

杂疏：控制论·人（VIII）

静思1 反馈·结构@调节？还是控制？

邹云 南京理工大学

依稀记得散人刚踏入控制理论门槛的时候，“自动控制原理”也还有称作“自动调节原理”的。现在只有“输出调节”的说法还见诸文献，而其他“调节”，如反馈调节等，很少见了。

就狭义的概念而言，经典的“调节”（Regulation）是对既有控制方式下相关控制量的调整与修正。因此，它属于“控制”（Control）范畴，称之为控制的控制也不为过。调节本身未必需要反馈参与，但通常它与反馈会是一对孪生兄弟。反馈所传递的信息是调节的依据，调节的效果需要通过反馈传递回来。

显然，开环控制系统属于控制系统结构设计。它是经典反馈调节的基础，制约着该方式下反馈调节效果的上界¹；而经典反馈调节则左右着给定控制方式下控制目的达成的可能性或品质。那么，经典意义下的反馈调节与反馈控制两种说法的区别何在？

黑格尔说：“熟知非真知。”今天，就探究一下这几个耳熟能详的基本概念，检验一下：我们是真知？抑或只是熟知？本文不是一篇科普，而是写给控制领域研究生的关于经典控制概念辨析的一点个人体会。

¹ 任何闭环控制都是时间 t 的函数 $v=v(t)$ ，理论上，它等同于开环控制 $u=v$ 的结果。因此，它的效果受制于开环控制手段理论上存在的最优水平。

一、经典闭环控制框图里，开环控制的 u 去了哪里？

教科书里，经典的开环控制框图是：



图 1. 经典的开环控制框图

而经典的闭环控制框图则是：

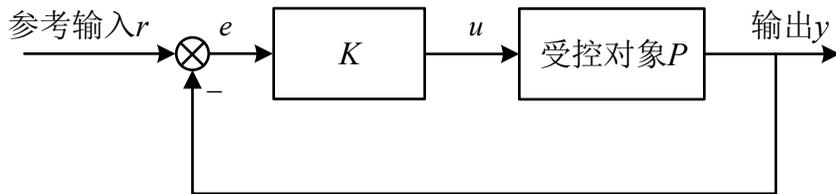


图 2. 经典的闭环控制框图

这里，反馈控制器 K 其实只是调节器。显然，图 2 里，控制 $u = K(e)$ 并非图 1 中的 u 。那么，图 1 中的 u 去了哪里？特别地，既然闭环控制框图中的 u 与开环控制框图里的 u 不同，那么闭环控制框图与开环控制框图里的 P 一样吗？

更为奇特的是，许多现代控制理论文献中讨论的反馈控制框图是这样的：

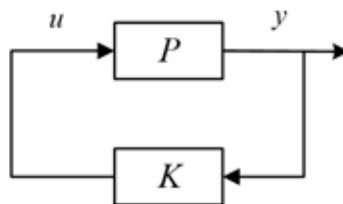


图 3. 另一种常见的经典反馈控制框图

许多控制理论学者认为：这个反馈控制框图反映了“控制的本质”。然而这个框图中，不仅没了开环控制的 u ，甚至也不见了图 2 中的参考输入 r ，当然控制偏差 e 也不见了。它们又都到哪里去了？事实上，稳定性分析里的最常见的闭环系统 $x(k+1) = (A+BK)x(k)$ 就是这样的。没有参考输入，没有开环输入。连续

情形也是一样的。

That's the question!

二、经典控制框图的扩充

先来看一看开环控制的过程是怎样的？它的特点是：控制 $u = u_0$ 是预先设定好的额定控制，无论干扰 d 如何作用，都是不变的。这也是开环控制最大的缺陷所在。因此，一般都需要设置反馈调节，以对抗干扰的影响，保证达成开环控制的目的。

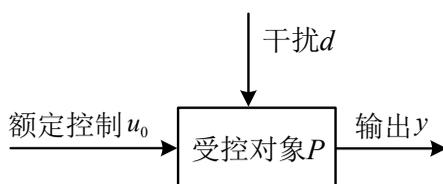


图 4. 开环控制的过程：粗略的轮廓

略微扩展一点，开环及其相应的闭环控制框图则如图 5 和图 6 所示。

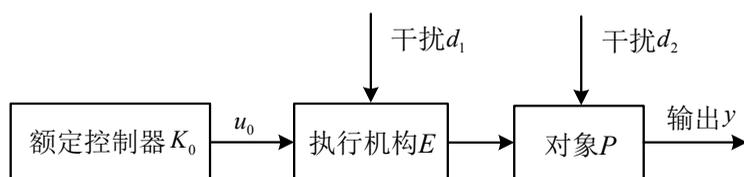


图 5. 开环控制的过程：相对完整的轮廓

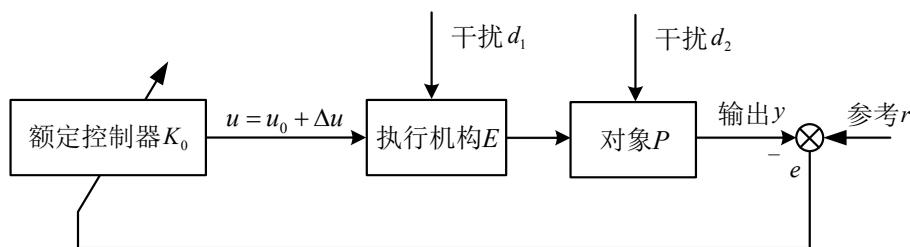


图 6. 反馈对开环控制的调节

图 6 中，反馈通道的作用，显然只是针对欲达到的目标 r ，对开环控制 u_0 进行调节： $u = u_0 + \Delta u$ 。若调节是线性的，则由迭加原理，可得如下框图：

