

# 控制论与一般系统理论——一门统一的科学吗？

(控制论应作为综合性的科学教学基础)

Joseph P. Mc Cool\*

本文建议控制论与一般系统理论作为统一的学科用作科学教学的一种统一的语言和方法。从目前的情况看，我们学校的科学教学是按分割的、实际上是零碎的科目来讲授的。控制论与一般系统理论已发展出许多跨学科的科学概念，这些概念可以用于很多学科中。因此，一旦把这些概念运用在科学教师的语言中，它们可以作为贯穿许多科学领域概念的一条红线，而有助于向学生说明科学中的完美统一性——模式和结构的统一性。

## 1. 引言

### 1.1 序

人类思想从不可分论的“线性因果论”向着“网路(系统)因果论”的相应转变，为今后具有生气的前景提供了一个基本前提，为此，数学方面应起到协调者(Pacemaker)的作用<sup>[1]</sup>。

说我们生活在一个科学的时代已经是陈词滥调了。然而，从相对意义上来讲，科学是现代的现象。罗兹(Rose,<sup>[2]</sup>)的文章表明在以往所进行的全部化学理论研究中有23%是在1957到1961年间进行的。

科学似乎是以指数方式增长的<sup>[3-6]</sup>。由单一的古希腊爱奥尼亚人的自然哲学做为发端，科学已经像一株大树一样成长起来了，不断地向着深度和广度发展，学科和专业不断增加。在十五世纪前，数学和物理学是作为同一门学科存在的，而化学直到十八世纪拉瓦锡(Lavoisier)的工作才独立起来。最可观的发展时期可能发生于十九世纪到二十世纪。生物学就是那时走向独立的，同时，形成一大批学科和专门化领域：核物理、电子学、优生学、细胞遗传学……。

Meadows<sup>[9]</sup>指出，专业化的划分的不断增加，可能出于两种因素：(1)保持所有普通科学领域并驾齐驱变得更加困难了；(2)思想的流派不同，形成了不同的专门领域；我们还可以加上第三点；(3)针对具体问题而形成了专门化。

随着科学领域的不断扩展，其每个专门分枝都发展了它自己的研究领域。它们都各自清晰地划定并定义了自己的狭窄区域。为此而采取的手法之一，就是发展深奥的术语，以致生理学家和力学家无法真正地交流信息。

### 1.2 控制论与一般系统理论是一门统一的科学

虽然有各种特定性和明显的不衔接性，但科学还是有统一性的<sup>[6]</sup>。如果不是其他理由，那么这是一种从自然界普遍存在的模式和结构的一致性由科学而导出的统一性<sup>[7]</sup>。这是一种在科学概念化的共同逻辑结构<sup>[8]</sup>中生动地以同构形式表现出来的统一性<sup>[9]</sup>。

Assimov<sup>[10]</sup>把科学比做为一个森林，这是一个有说服力的隐喻性说明，如果同大多数森林一样，科学也可以在概念上划分为一系列“林”带。专业工作者总是想达到那幽暗的深处，生活在树的根部当中去，而“科学通才”<sup>[11]</sup>则企图寻求一个能够鸟瞰全局的制高点。控制论和一般系统理论提供了这样一个制高点。

控制论提供了一套概念，这套概念由于与科学的各个分支有着确切的相应关系，从而能使这些分支建立起确切的互相关系<sup>[12]</sup>。

反馈就是这种概念的一个例子，它可以应用于经济学<sup>[13]</sup>，社会学<sup>[14]</sup>，生物学或工程学。

控制论之所以能够具有这个多学科性的品格，主要归因于对大脑和人工智能的研究。这些学科存在着激烈的争论并受到错综复杂的主观主义，意识形态和人的本性等哲学问题的困扰。在探讨大脑时，控制论工作者不得不努力在哲学上寻求中立——他们不得不发展那些科学上是客观的，有效的和严密的方法。当控制论者遇到问题时，他们可以用数学进行分析，“什么是它的功能，而且在对待它如何具有这种功能的问题上没有先入为主的想法<sup>[15]</sup>”。

因而在一定控制论中，那些组织形式是在独立于它们的载体(carrier)的情况下进行研究的，所以从一定意义上来说，控制论的系统就是在不同的、往往相去甚远的科学学科之中所定义出来的共同系统模型<sup>[16]</sup>。

### 1.3 科学的统一化

我们需要一个更简单的，更统一化地研究学科问题的方法。我们需要能够掌握科学而不是单单掌握某一专门的学科的人。一句话，我们需要“科学通才”。

假如各个学科的逻辑结构(framework)能够从它们的实际内容材料中辨明和分离出来，那末这种统一化就会更容易地实现<sup>[11]</sup>。

\*爱尔兰都柏林 Trinity 学院教育系

现在，控制论是一种跨学科的科学。正是这种“逻辑结构”也就是各学科内部组织上的内容，组成了现代控制论学科。

1.3.1 没有别的地方比在学校里看到人为地把科学进行分割的现象更为清楚了。物理是由一位老师在一间实验室里讲授的。而他的同事通常在不同的场合作为完全单独的学科来讲化学。致于生物学则又留给姑娘们去讲。

