

# 系统控制漫谈

## 控制与人生（上篇）

施凌 香港科技大学

### 施凌《控制与人生》·序

记得散人有一次在《控制论》课堂说：“任何课程，各位都有可能觉得自己缺乏对应的专业工程背景，唯独控制专业的课程不可能缺乏。除非你不是人。”结果严重伤害了一位来自数学专业的博士生，其课后忿然电邮抗议：作为一名教书育人的资深教授，你怎么能在课堂上公然侮辱人格？！

哦，疏忽了。忘了说惯常点睛的结束句：不曾食人间烟火，还能活到现在，必定是仙了。

是啊，能活到攻读博士学位的年龄，必定会是生物控制工程大师：在周边复杂的人际与自然环境里持续遭遇各种挑战，仍得以自理自立、交流协作博弈各方、发展自身到如今。具备如此深厚的控制工程背景，学习控制专业时还能说自己没有相关工程背景、不懂控制原理？

可以说：任何一位控制科学的博士，如果不能从满是数学的控制理论中回归人生，是没有资格说自己是控制专业的；如果不能从人生的历练中体悟出控制科学的精髓，并用之指导自己的人生事务，是应该向母校退还博士学位的。

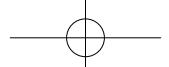
维纳说控制论是一门关乎在动物和机器中通信与控制的科学。这位神童自6岁起便产生了以机器实现动物智能行为的设想，后创立数学多个分支，成为莱布尼茨以来唯一集百科全书式学问家和大数学家身份于一身的天才大师。正是在他的早慧设想和超人智慧的驱动下，《控制论》问世了，控制科学创立了。近百年后，人工智能几经沉浮兜兜转转，最终还是回到了《控制论》绘制的具身智能的系统框架。

具身智能，某种意义上说，就是从人的自身行为起步，探索人的思维奥秘。在众所周知的冯诺依曼计算机框架中，很长时间里不为人知的是维纳做出的奠基性工作。而这些工作正是具身智能思想的一个经典实践。控制与人生：Control @ Life & Life @ Control是作为控制学人的我们不可缺失的专享思维方式。

认识施凌教授很多年了。最早知道他是因为他在圈内的才气：对控制的精妙理解与生动诠释。那时，散人才与鼎鼎大名的控制学才子丘立相识。他们对现代控制理论的研究工作有着一个共同的特点：完美的数学语言里，透着的是控制经典理论的美。将学问做成对经典的寻根、对美学的追求。在散人看来：这是一种纯粹，一种意境，一种以数学符号写就的萦绕在那年柏拉图学园的天空中的诗与远方。

很高兴有机会为施凌教授的《控制与人生》写序：德必有邻，吾道不孤。本文篇幅较长，本期将先行刊发其上篇，下篇精彩内容将于下期续载，敬请关注。期待施凌教授同意将更多的作品授权本刊发表。同时期待未来能有机会为丘立教授的作品在本刊写序。

——云中散人



## 控制与人生：序

施弟：姐，你还记得我们最后一篇公众号文章是什么时候写的吗？

施姐：啥？

施弟：我思故我在啊。

施姐做沉思状。许久，慢慢抬起头：我不记得了。

施弟：曾记否，我们更新的速度从一周一篇（2015），到两周一篇（2016），再到几个月一篇（2017）。现在2018就快过去了，咱啥也没写，我替你觉得非常不好意思，要不你写一篇？

施姐：真是一个娘生的！我和你的想法一样耶！

施弟：啥想法？

施姐：我替你觉得非常不好意思。

施弟：……

言归正传。近来（毕业季、申请季）很多学生过来和我探讨学术问题，顺便问问对于未来求学、工作以及人生方面的建议。我一般不愿就此话题与他人讨论，其一、每个人的生活都要自己去过，路要自己去走；其二、我自己还有很多方面没捋顺呢，常常琢磨好多事情，为其所烦恼。孔夫子说：“三十而立，四十而不惑，五十而知天命，六十而耳顺。”我还没到四十，“惑多惑少”总归有一些，也在情理之中。即便到了四十，我也没信心突然不惑而大彻大悟。

