

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.34. 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.

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

吴琳 曾庆存 洪钟祥

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 人工增雨已有 60 余年历史, 虽已取得很多成绩, 仍存在很多亟待解决的科学技术问题, 典型问题如作业具有一定的主观性及其与效果检验有脱节。控制论研究如何对系统施加控制作用使其表现出预定行为。作者研究工程控制论在人工增雨作业中的应用与建模问题, 将工程控制论引入人工增雨作业, 称作“局部控制”方法。以冷云的人工催化过程为例, 以单容加延迟的过程来简化单块冷云催化核化过程, 建立了有反馈的冷云催化框架模型。根据效果调整催化剂的播撒率以实施控制作用, 使作业后的雨云关键参数达到预期值。这种“局部控制”方法, 可使现有作业更科学化和客观量化, 只在作业设备中增加一通讯单元和作为传感/变送器以及控制器的一套专业软件即可。“局部控制”方案也可嵌入以自然控制论为框架的大范围全面全程控制问题中, 简化作业的方案。

关键词 人工增雨 催化剂播撒率 效果检验 工程控制论 自然控制论

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0979-07

中图分类号 P427

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.34

Cybernetics in the Artificial Weather Modification II: Application of Engineering Control Theory in Weather Modification and Its Modeling

WU Lin, ZENG Qingcun, and HONG Zhongxiang

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

Abstract The application of engineering control theory in weather modification process and its modeling are studied. Although weather modification has been developed for more than 60 years and has great achievements, there are still many scientific and technical problems to be solved, typically as the blindness of operation and the evaluation. Control theory studies how to manipulate action on the system to make it hold the given behavior. The authors introduce engineering control theory in weather modification, educe the “local control” method, and take the cold cloud seeding as an example. The first order plus dead time model is employed to simplify the seeding-nucleation process for one cloud mass and the frame model of cold cloud seeding process with feedback is established. This model adjusts the seeding rate according to the effects, so that key parameters of the rain clouds could achieve the desired values. The “local control” method also can be embedded in the global system controlling action (the natural cybernetics) to simplify the operation.

Keywords Artificial rain enhancement, Seeding rate, Verification, Engineering control theory, Natural cybernetics

收稿日期 2012-08-02 收到, 2012-09-20 收到修定稿

资助项目 博士后科学基金20100480436、201104139

作者简介 吴琳, 女, 1983 年出生, 助理研究员, 从事控制论和大气科学研究。E-mail: wulin@mail.iap.ac.cn

1 引言

人工影响天气是指在适当的天气条件下,经由人工干预,使天气过程向期望方向发展,主要包含人工增雨和人工消雹(毛节泰和郑国光, 2006)。人工增雨的历史始于 1946 年 Vonnegut and Chessin (1971) 发现干冰和碘化银可作为高效的冷云催化剂, 经由 60 多年的发展, 在播云试验、数值模拟和工程作业上都有一定进展 (Hess, 1974; 胡志晋等, 1983; Cooper et al., 1997; 黄美元等, 2003; Drofa, 2006; Guo and Zhen, 2009; Morrison et al., 2009)。但直到目前, 人工增雨仍存在着许多亟待解决的问题, 没有充分利用近、现代云物理学的成就, 人工增雨的若干关键技术方法尚未科学地发展起来, 典型问题如: 人工增雨作业的盲目性较大、缺少有效的效果检验方法 (黄美元, 2011)。这两个问题实质为一个, 因作业是否科学, 本身即是以能否达到预期效果加以判断的。以往研究中把作业方案与效果检验隔离开, 不知道应二者结合, 加以反馈, 即缺少根据效果对作业进行再调节的环节; 其实, 从工程控制角度上讲, 即便是最简单的控制系统, 没有反馈的开环调节都是难以达到稳定效果的。曾庆存 (1996) 提出自然控制论的思想, 并指出, 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敏感作业对象, 然后应用有效的作业方法, 并连续检验作业效果, 把其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。在广义上来说, 此类控制问题和工程控制如导弹制导十分相似, 只是被控对象是一个复杂巨系统。此后, 雷恒池等 (2001) 用自然控制论原理和方法, 从理论上探讨了用人工增雨来解决黄河断流所遇到的一些问题及解决方案, 首次提出了解决人工增雨的正问题与反问题的概念, 将自然控制论在人工增雨中的应用做了进一步理论化和实用化发展。

此外, 人工增雨中通常用降雨量来评价作业效果, 但实际上, 云和降水的发展受宏观和微观过程共同影响, 宏观过程如天气系统抬升、地形动力作用等, 微观过程为云的微物理过程 (廖菲等, 2006), 人工可干预的只是某些过程 (毛节泰和郑国光, 2006), 典型的如人工催化过程; 采用降雨量作为人工增雨作业的评价指标, 虽然直接, 但难以说清效果是否来源于人工影响, 除非采用更系统性的控

