

# MATLAB EXPO

理论+仿真+实验：控制工程基础课立体化教学探索

王林涛  
大连理工大学



# 报告提纲

(一) 控制工程基础课程教与学的困惑

(二) “理论+仿真+实验”教学方法探索

(三) 预期目标与展望

# 个人介绍

王林涛，博士，副教授，硕士生导师，入选大连理工大学“星海骨干”人才培养计划、大连市高层次人才创新支持计划。大连理工大学机械工程学院《控制工程基础》、《流体力学》课程主讲教师。



主要研究方向：复杂机电系统多学科建模与优化；重大装备电液控制与智能化技术。近五年发表SCI/EI检索论文20余篇，授权发明专利6项。负责国家自然科学基金青年基金、中国博士后基金特别资助、中国博士后基金一等资助、流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金等项目，获河南省科技进步二等奖，洛阳市科技进步一等奖，教育部博士研究生学术新人奖，陆增祺FPTC高科技奖等奖励。担任国家自然科学基金评审专家，以及《IEEE/ASME Transactions on Mechatronics》、《Automation in Construction》等多个国际期刊审稿人。

# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## • 课程简介

Applied & practical

《控制工程基础》侧重原理，其内容密切结合工程实际，是一门机械大类本科生的专业基础课，而且也是科学方法论之一，[控制工程](#)理论强调用系统的、反馈的、控制的方法来分析研究工程实际问题。

Theoretical & abstract

Y1

Y2

Y3

Y4

1

控制工程基础

3

4

# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## • 课程简介

- 承上：控制工程基础，先导包括物理、高等数学、力学、电工电子、理论力学等，学生在学习控制工程基础课程时候，等于是将先前的学习需要做融会贯通
- 启下：控制课程衔接的专业课，传感器与测试技术基础、液压传动技术、计算机控制系统、机电一体化系统设计等课程，目标是希望学生可以把学习到的控制技术能够运用到后续的学科中
- 该课程是机械领域学生进入社会或者继续深造的基石。



- 加深学生对理论知识的理解
- 提高其利用知识解决实际工程问题
- 提高学习知识迁移能力，面对新的挑战具备综合创新的能力

# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## · 一个机械专业学生遇到的问题

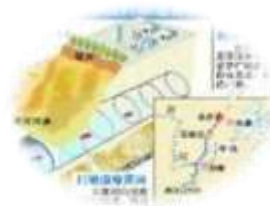
**盾构**是集开挖、排碴、衬砌等为一体的大型复杂掘进装备，可实现隧道的工厂化掘进作业。



城市地铁



公路铁路



水利工程



国防工程



市政管线



越江跨海



西气东输

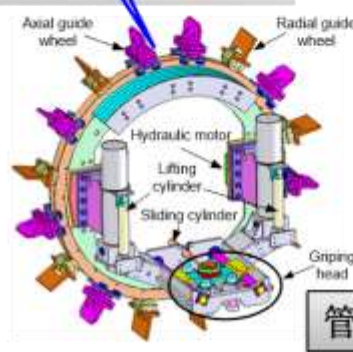
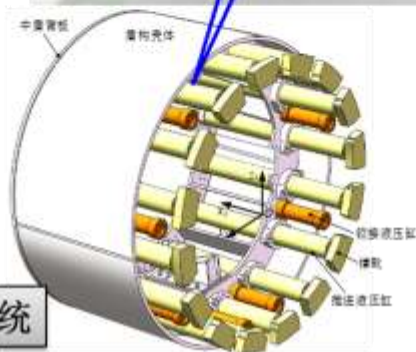
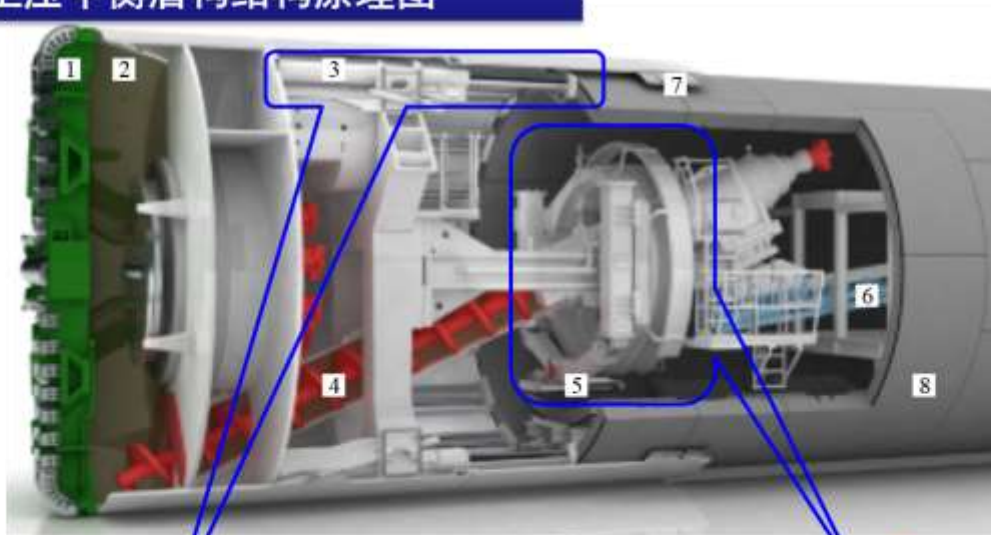


资源开发

# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

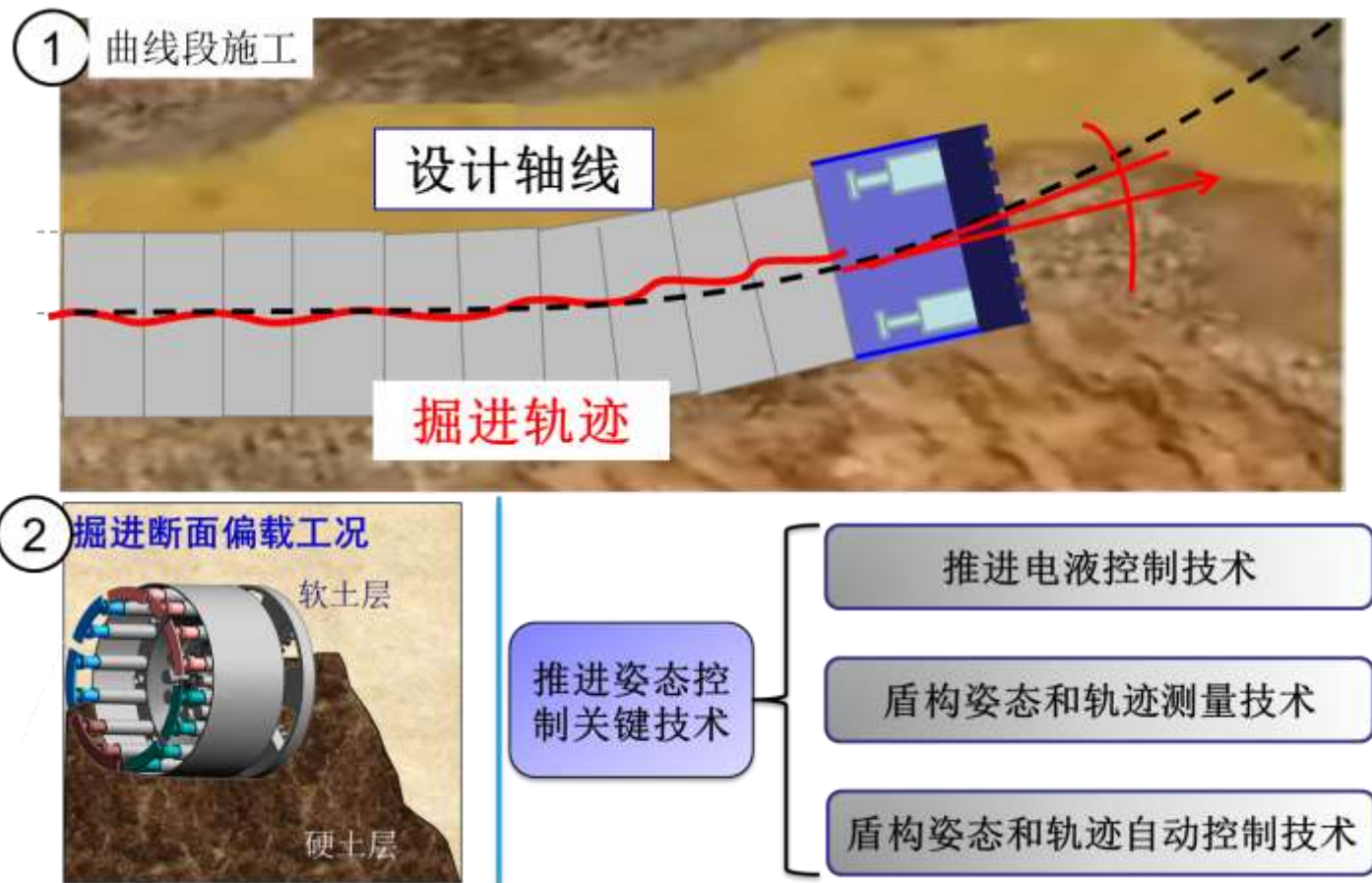
## • 一个机械专业学生遇到的问题

典型土压平衡盾构结构原理图



# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

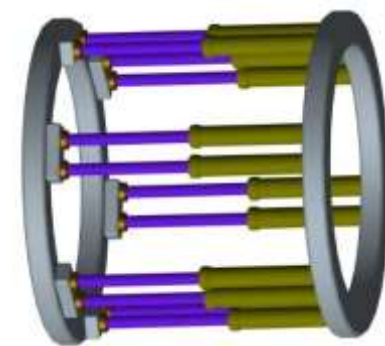
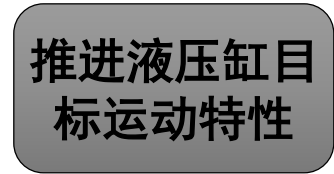
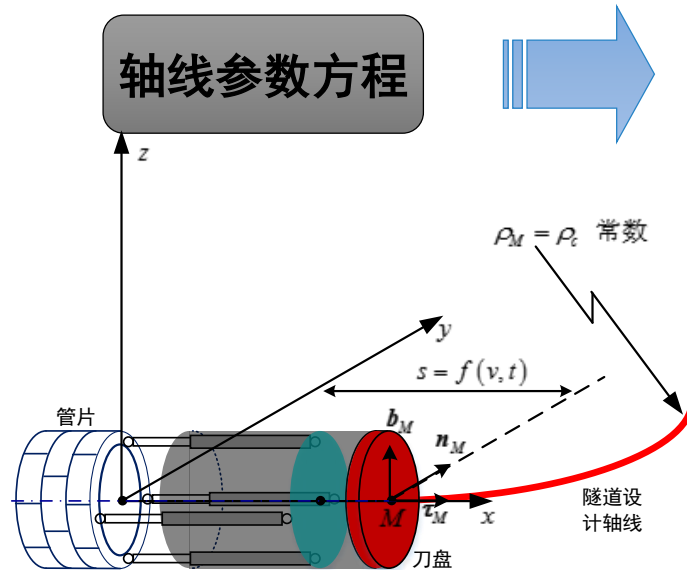
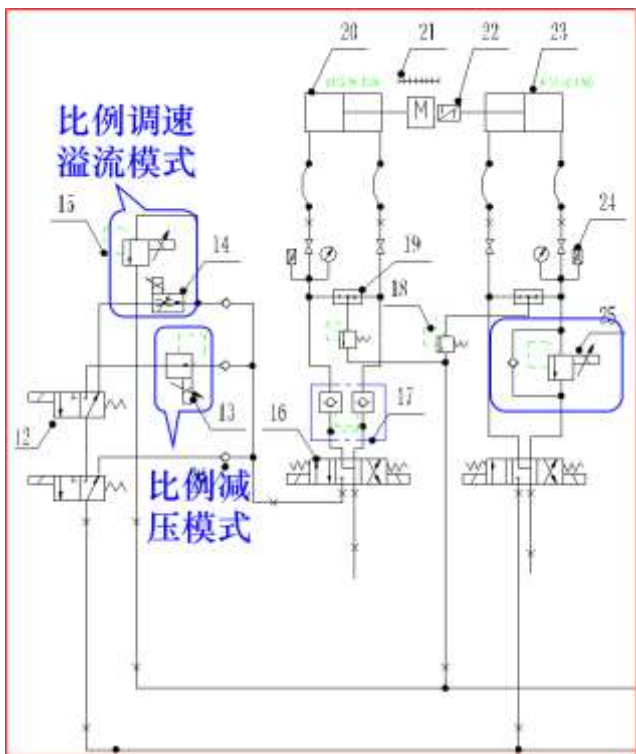
## • 一个机械专业学生遇到的问题