但是，每次看到小我许多的年轻学生过来请教，我还是很乐意和他们分享一些观点。能不能帮到他们我没有太多话语权，至少对他们没什么害处，这一点我还是很有把握的，毕竟这么多年来给我写感谢信的学生不少，扔西红柿、鸡蛋、砖头的到目前为止一个没有。当然，没有也说明不了什么问题，或许是人家涵养比较高。

和我聊天的学生都知道，一般我的开场白是这样的：“你有权保持沉默，但你说的每句话都将成为呈堂证供。”……不好意思，TVB剧看多了，间歇性短路。

施姐：NG！重来！

和我聊天的学生都知道，一般我的开场白是这样的：“以下我说的一切都是基于我个人的经历，对你可能有帮助，也可能没有什么帮助，甚至还有可能帮倒忙，比如把一个有巨佳创业潜质的人推到了僧多粥少、贫困潦倒、前途未了的博士求学路上，下一个DJI就这样毁在我手上了；又比如把一个绝顶聪明、一心专注研究的高材生推到了僧多粥少、贫困潦倒、前途未了的创业之路上，下一个爱因斯坦就这样毁在我手上了。我建议你多和一些师兄、师姐以及年长的老师聊聊，看看他们有什么建议，然后再结合自身——毕竟你最清楚自己——最终找到一条适合自己发展的路。”

施姐：你八股文看多了吧？官话！套话！就这样吧，没钱重拍了。

下面的对话比较长，我分成上下篇连载吧，分别是规划篇和能力篇，每篇分三小节。阅读对象为高中生、大学生、低年级研究生以及一切不懂控制理论的读者，敬请关注。

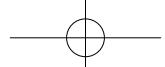
施姐：我滴乖乖，二三得六，六年不愁！

施弟：还有一个尾声呢，七年不愁。

## 控制与人生：上篇—规划篇

### 一、动态规划

序里未提及为什么标题叫“控制与人生”，这个和我做的研究有关，我本科和博士专业就是自动控制与动态系统。很多控制领域的想法，从哲学的角度来看，适用于各行各业，也包括我们人生的规划和平日的学习。本篇先谈谈利用控制的一些基本核心思想如何进行规划。今天我们聊聊



动态规划 (Dynamic Programming)。

动态规划是最优控制里面的一个核心思想，其本质是逆序求最优解。我们先来看一个简单的例子。

例一：三个海盗截获了 100 颗一模一样的钻石，分配规则如下：

1. 随机抽签得到一个先后顺序，假定为 A、B、C。

2. 小 A 先提出一个分配方案，比如铁公鸡型“我 100 颗，你们俩鸭蛋！”又比如大公无私型“钱财如粪土，我不感兴趣，你们一人 50 颗吧。”如果他的方案得不到半数(包括他自己)或以上通过，他就要被扔到海里喂鲨鱼，然后小 B 继续提出他的方案。如果小 B 的方案得不到剩下一半或以上

的通过，他也要被扔到海里喂鲨鱼。

基于以上规则，请问小 A 的最优方案是什么？我们这里排除任何道德因素，假定三个海盗都绝顶聪明，都想最大化自己的收益。

答案非常简单，用动态规划思想，逆序求解。我们假定只剩下小 C，那么他自动获得 100 颗钻石。

现在我们后退一步，假定只剩下小 B 和小 C (小 A 由于他提的分配方案得到 B 和 C 的一致否定而被丢到大海里啦)。这时小 B 漏出一脸邪恶的笑容：“嘿，我 100 颗，你鸭蛋一个！”这个方案最优，因为剩下仅仅两人，小 B 自己的票数已经保证方案通过。

小 C 独自望洋兴叹：“哎，A 啊，我多么地后悔，为啥刚刚不同意你呢？还不是因为你太贪了，想独占。”小 A 听到小 C 的哭声，过去拍拍他的肩膀。小 C 吓了一跳，“你是人是鬼？你不是已经在鲨鱼肚子里面了吗？”

