

自然控制论*

Natural Cybernetics

曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 研究员、中科院院士 北京 100029)

一、自然控制论的定义和发展

人类在发展的历史中,不断适应和认识自然界,也不断自觉或不自觉地利利用和改造着自然环境,其中包括局部地改善自然环境,也包括局部地甚至是大规模地破坏自然环境,使自然环境不利于人类和许多生物物种的生存。自世界进入工业化、尤其是晚近半个世纪以来,由于人类科技进步所带来的巨大生产力(同时也伴随着巨大的破坏性、毁灭性的力量),促使人类兴建了许多对自然环境有重大影响或改变的工程,且是以空前巨大的规模在自觉或不自觉地进行着。但由于人类对自然环境的维持和演变的规律性还缺乏认识,更由于人类社会尤其是国际间的剧烈竞争而对资源和环境实施大规模掠夺,致使全球规模的大气、海洋、陆地的污染以及环境生态的破坏已经成为当代以及未来的最严重的问题之一。人类生存和持续发展迫切需要解决这些问题,所以“环境和发展”已成为当代国际政治经济的一个热点,也引起大批自然科学家和社会科学家的高度重视,并从一般意义上提出“可持续发展”、“社会和自然环境协调发展”等概念和模式,以推动解决这些问题的具体研究。从自然科学的角度看,这就是人类在认识、利用和影响自然环境的同时,必须合理地、最优地规划人类本身的活动,以达到对自然环境的负面影响最少,而正面影响最多,简而言之,即是对自然环境进行合理的或最优的调控,使自然环境和人类沿着“合理的”或“协调的”方向演变。研究这类科学问题本质上属于“控制论”(Cybernetics, Wiener, 1948)的范畴,故不妨称之为“自然控制论”(Natural Cybernetics)。显然,这是人类最伟大的控制理论,也是规模最宏伟的控制工程。

尽管“自然控制论”一词最近由我们在中国首先提出,但有关的一些具体实际问题在国内外早已

提出并被有关的一些学科在研究着。从全球性的环境保持和调控问题来说,在最近 10 余年来,国际上已形成了几个庞大的国际研究计划,甚至在有关问题的初步研究成果的基础上,国际上已达成了政府间的公约和协议,例如“气候框架公约”、“保护臭氧层公约”、“保护生物多样性公约”、“21 世纪议程”,以及由于执行“全球变化研究计划”等的结果而可能很快出台的关于限制能源消耗、减少污染和保护包括海洋在内的全球生态环境的公约或国际准则,这些都有限制人类活动的具体规定(例如限制污染源、限制排放二氧化碳、氟利昂以及限制土地利用和生产活动),以求全球气候和生态环境在可容忍的范围内变化。毋庸置疑,执行这些国际研究计划,结果必然会引出或形成共同的问题,形成统一的观点和普适的方法论,形成既交叉又独立的学科。

自然控制论产生的另一个也是更直接更广泛的来源,乃是各国经济建设和改造自然的活动中必然出现的涉及环境的许多工程问题。例如水利工程、港湾工程、治沙、水土保持、营造防风林、海岸带开发利用、改良局地气候和人工影响天气等等;甚至农业、林业和渔业的规划,它们直接面对的就是自然生态环境系统、或是已经人工改造过的生态环境系统。

总之,一门新的学科——自然控制论正在酝酿之中,即将兴起。自然控制论研究自然环境的自控行为与人工调控的机理以及人工调控的理论、方法和技术。它用统一的观点、理论和方法指导研究与调控自然环境各种过程有关的众多具体问题,并发展相应的工程技术。正像把众多的工程控制技术的研究上升到工程控制论一样。自然控制论的研究具有基础和应用双重意义。

建立自然控制论不仅时机已经成熟,且具迫切性。实际上,自然控制论是许多学科的交叉点,它涉及水利科学、大气科学、环境和生态各学科、控制论、数学、力学、物理学以及工程技术学科等。这些

* 本文是在作者 1994 年 2 月中国科学院大气物理研究所“自然控制论和实用非线性复杂性研究中心”成立暨学术研讨会、1995 年 3 月香山科学会议第 29 次学术讨论会上所作的两次报告的基础上写成的。

