

实验 6，运放应用：PID 电机控制

阅读：

比例-微分-积分（PID）环路（自动控制原理教材）

1 介绍：

这次电路比较直观：一个电位器设定一个目标位置，一个直流电机企图运转到这个目标位置，实际位置通过第二个电位器进行测量。电路中的滞后因素会带来一定的麻烦：修正信号似乎到达得太慢。如果是这样的话，修正信号将会使事情变得更糟糕。

电机控制回路经常采用经典的 PID 电路。这种电路包括比例部分(P)，积分部分(I)和微分部分(D)。稳定性是它的核心目标。

希望这个电路能够让你们有机会运用到以前所碰到过的子电路：积分，微分，求和，在负反馈环中的推挽电路，微分放大器——这些电路都是你们所熟悉的。

2 PID 电机控制

这里我们所要做的看上去似乎很简单，实际上并非如此。我们所要做的就是控制直流电机轴的位置。利用与电机轴连接的一个电位器通过电压反馈位置。如图所示：

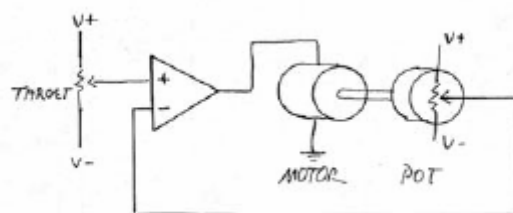


图 1 基本的电机轴位置控制环

还有比这图更简单的方法吗？似乎没有了。问题是，如何使电路稳定。由于电机的积分效应，也就是它的转角与所加电压之间的关系，我们往往很难使这个简单电路的稳定性能很好。

在输入为方波的情况下，图 2 形象的说明了输入电压与与电位器位置的关系。三角形输出看上去是不是与前面试验中的积分器输出类似？

图 3 是反馈系统的方框图。可以用更正式的控制回路表达：

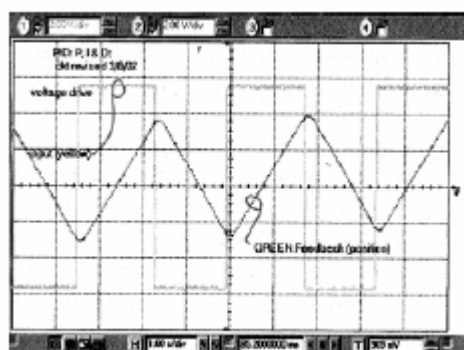


图2 加入积分器后电位器的位置

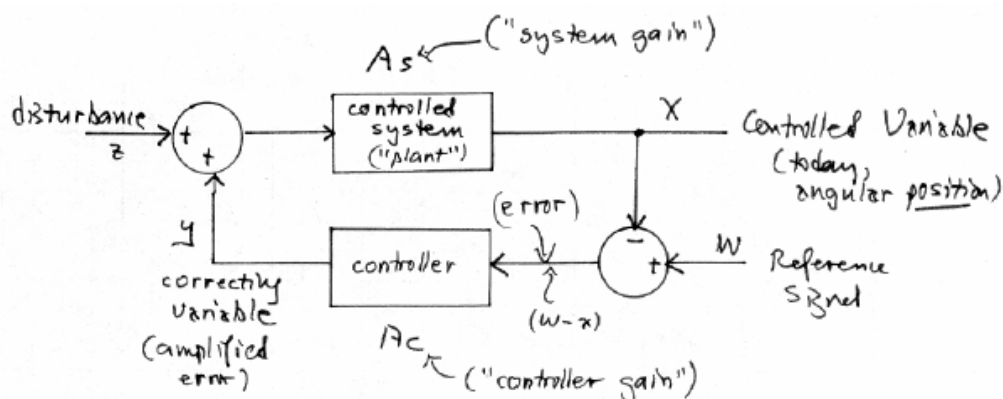


图3 简单的电机轴位置控制框图

现在我们重新画出同样的方框图，使之看上去更象我们所熟悉的运放图，如图4。

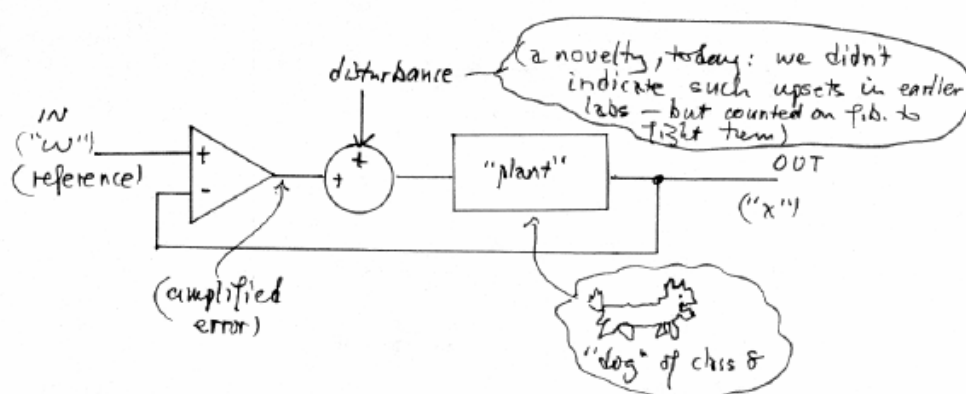


图4 控制电机轴的位置框图（更熟悉的方式）