小 A：“你痴线啊？[请用广东话读] 这不还在假定推理阶段嘛。这样吧，我拿 99 颗，你 1 颗，小 B 鸭蛋，如何？”小 C 很不甘心：“凭什么我 1 颗，你 99 颗？信不信我投你否决票？”小 A 笑而不语。小 C 快速脑补了一下只剩小 B 和自己的场景，然后咬牙切齿、内心万头神兽奔腾而过地表示紧密团结在小 A 身边，完全赞成小 A 的决定。

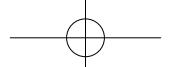
例子讲完，这个和我们人生的规划有何关系呢？关系可大了。

施姐：有点意思。为什么那三个海盗要这样分配呢？后面两个每个 50 颗不就好了吗？第一个也不会得逞啊？而且相比第一个提出的方案后面两个都得到更多啊。搞不懂。

施弟：……

例二：小 A 想在一年后推出一款扫地机器人产品。为了达到这个目标，第 11 个月时，最终产品雏形必须完成，因为调试修改至少需要一个月





时间。为了达到第11个月的目标，第10个月时，产品设计方案必须完成，因为从设计到生产至少需要一个月的时间。为了达到第10个月的目标，第九个月时，机械、控制、图形界面、嵌入式系统开发等重要的部分设计必须完成，因为各部分子系统整合至少需要一个月的时间……以此类推，小A发现，第一个月必须完成产品规格、性能、初步技术路线的调研，确定思路。

例三：小B刚刚开始读博士，初步目标是在四年内至少发表一篇顶级杂志文章。他想了一下，一般文章从投稿到被接收少则半年，多则几年，平均也要一年多，那么至少在第三年的时候文章必须要投出去。写一篇好文章至少一年时间，那么第二年就要开始酝酿、推导、写作。哎，妈呀，就一年时间读书打基础、学做研究了。赶紧干活去！少壮不努力，老大徒伤悲啊！

施姐：有点意思。一般我们定计划好像都是顺着时间定，小学怎么样，到了中学又怎么样，大学怎么样，诸如此类。这个逆序求解还挺好玩。对了，刚刚两个例子里面的小A和小B是那两个海盗吗？他们为什么不打打杀杀而去搞机器人和读博士了？

施弟：……

简而言之，动态规划的核心思想是确定一个优化目标，然后反向迭代，进而确定当下每一刻的最优选择和行动。

方法介绍了，也比较容易懂。这部分最难的其实是目标的设定，而这个我就帮不上忙了，要自己安排、量体裁衣，因为每个人的幸福指数、人生轨迹、成长与学习的环境、目标函数都不一样。

课后作业：

1. 如果是四个海盗，怎么分钻石呢？五个呢？
2. 你的五年职业目标、学习目标是什么？怎么实现呢？如何去规划每一年的任务呢？

欢迎各位童鞋踊跃留言提问，我不负责解答，就算回答了也不包您满意。

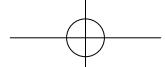
## 二、模型预测控制和反馈学习



上一节讲到了动态规划，这节我们讲一下模型预测控制（Model Predictive Control）和反馈学习（Feedback Learning）。还是先看一个例子。

小A决定一个月之内写一篇文章，思路有了，技术上也没问题，每周写两三页基本可以完成。小A详细规划了一下每周写什么，第一周顺利执行。然而第二周刚开始时，老家突然有急事，必须赶回去处理一下。一来一回耽误了三天，原来的计划也被打断。他重新审视了一下原计划，只剩下两个半星期，如果好好安排一下其他事情，文章还是可以完成，新计划需要剩下每周完成三四页。小A又认真工作了一个星期，发现竟然赶超进度，基本上都写完了。剩下最后十天小A又重新制定计划，在原有的基础上添加了一些新的想法，文章看上去也比预想的更加完美。

模型预测控制的核心思想是在当前时间寻找未来一段时间T的最优解，但是仅仅执行一小段时间t，等t时间过去之后再重新基于当前时间的最新信息寻找未来T时间的最优解，并仅仅执行t时间，以此类推。这样做的本质原因是生活