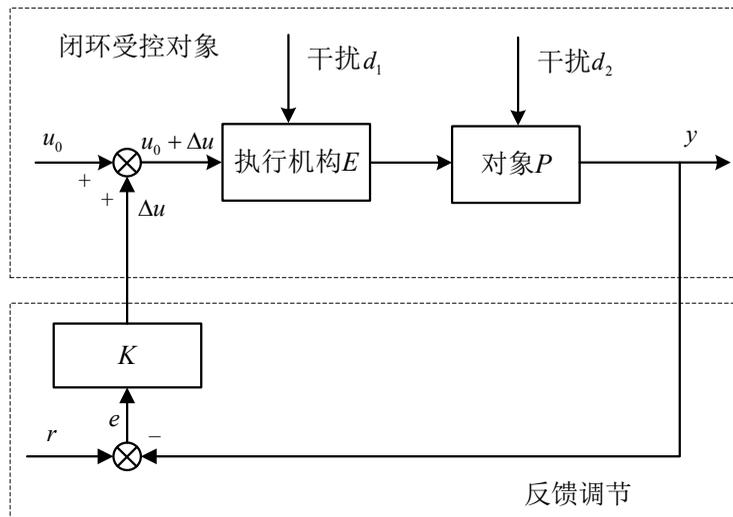


图 7a. 完整的闭环控制框图

这里，反馈调节是指依据控制偏差 e 通过调节器 K 将开环控制变量 u_0 修正调整为 $u_0 + \Delta u$ 的过程。显然，经典闭环控制框图（图 2）中的受控对象 P 是整个开环控制系统。由此可知：

经典反馈控制=开环控制+反馈调节，也即被反馈调节补偿了的开环控制。

经典的反馈控制框图 2 实质上只是反馈调节框图。它调节的对象是整个开环控制系统。

如图 7b 所示：经典反馈控制与开环控制都是给定开环控制方式通过执行机构 E 作用于开环受控对象 P ，区别只是在量值上有所不同。

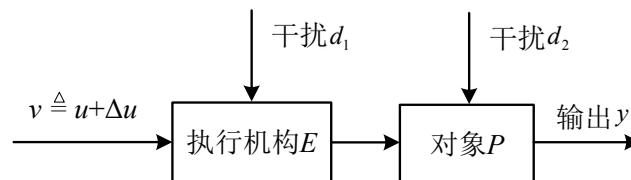


图 7b 等效开环系统

于是，经典反馈控制效果的天花板是“上帝视角²”下最优开环控制的控制效果，而反馈调节其实是用以逼近这个天花板的、截至目前别无它途的唯一有效手段。因此可以说：

开环控制方式是控制系统设计的硬核所在，决定了控制效果的上界。

三、控制理论视角：控制，既定结构框架下的适度调节

现代控制理论主要针对反馈控制框图 3。它是怎么来的呢？其实它也是从图 7a 得来的。将图 7a 重

² 也即洞悉过去、现在和未来一切扰动和不确定性。

新整理一下，就得到如下从 Δu 到 e 的等价框图：

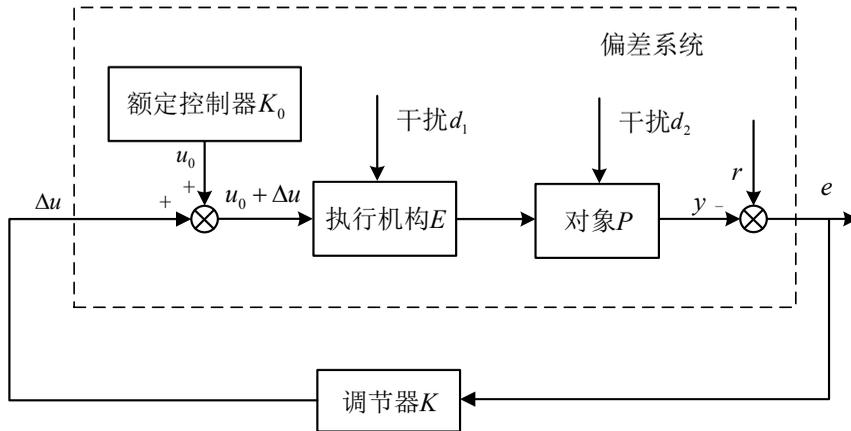


图 8. 偏差系统的反馈控制

显然，将上图中偏差系统记为 P ， Δu 记作 u ， e 记作 y ，则上图就是图 3 了。

偏差系统模型的数学推导很简单。若设开环受控对象为 $\dot{y} = f(y, u, t)$ ，参考输入方程为 $\dot{r} = h(r, t)$ ，偏差为 $e = r - y$ ，调节方式为 $u = u_0 + \Delta u$ ，则偏差系统即为：

$$\dot{e} = g(e, \Delta u, t), \quad g(e, \Delta u, t) = f(r - e, u_0 + \Delta u, t) - h(r, t)。$$

由此可知，反馈控制框图 3 的受控对象实际上是控制偏差系统。只是为简洁计，在不会发生混淆的情况下，相关变量前略去了 Δ ，并将 e 记做 y 。

- (1) 它的控制目标必然是偏差系统输出具有某种预设的特性 $y(t) \in \Omega$ ：比如 Ω 是满足 $y(t) \rightarrow 0$, $(t \rightarrow \infty)$ 或某种泛函极值 $\min\max\{\xi[y(t)]\}$ 的函数集合。前者适用于 $e = 0$ 为偏差系统的平衡点，此时 $f(r, u_0, t) = h(r, t)$ ，亦即 $r(t)$ 是开环系统的一支特定的运行轨线。此即控制理论中的反馈镇定调节。后者通常用于 $e = 0$ 不是平衡点的情形。
- (2) 反馈调节律是它唯一关注的硬核元素。其它的因素，如开环额定控制 u_0 和参考输入 r 等，都隐含在了偏差系统中了，被认为是“系统建模”。这在一定程度上体现了 Kalman 的控制理论观点：

