



系统控制漫谈

杂疏：控制论·人（VIII）

静思2 反馈·结构@学习？ 还是创新？

邹云 南京理工大学

学习的过程，无疑就是一个不断反馈的过程。静思 1 中，相关分析指出：

经典反馈控制=开环控制+反馈调节。反馈调节的对象是整个开环控制系统。因此，经典反馈构架只是用以逼近“上帝视角¹”下某种最佳意义下的开环控制律。

这就决定了它在哲学上来说，只能调节额定开环控制，而不可能突破开环控制系统框架的桎梏。然而，人类通过学习却是可以创新的。本篇在静思 1 的基础上，探讨一个基本问题：

反馈是如何在创新中起作用的？抑或，怎样的反馈才可能导致创新？

How do you work?



- “智能控制”到底在做什么？
- 反馈是如何生成“创新”的？

图 1 反馈何以创新？

¹ 亦即，在全时间域上洞悉一切扰动和一切不确定性。

一、反馈是最基本的学习方式

教科书里，开环控制框图是：

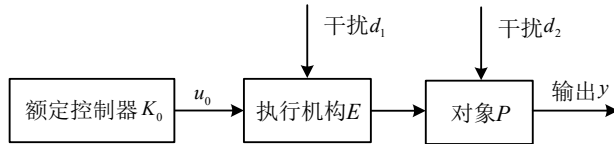


图 2 经典的开环控制框图

与它相应的闭环控制则是系统通过相对于参考输入 r 的系统偏差 e 的反馈，对额定控制器做调节将控制 u_0 调整为 $u = u_0 + \Delta u$ 。

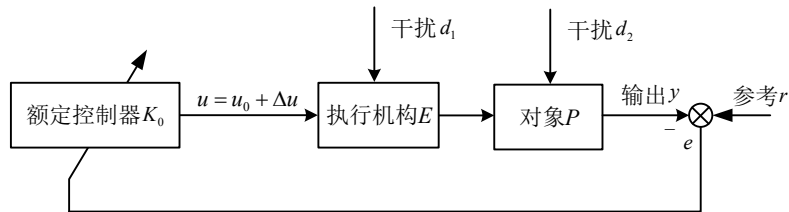


图 3 闭环控制框图

这个经典的反馈调节框图简洁明了地描述了典型的“学习”过程：从偏差中总结经验，调整策略以减少偏差，直至达成预定目的。

二、经典反馈只能逼近最佳、无法突破创新

为更加直观地说明问题，假设图 3 中的调节是线性的，则由迭加原理，可得如下框图：

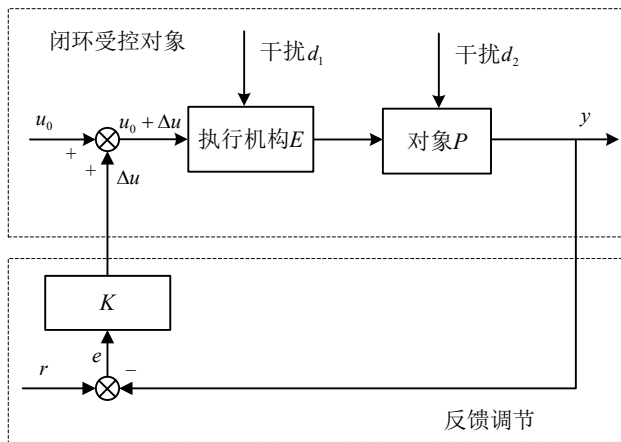


图 4 完整的闭环控制框图

这里, K 约定俗成成为反馈控制器, 其实它只是调节器。可见, 经典反馈控制构架就是对既有开环控制系统的控制量进行调节:

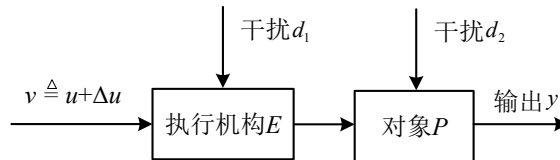


图5 等效的开环控制

显然, 其调节效果的天花板是“上帝视角”下实现开环控制的理想的控制效果 $r(t)$ 。事实上, 反馈调节其实是用以逼近这个天花板近乎唯一的有效手段。这也表明了这样一个事实: 经典的反馈构架只能调节开环控制律, 使之逼近该开环系统的预设控制目标, 而无法突破开环控制系统框架的桎梏获得“创新”结果。经典结构的反馈无法创新, 那么导致创新的反馈是怎样的?