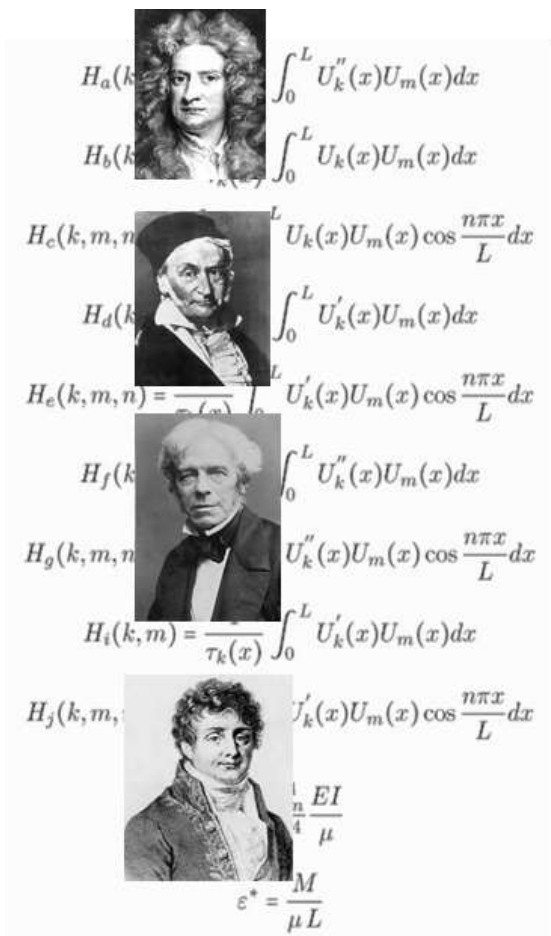
# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## • 一个机械专业学生遇到的问题



# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## • 课堂上的控制工程基础课



$H_a(k) = \int_0^L U_k''(x)U_m(x)dx$

$H_b(k) = \int_0^L U_k(x)U_m(x)dx$

$H_c(k, m, n) = \int_0^L U_k(x)U_m(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$

$H_d(k) = \int_0^L U_k'(x)U_m(x)dx$

$H_e(k, m, n) = \frac{1}{\tau_k(x)} \int_0^L U_k'(x)U_m(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$

$H_f(k) = \int_0^L U_k''(x)U_m(x)dx$

$H_g(k, m, n) = \int_0^L U_k''(x)U_m(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$

$H_i(k, m) = \frac{1}{\tau_k(x)} \int_0^L U_k'(x)U_m(x)dx$

$H_j(k, m) = \int_0^L U_k'(x)U_m(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$

$\frac{1}{4} \frac{EI}{\mu}$

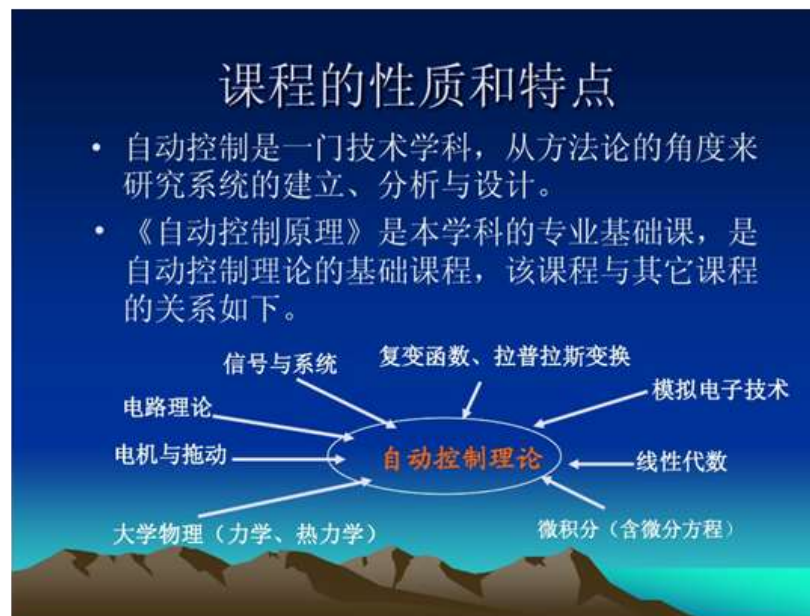
$\varepsilon^* = \frac{M}{\mu L}$



数学课?

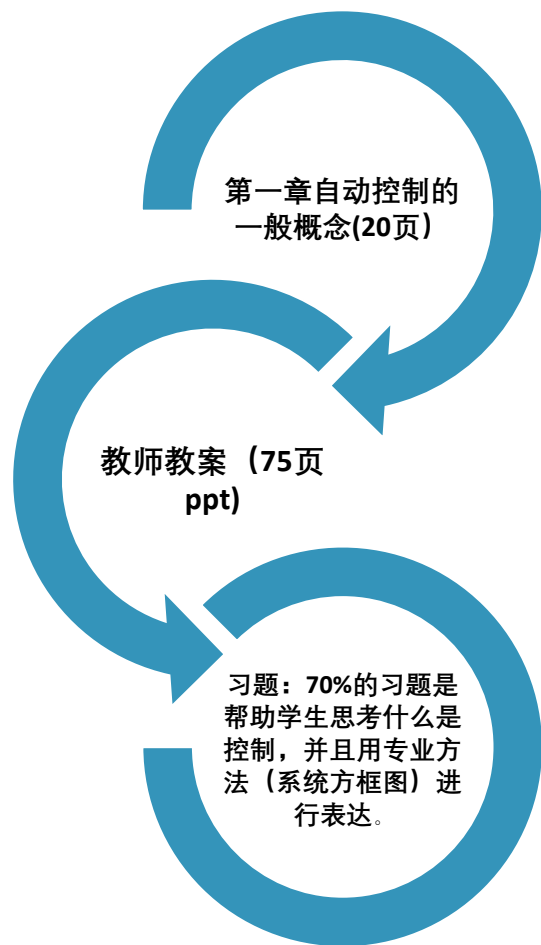
物理课?

无聊到怀疑人生。。



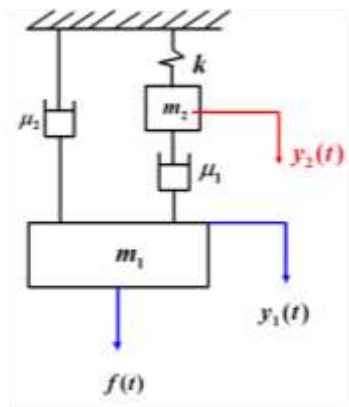
# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## • 课堂上的控制工程基础课

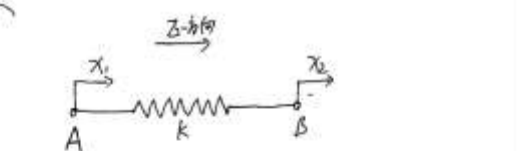


# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## • 课堂上的控制工程基础课



弹簧



弹簧通过端点 A, B 对外界输出的力  $F_A, F_B$  分别为

$$F_A = k(x_2 - x_1) \quad \text{另一端点位移减}$$

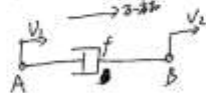
$$F_B = k(x_1 - x_2) \quad \text{另一端点位移}$$

若  $x_2 > x_1$ , 则  $F_A > 0$ , 与  $x$  方向相同

$$F_A \rightarrow$$

$$\text{则 } F_B < 0, \text{ 与 } x \text{ 方向相反}$$

反之...  $x_2 < x_1$



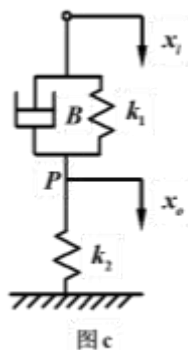
$$F_A = B(v_2 - v_1) \quad F_A = f(v_2 - v_1)$$

$$F_B = B(v_1 - v_2) \quad F_B = f(v_1 - v_2)$$

远端减近端

基于以上方法求合外力时, 可见不必分析初

$$\text{直接 } F_{\text{合}} = F_1 + F_2 \dots - F_n = \sum F_i$$



图c

(b) 引入一中间变量  $x$  (P点位移) 并由牛顿定律有:

先分析  $k_1, B$  (以P点为分析点):

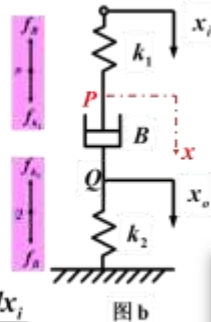
$$k_1(x - x_0) = B\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right)$$

再分析  $B, k_2$  (以Q点为分析点):

$$B\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right) = k_2 x_0$$

消除中间变量  $x$  有:

$$B(k_1 + k_2) \frac{dx_0}{dt} + k_1 x_0 = Bk_1 \frac{dx_1}{dt}$$



图b

$$k_1(x_1 - x) = k_2 x_0 \quad (1)$$

$$x = -\frac{k_2}{k_1} x_0 + x_1 \quad (2)$$

$$B\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right) = k_2 x_0 \quad (3)$$

(2) 求导后代入 (3)

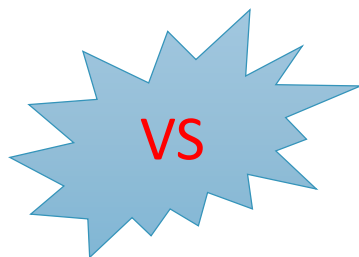
$$B\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{k_2}{k_1} \frac{dx_0}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right) = k_2 x_0$$

化成标准形式:

$$B\left(\frac{k_1}{k_1} + 1\right) \frac{dx_1}{dt} + k_2 x_0 = B \frac{dx_1}{dt}$$

# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

- 课堂上的控制工程基础课



# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## · 教与学的挑战



应试型



不知所以型

学生



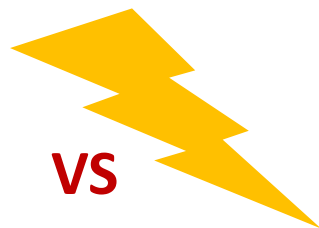
工程问题

# (一) 控制工程基础课程教与学的困惑

## • 教与学的挑战

### 现状

- 课时不断缩减，理论知识密集灌输
- 学生兴趣广泛、精力分散
- 实验滞后，理论和实践脱节



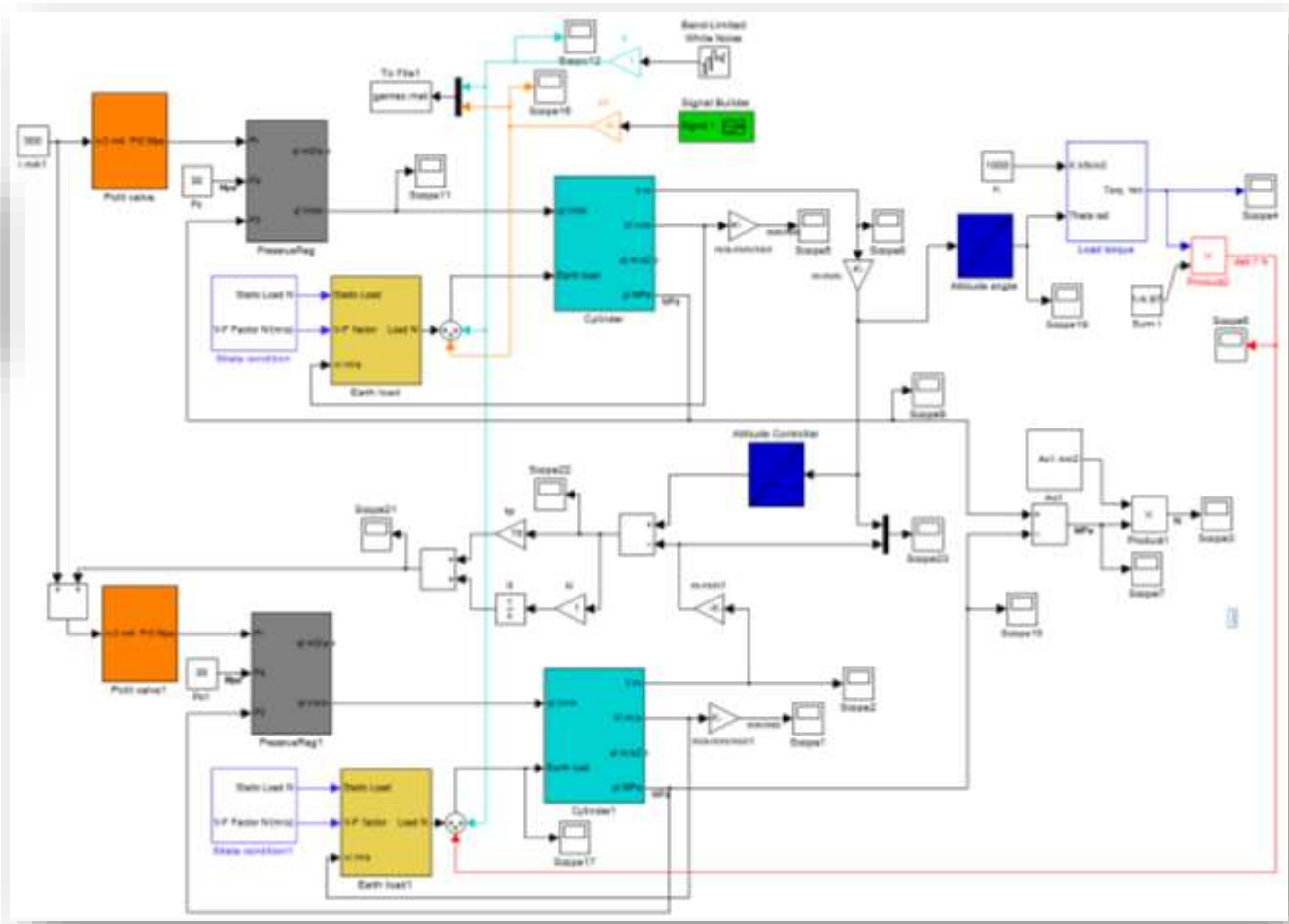
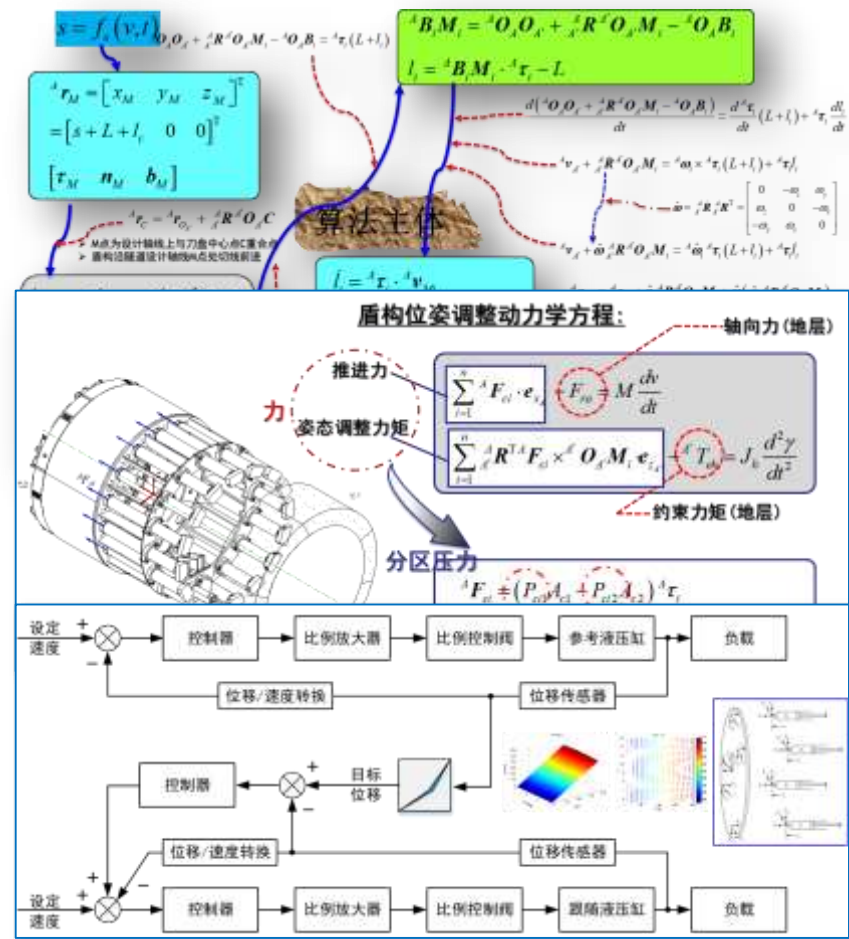
### 要求

- 创新能力
- 解决重大工程难题的能力
- 解决科学前沿问题的能力
- 具有人文社会科学素养
- 具有一定的组织管理能力
- ...

