20200309 在线研讨

Q：老师，我对前馈的概念没特别弄清楚。您的录音中好像提到一个简单电阻分压也可以看成一个前馈，那感觉所有有输入输出的系统，不是反馈的都可以叫做前馈？

A：前馈（feed-forward）相当于一个线性因果系统，箭头是一直往前走的，是线性因果系统，不一定是线性函数，输入物理量（比如一个电压）和输出物理量（一个光功率）可以是任何函数，只要仪器本身的规律允许。而反馈是带圈的，所以feedback control system有时也叫 loop filter。

Q：我之前见有人做一个稳相/调相系统，功能是让两束激光的相位差稳定，而且可以调节几个2pi（对应光晶格的格点移动几个周期）。做出来之后发现当相位从0增加到2pi时，越过2pi这个点的时候反馈系统实际上是尝试把相位拉回到0，这样虽然最后的结果是一样的，但在这一点会猛烈的抖动一下。为了消除这一点，在2pi附近主动地关闭反馈，把系统推到下个0到2pi周期后再打开反馈。这算是一种前馈吗？

A：是的，这种暂时的“主动关闭反馈”很可能是一种前馈，只要“把系统推到下个0到2pi周期”这个暂态过程是通过某一个“手动控制变量”实现的。“手动控制变量”指“我让你到哪里，你就得到哪里”，但是可能有误差，这是前馈的思想。可能有误差（长漂），但是靠谱，不会出大的漏子，这是前馈。

反馈是“我提命令，你去精确地完成”，在工作范围内，精准度比前馈要高；但是如果环境恶劣的话，可能根本完不成任务，谬以千里。

Q: 您刚才说的“是线性因果系统，不一定是线性函数”能否再解释一下？另外，我看很多讲这个的地方，大都在谈论反馈的技巧、思路，前馈讲的比较少。

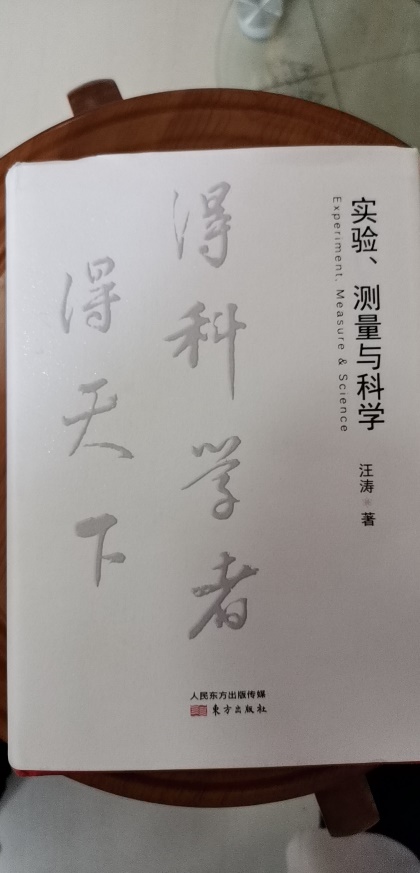
A：我先说一个线性函数的前馈。比如我们要将输入的电压控制信号转化为电流输出信号，可以通过电阻来做：I = U/R。这是一个线性函数的线性因果系统，后者“线性因果”又可以称为“简单因果”，即“有这样的原因一定有这样的结果”，比如一个电阻，有这样的电压，一定会有确定的电流，具体的形式是1/R的线性关系。而二极管是非线性函数的简单因果系统，同样是一定的电压对应一定的电流，在二极管这里就是一个非线性函数了，要去查“I-V曲线”。

Q：有没有既不是前馈也不是反馈的系统呢？

A：我们要明确，反馈和前馈都是实验控制的手段，大都是在实验室里进行的。实验是进行测量、开展科学研究的非常重要的手段。但是它不是唯一的手段，更广泛的概念，是测量。

比如我们去测量天体物理、宇宙学、地球科学的相关信号，测到什么，我们无法规定，甚至无法影响，但是测到的数据对于理解大自然非常有价值。这种情况下，就是单纯的测量，研究，理解，很多时候不一定涉及实验控制，也就无所谓前馈和反馈。

