

自然控制论*

曾庆存**

(大气物理研究所 北京 100080)

摘要 自然控制论是一门正在兴起的兼具基础性和应用性的交叉学科的新的生长点。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,以解决人类面临的环境和发展问题,达到人类与自然环境的协调和持续的发展。本文重点论述了自然控制论的定义;核心问题的一般提法和具体举例;与其他科学的关系;自身特点;研究方法等问题。

关键词 自然,环境,控制论

1 自然控制论的定义和发展

由于人类对自然环境的维持和演变规律还缺乏认识,更由于人类社会尤其是国际间的剧烈竞争对资源和环境的大规模掠夺,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热点,对它的研究已引起大批自然科学家和社会科学家的高度重视。现在已从一般意义上提出“可持续发展”、“社会和自然环境协调发展”等概念和模式,推动着解决这些问题的研究。从自然科学的角度看,人类在认识、利用和影响自然环境的同时,必须合理地或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小,而正面影响最大,即达到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”或“协调”的方向演变。这类科学问题应属于控制论(Cybernetics, Wiener, 1948)的范畴,我们不妨称之为自然控制论(Natural Cybernetics)。显然这是规模最宏伟的控制工程。

尽管自然控制论一词只是最近才由我国首先提出,但有关的一些具体问题在国内外早已提出并被研究。就全球性的环境保护和调控来说,在最近 10 余年,已形成了几个庞大的国际研究计划,甚至利用有关问题的初步研究成果,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、减少污染和保护全球包括海洋在内的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、氟里昂以及限制土地利用和生产活动),以便全球气候和生态环境在可容忍的范围

* 本文是在作者于 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”成立暨学术研讨会以及于 1995 年 3 月香山科学会议第 29 次学术讨论会“自然控制论的理论方法和重大科学问题”所作的两次报告的基础上写成的。

** 中国科学院院士。

收稿日期:1995 年 11 月 23 日。

内变化。毋庸置疑,执行这些国际研究计划,结果必然会抽出或形成共同的问题,形成统一的观点和普适的方法论,即形成由交叉而产生的独立的新学科。

自然控制论产生的另一个也是更直接的原因是各国在经济建设和局部改造环境的活动中不可避免地带来许多和环境有关的工程问题。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,其规划即调控的对象或者直接就是自然生态环境系统,或者是人工的然而和自然界的过程密不可分的生态环境系统。

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众多的与调控自然环境各种过程有关的具体问题,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。自然控制论具有基础和应用双重意义。

建立自然控制论有其迫切的社会需求,同时科学的积累业已成熟。自然控制论是许多学科的交叉点,涉及水利科学、大气科学、有关环境和生态的各学科、控制论、数学、力学、物理学以及工程技术科学等。这些科学现都已有长足的发展,为研究自然环境的调控问题打下了坚实的基础。不过,自然控制论不论其研究对象还是理论方法都不是上述各学科自身所能包括的,它是这些学科的复杂的交叉,这一科学上新的生长点,最终会发展成独立的学科。

2 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对自然环境的合理或最优的利用和调控,以便自然环境和人类沿着“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发展和研究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

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

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 A 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 $\|\cdot\|_e$ 所限, 即

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

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, 即是其某种泛函, 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)。

对于每个具体问题, (2.1)–(2.8)有其具体的表达内容。我们将在以下几节给出一些具体例子。

3 具体问题举例

3.1 最优航道工程和最优水利工程(略)*

3.2 区域污染控制(略)*

3.3 调控气候

最近 10 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(暂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。

待将来气候模式和描述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

$$\Delta T_s = \left[\int_{t_1}^{t_2} \int_S [T_s(P, t) - T_s^{(0)}(P, t)] dS dt \right] \frac{1}{S(t_2 - t_1)} \leq \delta, \quad (3.1)$$

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(3.1)限制条件下的最大 $\dot{c}(t)$, 即

* 由于篇幅所限, 发表时将具体论述略去。

$$\int_0^{t_2} \dot{c}(t) dt = \max. \quad (3.2)$$

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(3.2):

$$\int_{t_1}^{t_2} \iint_S R_2(P, t) \dot{c}(P, t) dS dt = \max. \quad (3.3)$$

当然,当考虑到经济发展等问题时,(3.1)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(如果有此可能的话)或毁林,可以改变大气局部环境,影响雨量和温度等。这些固然要通过人们精心的实践检查,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制定调控局地气候的规划。但这个问题和调控全球平均气候变化不同。所考虑的是局地区域,从而区域有更多的边界面,且系统更具开放性。

3.4 人工影响天气

人工影响天气,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,水资源短缺和旱涝、冰雹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,有一定成效,但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研究手段找到其对控制敏感的点 and 方式而确定作业对象,然后确定有效的作业方法,并通过连续观测以检查作业效果,把这些观测检验量再反馈输入到模式计算中决定随后的作业方案等。这样的控制问题和工程控制例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,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。这在不久的将来即可以解决。

上面只是举了几个典型的而且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;控制像沼气等具有温室效应的气体的排放也只是技术上的问题。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还会有更多的自然控制论的具体问题被提出来研究和解决。例如控制各类污染,人工调控生态环境,这其中包括土地的合理利用,农业的合理布局 and 合理结构,草场地的合理的或最优利用,海岸带 and 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,这些目的在于维持和扩大人类生存空间的问题,也必然成为有关学科和自然控制论的研究对象。

4 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。

和研究自然环境有关的诸如大气科学、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等科学以及农业科学、生物学等则为研究自然控制论具体问题提供自然科学的基础。很明显,没有这些有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,根本就不可能找到对它们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,1985,1983;Zeng,1992)。特别要指出的是在自然控制论提出的早期阶段、自然控制论的研究不宜过早与这些学科分开,应该共同努力,一起解决问题。

5 自然控制论问题的特点

从上面的例子可见,自然控制论问题与已有的控制论问题有所不同,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。但或者人们对其复杂性尚有许多未认识的东西,或者由于内部参数、初始条件和边界条件具有一些不确定(或未知的)因子,甚至可能还有随机因子。

(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的很微小的部分,然而这小部分正是人们所最关心和最重要的部分。

(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和困难,其计算量很大,对算法研究和计算机的容量、运算速度都有较高的要求。

6 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环境系统,因此,自然控制论和有关学科,都应同时发展。因此,至少是在现阶段,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。研究方法应是相互借鉴和相互补充,以便创造出新的专门的或普适的方法。

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)求解被调控系统处于自在状态和处于受调控(受影响)状态的相应数理方程问题,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,即列举法和从中选取认为可行或最好的方案。

在数学上,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答。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和复杂性问题需要研究。

(3)已知所欲调控的系统的一部分信息(例如结构、功能和部分的不全面的演变过程),由于该系统的确定性和各部分的相互联系特性,人们可以从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研究发展。

(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有很大的偏离甚至于毁灭性的后果。

(6)研究广义的反馈校正方法,即利用已有的对被控对象观测的信息作为输入,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,需要研究。

(7)相应的调控技术问题也应研究。

7 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,以便解决人类面临的环境和发展问题,达到人类和自然环境的协调和持续的发展。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,可以预见它将迅速地发展成熟起来。