**如何在有限课时内，在完成基本理论和知识点讲解的前提下，引起学生兴趣，加深学生理解，提高学生解决实际问题和创新能力是面临的巨大挑战**

# (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

## • 工程问题解决过程的启发





# (二) “理论+仿真+实验”教学方法探索

## 工程问题解决过程的启发

### 直线段与非直线段盾构姿态自动控制可行性验证

直线段

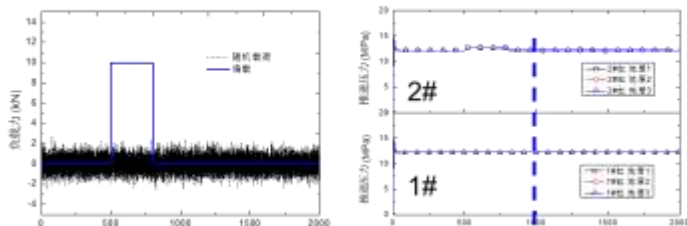


图4.19 随机干扰载荷和阶跃载荷

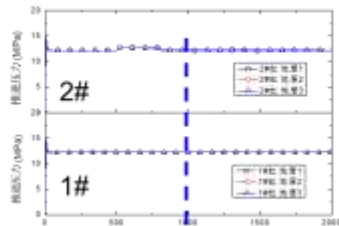


图4.29 不同地层推进压力控制曲线

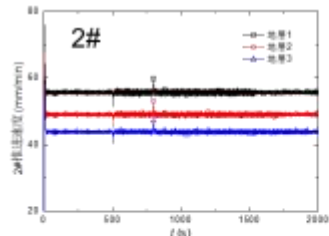


图4.31 不同地层推进速度控制曲线

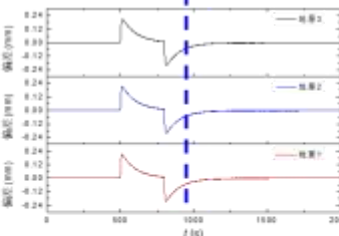


图4.32 不同地层推进液缸行程偏差

在直线段掘进时位移控制系统可以自动调整盾构姿态

### 直线段与非直线段盾构姿态自动控制可行性验证

圆弧曲线段

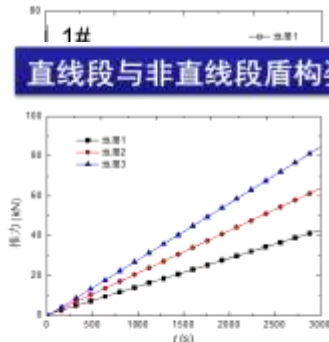


图4.40 位移控制系统姿态调整力

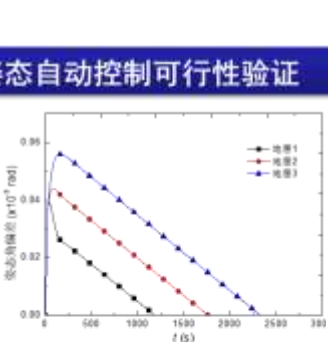


图4.41 位移控制系统盾构横摆角偏差

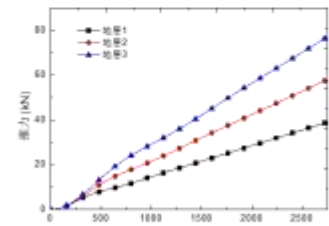


图4.43 力控制系统姿态调整力

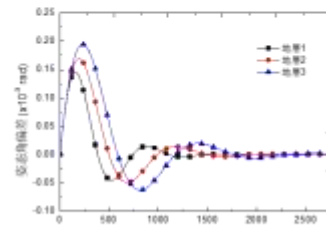


图4.44 力控制盾构横摆角偏差

位移控制和力控制系统均能够实现盾构圆弧曲线段

相对误差: 0.88%

### 复杂地层盾构姿态自动控制可行性验证 (抗干扰特性)

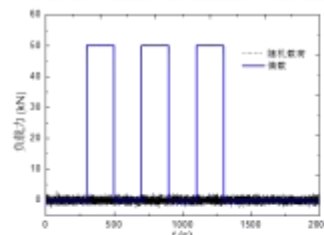


图4.35 随机干扰载荷和阶跃载荷

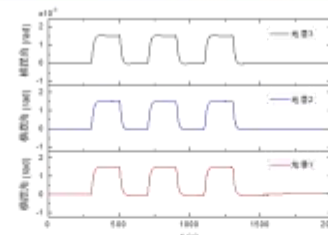


图4.36 位移控制盾构横摆角

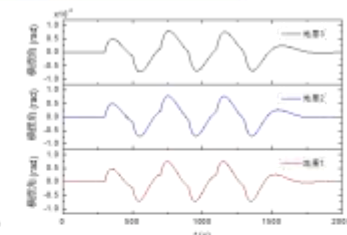


图4.39 力控制系统盾构横摆角

复杂多变地质条件:  
断面地层不均,  
轴向地质多变

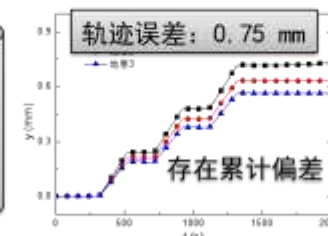


图4.38 位移控制系统盾构轨迹偏差

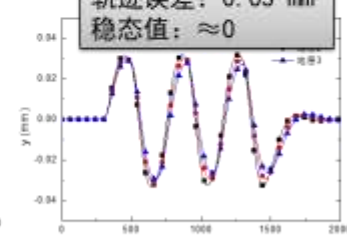


图4.39 力控制系统盾构轨迹偏差

在复杂多变地质条件下力控制系统可实现盾构直线段施工过程中的姿态自动控制



# (二) “理论+仿真+实验”教学方法探索

## • 工程问题解决过程的启发

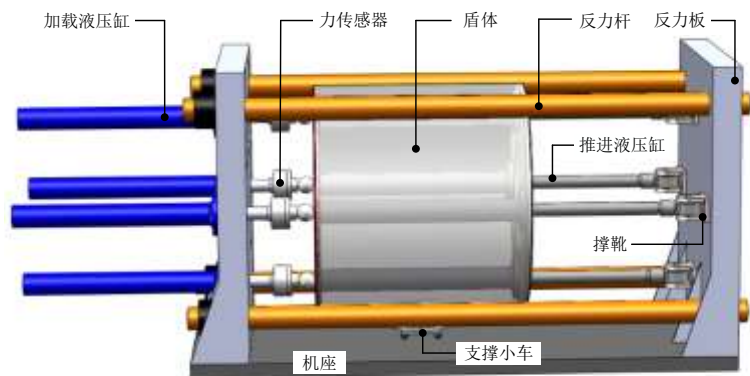


图4.53 P90

盾构沿直线型隧道设计轴线掘进模拟试验

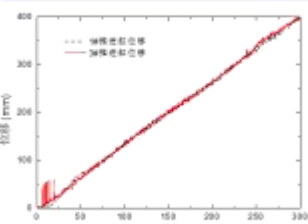


图4.55 推进液缸行程 (软硬不均地层)

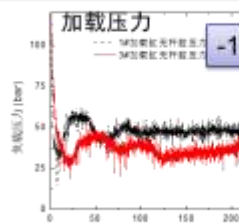


图4.57 加载系统工作压力 (断)

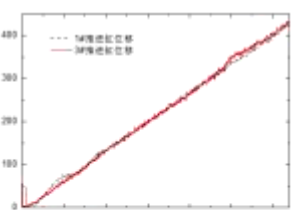


图4.56 推进液缸行程 (复杂多变地层)

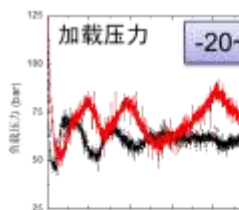
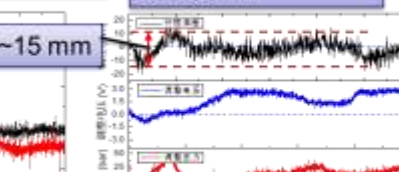


图4.58 加载系统工作压力 (轴)

盾构在直线段掘进时位移控制系统可以有效

人工控制轨迹偏差:  
30-50 mm



盾构沿直线型隧道设计轴线掘进模拟试验

减压阀系统

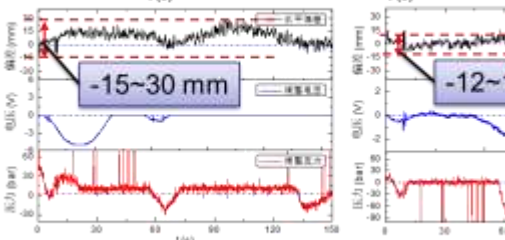
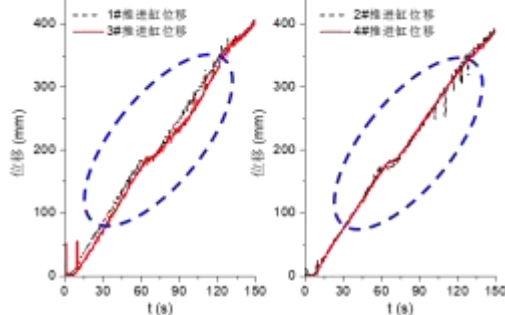


