

杂疏：控制论·人（VII）

完全能达性vs系统全驱性趣谈：

隐藏在“指鹿为马”背后的控制学原理

邹云 南京理工大学

控制论，也即动物与机器中控制与通信的科学。——诺伯特·维纳。

指鹿为马，非常荒谬，却不断再现于历史。这就引出了两个问题：荒谬却存在，其存在机理是什么？谁在荒谬？

关乎动物和机器的控制与通信，最典型的莫过于人和人类社会。那么，关于指鹿为马，从控制论视角看过去会有怎样的诠释？这个世界，有太多的东西，我们耳熟能详，却未必知其真谛。我们需要探索。

“熟知非真知。”——黑格尔。

一、系统行为完全能达性与系统的全驱性

教科书中，系统的完全能达定义于状态空间，全称为系统状态完全能达。这个概念耳熟能详，看上去平淡无奇。典型的闭环控制系统如图2所示。

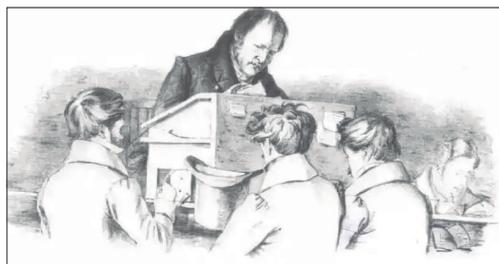


图1 黑格尔：熟知非真知

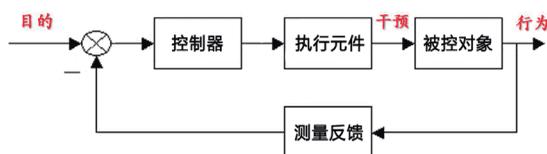


图2 闭环控制框图



图3 系统控制的行为模式描述

简化结构，则它的行为机理为：采取恰当的干预措施，以影响系统的行为，使其逼近预设的目的。

凡能近似描述被控对象行为模式的模型，均可用于控制设计。这在本质上是黑箱方法。图3中所示的行为是状态空间法之下的描述。系统完全能达性就是定义在状态上的。现实社会中，系统内部状态有一个很恰当的天然解释：心理/思想状态。

显然，相对于行为而言，除非十分简单的人和系统，如头脑非常简单的人和线性定常系统，否则状态的完全能达是非常困难、甚至不太可能的。这也是有实在作用的状态完全能达性概念至今依旧局限于线性定常系统的缘故。

与系统行为完全能达性密切相关的一个概念是全驱系统。全驱系统是这样的一类系统，“它们贵族般地存在，其基本的物理特征是其每一个自由度都是受控的。”^{1,2} 例如，机械臂的每个关节都安装了一个驱动电机；卫星的俯仰、偏航和滚动方向上都有控制力矩的飞轮等。

显然，系统的全驱性在理论上等价于通过恰当的控制即可对冲抵消掉受控对象的原有运动特性，并藉此重构一个预设的理想系统行为动态，从而必然是行为完全能达的。因此也可以说：系统的全驱性是系统行为在物理容许范围内完全能达的一类充分条件。