中往往计划不如变化快，因此需要根据当下最新的环境和信息及时调整策略。

施姐：有点意思。那  $T$  和  $t$  该怎么取呢？

施弟：厉害了呀，一针见血地提出了这么深奥的问题！

施姐：哪里哪里，略懂略懂。

我们拟定计划的  $T$  以及  $t$  非常重要，太长则不足以反映现实之不确定性和种种随机因素带来的冲击；太短则计划过密，往往最后一事无成，因为制定计划可是一件令人兴奋的事情。看着满满的日程表和 to do list，即便一件没有完成，制定完的那一瞬间还是令人幸福感爆棚的。

施姐：说了等于白说，还是没说明白  $T$  和  $t$  该怎么取。

施弟：……

施姐：饶了你吧。那你说说这个和 PID 控制有啥区别？

施弟：哎哟，看来你课后不仅复习了，还预习了啊？

施姐：哪里哪里，略花一点时间而已。

模型预测控制，顾名思义，带了预测的功能，模型越精确，其控制效果越好， $T$  和  $t$  也可以选择更长。一般朝九晚五坐办公室的员工，或者一些做重复性劳动的工人，他们的工作计划往往可以制定到几个月甚至于几年后，而一些咨询公司员工的计划可以短到按照几天制定。原因就在于前者的工作环境变化缓慢（精确模型）而后者变化迅速（模糊模型）。经典的 PID 控制却不带预测功能。

模型预测控制和 PID 控制都利用了反馈（Feedback）。如果只能用一个词来说明控制学科的话，我投票给反馈——这是控制理论的基础和精华之所在。

施姐：那反馈怎么用在平时的生活中呢？

反馈的思想非常强大。生活中，我们不仅要向前看，拟定各种计划（通过动态规划以及模型预测控制），我们更要静心思考，反思自己过去一段时间的得与失。

举个例子，我们学期前的目标是科科拿 A+，结果成绩公布了，门门 C+，如此大的反差（控制术语叫做预设值和实际值之间的误差 error）是怎样造成的呢？我们该如何改善呢？是学习方法有问题，还是时间投入不够？抑或是其他因素呢？

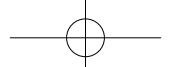
再比如，一个人经常闷闷不乐、易怒、脾气大、爱生气，那一定是某些方面出了问题。这个时候就要常想想哪里出问题了，是在自己身上，还是在别人身上？又分别需要如何解决？（这是另外一个大的课题，内容超出本篇之外，以后有机会再详细阐述。）

我给学生们的建议是反馈学习一定要及时。曾子曰：吾日三省吾身。要求每天都反省三次严格了一点，也没必要。一个学期反思一次则太久，可能很多事情都已被遗忘。年轻时消化、吸收信息的能力最为强大，每天都可能有明显的进步，此时每周反思一次最佳。仔细思考一下过去一周哪些地方做得不错，哪些地方还有欠缺，哪些地方做得糟糕。好的习惯继续保持，不良的习惯努力改正；成功的经验发扬光大，失败的例子汲取教训。失败了不怕，怕就怕重复犯同样的错。另外，我们经常嘴上说说容易，真正做的时候却有诸多借口，所以纵使明白了千千万万的道理，却仍过不好自己的小小人生。

施姐：说得好！可我感觉每天都忙忙碌碌，一年到头也没时间静心冥想，日子就这么稀里糊涂地过去了，怎么破？

施弟：设闹钟，设提醒，固定每周某一天的早上 8-9 点用来反思，雷打不动地贯彻执行。

施姐：太早了，我还在睡觉，不行。



施弟：那晚上 8-9 点吧。

施姐：吃饭时间，不行。

施弟：……

课后作业：

1. 你过去一周开心的时刻有哪些？不开心的呢？为什么开心或不开心呢？
2. 你未来一个月有什么计划？打算如何执行呢？

### 三、状态估计

有人说高校大门的保安是最具有哲学气质的人——他们每天都在问三个最重要的哲学问题：“你是谁？你从哪里来？你到哪里去？”要回答这几个问题可没有那么容易。

施姐：哪有那么难，我是你姐，我从家里来，我要去电子系看你。

施弟：哎呀，不是一回事呢，且听我慢慢道来。

施姐：行吧，小板凳摆好了，我当回吃瓜群众。

相传“认识你自己”是刻在阿波罗神庙的三句箴言之一，亦是最著名的一句。作者据说是希腊先哲泰勒斯，因为根据第欧根尼的记载，有人问泰勒斯人生何事最难，他回答道：“认识你自己(to know yourself)。”

