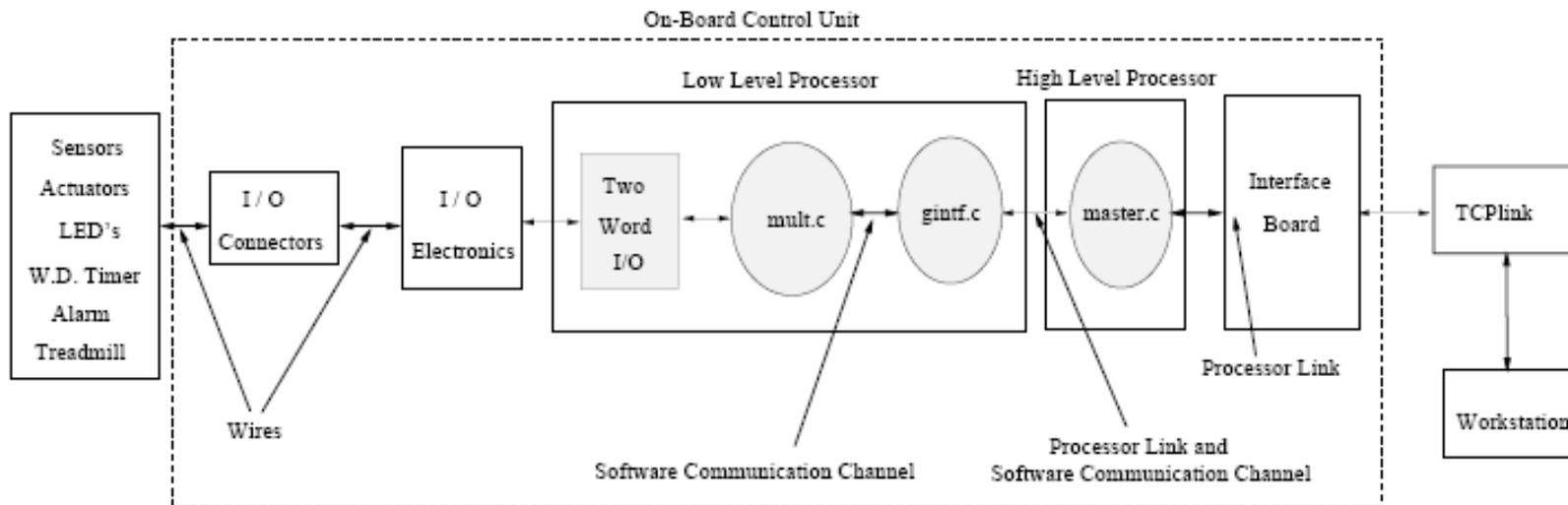
## ARL Monopod II MCgear Univ.



**结构：** 由机器人（ARL Monopod II）虚拟运动控制系统（Virtual Motion System）网络通讯(Tcplink)和计算机控制软件(Unix Workstation)组成

**控制：** 机器人上包括一个由两个微处理器构成的控制单元、传感器、执行器和能源部分。类似于传送带的踏车系统虚拟机器人的前后向跳跃中接触的地面。当代码在计算机里面开发后以后，通过网络将代码下载到机器人上的控制器中，通过控制机器人和传送带，实现机器人的原地和前后向跳跃的速度和距离的控制，机器人的姿态数据通过机器人各个关节的关电码盘采集后通过网络发送给Unix工作站。



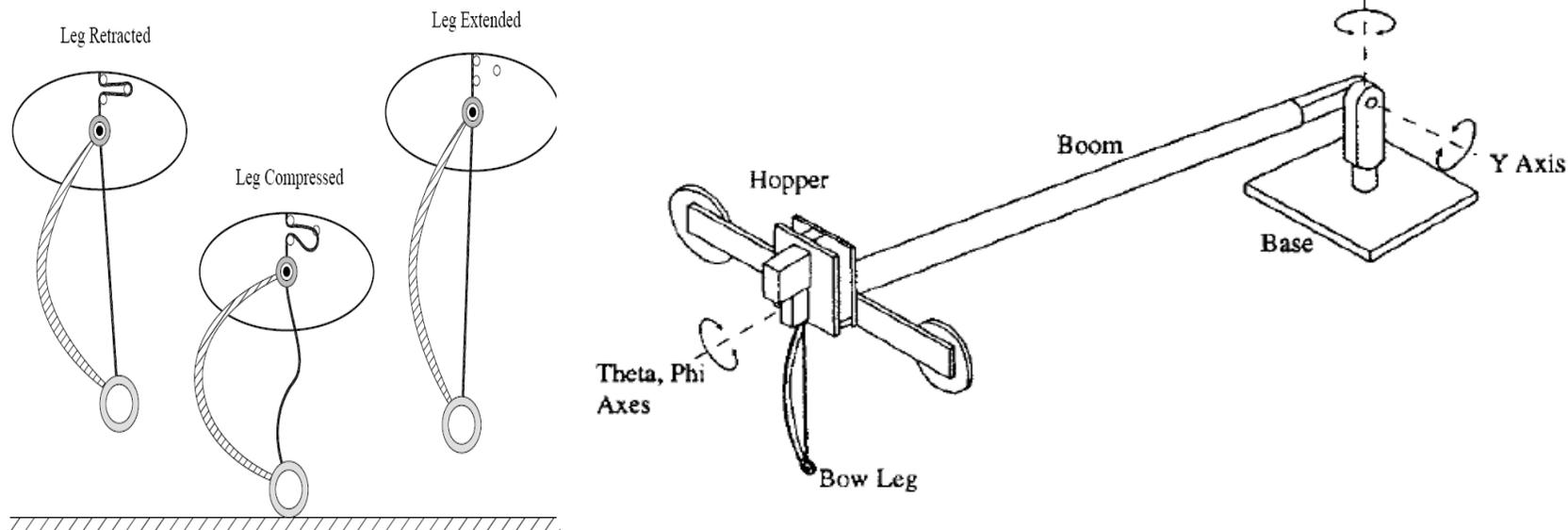


## ARL Monopod II 控制系统工作流程图

控制器由两个具有并行浮点计算功能的**INMOS**微处理器构成，其中控制指令的计算、数据转换、滤波处理在其中的一个高端处理器**IMST800D**上进行，低端处理器**IMST225**则负责**I/O**功能，包括传感器信号获取、控制命令的发送、时钟管理等功能。

运行三个**C**语言写的程序：**Master.c**在高端处理器上运行；**Mult.c**和**Gintf.c**在低端处理器上运行，分别执行操作硬件和两处理器的同步通讯功能。

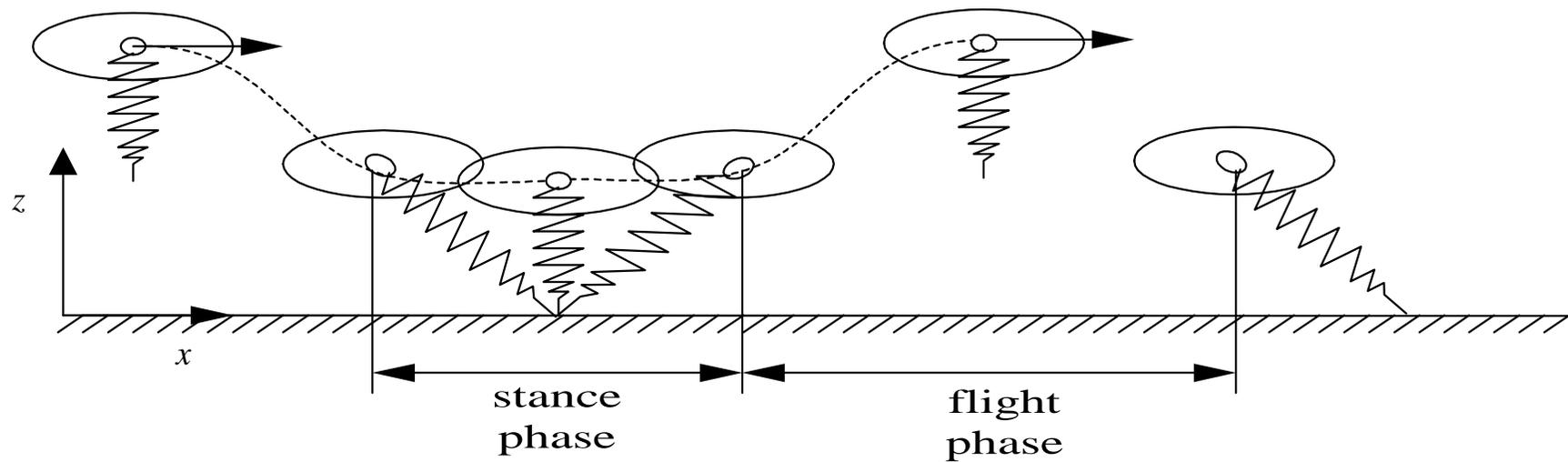
## Bow Leg CMU RI USA



**结构：** 通过绳索张紧的轻质弓形腿，在机器人的腾空阶段通过电机拉动绳索存储能量，在落地的瞬间通过触发释放储存在腿部的弹性势能，实现机器人跳跃。

**控制：** Bow Leg的控制系统包括一台133MHZ的Pentium PC 作为主控计算机，通过一个两通道的积分式译码卡和一个多通道、多函数功能的I/O板卡与机器人相连接。通过基座两个512线的光电编码器，测量机器人XY轴向的位置，机器人与支撑杆连接处的电位计记录机器人的身体姿态角。

## 弹性负载倒立摆模型(SLIP)



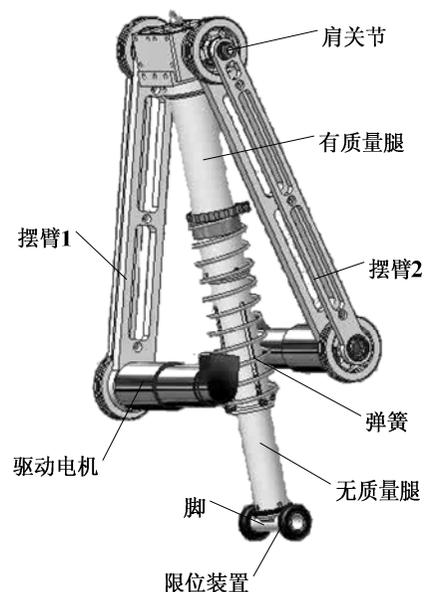
(1) 回避了多自由度机器人系统运动的**动力学耦合效应**，降低了机器人运动的能力和动作的灵巧性，离仿生机器人还有一定的距离。

(2) 机器人的运动的产生和控制需要有**功率密度很高的驱动器**作保证，一般采用液压和气动的方式，限制了机器人的运动范围，大大降低了机器人的运动效率。

(3) 机器人的控制采用简单的**PD控制方法**或者离线的**控制量查表方法**，由于没有考虑运动学的耦合和非线性时变等特性。在多状态运动和高速运动的情况下性能会变得很差，

## 论文研究的背景：

双臂单腿弹跳机器人  
由何广平、陆震等人提出。  
2005—2011



- (1) 脱离了SLIP模型，利用机器人各个构件之间动力学耦合效应，通过摆臂模仿动物头颈、尾巴对身体运动的平衡作用，具有更高的运动灵巧性。
- (2) 将SLIP模型单点支撑的动态站立平衡，扩展为多平衡姿态的平衡形流形，使其具有较多的动态稳定平衡点，扩展了运动形式和运动能力。
- (3) 通过电机控制，具有欠驱动的弹簧腿结构，通过控制注入弹簧的能量实现跳跃高度的控制和跳跃间能量的循环利用，高效率、大范围运动力。

## 论文研究的内容：

### 主要内容：单腿弹跳机器人控制系统的研究

- (1) 对单腿弹跳机器人及其控制系统进行数学建模，研究机器人的控制算法以及如何提高控制算法的实时性和鲁棒性。
- (2) 对机器人控制算法的进行仿真研究，根据仿真结果进行控制系统的需求性分析，研究其中涉及到的关键技术。
- (3) 选择合适的元器件和电路，进行控制系统的软硬件结构体系的设计，研究控制算法在微控制器的实现。
- (4) 对控制系统进行相关的性能测试，对机器人进行运动控制以及站立平衡控制的实验研究，分析实验结果。

