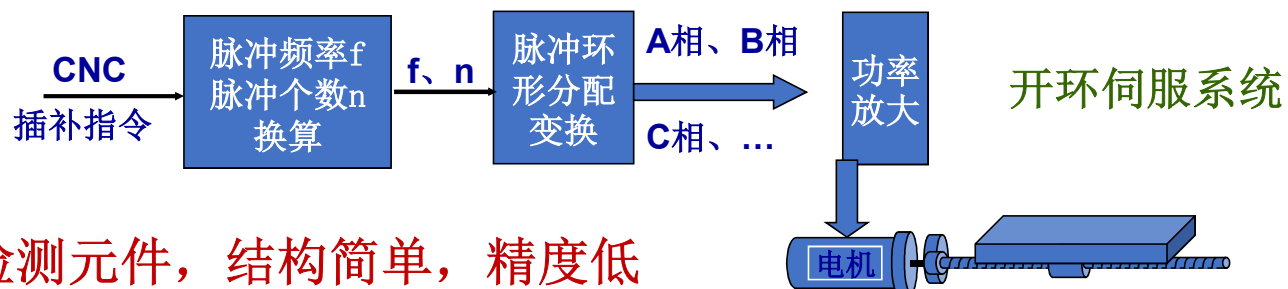




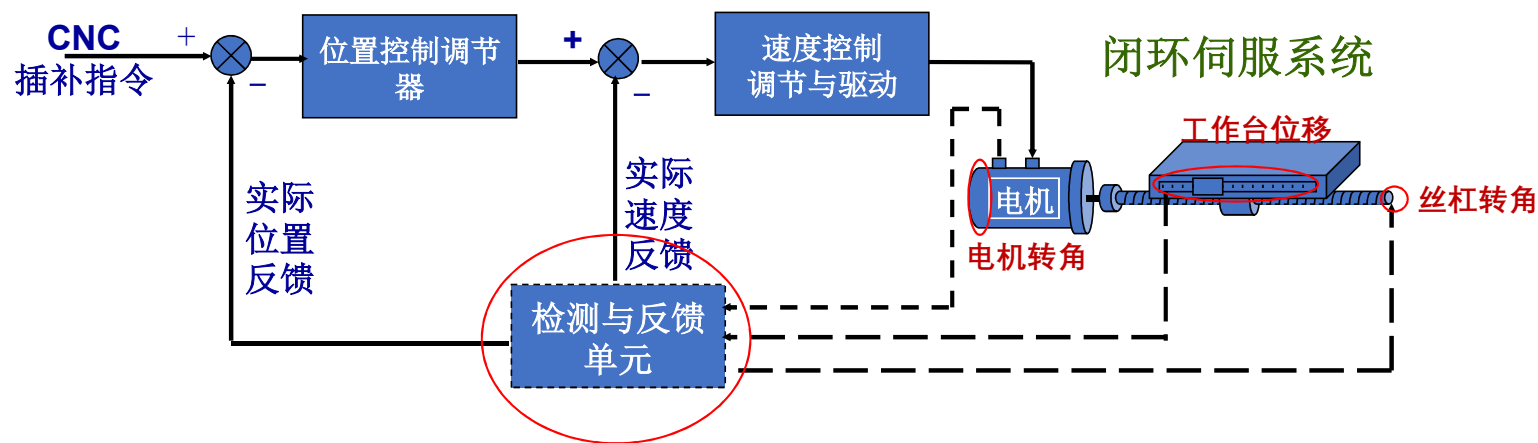
4.4 伺服系统设计方法

主讲教师：张立勋 教授

开环与闭环比较—知识点回顾

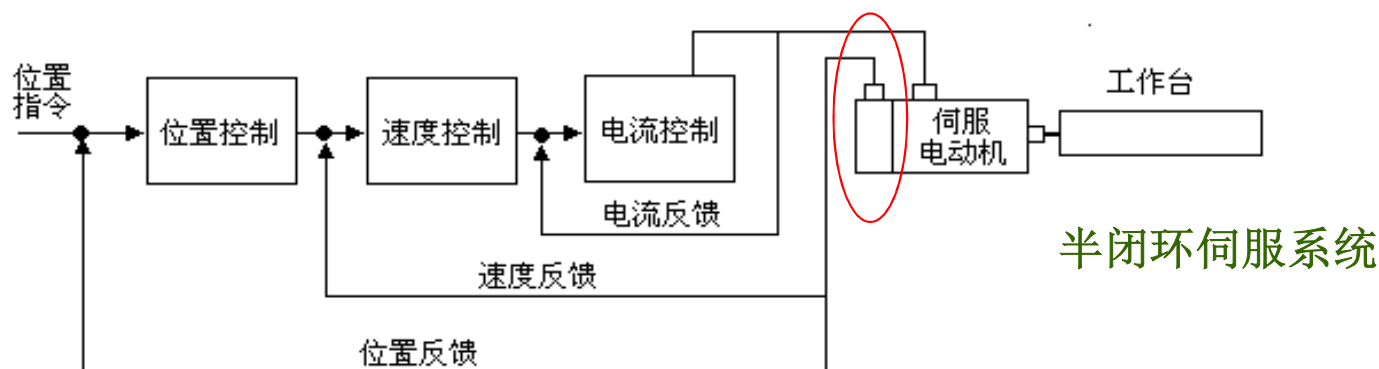


无反馈检测元件，结构简单，精度低

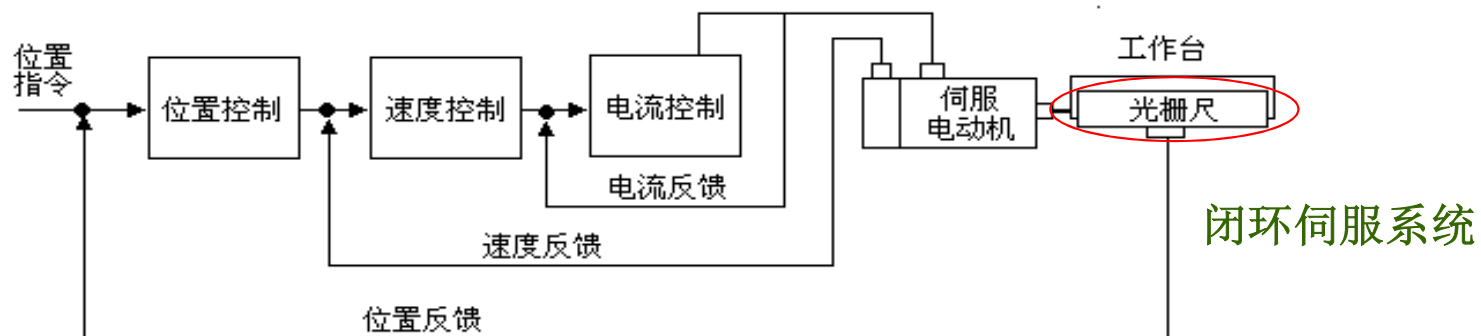


直接对输出量进行检测和反馈，并根据输出量对输入量的实际偏差进行控制，精度高，但结构复杂，成本高

半闭环与闭环的比较-- 知识点回顾



控制系统的稳定性高，不能消除伺服电动机与丝杠的连接误差及传动间隙对加工的影响



相对稳定性不高，易出现系统振荡现象，伺服调整比较困难。需发展伺服软件技术

4.4.1 开环伺服系统设计

开环控制方式是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程。

特点：

系统的输出量不会对系统的控制作用产生影响，控制精度完全取决于所用的元件及校准精度，抗干扰能力差，不可自动修正偏差。结构简单、调整方便、成本低。

4.4.1 开环伺服系统设计

(1)、系统方案设计

一般来讲，开环伺服系统具有稳定性，设计时主要考虑满足精度要求，通过合理的结构参数设计，使系统具有良好的动态响应性能。

- 1) 由于无法通过反馈对传动机构的误差进行补偿，需要较高精度的传动机构；**
- 2) 控制精度主要取决于驱动元件的控制精度**

4.4.1 开环伺服系统设计

(2) 传动机构方案的选择

选择滚珠丝杠（考虑传动精度直接影响输出的精度）

传动机构方案：

1) 步进电机与丝杠通过联轴器直接连接

优点：结构简单，可获得较高的速度；

缺点：对步进电机的负载能力要求较高。

2) 步进电机通过减速器传动丝杠

减速器的作用：匹配脉冲当量、转矩放大和惯量匹配。

3) 当电动机与丝杠中心距较大时，可采用同步齿形带传动，否则可采用齿轮传动，但需要采取措施消除其传动间隙。

