

自然控制论

曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 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学科分支, 它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, 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发展。本文重点论述自然控制论的定义和发展源泉; 核心问题的一般提法和具体问题举例; 与其他学科的交叉和相互关系; 自然控制论问题自身的特点; 研究领域和方法等问题。

关键词 环境 可持续发展 自然控制论

1 自然控制论——它的定义和发展

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和破坏、毁灭的力量, 人类对自然界环境的影响或改造工程的兴建, 更是以空前巨大的规模在自觉或不自觉地进行着。但由于人类对自然界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的大规模掠夺, 全球规模的大气、海洋、陆地的污染以及生态环境的破坏已经成为当代的最严重的并且影响到未来问题之一。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, 对它的研究已引起大批自然科学家和社会科学家高度的重视。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少, 而正面影响最多, 或者简而言之, 是对自然环境的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。研究这类科学问题就是属于“控制论”(Cybernetics)的范畴^[1], 而不妨称之为“自然控制论”(Natural Cybernetics)。显然, 这是人类最伟大的控制理论和规模最宏伟的控制工程。

尽管“自然控制论”一词尚只是在国内最近才提出, 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

1995-11-20 收到, 1996-01-29 收到修改稿

* 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

最近十余年来,国际上已经形成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,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。这些都有限制人类的活动的具体规定(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),以便全球气候和生态环境在可容忍的范围内变化。毋庸置疑,在执行这些国际研究计划的过程中,必然会提出共同的问题,形成统一的观点和普适的方法论,也就形成了独立的虽然是交叉的学科。

自然控制论的另一个也是更直接更广泛的来源乃是各国经济建设和局部改造环境的活动中不可避免地和环境有关的许多工程问题,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;还有农业、林业和渔业的规划,其规划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、兴起之中。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,正象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。

建立自然控制论不但有其迫切性,且时机已经成熟。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学科等等。这些学科现都已有长足的发展,为研究自然环境的调控问题已打下了坚实的基础。不过,自然控制论不论从其研究对象还是理论方法上都不是上述各学科自身所能包容的,它是上述各学科复杂的交叉,最终会发展成独立的学科,在科学上也是一个生长点。

2 自然控制论核心问题的一般提法

上节已经说明,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”、“协调的”方向演变。因此,自然控制论的核心问题就是发展研究和解决这问题的理论和方法。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:

$$X(P, t) = [X_1, X_2, \dots, X_m]^T. \quad (1)$$

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 ($j=1, 2, \dots, n$),

$$Y(P, t) = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]^T. \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial X}{\partial t} = L(X, Y, t), \quad (3)$$

还有初始条件

$$X|_{t=t_0} = X^{(0)}(P), \quad (4)$$

以及边界条件

$$\Lambda(X, Y, t)|_{\partial\Omega} = G, \quad (5)$$

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的边界, $X^{(0)}$ 和 G 为已知函数 (向量), 而 L 和 Λ 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

$$\|Y\|_e \leq C, \quad (6)$$

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

$$\|X - X_p\|_p \leq D, \quad (7)$$

其中 D 为限制常数。

自然控制论就是要在满足 (6) 或 (7) 或者 (6) 加 (7) 的限制条件下, 寻找一种合理或最适当的人类活动 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

$$F(X, Y) = \text{最优}, \quad (8)$$

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, (1)~(8) 有其具体的表达内容。在以下几节将给出一些具体例子。

3 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 内要建设一条通航航道, 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 $\dot{z}_b$, 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

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_1(P, t) \dot{z}_b(P, t) d\Omega dt, \quad (9)$$

