



# 系统控制漫谈

## 杂疏：控制论·人（VIII）

### 静思3 反馈·结构@闭环？还是开环？

邹云 南京理工大学

杂疏系列·静思系列某种意义上来说，是写给控制专业人士的，比较小众。目的是就几个最基本的控制概念，抛砖引玉，将散人的个人理解与同行做个交流切磋。本篇作为又一篇概念辨析，依旧不属于“科普”。

翻开教科书，映入眼帘的最基本概念无疑是开环控制与反馈调节。上两篇“调节？还是控制？”与“学习？还是创新？”从两个不同的角度讨论了反馈调节与被它调节的对象之间的关系，揭示了结构的重要性。然而，这可能导致一个误解：反馈调节之于控制的地位被贬低了。本篇从下述问题着手，诠释了反馈调节于控制王国是不可颠覆的无上王冠，并就闭环和开环的关系做了深入探讨。

(1) 没有反馈调节回路的控制称为开环控制。那么，真的有不存在反馈调节的控制吗？

(2) “即时反馈系统”以十分严谨的数学形式大行其道。然而，即使忽略物理可实现性，连续反馈调节的“即时反馈控制系统”在理论上就能够存在吗？特别地，于这样的闭环里，有没有开环控制环节？

此外，笔者对自动化是否意味着无人化做了些许思考。黑格尔说：熟知非真知。熟读了教科书，真知教科书了吗？

#### 一、开环控制背后的反馈调节

在《控制论》和《人有人的用处》中，维纳认为控制的灵魂是反馈。有目的因此才有控制。因而**控制是一种促使系统的行为趋于设定目的的减熵行为**。熵即无序度。维纳说“减熵”，是因为任何举措如果始终不加调整，则都会因为无处不在、无时不刻的无序度增长而逐渐随机发散。

没有反馈，就不知道与目的偏差的程度，也就无所谓目的了，有的只是对熵增加的放任。按照控制论关于控制的原教旨定义，这样的行为也就不成为控制了。因此开环控制之所以被称为控制，它的背后一定会存在反馈。问题是，它会在哪儿？

##### (1) 暗藏玄机的开环控制定义

百度百科将“开环控制系统”定义为：不将控制的结果反馈回来影响当前控制的系统<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> <http://baike.baidu.com/item/开环系统/2260379?fr=aladdin>



图1 开环控制

这个定义中有个关键词“**当前**”。这个限定词就注定了：开环控制 $\neq$ 没有反馈的控制。它只是当前的控制过程中没有关乎控制结果的在线反馈。

## (2) 玄妙的开环控制指令设置

没有来自控制过程中的修正，开环控制指令的设置变得非常重要。教科书上会明确指出：它来自初始的理论估算与**既往的运行经验**。也即控制指令的设置是既往的反馈总结的结果。此外，特别值得注意的是：开环控制指令一经设置或许不再变动，但却不会是再无校验。

为清晰起见，看一下作为典型的开环控制的火炮射击过程。

根据弹道学计算出的命中目标的弹丸轨线对火炮进行诸元设定，然后激发火炮射击。射击后，无论遇到怎样的干扰，弹丸的飞行都不再能被干预。这是典型的开环控制。

然而，若第一次弹丸着点距离目标远了，前沿观察所就会将命中偏差信息反馈给炮手，在第二次射击时修正射击诸元，从而弹丸着点会变得近一点。这是反馈，但不会对第一次射击的弹丸飞行产生影响。因此，每次射击的过程都是开环控制，但击次间存在反馈。



图2 开环的炮击



图3 闭环控制的导弹

相对来说，导弹就不同了。它在单次射击后的弹体飞行过程中，不断利用实时检测或接收到的偏差信息对弹体飞状态进行在线修正，以克服飞行环境和目标情况的变化带来的命中偏差。

## (3) 开环控制中隐身的闭环调节

如前所述，开环控制一定存在一个超乎其自身控制过程、更大范围里的反馈环节，不妨在此称之为“外环反馈”。这种“外环”的表现形式通常是“人在环中”：比如故障诊断与检修，又比如定期维护与保养。只不过，对于开环控制，这个外环反馈周期的时间尺度不仅很大、还可能并不固定。因此，一直没