4.4.1 开环伺服系统设计

(3)、驱动元件的选择

选用步进电机（可以实现开环转速或者位置控制）

确定步进电机动力参数

- 1) 电动机负载转矩计算
- 2) 电动机最大静转矩的确定
- 3) 电动机最大启动频率确定
- 4) 电动机最大运行频率确定

4.4.1 开环伺服系统设计

3) 验算惯量匹配

电动机轴上的总当量负载转动惯量 J_d 与电动机自身转动惯量 J_m 的比值应在一定范围内。

- 如果**比值太大**，则伺服系统的动态特性主要取决于负载特性，由于工作条件（如工作台位置）的变化而引起负载质量、刚度、阻尼等的变化，将导致系统动态特性也随之产生较大变化，使伺服系统综合性能变差，或给控制系统设计造成困难。
- 如果**比值太小**，说明电动机选择或传动系统设计不太合理，经济性较差。
- ✓ 通常取： **$0.25 \leq J_d/J_m \leq 1$**

通过减速器传动比 i 和丝杠导程 p 的适当搭配，往往可使惯量匹配趋于合理。

4.4.1 开环伺服系统设计

(4) 执行机构方案的选择

执行机构是伺服系统中的被控对象，是实现实际操作的机构，应根据具体操作对象点来选择和设计。

(5) 控制系统方案的选择

控制系统方案的选择包括微型计算机、接口电路和驱动电路的选择。常用的微型机有单片机、PLC和工业控制计算机。

4.4.1 开环伺服系统设计

开环系统误差分析

开环控制的伺服系统中，由于没有位置检测及反馈装置，为了保证工作精度要求，必须使其机械系统在任何时刻，任意情况下，都能严格跟随步进电动机的运动。

但是，存在着零部件制造及安装所引起的误差，机械系统动力参数（如刚度、惯量、摩擦、间隙等）引起的误差，必须将这些误差控制在允许范围内。

1)、死区误差

2)、由系统刚度变化引起的定位误差

可见，为减小系统死区误差，除应消除传动间隙外，还应采取措施减小摩擦，提高刚度和固有频率。对于开环伺服系统，为保证单脉冲进给要求，应将死区误差控制在一个脉冲当量以内。