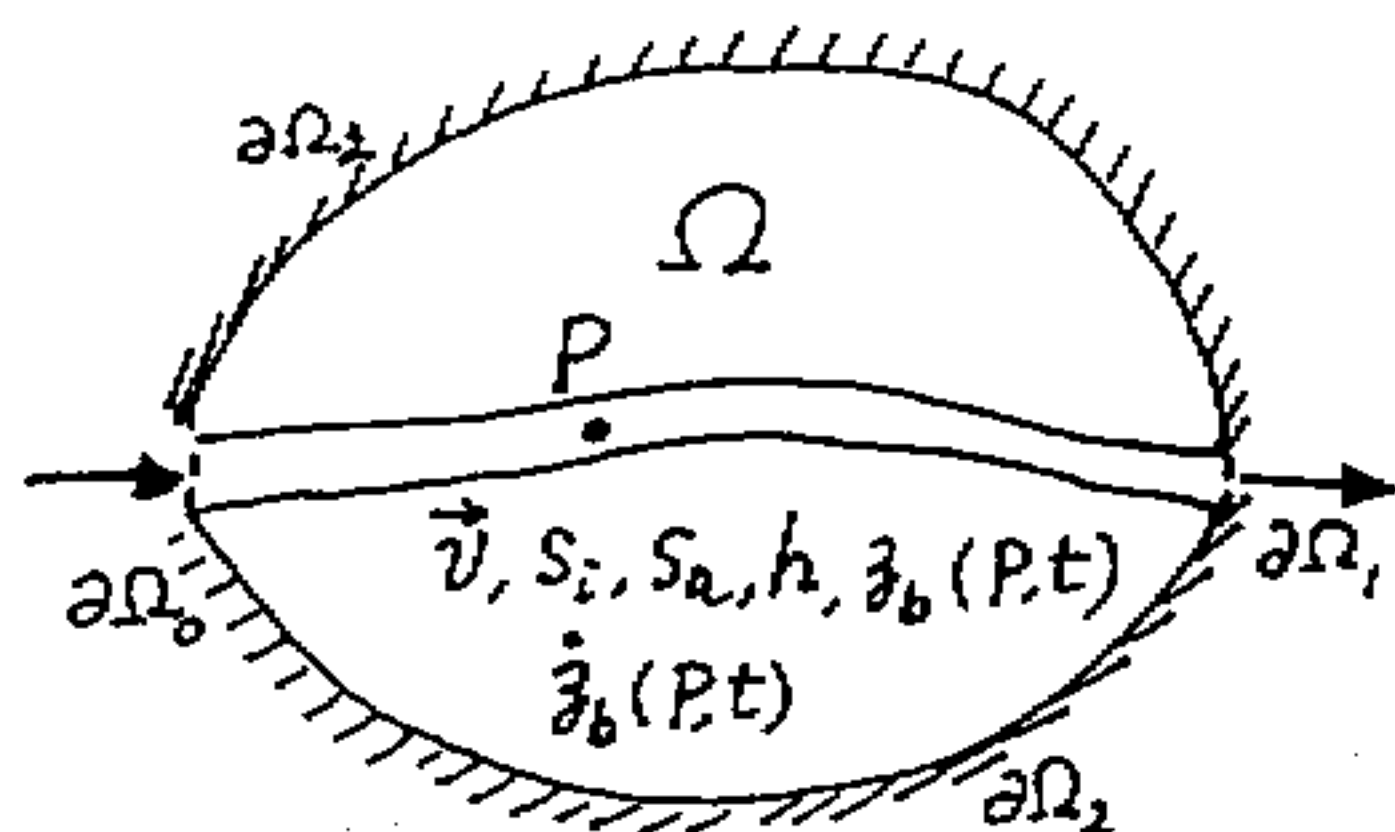


图1 水库或港湾航道工程示意图
其中 $\dot{z}_b(P, t)$ 为在点 P 上 t 时刻的挖泥率,
其余见文内说明

其中 $\dot{z}_b(P, t)$ 待求。(9)就是本问题对应于(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

$$h - h_p \geq 0, \quad (p \in \Omega_p \in \Omega), \quad (10)$$

其中 Ω_p 表示航道(其位置待求)。(10)为与(7)相似的限制条件。

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

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_2(P, t) h(P, t) d\Omega dt = \max, \quad (11)$$

