

曾庆存, 吴琳, 洪钟祥. 2012. 控制论与人工影响天气 III: 自然控制论在人工增雨作业中的应用框架 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 986–990, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.35. Zeng Qingcun, Wu Lin, Hong Zhongxiang. 2012. Cybernetics in the artificial weather modification. III: A framework of artificial weather modification based on the natural cybernetics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 986–990.

控制论与人工影响天气 III: 自然控制论在人工增雨作业中的应用框架

曾庆存 吴琳 洪钟祥

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 应用自然控制论的理论方法, 提出人工增雨作业和效果检验的框架。它将事前和作业进行过程中的观测和预报、调控方案(滚动式的和有反馈回路的)、作业和效果检验紧密联系成一个整体系统, 将调控方案提为最优化问题, 并把不断的观测资料同化到滚动式预报模式和求优化之中。所提出的一种效果检验方法是比较客观和定量的。

关键词 人工影响天气 人工增雨 自然控制论 反馈回路 优化 效果检验

文章编号 1006–9585 (2012) 06–0986–05

中图分类号 P427

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.35

Cybernetics in the Artificial Weather Modification. III: A Framework of Artificial Weather Modification Based on the Natural Cybernetics

ZENG Qingcun, WU Lin, and HONG Zhongxiang

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the theory and methodology of natural cybernetics a framework of artificial weather modification and its verification was proposed. The framework deals with the artificial precipitation enhancement. It consists of observation and prediction (both before and during the operation), the quasi-continuous decision making of operation (controlling) with feedback cycle, operation and verification. Every link is closely correlated each with other in a whole system. The scheme of operation is given by a solving relevant optimization problem. The verification method is quantitative and more objective.

Keywords Artificial weather modification, Artificial precipitation enhancement, Natural cybernetics, Feedback cycle, Optimization, Verification

1 引言

自古以来, 预算天机(天气预报)和呼风唤雨(人工影响天气)就是全世界各民族人民的大胆和美好幻想。经过数千年的追求和探索, 到 20 世纪, 终于先后形成为一门科学的研究对象, 并已在

不同程度上变成了实际业务。现在, 天气预报和气候预测问题是国际大气科学的重点研究对象, 是各国气象业务部门要重点保证的业务职责; 而人工影响天气(特别是增雨、消雹和防雷电)则在相当多国家, 尤其是在中国、俄罗斯、以色列等, 已形成大规模的作业。应该说, 人工增雨作业已有 60 年的历史, 成绩非凡。人工增雨在中国各省、市、自

收稿日期 2012–08–03收到, 2012–09–21收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目KZCX2-EW-203, 中国科学院大气物理研究所方向项目IAP201209

作者简介 曾庆存, 男, 研究员, 从事大气科学和自然控制论研究。E-mail: zqc@mail.iap.ac.cn

治区都有研究和作业的庞大队伍, 各地投入到这项工作的经费相当可观, 投身于人工影响天气研究和实践的先辈们(顾震潮, 1980; 黄美元等, 2003; 纪念著名大气科学家顾震潮编委会, 2006)对此也会会心欣叹事业发展的快速和规模的宏阔。但既有成绩, 又有困难。在当今业界中人士普遍认为: 困扰人工影响天气事业进一步发展的主要问题有三, 一是判定作业目标和选定作业方案的科学化, 二是作业技术的有效性或即科学化, 三是作业效果检验的科学化(毛节泰和郑国光, 2006; 黄美元, 2011), 姑且不论人工影响天气机理的理论研究问题(这方面颇有众多的研究者, 但有待加深, 不过基础研究无一时之功, 不是想突破就突破得了的)。