“Get the physics right. After that, it is all mathematics.”³

Kalman 的这个方法论观点，极大地推动了现代控制理论发展，其中最著名的就是图 3 结构下的反馈镇定控制。这是最易运用数学的一方沃土，因而也发展最为完善。然而，基于图 3 的框架，既然反馈调节器之外都属系统建模，久而久之，很可能产生“控制就是调节”的某种潜意识，而这是有害的。事实上，反馈调节器的设计有一个特点：

³ 尽管 Kalman 这句话非常全面，但数学科班出身的学生，自然认为“all”是侧重所在。而工程出身的学生，则会对“all”或心生畏惧或被强烈吸引，从而成为这句话的侧重所在。有趣的是 Kalman 本人并无数学专业的教育背景，并且因为早年被数学界冷落而耿耿于怀，以至于不出席数学学会后来给他的颁奖仪式。

它只是确定如何获得反馈调节律的算法，无关系统的控制结构设计。

这就意味着：包括反馈镇定调节器本身在系统中的控制系统结构设计被彻底忽略了。也即一切结构都是给定的，然后进行数学建模研究调节器算法。问题是，结构由谁给定？它是不是控制设计？

四、控制技术视角：控制，将反馈调节作为设计环节之一的系统控制结构设计

有趣的是：工程技术人员的视角不可能仅囿于反馈调节器，因为实际控制无法简单地归结为一个反馈调节器的设计。那种指望“调节器好，实际控制就能解决得好”是很荒谬的。比如，若采用自寻的、自驱动的控制方式，则无论怎样的调节都不可能出现廉价而高效的常规激光制导炸弹。

因此，技术人员更关心的是比反馈调节器更加基础的“控制方式的设置与优化”。于是，他们看到的“控制的精髓”，往往是如下框图所描述的情形：

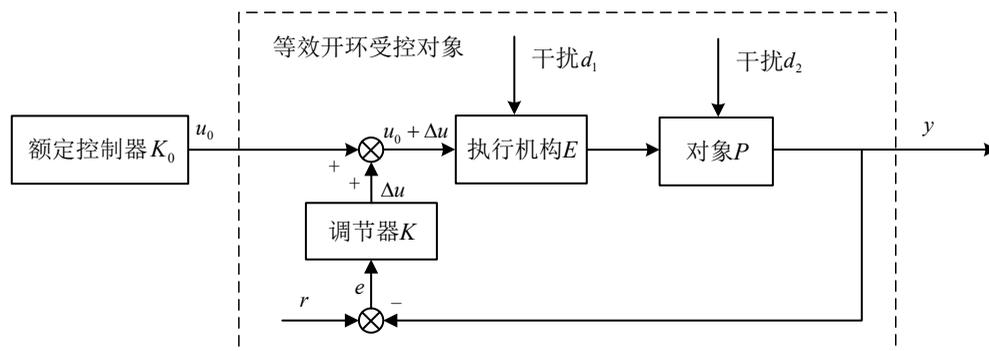


图 9. 开环视角下的反馈调节

这个框图看似简单，却与图 3 在方法论视角上却是天渊之别。它对反馈调节的认知重在结构：视作对开环受控对象的一个结构补偿机构，放在了等效开环受控对象的内部。此即通常说的“内环”。

事实上，自然界自带内部调节机制的受控对象很多。比如人体，它带许多内置调节，例如关乎血糖的胰岛素反馈调节机制等。预置内环调节器的受控对象也有很多，有的是开放结构因此可以调试，如飞行器姿态控制的位置环；而有的是集成封装不可打开调试的，如许多飞行器姿态控制的速度环，对它的补偿与校正只能通过外部开环手段或附加外环反馈调节来完成。

从图 9 扩展，可以得到许多开环控制手段。例如，图 10 所示的受控对象的结构补偿和图 11 所示的对原有内部参考输入的调配修正等。在下节案例分析中，图 10 的结构补偿控制方式将会被用到。