有一本书讲实验、测量与科学，讲得很好，推荐给大家：



在实验控制、工程控制论上面，钱学森先生的《工程控制论》（后来宋健先生参与合著新版）很值得读，比我读过的另一本《Feedback control of dynamical systems》更早，更有力量。钱老的许多论著，我个人读来都收益良多。

大家可能在想，反馈精准度高，那么前馈的好处有哪些？前馈的好处在于：范围大，速度快，鲁棒性好。

反馈的“精准度高”，主要是在相对低频，尤其是在d.c.的场合下才“精准度高”的；在足够高的频率下，任何一个单一的反馈系统，其表现都会一塌糊涂。但是我们大多数应用也都是需要在相对低频足够精准，所以反馈用得很广泛。反馈的精准度高，其实和其“低频”是有联系的，有一个电子学术语叫做“Gain-Bandwidth product”，不知大家听说过没有。对于一个运算放大器（op amp）来讲，这是最重要的性能之一。这是一个定值，所以，在低频时增益就大，在高频时增益就小，足够高频时增益远小于一。

Q：那对于高频率下的控制是不是就只能依赖前馈了，比如μs级脉冲光功率控制这些。

A：高频的控制，一个是可以选择更高速（i.e. 更昂贵）的反馈系统，另一个就是依赖前馈控制（放弃反馈）。

Q：老师好 我个人理解的前馈是不是就是实验者根据实验情况对参量进行直接调整。那如果这样的话鲁棒性体现在哪里呢？一次调整过后我感觉是需要反馈系统来保持系统长期稳定的。

A：想象一个声光调制器，输入射频功率（由电压控制）越大，输出的1级衍射光功率就越大，两者是有一个“对应表”的，如果知道这个对应表，那么我直接把控制电压调到1.234V，就可以得到1mW的输出光功率，而且我可以肯定，减小电压，就会减小光功率，反之增大电压，必然增大光功率。如果是反馈系统，超出了工作范围就可能出错；不超出工作范围，跳得过快，电路还可能振荡。

其实，反馈系统需要的两个东西：一是sensor，一是actuator。这个actuator单独拿出来，就是一个前馈。你想想一个自动控温的炉子（我的同事贾爽老师的实验室有很多很多炉子，专门烧样品），当温度过高或者过低时，拧一下控制加热量的旋钮，这个旋钮和它背后的加热系统，本质上就是一个前馈。

Q：所以这里的“反馈”是实验者来完成的，而不是闭合的电路实现的吧？

A：在我提到的这个例子里，“反馈”是实验者的眼、脑、手来完成的。当然在现代化的炉子系统中，可以通过闭合的电路控制来完成，这样的系统当然会贵一些。

Q：嗯嗯。这对应该就是老师说的前馈的大范围吧。但鲁棒性描述的是系统在外界干扰下仍保持稳定的性质，而一般考虑的干扰就是在设置参量附近的扰动。我一直觉得鲁棒性应该是靠反馈来达成的，不知道想的对不对 ？可能我理解的robust用disturbance rejection来描述更准确。

A：嗯，这个地方可能不同场合的用语不尽相同。我讲的鲁棒性确实偏向大范围一些。对于disturbance rejection意义下的精准度要求，在确定频率范围内，适合通过选择合适的sensor 和 actuator，用反馈来完成。

