



系统控制漫谈

杂疏：控制论·人（V）控制的蒹葭 —— 开环控制

邹云 南京理工大学

蒹葭苍苍，白露为霜。所谓伊人，在水一方。溯洄从之，道阻且长。溯游从之，宛在水中央。——《蒹葭》。

蒹葭：特定生长周期的荻与芦。蒹：没长穗的荻。葭：初生的芦苇。——百度百科。

我们今天的芦苇，前世都是蒹葭：平民化的身份，也无法篡改其贵族的血统¹。

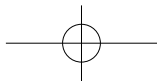
一、反馈不是悔棋、闭环只是亡羊补牢

元芳：教授，最近我在合作研究一类引信控制，可它哪里有控制问题啊？



图1.1 云中散人：开环控制，控制的蒹葭。

¹引自百度文库VIP专享文档2012-08-29：《我眼中的“蒹葭”》来源：http://www.szjiayuan.net:8000/jiayuan/news_show.asp?id=204，作者洪焯。





教授：哦？怎么会？按照相关标准定义，引信是一种控制装置，也是一种控制论装置²。怎么会没有控制问题的？说说看，怎么回事？

元芳：您看哈，比如炮弹定距或者定高爆炸。它是这样控制的：炮弹在飞出身管的一瞬可以测量出它的初速和自转速度。这样，它自转一周飞出的距离是可知的，比如 k 米/周。根据地磁效应，炮弹的旋转周数可以由炮弹在飞行中精确地简易自测量获得。如此，它要在 m 米处爆炸，根据相关弹道方程可知：只需在旋转 N 周时引爆即可。 $N=m/k$ 。

教授：因此，将 m 值设置在待发射的炮弹引信装置参数中，然后将 N 值在炮弹发射出身管时感应补充装在炮弹引信装置参数中就可以了。精确不精确，就看这个 N 的效果如何了。直觉上，这个应该和测量技术最相关。然后，就是开环了。这样，你就不知道控制在哪里。是吗？

元芳：是啊，教授。我是学控制的，他们擅长的引信硬件技术和测量技术不是我的长项。现在，闭环都没有，让我怎么用控制理论和控制技

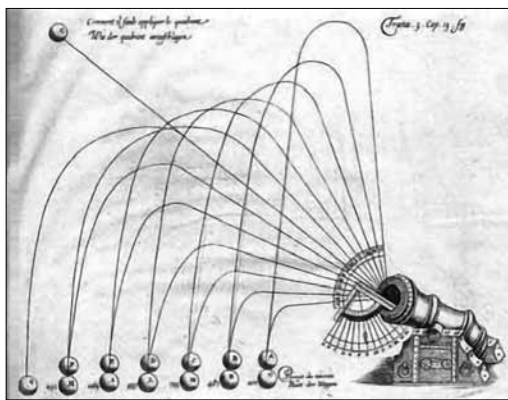


图1.2 炮弹的定高引爆

术与他们合作呢？要求飞行中加上闭环，他们说飞行中的弹丸没有闭环条件。体积和质量约束严格、飞行速度极高、探测能力很低、实时运算处理能力更低。

教授：没有闭环，就没有控制了？没有闭环，也即无需设计反馈。那么反馈是什么呢？是反悔？先前的控制不算，重来？

元芳：不是，是针对当前有关结果的偏差，对控制进行恰当的修正。

教授：那也就是说，已经执行了的，是不能被本次修正举措修正的。每次修正是一次新的开始——亡羊补牢。那么，可不可以说闭环是一连串的开环呢？

元芳：哦，教授，您是说控制的主体是开环？那么连续的在线修正呢？也是这样的么？

教授：某种意义上，也可以这样说。连续的在线修正，就算可以做到没有任何延迟，那也是 t 时刻的修正只能影响 t^+ 的行为，无法影响 t^- 的行为。理论上，依旧是一连串开环。只是在理论上而言它的个数是超穷的，而不像离散系统那样至多是可数无穷的。