学科现都已有长足的发展,为研究自然环境的调控问题打下了足够的基础。不过,自然控制论不论从其研究对象还是理论方法上又都不是上述各学科自身所能包容得了的,它是复杂的交叉,且最终必将发展成独立的学科,在科学上成为一个新的生长点。

二、自然控制论核心问题的一般提法

上节我们已经说明,自然控制论研究的最终目标,是实现对自然环境的合理或最优利用和调控,以求自然环境和人类自身沿着“合理的”或“协调的”方向演变。因此,自然控制论的核心问题就是研究、发展解决这类问题的理论和方法。从理论上说,其数学表达的一般提法可以简述如下:

设我们所欲利用或调控的自然环境的一部分变量及与之有相互作用的变量全体为集合 $X(P, t)$, 它随空间点 P 及时间 t 而变, 设 X 由 m 个分量 $X_i (i=1, 2, \dots, m)$ 所组成, 即 X 为一依赖于 P 和 t 的 m 维向量:

$$X(P, t) = [X_1, X_2, \dots, X_m]^T. \quad (2.1)$$

又设与之有关的人类活动或即人文变量为 $Y(P, t)$, 它是一个 n 维向量, 其分量为 $Y_j (j=1, 2, \dots, n)$,

$$Y(P, t) = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]^T. \quad (2.2)$$

这些变量直接或间接地作用于自然环境变量 $X(P, t)$ 之上, 从而改变着或即扰动着 $X(P, t)$ 的演变过程, 于是自然环境 X 的演变同时由其自身及人文变量 Y 所决定, 这种演变过程的规律性由微分方程 (一般常是偏微分方程) 所制约, 即

$$\frac{\partial X}{\partial t} = L(X, Y, t); \quad (2.3)$$

还有初始条件

$$X|_{t=t_0} = X^{(0)}(P), \quad (2.4)$$

以及边界条件

$$\Delta(X, Y, t)|_{\partial\Omega} = G, \quad (2.5)$$

其中 t_0 为研究该自然环境过程的起始时刻, $\partial\Omega$ 为所研究的自然环境空间 Ω 的边界, $X^{(0)}$ 和 G 为已知函数(向量), 而 L 和 Δ 为某些算子。

显然, 人类活动受其自身的能力例如经费所限制, 因此, Y 受其某些泛函或范数 $\|\cdot\|$ 所限, 即

$$\|Y\| \leq C, \quad (2.6)$$

其中 C 为限制常数; 或者人类要求改变后的自然环境距离人类生活最适宜的自然环境条件 X_p 相差较小, 即 $X - X_p$ 的某种范数 $\|\cdot\|_p$ 要满足一定的限制条件

$$\|X - X_p\|_p \leq D, \quad (2.7)$$

其中 D 为限制常数。

自然控制论就是要在满足 (2.6) 或 (2.7) 或

(2.6) 加 (2.7) 的限制条件下, 寻找一种合理或最适的人类活动 Y , 使得其某种社会—经济效益最优, 这个效益自然是由改变后的环境变量 X 和人文变量 Y 所决定的, 即是其某种范函, 记作 $G(X, Y)$, 于是我们要求

$$G(X, Y) = \text{最优}, \quad (2.8)$$

其中“最优”的意义可以是“最大”(例如经济效益最大), 也可以是“最小”(例如经费耗费最小, 或污染程度最小等等)。

对每个具体问题, (2.1) — (2.8) 有其具体的表述内容。我们将在以下几节给出一些具体例子。

三、具体问题举例(一)—— 最优航道工程和最优水利工程

设在水库或港湾容积空间 Ω 内要挖掘一条通航航道, 如图 1 所示。设在某点 P 和时刻 t 的单位面积和单位时刻的挖泥率为 $\dot{z}_b$, 又单位挖泥量的工耗(资金)为 $R_1(P, t)$, 则在时段 $t \in [0, T]$ 内在此水库或港湾 Ω 内挖泥的总工耗应满足不大于工程的总投资量 C , 即

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_1(P, t) \dot{z}_b(P, t) d\Omega dt \leq C, \quad (3.1)$$