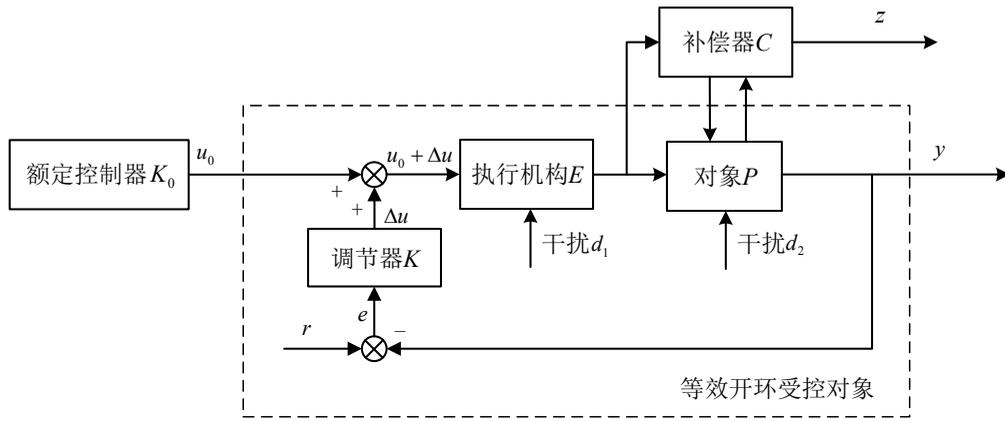


图 10. 开环受控对象的补偿⁴

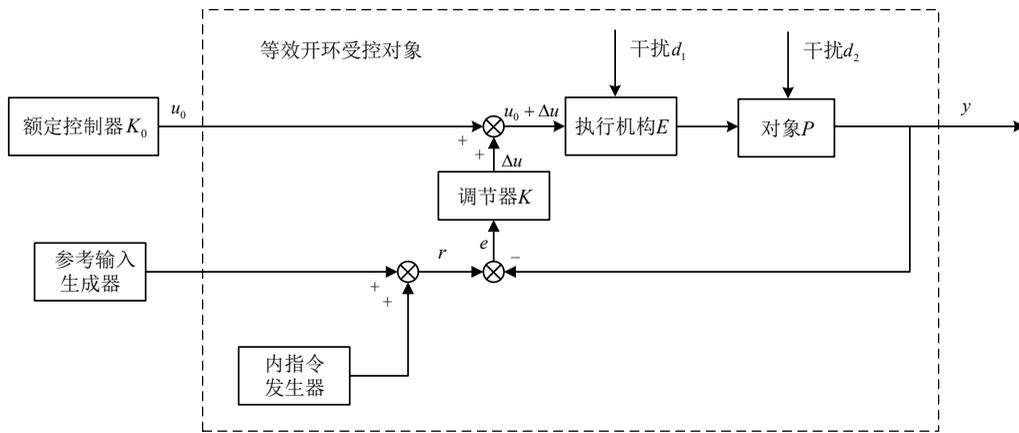


图 11. 参考输入/控制指令的外部调配⁵

从技术观点看，“控制的精髓”在于：在物理可行性和恰当的经济成本约束下，控制目标能够尽可能被可靠并高效地达成。这是控制的最高目的：解决问题，具体控制手段不拘一格。无论是否调节器，均属于控制系统设计。

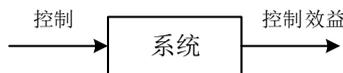


图 12. 技术视角下的“控制的精髓”

⁴ 显然，开环控制器可以看作是从外部附加在受控对象上的补偿装置。反馈、前馈和状态观测器也是如此。反馈本身也可视为在开环控制端和输出端之间补偿了一个反向的信息通道。

⁵ 曾经遇到一位十分崩溃的教授：“我熬夜修改的内容，他（学生）又都给改回去了！”这位学生的内指令发生器，有点像人体的正常血糖调节机制的参考输入，不受外部影响了。作为工业控制案例，风电跟踪的默认最优功率曲线（内指令）中低风速时效果很差，因此可类比图 11 予以恰当修正。

这里，特别需要强调的是：控制结构设计是控制系统设计中的重中之重⁶。比如激光制导方式对自寻的制导模式的颠覆。再比如散人眼中的全驱控制方式带来的改变：以构建的模型抵消原有受控对象的行为模式后所补偿的线性系统，不仅是进一步鲁棒控制的受控对象，更是控制设计参数。因此，设计自由度极大提高，更提供了一种寻求对抗抵消不彻底造成的不确定性的最佳适配系统的可能⁷。仅凭反馈调节，无法产生这样的控制设计。

五、控制系统设计案例：系统结构补偿设计的独特性

调节是对开环控制量的调整。同样的控制问题里，参考输入的调整，开环受控对象以及执行机构的改变，将可能导致不同的开环控制方式，从而使得调节的难度以及调节的结果大相径庭。

案例 1、激光制导炸弹

导弹太过昂贵，普通航空炸弹因此成为对地攻击最重要的常规武器。但投弹精度差、飞行员安全性不好。越战时⁸美军平均炸毁一座桥梁需要几十枚普通炸弹，对重点桥梁常常极难成功。例如防空能力非常强大的杜梅大桥，美军在七年时间里曾投入一千多架次的战斗机和轰炸机，执行了 64 次轰炸，损失近 70 架战机和 107 名飞行员，依旧没能炸毁大桥。使用了激光制导炸弹后，若干架次数枚炸弹便很快摧毁了大桥。飞机和飞行员损失为 0。

激光精确制导炸弹原理很简单，一架飞机用激光束远距照射目标，炸弹从高空被投下后激活激光接收器，可根据偏离光束的角度自动调整炸弹的弹翼偏转角以逼近目标。这一控制方式有别于导弹自寻的、自带动力飞行的控制方式，一度被称为“被动制导”。它成本很低，精度极高，而且极大改善了飞行员的安全。

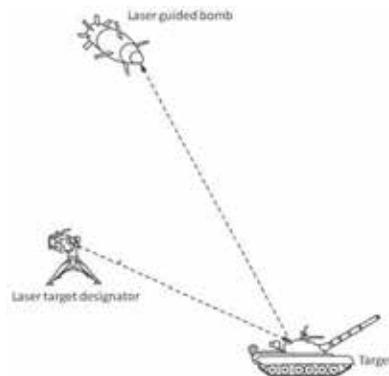


图 13. 激光制导炸弹制导原理

⁶ 按维纳《控制论》关于系统结构的示例，若速度控制方式采用的是自行车的动力驱动结构，那么反馈调节的极限也还是地面代步工具，而不可能是登月运载工具。

⁷ 参见《系统与控制纵横》2013 年第 1 期的《杂疏：控制论与人（VII）完全能控性 VS 系统全驱性趣谈：隐藏在“指鹿为马”背后的控制学原理》第 6 节。

⁸ https://www.sohu.com/a/673543047_121629716

被动制导中的调节方式非常简易。到了海湾战争，更是登峰造极，一度产生了一个概念叫做“简易控制技术”，意即只需简易反馈调节的控制方式。

这个例子说明：并非所有情形，反馈调节都是解决问题的核心技术所在。许多经久未决的控制难题，发明全新的开环控制方式才是根本所在。值得注意的是：全新的控制方式并不必然意味着拥有复杂先进的反馈调节环节，相反，它对反馈调节的要求很可能更加简单。

案例 2、矿井救援：传统方式 VS 紧急地下避难所+生命支援通道设置

2010 年，智利发生矿难。几十位矿工受困深层地下。矿难发生区域地质结构复杂，人员升井通道的数次掘进尝试均半途而废，救援方案因此不得不几经修正，以至于受困的矿工在井下度过了近三个月。救援结果出乎意料：所有井下受困人员 100%升井成功！这次救援事件成为矿井救援应急控制史上的重要里程碑与分水岭。



