

S2

倒立摆的相位超前补偿

这为ELEC2222贡献了5%的分数。

您将研究倒立摆的模拟控制。您将使用MATLAB中的根轨迹工具在简化模型上完成初始设计，然后研究被忽略的动力学的影响。



时间表

准备时间:3小时

实验室的时间 : 3个小时

I显微镜提供

工具:无

组件:无

设备:Bytronic倒立摆钻机, 2x100欧姆电阻
运放电路。

软件:Matlab

自带物品

必需品:实验室网站上有完整的清单:

<https://secure.ecs.soton.ac.uk/notes/ellabs/databook/essentials/>_____

在你来实验室之前, 你必须通读本文档并完成第2节中的**所有**准备工作。如果可能的话, 和你平时的实验搭档一起准备实验。只有在你的实验日志中记录的准备工作才会对你这次练习的分数有帮助。几个学生一起做准备是没有问题的, 只要所有人都理解这项工作的结果。在开始准备之前, 请通读这些笔记的所有部分, 以便充分了解在实验室中要做什么。

学术诚信——如果你和其他学生一起做准备, 在日志中注明这一点是很重要的。同样, 你可能想要使用来自互联网或书籍的资源来帮助回答一些问题。同样, 在你的日志中记录任何来源。

本练习使用实验室网站<http://secure.ecs.soton.ac.uk/notes/ellabs/markscheme/>上提供的
标准标记方案

马克计划

准备	
0	在实验室开始前没有完成准备工作或没有将“必需品”带到实验室
1	部分完成，不理解
2	部分完成，理解最少
3	部分完成，理解良好或全部完成，理解最少
4	全部完成，很好理解
5	全部完成，非常理解
进度与质量	
0	没有进展/没有参加实验室
1	最小进展(<第3部分的50%)
2	完成 3 部分的大部分内容
3	完成所有部分 3__
4	出色地完成了所有的第3部分和第4部分
5	出色地完成了第3部分和第4部分的所有内容 __
理解	
0	没有学习或理解-只是坐在那里?
1	对 3 节了解甚少
2	对 3 节的一些了解
3	对 3 部分有很好的理解
4	对 3 部分的所有内容都有很好的理解
5	对第3节和第4节的所有内容都 <u>有</u> 很好的理解
日志	
0	没有工作日志记录(或没有使用合适的日志)
1	实验室日志里的记录很少，没有什么好处
2	实验室日志的最小记录，有一些好处
3	一些活动/问题在日志中记录良好，但零星报道
4	在日志中完整记录活动/问题，有所改进 可能的
5	在日志簿中有优秀完整的记录

第一节

目标、学习成果和大纲

本实验练习旨在:

- 使您在物理系统上使用PID和引线补偿控制技术。
- 使您在设计控制器时应用根轨迹图。
- 给你使用Matlab的控制工具箱的经验。

成功完成实验后, 您将能够:

- 了解如何在控制器的设计中使用根轨迹。
- 了解PID和引线补偿。

第二节

准备

通读课程手册中关于安全和安全工作实践的说明, 以及你的标准操作程序副本。确保你了解如何安全工作。通读这份文件, 这样你就知道你在实验室里要做什么。

2.1 一般准备

在进行实验之前, 你应该熟悉:

- Matlab中控制系统工具箱的使用。特别是, 您应该检查(通过Matlab中可用的help <command>工具)以下命令:

Tf, step, feedback, rlocus, series, bode, rlocfind

- 根位点图(参见ELEC2222注释网站)。

2.2 系统建模

该装置由一个倒立摆组成(见图1)。

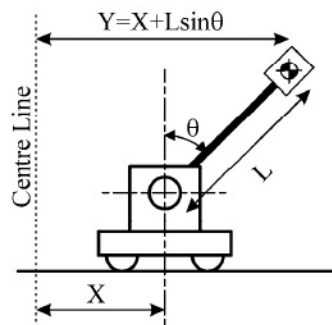


图1:倒立摆

这里X是小车的位置，通过伺服控制;Y是物体在杆上的位置。将系统方程线性化，我们得到了传递量

函数 $P(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-\omega^2}{s^2 - \omega^2}$, 其中 $\omega^2 = \frac{g}{L}$, 其中L为摆的长度, $X(s)$ $s^2 - \omega^2 L$
 $g = 9.81 \frac{\text{米}}{\text{s}^2}$ 是重力常数。摆杆顶端的质量, s^2
 有效摆长 $L = 0.20\text{m}$ 。



问题

请在你的日志中回答以下问题，并结合步骤反应图。

1. 计算传递函数P(s)的数值。
2. 写下Matlab命令，设置一个P(s)对应的传递函数摆。
3. 在Matlab中，使用step命令绘制系统的阶跃响应。
4. 植物是稳定的还是不稳定的？

在本实验的其余部分中，我们将设计一个补偿器，保证Y与x相应移动，稍后我们将在我们的模型中纳入初始模型中的伺服，如图2所示。

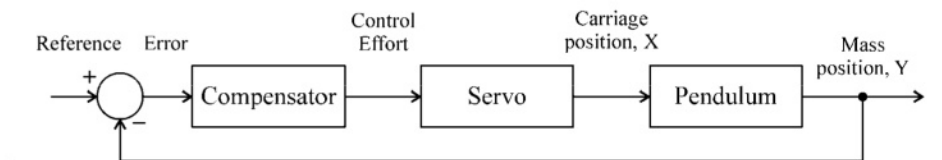


图2:控制系统

第三节

实验室工作

3.1 位置控制

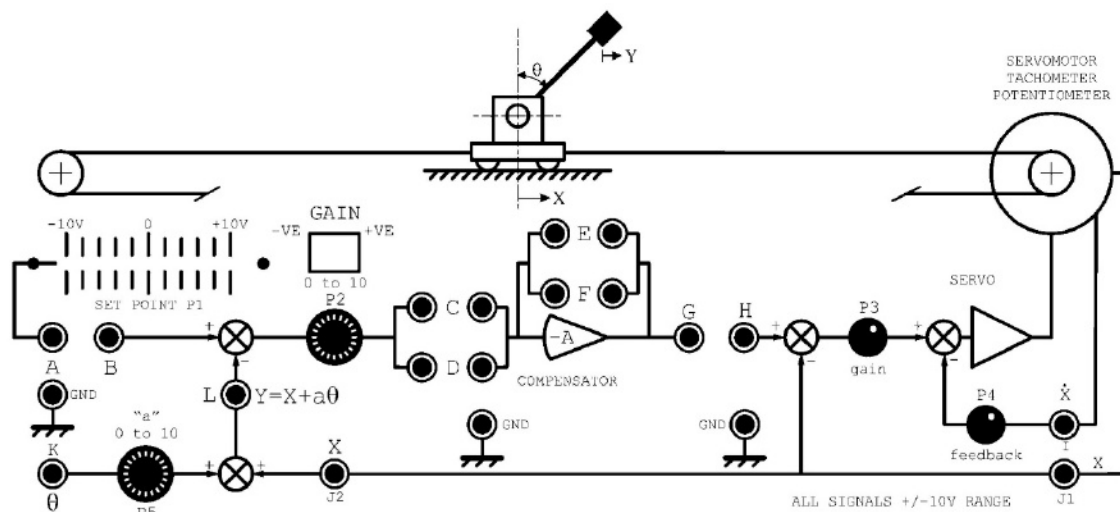


图3:Bytronix钻机

为了熟悉控制台，我们首先考虑摆架的位置控制。下面的说明见图3。

- 确保钟摆单元电源已关闭。
- 将钟摆从底座上拧下并放置到一侧。
- 将设定点电位器(P1)定位到0V。
- 将设定点(A)连接到伺服放大器输入端(H)。
- 将伺服增益(P3)定位在最大值，并将速度增益(P4)定位在大约中点。P3和P4设置应在实验室剩余时间内保持固定。