其中 $\dot{z}_b(P, t)$ 待求, (3.1) 就是本问题对应于 (2.6) 的限制条件, 此外, 为了通航的需要, 水深必须大于某个限制深度 $h_p(P, t)$, 即

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_2(P, t) (h_p - h) d\Omega dt \leq 0, \quad (3.2)$$

其中 R_2 为权重函数(详见下述)。

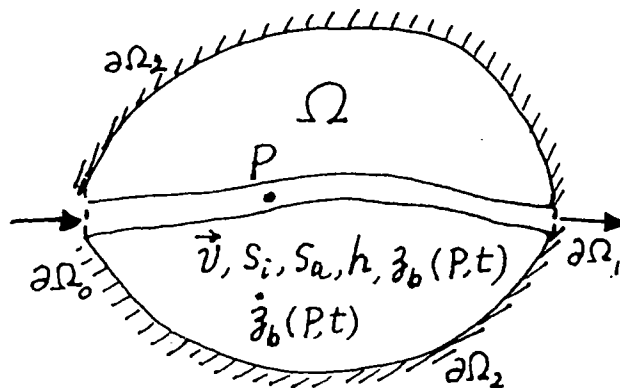


图 1 水库或港湾航道工程示意图, 其中 $\dot{z}_b(P, t)$ 为在点 P 上 t 时刻的挖泥率, 其余见文内说明

我们要求工程 $\dot{z}_b$ 的效果是在该时段 $[0, T]$ 内航道处的水深 $h(P, t)$ 最大, 即

$$\int_0^T \int_{\Omega} R_2(P, t) h(P, t) d\Omega dt = \max. \quad (3.3)$$

其中 $R_2(P, t)$ 是权重函数, 它甚至可以还含有 h 在内, 显然在航道外 R_2 可以是很小或甚至为零, 且在非通航或较小船只通行的季节内 R_2 也可以较小, 这个 R_2 是由具体条件给定的, (3.2) 即是本问题和 (2.8) 对应的最优问题的表达式。

若水深不大, 可以用浅水动力学方程描述自然环境的演变, 于是在本问题中, 自然环境变量就是 Ω 内的水流速度 (u, v) , 水深 h , 底床高程 z_b , 水中含沙量 s_i 和盐度 s_e (在水库中不必考虑 s_e); 而人文变量就是 z_b 。在有工程存在的条件下, 和 (2.3) 对应的方程就是浅水动力学方程组, 但 z_b 出现在底床变化方程中, 而有

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \rho_d^{-1} \alpha \omega(s_i - s_i^*) - \dot{z}_b, \quad (3.4)$$

其中 $\alpha \omega(s_i - s_i^*)$ 为单位时间的泥沙沉积率, s_i^* 被称为水流挟沙能力 (依赖于水流 $|\bar{v}| = (u^2 + v^2)^{1/2}$ 及水深 h 等), ρ_d 为湿沙密度; 我们在 (3.4) 中还忽略了盐的沉积影响。

$t_0 = 0$, Ω 自明, 而 $\partial\Omega$ 则由入口 $\partial\Omega_0$ 、出口 $\partial\Omega_1$ 和周界 $\partial\Omega_2$ 组成, 在这三段边界上边界条件不同, 例如在 $\partial\Omega_0$ 上一般是给出来水通量 F_w 和来沙通量 F_s ; 在 $\partial\Omega_2$ 上来水、来沙为零 (如旱、 $\partial\Omega_2$ 是钢壁的话); 在 $\partial\Omega_1$ 上或者出水出沙通量由水库使用调度所给定, 或者与港湾与外海的交换所决定。而初始条件就是在 $t=0$ 时要给出 u, v, h, z_b, s_i, s_e 。

上述问题也许无解, 即水深不能满足通航的要求, 换言之, 投资量 C 太小, 办不成事。于是问题转为另外的提法, 此时, 为要保证航道有足够的水深, 即 (3.2), 条件 (3.1) 必须去掉, 而要求工程总投资为最小, 即

$$\int_0^T \int_{\Omega} R_1(P, t) \dot{z}_b(P, t) d\Omega dt = \min. \quad (3.6)$$