元芳：这样的啊。可是，那又怎样呢？没有修正策略，不就是没有控制了嘛。

教授：哦？是么？那么，你认为闭环控制修正的是什么？“控制”么？难道不是对参考输入的一种等效修正？

元芳：等等，教授，我画一下图。闭环是这样的，开环呢，是这样的。哦，是的，教授。然后呢？又怎样了？

教授：开环控制很常见。特别地，如果将闭环内置地固化在受控对象里，形成一个扩展的受控对象 G_c ，那么从外部看这就是一个以 r 来驱动

² 崔占龙，引信发展若干问题，探测与控制学报，30卷2期，1-4页。

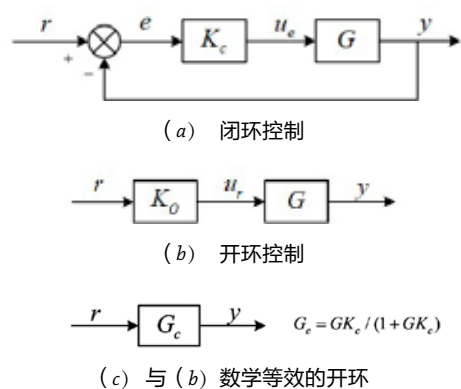


图1.3 闭环与开环控制

的开环控制。这个意义下，可将 r 看作是这个开环的控制指令。闭环的作用就是保证执行这个指令。重要的是：要是 r 不合时宜，闭环能起修正它的作用么？显然不能。那控制效果还能有保障吗？

元芳：嗯，如何设置 r 更加根本。有时，就算 r 设置得看上去很好，但若设置时忽略了受控对象的实际动态响应特性，那么实际执行反馈时就可能发生跟踪失效现象³，效益反而变得很差⁴。就像我小时候我爸妈老拿别人家的孩子让我做参考，但我笨，实在做不到，结果反而伤了根本。最后只好到孝陵卫皇家理工学院⁵就读。哎，原本是可以去隔壁那家福建民办大学的⁶。

教授：元芳，以你的资质能到学院来，还能遇到我这样的教授，那是你祖上烧了高香的。嗯，要是 r 设置得很恰当，开环控制的实际效果能让偏差 e 比较小的话，那么它远比闭环要好：简单还可靠。元芳，你发现了没有：这里， r 本身可以

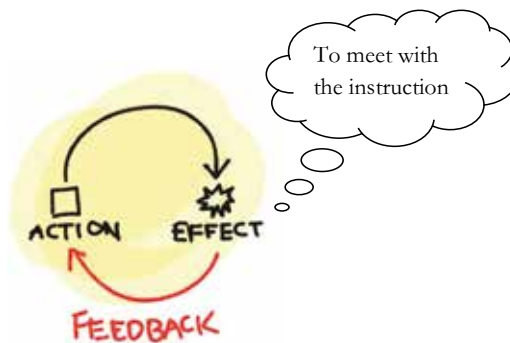


图1.4 系统动态过程的闭环控制只是保障开环指令得到有效执行

作为开环的广义控制，并可根据不同的实际场景对它加以修正优化？

元芳：这个我知道。在提升风能捕获效率的控制问题里，我们就把理论上得到的最理想参考输入的修正作为控制变量了。可是，教授，引信不一样啊！弹丸发射后，啪的一下，很快啊！然后 r 就无法更改了，不恰当也只能不恰当了。这样好吗？这样不好。可引信不讲武德，不给闭环条件，又不耗子尾汁⁷。该怎么办？

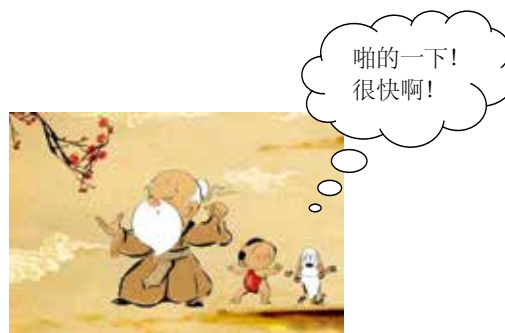


图1.5 这样好吗？这样不好

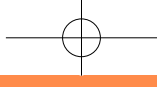
³ 殷明慧，蒯狄正，李群，张小莲，邹云，风机最大功率点跟踪失效现象，中国电机工程学报，2011，30(18):40-47.

⁴ 云中散人，杂疏：控制论·人(IV)：参考输入·约束条件，系统与控制纵横，2020，No.2.