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。(11)即是本问题和(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_a (在水库中不必考虑 s_a);而人文变量就是 $\dot{z}_b$ 。在有工程存在的条件下,和(3)对应的方程就是浅水动力学方程组,但 $\dot{z}_b$ 出现在底床变化方程中,而有

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \rho_h^{-1} \alpha \omega(s_i - s_i^*) \dot{z}_b, \quad (12)$$

其中, $\alpha \omega(s_i - s_i^*)$ 为单位时间的泥沙沉积率, s_i^* 为水流挟沙能力(依赖于水流 $|\vec{v}| = (u^2 + v^2)^{1/2}$ 及水深 h 等), ρ_h 为湿沙密度;我们在(12)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_0} 和来沙通量 F_{i_0} ;在 $\partial\Omega_2$ 上来水、来沙为零(如果 $\partial\Omega_2$ 是刚壁的话);在 $\partial\Omega_1$ 上出水出沙通量或者由水库使用调度所给定,或者由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_a (请参阅文献[13])。

上述问题也许无解,即水深不能满足通航的要求条件(10),换言之,投资量 C 太小,办不成事。于是,问题有另外的提法,此时,为了保证航道有足够的水深,条件(9)必须去掉,而要求工程总投资为最小,即

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_1(P, t) \dot{z}_b(P, t) d\Omega dt = \min. \quad (13)$$

填海造地工程与此类似,只不过此时 $\dot{z}_b$ 代表填石(土)工程率,而(11)则改为

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_3(P, t) h(P, t) d\Omega dt = \min. \quad (14)$$

其中 R_3 为另外的权重函数,即使泥沙沉积量最大,且条件(10)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

$$\sum_i \int_0^T R_{wi} F_{wi} dt \leq C_w, \quad (15)$$

$$C'_s \leq \sum_{i=1}^I \int_0^T R_{si} F_{si} dt \leq C_s, \quad (16)$$

其中 C_w , C_s 和 C'_s 为给定的常数, 而 R_{wi} 和 R_{si} 各为相应的权重函数。记泥沙沉积率为 $\dot{z}_b(P, t)$ 。一个最简单的调控问题是使得泥沙沿程沉积量最小, 即

$$\sum_{i=1}^I \int_0^T \iint_{\Omega_i + \Omega'_i} R_2(P, t) \dot{z}_b(P, t) d\Omega dt = \min. \quad (17)$$

其中 R_2 为相应的权重函数。如果冲刷也是有利的, 则上式中冲刷时 $\dot{z}_b$ 为负, 但公式(17)不变; 若冲刷与沉积都不利, 则(17)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(17)复杂得多。