打开电源，并验证设定点电位器P1的位置决定了小车(X)的位置。

我们需要控制摆质量Y的位置，然而，这不是直接测量的，只能从X和角度 θ 的测量中推断出来，见图1。对于小角度， θ 近似等于 $\sin(\theta)$ ，因此 $Y = X + L\sin(\theta)$ 近似等于 $Y = X + L\theta$ 。X位置由来自轿厢电位器的电压 V_x 表示，该电压通过运算放大器电路加到来自轿厢电位器的电压上，该电压可以按因子a缩放，由电位器控制

P5。由此我们得到： $V_Y = V_x + aV\theta$ 。

本实验室不需要对P5进行详细的校准。**将P5设置为2.7**，并确保摆锤在杆的末端。

3.2 比例控制

比例控制是“PID”中的“P”。首先，我们研究了它对控制器的模拟

MATLAB。



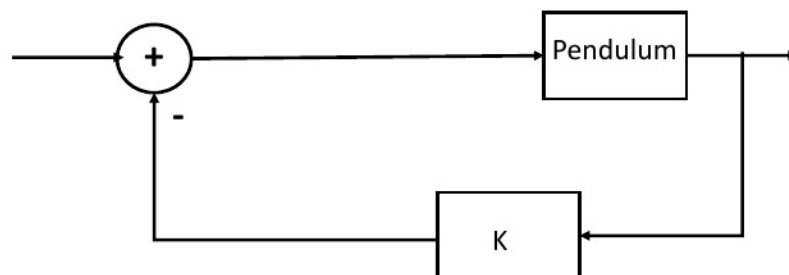
问题

5. 将变量摆定义为传递函数(见2.2节)，使用命令

```
k=1
Sysclp1 = feedback(pendulum,k)
步骤(sysclp1)
```

研究 $k=0,1,2,10$ 时，系统在负反馈(反馈命令的默认选项)下的响应。对系统的稳定性进行评论。

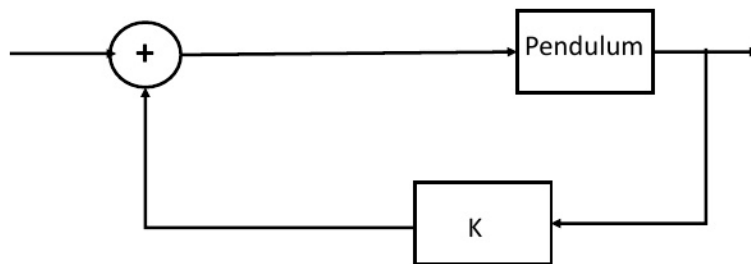
请注意，您正在进行以下配置:



6. 调查正反馈，即 $k=0,1,2,10$:

```
k=1
Sysclp12 = feedback(pendulum,k, +1)
步骤(sysclp2)
```


Notice that you are working on the following configuration:



7. Plot the root locus using MATLAB:

```
rlocus(pendulum) %Negative feedback
```

```
rlocus(-pendulum) %Positive feedback
```

8. Comment on the stability in both cases. Can proportional control stabilize the system?

记住你从上面得出的结论，我们现在将在物理摆上实现反馈比例控制。

关掉电源。把摆杆装在车厢的支架上。确保电位器P5设置为2.7，摆锤牢固固定在摆杆末端。连接设定点电位器，通过连接a和B作为控制系统的参考输入。

设置补偿器作为单位增益反相放大器，通过在终端D上放置一个100kOhm电阻，在终端f上放置另一个100kOhm电阻，将运算放大器的输出直接连接到伺服参考输入(即链接G和H)，确保增益开关设置为负。