有修正依旧工作正常，只是维护人员感觉没必要修正或疏漏的结果。无论如何，外环反馈通道一直都是存在的。

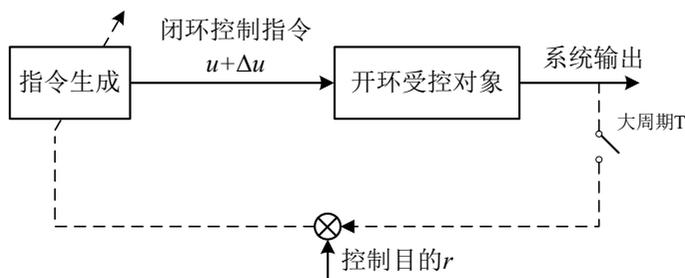


图4 外环反馈修正

这里有一种极端情形的例外，那就是“无法维护”，比如发射往太阳系外太空的探测器或者某类不打算维护的一次性设备。此时，相应的“开环控制”大概算作一次在时间轴上“有效撞运”的控制。即便如此，在初始开环控制指令的设置上，依旧是基于既有理论与经验的结果。而这些理论与经验的总结与运用本身，都是反馈的结果：结果越好，“有效撞运时间”就越长。

可见，有效的开环控制相当于一个双环反馈控制的特例：常规时间尺度上的内环反馈是断开的；大时间尺度上的外环反馈是闭合的。“常规时间尺度”的大小取决于具体控制。

下节将说明：一旦外环反馈周期的时间尺度变小，小到正好与常规控制时间尺度相匹配，那么图4立即转变成一个常规的闭环控制框图。

## 二、闭环控制：一系列开环控制的集成

考察教科书中无延迟环节的“即时反馈控制系统”。如图5所示。那么它会有开环控制环节吗？

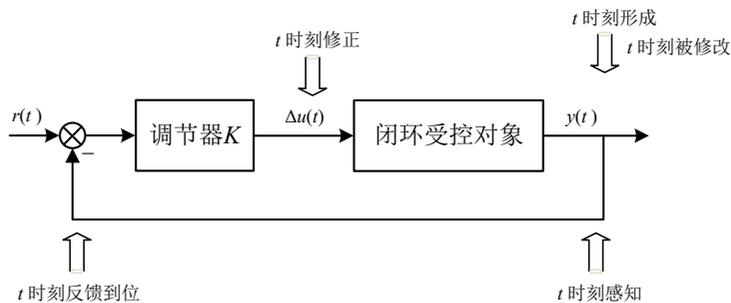


图5 “即时反馈控制系统”的系统框图

这里，需要强调的是：上图5中的“闭环受控对象”与图1与图4中的“开环受控对象”是不同的。以线性反馈情形为例，依据迭加原理可知：**闭环受控对象是整个开环控制系统、而非开环受控对象**。它与

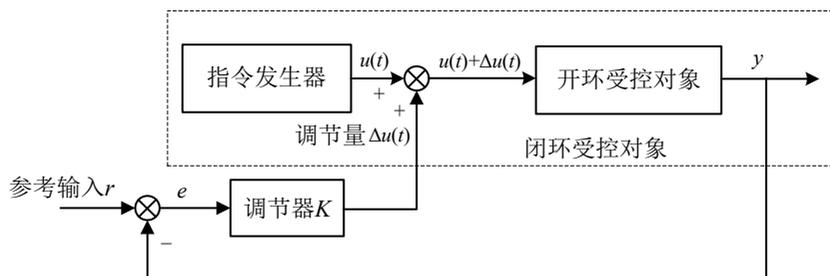


图6 线性反馈情形下的图5

### (1) 闭环控制中的开环控制环节

如图7所示,就极限论视角下的微观而言,它的反馈机理是,用 $t^-$ 时刻开环运行的结果,在 $t$ 时刻反馈给 $t^+$ 时刻开始的下一个开环控制过程。而在介于 $t$ 与 $t^+$ 之间,系统的控制是开环的<sup>2</sup>。