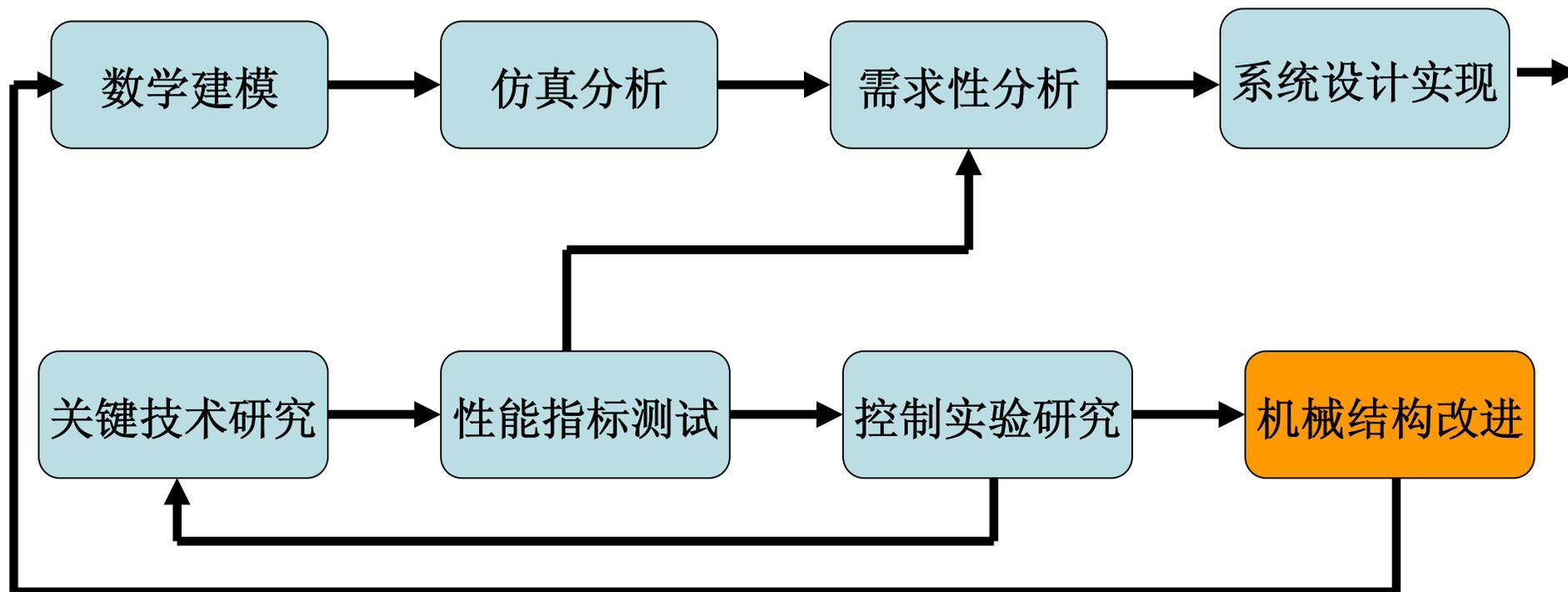
## 论文研究的意义：

(1) 本文的研究工作**搭建**了一个验证单腿跳跃机器人、欠驱动仿生机器人的相关先进控制算法的**实验研究平台**。

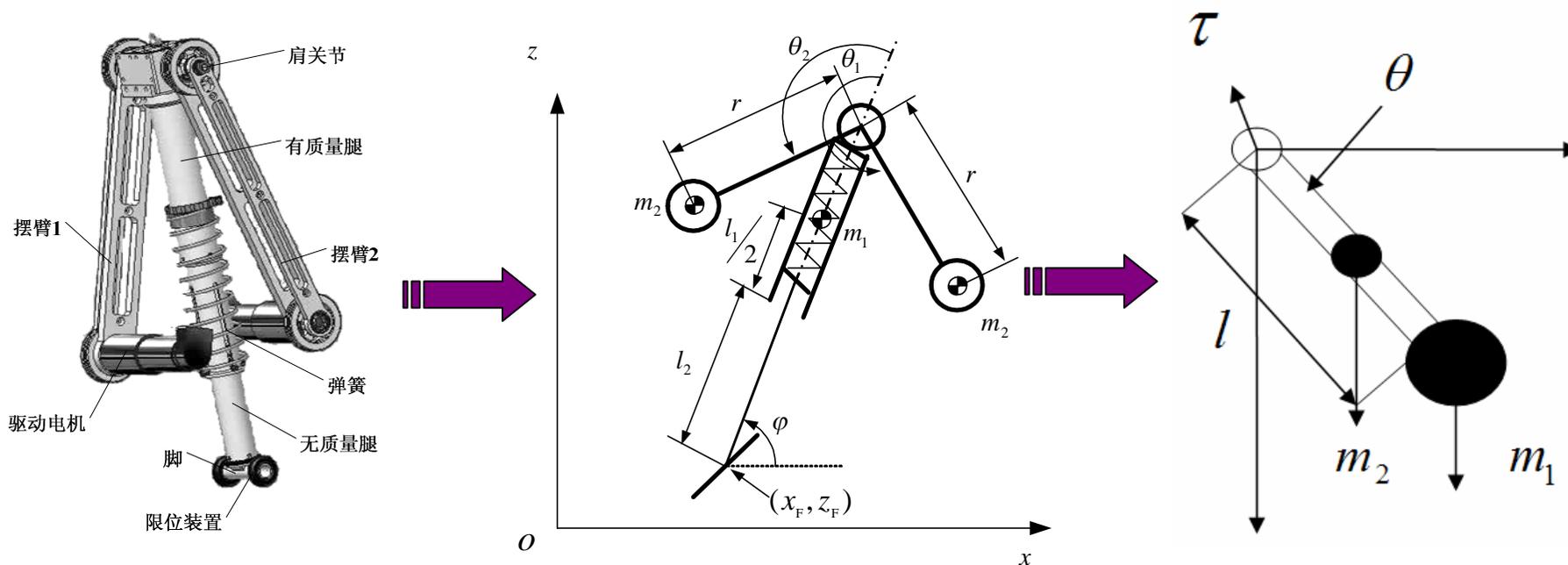
(2) 有利于理解和分析如何对单腿跳跃机器人进行运动控制和动作规划，为单腿跳跃机器人的后续的起跳、原地跳跃和前后向跳跃运动**奠定坚实的基础**。

(3) 有利于更深刻的了解单腿弹跳机器人的运动和站立平衡的基本原理，能够对后续单腿弹跳机器人系统的**机械结构的设计和 optimization**起指导作用。

## 论文研究的思路：



## 2.控制系统的建模及控制算法研究



**特点:** 单腿弹跳机器人利用两个摆臂的主动驱动，通过动力学耦合效应来实现对腿部姿态合弹簧振形的控制，实行机器人的动态站立平衡和跳跃，为一个**非完整约束的欠驱动系统**，具有高度非线性、强耦合、静态不稳定等特点。对它的控制存在一定的挑战性，对控制系统有特殊的要求。

**要求:** 高性能的运动控制系统是对机器人进行控制基础；传感器对姿态信号进行准确的采集；作为执行元件的两个电机驱动的摆臂能够准确、快速的跟踪运动规划出来的控制指令信号；算法实时性、鲁棒性能好。

## 摆臂控制系统建模:

**三个部分:** 一是直流电机和减速器的模型; 二是摆臂的动力学模型; 三是钢丝传动带来的非线性以及各个关节之间的摩擦力模型。

建立弹跳机器人的电驱动摆臂的数学模型为:

$$J\ddot{\theta} = -\frac{m_1}{2}gl\cos\theta - m_2gl\cos\theta + \tau + d + F_s$$

$$L\frac{d\theta}{dt} + RI + K_e n\dot{\theta} = U$$

$$J = \frac{4}{3}m_1l^2$$

$$\tau = K_m nI$$

$$F_s = B\dot{\theta} + AS_f(\dot{\theta})$$

其中 $m_1$ 为直流电机的质量,  $m_2$ 为摆臂的质量,  $l$ 为摆臂的长度。  $J$ 为摆臂的转动惯量,  $U$ 为电机输入控制电压。  $n$ 为减速器的输出加速比,  $R$ 为电机电枢电阻,  $I$ 为电枢电流,  $B$ 为折合得到的系统沾滞摩擦系数,  $S_f$ 为辨识得到的非线性摩擦力。

## 摆臂控制算法：

### PID 控制算法

在实际工程应用中对机械臂的控制。通常采用的最多的是PID 控制算法

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

数字控制系统用的增量式的PID 控制器：

$$\begin{aligned} \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = & K_p (e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) \\ & + K_D (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{aligned}$$

具有简单易用的特点，但是由于电驱动摆臂为一非线性控制系统，PID 控制器难以实现摆臂大范围内的轨迹精确，快速的跟踪，同时控制参数的整定是难点。

## 计算力矩法

通过在控制力矩中引入系统模型的非线性部分，进行模型的非线性动力学补偿，将系统的模型补偿为一个线性系统。利用状态反馈可以实现误差的收敛和控制性能的改变。

假定：

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 + \Delta\mathbf{U}$$

非线性补偿部分：

$$\Delta\mathbf{U} = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{K}_m \mathbf{n} \mathbf{I}} \left( \frac{\mathbf{m}_1}{2} \mathbf{g} \cos\theta + \mathbf{m}_2 \mathbf{g} \cos\theta + \mathbf{A} \mathbf{S}_f(\dot{\theta}) - \mathbf{d} \right)$$

得到线性系统：

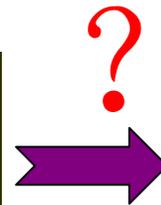
$$\mathbf{J}\ddot{\theta} = \left( \mathbf{B} - \frac{\mathbf{K}_m \mathbf{K}_e \mathbf{n}^2}{\mathbf{R}} \right) \dot{\theta} + \frac{\mathbf{K}_m \mathbf{n}}{\mathbf{R} \mathbf{J}} \mathbf{U} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U} \end{aligned}$$

最后得到含有非线性补偿项的控制量：

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 + \mathbf{V}\mathbf{U} = -\mathbf{K}\mathbf{X} + \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{K}_m \mathbf{n} \mathbf{I}} \left( \frac{\mathbf{m}_1}{2} \mathbf{g} \cos\theta + \mathbf{m}_2 \mathbf{g} \cos\theta + \mathbf{A} \mathbf{S}_f(\dot{\theta}) - \mathbf{d} \right)$$

在模型参数与实际物理参数一致，传感器获取的信号准确的情况下具有较好的控制性能。

存在参数摄动  
传感器噪声  
外部干扰



提高控算法的鲁棒性！

### 3. 机器人的鲁棒控制算法研究

系统的不确定性分析：

**不确定性：** 参数的摄动、未建模动态以及未知的外部干扰

1. 模型中的**参数**与实际物理系数的**误差**，比如电机的质量、摆臂的质量和长度，折合得到的摩擦系数也都存在一定范围内的摄动。
2. 未建模动态包括其它一些未建模的非线性因素和由于摆臂的高频运动所激发的高频模态和机构的间隙和**柔性**所造成。
3. 外部干扰包括从传感器采集到的信号会存在一定的**噪声**和漂移，机器人外接的电缆、腿与地面的相对滑动也会对控制造成**干扰**。

系统的不确定性有多种表示形式，比如：加性摄动，乘性摄动，反馈摄动。在 $H_\infty$ 鲁棒控制的设计过程中，经常用到的是**乘性摄动**，它不仅能体现参数的变化，而且还包括了系统的未建模动态。

## 鲁棒控制性能指标

**1. 轨迹跟踪误差的控制：** 在模型参数发生摄动的情况下能够实现摆臂轨迹精确跟踪。即优化灵敏度函数， $S(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1}$  使  $\|W_s S\| \leq \gamma$