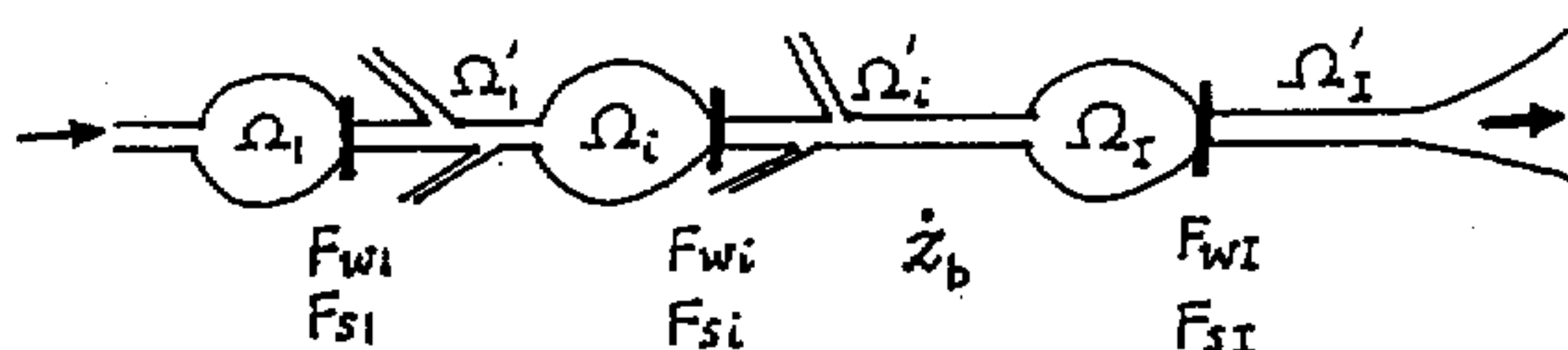


图 2 水库联合调度示意图

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 的调水和调沙量, 而沿程各点的泥沙沉积率为 $\dot{z}_b$ 。

4 具体问题举例 (二) ——区域污染控制

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), 如图 3。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

$$\rho(P, t) - \rho_p(P, t) \leq 0, \quad P \in \Omega, \quad (18)$$

或者把区域 Ω 扩大, 而采取稍弱的限制条件

$$\int_0^T \iint_{\Omega} R_1(P, t) |\rho - \rho'_p|^2 d\Omega dt \leq C, \quad (18')$$

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, 而单位产值的防污染耗费为 R_{3i} , 运输耗费为 R_{4i} , 在保证(18)或(18')条件下, 求厂址 $P_i(x_i, y_i)$ 的最佳位置, 使得