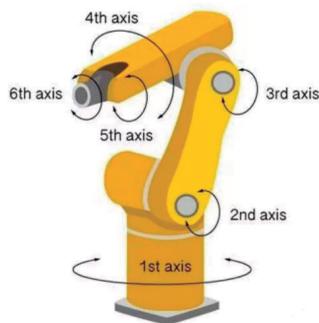


图4 全驱：每个自由度都受控

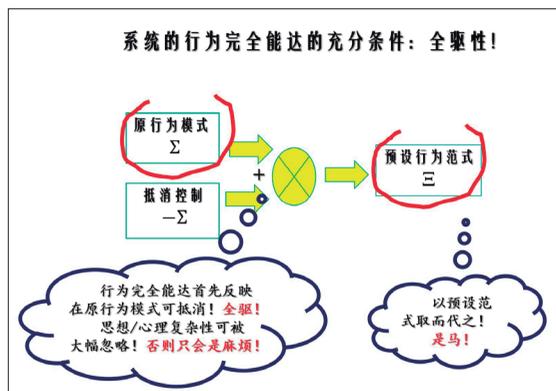


图5 强大的系统全驱性

二、指鹿为马：成就系统行为的完全能达性！

指鹿为马很荒谬：指的人知道那是鹿。边上的人也知道那是鹿。双方都知道对方都知道自己知道。然而，指的人说是马，边上的人也附和着说是马。系统行为完全能达！

那么，不附和的呢？这得问指鹿为马的发明者赵高了。当然，除了清洗还是清洗。于是系统

¹ 段广仁，摘取控制科学皇冠上的明珠——两种方法论的优势与希望，2021年院士大会报告。

² 关于全驱系统更为深入的展开，可参见第六节内容。不过，第六节只是对全驱系统控制的一点个人解读，数学公式许多，或许还偏颇谬误丛生，只为内容更加完整而添加。



图6 指鹿为马：系统行为完全能达！

被改造，每个自由度都被有效受控，从而行为完全能达。赵高荒谬么？并不荒谬，他只是想驱动系统成就指哪打哪的行为方式。

事实上，这是一种控制策略。通过这种策略，赵高们构建了一个之于他们而言，其行为可被任意驱使的系统。这样的策略对系统行为的驱动效应之强，堪称无以复加。因此，借用系统全驱性³概念，这里将之称作系统全驱化策略。

这就是指鹿为马不时在历史上冒出的控制机理所在。它并不荒谬。

三、指鹿为马的极端案例：鸣镝箭

历史上，就全驱化策略而言，指鹿为马的表现形式是多样的。其中最极端的一例就是“鸣镝箭”。这个故事出现在历史剧《汉武大帝》⁴中，尽管并非史实，它反映出的控制机理却是非常经典的。

故事是说匈奴王子伊稚斜地位岌岌可危，他的父王军臣单于很可能不会传位给他。这时，他命人打造了一种射出去会在飞行过程中发出声响的箭，称为鸣镝箭。伊稚斜要求他的卫队：他的鸣镝箭射向哪里，他们的箭就齐射向哪里。

有一天，他突然把鸣镝箭射向他最喜爱的战马。卫队条件反射地立即射向战马，那些顿了一下才射的当即被斩杀。又有一天，他毫无征兆地暴起将鸣镝箭射向最宠爱的妃子，卫队亦然。但还是有几个犹疑了一下，被斩杀。这一天，伊稚斜将鸣镝箭蓦然射向的是他的父王军臣单于！卫队当即箭阵齐射！待反应过来发生了什么时，伊稚斜已宣称继承了大单于之位。



图7 完全能达性？行为吗？好可怕！

故事中，莫名射杀爱马，无端射杀爱妃，犹疑者还被斩。很荒谬。可真的荒谬么？显然，荒谬表象的后面是通过不断的清洗队伍，使得卫队的行为变得完全能达！它并不荒谬。

这是一种极端的全驱化策略，促成系统具备行为的完全能达性！



图8 伊稚斜的鸣镝箭

³ 段广仁. 高阶系统方法- II. 能控性与全驱性. 自动化学报, 2020, 46(8): 1571-1581, <http://www.aas.net.cn/cn/article/doi/10.16383/j.aas.c200369>

⁴ 参见<https://www.shicehao.com/g2022110312300640b5.html>

四、指鹿为马的高级境界：司马昭之心

与鸣镝箭的暴戾血腥相比较，司马昭之心则高级得多。司马昭之心，看上去也很荒谬：谁都知道，可谁都不能说。都知道，说出来怕什么？不怕！但就是不能说！不然，就算你是皇帝，照杀！



稳定控制：不许说穿！“谎言重复一千遍也成不了真理，但重复一千遍还不许戳穿，大部分人就会当成了真理。”_戈培尔

图9 司马昭之心

本质而言，这也是一类系统全驱化。不同于赵高指鹿为马的粗暴直白，更不同于伊稚斜鸣镝箭的暴戾血腥，它始终游走在能稳的边缘：有点像钓鱼，鱼知道被钩住了，却挣扎无效。钓手并不猛拽，他担心拽得猛了会断线。他也不放纵，他知道稍微放纵，鱼会脱钩。就这样，鱼在无尽的憋屈中耗尽力气，最终被拖上了岸。至于鱼钩之外的旁观者，久而久之，也就认为一切是理所当然。

问题是：伊稚斜与司马昭，谁的全驱掌控更强？显然，司马昭若想暴力篡夺，实力绝对是支撑他的。他也没有伊稚斜地位不保的危机四伏。反之，伊稚斜做不了司马昭的事，他实力不足。由此，司马昭之心蕴含了伊稚斜鸣镝之力。