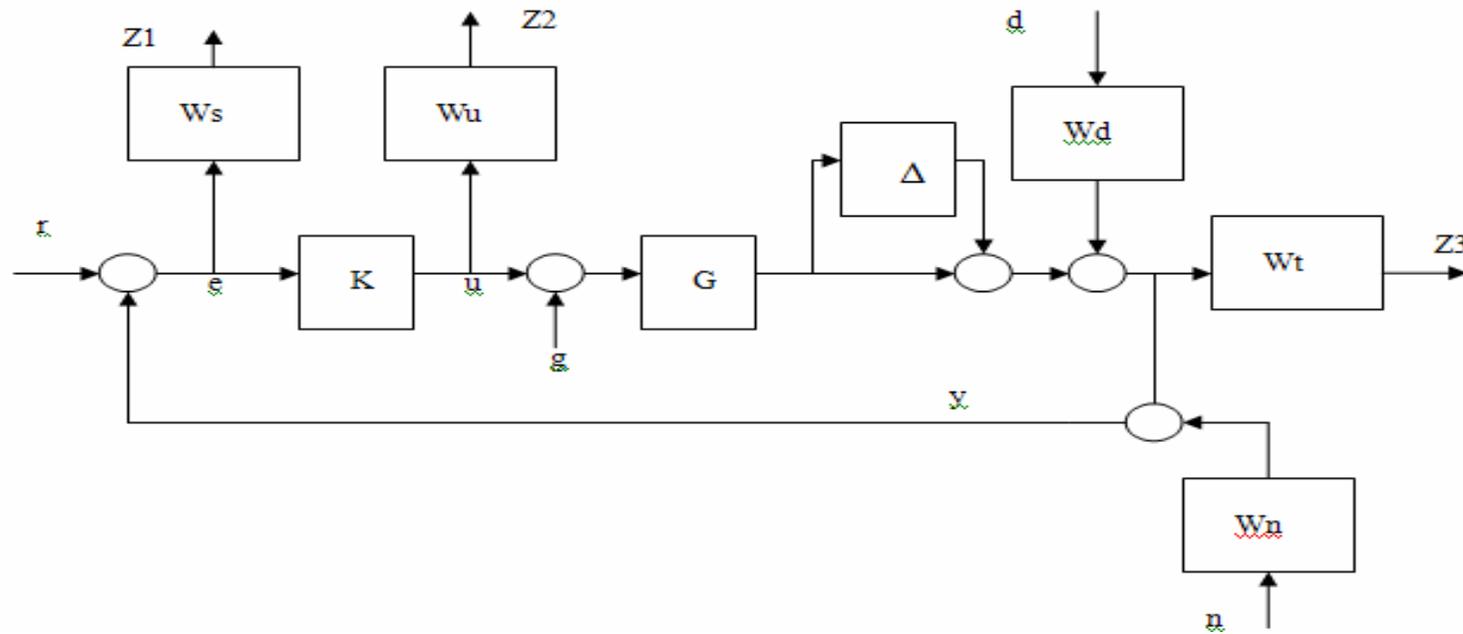
**2. 提高控制系统对不确定性摄动的容忍能力：** 要求减小补灵敏度函数

$$T(s) = I - S(s) = G(s)K(s)[I + G(s)K(s)]^{-1} \quad \text{使得, } \|W_t T\| \leq \gamma$$

**3. 对控制量进行优化：** 防止控制器有较大的输出，导致的执行器饱和而损坏机器人。尽量减少高频分量，减少机器人的“抖振”和防止激发一些未建模的模式。也即要求： $\|W_r R\| = \|W_r K S\| \leq \gamma$  其中  $R$  为输入灵敏度函数

**4. 减弱外部干扰的影响：** 减少外部干扰力矩对系统稳定性能和跟踪性能的影响，减小传感器检测噪声带来控制性能的恶化,选择合适的  $W_d(s)$

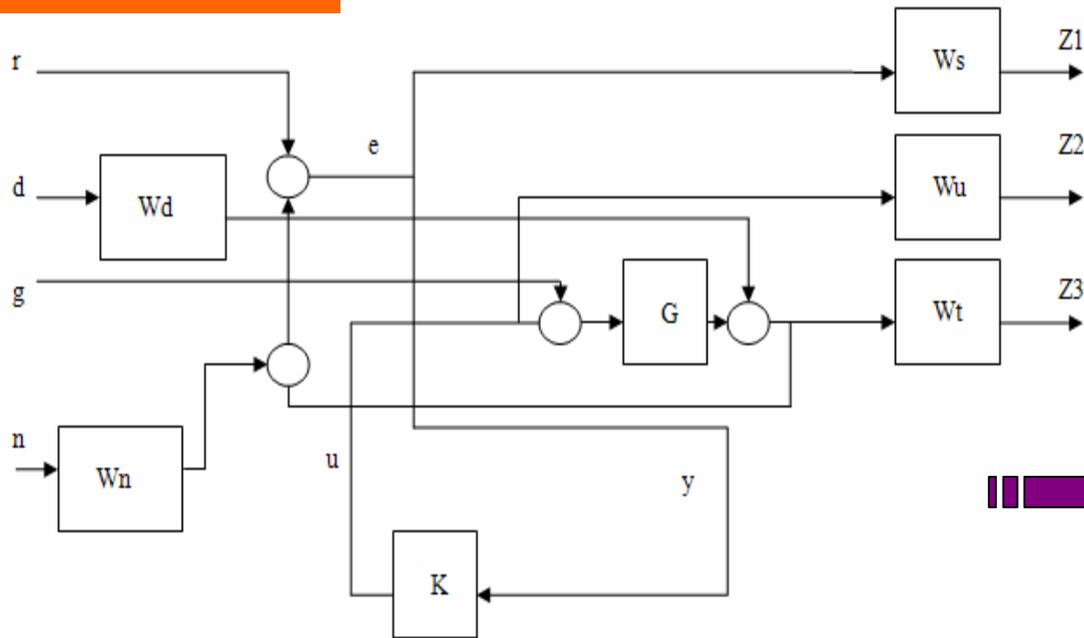
## 广义控制对象推导：



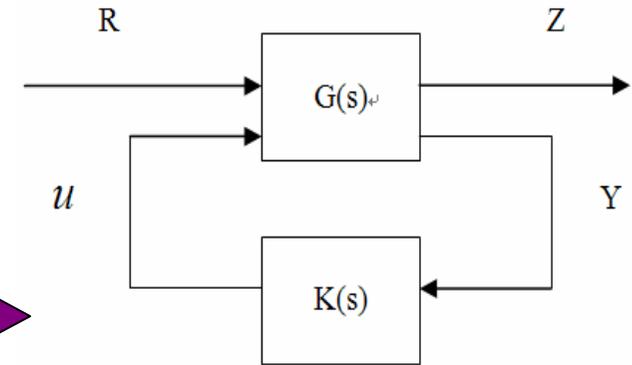
其中 $r$ 为参考输入， $e$ 为轨迹跟踪误差， $u$ 为控制器输出， $d$ 为外部干扰， $g$ 为重力干扰项， $n$ 为传感器检测噪声。

$W_s$   $W_u$   $W_t$   $W_d$   $W_n$  分别为对应为跟踪误差、控制器输入、系统输出、外部干扰和传感器噪声的加权函数。 $G_0$  是摆臂控制系统的标称或名义模型。 $K$  为待设计的反馈控制器。

## 框图变换：



## 标准 $H_\infty$ 控制问题



定义系统的评测输出  $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T = [W_s e \ W_r u \ W_t y]^T$  或系统评价指标，分别对应于控制对象的跟踪精度、控制量的大小、模型的未建模动态的控制加权矩阵，一般被称为性能加权、控制量加权和鲁棒加权。系统的指令  $[\mathbf{r} \ \mathbf{d}]^T$  和干扰输入，系统的输出为  $\mathbf{Y}$ ，控制器输出为  $\mathbf{U}$ 。

定义广义被控对象为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_P \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{P11} & \mathbf{G}_{P12} \\ \mathbf{G}_{P21} & \mathbf{G}_{P22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}$$

由上图可知:

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{W}_s \mathbf{e} = \mathbf{W}_s \mathbf{r} - \mathbf{W}_s \mathbf{W}_d \mathbf{d} - \mathbf{W}_s \mathbf{G}(s) \mathbf{u}$$

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{W}_r \mathbf{u}$$

$$\mathbf{z}_3 = \mathbf{W}_T \mathbf{W}_d \mathbf{d} + \mathbf{W}_T \mathbf{G}(s) \mathbf{u}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{r} - \mathbf{W}_d \mathbf{d} - \mathbf{W}_d \mathbf{G}(s) \mathbf{u}$$

可得广义控制对象:

$$\mathbf{G}_P(s) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_s & \mathbf{W}_s \mathbf{W}_d & -\mathbf{W}_s \mathbf{G} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{W}_r \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_t \mathbf{W}_d & -\mathbf{W}_d \mathbf{G} \\ \mathbf{I} & -\mathbf{W}_d & -\mathbf{W}_d \mathbf{G} \end{bmatrix}$$

由此将弹跳机器人摆臂控制的混合灵敏度优化问题转化为一个标准的  $H_\infty$  控制问题。即在干扰存在下  $\boldsymbol{\omega} = [\mathbf{r} \quad \mathbf{d}]^T$  (在系统性能设计目标是减少跟踪误差时, 外界指令信号也当作干扰信号处理), 设计一个控制器  $\mathbf{K}$ , 使闭环系统稳定且保持摆臂控制系统评测信号  $\min \mathbf{z} = \min [z_1 \quad z_2 \quad z_3]$  (最优) 或者  $\mathbf{z} = [z_1 \quad z_2 \quad z_3] \leq \gamma$  (次优)。

## 性能加权函数：

1.性能加权  $W_s(s)$  的选取： 主要考虑干扰抑制，由于系统的外干扰信号和外输入信号的频率一般较低，为了保证系统具有良好的抗干扰能力。 $W_s(s)$  为一**低通传递函数**。

2.控制加权  $W_r(s)$  的选取： 的选取是为避开使执行器饱和的控制输入和带给系统不良影响的脉冲式输入，为一**较小的系数**。

3.鲁棒加权  $W_t(s)$  的选取： 由模型的非结构不确定性即高频未建模动态和模型参数不确定性所决定，反映出了被控对象本身的固有特性。由于高频未建模动态特性和测量噪声在低频段相对较小，但在高频段随着频率的增高而增大， $W_t(s)$  为一**高通传递函数**。

$$W_{s1} = W_{s2} = \frac{1}{s + 0.5} \quad W_r = 0.01 \quad W_{T1} = W_{T2} = \frac{50(s + 30)}{s + 6000}$$

合适的参数在仿真分析中再根据分析结果加以调整！

## 鲁棒控制器的综合：

利用**MATLAB**的鲁棒控制工具箱（**Robust ControlToolbox**）对摆臂模型  $H_\infty$  控制器进行综合

最后得到相应的控制器**K**的状态空间实现为  $[A_K \quad B_K \quad C_K \quad D_K]$

$$A_K = \begin{bmatrix} -6301 & -4031 & -4591 & -341.5 \\ 512 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 64 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \end{bmatrix} \quad B_K = \begin{bmatrix} 1024 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_K = [43.13 \quad 503 \quad 55.74 \quad 1.344] \quad D_K = [0.04418]$$

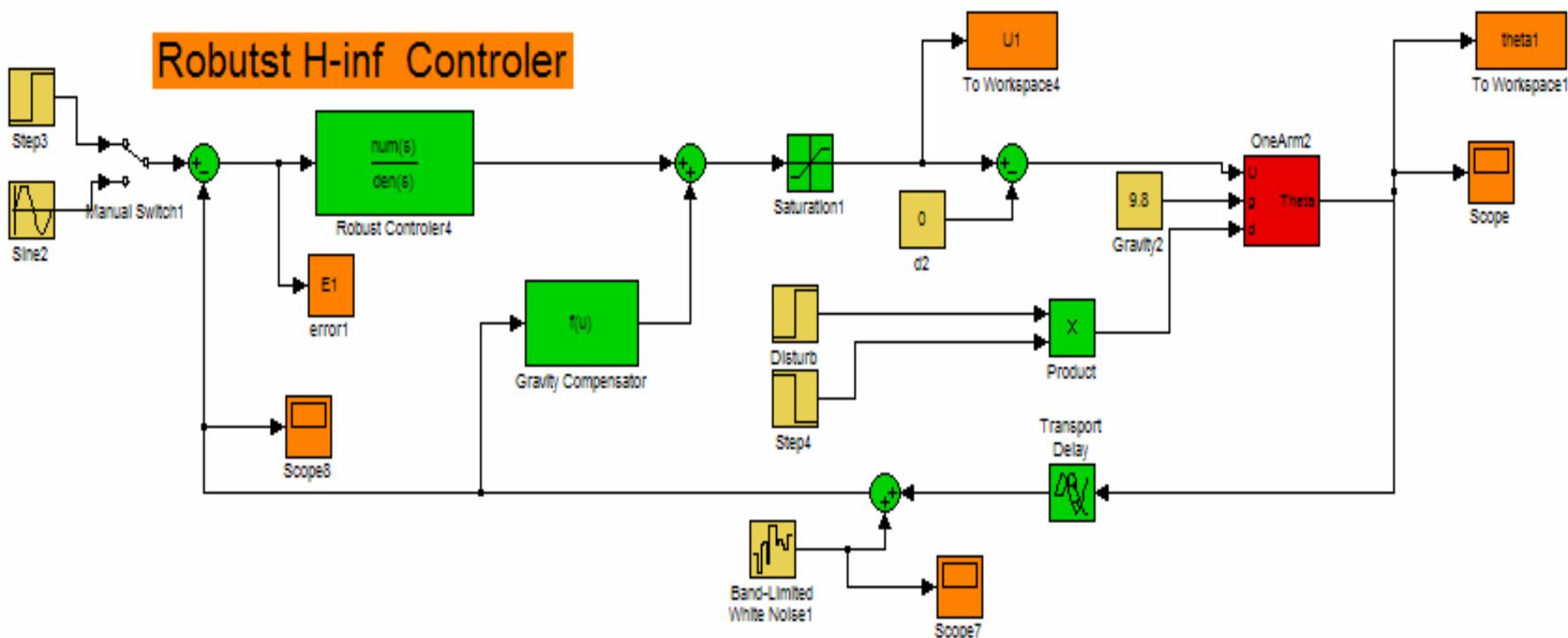
一定精度的范围内进行模型的**降阶处理**：

$$K(s) = \frac{-0.2551s^3 + 2.607e005s^2 + 2.028e006s + 3.4e004}{s^3 + 2060s^2 + 2.166e005s + 3.492e004}$$