⁵ 指南京理工大学。

⁶ 指东南大学。

⁷ 这里引用了当下年轻人熟悉的浑元形意太极拳掌门人马保国的梗。耗子尾汁，“好自为之”的方音谐音。



教授：元芳，这个梗好吗？不太好。只有喜欢上网的年轻人知道。不知道开环指令 r 怎么设置？那么我问你，你觉得理想的 r 是怎样得到的？实用的 r 又是怎样获得的呢？天上掉下来的？

元芳：当然不是的，教授。无论是机理分析得到的理论结果，还是根据实际情况获得的经验修正，本质而言，都是对既有实践总结的结晶。

教授：具体怎么说？

元芳：试错、反馈、修正、再试错……哦！反馈！教授，我明白了！这也是闭环的结果！开环的本质，是闭环的结晶！是人类对通过大量的经验积累不断修正得到的最为基础的控制方法！

教授：嗯，说得好！开环控制，控制的蒹葭！平民化的身份，也无法篡改其贵族的血统。可是，你不是说那里没有闭环啊？开炮，啪的一下，很快啊！你大意了，没有闪，被击中了。它没有闭环。无法修正。



图1.6 平民化的身份，也无法篡改它贵族的血统

元芳：是啊，修正它的闭环在哪里……？

教授：对于引信而言，装定值设定好了，就没法再变。可是设定怎样的装定值？这很有讲究。如果对开环面临的干扰场景有预先的认知，那么完全可以在简易的探测条件下对场景进行快速的模式识别，紧接着一个开环的 if-then 逻辑操作，预先内置的相应装定值就设定好。然后，whatever，看结果。

元芳：哦。我有点明白了。就是针对典型场景，反复进行试验，确定理想装定值在这个场景下如何进行修正？以获取最优的场景装定值。这个闭环，实际发射时不出现。但它是存在的。它的结果表现为 if-then 逻辑模式下针对典型场景的最佳开环指令。

教授：正确。哦，对了，看了嫦娥五号“打水漂”返回地球、验证载人登月的科普文章了么？我看了眼标题，感觉它与我们的话题有关，但还没仔细看。

元芳：哦，刚看过。说的是登月舱返回地球时，进入大气层时的下降攻角不当会造成灾难性后果：太平，会错过返回窗口，飞向太空；太陡峭，会产生太大的过载，伤害宇航员。

教授：有具体依据么？

元芳：有。文章说载人之前，阿波罗计划做了一系列试验。其中阿波罗 4 号和 6 号做了最坏情况的模拟。6 号采用比较陡峭的角度，它记录的数据是宇航员会在超越极限的过载下挂掉。4 号比较平稳，但在大气层中“打了一次水漂”，产生了一次弹跳，返回过程变成了“二次进入”。

教授：那嫦娥五号和它的关系是什么？

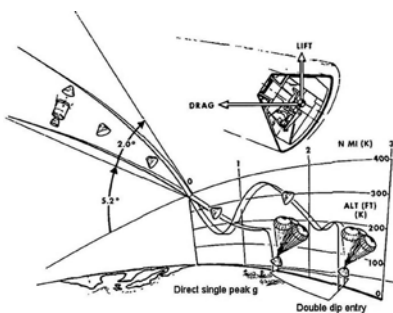
元芳：嫦娥五号对打水漂的效应又做了一次模拟实验，精准地测定了打水漂的操作过程数据。结论表明：这是一种最完美的返回方式，但难度非常高。

教授：难度非常高？那 1969 年创造人类历史的阿波罗 11 号最后采用的是哪一种？它“打水漂”了么？

元芳：是的，文章说当年的阿波罗 11 号是“打了水漂”。宇航员报告说：过载远没有预想的那么严重，感觉很舒适。阿波罗 11 号原计划的降落过程只有一次过载峰值，没有“弹跳”过程的设计。因此，它“打了水漂”是一次意外。起因则是因



为降落地点天气恶劣、临时调整落点。阿波罗飞行计划再没有第二次,更别说“主动打水漂”玩了。阿波罗 11 号运气太好了。

图1.7 阿波罗11号返回地球模拟图⁸图1.8 下降攻角与进入大气层过程⁸

教授：为什么呢？既然很好，干嘛没有引起关注，重点研究一下呢？

元芳：文章分析说 NASA 玩不起啊，教授。登月这活儿太烧钱不说，更是人命关天，当然采取更容易实现的稳妥方案。不过，阿波罗 11 号“打水漂”的现象在历史上不知何故的确没有引起足够的重视。直到 2011 年 NASA 才有人将其定义为“二次进入”，认为这是载人登月飞船最安全的返回方法。

教授：哦，这样啊。那么元芳，你觉得这个下降攻角是控制么？

元芳：当然是控制。不仅是控制，而且还是生死攸关的控制。尽管确保它获得精准执行，应该有个闭环操作系统来支撑，但它本身是开环的。一旦决定执行，就很难再有修正可能。然而，这种开环的控制策略，是在反复的试验中得到的。因此，围绕这一类在线开环控制策略的生成，应该有个离线的闭环决策过程。