制理论 (如自然控制论)。较为简单的方法是区分云降雨中各过程环节, 有针对性地人工干预某些具体过程, 选择适当的云动力学参数或云微物理参数作为效果指标。例如, 针对冷云的人工催化过程, 有效评价量应为核化冰晶数的变化量, 由此提出来的一个最优控制问题: 即如何科学作业, 能使核化冰晶数的增加量达到期望值。

以 Wiener 为代表的一代科学家揭示了控制概念的本质内涵, 核心有如下几点: 1) 控制是一种有目的的行为, 并给目的概念以科学的量化界定 (Rosenbluth et al., 1943); 2) 控制问题的关键应该明确, 例如对电信来说, 是围绕信息概念展开的, 控制过程即通信过程 (Wiener, 1948); 3) 系统实现目的性行为的机制是负反馈, 反馈是系统控制熵的手段 (Wiener, 1954)。控制由此表现出极强的科学解释力和工程实现力 (苗东升, 2006)。除典型的工程应用, 如化工工业的过程控制、导弹的制导控制等, 控制论的理论和方法还已被大量应用到经济管理、能源管理、生产和消费的自动化管理、交通运输自动化调度等多领域 (钱学森和宋健, 1980)。钱学森和宋健 (1980) 指出, 世界上各种过程的发展, 很多是可以由人来控制的, 至少可以在不同程度上对发展的趋势和进程施加影响, 在充分了解了过程的运动规律, 即建立了比较准确的数学模型后, 就可以应用类似于工程控制论中的系统设计办法去寻找和确定能达到预期目的的控制方案。毋庸置疑的是, 从生物和机器通讯中抽象概括出的控制论, 也适于自然环境这类复杂巨系统, 只是尚须理论化的足够发展。

本文的目的是选择人工增雨中的某一具体化过程, 即“局地”控制问题, 采用简化模型描述与解释控制论在人工增雨作业中的应用过程, 揭示控制论在科学作业中的潜力。原则上, 可将云和降水的发展作为一个动态系统, 将控制论引入人工增雨作业, 对云降水的某一具体过程, 研究人工控制的可能性, 以及如何施加控制作用, 使云动力学参数或云微物理参数达到期望值。本文即针对冷云的人工催化过程, 研究引入工程控制论进行科学作业的建模和数值模拟。

2 控制论在冷云催化中的应用框架

2.1 反馈控制回路的基本构成

反馈是控制论的核心思想, 即利用系统输出与

期望值的偏差来调节系统输入、控制系统行为,使误差减小,以至趋近于零。这也正是控制论创始人 Wiener (1948) 所提出的“双向通讯”的概念,既有从系统输入到系统输出的正向信息传递和变换,也有从系统输出端返回输入端的反馈信息 (Wiener, 1948)。反馈控制系统通常称为闭环控制回路,反之,如果系统的输出信号只是被检测,不反馈到系统的输入端,则为一个没有闭合的开环控制系统。

反馈控制系统是最基本的过程控制系统,典型环节包括被控对象、传感器和变送器、控制器、以及执行器(其回路的基本结构见图 1)。图 1 就是工业或工程控制系统的基本框图,其中的被控对象指被控制的过程或系统,该系统的某重要参数 y 为被控量,也记为系统的输出量, f 为外来扰动作用(一般为不可知)。传感器或变送器用来检测系统输出量,并转换为标准信号,即是 y 的某种泛函 z 。 r 为根据需求给定的被控量参考值或设定值,即期望被控量应保持的参数范围。 e 为被控量的测量值与参考值的偏差,为控制器的输入信号,控制器根据此偏差值和控制律设计控制信号 u ,输出给执行器,并得到实际控制量再加到被控制对象 y 中。人工影响天气(例如人工增雨)当然没有这样简单和鲜明,而应从广义上去理解每一环节。这里最主要的是反馈过程,否则将是一个开环系统,是低效甚至无效的控制。当今人工影响天气的作业就是这样。曾庆存(1996)特别注意到这点,第一次将反馈过程引入到人工影响天气作业中,使之成为一个闭环的可控制问题,并可用图 1 恰当地表述。

2.2 控制论在冷云催化中的应用建模

冷云人工增雨的基本依据是,大部分形成降水的混合云中,冰晶粒子的浓度是决定云体能否产生降水以及降水多少的主要条件(杨洁帆和雷恒池, 2010)。因此,选择被控量为播云催化后云中冰晶粒子浓度的增加量。将人工催化过程近似为一个过