## 4.控制算法仿真，系统需求性分析

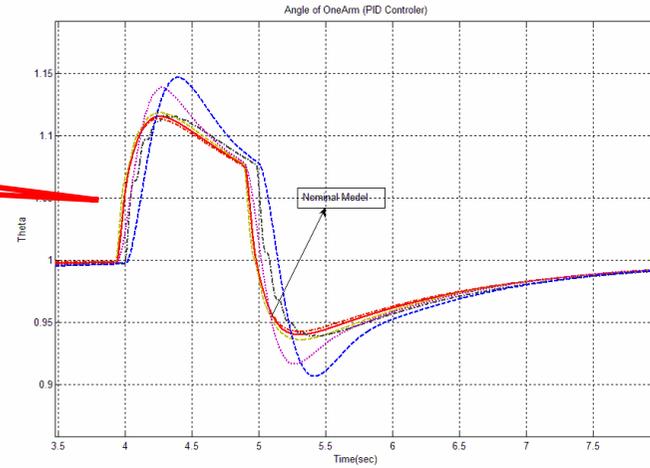
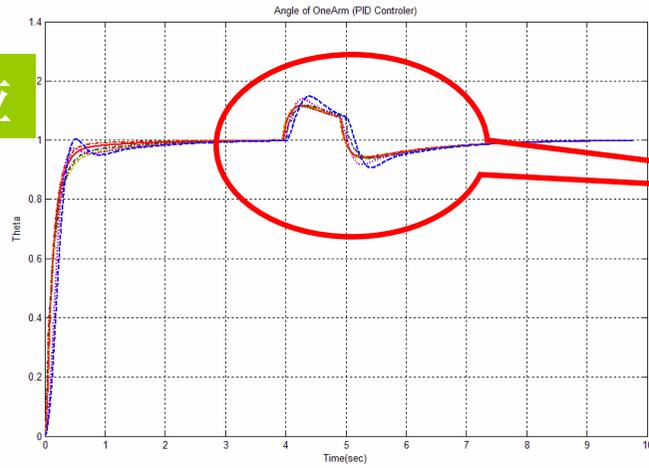
机器人站立平衡的仿真：

在MATLAB的SIMULINK 环境内，对摆臂控制系统进行数值仿真。仿真过程中的机器人的各个参数尽可能的接近实际机器人的物理参数，目的是尽可能的通过仿真来反映机器人的控制特点和对控制系统的要求。仿真时间为10S。在仿真过程中增加一外部干扰，检验控制系统对外部干扰的响应。

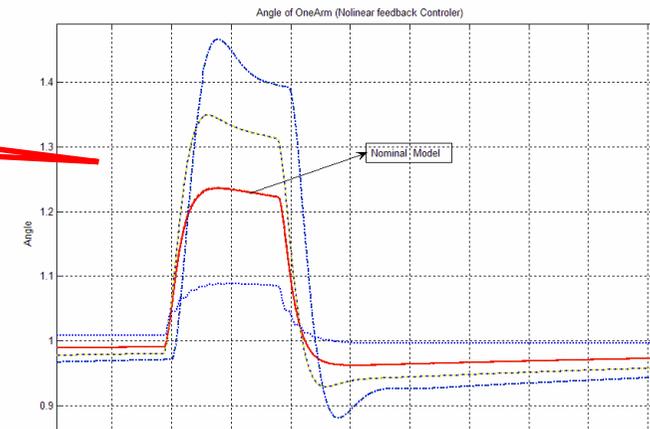
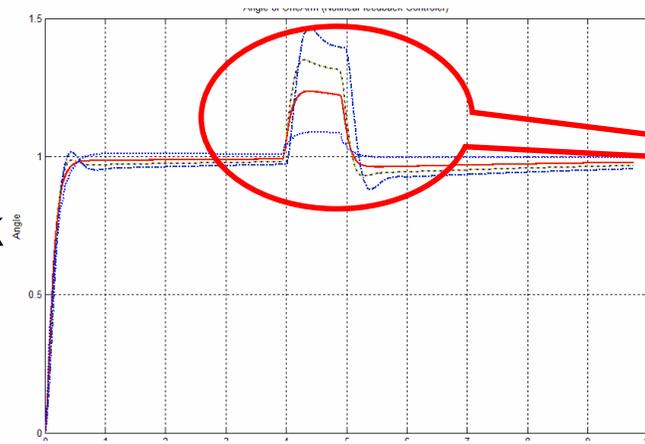


阶跃响应

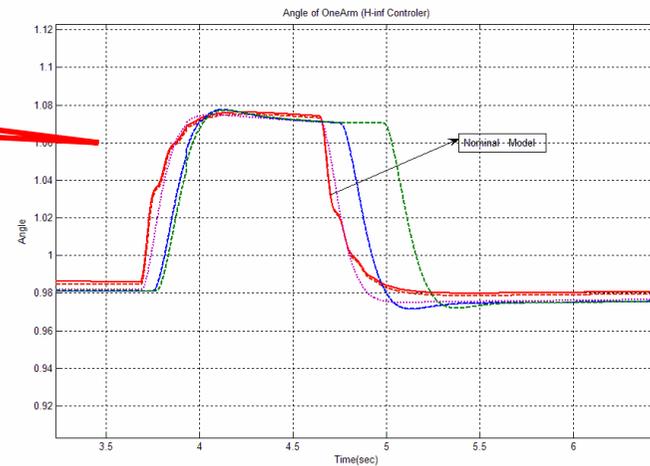
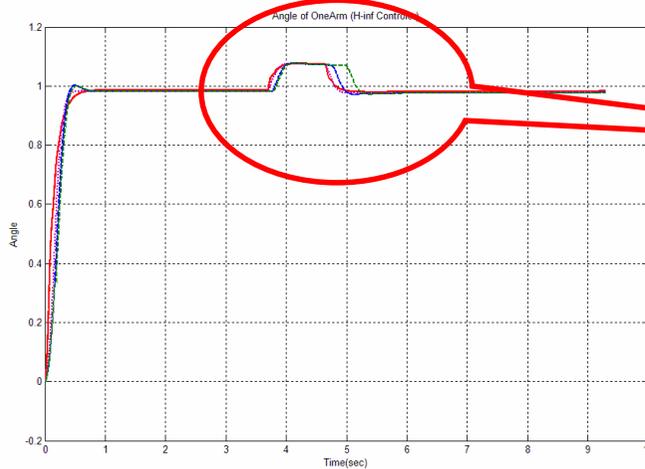
PID  
Control



Nolinear  
Feedback  
Control

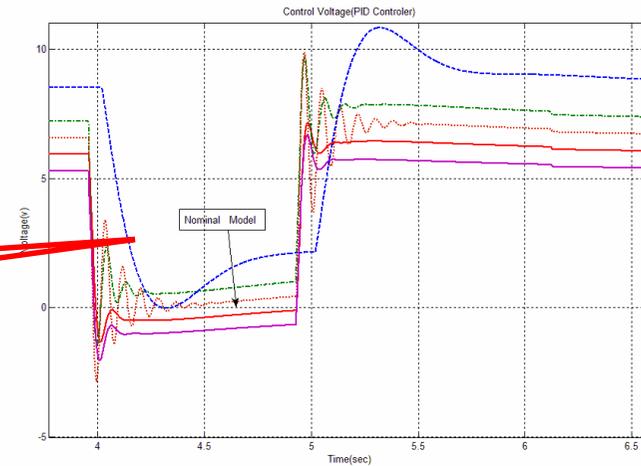
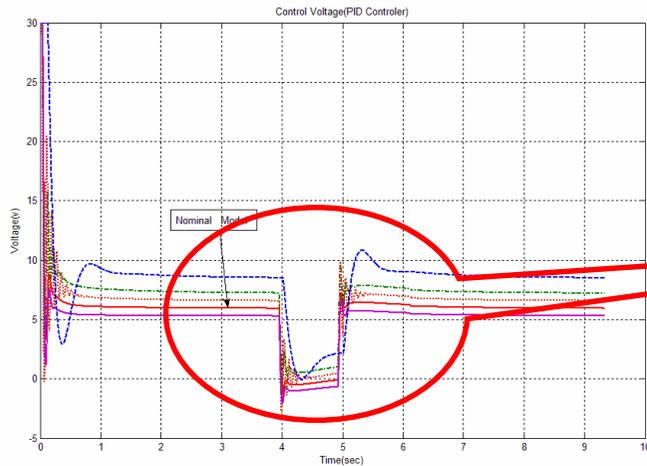


$H_{\infty}$   
Control

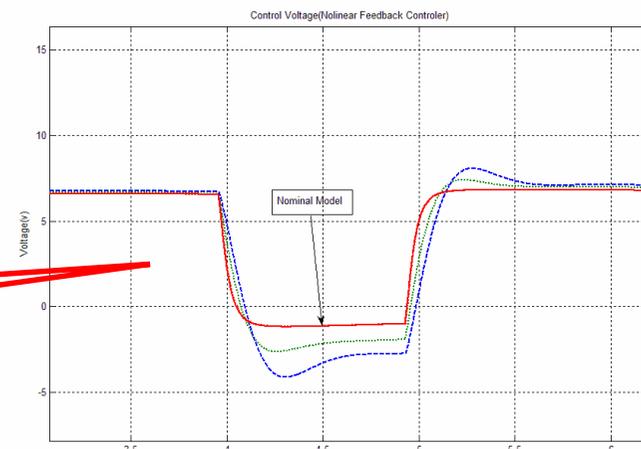
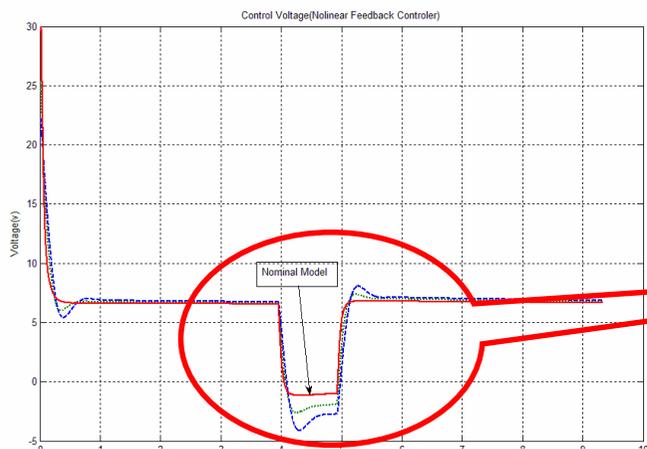


控制量

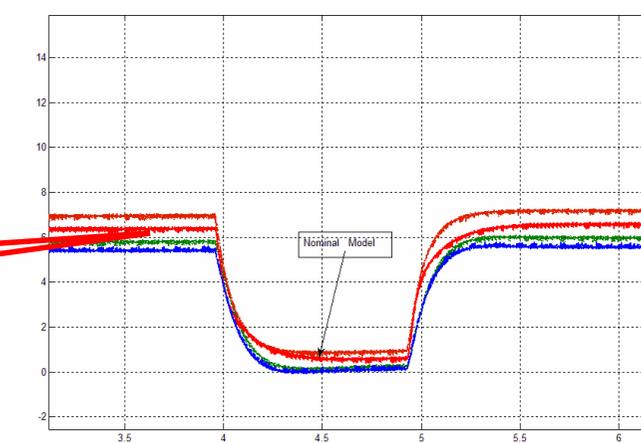
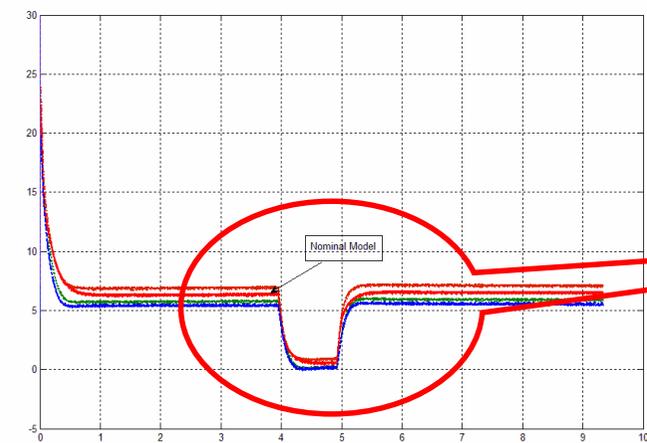
# PID Control