4.4.2 闭环伺服系统设计

当系统精度要求较高或负载较大时，开环伺服系统往往满足不了要求，这时应采用闭环或半闭环控制的伺服系统。

- 从控制原理上讲，闭环控制和半闭环控制是一样的，都要对系统输出进行实时检测和反馈，并根据偏差对系统实施控制。两者的区别在于传感器检测信号位置的不同，因而导致设计、制造的难易程度不同及工作性能的不同，但两者的设计与分析方法是基本上一致的。
- 设计闭环伺服系统必须首先保证系统的稳定性，然后在此基础上采取各种措施满足精度及快速响应性等方面的要求。

4.4.2 闭环伺服系统设计

(1)、系统方案设计

闭环和半闭环控制方案的选择

- 当系统精度要求很高时，应采用闭环控制方案。它将全部机械传动及执行机构都封闭在反馈控制环内，其误差通过控制系统得到补偿，因而可达到很高的精度。
- 但是闭环伺服系统结构复杂，设计难度大，成本高，尤其是机械系统的动态性能难于提高，系统稳定性难于保证，因而除非精度要求很高时，一般采用半闭环控制方案。目前大多数数控机床和工业机器人中的伺服系统都采用半闭环控制。



4.4.2 闭环伺服系统设计

(2) 执行元件的选择

在闭环或半闭环控制的伺服系统中，主要采用直流伺服电机、交流伺服电机或伺服阀控制的液压伺服马达作为执行元件，液压伺服马达主要用在负载较大的大型伺服系统中，在中、小型伺服系统中，则多数采用直流或交流伺服电机。

4.4.2 闭环伺服系统设计

(3) 检测反馈元件的选择

- 机电一体化产品中的伺服系统多数采用计算机数字控制，因而相应的位置传感器也多数采用**数字式**传感器，如光栅尺、光电脉冲编码器等。传感器的**精度与价格**密切相关，应在满足要求的前提下，尽量选用精度低的传感器，以降低成本。选择传感器还应考虑**结构、空间及环境条件**等的影响。
- 交、直流伺服电机常用的速度传感器为测速发电机。目前在半闭环伺服系统中，也常采用光电脉冲编码器，既测量电动机角位移，又通过计时而获得速度。

4.4.2 闭环伺服系统设计

(4) 控制方案的确定

包括执行元件控制方式和系统伺服控制方式的确定。

对于直流伺服电机，应确定是晶体管脉宽调制（PWM）控制，还是晶闸管（可控硅）放大器驱动控制。

对于交流伺服电机，应确定是矢量控制，还是幅值、相位或幅相控制。

控制方式采用模拟控制还是数字控制、何种控制算法、软件伺服控制还是硬件伺服控制、选择计算机。

对于工业控制场合，通常采用PLC控制

4.4.2 闭环伺服系统设计

(5)、校正环节设计

1)、校正环节的作用

稳态精度
响应速度
稳定性

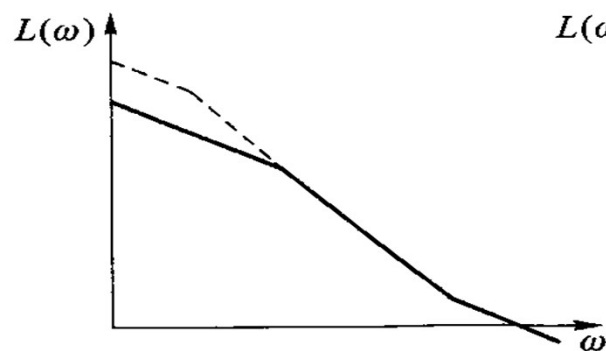
2)、校正环节设计原则

伯德图形状决定闭环系统的性能：
低频段——影响系统**稳态误差**；
中频段——影响系统**稳定性**和**快速性**；
高频段——影响**系统对高频噪声的抑制能力**。