将增益电位器(P2)设为零。用手托住钟摆，接通电源。调整设定点电位器，使摆架进入钻机中心。慢慢增加增益P2。当你将钟摆移动到一边时，观察马车的动作。



问题

9. 对不同增益值的行为进行定性比较。它与根位点预测一致吗？

3.3 超前补偿

在本节中，我们设计并实现了一个基于导联补偿的稳定控制器。这是一个由传递函数描述的控制器

$$H(s) = \frac{1 + c\tau s}{1 + \tau s}$$

基于根轨迹的考虑，我们需要将补偿器的零点放置在左半平面(希望能吸引植物的右半极点)。最简单的选择是放置补偿器的零点直接抵消植物的稳定极点，即我们选择

$$\frac{1}{c\tau} = \omega$$

然后使用一个较高的c值，比如c=10。在现实中，我们不能精确地选择 $\frac{1}{c\tau} = \omega$ ，因此我们将使用如下形式的补偿器：

$$\frac{1}{c\tau}$$

$$H_1(s) = \frac{1 + 0.1s}{1 + 0.01s}$$

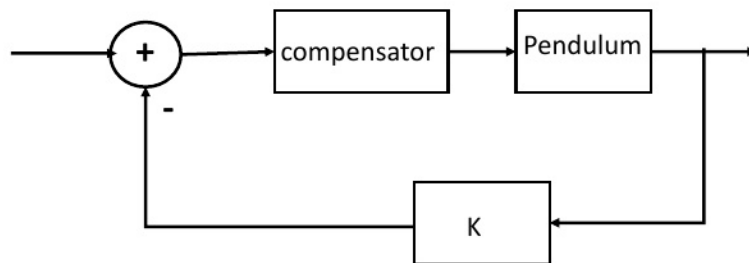


Questions

10. 为 $H(s)$ 构建一个Matlab传递函数补偿器，并将其连接进去
串联与植物和负增益:

摆sys2 = 系列(补偿器)

注意，你现在正在进行以下配置:



用rlocus(sys2)绘制根轨迹。对图进行评论。

11. 为 $H_1(s)$ 建立一个传递函数compensator2，并绘制根轨迹

在正反馈下

sys3 = 系列(-compensator2摆)

rlocus (sys3)

点评剧情。

请注意，这种“近似”极点抵消只能在稳定极点周围有效:试图抵消不稳定极点的效果非常不同。事实上，它根本不能提供稳定性。

物理上，传递函数 $H_1(s)$ 是通过运算放大器补偿器电路实现的:见图4。

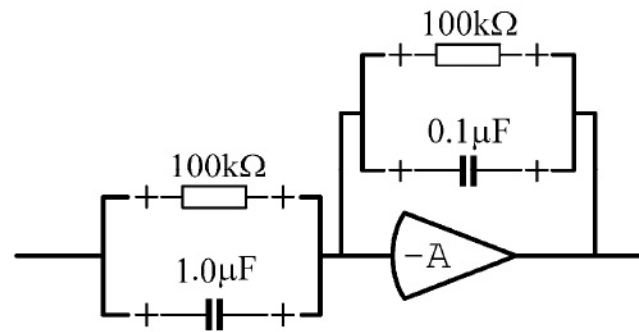


图4

为了验证运算放大器电路与期望的补偿器相对应，表示输出电压为 V_o ，输入电压为 V_i ，周围的反馈阻抗
运算放大器 Z_f ，输入电压和求和之间的阻抗

结通过 Z_i ，我们注意到 $\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_i}$ 为由电阻器组成的并联电路

R 和电容 C_f 我们有 $\frac{1}{Z_f} = \frac{1}{R} + C_f s$; 同理, $\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{R} + C_i s$ 。因此 $\frac{Z_f}{Z_i} = \frac{R + C_f R s}{R + C_i R s}$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1 + RC_f s}{1 + RC_i s}.$$

我们现在准备物理实现控制方案:

- 确保钟摆质量固定在杆上的最大位置。
- 将a设置为2.7。
- 确保伺服增益(P3)处于最大值，并且速度增益(P4)大约处于中途点。
- 将增益(P2)设置为0。
- 确保增益开关设置为负。
- 如图4所示，将补偿器组件放置在端子E和C之间。
- 将钟摆直立放在轨道中心。