稳定性：对这个电路我们可以使它处于临界稳定，可以简单地通过使电路增益尽可能的小得到。

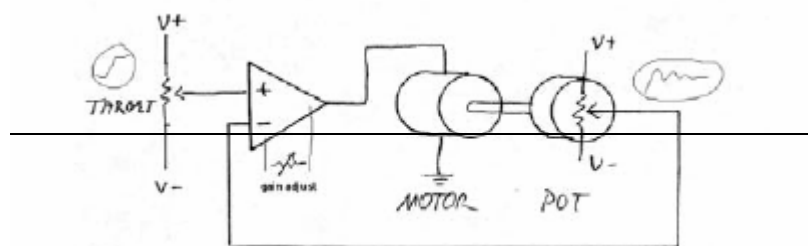


图6 P-Only 驱动将会产生过调现象

我们试着逐渐增大增益。当增益小时，电路相当稳定。随着增益的增大，开始发现过调和振铃现象，表示电路开始出现不稳定；随着增益越来越大，开始出现振荡现象。

最后，我们给出几张图来说明对比例电路增益的改变的响应。

2.1 电机驱动器

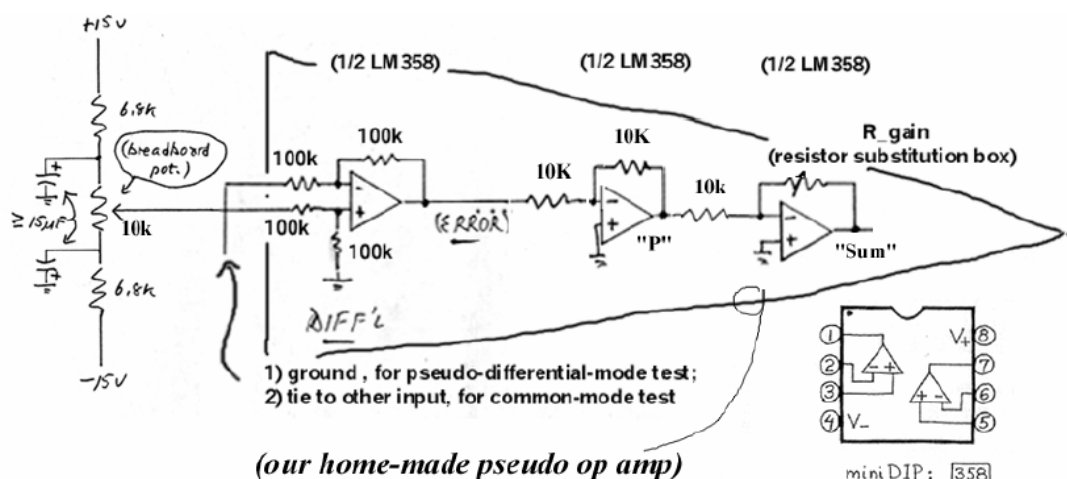


图 8 微分运放

第一级是一个标准的差分放大电路，它有单位增益（增益为 1）。第二级是一个简单的倒相器；第三级似乎仅仅撤销了第二级的倒相。这是对的。我们介绍这个电路是因为我们很快就用到它，给它接入两个或者更多的输入，作为求和电路。此电路将把如下 PID 控制需要的信号联合起来：比例，积分和微分。

此电路是增益可调的差动放大电路，使我们可以得到适度的增益。它还有一个优点：在输入和输出之间没有相移。设置增益为 10，观察共模信号是否对输出产生了影响（输出是否为 0？共模信号是通过电位器两端同时抬高一定的电压得到）。接着使一个输入接地（通过 100k 的电阻）；一端接电位器的输出（通过 100k 电位器）。调节增益电阻（R-gain），看看是否是所期望达到的增益+10。

一些特点

增益是正的。可以看到三个放大器的连接成了正、负、负；

我们采用的是“伪差动”信号，一个接地，一个接运放的正端。

当用电位器电压作为输入时，DVM（数字电压表）比示波器能更方便地验证输入与输出的信号传递关系。测试完后，把输出电压调到零。

2.3 驱动电机

已经测试了电机驱动器，现在开始检查前面谈到的三个用运放级联的电路。通过调整输入电位器的电压超过 0V 或者低于 0V，来验证你能让电机两个方向都能旋转。（电位器即使到了它的极限，电机驱动器也能让电机正常工作，因为电机有一个离合器来控制电机的齿轮啮合）