人工影响天气其实也应视为是控制论(Wiener, 1948; Tsien, 1954; 钱学森和宋健, 1980; 宋健, 1991)范畴。上述三大困扰问题的第一个就是可控与否和如何最优控制的问题, 第二个就是在现有技术层面上说技术元件的最优组配和元件的有效性(元件的有效性和敏感性当然还应精益求精、不断提高), 第三个问题就是要有客观定量的检验方法以判定作业的成败和有多大的成功。但是, 现有的人工影响天气的方法不同于卓有成效的现有控制论方法, 其最大的差别就在于前者缺失了控制论过程中的反馈回路。正是这缺失, 使得上述 3 个科学化问题未能相互联系, 以致时至今日未能解决好。

还有, 以人工增雨为例, 当今的人工影响天气作业, 也还存在一些次一级的模糊未清的问题。例如, 现有的作业拟调控的目标和效果检验并非直接对着“增雨”, 而是云中的微物理特性如“云滴”(其大小及谱分布)。虽然“云滴”特性和“增雨”量在数学上说都是所调控的那个系统状态的一个“泛函”, 是系统状态的输出量, 但是此“泛函”不是彼“泛函”, 二者的联系还得通过系统状态变量。由观测云滴特性的变化不能直接推出增雨效果。即使就依据云滴特性变化来推断作业效果来说, 现行的作业也还是可以进一步优化即科学化和尽量客观化的, 为此就要在作业与观测检验间引入反馈回路这一环。这就是吴琳等(2012)所建议的应用工业中卓有成效的工程控制论方法, 这里称之为“局部控制”方法。这是因为控制的只是作业点当地和即时的量, 而不是从系统在一定时段内和全

局来考虑的。

本文将从系统控制论的观点(宋健, 1991)出发, 直接应用“自然控制论”(曾庆存, 1996)的方法, 将人工增雨作为全局长程的控制问题, 构建人工增雨的系统工程框架。这似乎可以在一定程度上破解上述 3 个问题的困扰, 给出在现有的科学技术条件下的明确回答。尽管由于受现有科学技术水平的局限, 人工增雨作业和效果评估都有一定的误差(error)和不确定度(uncertainty), 但可对它们作出定量的估计。

2 人工增雨的自然控制论方法框架

简单地说, 应用自然控制论的方法, 将人工增雨作为控制工程系统来处理, 必须将预报—控制(作业)—观测—效果检验一体化, 将它们组成为一个客观、连续、紧密相连的工程系统, 各环节不是各自独立(或不连贯的)事件, 反馈回路将它们全体都联系起来。

具体地说, 该工程系统可分为下述数环:

(1) 作业前的观测和预报

毫无疑问, 要先作观测, 其空间范围要比作业区和检验区更大些, 观测项目包括常规的气象观测、雷达观测和云物理参数的特种观测——如果有可能的话。以此作为初始场, 用短期天气数值预报模式对将要进行作业的时段的天气形势、云雨等作出预测, 据此以作出人工增雨作业的初步方案(包括最佳方案, 详见下述)。

(2) 作业初步方案的制定和执行

如果使用的方法是撒播催化剂以增加和增大可成雨的云滴, 问题是何时(时刻 t)和何地[三维空间坐标点 (x, y, z)]撒播多少剂量的催化剂(H)? 在这里, 时刻包含在一定时段——即作业时段内($t_1 \leq t \leq t_2$ 或写成 $t = [\Delta t_a] = [t_1, t_2]$), 空间点包含在作业空间 Ω_a 内, $(x, y, z) \in \Omega_a$ 。当然作业空间 Ω_a 应包含于作预报的空间 Ω 内, 即 $\Omega_a \subset \Omega$, 而作业时段 $[\Delta t_a]$ 应包含在预报时段 $[\Delta t_p]$ 之内, 即 $[\Delta t_a] \subset [\Delta t_p]$, 其中 $[\Delta t_p] = [t_0, t_3]$, $t_0 < t_1 < t_2 < t_3$ 。此外, 检验时段 $[\Delta t_v] = [t'_1, t'_3]$, 应取 $t'_1 \geq t_1$, 但 $t'_3 \leq t_3$; 而若检验的是作业的某一子空间 Ω_v , 自然应有 Ω_v 包含于 Ω_a 中, 即 $\Omega_v \subset \Omega_a$; 但若是检验区域 S 的雨, 则 S 可以部分甚至全部在 Ω_a 之外, 但区域 S 应包含于预报空间 Ω 之内。