# Nolinear Feedback Control



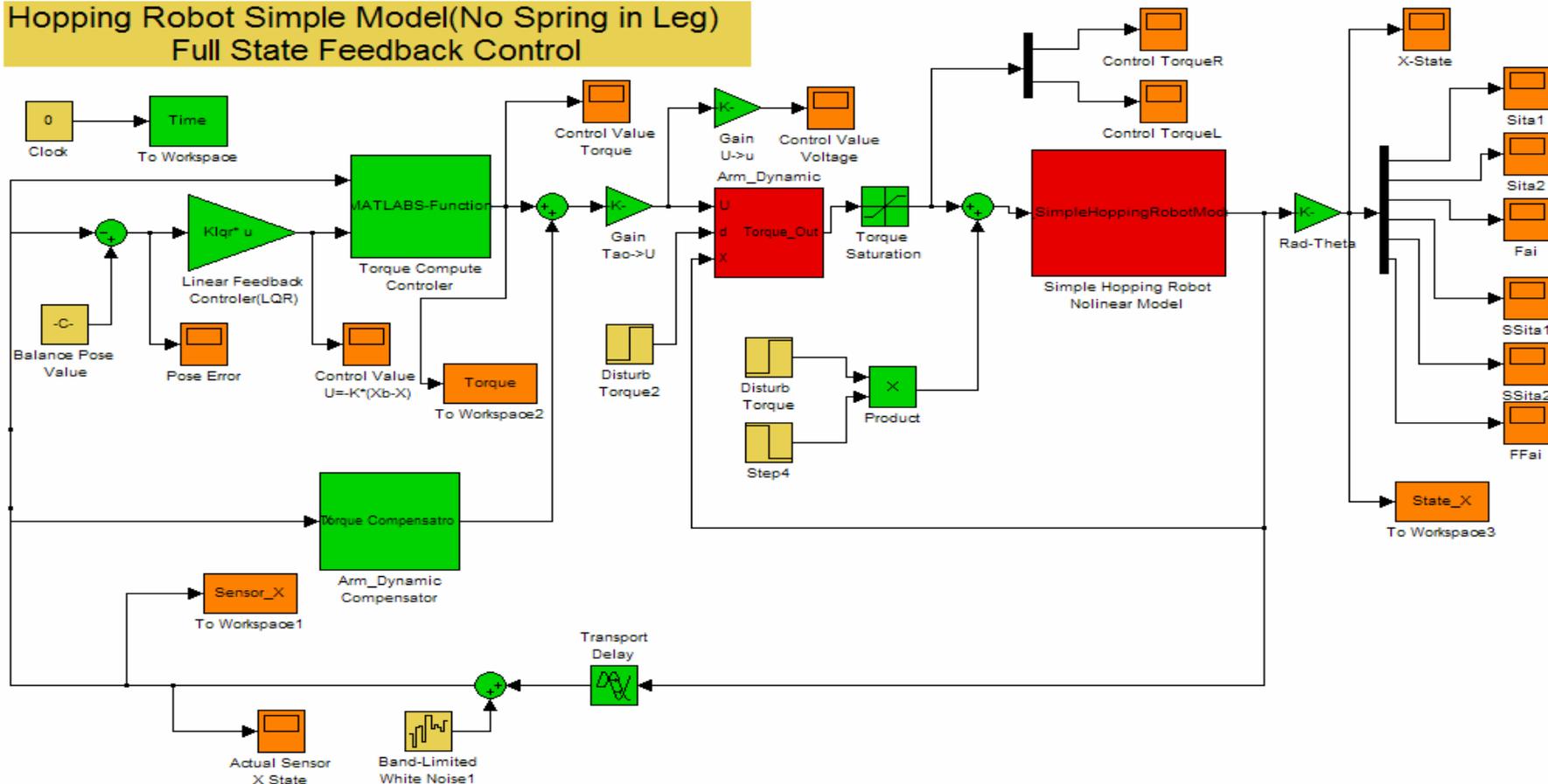
# $H_{\infty}$ Control



## 机器人站立平衡的仿真：

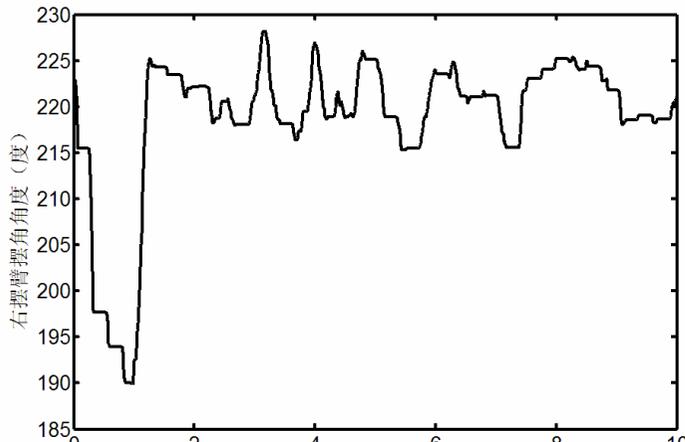
仿真框图如下图：其中的Hopping\_Robot 模块为封装成S函数的机器人的动力学模型，Arm\_Dynamic 模块为摆臂控制系统的数学模型；Torque\_Compute 为基于非线性补偿和全状态反馈组成的计算力矩控制器模块，Arm\_Compensator 为控制器内对摆臂动态的补偿部分。给定机器人的初始姿态为： $\theta_1 = 223^\circ, \theta_2 = 133^\circ, \varphi = 85^\circ, \dot{\theta}_1 = 0, \dot{\theta}_2 = 0, \dot{\varphi} = 0$

Hopping Robot Simple Model(No Spring in Leg)  
Full State Feedback Control

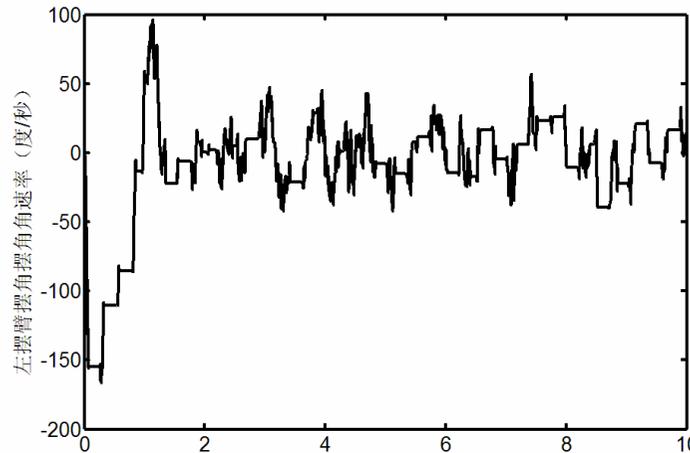


站立平衡  
状态变量

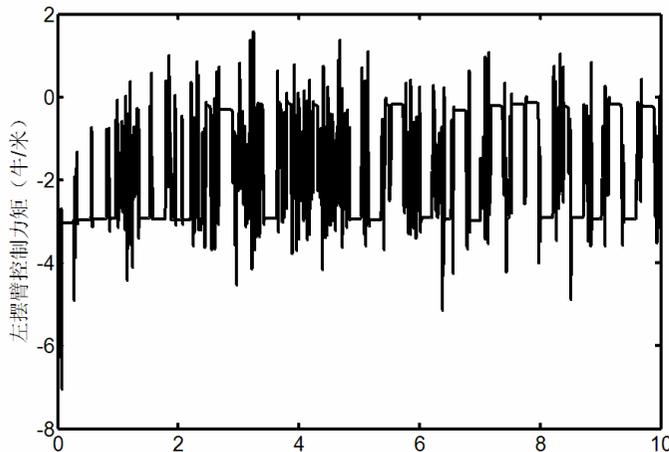
Sita1



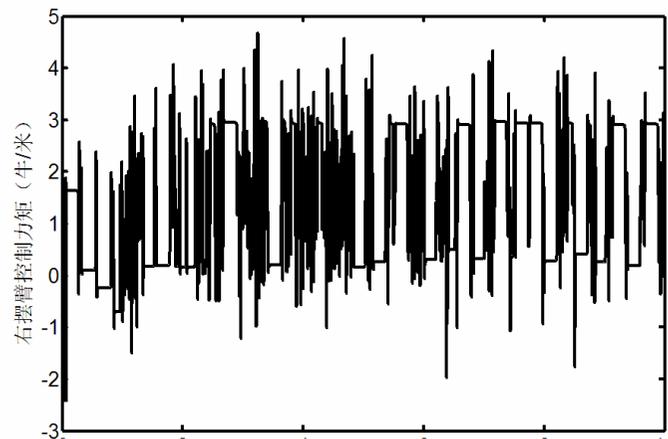
Sita2



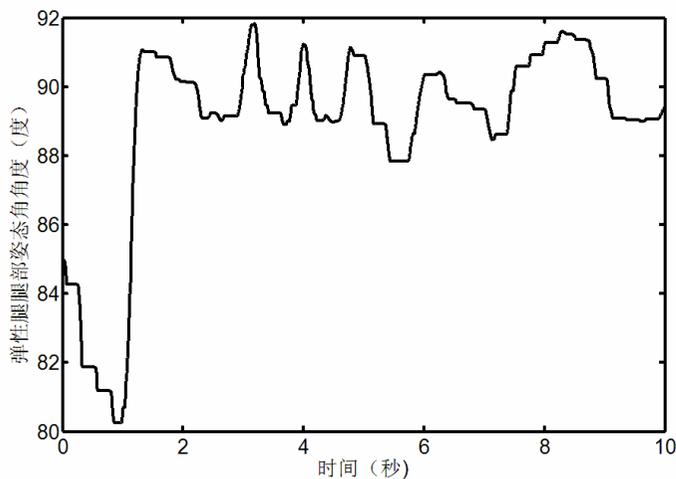
Tao1



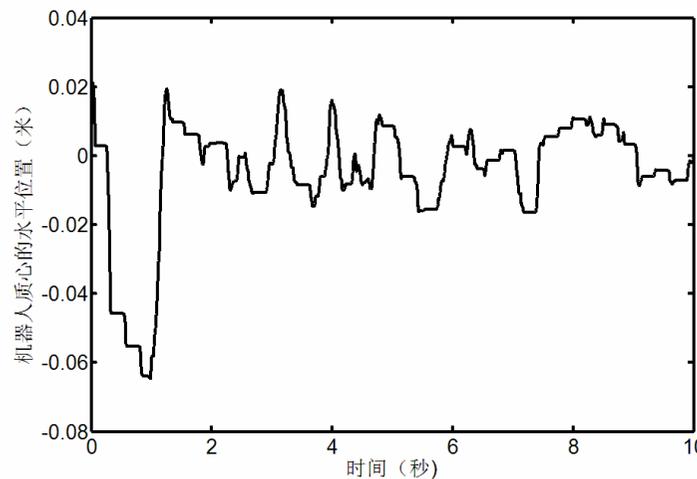
Tao2



Fi



M\_x



## 系统的需求性及关键技术分析：

### (1) 传感器信号的采集和处理：

信号采集的精度、实时性和低噪声有比较高的要求。解决由于传感器误差和非线性因素，信号传输和采集过程中加入的噪声和干扰，以及运动过程中造成的累积误差等问题。 **方法：** 多路采样， 软硬件滤波， 补偿修正。