三、案例分析: 系统结构改变导致创新的产生

依旧考察静思 1 中的案例: 矿井救援。传统的矿井救援方式参见图 6。显然, 这一构架下, 无论怎样“神”的反馈调节都将不过是使得人员升井通道的掘进救援抵达时间逼近理想情形下的最快值, 改变不了“与时间赛跑”的救援本质。

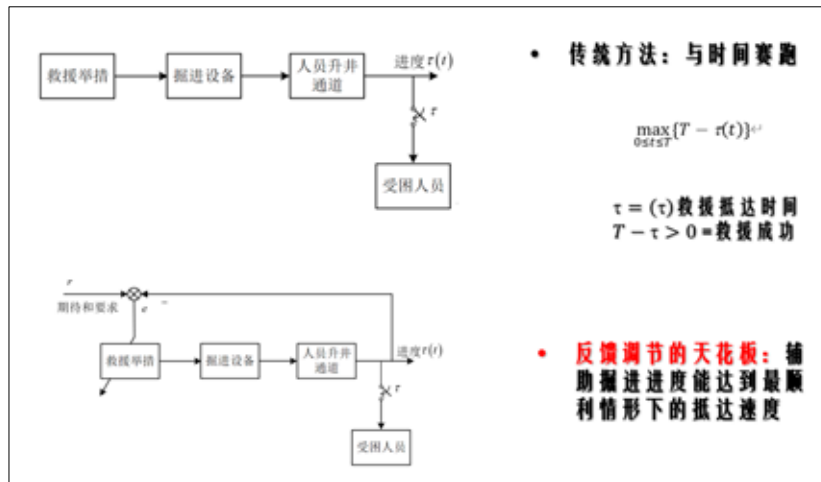


图6 传统救援方式

然而, 2010 年震撼世界的智利救援方案, 采取了地下紧急避难室+生命支援通道掘进的补偿结构 (参见图 7), 一举改变了传统方式与时间赛跑的顽疾, 使得井下受困人员在地质情况复杂, 人员升井通道掘进几度严重受挫的情况下, 在井下安然舒适地度过圣诞节, 创造了历经三个月的等待全员升井的人间奇迹。