图 14. 2010 年智利受困矿工借助地下紧急避难室 100%升井的事件

所有这一切，都是智利引入了颠覆传统救援的移动式“地下紧急避难室”+生命支援通道的救援方式带来的。传统救援方式从最优控制角度看，其实就是“与时间赛跑”：

$$\max_{0 \leq t \leq T} \{T - \tau(t)\}.$$

这里， t 是救援进程的时间尺度。 T 为地下受困人员中最大生存时间。而

$$\tau(t) = F(\alpha(t), \beta(t), t).$$

为救援在 t 时刻对救援抵达（受困点）时间的预测值。 α 为救援举措向量，包括救援物资、救援设备、

救援人力和救援方案等， β 为救援运行执行状态向量。



图 15. 与时间赛跑

若以 $u(t)$ 表示 t 时刻各种控制举措，它或许也可表达为我们熟悉的迭代格式：

$$\tau(t+1) = G(\tau(t), u(t), t)$$

这个表达式有点像车辆导航的“在线预计抵达时间”。令 $\tau = \tau(\tau)$ 为救援抵达时间，则 $T - \tau > 0$ 救援才能成功。传统的应急救援方式大致如下图所示：

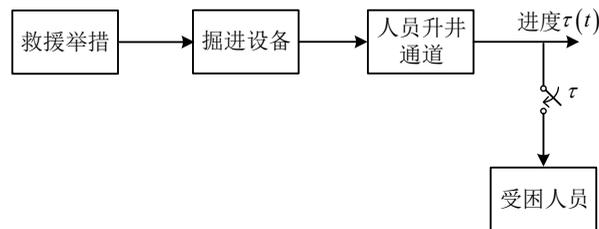


图 16. 传统救援控制

它的反馈调节图为：

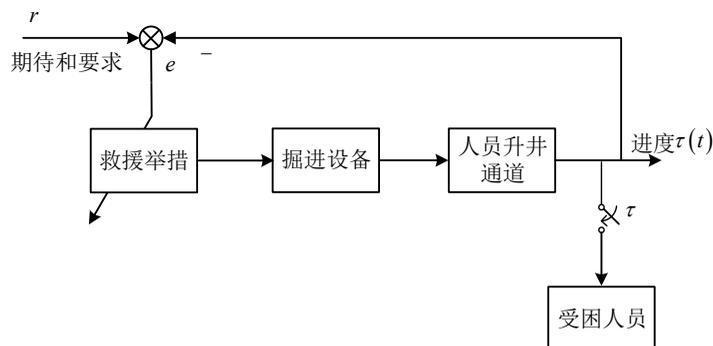


图 17. 传统救援的反馈调节

地下作业面很深，地质结构复杂，被困人员定位困难，掘进进度缓慢，井下生存条件恶劣、被困人员生存时间很短。而反馈调节的极限也只是在不断调整举措，使得实际掘进速度向理想情形下能够达成的速度逼近，改变不了大局。历史数据表明，救援成功率很低。

智利则采取了对掘进面补偿的办法，在井下设置了移动式紧急避难室，并在救援通道上开创了生命支援通道和人员升井通道的双通道模式。此时，救援的开环控制框图变为：

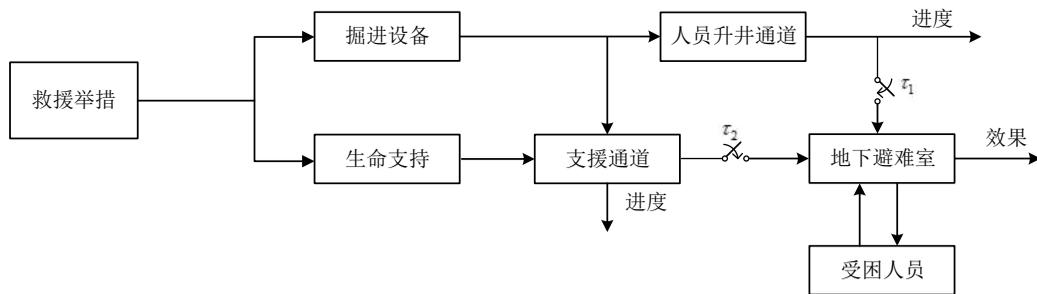


图 18. 新的救援方式

它的反馈调节是：

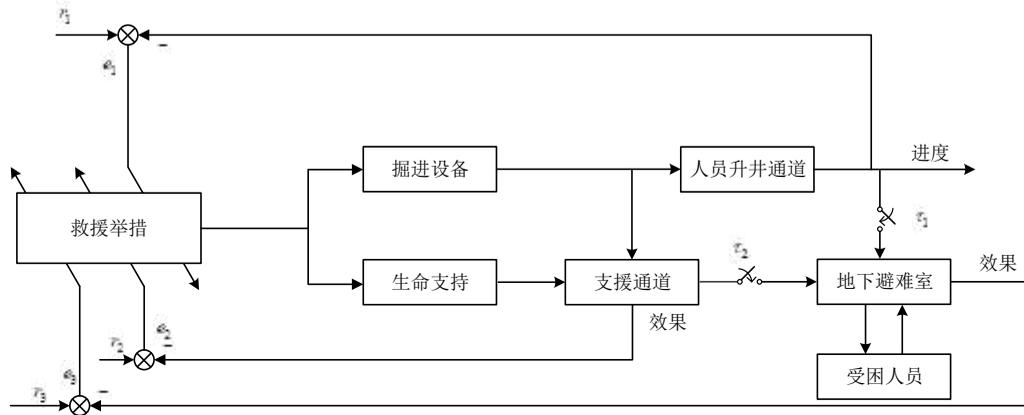


图 19. 新救援方式下的反馈调节

避难室位置精确已知、维生设施完善，储备可以维持相当长的时间，而生命支援通道口径小，容易钻成，开通所需时间 τ_2 很短。一旦开通，以往十万火急的人员升井通道的开通变得从容不迫。这是矿井救援史上颠覆性的进步。

从控制理论角度看，新的救援方式使得矿井救援应急控制中的受控对象、控制举措、控制任务和优化指标都发生了全面的改变。因为不再与时间赛跑，新的救援方式对反馈调节的要求松弛了不知多少倍。