图4.63 推进缸行程偏差, 调整电压, 压力

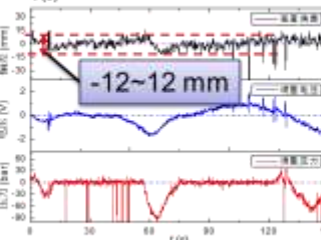


图4.64 推进行程偏差, 调整电压, 压力

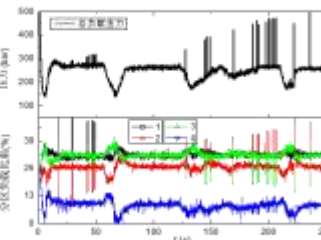


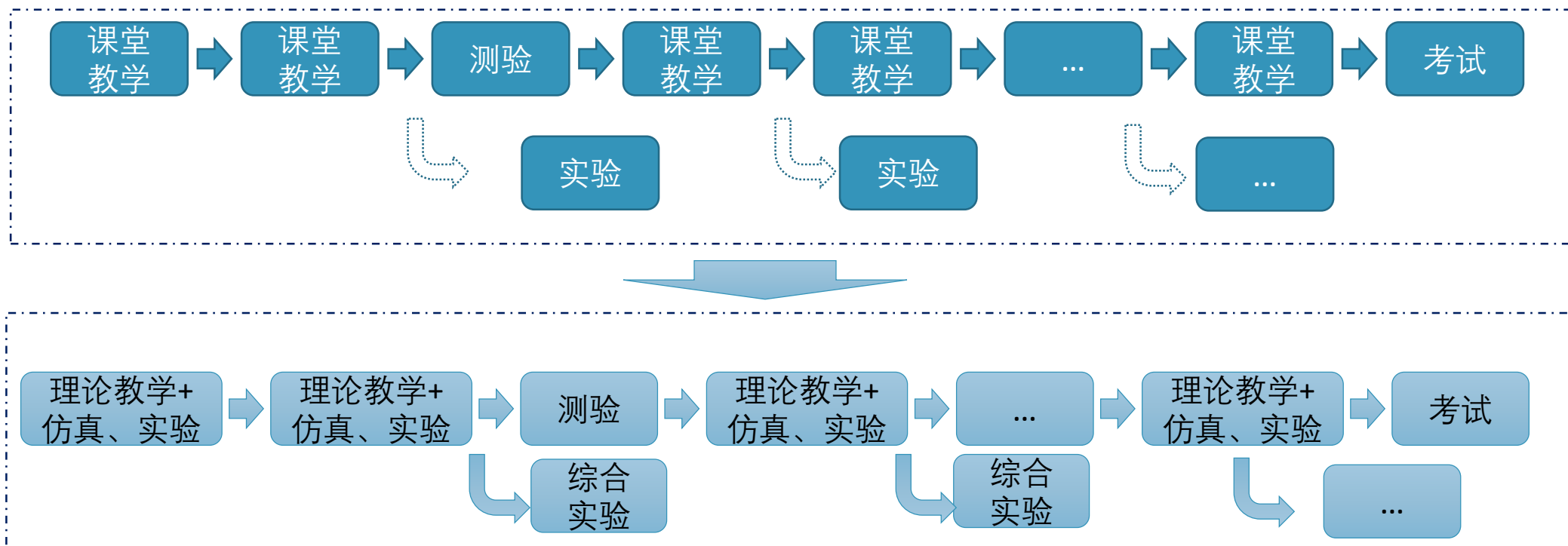
图4.65 加载系统工作压力

➤ 盾构在直线段掘进时位移控制系统在减压阀系统中同样有效

➤ 两个方向同时进行姿态调整存在耦合现象, 建议盾构施工过程中同一时刻单方向调整盾构姿态

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

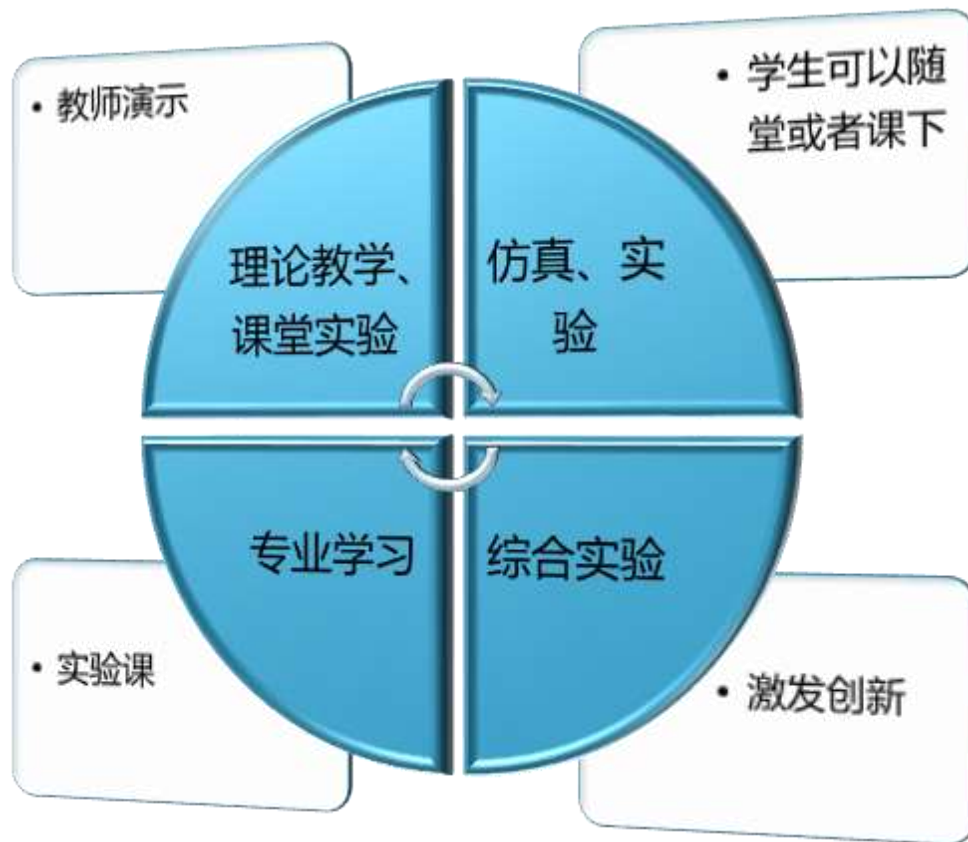
### • 教学模式和方法的改革



通过课堂教学中理论与仿真、实验教学深度融合，加深知识的理解，提高解决工程问题的能力；通过综合实验，提高学生知识迁移和综合创新能力。

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

### • 教学模式和方法改革

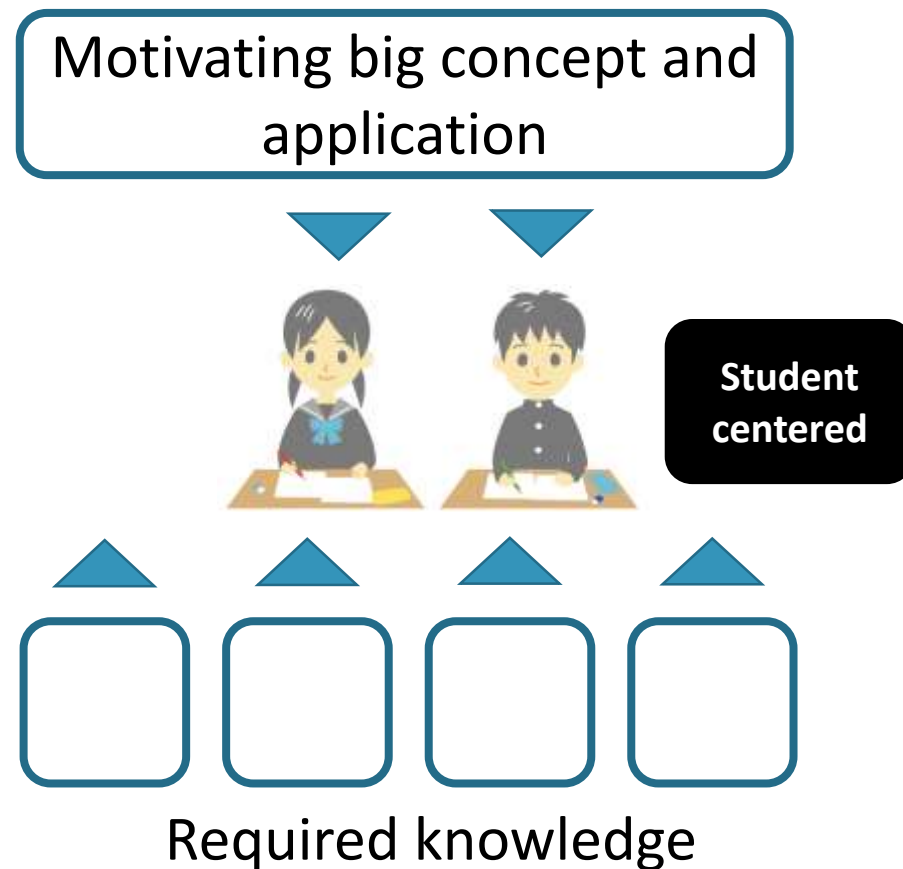
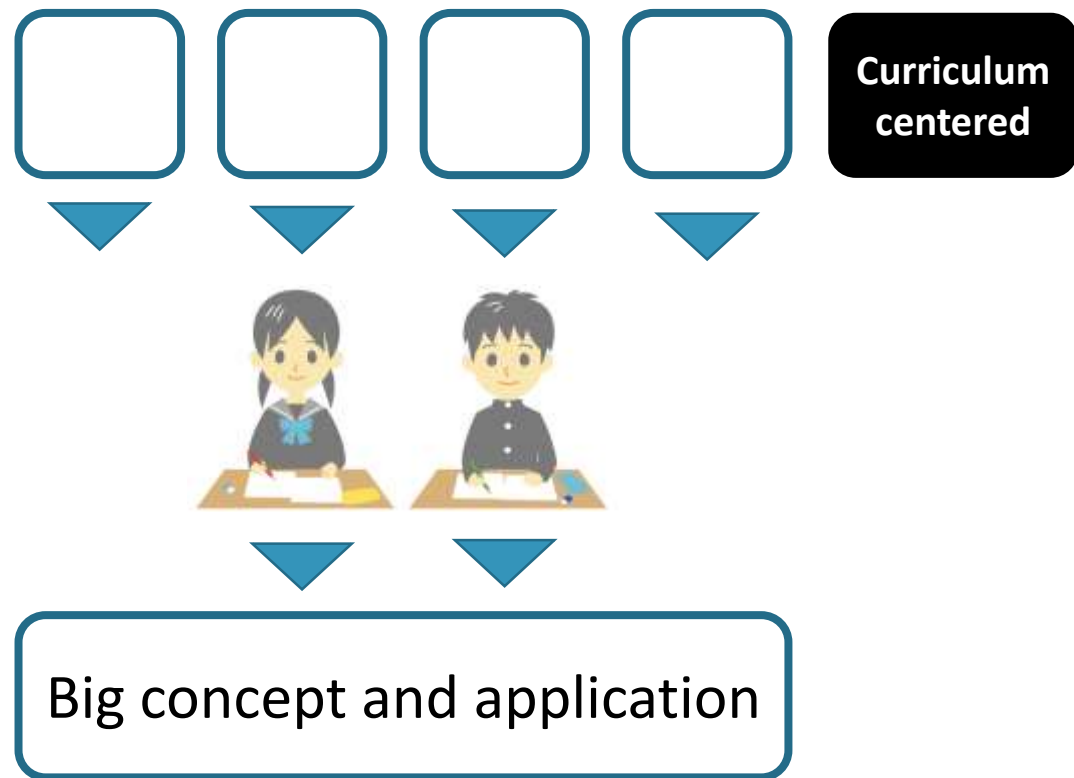


时间:

- 课堂上
- 课下交互
- 自我探索 (学生碎片时间)

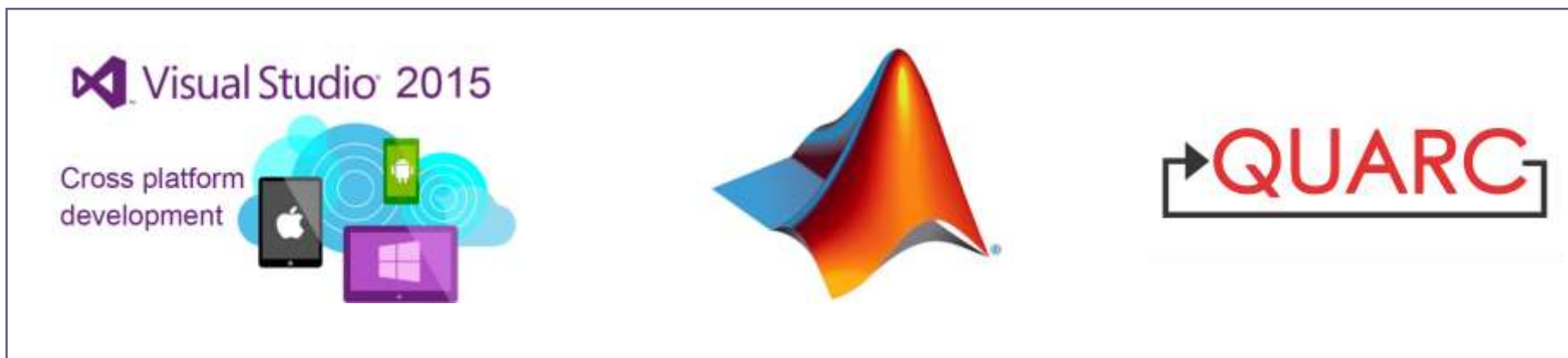
## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

### • 教学模式和方法改革



## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

- 课堂仿真和实验的软、硬件支撑条件



## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

- 课堂仿真和实验的软、硬件支撑条件

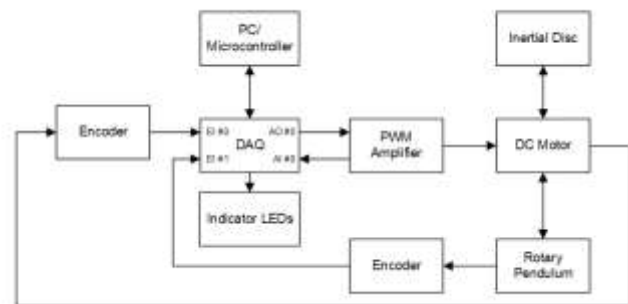


硬件系统组成



(a) 连接惯性圆盘模块的QUBE-Servo 2

(b) 连接倒立摆模块的Qube-Servo2

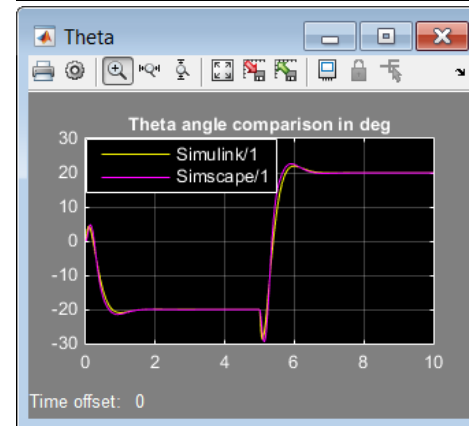
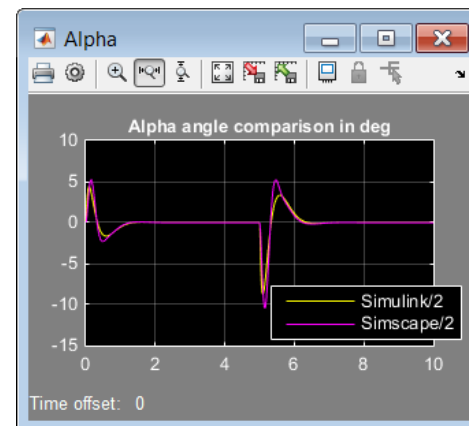
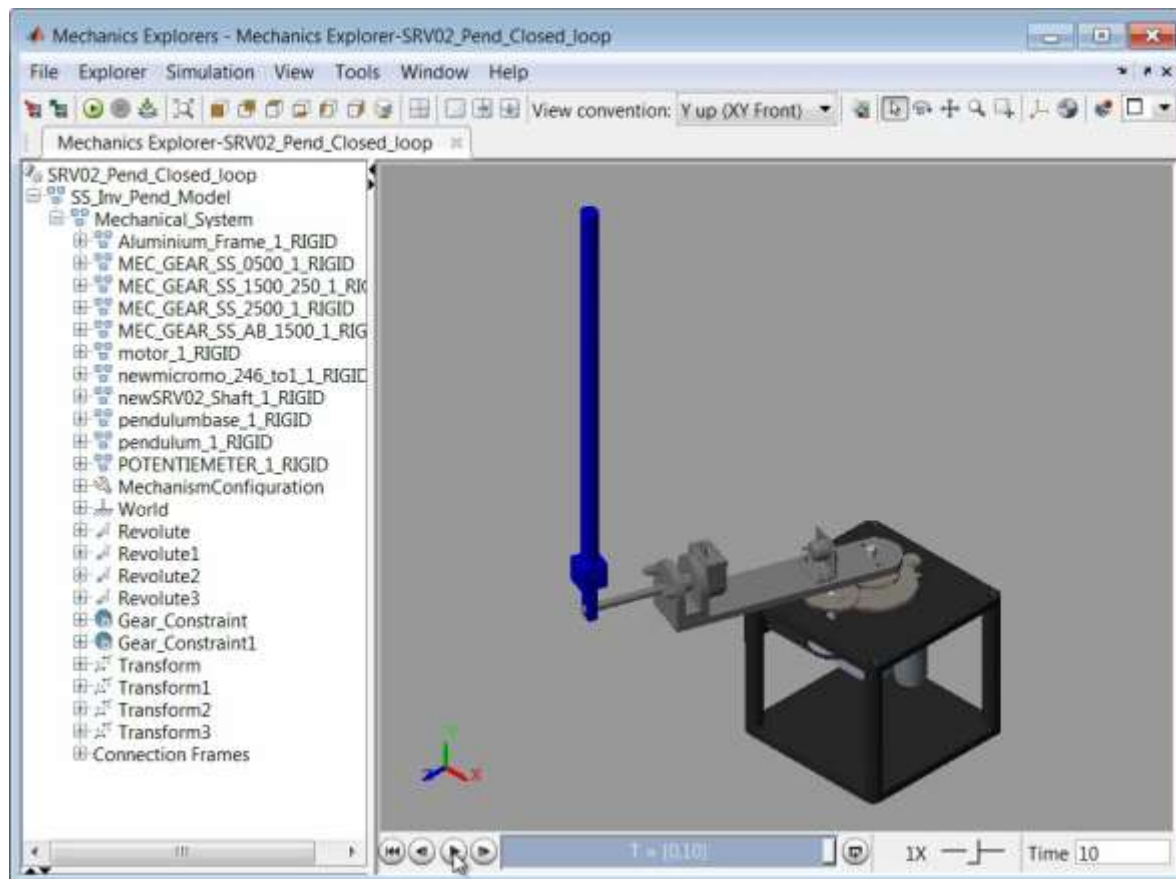