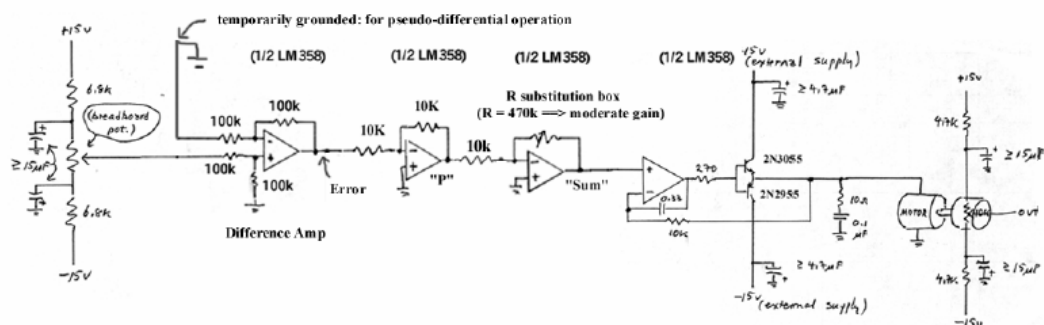


图 9 测试电机旋转，测试差动运放和电机驱动

2.4 闭环

现在减小增益，设置增益为 1.5。把“伪运放”的反相输入接地替换成接到输出电位器的电压输出。电路图如图 10。

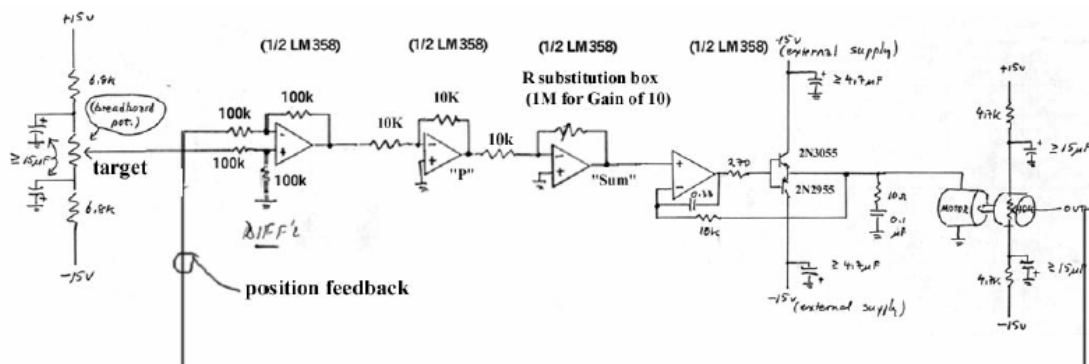


图 10 闭环，比例电路

用示波器的两个通道分别观察 V_{IN} 和 $V_{output-pot}$ 。数字示波器比较适合，因为它有一个比较慢的扫描速率：可以比 0.5s/Div 或者 1s/Div 还要低。

有很多方法来测试这个环路：手工或者用函数发生器。你可以用以下方法测试：

两种驱动输入的方法：

函数发生器产生方波：方波 ($\pm 5V$)，最低频率 0.2Hz。这种输入能暂时代替电位器输入。这可能是最好的选择了，因为它能提供连续不断的输入，而人工是不太方便的。

人工输入阶跃信号：这种方法比较简单。用手转动电位器作突然的转动。

与电机连接的输出电位器应该对过调和几个周期的阻尼振荡有所反应。

另外一种测试方法：扰动输出，并观察恢复情况。让输入电压为恒定值，强制性的让电位器偏离它最后停留的位置（简单的改变输出电位器的旋钮），然后松手，让系统自由运行，观察旋钮能否回到它的原始位置。能看到一些过调和衰减振荡，与调节输入电位器的现象一样。

即使在仅仅只有比例电路的情况下，刚开始增益也应该取得较低，这样电路会稳定一点。

开始使用 $R_{sum} = 100k$ ；增大增益， R_{sum} 取 220k，我们可以看到一些过调现象和一两个周期

的震荡。这种振荡相当明显。这种装置如果用在飞行器上的话，将是很危险的事情。如果我们能抑制过调并且能让系统迅速地稳定下来的话，将是一件很有用的事。

取 $R_{sum}=680k$ ，此时增益更大，我们会观察到更多周期的振荡。增益越大，电机驱动电压的波形就越乱，振荡就越明显。如图 11 所示。

增益再增加， $R_{sum}=1M$ ，输入的微小改变或者电位器输出的旋钮失位都将会带来持续的振荡。找到让你电路开始持续振荡的最小增益，并注意振荡的周期。我们称呼此时的周期为“自然周期”，后面我们将用它来作为抑制振荡的参数。