司马昭之心，让你知道，不让你说，荒谬吗？真不荒谬。它很高明。

显然，无论赵高、伊稚斜，还是司马昭，形形色色的指鹿为马，是以超强的系统控制力为基

础，目的则是构建一个指哪打哪的行为完全能达系统。也即任何自由度都有控制力存在。如第一节所述，这类系统的一个典型代表就是全驱系统。

这个特性显然就是指鹿为马作为控制策略的核心作用所在。

五、控制的核心：状态？还是行为？

维纳控制论的本质，是行为主义的目的论。其最终目的不是影响系统的状态，而是调节或左右系统的行为，使之达到预先指定的行为方式。因此，控制的原教旨核心不是状态，而是行为。

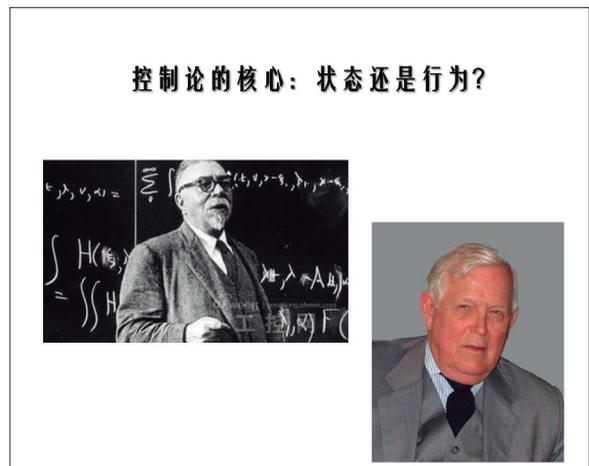


图10 状态？还是行为？That's the question!

(1) 有效的行为控制力之下，才会有状态控制的艺术。

亦即，行为控制力才是控制的根本。为生动计，这里以网络热点小说《紫川》的故事情节为例加以诠释。

这部小说里，最强战力的魔族意外地突破了人类世界的天堑壁垒瓦伦关，一马平川地面对紫川帝国，帝国的覆灭就在眼前。这时，青年将领紫川秀要去瓦伦关外的远东，深入敌后牵制魔族。