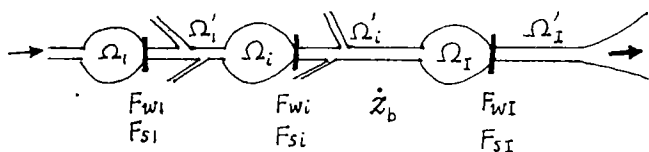


图2 水库联合调度示意图, 其中 Ω_i 为水库, Ω'_i 为其下游河道, ($i=1, 2, \dots, I$); F_{wi} 和 F_{si} 分别为水库 Ω_i 的调水和调沙,

填海造地工程与此类似, 只不过此时代表填石 (土) 工程率, 而 (3.3) 则改为

$$\int_0^T \int_{\Omega} R_3(P, t) h(P, t) d\Omega dt = \min. \quad (3.7)$$

其中 R_3 为另外的权重函数, 即使泥沙沉积量最大, 且条件 (3.2) 不必要, 也许在另外一些填海工程中, 还要改变 $\partial\Omega_2$ 的一段, 而求这一段的合理位置。

更复杂一点的问题是多个水库的联合调度, 设有 I 个水库 Ω_i ($i=1, 2, \dots, I$), 如图 2。其相应下游河道为 Ω'_i , 今调控各水库的流出水量 F_{wi} 和流出沙量 F_{si} , 由于调控需要能耗, 且必须保证水库有一定库容, 即必须

$$\sum_i \int_0^T R_{wi} F_{wi} dt \leq C_w, \quad (3.8)$$

$$C_i \leq \sum_{i=1}^I \int_0^T R_{si} F_{si} dt \leq C_s, \quad (3.9)$$

其中 C_w, C_i 和 C_s 为给定的常数, 而 R_{wi} 和 R_{si} 各为相应的权重函数, 一个最简单的调控问题是使得泥沙沿程沉积量最小, 即

$$\sum_{i=1}^I \int_0^T \int_{\Omega_1 + \Omega'_1} R_2(P, t) \dot{z}_b(P, t) d\Omega dt = \min. \quad (3.10)$$

其中 R_2 为相应的权重函数。如果冲刷也是有利的, 则上式中于冲刷时 $\dot{z}_b$ 为负, 但公式 (3.10) 不变; 若冲刷与沉积都不利, 则 (3.10) 要作一些改变。假如还需考虑到发电, 以及提水作工业或农业使用, 且要考虑其经济效益, 则最优问题的提法显然要比 (3.10) 复杂得多。

四、具体问题举例(二)——区域污染控制

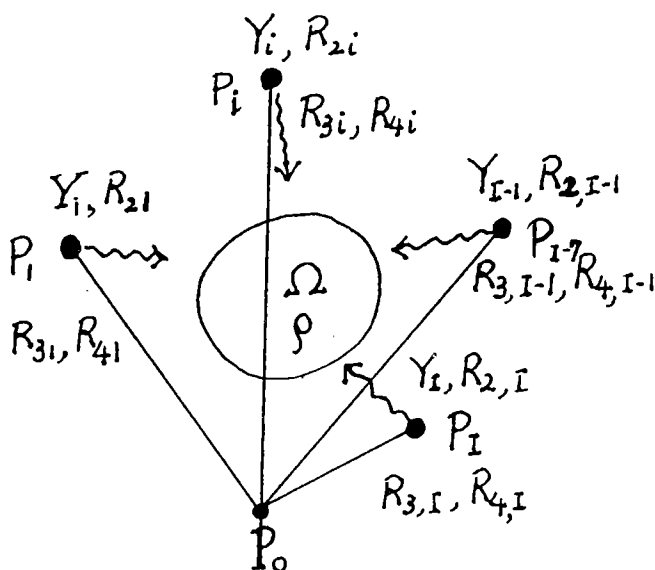


图3 区域污染防治规划示意图, 其中 P_0 为原料供应地, P_i ($i=1, 2, \dots, I$) 为工厂, Ω 为居民区, ρ 为污染物浓度, 其余见文内说明。