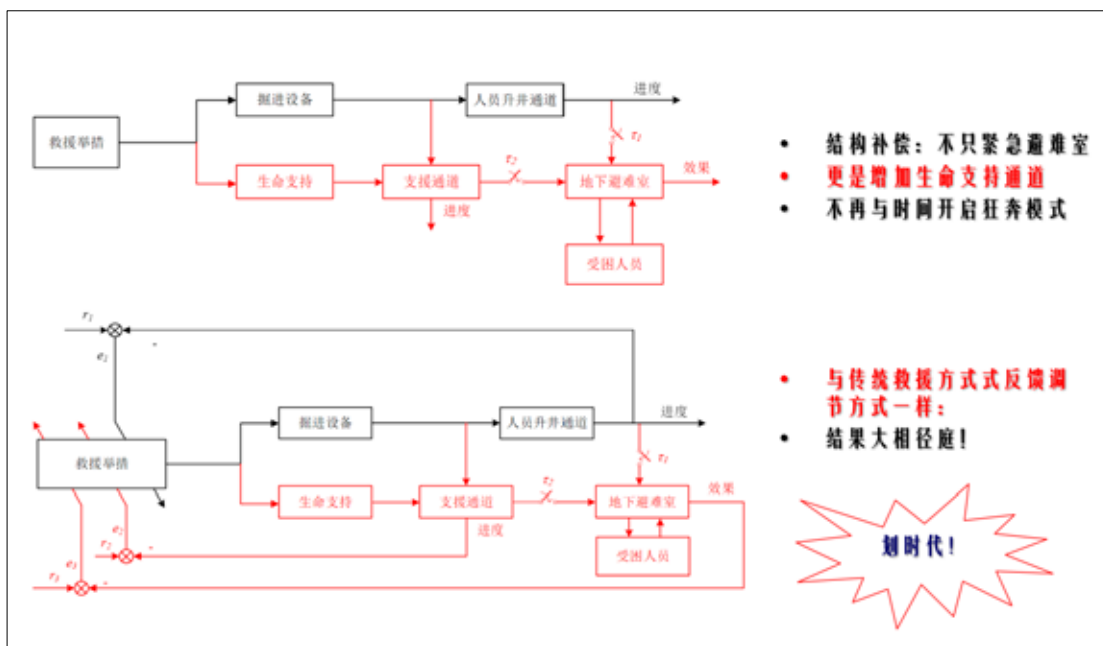


图7 智利救援方案

这个案例表明：创新来自于对原系统的结构补偿，具体参见图7中的红色部分。也即开环控制系统的结构产生了实质性改变。这是通过优化调节律算法无法获得的进展。相反，由于不再需要与时间赛跑，反馈调节受到的约束获得了极大的松绑。

再看一下激光制导炸弹。这使得廉价的普通炸弹具备可高空水平高精度投弹的特性，这一直是人类空中打击力量的梦想。由于高空水平投弹毫无精度可言，因而不得不发明低空俯冲轰炸机，以非常危险的方式提高投弹命中率。即便导弹被发明了很久，对提高普通炸弹的命中率也毫无启迪。直到简单的激光捕捉器被安装到炸弹上，通过感应激光束并计算出运动差角、调整炸弹尾翼以改变炸弹落点的被动制导原理被提出后，这个梦想才得以实现。具体参见图8。

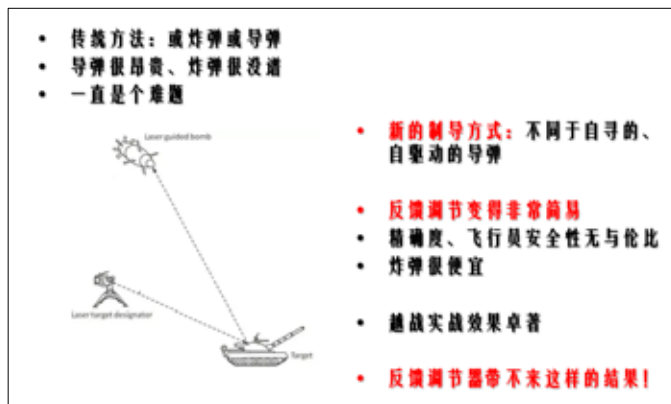


图8 激光制导炸弹制导原理



值得一提的是，这个颠覆性的创新，并非是在传统导弹的制导框架下，通过提高和改进反馈调节器的性能获得的。相反，与自驱动、自寻的导弹相比，这个方式下的反馈调节任务变得非常简易。与矿井救援一样，它依旧是改变了开环控制方式/结构而得到的。

这说明，系统结构的调节不同于开环控制量的调节，它可以产生突破原有结构桎梏的新结果。经典的反馈调节构架里，反馈调节被局限于开环控制量，而非开环控制系统结构、或者说开环控制方式。因此，它的作用从根子上就被囿于开环方式能达到的理论效果范畴，失去了创新的可能。

那么，系统结构在控制中起着怎样的作用、处于怎样的地位呢？让我们回归控制论，看看鼻祖维纳是怎样说的。

四、寻根控制论：维纳论系统结构

在《人有人的用处》(*Human Use of Human Beings*)中，维纳明确指出：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. 按钟韧先生的翻译：机器或有机体的结构本身是预定它能够完成怎样任务的一个指标²。