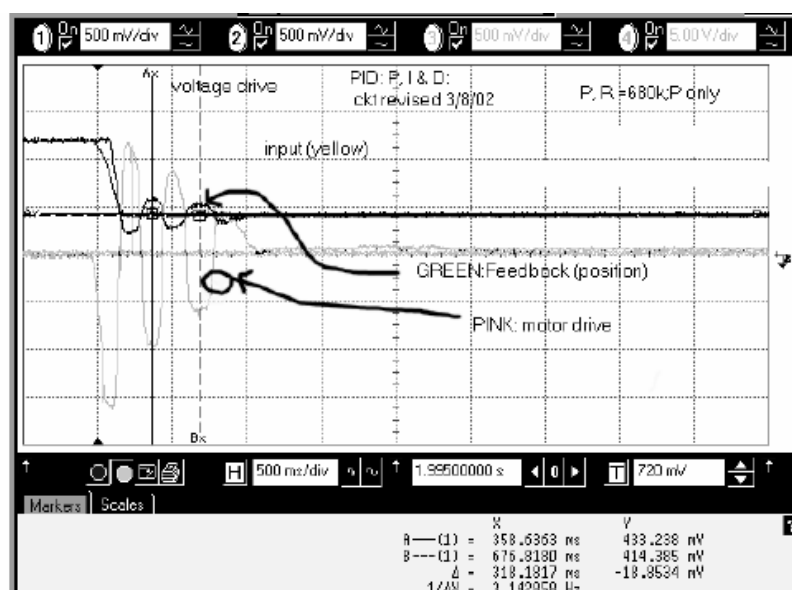


图 11 高增益大振荡

3 增加一个误差微分电路

如果加入此电路，系统将会稳定得更快，其效果将得以提高（这就是 D 的来由），甚至“P”的增益也将会得到增强。把稳定性问题当成消除正弦波相移的问题——通常用运放电路做这些工作——我们将看到如果插入一个微分电路到反馈环中去，将会在某种程度上抵消积分电路的作用。积分电路在这里是比较危险的，其中之一是自然形成的，它对应于电机角位移与角速度之间的关系。额外的来自于积分的相位滞后可能使系统产生-180 度的相移，它将使电路变得非常糟糕，能产生持续的振荡。

3.1 微分电路

如下所示，它的拐点频率大约在 1kHz 左右。

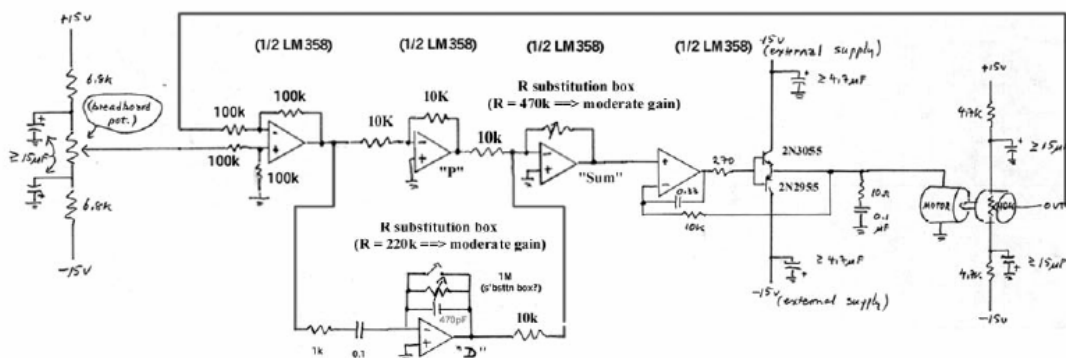


Figure 12: Derivative added to Loop

多大的微分？

加入微分电路之后，我们的目标就是消除额外的相移，这种相移能带来系统的不稳定。我们怎么能知道什么频率下产生麻烦呢？又怎么确定微分器的增益和频率响应呢？我们已经得到一个参数：观察得到的“自然振荡”频率。可以通过逐渐增大增益直到看到由此引起的输出需要很长的时间来稳定，或者看到一个持续的振荡。在这个实验中，“自然振荡”的周期大约是 0.6 秒（注：我们的大约为： ）。

为了简单起见，假设“比例电路”是单位增益（就是 1）。那么我们的目标就是调整各元件，使微分的作用跟比例的作用相等；否则，在这个频率之下，电路就会出现不稳定。微分电路让系统稳定。如果加入另外一个低通电路，系统的稳定性会变坏，这时就应该减小系统的增益，使其小于 1，以便使振荡消失。

首先看一下微分增益的含义，接下来我们将计算什么样的 RC 电路将会使电路稳定。

微分增益的定义如下： $\frac{V_{OUT}}{dV_{IN}/dt}$ ，已知： $V_{OUT} = I \times R_{FEEDBACK}$ ， $I = C \times dV_{IN}/dt$

那么：

$$\frac{V_{OUT}}{dV_{IN}/dt} = \frac{R \times C \times dV_{IN}/dt}{dV_{IN}/dt} = RC$$

因此，RC 定义了微分电路的增益。微分器的输出随着频率的增加线性增大，换句话说， V_{OUT} 与 ω 成正比，即 $V_{OUTDeriv} \propto \omega RC$ 。