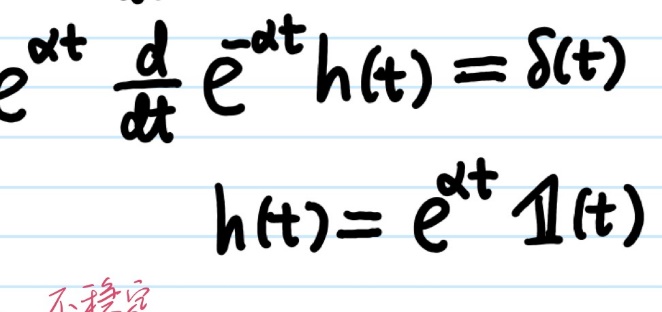
Q：这样就是和反馈相对应的，老师说的大范围就是和前馈相对应，应该是这么理解吧？

A：嗯嗯，大范围、快速，但未必非常精确。就是尽量要用前馈做完任务的大头，再用反馈去作精确的修正。

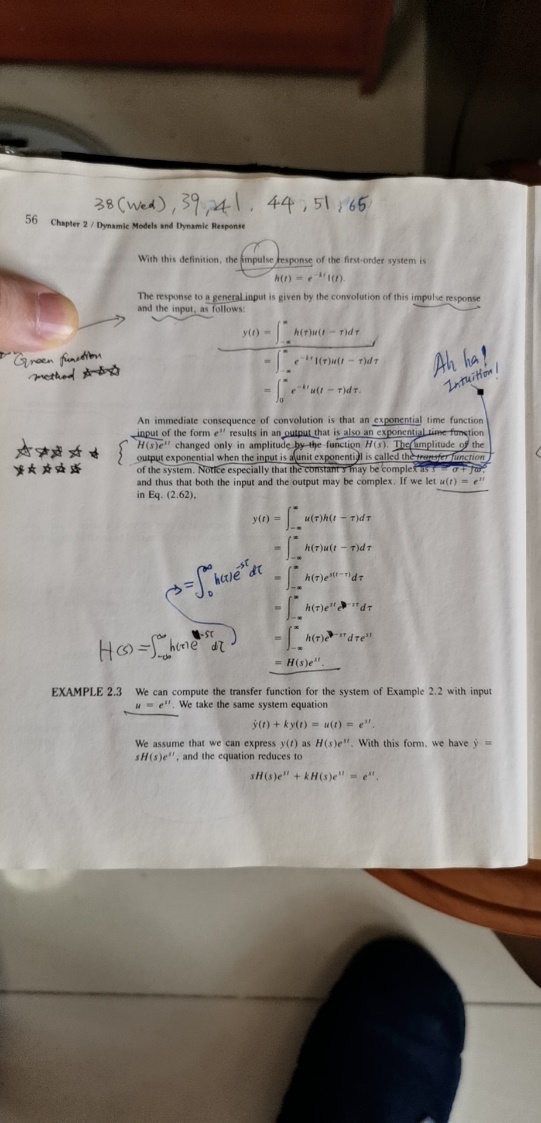
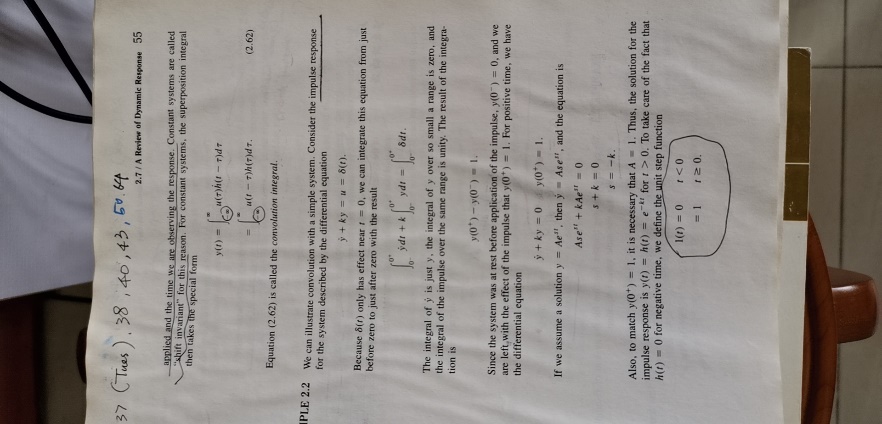
Q：老师，极点不能在右半平面的原因那一部分录音是不是没有讲啊？