为简单起见, 设有 I 个工厂, 生产某种产品 Y_i ($i=1, 2, \dots, I$), 其散布某种污染物在空中的浓度为 $\rho(P, t)$ 。设有居民区 Ω (为简单起见设只有一个), 为保证居民生活, 可容许的污染物最大浓度为 $\rho_p(P, t)$, 即要求

$$\rho(P, t) - \rho_p(P, t) \leq 0, p \in \Omega; \quad (4.1)$$

或者把区域 Ω 扩大, 而采取稍弱的限制条件

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_1(P, t) |\rho - \rho_p|^2 d\Omega dt \leq C, \quad (4.1)'$$

此时 ρ_p 是某个最宜人的密度(就污染而言, $\rho_p = 0$)。

设各工厂 P_i 的原料均由 P_0 地点运输而来。设产品单位产量的产值为 R_{2i} , 设污染物的释放和产值成正比, 而单位产值为防污染耗费, 为 R_{3i} , 运输耗费为 R_{4i} , 在保证(4.1)或(4.1)'条件下, 求厂址 $P_i(x_i, y_i)$ 的最佳位置, 使得

$$\sum_{i=1}^I \int_0^T (R_{2i} - R_{3i} - R_{4i}) Y_i(t) dt = \max. \quad (4.2)$$

要注意的是 R_{2i} 、 R_{3i} 和 R_{4i} 是点 $P_i(x_i, y_i)$ 的非线性函数; 且 ρ 是 Y_i 及其源点 $P_i(x_i, y_i)$ 的复杂函数, 它是由大气扩散方程在复杂可变的气流条件下所决定的。因此, 环境变量最少还包括有气流 $\bar{v}$, 尽管它在限制条件(4.1)或(4.1)'中不出现(相当于取其权重为零); 而厂址 $P(x_i, y_i)$ 是包括在人文变量之中的。

关于区域污染控制问题按实际需要还有各种提法, 例如在 Marchuk(1982)的书书中就有另外的一些提法。

五、具体问题举例(三)——调控气候

最近十多年来各国科学家研究的结果大都说明, 如果人类活动继续以现有方式向大气排放二氧化碳, 则大气中的二氧化碳含量将逐年增加, 并导致全球变暖。利用现有的气候动力学模式, 并设想了几种减少排放量的方案, 按此可以算得 2050 年左右与之相对应的全球平均地表气温度的增值(见 IPCC, 1990), 从中选出一种方案认为是“合理”的, 要求按此向各国摊派应减小排放量的值。姑不论其摊派的原则是否“公平合理”, 这里是应用了列举法来解决气候调控问题, 而列举法仅仅是控制或规划问题中的定性的或比较初等的方法, 未必能找到最佳答案。

待将来气候模式和刻画二氧化碳在气候系统(包括大气、海洋、陆面环境和生态以及冰雪圈)中的循环规律的模式进一步改进之后, 调控像二氧化碳等有温室效应的气体的排放以达到控制全球气候的目的的提法当会改进。其实, 设全球平均的单位时间内人类向大气排放二氧化碳的量为 $\dot{c}(t)$, 其中 $t < t_1$, 则在 $t > t_1$ 时全球平均地表温度的增量 $\Delta T_s = T_s(t) - T_s^{(0)}$ 是 $\dot{c}(t)$ ($t < t_1$) 的泛函数, 其中 $T_s^{(0)}$ 为现时温度。要求

$$\Delta T_s = \left[\int_{t_1}^{t_2} \iint_S [T_s(P, t) - T_s^{(0)}(P, t)] dS dt \right] \frac{1}{S(t_2 - t_1)} \leq \delta, \quad (5.1)$$

其中 δ 是可容许的温度变化, S 为地表面积, 于是问题就是求在(5.1)限制条件下的最大 $\dot{c}(t)$, 即

$$\int_0^{t_2} \dot{c}(t) dt = \max. \quad (5.2)$$

如果再照顾到经济发展和各国社会间的“公平合理”原则, 当向各国摊派排放量指标即将 $\dot{c}$ 写为 P 和 t 的函数时, 应有合理的权重 $R_2(P, t)$, 而用下式取代(5.2):