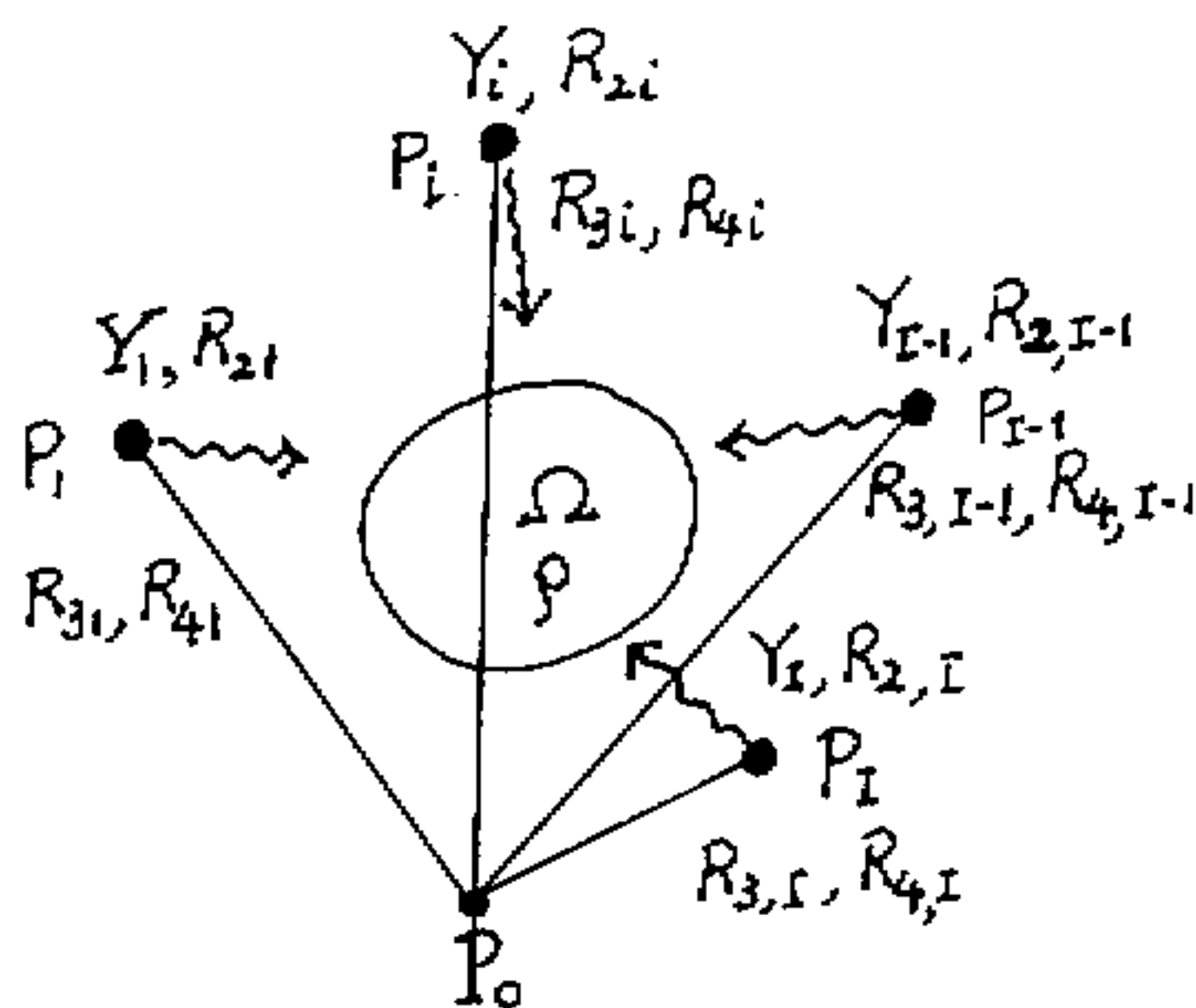


图3 区域污染防治规划示意图

其中 P_0 为原料供应地, P_i ($i=1, 2, \dots, D$) 为工厂, Ω 为居民区, ρ 为污染物浓度, 其余见文内说明

$$\sum_{i=1}^D \int_0^T (R_{2i} - R_{3i} - R_{4i}) Y_i(t) dt = \max. \quad (19)$$

要注意的是 R_{2i} 、 R_{3i} 和 R_{4i} 是点 $P_i(x_i, y_i)$ 的函数; 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(18)或(18)'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 的书 中就有另外的一些提法^[7]。

5 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温度的增值 (见文献[9]), 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, 调控象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。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

$$\overline{\Delta T_s} = \left\{ \int_{t_1}^{t_2} \int_S [T_s(P, t) - T_s^{(0)}(P, t)] dS dt \right\} \frac{1}{S(t_2 - t_1)} \leq \delta, \quad (20)$$

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(20)限制条件下的最大 $\dot{c}(t)$, 即

$$\int_0^{t_2} \dot{c}(t) dt = \max. \quad (21)$$

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(21):

$$\int_{t_1}^{t_2} \iint_S AR_2(P, t) \dot{c}(P, t) dS dt = \max. \quad (22)$$

当然, 当考虑到经济发展等问题时, (20)也显得过于简单, 或许应采取更复杂和更合理的限制条件。

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(如果有此可能条件的话)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作调控局地气候的规划。但这与调控全球平均气候变化不同, 所考虑的是局地区域, 而区域有更多的边界面, 且系统更具开放性。

6 具体问题举例(四)——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^[3,4]。但是随着经济的迅速发展, 水资源短缺的制约作用和旱涝、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, 有一定成效, 但仍存在着很大的盲目性和许多有待解决的问题。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关键的即对控制敏感的点和方式而确定作业对象, 然后应用有效的作业方法, 并连续地通过检查以检验作业效果, 把这些观测检验量再反馈输入到模式计算中从而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。这在不久的将来就可以解决。上述人工影响天气的控制过程可以简示如图4。

提到控制龙卷, 过去也曾有过建议, 如张捷迁等曾建议以爆炸方法割断龙卷涡管, 于是龙圈所具有的涡管自然萎缩成雨段而不具破坏力。如果此原理正确, 则在当代或未来可以通过如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并在合适部位爆炸。当然, 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。