A：极点在右半平面时，对应的time-range的信号（时域信号）是指数增长的，所以不稳定；极点在虚轴上时，对应的信号是等幅振荡（i.e.不稳定），仅当在原点时对应一个常数（稳定）。所以，一个稳定系统的极点要么在左半平面（不含虚轴），要么在原点。进一步的你可以查拉普拉斯变换的性质。

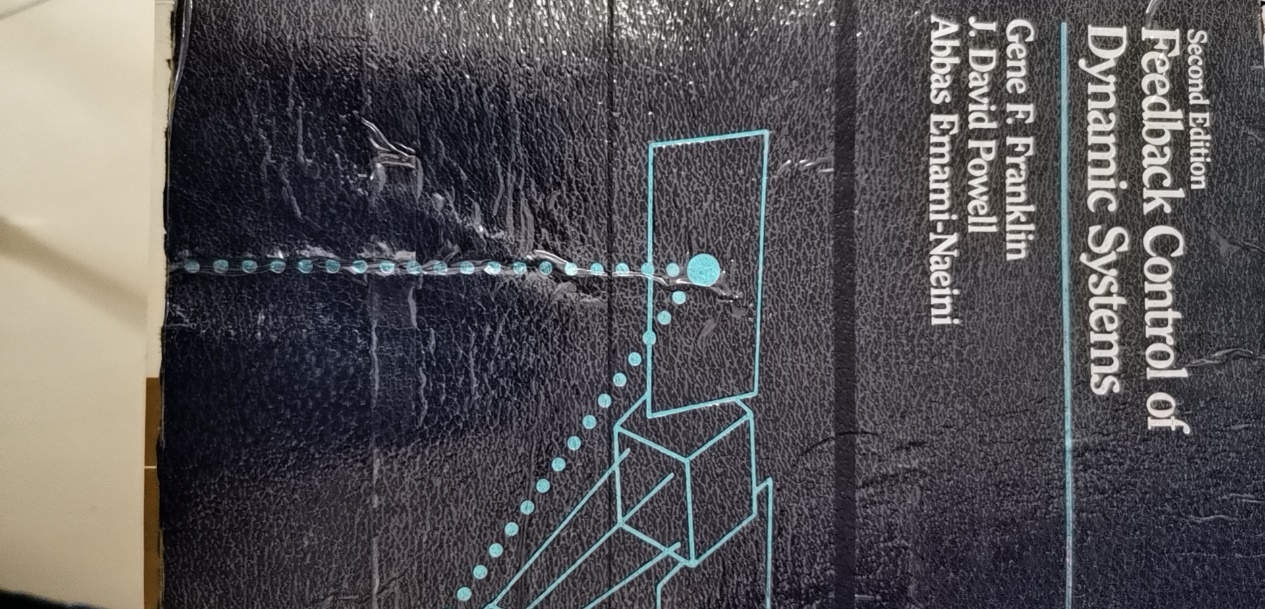
Q：老师，还想问一下这下面一行是什么意思。镂空体的1就是一个常数吗？还有和上面一行什么关系呢。



A：这个h(t)是系统对于delta 函数"kick"的反应。这个镂空体的1是一个阶跃函数，在t<0时为0，t>0时为1，下面这一行，是在解第一行的微分方程呢。



·



可以查这本书（以上的两页）。

Q：我想问一下，能不能说pid feedback只是把低频的noise转化到了gain bandwidth的位置，总的noise并没有变？

A：不能这么说，但可以说是，在noise最多的频率段，使得feedback处理能力最高；在noise很少的频段，处理能力非常差都可以（“管它洪水滔天”）。是处理能力的重新分配，不是noise的重新分配。否则一个普通的外腔半导体激光器（MHz线宽），就不会被多级PID控制转化成一台亚赫兹线宽的超稳激光器了。这个问题很好，我们以后还可以继续讨论。

今天的第四讲和下次的第五讲，合起来会给大家提供一些非常普适的实验控制概念（或者“工程控制”素养），大家可以合起来学习和体会。我在本科期间，是不明白这些概念的，在博士期间也只是做了一些具体项目才有体会，我希望大家比当年的我更早学到这些基础性的思想和方法。