$$\int_{t_1}^{t_2} \iint_S R_2(P, t) \dot{c}(P, t) dS dt = \max. \quad (5.3)$$

当然, 当考虑到经济发展等问题时, (5.1)也显得过于简单, 或许应采取更复杂和更合理一些的限制条件。

人类又总是自觉或不自觉地改变着局地气候状态, 它往往是通过改变局地自然地理环境来实现的, 虽然有些是正面的, 即气候得到改善而更适合于人类生存和活动; 有些则是负面的, 即使气候恶化, 例如通过大规模的造林, 抑或毁林, 均可以改变大气局部环境, 影响雨量和温度等。这种变化一般要通过人们精心安排的实践性检查, 也可以通过数值模拟提出方案, 然后试验。在将来显然可以通过后者而作调控局地气候的规划, 但这一问题和调控全球平均气候变化不同, 所考虑的仅是局地区域, 而区域则有更多的边界, 且系统更具开放性。

六、具体问题举例(四)——人工影响天气

人工可影响天气, 例如人工降雨、人工消雹等已经取得初步的成功(Hess, 1974; 黄美元和王昂生, 1980)。而且随着经济的迅速发展, 水资源短缺造成的制约作用和旱涝、雹风等灾害造成的经济损失愈来愈大, 人们对人工局地控制天气的要求也愈来愈迫切。其实, 人工降雨或消雹工作现在已经在全国大规模地进行着, 且有一定成效, 但仍存在着很大的盲目性和许多待解决的问题。可以设想, 要提高人工影响局地天气的成效, 必须先通过雷达等探测手段和动力学研究手段找到其关键点, 即对控制敏感的点, 以确定作业对象, 然后确定相应的有效的作业方法, 并通过连续的检查以掌握作业效果, 同时把这些观测检验量再反馈输入到模式计算中, 以决定随后的作业方案等。这类的控制问题与工程控制方法(如控制导弹等)十分相似, 只不过被控制的是一个复杂的开放性很大的偏微分系统。显然, 为此而寻求好的云雨、冰雹动力学模式和足够快的计算机是十分需要的。这在不久的将来可望得到解决。上述人工影响天气的控制过程可以简述如图 4。

过去在控制龙卷风等问题上也曾有过类似的建议,如张捷迁等曾建议以爆炸方法割断龙卷风涡管,龙卷所具有的涡管自然萎缩成两段而失去破坏力。如果原理最终证明正确,则当代或未来均可通过巡航导弹之类的技术和目标自动识别技术将爆炸物引向龙卷风并在合适部位爆炸。当然,在此我们再一次强调,对被控对象即龙卷的动力学研究是关键性的。

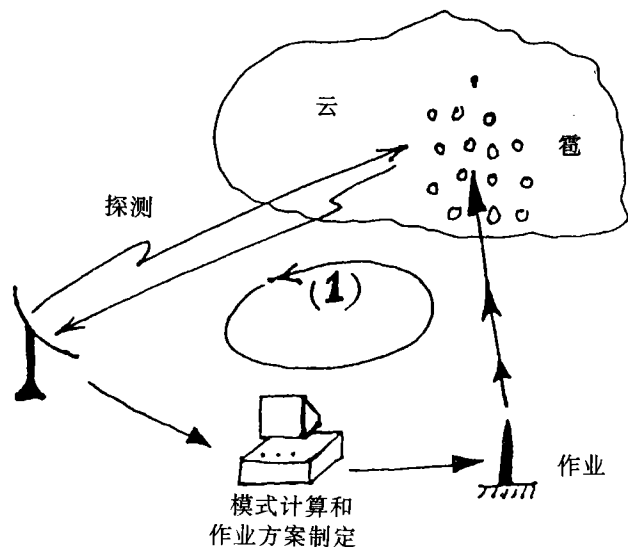


图4 人工消雹示意图,其中(1)表示反馈回路

七、具体问题举例(五)——其他

上面几节只是列举了几个典型的、比较成熟的自然控制论具体问题。提法比较成熟然而规模不那么大的还有像人工消雾、消云,人工防霜等问题;控制像沼气等这类具有温室效应的气体的排放,也只是个技术性问题。应该说,现在就有,而且将来随着环境与发展问题的日益密切而会有更多的自然控制论具体问题被提出来研究,例如控制各种类型的污染、人工调控生态环境等,这其中既包括土地的合理利用,农业的合理布局 and 合理结构,草场和牧地的合理的或最优利用、也包括海岸带和湖泊的最优规划和合理养殖、农业病虫害的防治规划和控制措施等等。至于水土保持、种草改良干旱带的生态、沙漠化的防治和沙漠的利用等,甚至人类移居地球外的空间等,这些目的在于维持和扩大人类生存空间的问题,也必然会成为有关学科和自然控制论的研究对象。