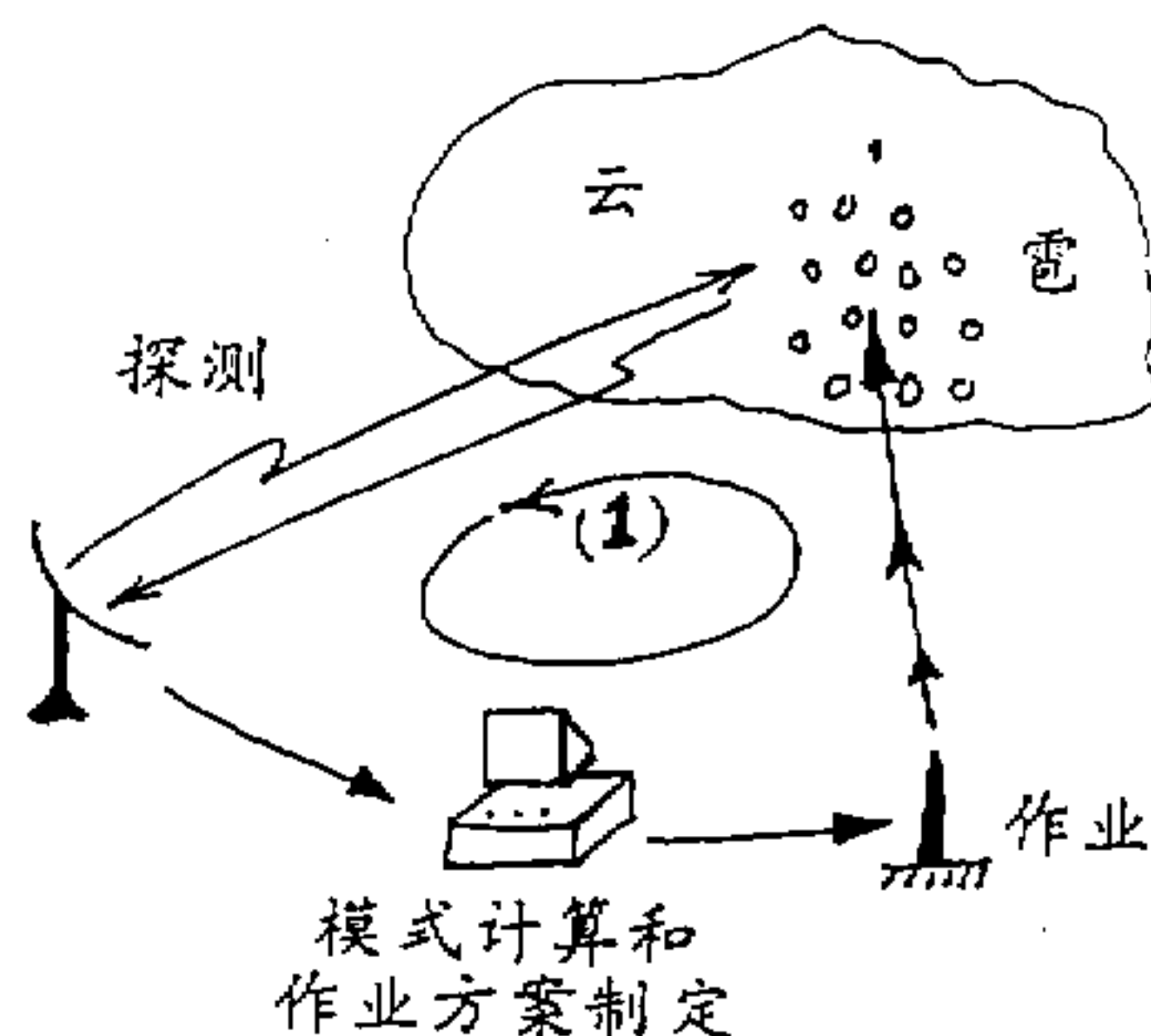


图4 人工消雹示意图, 其中(1)示反馈回路

7 具体问题举例(五)——其他

上面几节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

的还有人工消雾、消云,人工防霜等问题。控制象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,随着环境与发展问题的日益密切,将会有更多的自然控制论具体问题被提出来研究和解决。例如控制各种类型的污染,人工调控生态环境,其中包括土地的合理利用,农业的合理布局 and 合理结构,草场和牧地的合理或最优利用、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,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。