教授：非常正确。只是……元芳啊，我们如何称呼这个闭环呢……

元芳：就叫……虚拟闭环吧！我有悟道！回去闭关一下。教授，下次讨论。

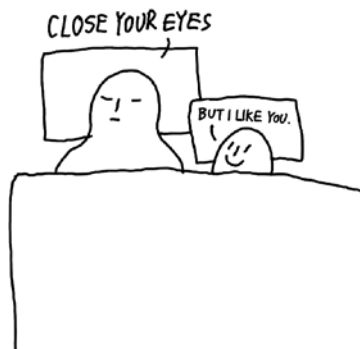


图1.9 就叫它虚拟闭环吧

云中散人：虚拟闭环的提法源自孝陵卫皇家理工学院郭治先生。他是 20 世纪 90 年代末在研究火控系统时提出的。意即利用统计得到的误差，

⁸老粥科普，嫦娥五号“打水漂”返回地球，验证载人登月，阿波罗大多不敢玩
<https://c.m.163.com/news/a/FU08H2IK05329CR2.html?spss=newsapp>



对射击诸元进行了修正⁹。近年来,皇家理工学院引信团队则在装定值修正试验过程中依据工程经验独立地引入了另一种虚拟闭环的提法,它的思想与郭治先生的提法有相通之处,但实际意义与郭治先生的提法有所不同。后文中将对此做进一步诠释。

若追根溯源,类似的思想和方法在实际控制工程中早已有之。即便在现有的控制理论中,离线训练的方法至少在方法论上已经具备了这个要素。只是可能尚未形成一种成体系的关于参考输入或控制指令如何生成、并与具体控制动态过程的响应特性进行一体化协调设计的理论框架和方法。此外,平行控制的思想和方法,从方法论的内涵来看,是应该可以运用在这个问题中的。



图1.10 控制设计不仅仅是闭环控制器

这里的问题或许不在于阐述虚拟闭环的思想和方法,它的要点在于:开环控制是控制的硬核内容。不仅在实际问题中常常不可避免,而且它的难度和对理论与方法的需求非常高。应该说:目前的控制理论对开环控制的设计方法的关注

度与开环控制的实际需求之间,存在着比较大的Gap,亟待重视与克服。显然,有三点是非常清楚的:

(1) 系统动态过程闭环控制通常只是保障控制指令得到有效的执行,属于控制的支撑部分。它对控制指令的偏差没有修正作用。

(2) 控制指令是指导执行环节控制执行的方略,是控制系统设计不可或缺的主导环节。往往是离线训练的结果,在线开环执行。

(3) 许多情况下,控制指令的设置本身是一种开环控制,它必须兼顾具体受控对象本身的动态响应特性,才可能获得满意的控制效益。

可以说,在工程可行范畴内,受控对象动态特性的改善是控制系统设计的重要解锁环节,在控制的原教旨意义下,是一种经典的开环控制。

一句话:受控对象动态特性恰当改善、控制指令巧妙生成和针对受控对象执行控制指令的闭环控制合理构建,构成了完整的控制系统设计。对任何一个环节有失偏颇,都将严重损害控制科学与工程的整体性和实用性。

二、虚拟闭环:控制不可或缺的一环

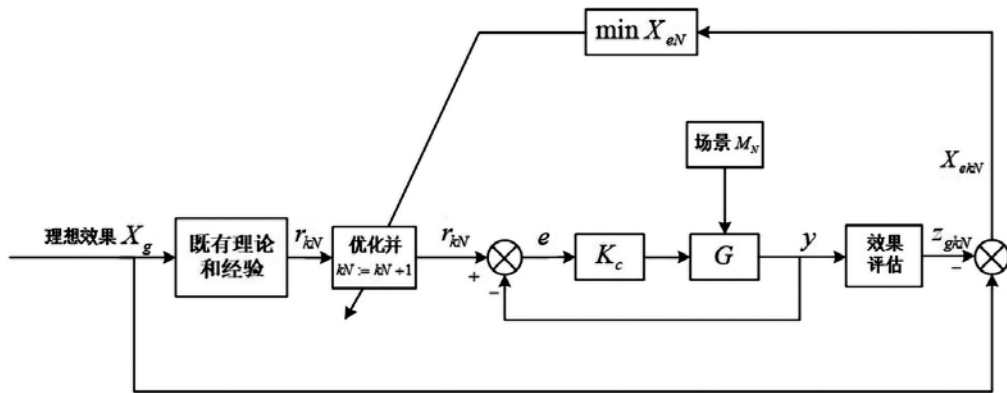
教授:元芳,闭关结束了?有什么收获?