那些显然是并行的课题在不同的学科中以很少或根本没有交叉的方式来讲授，不必要的重复异常明显。典型的例子，就是按指数增长问题(参见2.2)、广义的惯性问题或众所周知的与生物和物理控制系统中反馈有关的同构系统(Isomorphic systems)。

正是由于利用了所有这些并行性并使用一种共同的术语来描述它们才存在着科学上统一化的可能性：“世界的统一概念不会建立在最终把现实的问题(levels of reality)归结为物理问题(level of physics)的那种可能落空的，因而当然也是在牵强的希望上面，而可能建立在不同学科领域中那些法则的同构性质上面”[9]。

本文的目的就是要说明控制论与一般系统理论不仅是统一的科学，而且是具有进行统一能力的科学。做为统一的科学，它们提供了一般系统跨学科的概念。它们提供了一种能够用来作为综合科学教程基础的方法论(实际上是一种语言)如果教师在讲授自然科学时能够用控制论和一般系统的概念来进行的话，它将有助于减轻人为造成的支离破碎现象，而这是我们教学体系中的一个固有问题。正如 Clark[17]所指出的，这种贯穿于我们教育体系中的支离破碎现象就是造成现代教育危机的主要原因。

## 2. 关于教学内容的某些建议

### 2.1 序

控制论已经在教育的过程中有所应用。它已经在有关组织方面给人以启示[10-21]，而且在教学机器[22]的设计方面作出了贡献。它在学习过程问题上，提供了深入的见解[23]。在本节中我们将简单地提出某些有助于建立一个综合性教学内容的某些想法。

出于启发性的考虑，首先探讨某些对于用定量描述的学科有用的控制论观点，其次再考虑某些用于较强的定性表示的控制论观点，前者在本节内介绍，而后者则在第三节内介绍。

### 2.2 系统

用控制论术语讲课时，最核心和最重要的控制论概念之一，就是系统。Ashby[1]定义系统为“变量表”。

Klir和Valach[16]通过下式来定义

$$S = \{A, R\} \quad (1)$$

式中的{A}是元素(或变量)的集合，而{R}是它们两者之间关系的集合。这种系统的特性可以用Ashby在参考文献[12]中第一部分提出的方法来描述。

### 2.3 指数律增长

用一个增长速率为 $\dot{n}(t)$ 的细菌培养过程为例来说明(其中 $n(t)$ 是在时间 $t$ 时细菌的数量)。已知：

$$\dot{n}(t) = kn(t) \quad (2)$$

式中 $k$ 是满足下式解的常数

$$n(t) = n(0)\exp kt \quad (3)$$

对某一分辨水平[16]，这个系统相当于

$$A = \{n, n, t\} \text{ 和 } R = \{n' = kn\}$$

其中 $k$ 可以作为一个参数，系统可以用下图来模拟， $k$ 便是一个具有二维矢量输出( $\dot{n}, n$ )的确定性机器的输入。



这个系统在任何给定时间上的状态，由模型的输出给出。当系统状态按一系列的高散步改变时，每步末的系统状态( $n', n'$ )可以从以前的状态按1:1映射得到：

$$n \rightarrow n' \text{ 其中 } n' = n \exp(kT) \quad (6)$$

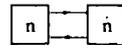
其中 $T$ 是一步的时间

$$\dot{n} \rightarrow \dot{n}' \text{ 其中 } \dot{n}' = Kn \exp(kT) \quad (7)$$

这个系统的运动学图形为：

$$(n, \dot{n}) \quad \circ \rightarrow \circ \quad (n', \dot{n}')$$

而直接效应图：



概述了系统以后，就可以讨论它的行为特性(可以按稳定性角度)的一些问题了。系统的某一平衡状态可以定义为不变状态。根据(6)式它应为：

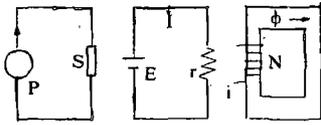
$$n' \rightarrow n \quad (8)$$

可以清楚地看出，没有这样的平衡状态，因而，系统是不稳定的。

2.3.1 上述例子当然是一个经典的例子。即使是年轻的学生都会很快地认识到它与其他一个大范围的系统是同构的。

生物老师可以用上面的方法解释细菌学系统的机制，而一个物理老师可以使用这种同样的概念和术语描述一个物理系统，例如，放射性衰变，或是受热物体的冷却速率。如果能这样做的话，则在两种场合使用同样的语言这种做法，将在学习者的头脑中产生一个统一的过程。