### (2) 高性能电机的闭环控制：

电机工作在一个比较宽的范围，在平衡位置的高速的来回高频颤振，克服减速器齿隙和钢丝传动带来的非线性影响。 **方法：** 补偿算法，输出滤波

### (3) 机器人的实时控制问题：

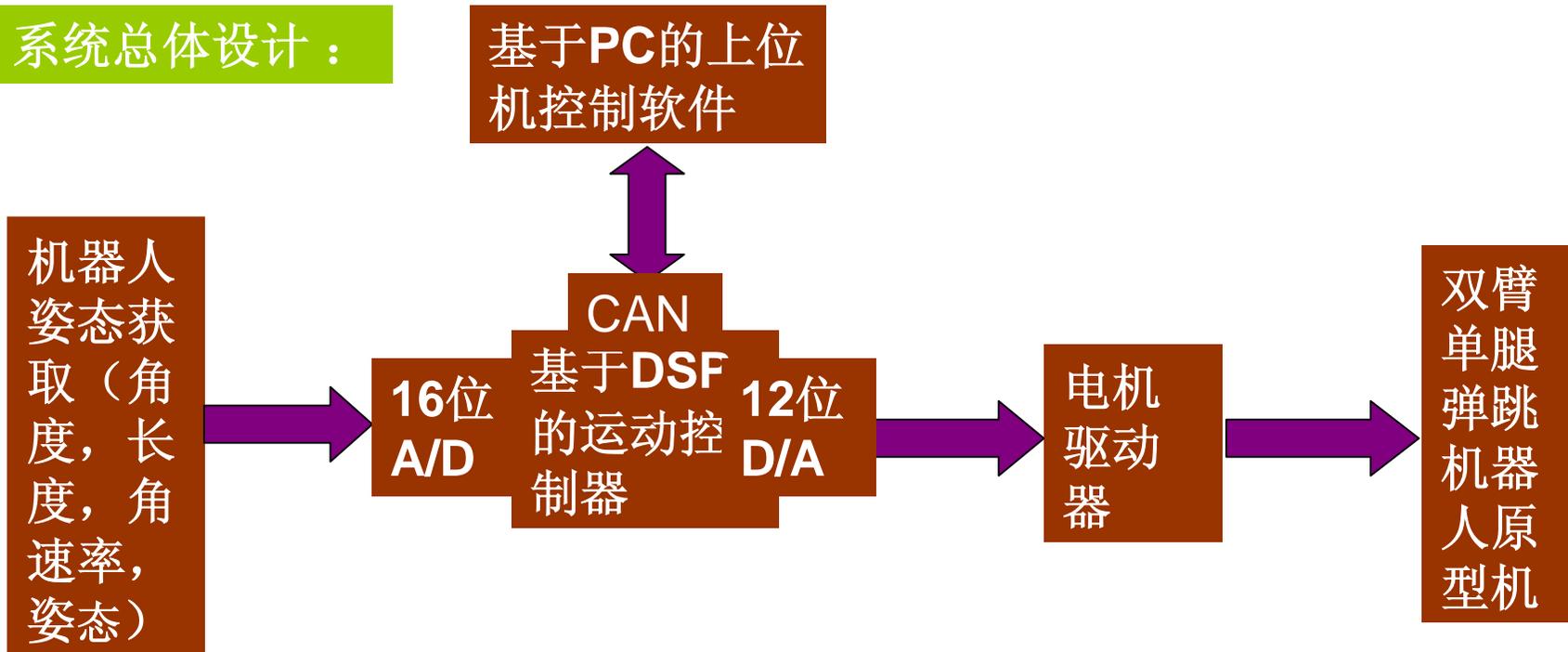
静态不稳定系统的控制,应该保证一个较小的控制周期。控制器任务包括非线性的动力学运算，信号采集，滤波，通信。 **方法：** 优化算法，混合编程

### (4) 控制参数的整定问题：

参数的整定：控制器反馈阵的系数、补偿的非线性摩擦力系数，滤波算法参数，力矩电压系数保护参数等。 **方法：** 系统的实验，辨识，数据分析。

## 5.控制系统的设计及实现

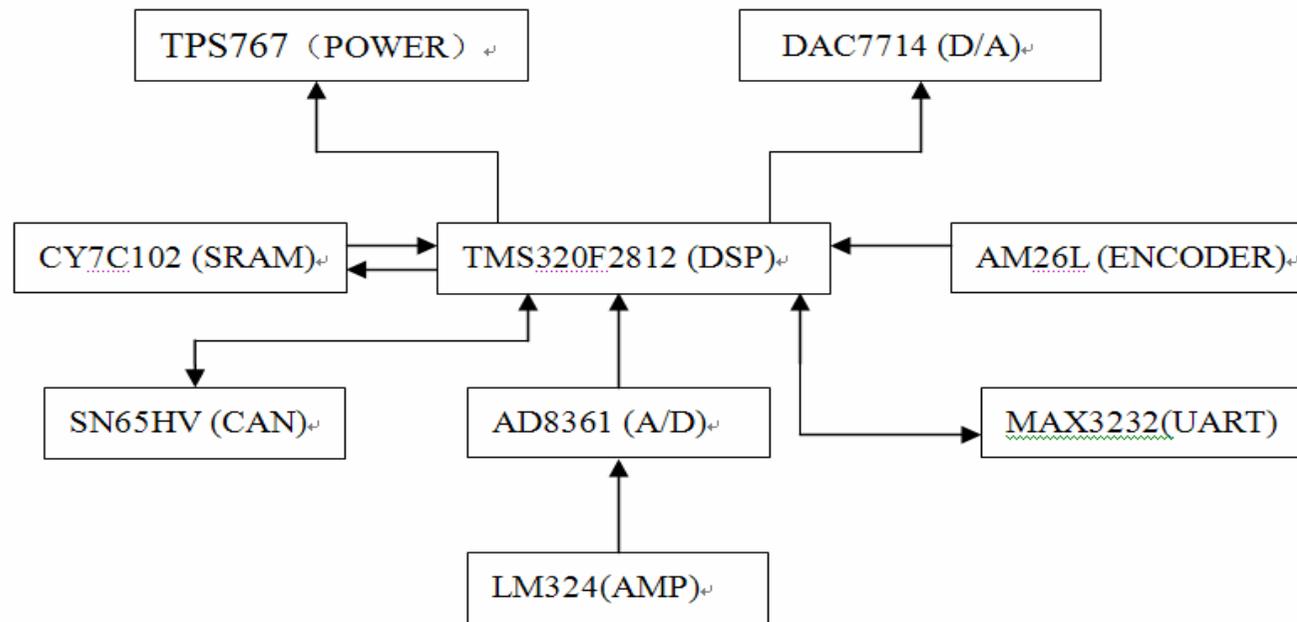
系统总体设计：



**优点：**充分利用了**DSP**在数据采集、滤波处理以及运动控制方面的优势，既能够保证传感器数据采集、处理的精度要求以及运动控制的高度实时性。同时也大大的减小了系统的体积，减少了开发的复杂程度，提高了系统的可靠性。

在**PC**机上可以很快的实现机器人动力学模型的解算、机器人的运动规划和控制率的生成。同时通过良好的人机界面，容易实现系统参数的整定，以及进行实验过程的调试和分析。

## 控制器硬件设计：



## 系统的硬件实现：

WDL-100 型 直线导电塑料位移传感器，CXTA-01单轴倾角传感器，CS-ARS-04 型角速率陀螺，HEDL5540，500线光电编码器，MAXON RE35 电机，ADS驱动器；

TI 公司 TMS320F2812 DSP控制器；CAN 通信方式；6位A/D,ADS8361，12位D/A DAC7714 扩展SDRAM，CPLD；电源，监控，信号调理滤波  
上位机软件 Visual C++6.0，C++Builder

下位机控制器实物图:



基于DSP  
的控制器

ADS 电机  
驱动器

可旋转水  
平支架

PC上位机  
控制软件

信号用航空  
插头

下位机  
控制器

保护钢丝  
信号电缆

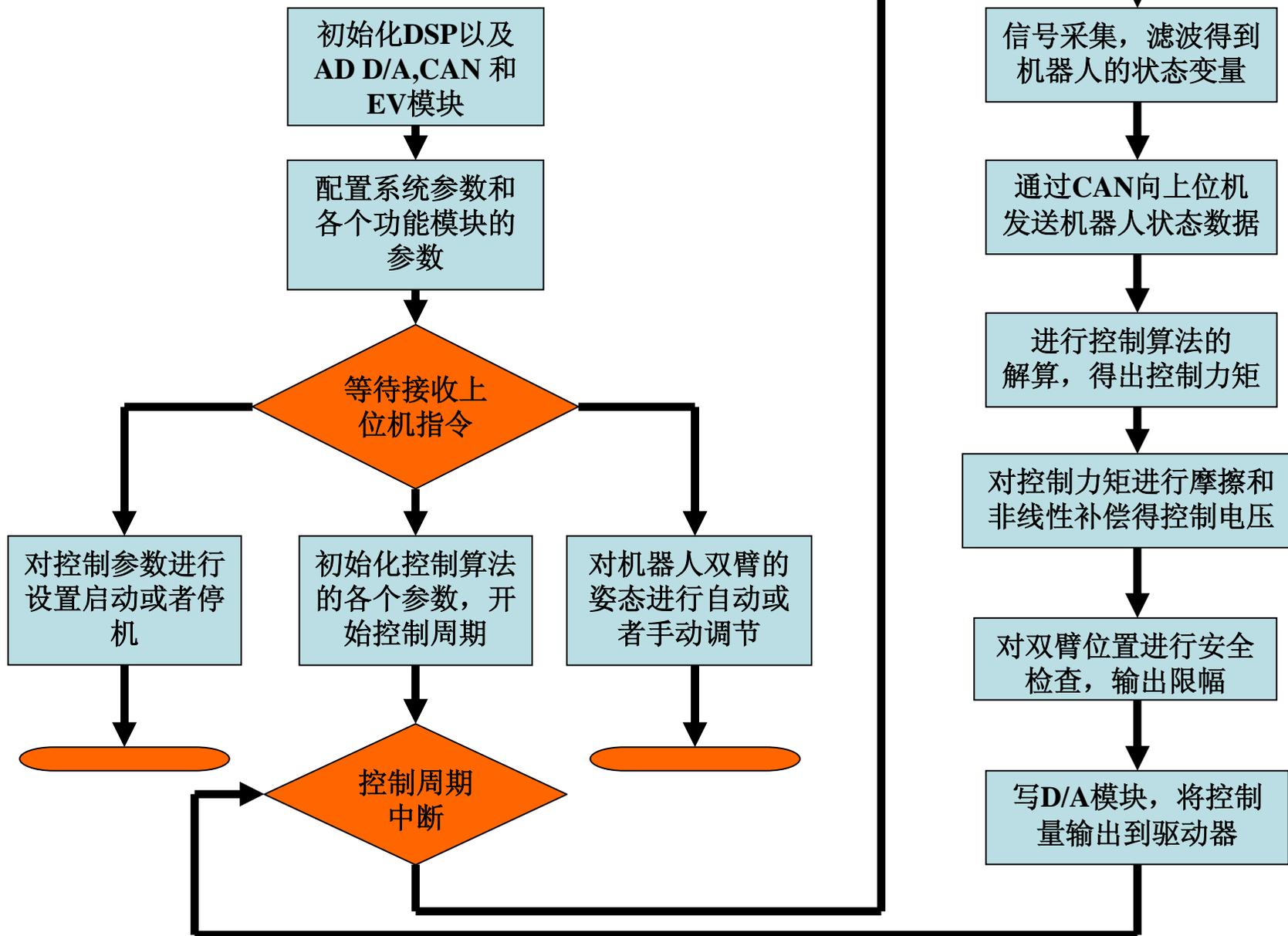
机器人控制实验图:

双臂单腿弹  
跳机器人



# 下位机控制算法实现：

# 机器人控制算法流程图



## 6. 控制系统的实验研究

### 1. 各个模块的性能测试实验

[实验视频](#)

配置滤波器的参数并对滤波后信号的**精度**、滤波算法的**实时性**进行分析；优化各个模块的算法和执行的**效率**，减小机器人的控制周期。

### 2. 电机的运动闭环控制实验

对控制系统的一些参数（比如摩擦力系数）进行**辨识**。对系统的整体性能进行测试，检验**外部干扰**给系统控制性能带来的影响。

### 3. 机器人的运动控制实验

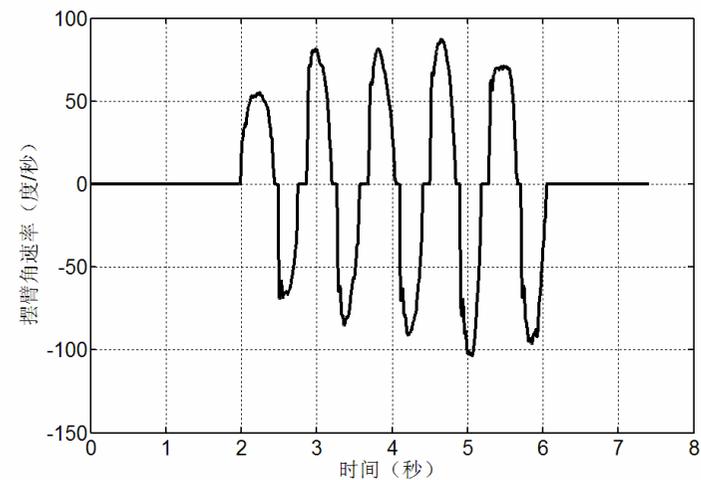
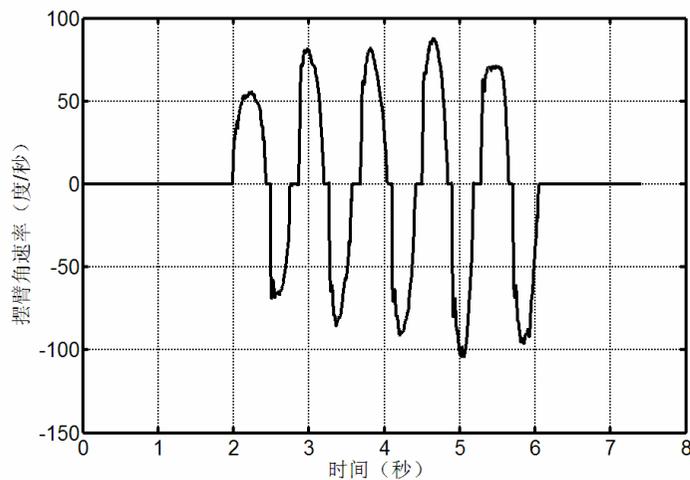
单双摆臂的位置和速度跟踪的控制，确定控制算法中的**各项参数**，了解臂腿之间的动力学耦合效应和弹性腿能量的积累过程。