8 自然控制论与其他学科的关系

由上面几节的论述可见,自然控制论的核心问题和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,就象工程控制论^[2,5]、人口控制论^[6]和生物控制论等一样。同时,正象控制论和系统科学的关系一样^[10],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,非线性和复杂性学科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,根本就不可能找到有效的对它们的人工调控方法;没有对环境生态动力学数值模拟研究的开展就不可能使自然控制论上升到定量阶段^[8,12,11]。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于过早与这些学科分开,应该共同努力,一起解决问题。

9 自然控制论问题的特点

从上面列举的具体例子可见,毕竟自然控制论问题与成熟的一般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之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。但或者人们对其复杂性质尚有许多未认识的方面,或者内部参数、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) 由此使得调控问题求解复杂和困难，计算量很大，对算法研究和计算机的容量和运算速度都有较高的要求。

10 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和掌握之上，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，自然控制论和有关学科，都应同时发展。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；研究方法也应相互鉴借和相互补充，以便创造出新的独特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和方法，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、最为重要的研究领域。

(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却是稳定的，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，即利用已有的被控对象的观测信息作为输入，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。

11 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,以便解决迫切需要解决的环境和发展问题,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,可以预见它将迅速地发展成熟起来。

参 考 文 献

- 1 Wiener, N., 1948, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, MIT Press, Cambridge, MA. (中译本: N. 维纳著, 郝季仁译, 1963, 控制论, 北京: 科学出版社)
- 2 Zeng Qingcun, 1995, Silt sedimentation and relevant engineering problem: an example of natural cybernetics, *ICIAM95 Proceedings of the Invited Lectures*, Akademie Verlag, Berlin.
- 3 Marchuk, G. I., 1982, *Mathematical Modellings in Environmental Problems*, Science, Moscow.
- 4 IPCC / WMO-UNEP, 1990, *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*, Edited by Houghton J.T. et al., Cambridge University Press.
- 5 Hess, W.N., 1974, *Weather and Climate Modification*, John Wiley and Sons, Inc.
- 6 黄美元、王昂生, 1980, 人工防雹导论, 北京: 科学出版社.
- 7 钱学森 (戴汝为等译), 1958, 工程控制论, 北京: 科学出版社.
- 8 钱学森、宋健, 1981, 工程控制论, 北京: 科学出版社.
- 9 宋健、王浣尘、于景元、李广元, 1981, 人口动态过程的控制和大系统结构, 系统工程论文集, 北京: 科学出版社.
- 10 宋健, 1991, 系统控制论, 中国大百科全书·自动控制与系统工程卷, 北京: 中国大百科全书出版社, 1~6.
- 11 曾庆存, 1985, 大气科学中的数值模拟研究——理论研究和实用相结合, 大气科学, 9, No.2, 186~194.
- 12 曾庆存, 1993, 气候和环境生态系统的动力学问题, 大气科学, 17, No.1, 121~125.
- 13 Zeng Qingcun, 1992, Numerical simulation of climate and environment, in: *Climate, Environment and Geophysical Fluid Dynamics*, 3~11, China Meteorological Press.

Natural Cybernetics

Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Natural Cybernetics is a new and developing branch of sciences, which investigates the self-controlling behavior of the natural environment and the possible mechanism of anthropogenic controlling and develops theory, method and technology of anthropogenic controlling. The development of natural cybernetics will facilitate the solution of the problems "environment and development" and lead to the harmonic consistence of the mankind and the environment and the sustainable development of the mankind society. Several major problems discussed in the paper are: the definition of natural cybernetics and the sources of its development, the general formulation and some concrete typical examples of problems, the relationship and interaction of natural cybernetics and other relevant sciences, the major characteristic features of the problems, the research fields and methodology.

Key words environment sustainable development natural cybernetics