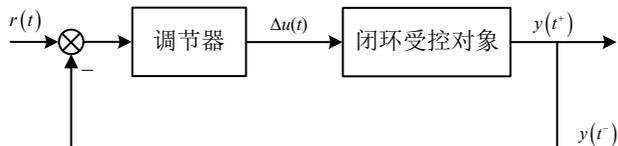


图7 “即时反馈控制系统”中的开环过程

### (2) “即时反馈系统”逻辑悖论

如果将上面的“ $t$ -开环链条”的机理解释去掉,会发生什么呢?这时没有了 $t^\pm$ ,于是状态存在于 $t$ ,也修正于 $t$ 。亦即:

$t$ 时刻的信息,  $t$ 时刻采集、 $t$ 时刻传送、 $t$ 时刻生成输出、 $t$ 时刻修正输出!

物理上,即使电信号是光速,也无法做到“即时”。因此,它只是对实际系统的一个理想化的近似描述。通常,对物理过程的数学近似并不会造成逻辑悖论。然而,这里却是个例外。

在哲学上,于自身出生的同时用自身修改掉自身的存在,这是无法存在的。否则,这个存在就是幽灵在显灵。

因此,哲学实在意义上的“即时反馈系统”是不可能存在的。连续时间的无延迟反馈控制系统,也是由无穷多个开环过程集成而来的。必须指出:为了避免尚处于起步的“量子控制”的“纠缠”,这里,仅论及宏观系统的经典控制。

<sup>2</sup>显然,这种极限论视角之下的微观观察,较之出身工程物理的专业人士,出身数学系科班的人反而更容易理解。数学上,函数 $x(t)$ 在 $t$ 处连续定义为 $x(t^-)=x(t)=x(t^+)$ 。因此,诸如 $x(t^-)=-1, x(t)=0, x(t^+)=1$ 之类的不连续函数实属寻常。

众所周知，经典控制是基于拉普拉斯哲学原理建立起来的。这个哲学原理是：一个质点的运动是确定的，系指这个质点在确定的位置  $x$  和确定的时间  $t$ ，其位置变化率  $\dot{x}$  是确定的。亦即：

$$\dot{x} = f(x, t)$$

有基于此，拉普拉斯说：给我一组初始条件（现在的状态），我将告诉你这个宇宙的未来。就思想实验而言，这组初始条件，按照上述拉普拉斯的哲学原理，只要这个世界是确定存在的，那么无论我们拿到拿不到，它都是存在的。也即世界的一切都是宿命的，区别只是人类能不能预言。



图 8 拉普拉斯妖

这句话很有名。史称“拉普拉斯妖”<sup>3</sup>。很妖，非常妖。直到海森堡测不准原理和哥德尔不完备性定理的横空出世，才算破解了些许“妖气”。

### （3）离散情形的“即时闭环控制”

这个有点麻烦，因为前面  $t^\pm$  的解释在这里无法照搬。因此，只有将“离散时间”  $t_k$  解释为一个宽度很窄的区间： $t_k = (t_k^-, t_k^+)$ 。在这个区间里，调节器完成从测量偏差、生成调节指令到完成调节修正的整个过程。这个宽度  $\tau_k = t_k^+ - t_k^-$  与整个离散过程两步过程之间的时间间隔相比非常小，因此可用“即时闭环”近似地描述。

### （4）闭环控制中隐身的开环控制

可见，一如上节断言的那样：一旦开环控制过程的外环反馈周期的时间尺度变得足够小，小到与控制过程的常规时间尺度在同一等级上，那么开环过程就会自然隐身，而它“外环反馈环节”就变成了通常的“即时闭环系统”。

散人闲来无事，琢磨再三，感觉之所以开环控制系统的分析成为闭环控制系统设计的基础，其哲学原理大概就在这里。

<sup>3</sup> “拉普拉斯妖”：一个知道宇宙过去和未来的“恶魔”，量子探索，2022年2月22日。  
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1725459108651135605&wfr=spider&for=pc>