换言之，自行车的结构注定无论怎样的反馈调节，它都是简易的人类地面代步工具，不可能用来登月飞行。

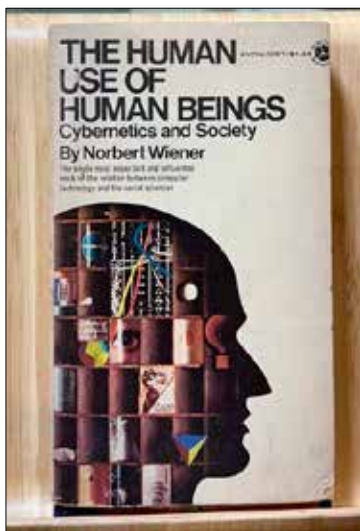


图9 维纳的控制论科普著作

显然，图4所示的经典构架与下图等价：

² 钟韧，维纳著作选，上海译文出版社，1978。这里，不推荐陈步先生的译本《人有人的用处》。以现代控制术语看去，陈步先生的译文较为生涩难懂。

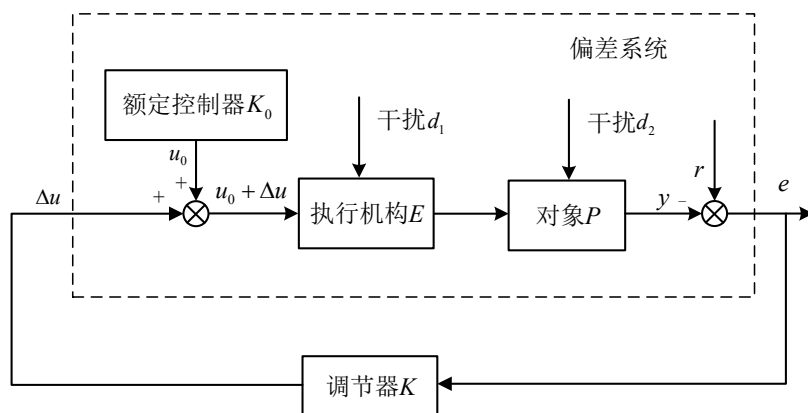


图 10 反馈调节问题

它通常被简记为:

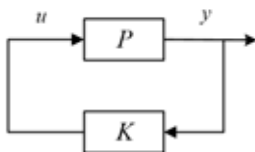


图 11 反馈调节问题简图

这里, P 是偏差系统。这个框图里, 通常会将整个开环控制系统视为“系统建模”。也即排除了开环控制系统的设计。它假定开环控制系统是确定的、不在系统设计之内, 问题只是怎样对之进行恰当的数学描述。也即, 将开环控制方式整个作为“系统建模”, 从而, 将控制设计转化为反馈调节器的算法设计, 并得出调节器的设计是控制的本质的认知。这里, 卡尔曼的一段话经常被引用:

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

然而, 一如静思 1 中所指出的那样, 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, 而非系统结构设计。显而易见的是, 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新的可被调节的控制量, 转而规定了调节效果的新上界。

某种意义上说, 导致经典构架的反馈控制产生实质性创新的不是调节器 K 的确定方法, 而是偏差系统 P 的结构新设计。也即, 卡尔曼是在说: 物理是设计问题, 数学是优化算法。设计之后, 是优化。不同的优化目标, 不同的用以确定调节器调节律的数学算法。这里, 系统状态或输出的稳定化也被视为是一种系统特性方面的优化目标。

可见, 要创新, 就必须根据偏差去调整系统的结构, 向结构的调整索要创新! 事实上, “解放思想、突破固有思维定势是创新的前提”早已是人类的认知论共识。这里, 固有思维定势, 作为机器化思维, 主要体现在系统的既有结构设计框架。

众所周知，尽管目前智能控制的智能几乎都是囿于闭环控制中的反馈调节器的智能化，还达不到矿井救援和激光制导炸弹案例中的创新开放度，但相对于固定调节律的调节器来说，这已经是一项重大的创新。那么，这种创新是不是也伴随着系统结构的改变呢？

五、智能控制中调节器的设计手段：结构补偿

首先，看看自适应控制。它有两种经典的构架：模型参考自适应控制（图 12）和自校正控制（图 13）。显而易见，系统的结构被明显改变了。和矿井救援一样，红色部分的结构被补偿到了经典的反馈调节系统。