我们希望 $V_{OUTDeriv}$ 等于 $V_{OUTProportional}$ ，在这里，假设 $V_{OUTProportional}$ 等于 V_{IN} 。那么：

$$\omega RC = 1$$

$$2\pi fRC = 1$$

$$RC = \frac{1}{2\pi f}$$

总之，RC 应该是自然振荡周期的六分之一。本实验中， $T_{oscillation} = 0.6s$ ，我们设置 $RC=0.1s$ ，或者更小一点。如果我们让电容 C 为 0.1 微法，则电阻 R 大约为 1M。电阻应该选可调的。观察电位器转子的位置可以得到它阻值的一个估计值，误差一般不大于 20%；

中间值应该是 500k；如果阻值为 750k 的话，转子应该停在四分之三的位置。微分器的输出进入求和电路，通过挑选电阻使微分的功效等于比例电路的功效。

希望你看到了微分电路的有效性。一旦它在电路中发挥了作用——消除了超调和振荡——增大比例电路的增益，到 10。它还稳定吗？如果不稳定，尝试增大微分电路的增益。过大的微分增益会使电路出现问题吗？从示波器的波形上可以判断微分增益合适与否。如果过少，你将会看到跟只有比例电路一样的过调现象；如果过大，你将会看到在输出电压中有 RC 冲放电式的曲线，慢慢逼近目标值。

开关：反馈电阻上的拨动开关可以使我们容易地引入或断开微分电路。当接到求和电路的电阻比较大的时候（实际上是说微分功能的比例比较小的时候），开关似乎对我们很有帮助。电位器在某些位置上微分电路是否对系统的稳定性有贡献判断起来比较困难，而通过不断地拨动开关观察系统的反应使我们判断起来相对容易一些。

3.2 增加一个积分器

“ I(积分)”能消除残余误差(输入电位器给出的电压与输出电位器给出的电压之间的差)。残余误差在示波器上很难看见,所以增加一个“积分器”所产生的效果跟增加“微分 D”不同,在示波器上看来不太明显。为了满足观察的愿望,使比例电路的增益减小到很低,取 $R_{sum}=100k$,这样当不加入积分电路时,系统就会产生一个较大的残余误差(以便观察)。