硬件系统连接关系

两种工作模式

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

- 连接倒立摆模块的 Qube-Servo2 的 Simscape Multibody 建模

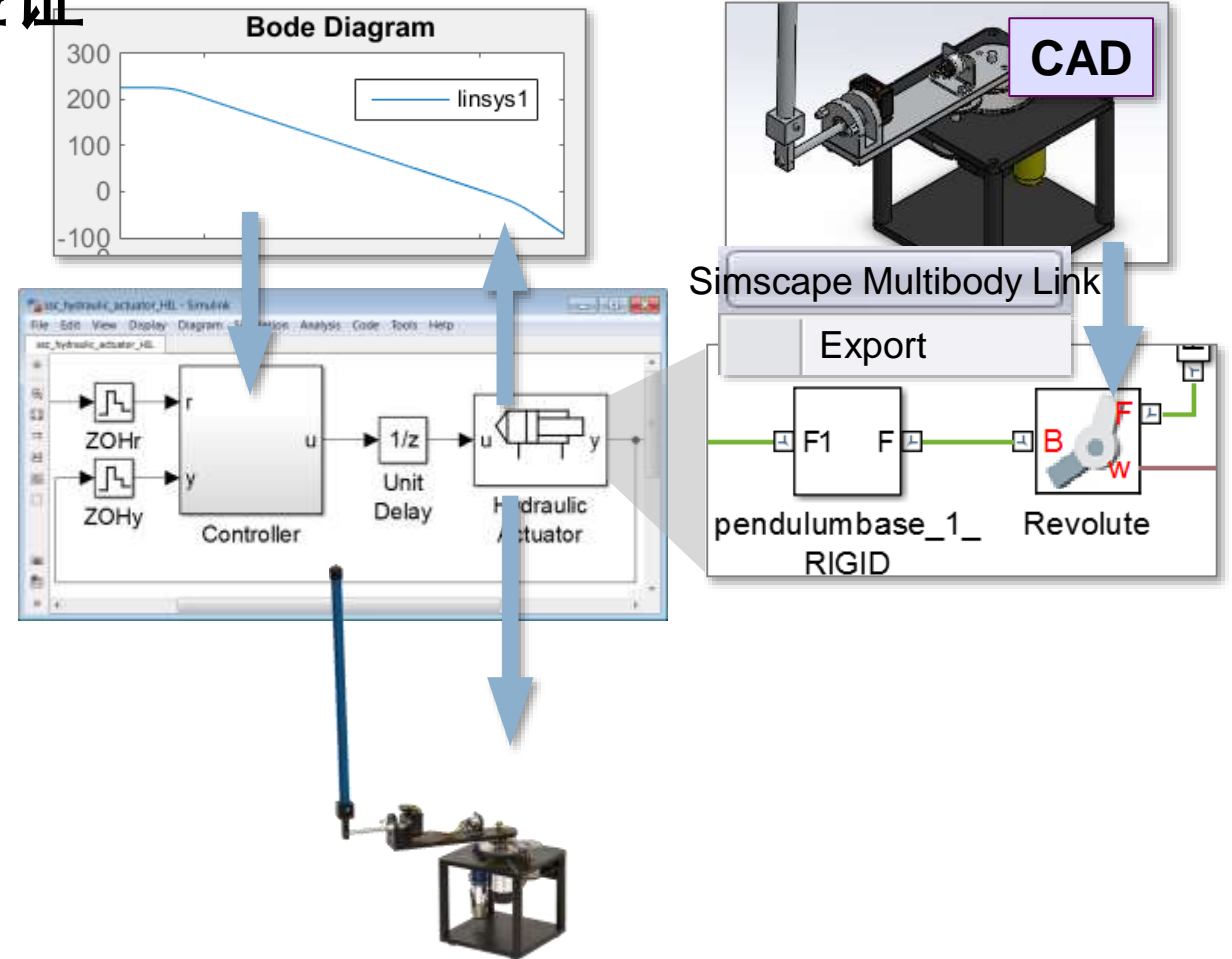




## (二) “理论+仿真+实验”教学方法探索

### · 复杂动态系统控制器的快速设计与验证

1. 在 Simulink 中搭建被控对象模型、或将 CAD 模型导入 Simscape Multibody
2. Simscape Multibody 模型线性化、分析和设计所需的控制器
3. 控制算法验证
4. 在 Quanser 实时硬件上部署代码



## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

### • 基础实验—伺服电机的理论建模、仿真分析和验证

#### ■ 内容及目标

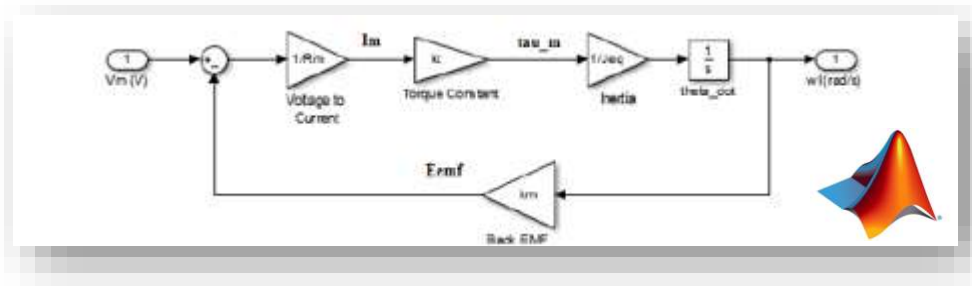
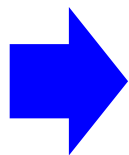
- 运用所学的理论建模方法，建立直流旋转伺服电机的动力学方程。
- 使用拉氏变换建立传递函数，运用Simulink搭建系统的仿真模型。
- 通过对比仿真和实验曲线，对通过理论方法建立的模型进行验证。

#### ■ 工程背景

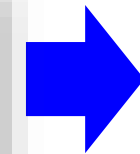
- 电动汽车轮边电机的建模与运动控制（开环）



轮边电机

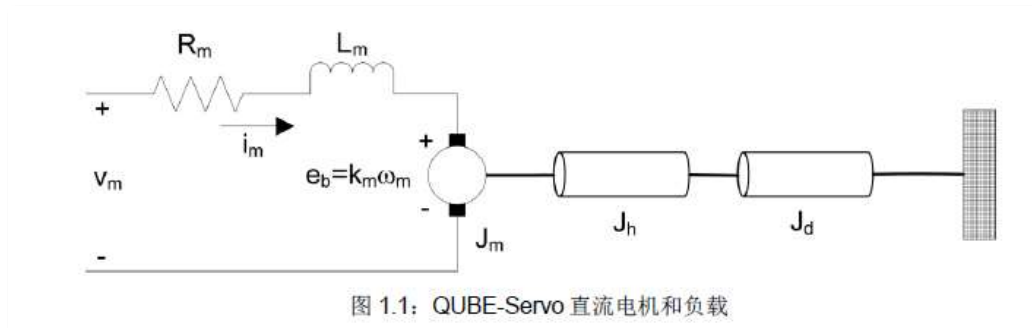


实验系统



# (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

## 理论建模



反向电动势  $e_b(t)$  决定于电机轴的转速,  $\omega_m$ , 电机的反电势常数为  $k_m$ , 它与电流方向相反, 大小为:

$$e_b(t) = k_m \omega_m(t) \quad (1.1)$$

符号	描述	数值
<b>直流电机</b>		
$R_m$	电机电阻	8.4 $\Omega$
$k_r$	转矩常数	0.042 N·m/A
$k_m$	电机反电势常数	0.042 V/(rad/s)
$J_m$	转子惯量	$4.0 \times 10^{-6}$ kg·m <sup>2</sup>
$L_m$	转子电感	1.16 mH
$m_h$	负载轮轴质量	0.0106 kg
$r_h$	负载轮轴半径	0.0111 m
$J_h$	负载轮轴惯量	$0.6 \times 10^{-6}$ kg·m <sup>2</sup>
<b>负载圆盘</b>		
$m_d$	圆盘负载质量	0.053 kg
$r_d$	圆盘负载半径	0.0248 m

表 1.1: QUBE-Servo 2 系统参数

采用基尔霍夫定律, 我们得到下列方程:

$$v_m(t) - R_m i_m(t) - L_m \frac{di_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (1.2)$$

因电机线圈  $L_m$  远小于其他项, 可忽略, 则方程变为

$$v_m(t) - R_m i_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (1.3)$$

求解  $i_m(t)$ , 可得电机电流为

$$i_m(t) = \frac{v_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m} \quad (1.4)$$