### 2.4 广义欧姆定律



上图示出了三个不同的，但是同构的系统。(i) 一个泵(压力为P)在一个有效阻力为S的管路中使水循环，所得到的流量是f; (ii) 一个电动势E推动电流I通过电阻r; (iii) 一个磁动势(N, i)驱动磁通沿着磁阻为l的闭合磁回路通过，其中N为线圈的匝数; i为电流通过的安数;

$$A_i = \{P, f, S\} \quad (9)$$

$$A_{ii} = \{E, I, r\} \quad (10)$$

$$A_{iii} = \{N, i, l, \Phi\} \quad (11)$$

上面的集合描述了系统内部的变量。变量间的关系式如下式所示:

$$R_i = \{P = fs\} \quad (12)$$

$$R_{ii} = \{E = Ir\} \quad (13)$$

$$R_{iii} = \{Ni = \Phi l\} \quad (14)$$

上述三式都可以用下图来模拟



显然，如果以参数r作为系统参数(ii)时，象其他系统一样它符合Ashby的“确定性机器”的定义，因而任何特定的电压均将被映射到一个唯一电流值上。

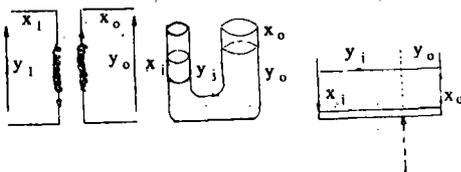
通过使用控制论和一般系统理论的术语来描述这些系统，本来是可以找出它们间的同构性质的。

### 2.5 广义化模型单元

模型化的思想是控制论的核心。正如大多数系统理论学者们所认识的那样(文献16、78页图4.1)，控制论模型是广义化的，它们是可应用于很多学科的模式。因此，把模型化的概念作为一个教学工具特别合适。

下面我们仅举几个在学校科学教学中常常可以用来阐明概念的广义模型例子。

(i) 广义化变压器，在这个单元里我们可以看到电具有两个子系统：一个初级系统(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>)和另一个次级系统(x<sub>o</sub>, y<sub>o</sub>)。



广义化关系式是

$$x_i y_i = x_o y_o \quad (15)$$

(ii) 广义化变换器，用这一种元件把一种形式的能量转换为另一种形式的能量，例如：唱机的磁头，热电偶，肌肉等，例子是很多的。

(iii) 广义化放大器，它们都具有输入、输出，以及一个提供无限能量的能源。当一个无线电的接收机，作为一个放大器来看待时，电磁波是它的输入，声波是它们输出。输入变量的变化形式与输出变量的变化形式应是一样的，但输出里含有更多的能量，因为它已被放大了。

电子的和气动的放大器，是众所周知的，不太熟悉的有生理学<sup>[23]</sup>，控制系统<sup>[1,2]</sup>或生物学中的放大器。肌肉和神经元，也可以认为是放大变换器。<sup>[24]</sup>

(iv) 势能和动能系统。势能单元凭借着某一变量的量值来存储能量，最熟悉的例子是悬挂在一定高度(变量)上的某一质量。其他例子还有充电电容器，通电的电感，贮存在人体内部的脂肪或糖份等。在势能单元中，还包括能子单元，它们凭借某变量的变化速率贮存着能量，例如凭借运动在体内存贮能量。

(v) 广义阻抗。它是一种对起着阻止某一变量流动作用的分量的模型。在化学、水力学、经济学……，都能找到这类例子。

### 2.6 其他例子

还有广义惯量或广义时间延迟等等。实际上，可以列出一大套完整的清单。使用这些单元概念和始终考虑它们的所有同构性质还要做许多工作，才能制定出一个综合性的科学教学计划。

## 3. 定性问题

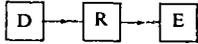
### 3.1 调节

上述例子，对于那些存在着严格的定量法则的科学领域(如物理学)提供了一个很好的教学方法。

对生物学那就不是这样了。对生物学而言，数学分析还没有取得多少进展，因此，在学校中讲授的生物学，多为定性的和描述性的，而不是定量的和分析的。生物学课程，通常进行的是对细胞、进化和遗传等事物的描述，很少进行定量分析<sup>[6]</sup>。

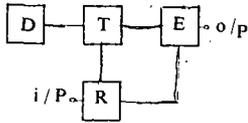
然而，生物学也可以用系统理论的观点来探讨，一个有机体可以看成是一个子系统，一个心脏，一个细胞或一个物种都可以看成是一个系统。