根据预报场先作最优作业的初步方案,即要求按此作业方案预期有“最优”的“效果”,那么,何谓“效果”?何谓最优?这些有各种提法。

在这里,以直接检验增雨效果为例作说明,增雨“效果”可取为在检验时段 $[\Delta t_v]$ 和检验区域 $S(x, y)$ 内的总增雨量 ΔP ;也可以是从经济学上考虑的某种经济净效益 E 或投入产出比

$$Q_p = E_p / C_A,$$

其中, C_A 为作业的总经费, E_p 为用 ΔP 算得的毛收益, E 为 E_p 减去耗费 C_A 的加权平均。记上述三者之任一为 Q , 所谓“最优”, 就是使 Q 最大。至于如何求出这种最优方案, 将在下一节中讲述。一旦确定, 则作业就按此方案确定的撒播催化剂量 $H(x, y, z; t)$ 来执行。

(3) 专为临近作业和作业全程跟踪以及效果检验而设置和进行的观测

按照(2)的初步方案, 在选定的作业区和效果检验区设置观测方案, 在临近作业以及作业全程启动观测。

如果是使用飞机进行作业, 则这种观测至少应覆盖作业航线, 观测项目应反映作业区的云微物理状态(直接探测或遥感); 如是使用较稠密地散布于某一地区地面上的高炮(或某些撒播炉等装置), 则观测区应至少覆盖高炮阵地和达到的高度, 不过观测也许只可能是像使用雷达等仪器得到的一些遥感资料, 再由此反演云微物理特性, 时空上有一定的不完全性, 也有一定的不确定性和误差。

如果效果检验是直接增雨量 ΔP 或 Q , 则作为直接检验用的观测是在检验时段 $[\Delta t_v]$ 和检验区域 S 内的雨强观测。

(4) 滚动式的作业方案的制定和实施——反馈回路的作用和方案的滚动修正

有了新的观测资料, 特别是作业后的实测资料和检验区域的实测资料, 就可以用来对原先的预告作订正(或曰“同化”), 重新作预告, 并据此作出新的作业最优方案(即对原定方案作修正), 如此滚动式地进行。尽管这些观测资料是不完全的, 但有针对性, 反馈到作业方案中去极为重要和宝贵, 可使滚动后的后续作业效果更优。

“同化”方法(或曰“同化”技术)现在已在气象预报和环境质量预报中广泛应用(Zhu et al., 2009)。当用滚动式预报和作出新的作业方案时, 时段可以很短, 计算量是不很大的, 最主要的是要及

时, 甚至是可以几乎连续不断的。

(5) 效果检验方法

无论是直接检验增雨量 ΔP , 还是效益 E 或 Q , 都只有进行了作业情况的雨量 P , 但我们无法知道不进行作业情况的雨量 P_0 。因此 P_0 只能用某种方法估计, 同时要给出估计的可能误差。这将在第 4 节中论述。