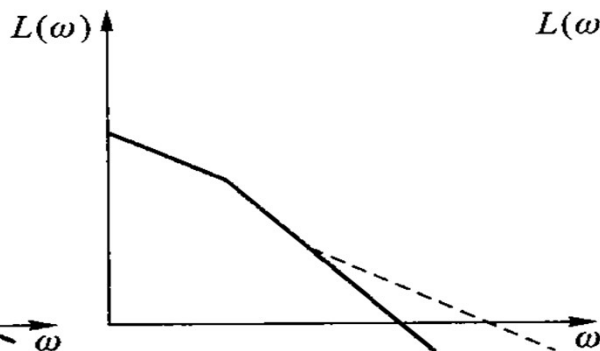
4.4.2 闭环伺服系统设计

频率法校正的实质：在系统中加入频率特性形状合适的校正装置，使经过校正后的系统开环伯德图具有理想的形状。

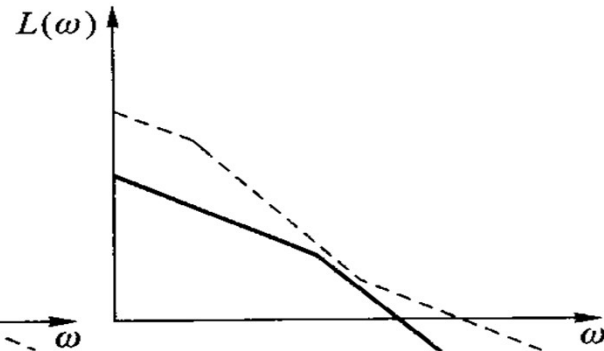
3种类型：



(a) 稳定并有满意的瞬态响应，但稳态时的跟踪误差过大。这时必须**提高低频段增益**以减小稳态误差，同时保持中频段和高频段形状不变。



(b) 系统稳定。稳态时的跟踪误差符合要求，但是瞬态响应比较差，则应**改变中频段和高频段**，提高增益交界频率。



(c) 系统基本稳定，但稳态误差和瞬态响应都不满意，就是说整个特性都必须予以改善，这时需**同时增加低频增益和改变中频段形状**。

4.4.2 闭环伺服系统设计

3)、系统控制参数设计

影响闭环伺服系统性能的主要参数有：开环增益、阻尼比和固有频率。

在设计闭环伺服系统时，必须综合考虑它们的影响情况，并通过它们的合理设计与匹配，保证系统在各方面的性能要求都得到满足。

4.4.2 闭环伺服系统设计

➤ 系统开环增益

为保证系统稳定性，增益 K 应取小值；

K 越小，系统截止频率越**低**、频宽越**窄**、快速响应性越**差**，稳态误差越**大**。

因而，为满足快速响应性和精度要求，希望 K 取大值。

闭环伺服系统正常工作的首要条件是系统稳定，因而位置伺服系统的 K 值一般都取得比较低，被称为低增益系统或软伺服系统。

4.4.2 闭环伺服系统设计

➤ 系统阻尼比

阻尼比对系统性能的影响也是矛盾的。阻尼比越大，系统稳定性越好，响应过程的平稳性越好，超调量小。系统响应速度越慢。

因而，阻尼比的取值不能太小也不能太大，一般按系统所允许的最大超调量来决定

4.4.2 闭环伺服系统设计

➤ 系统固有频率

伺服系统中各环节的固有频率对系统稳定性、精度和快速性都有重要影响。一般来讲，固有频率越高，系统稳定性越**好**，响应快速性越**好**，各环节引起的误差越**小**，抗刚干扰能力越**强**。

但固有频率的提高往往受系统结构、成本等条件限制。一般情况下主要按系统稳定性要求来确定各环节的固有频率。

如：机械系统的固有频率应高于驱动系统固有频率的2-3倍；

位置环以外的其他机械部件的固有频率比位置环内部高2-3倍；

系统工作频率范围不应包含各环节的固有频率，以免在扰动影响下发生共振；各环节的固有频率应相互错开一定距离，以免振动耦合。

4.4.2 闭环伺服系统设计

4)、常用校正环节

相位超前校正、相位滞后校正、滞后超前校正

➤ 超前校正

超前是指在稳定的正弦信号作用下，校正器的输出正弦信号在**相位上超前**于输入正弦信号。

超前校正环节可以为系统提供一个**相位超前角**，使系统的频带加**宽**，改善动态性能。

常用于对响应速度要求比较高的场合。

4.4.2 闭环伺服系统设计

➤ 滞后校正

串联滞后环节，在高频产生衰减的特性，使幅频特性曲线的穿越频率提前，从而达到稳定的要求，但是由于穿越频率减小，将使系统响应的快速性变差。滞后校正常用于电液位置伺服系统。

➤ 滞后-超前校正

超前校正--改善动态性能

滞后校正--改善稳态性能

滞后-超前校正环节可以同时改善系统的瞬态响应品质和稳定性，获得较好的综合控制性能。

4.4.2 闭环伺服系统设计

➤ PD调节器

对系统相位超前的作用，可以改善系统的相对稳定性，提高系统响应的快速性。

为高通滤波器，将使系统对高频信号的抑制能力明显下降，容易引入高频干扰，这是它的缺点。

通常引入一个惯性因子（不完全微分PD控制器）来提高抗噪声的能力，常用于位置环控制。

4.4.2 闭环伺服系统设计

➤ PI调节器

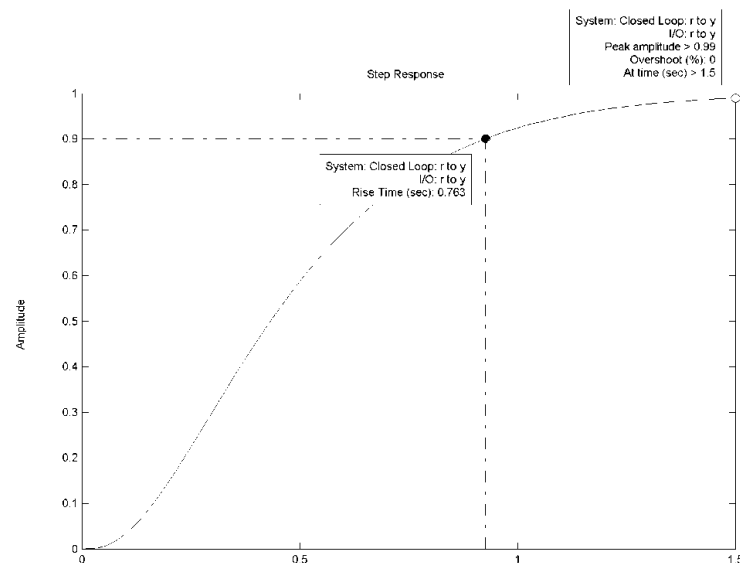
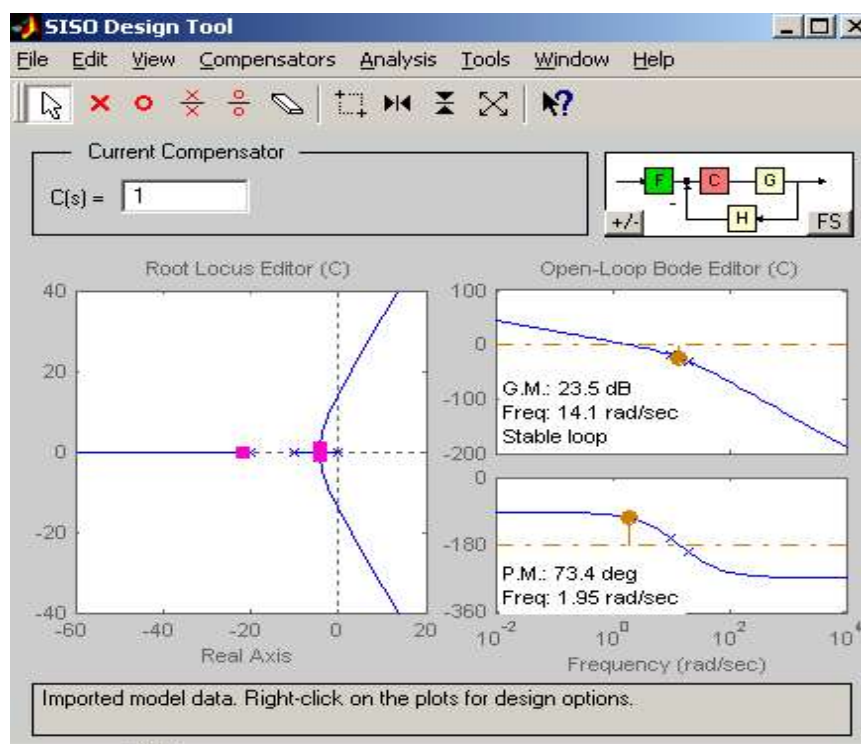
比例-积分调节器，提高了系统无静差阶次，使系统的稳态性能得到很大改善。在直流电动机调速系统中普遍使用这种调节器。但是快速性变差。