图 20. 传统救援方式的结构

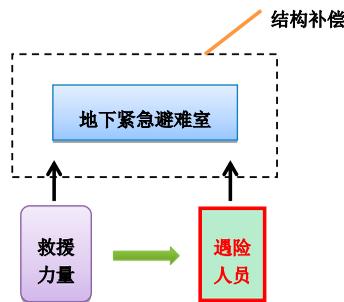


图 21. 紧急避难室对原受控对象的补偿

在《控制论》课堂上，常有同学非常困惑：为什么航天都有逃生舱设计，井下却长年（2010 年之前）没有类似的存在？这个问题很有趣。原因或许在于：航天逃生，是自主行为。有没有逃逸舱设计，以目前的情况来说，地面都不存在要求紧急抵达事故点的救援任务。因此，逃逸舱设计属于单独的逃生系统设计。这就使得它从一开始就被提上议事日程。



图 22. 科幻大片《火星救援》：其实只是绝处逢生的自救

地下紧急避难室没有自主逃出功能，论实际作用也只是拖延时间，等待地面救援抵达。特别地，如果没有生命支援通道的结构补偿，即便有地下避难室设置，地面掘进救援依旧是个略微松弛了的“和时间赛跑”。因此，作为地面救援任务枝节性辅助措施，很容易被思维定势视而不见。



图 23. 著名影片《虎口脱险》台词：我想拖延时间……

智利救援发生之前，国内在推行“领导干部亲自下矿”。网上一片叫好声⁹。



图 24. “领导下矿”减少矿难



图 25. 领导下矿视察图



图 26. 智利救援事件当年对国内的舆论冲击

智利救援被报道后，国内受到了强烈的冲击，导致网络报道画风突变！

与案例 1 一样，长年的控制难题的突破并非因为反馈调节技术的提高。值得注意的是：在新的控制方式下，反而大幅松弛了对反馈调节的要求。

案例 3、指鹿为马中的反馈调节

指鹿为马是赵高发明的权术。它以极其荒谬的面目出现，迅速达成对异己的清洗，使得他治下的系统变得在他看上去完全能控。这里，“指鹿为马”起着类似滤波器的作用（图 22）。它将系统做了能控子系统与不能控子系统的分解，而后通过对不能控子系统的清洗和重组，得到了一个完全能控的新系统。

⁹ 那时，甚至有很荒唐的“二战降落伞 0 故障率”的“真实案例”在各种讲座中大行其道。说的是一开始降落伞故障率很高，战场损失很大。军方规定公司老板必须亲自试跳伞检验产品质量，于是“降落伞故障率变成了 0”。这很反智。

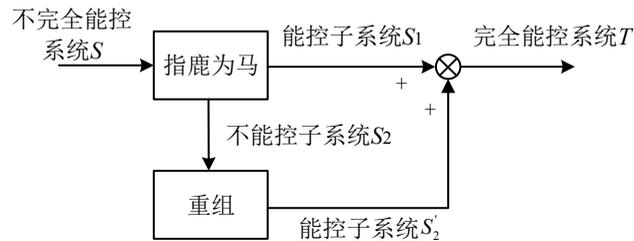


图 27. 指鹿为马的控制框图

它的反馈调节为:

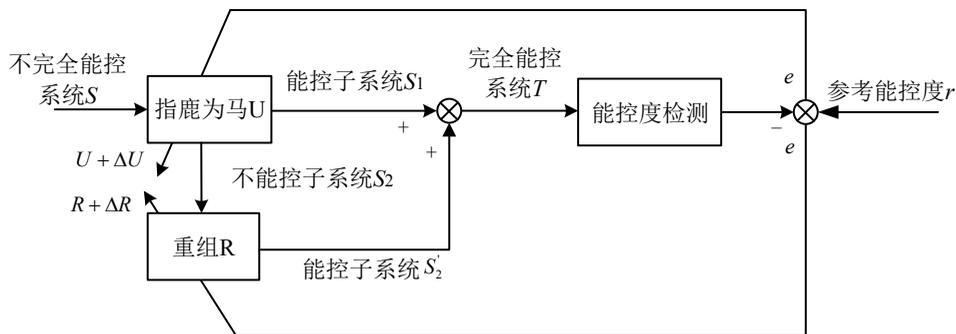


图 28. 指鹿为马的反馈调节

图 27 和图 28 中的子系统“+”系指按系统分解时的结构进行再次“合成”。显然，图中“指鹿为马”的滤波策略 U 一旦实施，则调节量 ΔU 就几乎没有存在的余地，而无论怎样调节量 ΔR ，“指鹿为马”本身的荒谬性产生的副作用都是无法消弭的。调节能做到的，只有调整重组的范围与程度。长远地说，指鹿为马是个很糟糕的策略。要改变它，仅凭调节是无能为力的。

其实，就其本质而言，“指鹿为马”是俗称“引蛇出洞”的策略中一类极端激进的特例。若将图 28 中的滤波策略换做比较温和的“言者无罪，异议可贵”，那么调节的作用则根据参考能控度 r ，可以很恶劣地扩大化，也可以相对恰当地分而治之。通过调节 r ，可以生成渐近消弭“引蛇出洞”副作用的可能性。可见，同样的调节策略，调节效果的天花板受开环策略和参考输入的限制。

案例 4. 风电场间大规模并网难题

同步机组和水电机组是依靠机电电磁物理自然响应动态绑定发电机功角特性形成自同步。它在不同的发电机组并网时，能为电力系统提供强大的惯量从而构成实现并网稳定的物理基础。而目前，风力发电机并网运行的模式是通过测量频率，然后控制风电机组的功率输出具备与同步机组相似的惯性响应特性。

这种方式不能为电网提供实在的物理惯量，使得风机在提供虚拟惯量时始终依赖频率的准确测量，由此组成的电网也会因测量误差、时延以及扰动造成规模越大越脆弱的特点，极大地限制了风电并网