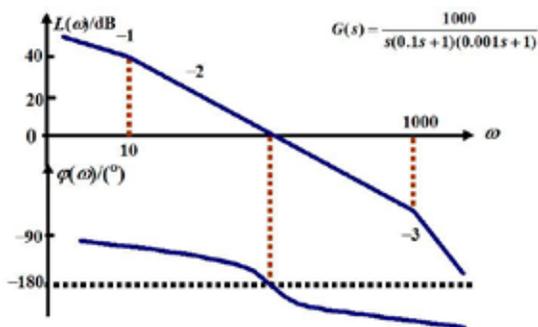


图9 系统开环频率特性/波特图

#### (4) 时空连续性假设的困境

上面说到的“即时反馈系统”的逻辑悖论，究其实质，还是时空连续性假设导致的。时空连续的假设，大抵来自直观的“一尺之棰，日取其半，万世不竭”的思想实验。这个假设能带来许多好处，却也带来贝克莱大主教提出的著名悖论：“消逝中的鬼魂”。其实，它只是更为著名的芝诺悖论的一个变种。例如**芝诺悖论现代高铁版**。

这个悖论是说：高铁从南京南发车。它未曾启动过，却在1小时20分后抵达了上海虹桥。

它的推理是这样的。由于时间和空间的连续性，如果高铁的速度不为0，那么它已经启动了。否则，它就还没启动。既然1小时20分后抵达了上海虹桥，那么在南京南它肯定是启动了。问题是：它究竟在何时启动的？

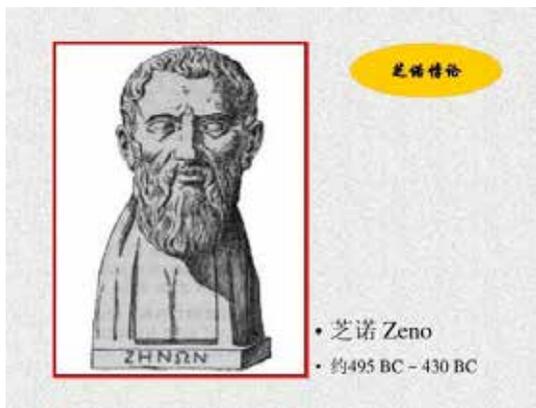


图10 芝诺悖论

极限论能解决这个问题么？并未真正解决。使用极限论，我们势必得到这样一个时刻：在这一时刻，高铁速度为0但它已经启动了。没办法，它必须是启动了。否则矛盾。然而，既启动了又没启动，真的是“消逝中的鬼魂”。

显然，只要抛弃时空连续性假设，一切问题也就不再存在了。事实上，既然普朗克说能量不再是连续的，那么时空为何必须是连续的呢？自然，与说它是连续的一样：说它是离散的，也依旧还是个假设，

因为没有任何证据。

离散时空假设会带来什么问题？首先，著名的 $\sqrt{2}$ 没有了。自然，著名的毕达哥拉斯定理（勾股定理）也不再成立。当然，消失了的不仅是 $\sqrt{2}$ ，而是包括更为著名的 $\pi$ 和 $e$ 在内的一切无理数。这有什么问题吗？其实没有。一如黎曼几何与罗巴切夫斯基几何那样，再发展一套适用的几何就是了。它丝毫不会影响欧氏几何的成立。别说直线外一点都可以做出两条不同的平行线了，就连宇宙都是弯曲的：任何直线都闭合，好像也没什么灾难性后果。



图 11  $\sqrt{2}$ 还在吗？

圆周率没有了，计算会受影响吗？完全不会。没有人、也没有机器，能够计算无理数。无论人还是机器，都是在用有理数做近似计算的。有理数、甚至代数数都不过是个 $0$ 测度集。因此，随机选择一个数，选中超越数的概率为 $1$ 。然而，迄今为止，除了 $\pi$ 和 $e$ ，实际上人类掌握的超越数寥寥无几。这本身就是件非常奇怪的事。不是吗？

事实上，戴德金的实数论不过是在用人造数去填补空间连续性假设的窟窿。为此，他利用有理数子集去制造了一个完备的数系，称作实数。非常完美，但的确是人造数系。可见，极限论主要是个工具论，用以定义时空连续假设下相关数学量的计算值。它并不能对时空连续性假设带来的悖论给出终极解释。

其实，只要注意到函数的黎曼定积分定义里的两个“任意”：对任意的区间划分和划分区间上的任意函数值，其相应的无穷求和都存在极限且极限唯一，就知道这不是在计算面积。这是在定义面积。只不过这种定义很奇特：它本身是可计算的，定义是否有意义与计算是否有结果直接挂钩，有结果，这个结果就定义为面积。无结果，就定义为没有面积。因此看起来像是计算面积。