- 将控制器输出连接到伺服输入(即;连接G和H)。
- 松散地支撑钟摆，逐渐增加增益(P2)，直到达到稳定。
- 现在可以完全释放钟摆了。

如果你平衡钟摆有困难，试着稍微调整一下电位器(a)。



问题

12. 使用根轨迹图解释为什么增益P2的小值不会导致稳定的闭环。

3.4 被忽略的伺服动力学

伺服有显著的，如果快速的动态，这在我们的设计过程中被忽略了。我们现在研究这些动态的影响，并表明它们确实可以在设计中被忽略(在某种程度上…)。

当伺服增益(P3)和伺服速度反馈(P4)固定在它们的原始位置时，伺服动力学由二阶模型近似给出

$$G(s) = \frac{1}{0.00025s^2 + 0.02s + 1}, \text{ 即具有固有频率的二阶系统}$$

$\omega = 10$ 赫兹

阻尼比 $\zeta = 0.7$ 。在我们的设计中，我们忽略了这些伺服动力学，假设它们足够快，可以忽略。

为了将它们的影响合并到MATLAB模型中，并参考图2，键入

```
Servo=tf([1], [0.00025 0.02 1])
```

实际=系列(伺服摆)

`Sys4 = series(-compensator2,actual)`

现在用`rlocus(sys4)`绘制根轨迹。



问题

13. 使用命令`rlocfind`确定系统保持稳定的增益范围的上下限。通过增加增益P2，在硬件上定性地验证上限值，直到不稳定开始。

注意，没有伺服动力学的系统的根轨迹(`rlocus(sys3)`)并没有预测到这种不稳定的开始。

3.5 鲁棒性

当你对增益P2做出了很好的选择，比如将其设置为1.2左右时，你会注意到闭环系统是相当鲁棒的。轻敲钟摆不会使其失去稳定性，钟摆本身的变化(例如，将质量不完全置于顶部)也不会对控制系统的性能产生显著影响。控制系统对对象参数变化的相对不敏感与其鲁棒性有关:控制器不仅稳定被设计控制的对象，还稳定从改变其参数的原始对象获得的其他对象。本节的目的是让您研究鲁棒性的度量，并通过实验验证控制器的鲁棒性。



问题

14. 使用 $k = \text{rlocfind}(\text{sys4})$ 确定增益 k 的一个稳定值，并定义 $\text{sysclp3} = \text{feedback}(\text{sys4}, k)$ 。绘制波德图：

波德(sysclp3)

估计增益和相位裕度。

增益和相位裕度是对控制器鲁棒性的粗略估计。用 $P(s)$ 表示植物传递函数；则增益边际是最大的，使得(固定的)控制器 $K(s)$ 稳定了植物 $aP(s)$ 。相位裕度是 $P(s)$ 中最大的相位，使得控制器 $K(s)$ 稳定移相装置。利用闭环传递函数的奈奎斯特图和奈奎斯特稳定性判据，相位裕度和增益裕度的几何意义很容易理解。它们也可以用波德图来测量。



问题

15. 将钟摆质量向下移动到杆的一半。再次轻敲重物，定性地评价相对稳定性。
16. 将重物移至杆子底部，重复测试。对反应进行评论。
17. 将摆锤置于杆的底部，重新调整电位器 **P5** 以获得良好的响应。
18. 现在将钟摆重量移到杆的顶部，并评估相对稳定性。

第四节

可选的附加工作

如果你已经完成了第3部分的所有内容，并且理解得**很好**，那么这个部分的分数才会被授予。



问题

19. 定义新的传递函数pendulum2和pendulum3分别对应问题15和16的情况。
20. 重新绘制相关的根轨迹。
21. 使用rlocfind，调查稳定增益的范围，并将其与硬件响应进行比较。