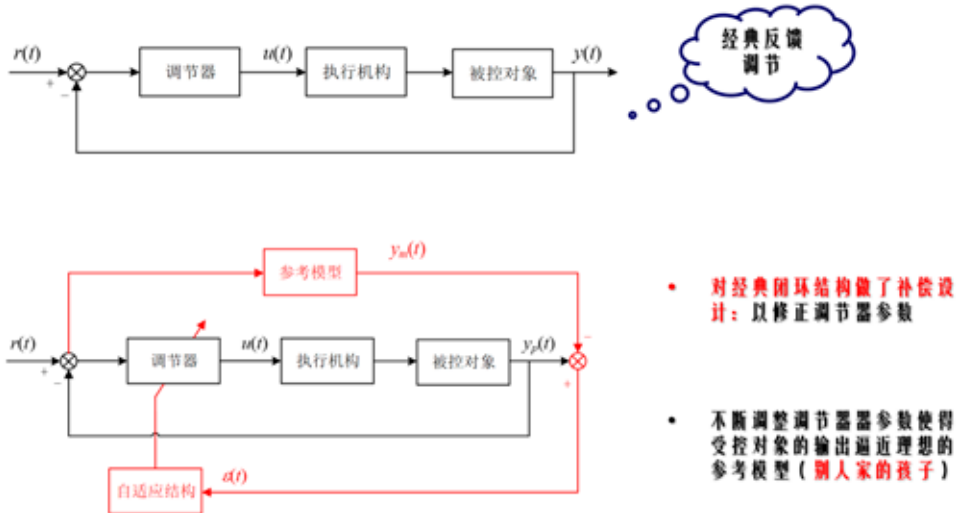
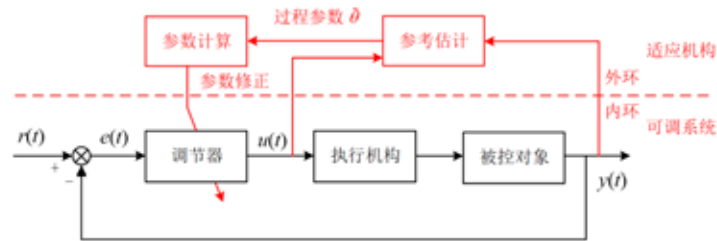


图 12 模型参考自适应控制



- 通过在线辨识受控对象参数调整调节器参数，取得好的调节效果
- 对经典闭环结构做了补偿设计：以修正调节器参数

图 13 自校正控制

图 14 是从网上随机选出的两种智能控制框图。从中可以清晰地看到，依旧是对控制系统做了结构补偿。

更多的例子不胜枚举，但其中的共性是一致的：对经典闭环结构做了以修正调节器参数为目的的补偿设计。这些设计，深刻地印证了维纳关于系统结构的观点。也即要实质性创新，必须从系统结构的调节入手。