总体来说, 这种框架可以用图 1 来表示, 其中的个例档案一环绝不可少, 以备总结经验和作统计检验。

3 最优作业方案与反馈回路

以人工增雨为例, 反馈回路的引入和作出最优作业方案就组成一个分布式(即与偏微分方程相联系的)控制问题。在已知大气状态变量(包括初始条件和边界条件)以及给定的催化剂撒播量 $H(x, y, z; t)$ 的情况下, 求大气状态(包括云微物理特性和降雨量)的演变就是预报问题, 是正问题。但 $H(x, y, z; t)$ 本是应由人们希望达到的最优效果来决定的, 于是相伴有求解“最优作业方案”或即“最优控制方案”的方程, 就又称为控制问题或反演问题, 相应的问题一般是与原问题(正问题)紧密相连的所谓“伴随方程”。不像在工业中常应用的用常微分方程(尤其是线性方程)描述的工程控制论方法那样简明, 在这里一般要同时求解正问题和“伴随”问题, 或曰求“原算子” A 和“伴随算子” A^* 的解。对于自然环境的控制问题, 例子可见 Marchuk (1986)、Zeng (1995)、Zhu et al. (1999)、刘峰和黄顺祥(2011)。自然控制论和工程控制论的最大区别在于, 前者必须对被控系统的演变过程进行预告, 预告与求最佳调控方案要同时进行, 二

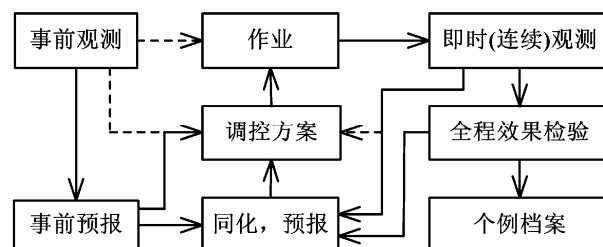


图 1 应用自然控制论作人工增雨作业的流程(虚线表示当运行不太顺畅时可人为调节的流程)

Fig. 1 Diagram of weather modification operation with natural cybernetics (dashed line shows the process that can be adjusted artificially when the operation is not very smooth)

者相互影响;而后者则是认为被控系统的演变过程是已知的,不必通过作预告再进行最佳调控方案的求解,尽管这“已知的”系统演变过程中可能迭加有不可预知的随机的但被视为微小的干扰(噪音),而调控方案中本身就包含有容纳、抵抗干扰和自动修正的部件。

为叙述简便起见,下面我们将认为同化、预报、反馈、作业方案的更新或修改可以瞬时作到,即略去每次滚动式同化和预报及制订新作业方案的中隔时间(这其实是很短的,如果电子计算机够快的话)。

记由风、温、湿、压及云内各种特性等大气状态变量(共 n 个)为

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_n].$$

记人工输入(即控制行动)的量(共 m 个)为

$$H = [H_1, H_2, \dots, H_m],$$

(如果只用一种撒播剂,则 $m=1$);另有常数(共 l 个)为

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_l].$$

常数将随同化甚至控制行动而变。设作预报的空间为 $\Omega(x, y, z)$ 和时段为 $\Delta t_p = [t_0, t_N]$,不妨记作业空间 Ω_a 和时段 Δt_a 各与 Ω 和 Δt_p 重合(其实,在不作业的空间和时段部分,取 H 为零即可)。于是简记预告和作业时空间为 $\Omega(x, y, z) \times [t_0, t_N]$ 。此外,还有初始条件和边界条件等。这样,有大气状态的预报方程等如下:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = A(F, C, H), (x, y, z) \in \Omega, t \in [t_0, t_N], \quad (1)$$

$$F|_{t=0} = F^{(0)}(x, y, z), \quad (2)$$

$$B(F, C, t)|_{\partial\Omega} = G(x, y, t), \quad (3)$$

其中, A 为预报方程算子(即大气动力学方程), B 为相应的边界条件的算子, $\partial\Omega$ 即 Ω 的下边界,初条件 $F^{(0)}$ 为作业前的观测所给出, G 为已知的函数或与 F 有关。另:为简单起见,这里略去了侧边界条件。因引入了 $H(x, y, z; t)$,故 $t > t_0$ 以后,状态变量 F 就依赖于待定的函数 H 。收益函数 Q 则是 F 和 H 的函数,即泛函,记其单位时间单位面积的密度为 $q(x, y; t)$ [例如取 ΔP 为检验量,则 $q(x, y; t)$ 依赖于当时当地的雨强 p],于是要求