如果我们把自己 (self) 当成一个未知状态 (unknown state)，那么“to know”其实也就等价于“to estimate”（去估计）。在控制理论中，状态估计 (State Estimation) 撑起了半边天，其用途甚至比控制还广阔，因为精确的控制基本都需要精确的估计，而在很多应用上，我们仅仅需要精确的估计，例如环境监测，我们只是想单纯地观察、估计、分析，而不会去干涉自然。

施姐：既然是估计，就必然会有误差，也就是说你认为我们无法精确地认识自己了哦？

施弟：是的，给你点一个大大的赞！



没有人能够精确地估计自己，最多也只能做到尽量逼近——恐怕只有上帝才知道的——准确值。我们先看一个在状态估计领域里面的简单例子：估计一个静态未知量  $x$ 。要使得这个问题有意义以及有解，我们必须引入至少两个东西。

第一，我们必须根据一些已知量（暂且叫  $y$ ）来估计  $x$ 。比如三个海盗想知道明天是否会下雨，那么需要一些气象资料来做预测，否则和投骰子的结果也差不多。

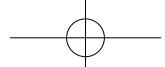
小 A：天灵灵地灵灵，咦，我抛了一个 6，大，明天晴天！

小 B：天灵灵地灵灵，咦，我抛了一个 1，小，明天雨天！

小 C：你俩到底谁对啊？我都糊涂了。明天还要不要出海打劫？

这个  $y$  必须和  $x$  有点关系 (correlated)。要是一点关系都没有，譬如说，已知我今天早上吃了两个包子，求解今天苹果多少钱一斤？估计您心脏病都要被气出来了。既然有点关系，那么我们就给它们一个形式上的证书吧， $y=h(x)$ ，这个  $h$  呢，就是一个函数，表明  $y$  和  $x$  是何种关系，例如  $y=h(x)=x+v$ ， $v$  是测量的噪音。

也就是说，虽然我们不知道  $x$  的精确值，但



是我们可以根据一些观测量  $y$  获得  $x$  的部分信息，然后我们去设计一个  $x'$  使得  $x'$  和  $x$  越接近越好。这就关乎到我们说的第二个东西了—— $f(e)$ ，一个估计误差  $e = x - x'$  的函数，例如  $f(e) = e^2$ 。

有了  $y = h(x)$  以及描述误差的函数  $f(e)$ ，一个基本的状态估计的问题就刻画清楚了，也就是说，我们需要基于  $y = h(x)$  设计  $x'$  使得  $f(e)$  越小越好。

施姐：你博士就是做这个的呀？

施弟：是呀！

施姐：我还以为博士学位很难拿呢，原来不过如此，早知道我也去拿几个。

施弟：……

施姐：不调侃你了，问你一个学术问题吧，得到精确的  $x'$  有啥好处？

施弟：如果我们想去控制某个变量  $x$ ，那么前提条件是根据已知信息  $y$  得到  $x$  的一个精确估计。打个比方，我们想控制一个房间的温度在 26 度，空调必须根据当前室温来决定是否吹冷风还是热风。我们先处理温度计的测量值  $y$  得到一个比较精确的温度估值  $x'$ ，然后再基于  $x'$  进行合理的控制。

施姐：也给你点一个赞！把这么一个阳春白雪、高大上的控制理论解释的如此下里巴人、接地气！

施弟：哈哈哈！

施姐：你说的还是太学术了，什么函数啊，变量啊，你赶紧讲讲在生活上的应用吧。刚刚我偷瞄了一眼，一起进来的十几个吃瓜观众都走了大半了。

施弟：那至少还有一小半有追求、保持一颗学术敬畏之心嘛。

施姐：敬畏你个头啊？剩下那几个，一个在打呼噜，吵死了；另外几个在斗地主，更吵！

施弟：……

应用于估计自己，我觉得有几点可以探讨。

其一，为什么要估计自己？其二，如何估计自己？其三，估计之后做什么？

我们先聊聊为什么要估计自己。从大的方面讲，我们的一生无非是需要处理好自己与自己的关系，自己与他人跟社会的关系，以及自己与自然的关系。我们必须先清晰地定位好自己，然后才能慢慢把这几方面关系理顺。具体到每天的生活与工作，如果我们不能清晰地认清自己的所思所想、所求所欲，以及自己的性格、能力、长处、短处，那么判断失误、遇人不淑、遇事不顺都会接踵而来。即便幸运地没有经历大起大落，也不免终生碌碌无为。