### 4. 机器人的站立平衡实验

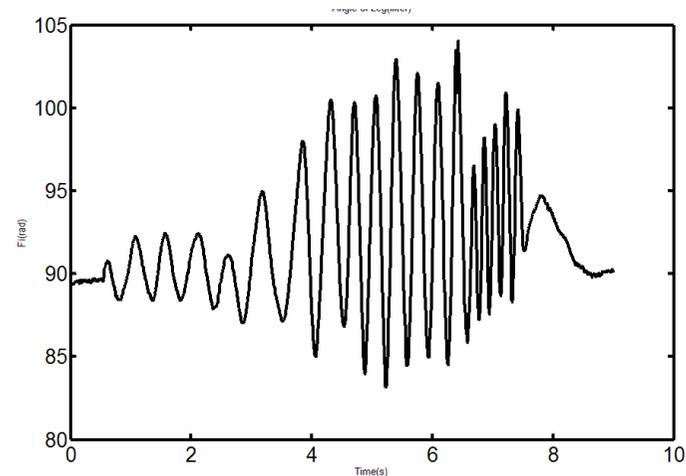
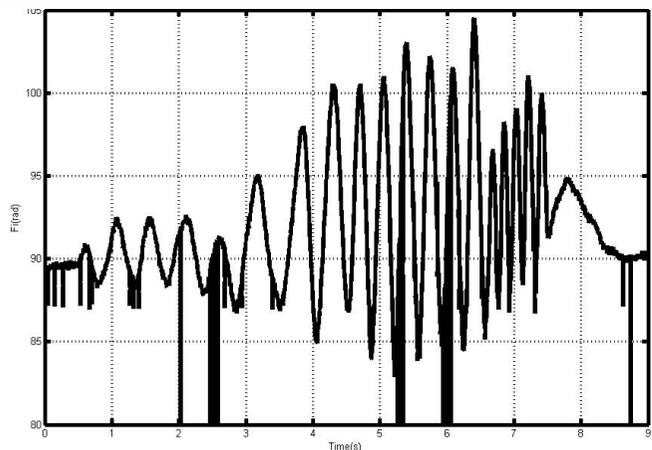
充分暴露控制系统和机器人机械结构中存在的问题，深入了解机器人站立平衡的原理，**检验实时控制算法的有效性**。

## 数字滤波效果:

摆角速率



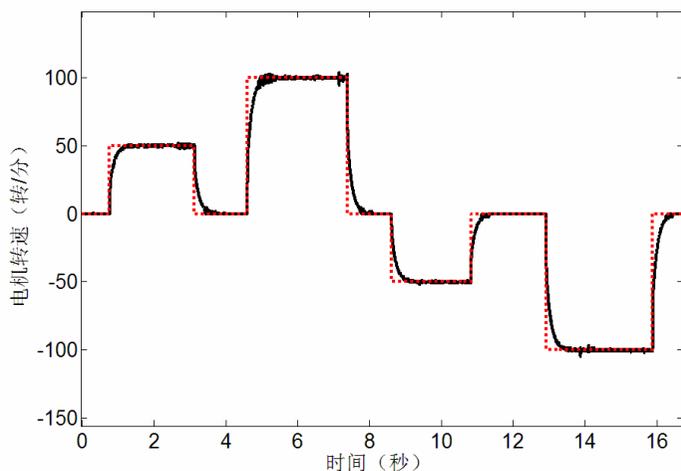
腿部倾角



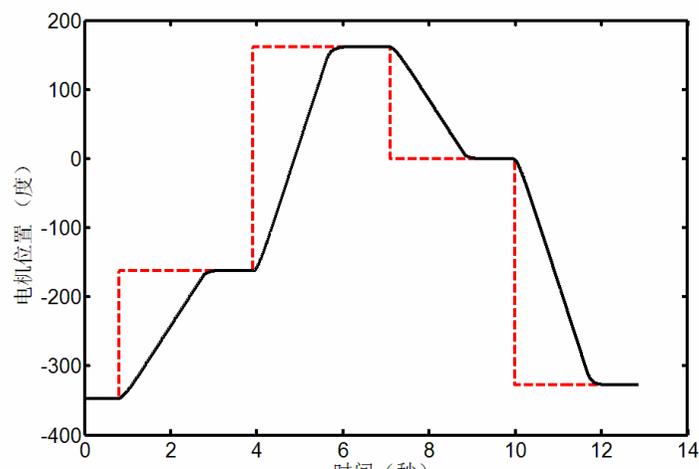
经过数字滤波以后的信号去掉了**脉冲干扰信号**，同时对**高频噪声**信号有一定的抑制作用，使得获得的信号变得比较平滑，有利于机器人的控制。

## 电机闭环性能测试：

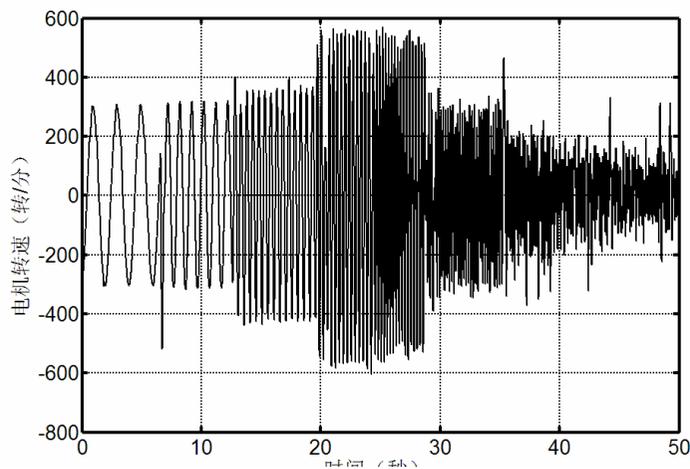
转速跟踪



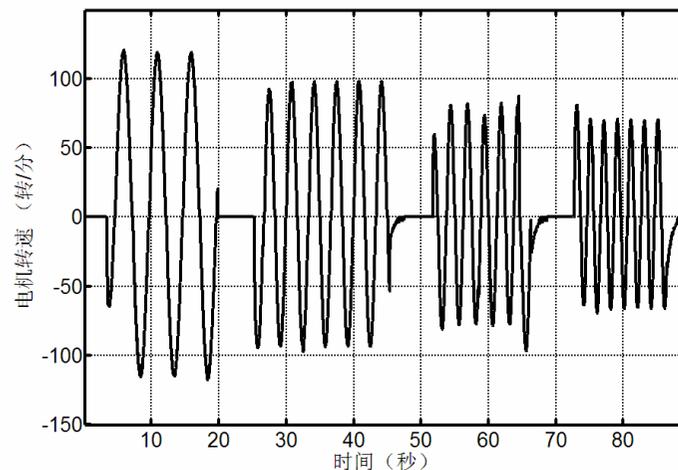
位置跟踪



开环正弦



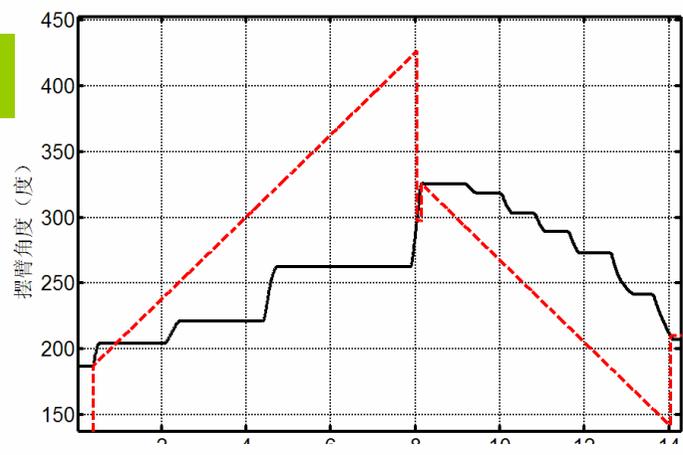
闭环正弦



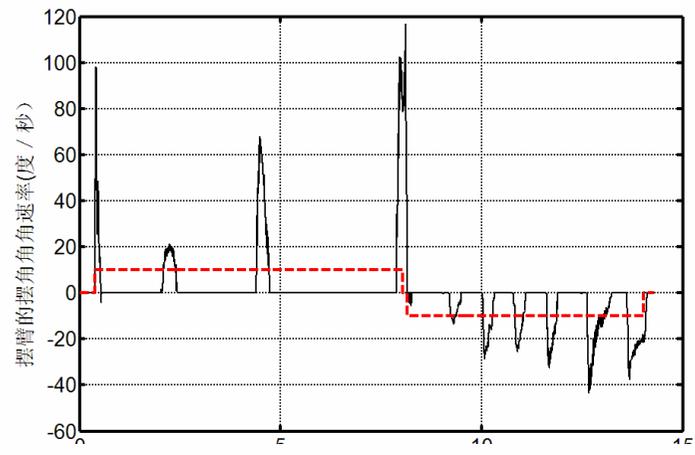
点划线为参考速度和参考位置信号，实线为电机的跟踪信号。位置跟踪调节时间短；超调量和稳态误差较小。整个闭环控制系统具有**较好的动态和稳态性能**

单臂:

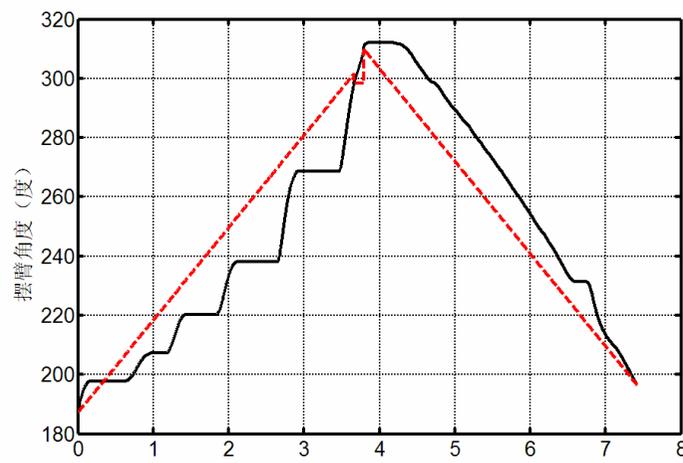
斜坡信号



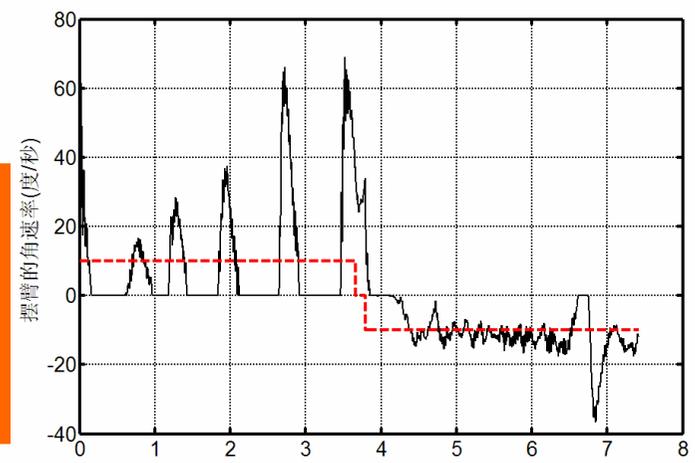
速度跟踪



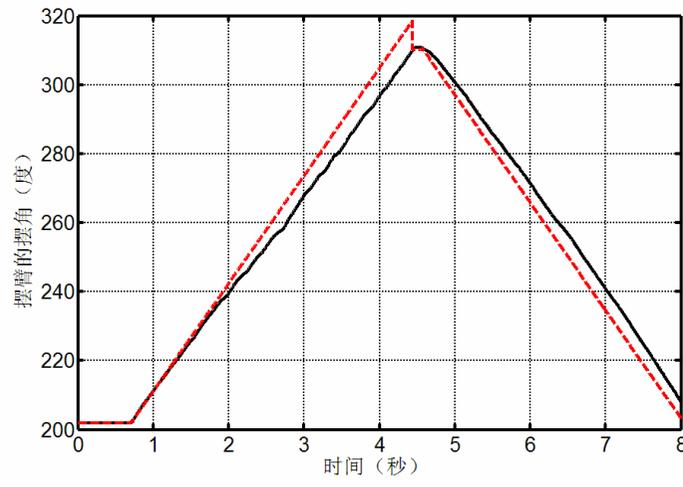
PD 控制



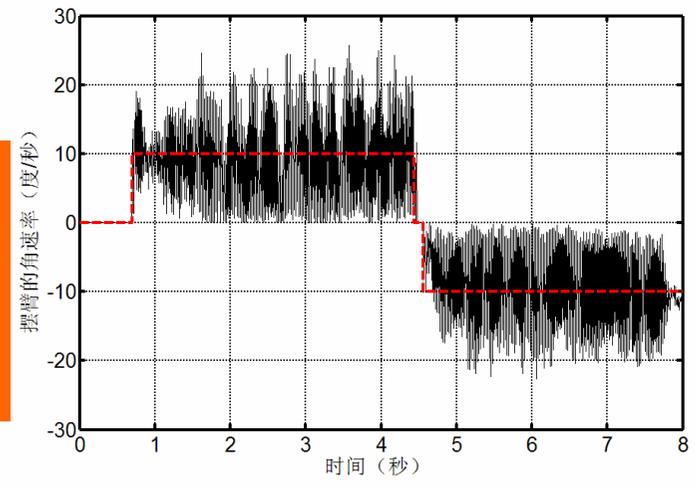
速度跟踪



非线性补偿

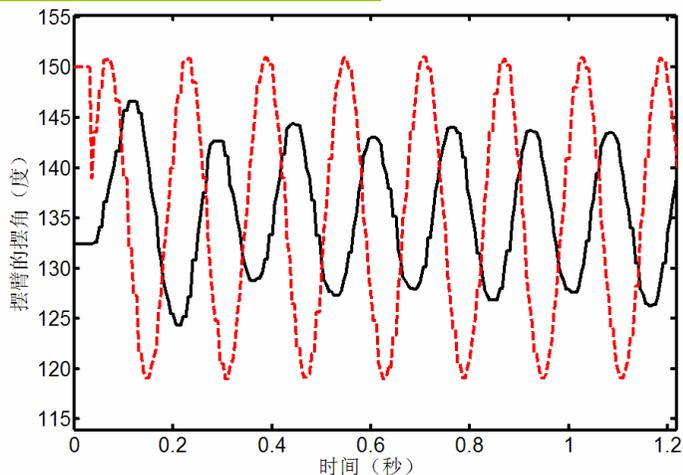


速度跟踪

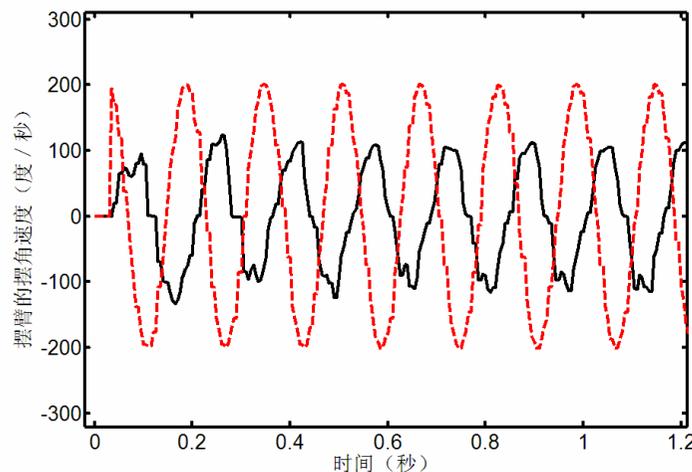


## 双臂正弦信号跟踪：

位置跟踪



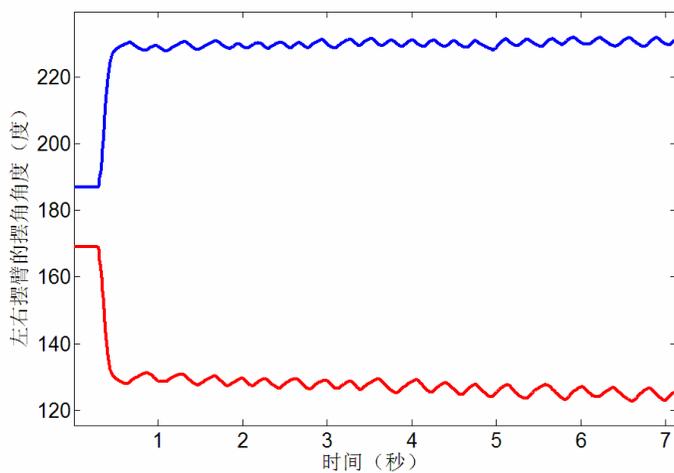
速度跟踪



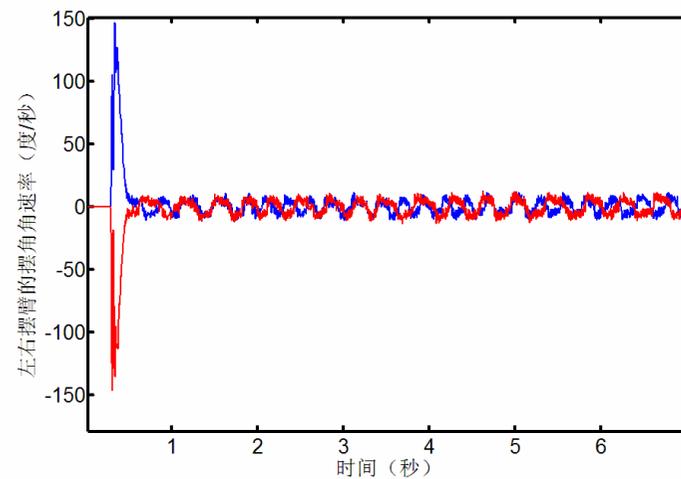
机器人的摆臂能够比较好的实现不同频率下的正弦信号跟踪，验证了控制系统各个部分的功能和性能的完善性，具备机器人控制的基本条件。

## 机器人初始平衡位置调节：

位置调节

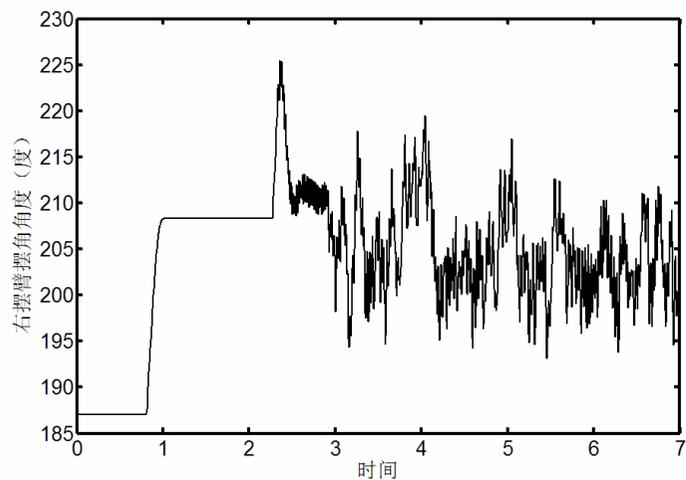


速度调节

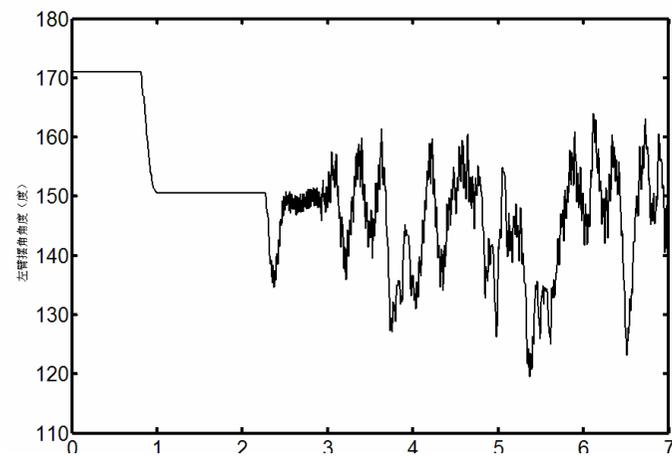


# 机器人的原地站立平衡实验:

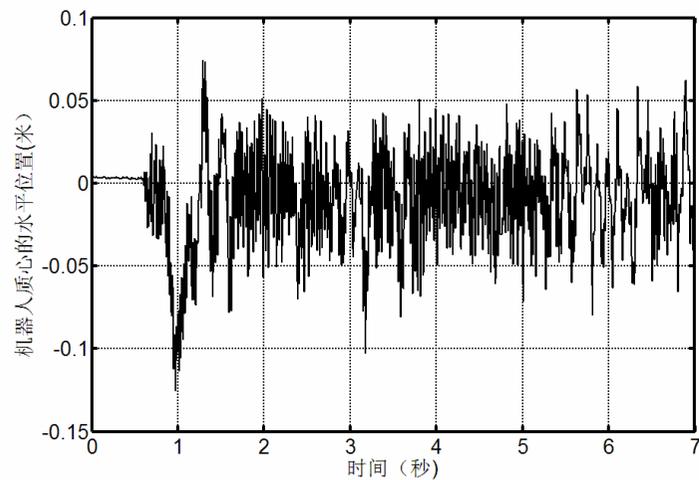
右臂摆角



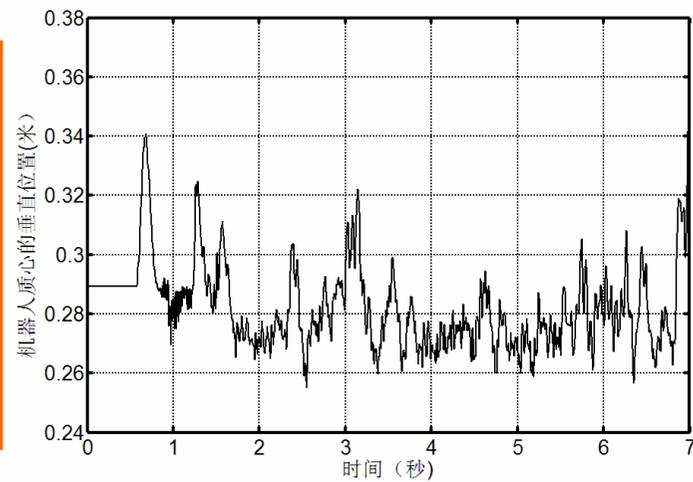
左臂摆角



质心水平位置



质心垂直位置



## 实验结果分析:

**结果:** 两个摆臂都在靠近平衡位置的的范围内出现了高频率的振荡。摆臂的高频振荡, 通过动力学之间的相互耦合, 实现对腿部姿态角和角速率的控制。两摆臂的运动规律基本上符合在仿真的摆角变化规律。证明了控制算法的正确性, 系统的质心位置在一定的范围内波动(波动的范围)即系统的中心始终在机器人站立腿的正上方摆动, **实现了系统的动态站立平衡。**

**原因:**实际上由于单腿弹跳机器人是一个静态的不稳定系统, 在对机器人进行实际控制实验时, 由于传感器噪声、外部干扰力矩, 摆臂的非线性和机器人高频振动时所激发的高频模态和机构的柔性效应的影响, 机器人只能够实现**有限时间和有限范围内的动态的站立平衡**过程。

## 结 论

**主要结论：**对控制系统进行了建模仿真，提高了控制算法的鲁棒性，对控制系统进行软硬件的设计，通过实验检验了控制系统设计的合理性。

后续工作： 站立时间更长，更稳定，起跳，跳跃. . . . .

需要改进机器人的机械结构设计：

更好的改进弹性腿部的机构设计

可以采用更有效的摆臂传动方式

改进机器人姿态信号的检测方式

采用实时性，鲁棒性更好的控制算法



**重新进行控制系统的硬件和软件设计！**

# 致 谢

感谢陆震教授，何广平教授的指导！

感谢顾颢同学以及其它给与过真诚帮助的老师 and 同学！

献给我的父母！

The End!

Thank you for your attention,  
questions or comments?

[Lch\\_onion@asee.buaa.edu.cn](mailto:Lch_onion@asee.buaa.edu.cn)