如果你是用函数发生器提供阶跃输入，现在就用人工调解电位器代替它。减少示波器的扫描速率以使你能够看到由积分器贡献的、秒级的波形变化。电路如下：

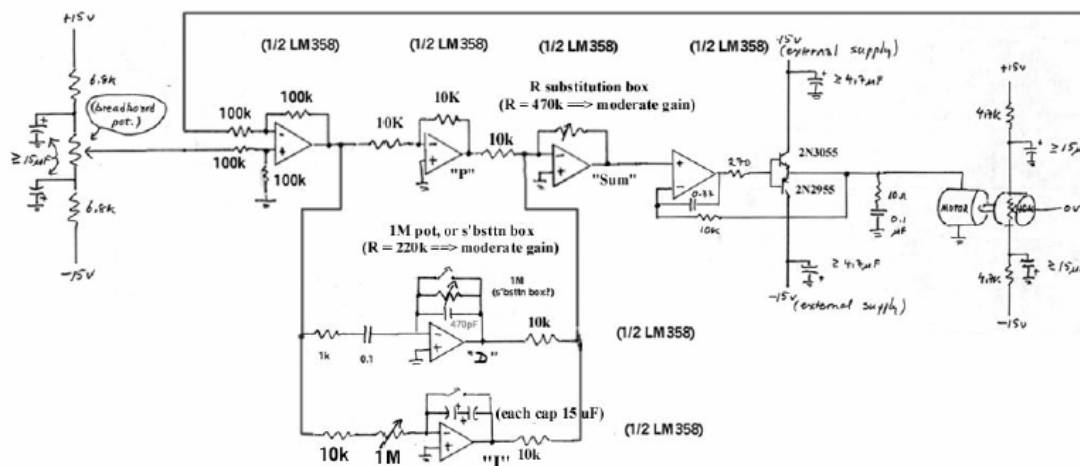


Figure 13: Integral added, to complete the PID loop

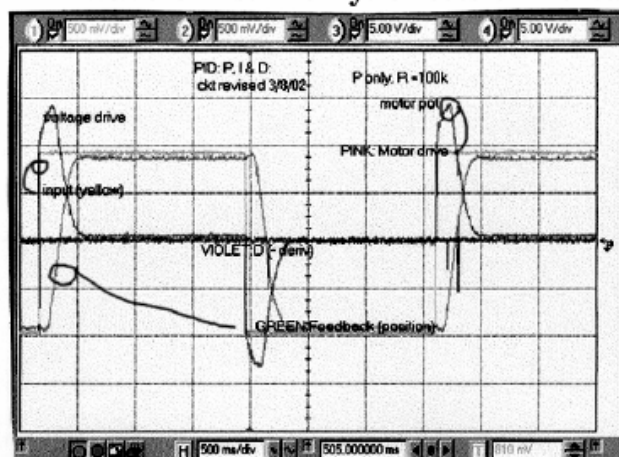
如果你使用数字示波器，在输入电位器作阶跃变化时，你将能够看到输入（“目标”）和输出（“电机电位器”）以及积分器的信号。耐心的观察和调试，你甚至能够看到电机和电位器的“颤动”，即在微小的输入改变下，电机和电位器不会平滑的移动。相反，电机将等到积分器到达某个最小的值之后才会移动。这时，输出电压将会跳到一个新的值，并且等待下一次驱动。本文的末尾将会给出一些在这种影响下示波器的图形。