➤ PID调节器

兼顾PD和PI校正优点，又尽可能减小不利影响，常采用比例-积分-微分（PID）调节器对系统校正。

4.4.2 闭环伺服系统设计

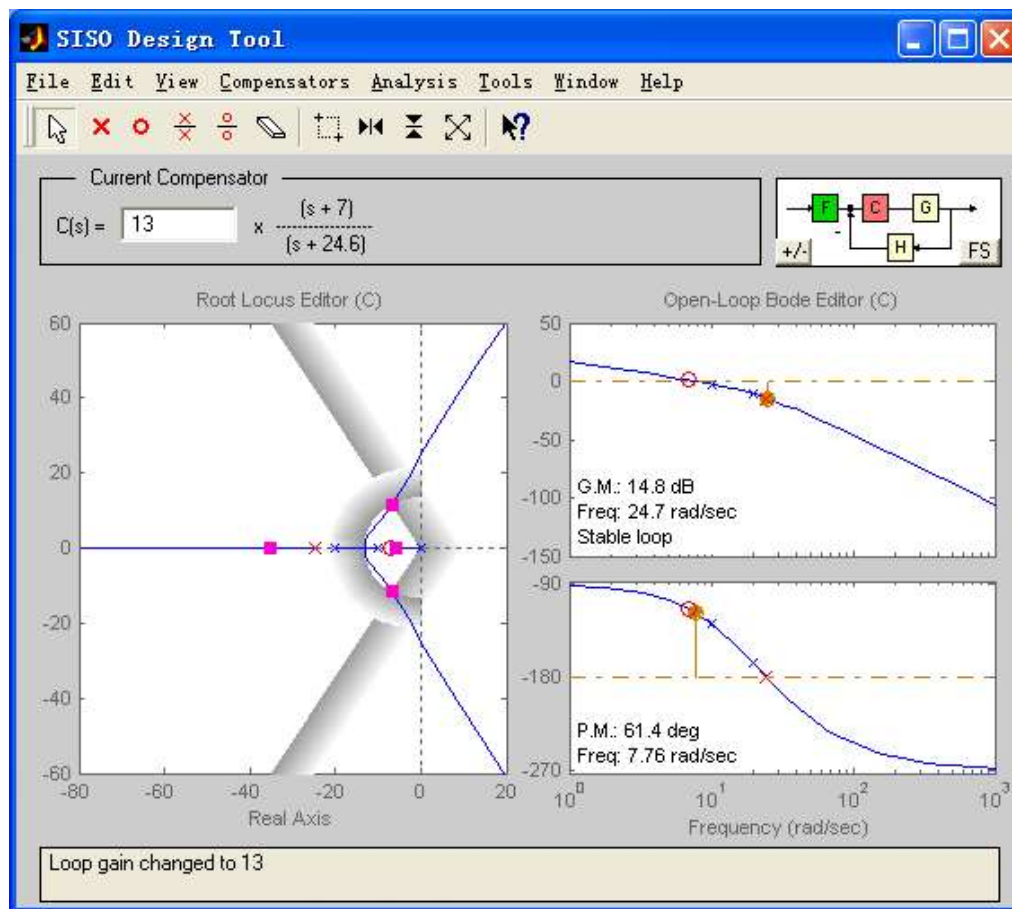
例1：系统开环传递函数为 $G(s) = \frac{400}{s(s^2 + 30s + 200)}$