$$Q = \int_{t_0}^{t_N} \iint_S q(x, y; t) dx dy dt = \text{最大}, \quad (4)$$

其中检验区域 $S \in \partial\Omega$ 。于是最优控制就是求解(1)~(4)来定出 $H(x, y, z; t)$ 。在这里,同化和反馈都

已自动考虑在内了。

如果取 $Q = \Delta P$,则我们肯定还要求经费不能大于某个限度,即

$$C_A \leq \text{某数}, \quad (5)$$

不过当用 $Q = E$ 或 E_p/C_A 时,因条件(5)其实已在 Q 中计及而不必再加入了。

如何求出 $H(x, y, z; t)$,目前最好的办法之一是引入相应的伴随算子 A^* 和 B^* ,与 F 和 G 相对应的伴随函数 F^* 和 G^* (Zeng, 1995; Zhu et al., 1999)。当然,也有别的方法,不用计算伴随函数 F^* 和 G^* ,效果也很好。

4 效果检验方法

因为不能确知不进行作业的降雨量 P_u ,只有经过作业后的实际降雨量 P ,因而不可能确知增雨量 ΔP 。不过有作业前的降雨量预报值 $P_{(i)}$ 和作业完了一定时间后的预报量 $P_{(N)}$ 。如果预报模式足够好的话,不妨在作业方案的制定中取

$$P_{(N)} - P_{(i)} = \text{最大}, \quad (6)$$

或由 $P_{(N)} - P_{(i)}$ 算得的 Q 为最大。并取效果检验为

$$\Delta P \approx P - P_{(i)}, \quad (7)$$

而模式(包括作业方案)的误差 δ 就是实有量 P 与预报量 $P_{(N)}$ 之差:

$$\delta = P - P_{(N)} = \int_{t_0}^{t_N} \iint_S (p - p_{(N)}) dx dy dt, \quad (8)$$

其中 p 和 $p_{(N)}$ 为相应的雨强。

一旦进行了相当多次的作业事件,则可对其作集合平均,得到统计检验结果 $\langle \Delta P \rangle$ 以及相应的 $\langle E \rangle$ 和 $\langle E_p/C_A \rangle$,并给出增雨估计的误差 $D \equiv \delta^2 > 1/2$ 。这些都是较客观、较定量的,效果检验有说服力。

5 讨论

这里提出应用自然控制论方法来进行人工增雨作业和效果检验,在今时是完全可以进行试验的。

这样做的条件已具备:观测已能覆盖较大的空间范围,分辨率和精细程度已比以前大为进步;催化效率比以前提提高且可大量生产;区域及中尺度天气预报和云雨演变过程方程已经大体上可以描述云微物理和降雨过程(当然还需再提高精度);可高速计算的计算机不难拥有,甚至可放在作业指

挥场所,运算速度可以满足时效要求。只要将观测、预报、调控方案、作业指挥、效果检验设置好和组织好,这样的增雨试验完全可以进行。

也许会提出问题:这样的效果检验是否可取?例如选定了一块检验区域是否太局限了。首先,那块区域应是人们最关心的,它也可以是不固定的。其次,若某次作业后在所选的那块区域增雨效果不佳,但在其外的区域则有效果,则把原选的那块区域扩大到包括有争议的区域。不过,在很大的区域进行平均,有可能正、负相消,效果反而不显著,不具有说服力。

最后应当指出,本文的方法是在现有的科技水平上作出的“最优调控”。显然,要作到真正好的人工影响天气,天气系统动力学、云和雨的动力学、催化剂或人工影响方法等基础研究是必须加强的。

致谢 本文是根据作者在“东北区域第一届人工影响天气科学技术研讨会(2011年6月15日,长春)”的报告写成,作者衷心感谢该研讨会组委会和东道主吉林省气象局及吉林省人工影响天气办公室金德镇主任的盛情邀请和提供的许多宝贵意见和帮助。