元芳:教授,我给你看一张图。虚拟闭环机理图。嘿嘿。

教授:嗯,那个斜向的调节箭头所在的优化反馈环路就是虚拟闭环吗?我怎么看不出它的虚拟性来呢?看上去倒像是个实在的反馈。

元芳:教授,嗯,这个图广义地说,整体并不是虚拟的,当然也不是系统的实际运行框图。它是描述通过反复试验,针对实际场景 M_N 对理想控制指令 r_0 进行优化修正的过程的实际试验环节。

⁹ 火控系统通过探测信息预测未来点控制火炮射击,但经常不是一有未来点就射击而是要平稳跟踪一段时间,在此时间流逝过程中,一个个未来时刻变成了现在时刻,而现在时刻是有测量值的,未来点构成的预测航路与现在点构成的实测航路的误差反馈给火控解算构成并无实弹校正的虚拟闭环校射,以提高射击精度。



$N = 1, 2, \dots, M$. k 为试验轮次. X_{eN} 为 N 场景下效果偏差的目标函数.

图2.1 动态虚拟闭环/实际试验环节



图2.2 反复试验修正

教授：哦，也就是狭义来说，系统的实在过程是从 r 到 y 的环节。这个环节也可以是开环，也可以有一个闭环支撑系统使得 r 获得精准执行。而从系统运行的实际动态运行角度看：由实际评估效果偏差 X_{ekV} 通过极小化 M_N 场景评估效果偏差的方式得到对 r 的优化修正这个环节是虚拟的，并不出现在实际系统动态中。或许，可以称之为“虚拟闭环部分”？

元芳：是的。因此，一般而言：数学上，这是一个典型的离散-连续系统。系统动态过程是一个完整的连续过程。虚拟闭环部分是离散的，试验次数是离散变量 k 。每次系统结束运行对运行

结果进行效果评估后，才进行下一次虚拟的优化反馈修正。

教授：哦？这样啊。有道理。但这样的虚拟闭环加上以后，经典的闭环设计理论能够直接使用么？若可以，则理论上没有新的东西啊。

元芳：这个问题我考虑过。虚拟闭环部分与经典反馈控制设计问题不太一样。由于这个虚拟闭环部分优化的对象是参考输入 r ，一般不会影响实际系统动态的稳定性（如线性系统情形），即使影响，也是如何进一步联动设计最优的或恰当的内环控制器反馈 K_c 或开环控制器 K_o 的问题。因此，它与系统稳定性并无直接关联。它也可以使用稳定控制的闭环设计方法，但总体上是优化问题。当然，稳定控制问题本质上也是一种优化。



图2.3 系统动态过程的稳定运行



教授：的确是这样。它可以是一个不考虑系统稳定性的纯粹优化问题。探索的是 r 对 X_{eN} 的影响机理 $X_{eN} = I(r)$ ，以及从 $\min X_{eN}$ 获得恰当的 r^* ？而且是个离散 - 连续动态约束、很可能表征为重复系统特征的优化问题。这些特点，在具体工程里，从试验过程和干扰场景的数学建模、控制指令对效果偏差的影响机理以及对传统试验数据的发掘分析等方面提出了新的挑战，并在数学上出现了相对不太常见类型的优化算法的进一步探索问题。

元芳：是的，教授。

教授：考虑到目前许多工程领域里，很多控制指令，主要依靠大量的经验积累通过反复试验试错、或者进行遍历方法来获得最佳设定的，存在很大的提升空间。因此如何进一步提高海量试验数据的挖掘效率？如何进一步压缩试验成本和试验周期都是对控制理论提出的很有意义的挑战。或许，虚拟闭环技术可以提供有效的解决思路。闭关悟道效果不错，这学期的控制论免试了！

元芳：又来了，教授。那门课都是前年考过的了。

云中散人：开环不是没有用武之地。相反，实际工程中开环在大量地被使用，而且具有决定性的作用。许多时候，我们并不是不想用闭环，



图2.4 开环地发出投篮指令，闭环地完成投篮动作

而是实施闭环需要的条件不具备、太昂贵或者达成太困难，因而无法使用闭环。比如篮球比赛，何时传球？何时投篮？采用怎样的投篮方式？都是决胜的关键。但它们都是开环的，因为一旦决定动作就再无修正机会。

当然，球在飞行过程中获得球员的修正是规则允许的，比如空中接力式样的投篮，但在实际情形里一般无法实现。因此，要获得反馈，也只有赛后总结会上复盘了。有趣的是，尽管人体完成这些将球出手的动作时，其动态过程是闭环的，但这个闭环只是保证控制指令（具体动作的决策）在强对抗的各种场景下获得尽可能准确的执行。它无法补偿控制指令的偏差。