在性格形成学说(ethology)中经常遇到的目标的寻找特性，可以参照马尔柯夫机器的“搜索和保持”(hunt and stick)特性来模拟(Ashby<sup>[1]</sup>和Pacc<sup>[2]</sup>)。生物体中<sup>[7][25]</sup>的调节作用，可以根据Ashby的广义调节器按下图建模。图



中代表来自周围环境的扰动,  $E$  是将被控制的“主要变量”的集合,  $R$  是调节机构。

蒸气机的转速调节器 ( $R$ ), 防止了负载波动 ( $D$ ) 对转速 ( $E$ ) 的影响, 具体说来, 反馈调节可按下图来模拟:



图中  $T$  可以代表某一机器或有机体;  $R$ 、 $D$  和  $E$  的意义仍如前所述;  $i/P$  是变量  $E$  的某一集合值,  $o/P$  是最终得到的值。

在 *Alveolar* 通气调节中<sup>[29]</sup>,  $T$  代表小槽而  $D$  可以代表负荷的增加或空气中氧含量低时对系统的需求。系统的输入和输出由矢量 ( $O_2, CO_2$ ) 输入和 ( $O_2, CO_2$ ) 输出组成 (*Mackean* 27)。

调节器和控制的概念渗透在生物学的整个内容里, 从一个有机体的内在过程的调节到一个生态系统内的生殖控制。

必须强调指出, 无选择性的将工程概念应用到生物学的情况下是隐藏着危险的。只有极度的谨慎和仔细的分析才能避免许多可能的失误<sup>[15]</sup>。

用于描述这些过程的概念性模型, 也适应于整个科学范畴内的相似的“有组织的机构中”。

### 3.2 信息论

信息论的一些概念是与控制和调节的概念有联系的。可以使用它们来建立基因和脱氧核糖核酸 ( $DNA$ ) 分子功能模型。由于由这种分子所携带的信息是腺嘌呤, 胞嘧啶, 胸腺嘧啶和鸟嘌呤的排列顺序和样式的函数, 所以所表现出的种类数量以及所携带的信息就可以令人满意地应用 *Ashby* 的方法进行讨论 (做为例子可以参看他的“序列矢量”<sup>12</sup>) 就脱氧核糖核酸状态来说, 种类越多, 所携带的信息也就越多。

同样, 神经功能也可以从信息论的角度来讨论。现在已经有了抽象的模型和具体模型<sup>[16]</sup>。Bateson<sup>7</sup> 曾经设法把信息论的概念扩展来讨论动植物世界里的对称和不对称性问题。

## 4. 讨 论

在上面几节中, 我们只给出了怎样发展综合性科学教学方法的粗糙轮廓。下列各点必须进一步明确:

(i) 控制论与一般系统理论二者都是年轻的学科, 在他们有可能成为一种综合的教学语言之前, 在技巧方面 (*mechanics*) 目前还要做大量的工作。

(ii) 在教育体系中使用这些理论的危险, 是它们会退化到成为另一个纯理性的课程。本作者的意见是, 控制论应分散地贯穿到整个教学内容中。它可以提供一种语言; 一种解决问题的方法论和一个广义的阐述科学的综合途径<sup>[30]</sup>。

(iii) 在使用同样的语言来描述生物系统和物理系统两者的机理过程中, 人们采用了不被注意的哲学假说, 即假使生物和物理的机理是可以比拟的。Sommerhoff<sup>[15]</sup> 已经指出了某些方面有生命特性与机械特性的区别。

正如 Weiss<sup>[1]</sup> 所阐述的, 只有当我们对世界的认识系统化的时候, 才是真正可信的。“系统化”意味着从整体上而不是通过分解或一点一滴的方法去观察世界。利用个别的和分割的科学知识来观察我们的世界, 所获得的概念是支离破碎的, 是不能使人信赖的, 因为它是不系统的。

……世界是一个整体, 各种事物都是互相联系的, 而为了恢复这个整体, 我们要用综合的方法, 例如用系统学说的思想方法可以解决这个问题。<sup>[30]</sup>

人们当今或比以前任何时候都更加面临着全球性的和生态学性质的问题<sup>[31, 32]</sup>。在我们人类社会周围环境里一个变量的变化意味着整个生态学复杂网络的复合体的变化。

只有具有通观全局的观察和必要的科学综述能力的科学家, 才能具有解决人类今天面临的生态问题。正如 Bode<sup>[11]</sup> 说过的, 世界需要“科学通才”。

把控制论的方法论与雅典性的教育模式 (即强调普遍的概念和思维习惯, 而不是专注于技巧和具体的装置上面) 的结合, 有可能成为用来推动建立一个渗透着为人类更大利益服务的人类哲学的统一的自然科学知识结构一个强有力的因素<sup>[33]</sup>。

参考文献 33 篇 (略)

李洵、李春茂 译自《*Kybernetes*》1980年 Vol.9. pp.

67~73

张钟俊校