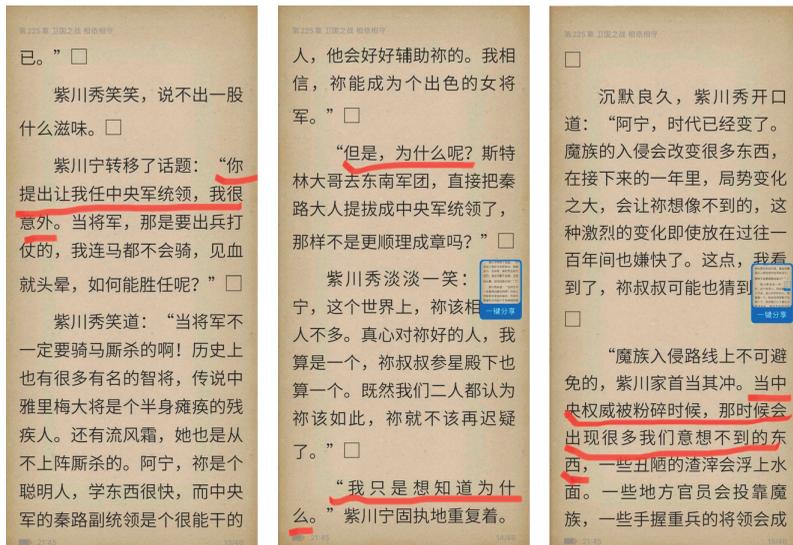


图11a 《紫川》片段1

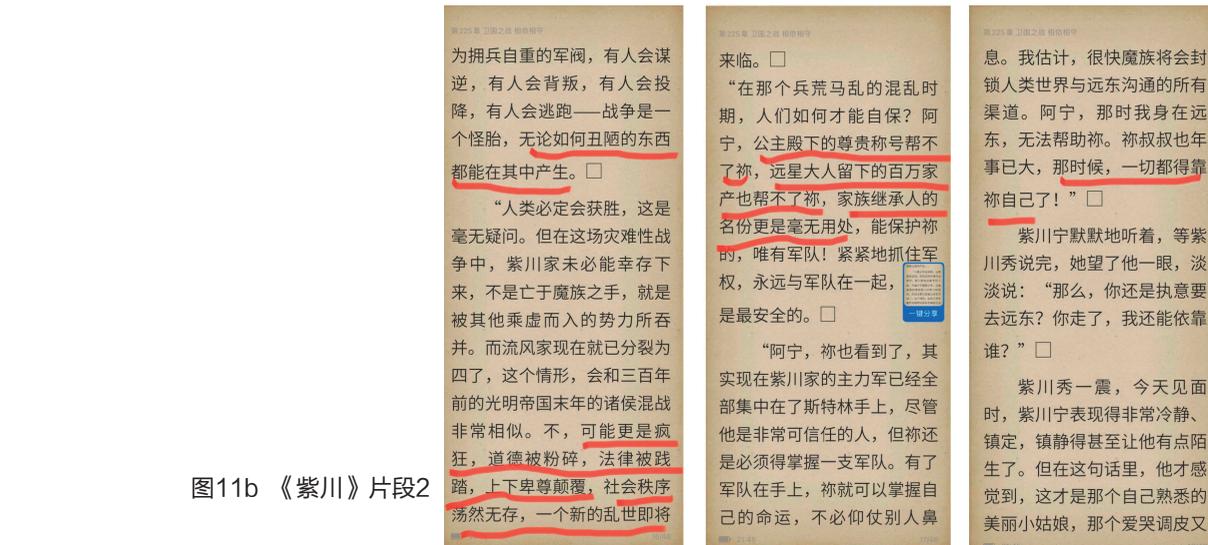


图11b 《紫川》片段2

临走，他提议紫川家族唯一的继承人、少不更事的紫川宁公主出任中央集团军的司令。期待他的秀哥哥留下护卫帝都、护卫她的紫川宁，彷徨无助，伤心不解，于是发生了这样一段对话。对话内容具体参见图 11a、图 11b。

这段对话里，紫川秀指出帝国秩序一旦被魔族冲垮，各种背叛、各种平时难以想象的意外情况都会发生。这个时候，家族的威势、公主的身份、皇家的财富、平时忠诚无比的臣下……都不再有

用、也不再可靠。可靠的，唯有自己掌握的力量。尽管这力量已经不可能支撑对整个系统的全驱化，但从此出发，即使不能重整山河，也可自保。

可见，系统全驱化的程度是对系统进行控制总体设计的根本：控制力才是控制的根本。有效的控制力之下，才有状态控制的艺术。

(2) 行为掌控的不达之处，是专注状态的不得已而为之。

换句话说，行为掌控力是系统控制的硬核。

这里，依旧以网络热点小说的情节为例加以诠释。《紫川》中，由于紫川家族最高层的猜忌，远征军面临触犯兵家大忌的双指挥核心的分裂局面，部将白川将军的愤懑不平被紫川秀厉声呵斥，委屈无比，伤心离去。出于不忍，紫川秀叫住白川，说了这样一句堪称经典的话：“傻丫头，别伤心了！知道吗？重要的不是我应该做什么事，而是我能够做什么事。”

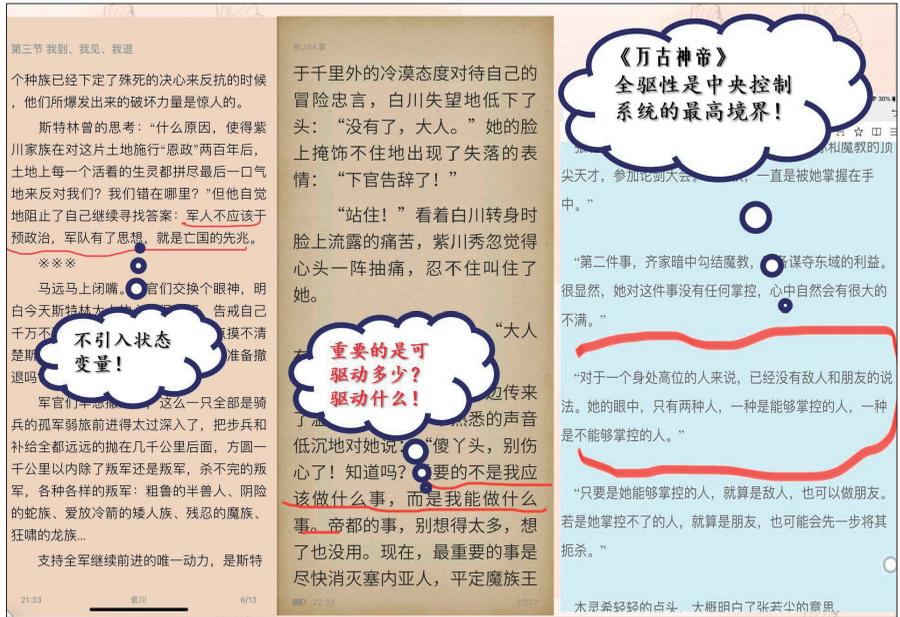


图12 控制的硬核：行为掌控力

遇到危机，重要的是可驱动的是什么？然后才是应该驱动哪样？怎样驱动？

在另一部网络小说《万古神帝》中，男主角若尘对困惑不解的同伴木灵希说了这样一段话：“对一个身处高位的人来说，已经没有敌人和朋友的说法。她的眼中，只有两种人，一种是能够掌控的人，一种是不能掌控的人。”