从特性曲线上看，稳态性能符合要求，
需提高其快速性，故设计超前校正装置。

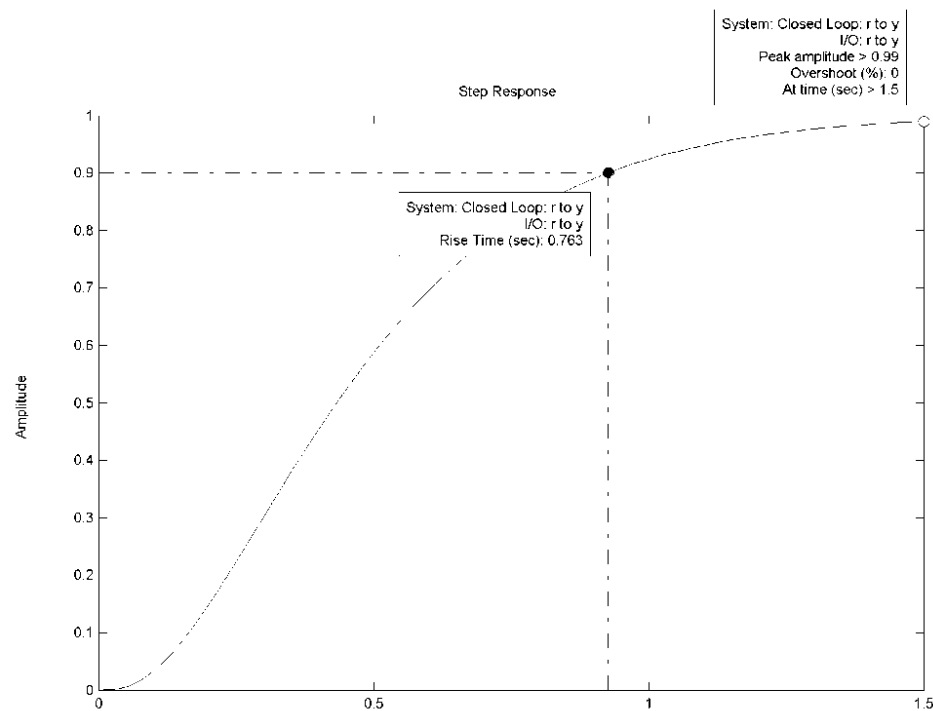
4.4.2 闭环伺服系统设计

引入超前校正环节

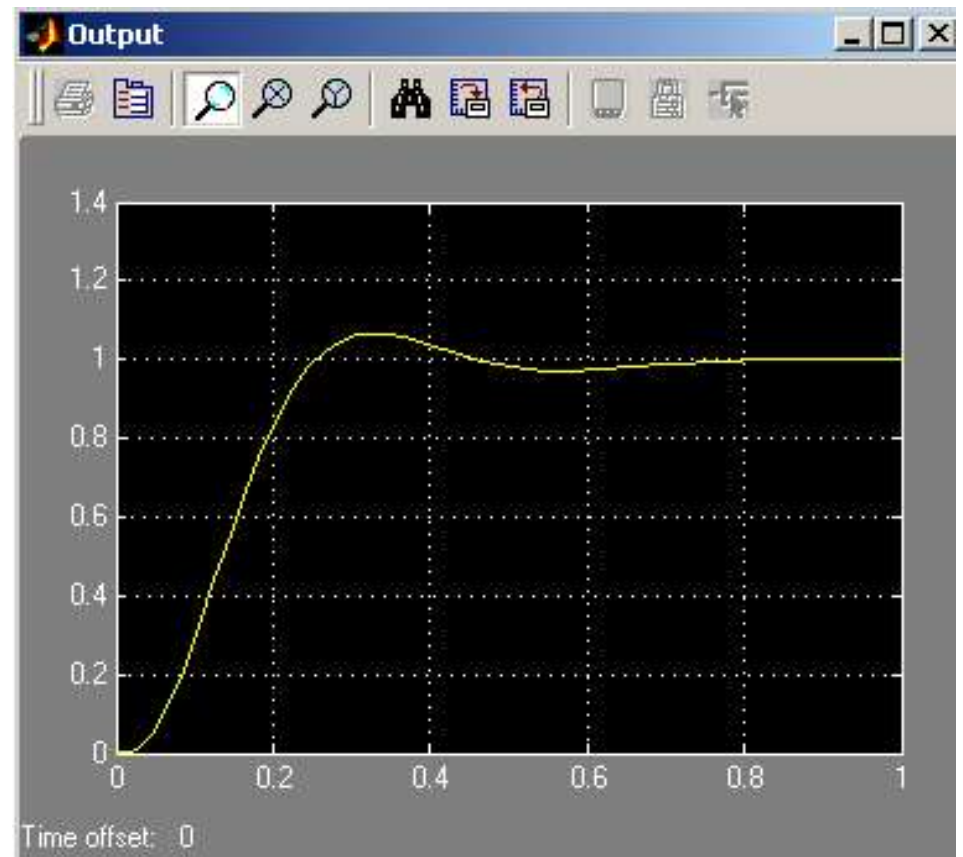


4.4.2 闭环伺服系统设计

超前校正



比例校正

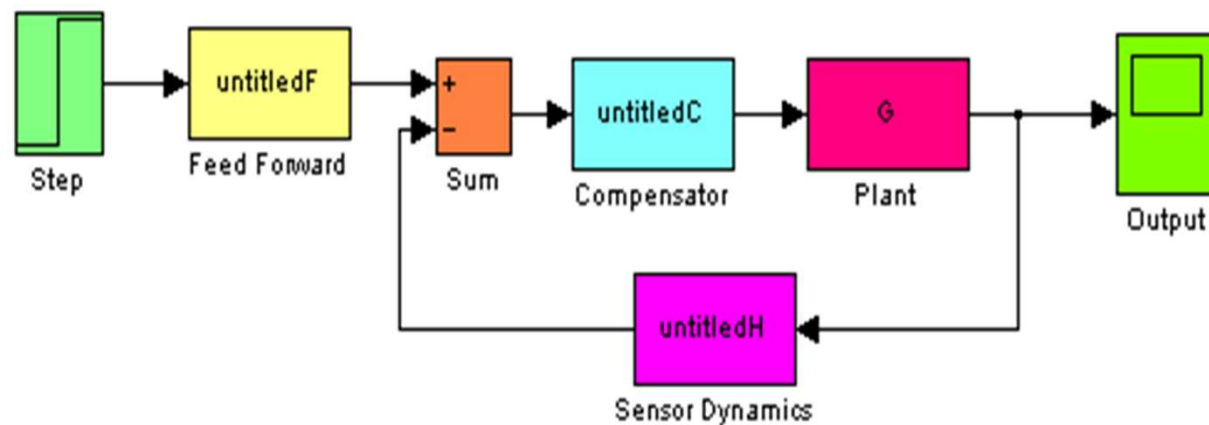


4.4.2 闭环伺服系统设计

例2：已知永磁电机开环传递函数为 $G(s) = \frac{1318982}{s^2 + 765s + 36061}$