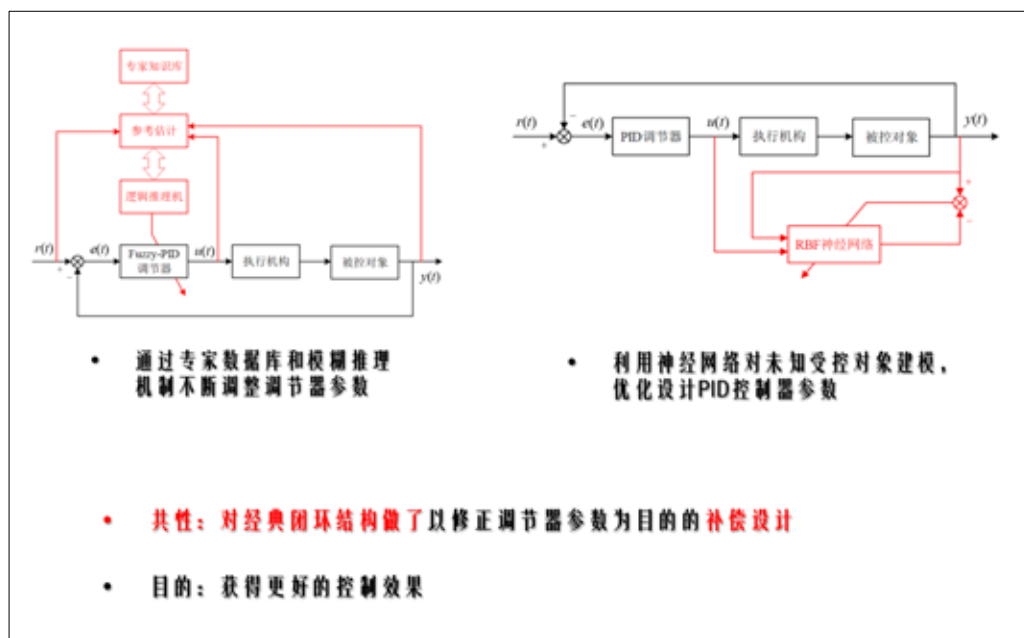


图 14 两种智能控制的原理框图

六、一类机器辅助创新的可解释方案设想

前面的分析表明：机器创新必须将系统的结构作为反馈调节的对象。然而，做到这一点并不容易。依照可解释性原则，如图 15 所示，这就要求实现如下三个问题：

(1) 结构的代数描述

参照经典的函数泰勒展开与傅里叶展开，这在数学上相当于要求寻找到一种“元数学描述”，具有下述特性：结构简单，这类元描述的恰当组合可以近似描述具有任意拓扑结构的动态过程。目前，神经网络元对略去拓扑结构的动态过程的描述具有类似的特性。

(2) 代数描述可调节

组合可以被充分调节。也即对于任意给定的具有拓扑结构的动态过程，从任意的一组组合出发，存在一种组合系数的调节方式获得达到给定过程的一组近似描述。这样，反馈可以起作用。

(3) 代数描述拓扑还原

给定一组组合描述，可以获得一种动态过程的拓扑实现。这样可以对反馈调节的结果进行解释，并

转化为系统设计。

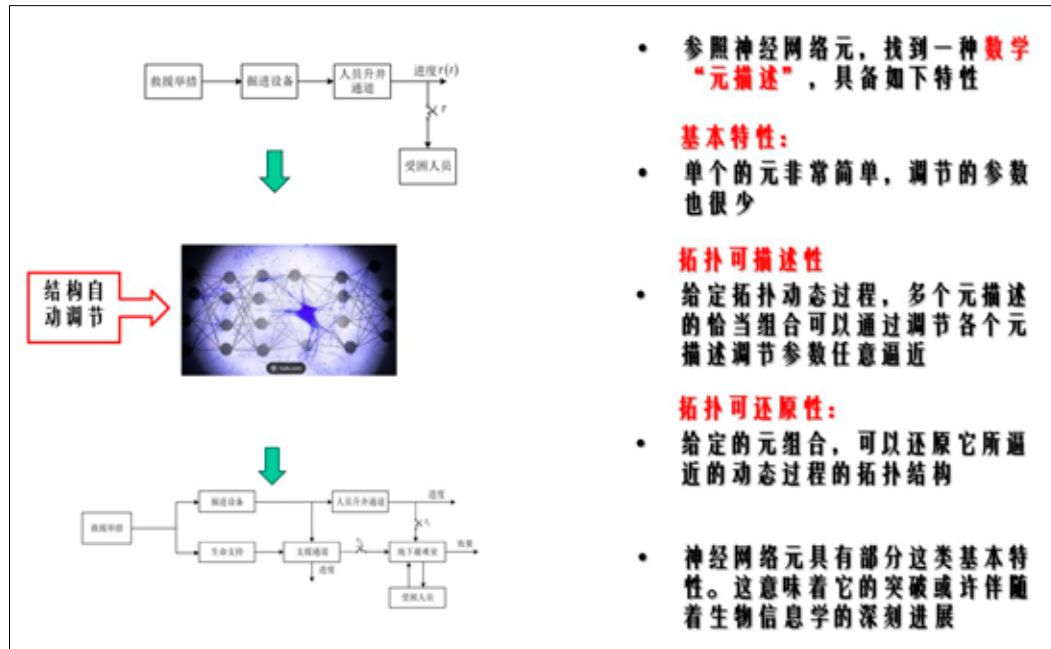


图 15 带有拓扑结构的动态过程的元数学描述及其组合

这样，如图 16 所示，在上述数学描述基础上，模仿人的创造性思维过程，可以给出一种三层机器实现程序。

(1) 内层优化、传统智能控制

内层，也即常规运作层。在初始控制方式下作调节器的智能优化设计。

(2) 外层创意、天马行空

外层，也即分析创意层。接受内层的问题反馈，以多种手段，如内层数据反馈驱动、统计分析随机试验、事件触发新机理发现的介入……，调节结构参数，生成新的动态系统描述。

(3) 夹层检验、由外及内

夹层的设置很重要。获得新的初始创意描述后，需要进行结构还原和系统实现，并对其内层模拟运行校验，找出其中有意义的新结构，提交给内层。

目前，包括适合函数逼近的各种数学展开与动态过程逼近的神经网络元在内各种元数学描述，都对拓扑结构的描述、逼近和调节无效。此外，在还原是实现方面，即便是函数逼近，也是缺乏直接有效的方法的。通常手段是截断形成一组有限元函数组合，再从感兴趣的函数类里寻求最某种最优逼近解。现阶段的 AI 控制的不可解释性，应该与此有关³。