的确，高高在上、实力无匹的女皇并非黑白不分，而是要统掌全局，主导应对各种内外危机。对身处高位的人来说，任何时候，控制力才是硬核。只有控制力不逮、又无法简化局面时，才会不得不在态势上造势的状态调节上尽力而为。

至于后面的一段关乎帝王之术的剖析，那就是典型的系统全驱化策略了。这种全驱化策略，在封建皇权的社会里，是历代雄主不可不谙熟于心、雷厉于行的帝王控制策略。目的很简单：就是构建一个具有行为完全能达性的系统。

(3) 控制的硬核：行为？抑或状态？终究还需具体问题具体分析。

行为和状态的区分不是绝对的，不同的问题里，有不同的作用和意义。



图13 道可道

系统的完全能达性的确是耳熟能详。然而，若是限于状态，而是扩展到行为上，现在还会被认为是平淡无奇吗？

任何时候，感觉很荒谬，拿荒谬却偏偏还大行其道，荒谬的是觉得荒谬的人。真正的荒谬，必然不合逻辑，因而是不会存在的。



图14 原来荒谬的是我

世界不荒谬。人生也不荒谬。人活在这个世界上才是荒谬的。——加缪。



图15 怎么会荒谬还存在的？

因此，面对存在，越是有荒谬感，越要弄清其存在机理。机理清楚了，阻断这个存在机理，荒谬才会成为真正的荒谬从而不再存在；阻断原有存在机理并对之进行补偿进而生成新的机理，才会成就新的存在；只有新的机理逻辑恰当而运作稳健，期待的新存在才会成为有意义的现实。

这就是控制科学的精髓所在。它很朴素。



图16 控制的精髓很朴素

六、全驱化的内核：依旧的经典控制？抑或一种新型控制？

本节的内容并非科普。准确点说，只是对全驱系统概念的一点个人解读。感兴趣的读者，请阅读相关的专业学术论文，以免被误导。

如前所述，全驱系统是这样一类系统，它们贵族般地存在，其基本的物理特征是其每一个自由度都是受控的。例如，机械臂的每个关节都安装了一个驱动电机。这等价于可彻底抵消受控对象的运动特性，从而重构一个预设的全新或理想系统行为动态。

全驱系统的数学定义是一切可通过等价变换和变量消元化为高阶系统。

$$A_m x^{(m)} + A_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + A_1 \dot{x} + A_0 x = Bu$$

其中 $x \in R^n$ 为系统状态变量， $u \in R^n$ 是控制输入， $A_i, i=0, 1, \dots, m$ 和 B ($\det B \neq 0$) 为适当维数的实系数矩阵。显然对这一系统，选取控制律

$$u = B^{-1} \left[\sum_{i=0}^{m-1} H_i x^{(i)} - (A_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + A_1 \dot{x} + A_0 x) - v \right]$$

式中 $H_i, i=0, 1, \dots, m-1$ 为任何给定的定常矩阵， $v \in R^n$ 为一外部信号，则可彻底抵消受控对象原有动态得到预设的理想闭环：

$$x^{(m)} + H_{m-1}x^{(m-1)} + \dots + H_1\dot{x} + H_0x = v$$

形象地说，赵高和伊稚斜上来就要打造类似这样的系统：彻底抵消掉受控对象的原有行为模式，强迫其表现为他们预设的模式。司马昭复杂一点，但实质上还是可化为类似的系统。

为了避免使用复杂的高阶系统符号，这里采用下面的简易数学描述代指全驱系统：

$$\dot{y} = P + u.$$

这里， P 是受控对象实际行为模式。设 M 为 P 的数学建模。则反馈控制是

$$u = -M + G + v.$$

这个反馈用以抵消受控对象的行为模式 P ，从而强迫系统行为服从理想的预定行为模式 G 。当然，这类抵消控制策略一般不可能随心所欲。毕竟 M 不是 P ，即便是对象特性重构的不同步： $M_t = P_{(t+\tau)}$ ，也会对全驱系统的抵消控制成败产生致命影响。特别地，系统全驱控制力一旦衰弱，往往导致系统全面崩溃。