图2.5 开环控制的学问很大

因此，离线的训练，主要针对的是支撑性的技术动作。至于场上的球感、出手时机的判断与把握以及对手不同时应对策略的调整都是在长期的比赛中反复试错后总结获得的。后者大多是一个相对于赛场连续比赛时间、慢时间尺度上的离散虚拟闭环过程。

三、经典控制理论：进一步思考

元芳：教授，您能帮助我将这几次讨论的主线厘清一下么？我总感觉每件事似乎都清楚了，可放在一起还是有点乱啊。

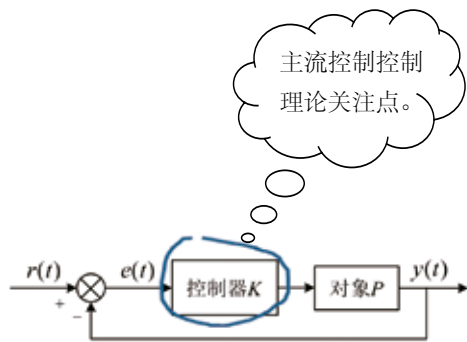


图3.1 主流控制理论关注的重点

教授：好吧。我们还是从目前在设计理论中具有压倒份量的闭环稳定控制说起吧。当前，主流控制理论的关注点集中在闭环控制的各种设计方法以及相关的设计指标。有两点是相对被忽略了的。

元芳：您是说参考输入或者控制指令 r 和受控对象 P ？

教授：是的。参考输入如何生成？具备怎样特性的对象更好控制？至少不是主流控制理论关注的热点。相反，这是具体的控制工程领域关注的要素。

元芳：这个我知道。以电力系统控制工程为例，他们研究的热点，是在工程允许的范畴里、恰当调整受控对象的运行模式和运行结构参数，或调整更加符合实际的系统参考输入 r ，使得系统在给定的闭环控制器 K 下取得更好的控制效益。

教授：的确如此。在那里，闭环控制器设计不是他们的重点，也不是他们的长项。他们主要是拿来主义。不论什么控制器，成熟、可靠是第一要素。因此工业应用至今仍旧大量使用 PID 控

制。任何意义上说，工业和工程控制领域人士都是做控制的。他们自己也说他们做的是控制，但通常并不会将主要注意力放在创新闭环控制器的设计理论和方法上。

元芳：教授，您还说。师兄听您的话，做深入电力工程实际中萃取的科学问题研究，结果是学位论文的盲审又一次被差评，还不能答辩。说论文做的 MPPT 控制¹⁰ 设计里“没有控制”，不是控制论文，特别是还“没有理论分析”。发的电气工程 1 区刊物论文都被视而不见。可是复杂的数学模型难以建立，建立了也难以进行严格的数学分析证明。而简易数学模型下的数学分析根本不切合实际，也不被电力工程领域接受。更糟糕的是采用电力工程领域的理论分析方法：物理机理分析+专业模拟仿真平台实验数据遍历分析，在控制理论领域里被许多人认为是“没有理论分析”。限于学位授予规定，我们又没法申请电气工程学科的学位。教授，我怎么毕业啊？ 55555……



图3.2 再这样下去我就要肄业了…

¹⁰ Maximal Power Point Tracking的缩写。亦即最大功率点跟踪控制。这种控制是风电领域最负盛名的控制策略之一。它的设计要点不是跟踪控制器，而是调整被跟踪的忽略了风机动态响应特性而得到的理想最大功率点，使之能够更加符合风机运行实际，捕获更多的风能。那里，跟踪控制器的设计方法并非创新的重点。通常，它是直接采用控制理论的成熟设计方法或者是直接应用控制理论的最新研究成果。

教授：好了，元芳。这只是暂时的。况且也是你师兄没有把问题说透。学科领域之间的交叉是一个需要长时间磨合的过程，不会一蹴而就。要有耐心，要把问题真正弄懂说清楚，让外行都能明了。做到了这一点，你还毕不了业，我辞去教授，和你一起自谋职业去。爱因斯坦说过……

元芳：切，教授，又要老生常谈了。爱因斯坦说过：如果你不能简单说清楚，就是你还没有完全明白¹¹。您这么大岁数了，百无一用的老秀才，辞职，还自谋职业，谁要您啊？我毕不了业就够惨，送盒饭之余，还要照料您老人家。得了，您老饶了我吧。