规模。鉴于系统的固有物理特性和网络的规模，反馈调节对此无能为力。要解决这个问题，只有设法改变目前的风机运行方式，以使其并网时能够为电力系统提供实在的物理惯量。这个问题目前还在研究中。

六、系统建模？还是控制设计？

第三节里，讲到控制理论视角时，提及对 Kalman 的理念的一类解读：将开环控制方式整个作为“系统建模”，于是得出调节器的设计是控制的本质认知。然而，从概念层面看，“建模”是对既有对象的一种特定语言体系（比如数学语言）的描述。没有建模对象，建模也就无从谈起。上述案例中，被“系统建模”覆盖的区域里含有最为深刻的控制设计，这种控制设计为随后的反馈调节提供了被调节的控制量。

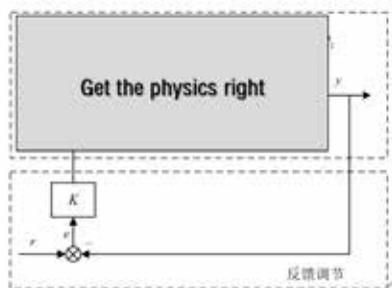


图 32. 揭开物理的盖子：里面有深刻的控制设计

案例 1 说明：开环控制方式的全新设计，是对炸弹投放控制方式的颠覆性改变。若依旧局限于导弹的控制方式，那么无论反馈调节如何先进，常规炸弹将依旧是常规炸弹，战争的巨大费用使得常规炸弹会一直服役到导弹变得廉价，它的低效率与高风险也将一直存在到那一天。

案例 2 说明：传统的矿难救援方式所面临的“与时间赛跑”难题使得一旦矿难发生，井下被困人员损失非常严重。这个困扰人类数百年的难题，仅凭救援控制中的反馈调节、甚至单凭设置地下紧急避难室都是无法克服的。最终，通过对受控对象的结构补偿获得破解！这个补偿中的结构，不仅包括避难室本体，更包括了生命支援通道的结构设计创意¹⁰。

事实上，这是控制设计，不是系统建模！

案例 3 则进一步说明了参考输入（许多时候，也称为控制指令）的修正与优化对控制效果的意义。“指鹿为马”方式里，无论怎样的控制指令，其作用都是负面的调节方式。而“引蛇出洞”方式中，反馈调节既可以在温和的控制指令指导下表现得较为正面，也可以在激进的控制指令下变得较为负面。而两种控制方式仅仅因为采纳了不同的滤波设计。参考输入优化对控制效果的意义可见一斑。这里的

¹⁰ 在《系统与纵横》2014年第1期《漫谈控制论之结构》中，除了本案例，还列举了很多类似的结构补偿案例，都是久悬不决的难题通过系统结构补偿获得轻松简单的解决。值得注意的是这些设计都是舶来的。哪怕是已经广泛应用、用以解决曾经让各方头疼的排队插队难题的结构补偿方案，也是如此。

“好坏”是针对是否有利于系统的可持续维系而言的¹¹。

案例4则给出了开环控制方式导致的系统反馈调节无法维持系统稳定性的一个示例。这是由于在现有同步控制方式下，系统平衡态在并网时缺乏物理惯量支撑，因而非常脆弱。大规模并网情形的平衡难以通过系统反馈调节维系。只有改变现有开环控制方式的设计，才可能获得实在进展。

我国占世界风力发电装机总量的40%以上，现有的电网尚未发展到以新能源为主体的新型电力系统阶段，仍存在大量的传统火电、水电机组，尚能平抑目前控制方式下风电并网带来的影响。若再不向电网提供实在的物理惯量，则越来越高渗透率的接入将会对电网运行稳定性产生很大干扰，因此其运行控制方式亟待获得突破性的创新。

综上，我们也可以得出这样的观察：当一种控制难题长期困扰着人类，它的突破一般都是由基础的控制方式设计上的改变与突破带来的。因此，必须摒弃那种以为反馈调节算法就是控制或控制的核心潜意识。

七、可改进控制效果的系统补偿和优化皆为控制

原教旨意义下的“控制”就是从外部施加于系统以影响其行为的举措。随着卡尔曼观点指导下的控制理论不断发展，反馈调节器设计成为控制的正统代表。这在很多时候就导致外界对控制专业产生了一种误解：控制就是一个调节算法。事实上，控制设计体现在系统设计中。系统中的控制系统的结构/控制方式才需要经典意义下的设计，而调节器的“设计”确实表现为算法的设置。

有趣的是计算机领域站出来宣称：给足够多的数据，我啥都可以做！一个以研究计算工具兼做软件而出世的学科，软件照做，具体领域也介入，智能系统、机器人硬件照上。

这样的现实值得我们深思。

有个现象令人忧虑。散人研究团队在研究以提高伺服控制的风能捕获率为目的的风机跟踪功率曲线修正时，尽管学生们电力杂志论文发表情况良好，却因没有反馈调节器设计，依旧遭遇盲审麻烦：标“题目是MPPT控制，内容却没有控制”！

为了避免诸如此类的误解，我们在关于大型风力发电机组风能捕获跟踪控制技术的专著出版时，于“跟踪控制”前加上“广义”。这让电力专业出身的编辑非常不解：“这就是控制，怎么说是广义的？”为了释疑电气工程同仁的不解，散人写了个后记：“关于广义跟踪控制技术的一点注释”。

¹¹ 关于指鹿为马的分析还可见《系统与控制纵横》2013年第1期的《杂疏：控制论与人（VII）完全能控性VS系统全驱性趣谈：隐藏在“指鹿为马”背后的控制学原理》。在那里，从另一个角度分析了它透出的控制学原理，揭示了系统全驱性具有的强悍控制力。