设计电机速度回路和位置回路的控制器。

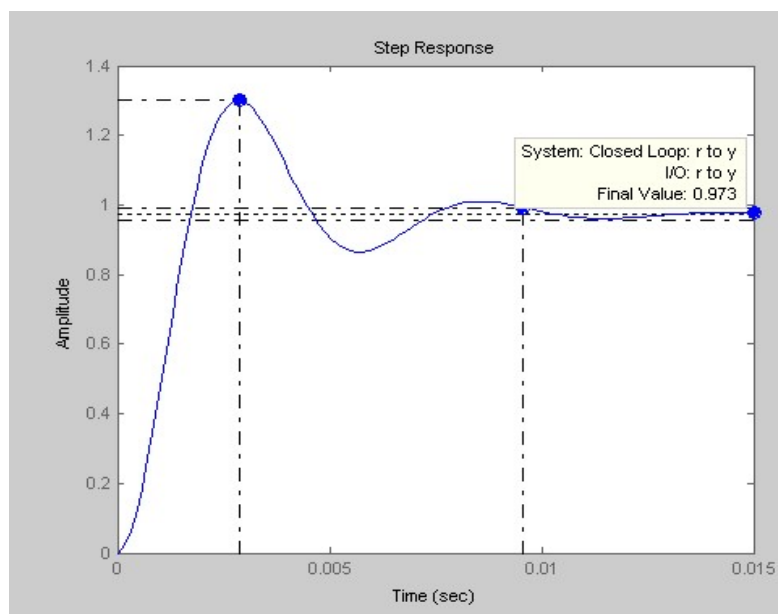
解：



速度环模型

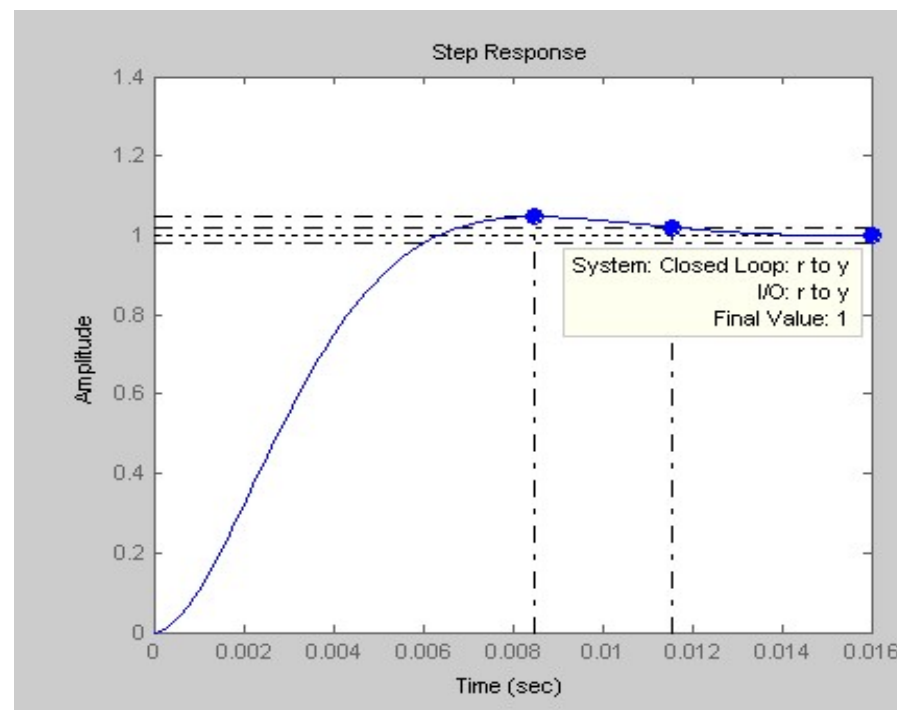
4.4.2 闭环伺服系统设计

速度环时域响应曲线



校正前

被控对象快速性较好，稳态值为0.973，
稳态误差存在。故设计采用PI控制器

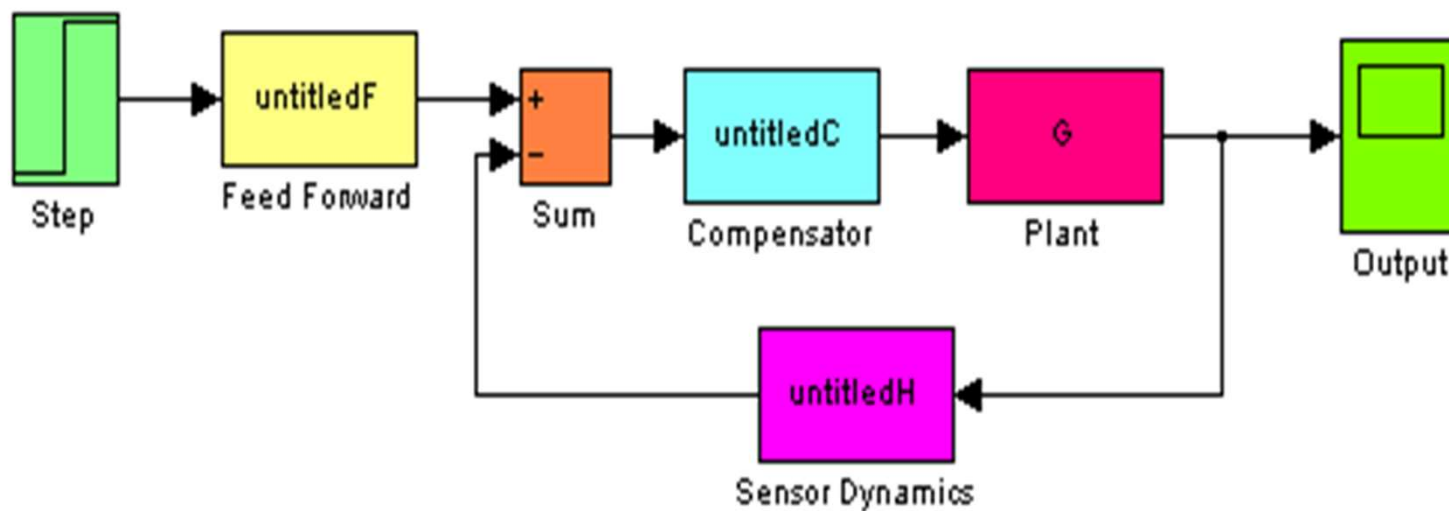


校正后