八、自然控制论与其他科学的关系

由上面几节的论述可见,自然控制论的核心问

题也即目标,乃是人工调控自然界环境系统的某些具体客体。从这种意义上说,它显然可以是维纳提出的控制论的延伸,即可以说是控制论的一个分支,就像工程控制论(钱学森,1958;钱学森和宋健,1981)、人口控制论(宋健等,1981)和生物控制论等一样。同时,正像控制论和系统科学的关系一样(宋健,1991),由于自然环境系统的复杂性,在研究自然控制论问题时,系统论的一些观点和方法将会有重要应用。此外,由于被控制的对象是开放的复杂的非线性系统,近代以及将来发展的非线性和复杂性科学研究也会有重要应用。

与研究自然环境有关的学科诸如大气科学、海洋科学、水利科学、环境科学、地理科学、环境生态动力学和其他地学学科,以及农业科学、生物学等,则为研究自然控制论具体问题提供了自然科学的基础。很明显,没有这些相关学科所提供出来的有关自然环境客体的演变规律性的认识,根本就不可能找到相应的有效的人工调控方法;没有对环境生态动力学数值模拟研究的开展则不可能上升到定量阶段(曾庆存,1985,1993;Zeng,1992)。特别要指出的是在自然控制论提出的早期阶段,自然控制论的研究也不宜于过早地与这些学科分开,而应该共同努力,一起解决问题。

九、自然控制论问题的特点

从上面列举的具体例子可见,自然控制论问题与一般控制论问题显然有所不同,它有许多鲜明的特点:

1. 被调控的客体是开放的自然界复杂环境系统,其质量、能量和信息量都非常巨大,且其各部分之间以及该系统与外界间的作用关系也非常复杂。
2. 被调控的客体的演变或行为基本上是确定性的。但是,或者人们对其复杂性质尚有许多未知面,或者由于内部参数、初始条件和边界条件具有某些不确定(或未知的)因子,甚至可能还存在随机因子。
3. 被控制的只是系统中很微小的然而又是很敏感的部分;调控的结果也只是改变系统功能行为或演变过程中很微小的部分,然而这小部分往往正是人们所最关心和最要紧的部分。
4. 被调控系统的功能行为或演变过程由复杂的非常定偏微分方程组或偏微分方程和常微分方程混合组成的方程组所描述,因此,大部分是偏微分方程的控制问题。也许对于生态过程的最简化模式的控制才可以简化为微分动力系统的控制问题。
5. 被调控的大都是系统长期功能行为或演变过程。
6. 由此而使得所联系的调控问题,求解复杂、

困难,其计算量很大,对算法研究,对计算机容量和运算速度都有较高的要求。

十、研究领域和研究方法

上面我们已经提到,自然控制论问题的研究与各具体问题所相关的学科密不可分,因为一种可能的或者好的调控方法必须建立在对被调控对象的功能行为和演变过程的客观规律的认识或掌握之上,而自然控制论问题的对象恰好是我们尚未很好认识的各种自然界环境系统,因此,自然控制论应和有关学科同时发展。在现阶段,其研究领域有相当的重叠,各学科应携手联合对问题进行研究;而研究方法也应是相互借鉴和相互补充,以便创造出新的独特的专门的或普通的方法。

这些领域和方法大体上可概括如下:

1. 对被调控的对象进行尽可能的观测或监测,以获取足够的信息。
2. 对处于自在状态和处于受调控(受影响)状态下的被调控系统的相应数理方程问题求解,以便认识或解得该系统的行为、结构特性和演变过程,明确其控制行为,并寻找可能的调控方法。这也是现有的研究调控自然环境的方法,即列举法,从中选取认为可行或最好的方案。