特别地，当被积函数太破烂，由它定义的所谓曲线围成的面积不存在时，勒贝格-斯提吉斯就出来定义更广义的面积了。一切都是人造的，在具体实在物理领域里适用不适用，那是另一个问题了：一如欧氏几何和与之矛盾的非欧几何之于具体的物理学。

### 三、自动化不是无人化

自动运行的原教旨定义，就是系统无须人的介入地自行运行。因此，逻辑上，自动化天然具有奔向无人化终极目标的原始冲动。时至今日，工业自动化已达到极高的水准。随着 ChatGPT 的惊艳登场，以 AI 为核心的智能自动化又达到了一个新的高度。

夜路上溜达着的机器狗、悄无声息的机器虫蚁已经令人感到了些许恐怖。高端的艺术创作与科学研

究（如电化学分析领域）无人化、知识推理无人化、学校教学无人化、作战无人化等也在路上。

至于相对一般的护理无人化，环卫无人化，图纸作业、软件编程无人化，股票经纪无人化，医学诊断治疗无人化等甚至已部分抵达。而生产车间无人化，变电站无人化，驾驶无人化，抄表无人化已不稀奇。

就连超市收银、医院抽血和接线员语音服务也无人化了。或许，唏嘘硕士毕业送外卖的声音还未落下，却突然发现这个饭碗突然就没了。一切都要无人化了吗？人的位置何在？一般人员的生存饭碗又在哪儿？

其实，对于人，世上的事情大致可分为三类：

非常繁重、抑或要求很高以及具有危险性的工作：可以无人化。但最好的方式，应该是发展将强化人的能力的自动化以协助人类迎战挑战，而不是对人的越俎代庖。

普通的人力可为又要求不高的：如超市收银员的简单工作、护士的一技之长、话务咨询的人工服务等，保留给自然人类。发展可让他们提高效率的辅助自动化技术，而不是简单应答资本的诉求：付出更少人力成本、承担更少社会责任，贪图机器化带来的效率、效益。

以一般车辆自动驾驶技术为例，可以发展在人类严重误操作以及反应不及时可以在线做出正确操作的自动化应急自动决策控制系统，而不是完全无人化。又如未来的出行可以是单人飞行模式，而非任由无人机统治天空。

创造性的、艺术性的以及技术性的：这应该是人类个体安身立命之本，必须让大部分有才干的人有充分发挥的机会，才能保证人类的顶端创造力不至于成为无源之水。相应的自动化应该遵循辅助工具的前提，例如“灵感生成启迪系统”一类的技术，而非 AI 碾压人类。



图 12 人是这个世界的主体

无人化是自动化。可自动化不应该是无人化。人是这个地球上人类社会的主体，更是一切智慧的源头。人类的个体应该在自动化技术的辅助下，变得更强大、更智慧、更有力量。这样，后信息化时代会造就一个自动化配置辅助下的超人群体的时代，而不是催生出颓废的、被机器淘汰、全面退化中的食福利者寄生群的悲惨世界。

人的自动化是支撑人的自动化，不是取代人的无人化！



#### 四、反馈·结构之静思：几点总结

经典反馈控制=反馈调节+开环控制：反馈调节的对象不是开环受控对象。它是整个开环控制系统。教科书中的经典反馈控制框图其实是反馈调节框图。它对整个开环控制系统进行调节。

经典开环控制系统的理论上最优控制律构成了反馈调节效果的上界。反馈调节是逼近这一上界的唯一有效工具。

进而，若开环控制系统不变，则经典反馈控制不会有创新的结果。要创新，就必须对开环控制系统/控制方式的结构进行调节。

控制论是行为主义的目的论，没有反馈调节的存在，目的就难以持续保持有意义的存在。从而，纯粹的开环控制是不存在的：任何开环控制，不仅是闭环产生的结果，更是一个大时间尺度下的闭环。这一闭环最常见的存在方式是：人在环中。

自动化不是无人化：它是对人的解放，是支持人，而不是对人的取代、驱逐！



**【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，江苏省电机工程学会常务理事，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。