控制器：极点0，零点 -50，增益 $K = 0.2$ ，
满足系统性能要求。

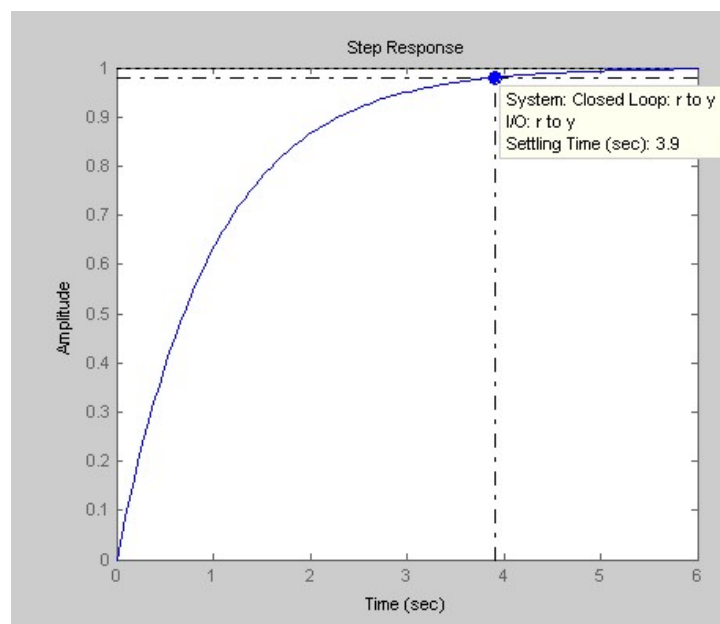
4.4.2 闭环伺服系统设计

位置环控制器C



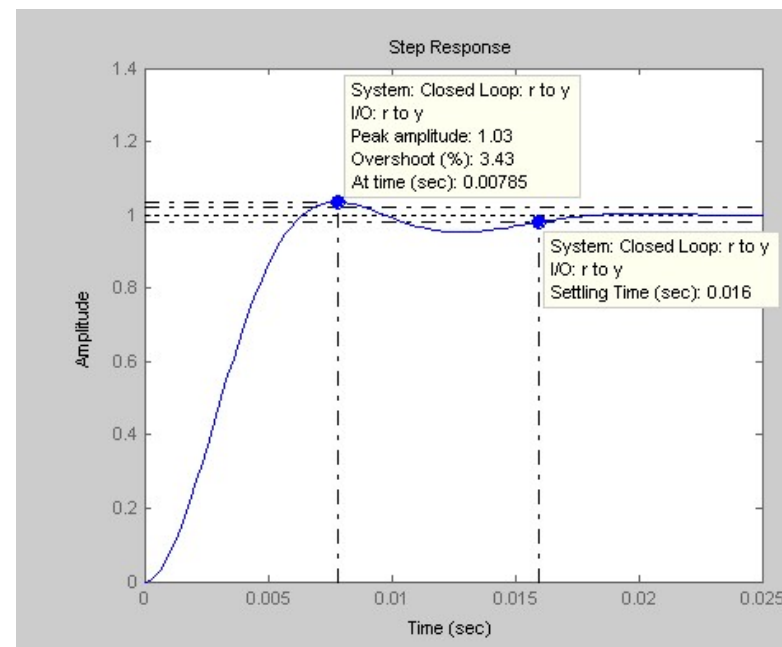
4.4.2 闭环伺服系统设计

位置环时域响应曲线



校正前

稳态性能指标满足要求，但需提高其快速性，故设计PD。



校正后

PD: 零点 -500, 增益0.6
峰值时间和调整时间等快速性指标



感谢聆听

机电一体化系统设计

主讲教师：张立勋 教授