电机轴的动力学方程为

$$J_m \ddot{\omega}_m(t) = \tau_m(t) \quad (1.5)$$

其中,  $J_m$  为电机轴上所有转动惯量,  $\tau_m$  为直流电机输出扭矩。基于应用电流, 该扭矩为

$$\tau_m(t) = k_r i_m(t) \quad (1.6)$$

设圆盘质量为  $m$ , 半径为  $r$ , 则绕其轴的转动惯量为

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (1.7)$$

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

### ■ 基于拉氏变换的 Simulink 仿真模型建立

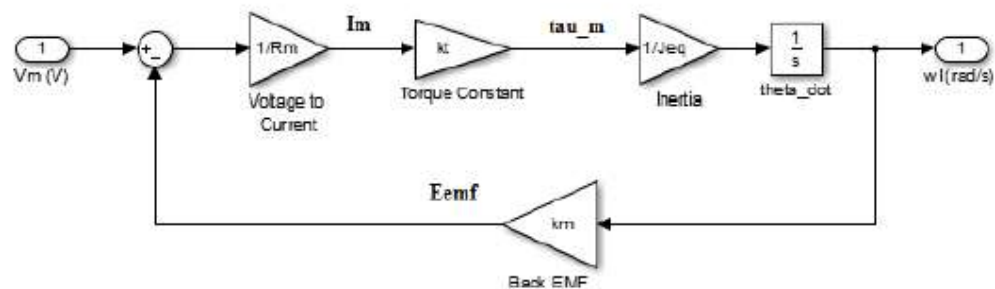
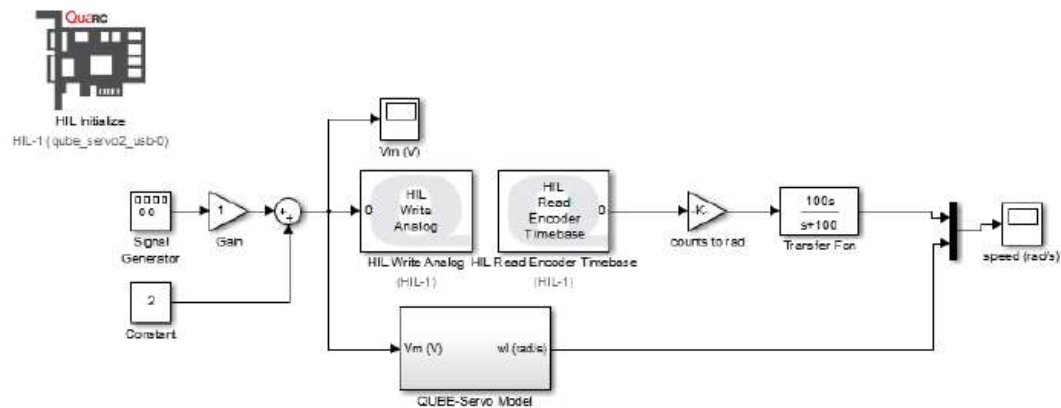


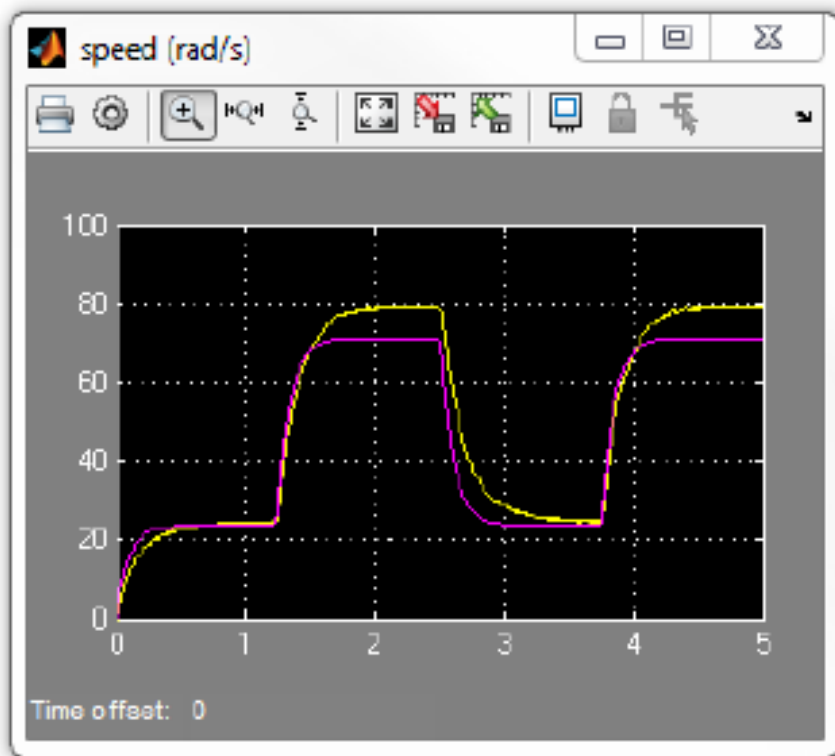
图 Ans.2.1: 完整的 QUBE-Servo 2 模型子系统

### ■ 被控对象模型搭建

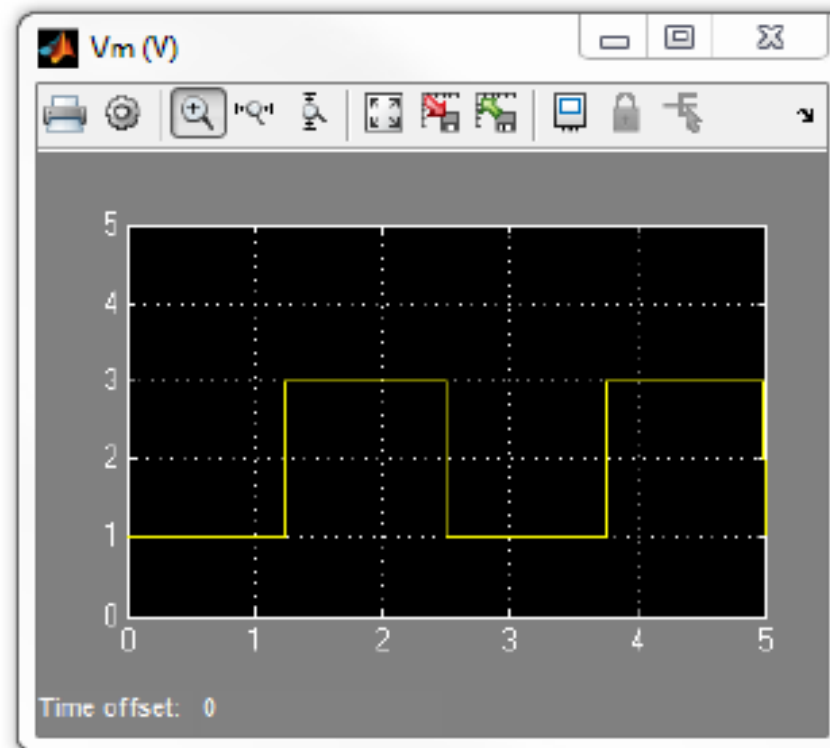


## (二) “理论+仿真+实验”教学方法探索

### ■ 硬件在环模型验证



(a) 电机速度



(b) 电机电压

图 2.3: QUBE 响应曲线

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

- 基础实验—二阶系统的动态响应

- 内容及目标

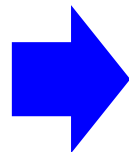
- 利用Qube装置构建转角的反馈控制系统
    - 建立传递函数及绘制系统方框图，运用Simulink搭建系统仿真模型
    - 编写实验系统程序，基于实验数据，求解本系统的动态特性指标
    - 改变系统参数，探索系统参数对系统动态特性的影响规律

- 工程背景

- 加工中心换刀过程的转角精确控制（闭环）



加工中心刀库



实验系统

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

### • 基础实验—二阶系统的动态响应

#### ■ 闭环系统构建及方框图

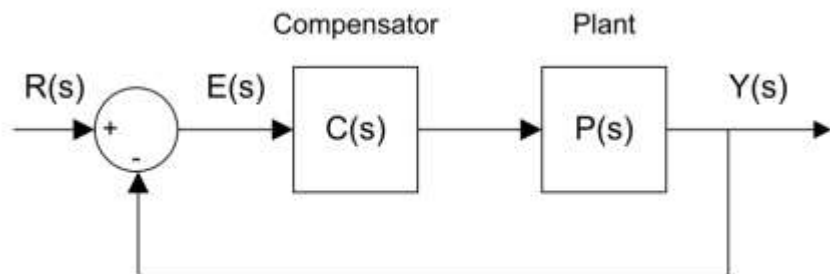


图 1.2: 单位反馈闭环

QUBE-Servo 2 电压到位置传递函数为

$$P(s) = \frac{\Theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (1.6)$$

其中,  $K = 23.0 \text{ rad}/(\text{V}\cdot\text{s})$  为模型的稳态增益,  $\tau = 0.13 \text{ s}$  为模型的时间常数,  $\Theta_m(s) = L[\theta_m(t)]$  为电机/转盘的位置,  $V_m(s) = L[v_m(t)]$  为施加到电机上的电压。如果需要, 可对你特定的伺服, 通过做实验找到更精确的模型参数  $K$  和  $\tau$  (如进行冲击测试建模实验)。

控制器记为  $C(s)$ 。在此实验中, 我们将只使用单位反馈, 因此

$$C(s) = 1 \quad (1.7)$$

如图 1.2 所示单位反馈下, 从参考输入  $R(s) = \Theta_d(s)$  到输出  $Y(s) = \Theta_m$  的 QUBE-Servo 2 位置控制闭环传递函数为:

$$\frac{\Theta_d(s)}{V_m(s)} = \frac{\frac{K}{\tau}}{s^2 + \frac{1}{\tau}s + \frac{K}{\tau}} \quad (1.8)$$



(a) 连接惯性圆盘模块的QUBE-Servo 2

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

### ■ 实验模型搭建

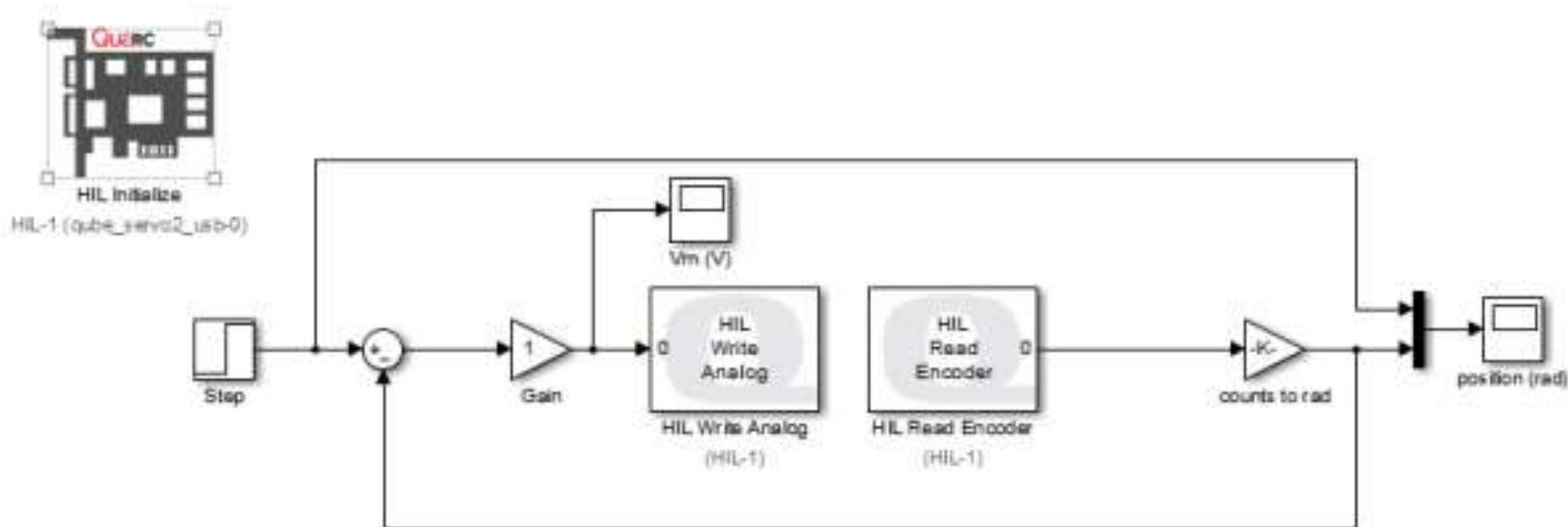
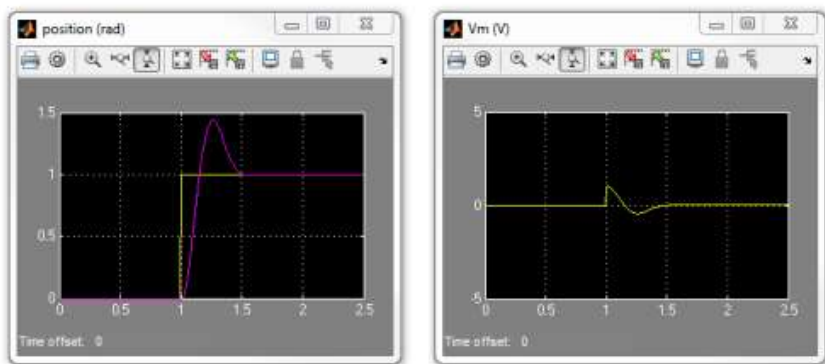