积分对稳定性的影响 听起来很危险，不是吗？——一个积分器，加上其它电路引起的相移滞后将会危及电路的稳定性。过分增大积分器输出对电路的影响是比较危险的，犹如在

那些你不知道微分器对电路有稳定作用的黑暗岁月里一样,你设计的积分电路同样有可能会带来振荡!但是,尽管事实如此,精心设计的积分器确实能够提高反馈的性能,而且不会导致电路不稳定。

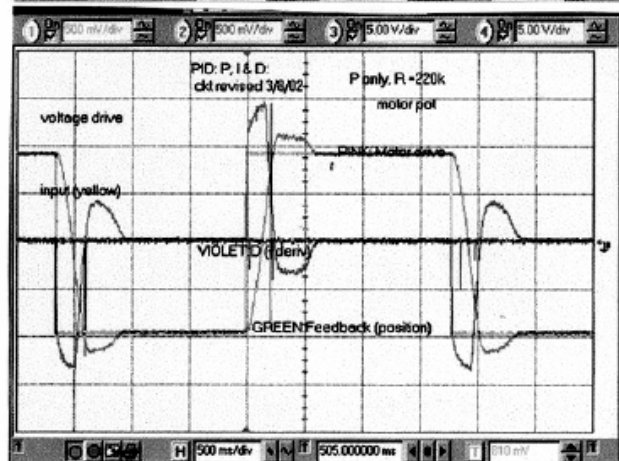
下面是一些实际的实验图,是从示波器上得到的。

PID waveforms: P-only: effects of increasing gain



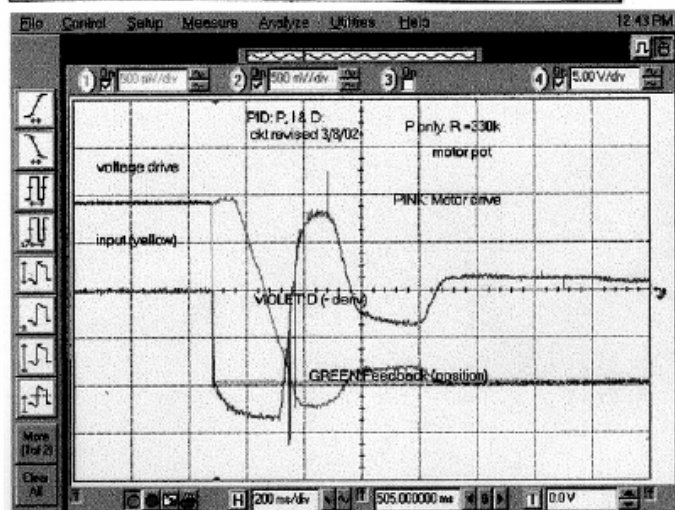
$R_{sum} = 100k$
(modest gain)

Gain setting 1,
of 5 examples.