参考文献 (References)

- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 219pp. Gu Zhenchao. 1980. Physics of Clouds and Precipitation [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 219pp.
- 黄美元. 2011. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 543–550. Huang Meiyuan. 2011. Urgent problems and thinking of development for precipitation enhancement in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 543–550.
- 黄美元, 沈志来, 洪延超. 2003. 中国科学院大气物理研究所半个世纪以来的云雾、降水和人工影响天气的研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 536–551. Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Hong Yanchao. 2003. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 536–551.
- 纪念著名大气科学家顾震潮编委会. 2006. 开拓奉献, 科技楷模——纪念著名大气科学家顾震潮 [M]. 北京: 气象出版社, 413pp. Editorial Committee for Memorial Collection of Papers to Professor Gu Zhenchao. 2006. Dedication, Pioneer and Great Scholar — Memorial Collection of Papers to Professor Gu Zhenchao, the Great Scientist in Atmospheric Sciences [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 413pp.
- 刘峰, 黄顺祥. 2011. 大气环境风险控制的优化理论与应用 [M]. 北京: 气象出版社, 168pp. Liu Feng, Huang Shunxiang. 2011. Optimization Theories and Application in Atmospheric Environment Risk Control [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 168pp.
- 毛节泰, 郑国光. 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨 [J]. 应用气象学报, 17 (5): 643–646. Mao Jietai, Zheng Guoguang. 2006. Discussions on some weather modification issues [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (5): 643–646.
- Marchuk G I. 1986. Mathematical Models in Environmental Problems, translated from Russian [M]. Amsterdam, North-Holland, 217pp.
- 钱学森, 宋健. 1980. 工程控制论 [M]. 北京: 科学出版社, 453pp. Qian Xuesen, Song Jian. 1980. Engineering Cybernetics [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 453pp.
- 宋健. 1991. 系统控制论 [M]//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. Song Jiang. 1991. System Cybernetics [M]// China Encyclopedia, Vol. Automatic Control and System Engineering (in Chinese). Beijing: China Encyclopedia Press, 1–6.
- Tsien H S. 1954. Engineering Cybernetics [M]. New York: McGraw-Hill Press, 289pp.
- 吴琳, 曾庆存, 洪钟祥. 2012. 控制论与人工影响天气 II: 工程控制论在人工增雨作业中的应用与建模 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 979–985. Wu Lin, Zeng Qingcun, Hong Zhongxiang. 2012. Cybernetics in the artificial weather modification. II: Application of engineering control theory in weather modification and its modeling [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 979–985.
- Wiener N. 1948. Cybernetics [M]. Boston: MIT Press, 194pp.
- Wiener N 著, 郝季仁译. 1963. 控制论(或关于在动物和机器中控制和通信的科学) [M]. 北京: 科学出版社. Wiener N. 1961. Cybernetics (Or Control and Communication in the Animal and the Machine) [M]. Massachusetts: MIT Press, 212pp.
- Zeng Q C. 1995. Silt sedimentation and relevant engineering problem—An example of Natural Cybernetics (Invited lecture). // Proceedings of Invited lectures, 3rd International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Hamburg, Germany, July 3–5, 1995. Mathematical Research. Vol. 87, edited by Klaus Kirchgässner, et al., Akademie Verlag, Berlin.
- 曾庆存. 1996. 自然控制论 [J]. 气候与环境研究, 1 (1): 11–20. Zeng Qingcun. 1996. Natural cybernetics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 1 (1): 11–20. (Zeng Qingcun. 1996. Natural cybernetics [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 10 (2): 105–113.)
- Zhu J, Zeng Q C, Guo D J, et al. 1999. Optimal control of sedimentation in navigation channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 125 (7): 750–759.
- Zhu J, Lin C Y, Wang Z F. 2009. Dust storm ensemble forecast experiments in East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (6): 1053–1070, doi: 10.1007/s00376–009–8218–0.