图 2.1: QUBE-Servo 2 单位反馈位置控制



# (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

## ■ 实验及动态特性指标求解



(a) 位置

(b) 电压

图 2.2: QUBE-Servo 2 单位反馈阶跃响应

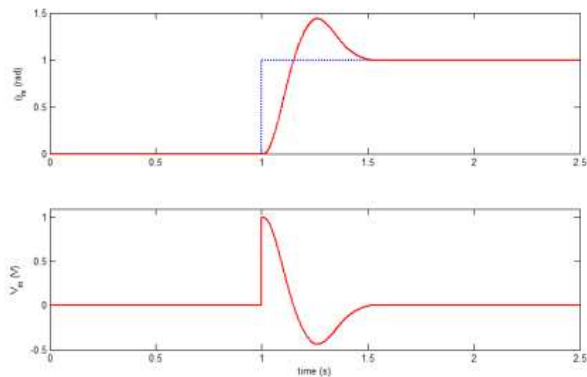


图 Ans.2.1: 单位反馈下测得的 QUBE-Servo 2 响应曲线

A-1 由方程(1.1), 其标准特征方程为

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0.$$

与方程(1.6)对应的 QUBE-Servo 特征方程相对应

$$s^2 + \frac{1}{\tau}s + \frac{K}{\tau} = 0$$

我们得到方程

$$2\zeta\omega_n s = \frac{1}{\tau}$$

和

$$\omega_n^2 = \frac{K}{\tau}.$$

A-2 求解上述你所得方程中的自然角频率和阻尼比

$$\zeta = \frac{1}{2\tau\omega_n}$$

和

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{\tau}}.$$

## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

### • 目前可开展的随堂实验

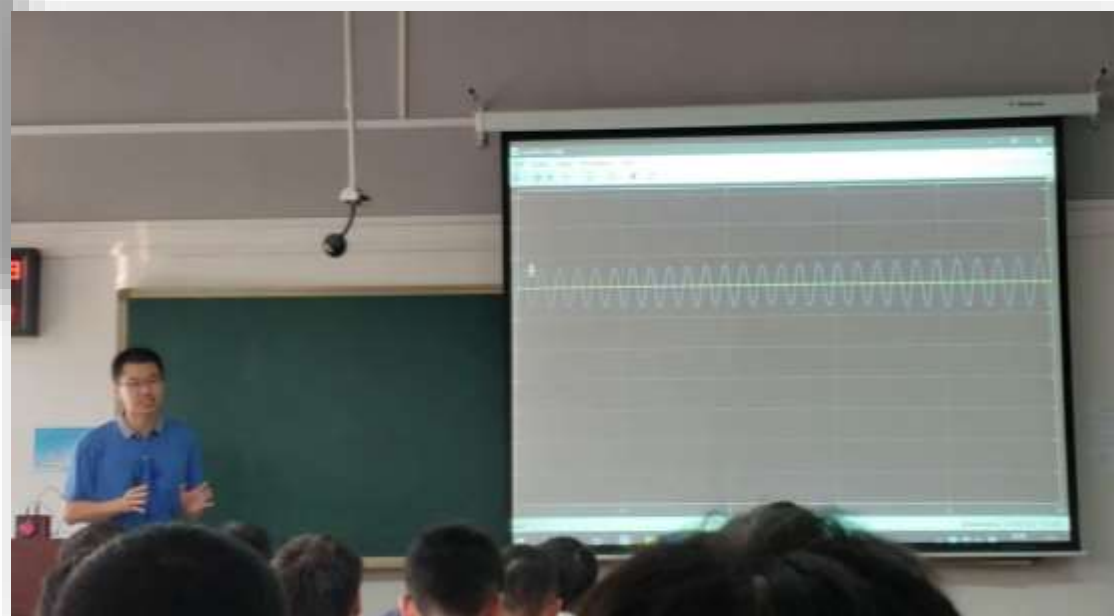
	实验主题	实验	拓展实验 (2020年新添加实验)
惯性盘实验	仪器仪表	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 硬件集成</li> <li>• 滤波</li> </ul>	
	建模	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 阶跃响应建模</li> <li>• 方框图建模</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 参数估计</li> <li>• 频率响应建模</li> <li>• 状态空间建模</li> <li>• 摩擦识别</li> </ul>
	控制分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 稳定性分析</li> <li>• 二阶系统</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 劳斯-赫尔维茨稳定性判据</li> <li>• 奈奎斯特稳定性判据</li> </ul>
	控制设计	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PD 控制</li> <li>• 超前补偿器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 比例控制</li> <li>• 稳态误差</li> <li>• 负载扰动</li> <li>• 鲁棒性</li> <li>• 最优控制</li> </ul>
	离散控制		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 数字控制介绍</li> <li>• 离散稳定性</li> <li>• 离散控制介绍</li> </ul>

	实验主题	实验	拓展实验 (2020年新添加实验)
倒立摆实验	建模	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 转动惯量</li> <li>• 摆建模</li> <li>• 状态空间建模</li> </ul>	
	控制设计	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 倒立摆平衡控制</li> <li>• 起摆控制</li> <li>• LQR 状态反馈平衡控制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 极点状态反馈平衡控制</li> </ul>



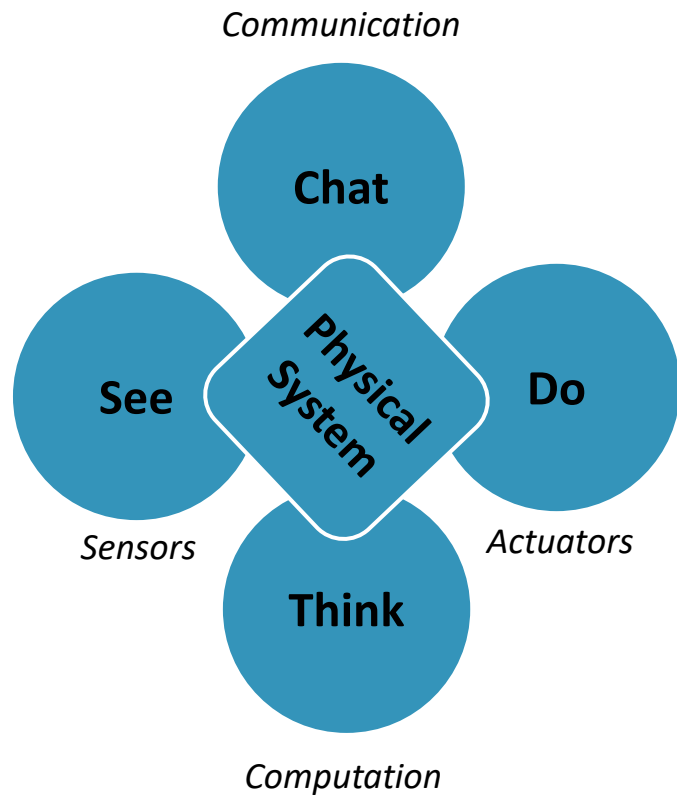
## (二) “理论+仿真+实验” 教学方法探索

- 随堂实验场景



# (三) 预期目标与展望

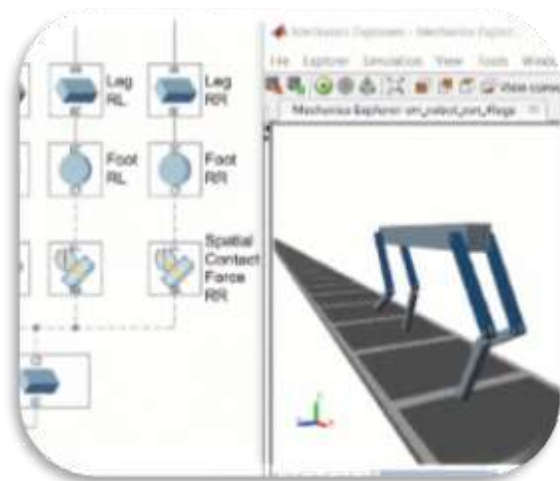
## • 架构-课程计划



- 课程的框架：整个框架覆盖各个学科课程之间连接，学科课程与实验、实践项目的连接
- 课程的设计：结合现实，实现以结果和目标为导向的学习过程
- 课程的内容：确保现代复杂系统的组成元素可以贯穿整个学习过程

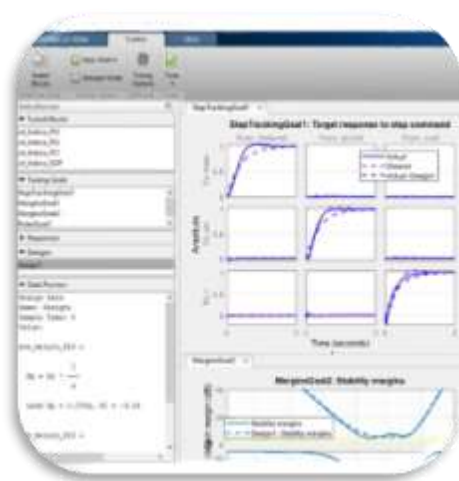
# (三) 预期目标与展望

结合先进的设计教育与高保真的现代工程系统，以支持创新和挑战的设计应用



## 激发自驱力

Students access research-grade equipment mapped to engaging applications. Experience advanced engineering concepts at the overview level.



## 快速提升专业技能

Specialized application platforms illuminate essential dynamics and allow for efficient development of critical system integration and implementation skills.



## 测试和设计迭代

Design refinement techniques utilizing advanced model-based-design (MBD) and hardware in the loop (HIL) testing. Connect modeling and engineering science to design.



## 构建和部署

Enhancement of the makerspace supports advanced design and system integration experiences

# 谢谢!