$R_{sum} = 220k$

Gain setting 2,
of 5 examples.



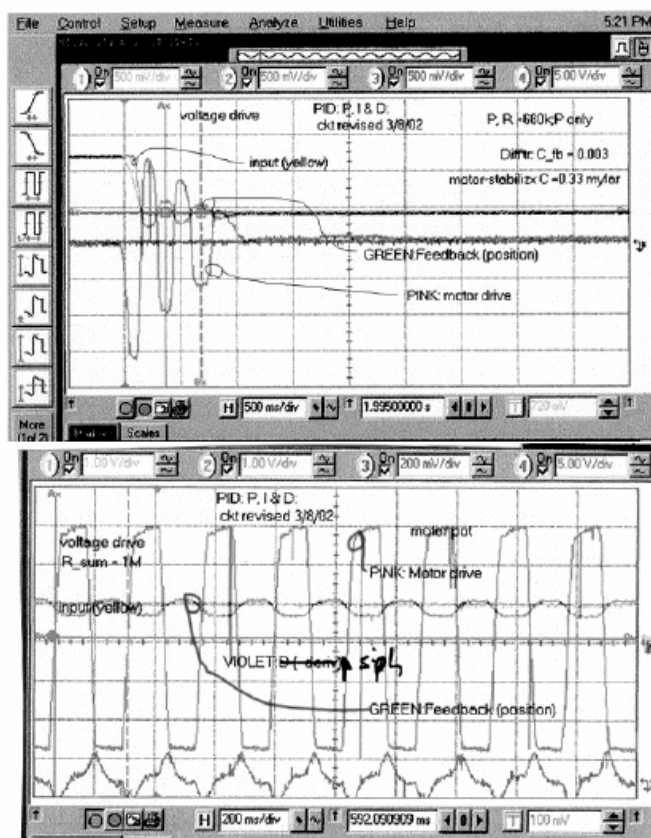
$R_{sum} = 330k$
(higher gain,
but still stable:
a little overshoot)

Gain setting 3,
of 5 examples.

Figure 14: Increasing P-only gain brings increasing overshoot

图 14 在“比例电路 P-Only”中,逐渐增大增益的影响

P-only: effect of increasing gain, cont.



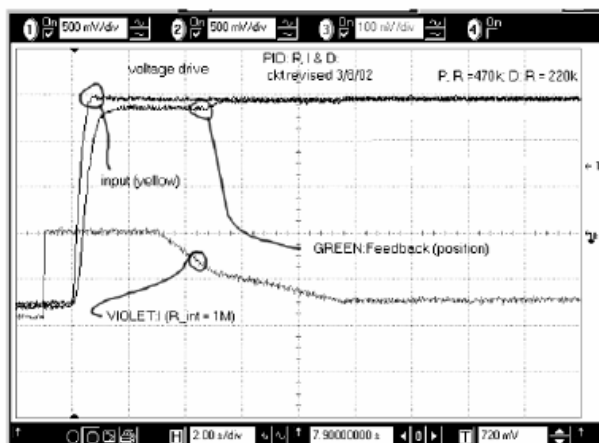
marginally stable:
 $R_{sum} = 680k$

Gain setting 4,
 of 5 examples.

Unstable:
 $R_{sum} = 1M$

Gain setting 5,
 of 5 examples.

Effect of integration term



Effects of "sticktion" visible

图 15 在有“积分器”的情况下，增加“P—Only”的增益，会带来震荡