教授：有这么和老人家说话的么？总体而言，我们讨论的，就是将控制指令的生成和将受控对象的总体设计引入控制理论的研究范畴。以虚拟闭环的方式，拓展开环控制理论和方法的内涵与手段。

元芳：嗯，教授。我有点清楚了。我们现在谈论的是控制指令的生成理论和方法。关于受控对象，以前讨论过很多的。师姐的博士学位论文做的就是这个。

教授：是啊，元芳。还记得我为你师姐的博士学位论文破天荒地写了篇序，诠释论文的选题“怎样的受控对象更好控制”？她就是试图探索受控对象的特性与控制器设计之间的关系和影响机理。

元芳：记得啊。导师给学生的学位论文写序，那可是很另类的。后来，还在《系统与amp;控制纵横》上发了一篇“怎样的柿子

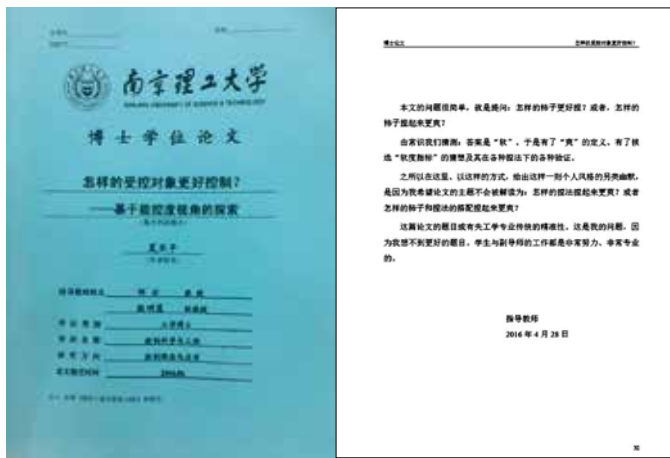


图3.3 指导教师为学生学位论文作的序

更好捏”的科普做进一步诠释来着¹²。“好捏”是什么意思？如何度量这个“好”？找到的度量是否满足要求？是这个课题的研究重点吧。

教授：那你应该还记得问题的背景和具体解决方案吧？

元芳：是的。经典控制理论框架都是受控对象是给定的，然后针对这个对象寻找恰当的闭环控制使得系统满足工程实际提出的控制要求。但如果受控对象特性很差，控制效果就会很差。有时对象结构参数稍作调整，就能获得很大的控制效益。但是负责总体设计的工程师不同意调整，因为任何调整的牵涉面都是巨大的。涉及不同学科不同领域不同性能要求，尤其是安全可靠性能要求。按规程，论证过程得重来一遍。因此，他们说：如果不能控，我们重新设计。否则，不能改动。

教授：是啊。历史上受控对象不能控，而导致总体设计被推倒重来的情形还真发生过，事关美军的新式战机¹³。参与总体设计是一件性质很不同的工作。总体设计工程师是不会考虑控制工程师从某个具体控制器设计的具

¹¹ If you can't explain it simply, you don't understand it well enough. Albert Einstein.

¹² 云中散人，捏柿子：“更好控制的对象”与“控制系统一体化设计”，系统与amp;控制纵横，2017，No.1.

¹³ 邹云，夏亚平，殷明慧，蔡晨晓. 怎样的受控对象更好控制——一个基于能控度的分析与猜想. 中国科学：信息科学，2017，47(1)：47-57.



体需求，去要求更改或调整总体设计要求的。除非控制工程师可以明确要求受控对象满足与具体控制器设计无关的开环性能指标，控制工程师参与总体设计才成为可能。

元芳：师姐的论文就是猜想“能控度高的受控对象相对容易控制”，也即采用同样的控制器设计方法的前提下，能控度高的线性化系统，控制达到的性能指标相对较好且控制增益相对较小。

教授：是啊，这就是你成绩这么差，为师为何还招你入师门的机理所在啊。你成绩虽然差，但你灵活、反应快，还做事迅捷：不用反复叮嘱或监督，就能较高质量地理解导师意图并看似轻松地将其实现。这就是能控度高。招博士生，就得这样的。当然，你的本科再用功一点，成绩要是再高一点，基础再学扎实一点就更好了。

元芳：教授，您这是夸我吗？我成绩有那么差吗？不就是我大意了，没有闪，结果被意想不到的题目偷袭了嘛。



图3.4 我有那么差吗？

教授：受招收学生的做法启迪，还有一类指标：受控对象的信息熵，也可作为系统更好控制的度量。极有可能，信息熵越小的系统越好控制。你看你师妹，人没有你聪明，但和她说什么，说一遍就可以了。她理解后说出来的，就是我要和她说的。信息经过她，几乎没有损失。可惜，没有人愿意做。都说熵太吓人了。要不，元芳……