很有趣的是，这样的控制策略下，相应的闭环系统将再次回归为经典的鲁棒控制问题：

$$\dot{y} = G + \Delta + v.$$

这里， $\Delta = P - M$ 作为不确定性物理意义十分明确。它就是对实际受控对象 P 的建模偏差。经典控制方法是：针对 M 设计控制策略 $K(M)$ ，然后用 $K(M)$ 去实际控制 P （因为 M 只是替代对象 P 以得到 $K(M)$ ），因此要求标称控制 $K(M)$ 对 $M + \Delta$ 具有鲁棒性以保证对 P 的有效性。

而全驱系统不同。这里的控制策略首先是



图17 彼得大帝改革



图18 王莽新政

$u = -M + G$ ，这样全驱控制之下的闭环受控对象不是 P ，而是 $G + \Delta$ 。理想情形下， $\Delta = 0$ 。然后，系统设计是针对预设系统 G 的 $K(G)$ 。具体的控制设计中， Δ 有着明确的具体结构特征。

段广仁老师说 G 一般可以构建成线性定常系统，从而极大地延拓线性系统鲁棒控制理论的应用⁵。然而，以散人的视角看过去，全驱控制带来的新意远不止如此。因为非常意外的是： G 是可以随意设计的，因此以它作为加强应对 Δ 的一个手段，大有可为！

值得特别指出的是：同样的全驱系统控制，实现的理想系统 G 不同，来自 Δ 的不确定性的影响可能大相径庭：或可消弭而趋于平稳，又或受到刺激而失稳爆发。令人不禁想起彼得大帝“用野蛮制服了俄国的野蛮⁶”的改革和王莽强加的 G_w 是复古西周礼制，其不确定性效应也大相径庭。

毋庸置疑，这是一类全新的控制。它针对 $\Delta = P - M$ 的内在结构特性，构建与之匹配的理想模型 G ，结合针对 G 设计的常规反馈控制器 v ，使

⁵ 段广仁，摘取控制科学皇冠上的明珠——两种方法论的优势与希望，2021年院士大会报告。

⁶ 马克思语。参见<http://mooc.chaoxing.com/course/65458.html>

⁷ 王莽的“新朝”是试图对没落的西汉社会进行全面改制，但方向是复古西周时代的周礼制度，以图达到其治国安天下的理念。参见<https://baike.so.com/doc/1728296-1827217.html>。

得控制趋于预期效果且运行平稳。

因此，可以预期系统全驱控制会有三个基本问题：

(1) 首先是系统全驱化策略问题：也即如何将系统化作全驱系统？

赵高、伊稚斜和司马昭都是在做这件事情。

显然，这是个历史悠久的控制问题，然而却是个全新的理论问题。具体反映在：必须研究给出系统具有全驱性的各种简单实用的充分与必要判据。同时也要研究给出简单实用的全驱标准型实现方法以便构建抵消控制。这个基础上，给出将欠驱系统补偿为全驱系统的方法。

(2) 抵消控制偏差 $\Delta = P - M$ 的极小化和稳健化：

这首先是个数学建模的精度与模型实现的技术问题。必须全面深入地分析掌握受控对象 P 的解构特性，优化实现抵消控制中的 M ，保障全驱控制的硬核基础。

(3) 预设理想模型 G 及其反馈控制 v 的一体化设计：

这首先是个理论问题。针对 $\Delta = P - M$ 的结构特性，优化设计与之匹配的理想模型 G 和反馈控制 v 。这个问题很有挑战性，必须针对各类重要实际工程问题，做符合工程实际的抽象与探索。

可见，无论理论体系还是方法论内涵，全驱系统控制都是一种新型控制。然而，全驱系统控制，却也是司马昭们运用老到的经典控制。这个意义上说，全驱系统控制依旧是一种经典控制？抑或一种全新的控制呢？都是！

控制论，也即关于动物和机器中通信与控制的科学。——诺伯特·维纳。

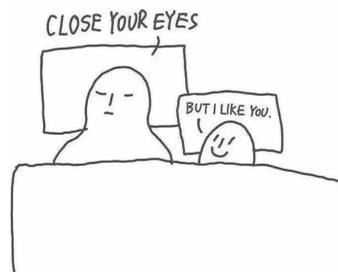


图19 全驱控制策略：经典耶？全新耶？



【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。