³ 据网易新闻今年初的一则报道：普林斯顿大学和谷歌 Deep Mind 学者用随机图作工具从数学上严谨证明了“大语言模型（LLM）不是随机鹦鹉！规模越大能力越强”是有理论依据的。哪里使用的“随机图”起到了这里所说的关于结构的数学“元描述”的作用。本文投稿时，网易尚未报道这则新闻。

当然，并非所有任务都需要可解释性，一如人类的思维出新过程。只有那种必须实现为具体系统用于实际运行的任务（如矿井救援或者激光制导炸弹），才需要完全的可解释性。这类可解释性，也并非必须如上述方案显示的那类完全可解释。在动态迭代中逐步地动态实现解释也是一种可取方式。

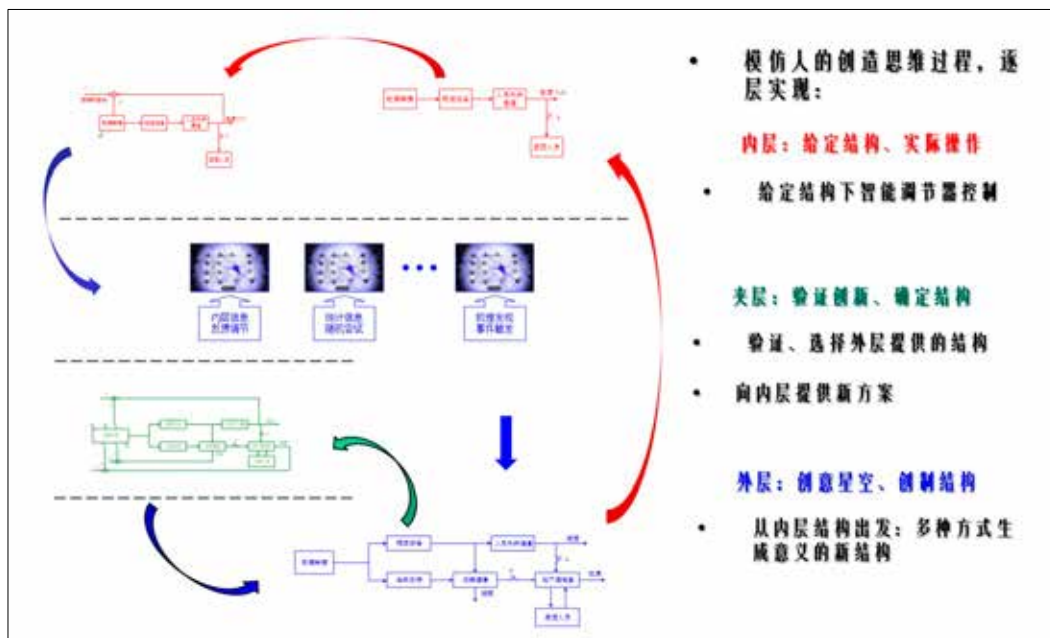


图 16 一种机器创的三层实现设想

七、若干分析总结

本篇静思从维纳的观点出发，结合具体案例分析得到如下观察：

(1) 创新自动化的硬核在于对象系统拓扑结构的推演出新。关于系统结构的恰当数学描述则是问题的本质。

(2) 函数逼近论在数学上很成熟，但具有对拓扑结构的动态过程的逼近，在信息领域尚未有报道。AI 领域的最新进展中，随机图理论似乎起到了这种数学描述工具的作用。

(3) 当下智能控制仅针对反馈调节器的智能化，而在现有理论中调节调节器的调节结构是固定的。这种调节调节器的调节结构的多样化，定义了诸多不同的智能控制。

(4) 当前基于深度学习的 AI 技术遭遇的可解释性困境，很可能是无法从神经元还原具体系统结构造成的。如前所述，最新的进展表明它正在被撬动。而方法论正是本文提出的框架。

(5) 智能技术，一如人类生物智慧，它们的存在并不必须由可解释性来维系。