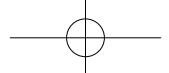
施姐：说得好！此处有掌声、鲜花！哎，你们几个斗地主的，不要再碌碌无为了！

再聊聊怎么估计自己。意识到需要估计自己是第一步，可是绝大多数人就这第一步也未能迈出。其次是寻找各种有效的方法来进行估计。我个人以为利用固定时间进行冥想比较有效。譬如每周划出一个小时，如上节反馈学习所说，专门用来反思，问问自己以下问题。

1. 自己的兴趣、能力（下篇会涉及）、长处、短处？
2. 自己的需求、对自己以及对他人的期望？
3. 自己性格上的优缺点、为人处世的方式？
4. 独处的时候是什么状态？烦闷、无聊、抑或是其他？

这些本质上是通过观察自己与自己、自己与他人的相处模式  $h(x)$  来认识自己  $(x)$ 。

另外一个比较有效的方法是看书，要看经典的书，看经久不衰的书（如罗素与叔本华的书）。我们遇到的种种人生问题，绝大多数都被先哲们考虑得熟烂透顶。太阳底下没有新鲜事！我们所需要做的仅仅是结合自身的状况，简单应用执行就好。



最后聊一下精确估计了自己之后做些什么。  
可是如果已经精确地估计了自己，那么需要做什么就去做什么咯:-) 此处省略 xxx 字。

施姐：再给你一次掌声！好像人又多起来了  
呢，恭喜恭喜！

施弟：我拖堂了，他们是来听下一场的。

施姐：晕死……

课后作业：花 30 分钟和自己聊聊天。

小结：上篇我们讨论了控制理论的一些核心思想在我们生活中的应用，特别是用在学习与生活的规划方面。我们谈论了动态规划（逆序求解），模型预测控制（顺序求解），反馈学习，以及本节的状态估计（认识你自己），希望对大家有所帮助。

控制学科已经发展了一百多年，其应用之广、之深可能大家都沒有意识到，恰如现在沒人会觉得计算机是多么了不起，微信、二维码支付有多么高大上，因为这些都是非常成熟的技术。控制里面还有众多有趣的题目和研究方向，例如最优控制、自适应控制、鲁棒控制、基于事件触发的状态估计与控制、传感器调度、控制安全与隐私等等，以后有机会再慢慢写一些它们与我们日常生活的联系。

规划篇就写到这里，下篇开始我们探讨另外一个不同的话题，我会就“什么能力对我们的学习、研究、生活、以及工作有很大帮助与促进？”和大家分享一下自己的一些个人观点。敬请期待！

本文转载自作者于 2018 年 12 月 21 日至 2019 年 1 月 11 日在微信公众号“我思故我在”发表的《控制与人生》系列文章。



**【作者简介】**施凌，香港科技大学电子及计算机工程系教授。2002 年于香港科技大学电子及电机工程系获本科学位，2008 年于加州理工学院控制与动力系统系获博士学位。施教授在控制领域顶级期刊，包括 IEEE Transactions on Automatic Control, Automatica，发表论文 180 余篇；获 2017 年度教育部高等学校科学研究优秀成果奖自然科学一等奖以及 2019 年度上海市自然科学二等奖。2019 年入选第二届世界顶尖科学家论坛青年科学家（全球仅 100 人），2020 年入选世界经济论坛青年科学家（全球仅 25 人），2023 年当选 IEEE Fellow，2024 年当选香港青年科学院院士，2024 年获陈翰馥奖。施教授曾获香港科技大学 2011、2023 年度工学院优秀教学成果奖以及 2021 年度电子与计算机工程系优秀教学成果奖。他培养的 6 名博士分别入选 2016、2017、2018、2022、2024、2005 年度的国家级青年人才计划。