图 29. 总结团队研究工作成果的学术专著

后记：关于广义跟踪控制技术的一点注释^①

广义跟踪控制技术是指用以提高跟踪控制系统跟踪效能的相关系统设计技术。它不仅包括经典意义下的跟踪控制器参数优化设计，也包括控制器以外其它可调系统硬件参数与可控工艺参数的优化设计技术，目的是提高系统跟踪控制效益。^②

直到本书定稿的最后一刻，殷教授还在为书名是否加上“广义”二字推敲斟酌。在他看来，凡是可以提高风力机控制系统捕获风能效果的优化设计显然都是控制。对于电气工程师而言，这是无可置疑、自然而然的事情。然而，站在控制学科的角度，看上去却是另一种景象。记得 2013 年前，每当研究小组以风力机系统 MPPT 控制为研究课题的博士研究生在博士学位论文预答辩时，来自控制学科的教授总是很困惑：你们的控制究竟在哪？学生们的回答是：风电系统的跟踪控制技术研究都是这样描述的。回答没有错。这是事实。然而，问题并没有获得有效解释。同期存在的另一个事实是：论文盲审时，若非正好被送到风电控制专家那里，论文评审成绩则可能受到严重影响。^③

图 30. 关于广义跟踪控制技术的一点注释

为区别于经典跟踪调节器设计，我们将提高系统跟踪控制效益的各种技术，包括参考输入的修正和受控对象结构基于控制视角的优化设计等，统称为广义跟踪控制技术。它们可以是闭环，也可以是开环。

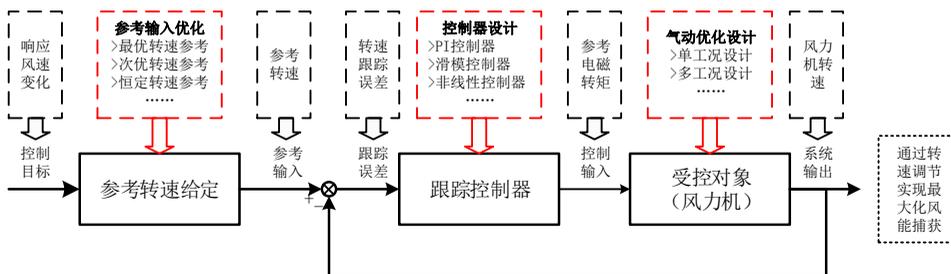


图 31. 控制学科视角下风机风能捕获广义跟踪控制框图

中低风速风场对风力发电机组风能捕获效率的影响是结构性的：中低风速动能大幅下降，风机叶片尺寸大幅增大，从而风机转动惯量增幅显著，导致动态特性严重恶化；另一方面，中低风速的风力变化多端。这个矛盾显然仅凭反馈调节已无法获得实质性改善。对此我们提出了相应的“广义跟踪控制技术”。实验表明：工业标准的 PID 调节器下，控制效益也获显著提高。

八、调节，还是控制？这是个问题！

控制是从外部干预受控对象以达成恰当目的、取得效益的一切举措。特别地，反馈调节效果的天花板受制于被其调节修正的开环控制方式。维纳认为：机器和有机体的结构本身是预定它能完成什么任务的一个指标¹²。这个观点清楚地表明，忽略了控制系统结构设计的调节优化无法解决由结构本身造

¹² 《维纳著作选》，钟铤，上海译文出版社，1978。原文是：Cybernetics takes the view that the structure of the machine or the organism is an index of the performance that may be expected from it.

成的控制瓶颈问题。因此，许多时候，久悬不决的顽固瓶颈并非由于调节理论的进步而突破，而是系统结构中控制方式设计获得改进才打破的。

激光制导炸弹的新型控制方式与地下人员升井通道+紧急避难室+生命支持通道的双通道结构补偿设计就是体现这一结论的最好案例。Get the physics right is right, 但 Physics 里除了开环受控对象建模之外，更有深刻的控制系统结构设计。显然，有结构的才需要设计¹³。因此，系统才需要设计，调节器需要的是算法。当然，设计不是建模。

调节，是控制的控制，本身就是控制，但就如学院也是大学，却未必一定要教育部御批更名为大学。真心希望专业基础教科书《自动控制原理》能更名为《自动调节原理》。至少，这可能使得控制理论的学生潜意识里形成“反馈调节”不是“反馈控制”的概念。这个概念的建立，将有助于摆脱“反馈调节器算法即便不是所有也差不多了”的不良潜意识而走向更加广阔的控制天地。

信息时代之父唯有维纳担当得起。他的《控制论》是开创信息时代的鸿蒙巨作。控制专业的人，应该规模性地走出 Cybernetics 中的 Control 大本营，成为解决实际 Cybernetics 问题的主力军。

致谢：感谢 2023 级南京理工大学控制学科博士研究生。他们在学位课程《控制论》上对学术理念柔和的坚持，促成了散人对调节和控制的本质差异的思考。任何时候，认真严谨的态度，坚韧柔和的坚持，才是学术的真正灵魂。

感谢我的学生、南京理工大学的殷明慧教授、蔡晨晓教授和中国矿业大学的马磊副教授！文中有许多观点，如第六节和第七节分别汲取采纳自他们于理论与工程的深刻洞见。感谢南京理工大学我的同事盛安冬教授和孙金生教授经常性的探讨和鼓励。感谢我的博士研究生郭连松为本文绘制了所有系统框图。

最后，特别感谢山东大学张焕水教授对“控制的本质”的深刻见解与富有成果的讨论！没有他最后的灵魂一击，散人至今依旧会处于理论与技术的分裂状态不能自拔，也就没有了本篇文章里技术与理论的对立统一。



【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。

¹³ 例如模型参考自适应控制、自校正控制以及其他智能控制方式对调节器参数作调节的原理结构设计，就是典型的系统设计。从其各自的经典控制框图的结构上看，它们都是经典反馈调节环节上补偿了用以调节调节器的补偿结构。然而，结构一旦确定，调节调节器的调节律设计就变成了优化算法问题。