元芳：别！教授。我现在就参考输入或者控制指令优化设计，虚拟闭环我还没有搭建出来呢，

可别把熵塞进来。您不是说我基础差吗？我承认！我真的承认！

教授：人贵有自知之明啊！孺子可教，孺子可教。

元芳：……

教授：现在，讨论了这么多，你能试着思考和定义一下“控制”和“开环控制”的内涵么？

元芳：哦，我觉得所谓控制是一种有目的地影响系统行为的举措。若它具有这样的特征：这种举措一旦执行，则在随后阶段的系统动态过程中再无在线修正的机会或可能，则它就是开环控制。否则，就是闭环控制。

教授：很好，和我的看法一样。那么照此看来，你认为选择更好的受控对象结构参数、工艺参数和运行模式，就如同国家篮球队队员的挑选及其个人能力素质的提高改进，是一种对象参数优化？还是一种开环控制？

元芳：这要看这种选择的目的是什么？若是 有目的地影响系统的受控行为，使之达到我们期待的行为特性或目标的，就是控制。这类控制设计涉及对象结构参数、工艺参数或运行模式的确定，因此一经选定，即便是基于安全可靠的考虑，也不会轻易再变动或持续频繁地调整。因此，它通常是开环控制，至少是 if-then 类型的事件触发



图3.5 完整的控制

型的阶段性开环，如前后掠角可变翼飞机。

教授：好！这样，我们就把整个控制设计分成了相互关联的三大部分：受控对象的控制性设计、系统控制指令设计和系统动态过程的闭环控制系统设计。其相互之间的关系通常会：控制指令决胜、闭环系统支撑、对象品质筑基。

元芳：控制指令决胜、闭环控制支撑、对象品质筑基。对啊！应该是这样。这样才构成一个完整的控制设计视角。还有一个问题：教授，基于 if-then 模式的多场景在线匹配开环控制方式，与在线闭环控制方式的区别是什么？

教授：很好的问题。基于 if-then 模式的多场景在线匹配开环控制方式，需要对具体的受控对象和系统运行环境场景有着深刻的理解，合理可行的分类，精准的特征提取、准确快速的模式匹配和基于大量试验的虚拟闭环分析，才有可能实现。元芳，你觉得这意味着什么？

元芳：哦，教授。这就是说，要立足于具体



图3.6 If-then模式的在线匹配开环控制，意味着什么？

工程系统。相当于将如何研究设计“超级聪明的自主大脑”的难题，转化为对具体控制工程问题的深刻认知和巧妙处理。这些问题包括对系统运行环境内在特性和独特品质的认知与利用。一瞬辉煌在场上，十年功夫在场下！虚拟闭环，无名英雄。

教授：哦！好一个场上一分钟，场下十年功！

元芳，你可以出师了！

元芳：就是说我可以直接拿学位了？

教授：做梦呐？回去好好搭建你的引信虚拟闭环框架去！

元芳：……

云中散人：开环控制不仅很常见，也非常重要。许多时候，系统并不具备实施闭环控制的基础条件。这种无法设计闭环的情形，在生成控制指令和解锁系统受到的物理结构制约等情景里尤其常见。前者，控制指令一旦生成，通常不宜再行经常变动，朝令夕改一般而言是个大忌。后者，受控对象的结构参数、工艺参数和运作模式的变更，也不可能随时随地不断再变更，否则结构安全性和系统可靠运行都将面临重大挑战。

开环，总是虚拟闭环的结晶。它本质是闭环



图3.7 元芳：场上一分钟，场下十年功，我恨教授



的，却是开环执行的。开环，也是最早的反馈控制的原始体现：对既往经验的总结获得的在特定场景下“以不变应万变”的执行策略。

有目的地从外部影响系统行为的举措即控制，根据在线偏差实时修正系统行为的纠偏机制缺位的控制就是开环控制。开环控制是控制的蒹葭，理应引起控制理论界的高度重视。



图3.8 有目的地从外部影响系统行为的举措即控制



【作者简介】邹云，1962年生。南京理工大学教授、博士生导师。1983年于西北大学数学系获理学学士学位，1990年于南京理工大学动力工程学院获工学博士学位。现为中国自动化学会名誉理事，江苏电气工程学会常务理事，美国《数学评论》评论员，美国国家数学学会终身会员。近期研究兴趣为：对象结构-控制器一体化设计，智能电网运行与控制等。