在数学上说,这就是一个正问题,即在已知初始条件和边界条件下求出问题的解。此外,对解的定性研究也十分重要,因而又有许多实用的非线性性和复杂性问题需要研究。

3. 已知所欲调控系统的一部分信息(例如结构、功能和部分的不完整的演变过程),由于该系统的确定性和各部分的相互联系特性,人们可以由此推断出其余的未知信息。这仍然是属于认识自然界

的范畴,但却是求解一类反问题。例如用全套综合观测数据和动力学方程式等反求方程的某些待定的参数;或者反求初始条件或边界条件。关于求解这类反问题的算法应该予以重视,并促其发展。

4. 求解自然控制论的核心问题即最优调控问题,以便确定调控方法和制定调控方案。从某种意义上说,这是另一类反问题。关于具体最优调控问题的提法和相应问题求解法尤其是计算方法,应该是最为迫切、至为重要的研究领域。

5. 研究正问题和最优调控问题的敏感性和稳定性。人们总希望系统中被调控的那部分是最敏感的,可以“顺其自然,因势利导”;同时却又希望调控方案本身是稳定的,即调控方案的微小失误不会导致与原设计效果很大的偏离乃至毁灭性的后果。

6. 研究广义的反馈校正方法,即利用对被控对象观测所得的信息作为输入,反馈到未来时刻的调控方案中,对原定方案作校正。这虽是工程控制论所熟知的方法,但如何推广,以适用于解决自然控制论具体问题,尚需研究。

7. 相应的调控技术问题也应研究。

十一、结 语

自然控制论是一门正在兴起的兼具基础性和应用性的科学,它研究自然环境的自控行为与人工调控的理论、方法和技术,以便解决人类现在已经紧迫的环境和发展问题,达到人类和自然环境的协调的和可持续的发展。协调自然环境和社会发展将是人类最伟大的控制工程。自然控制论有着广阔的前景,可以预见,它必将迅速地发展成熟起来。

(责任编辑 蔡德诚)

科技动态

地球内地核在旋转

据英国《新科学家》1996年7月20日报道,纽约哥伦比亚大学地震学家保罗·理查兹(Paul Richards)和纽约帕利塞兹的拉蒙特·多尔蒂地球观测台的宋小东(音译)发现,地球的内地核是一个质量和月球差不多的铁晶体,内地核比地球的其余部分旋转得稍快一些。这一发现证实了由最新的地球磁场计算机模型进行的预测。

地球内地核这个巨大的铁晶体直径有2400公里,相当于一个巨大的电动马达的一部分,在固态的内地核铁心和包围它的液态的外核之间有约100万安培的电流通过。在地球磁场的作用下,这一电流产生巨大的力,牵动固态铁芯旋转,又因为外地核具有比较低的速度,因此内地核能自由地旋转。

1995年,美国新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室的加里·格莱兹梅尔(Gary Glatzmaier)和洛杉矶加利福尼亚大学的保罗·罗伯茨(Paul Roberts)用一种高级

计算机模型预测,地球的磁场是由外地核中的对流电流产生的。

该模型假定,地球的内地核部分比其余的部分一年中要以快 $1\sim 2^\circ$ 的速度向东旋转。这一预测和今年理查兹和宋小东的发现正好一样。格莱兹梅尔说:“我非常高兴,因为我们原来认为,我们的预测不太可能很快就得到验证,没想到这么快就被理查兹和宋小东证实了。”理查兹和宋小东是在分析了从南极附近的南桑威奇岛穿过地球中心传播到阿拉斯加的地震波的记录后证实地球内地核是在旋转的。

南桑威奇岛自1969年以来,已发生过38次5.5级以上的地震,每次地震都同时向四面八方发出地震波。其中有些地震波仅通过外地核传到阿拉斯加的地震监测站,而其它地震波则穿过内地核传播。

1967年,地震波通过外地核到达阿拉斯加时,比穿过内地核的地震波迟了约8秒到达阿拉斯加。到1995年,这一时间差增加了约 $1/3$ 秒,这表明现在通过内地核的地震波传播得更快了。研究人员在《自然》杂志(卷382,P221)上报道了这一分析结果。(下转第62页)