程控制系统(这就是局部控制系统),将要进行催化的云层作分块处理,单块体积为 V_c 。为使控制问题易于表达,本文弱化云降水的微物理过程的复杂性,做如下简化处理:1) 设被作业的冷云块已满足人工增雨作业条件,且其环境参数相对稳定;2) 冰晶粒径单一;3) 简化核化机制,虽然播云催化剂 AgI 粒子具有凝华、接触、凝结—冻结和浸润 4 种主要核化机制(杨洁帆和雷恒池, 2010),只用单一的核化率系数 α 来表示。图 2 为人工催化的控制过程示意图, N_r 为冰晶浓度增加量的期望值,由云降水条件给定;设 N 为云块中的冰晶浓度; Q_i 为催化剂输入量(单位: g/s); Q_o 为催化剂输出量(单位: g/s); 控制器根据偏差值 $(N_r - N)$ 设计控制律,调节输入量;测量变送模块检测催化剂的剩余输出量(未达到核化冰晶粒径的粒子浓度),再通过核化率转化为冰晶浓度。在实际作业中,要引入反馈机制,就必须了解实况,即适时探明云的状况,催化云可由六氟化硫(SF_6)气体示踪,在空中观测到的 SF_6 浓度与被催化中冰晶浓度的相关性为观测到的冰晶与催化作业之间的直接联系提供了证据(Stith et al., 1990),这项工作对于监测云中条件的变化和比较被催化的与未被催化的云团都是重要的第 1 步(Czys, 1995),也是反馈控制实现的关键探测环节。因此,除播撒催化剂的飞机外,还需一架飞机适时探测催化剂的剩余量(同时可作云微物理的科学试验),再将信息反馈给作业飞机上的控制器和播撒的执行器(如图 3 所示)。

设催化剂粒子的质量为 m , 对 V_c 体积的云块, dt 时间内增加的冰晶浓度为

$$dN = \alpha \cdot \frac{[Q_i(t)dt - Q_o(t)dt]}{m \cdot V_c}, \quad (1)$$

即

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \cdot \frac{Q_i(t) - Q_o(t)}{m \cdot V_c}, \quad (2)$$

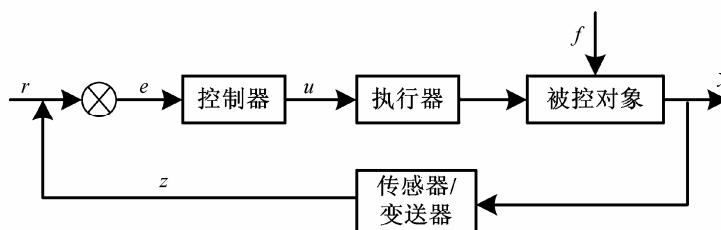


图1 反馈控制回路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of feedback control

对 N 求解, 得

$$N = k \int (Q_i - Q_o) dt, \quad (3)$$

式中, $k = \alpha / (m \cdot V_c)$ (这里近似地取核化率系数 α 为常数)。由式 (3) 可见, 这是一个积分过程, 积分过程一般是非自衡的, 即不能靠自身演变达到平衡或稳定状态, 所以要加上限制 (即制约) 条件, 而这就是控制论要解决的问题。

假设初始条件为 $N(0) = N_0$, $dN(0)/dt = 0$, 则式 (3) 的拉普拉斯变换式为

$$\frac{sN(s)}{k} = Q_i(s) - Q_o(s) = \Delta Q(s), \quad (4)$$

即传递函数为

$$G(s) = \frac{N(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{k}{s}. \quad (5)$$

催化剂粒子播撒后, 经由扩散、核化过程, 到能产生冰晶, 存在一定的作用时间, 即系统延迟。假设

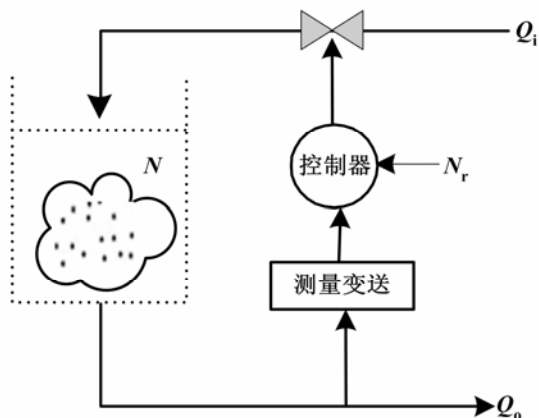


图2 有反馈的冷云催化过程示意图 (虚框表示开边界条件)

Fig. 2 Schematic diagram of cold cloud seeding with feedback (the dotted rectangle denotes the open boundary condition)

催化核化的作用时间为 τ , 即公式 (5) 具有纯延时 τ , 其传递函数为

$$G(s) = \frac{k}{s} \exp(-\tau s). \quad (6)$$

工程控制上将上述过程称为一阶单容延迟系统。虽然多数物理化学过程动态上都很复杂, 但通常可以相当准确地用单容加延迟来模拟, 因几乎所有的物理过程都有一些储存物质或能量的容积, 并且在输入和输出之间也都有某些传输、扩散和作用过程导致的延迟 (Shinskey, 1996)。同时, 钱学森和宋健 (1980) 指出, 对分布参数控制系统而言, 如果时滞是由于运动在某种场内传递而造成 (正如本文中的催化剂扩散作用过程), 时滞系统即为分布参数系统的一个特例, 可用带有时滞环节的常微分方程来描述。

此外需指出的是, 以上仅为针对单一云块的一阶近似, 实际上许多过程都由两个或一连串的容积组成。如果催化作用云的微物理特性相差较大, 则要将其分块建模, 甚至要采用有相互作用的多容过程进行近似, 其示意图如图 4 所示。

2.3 控制器设计

比例积分微分控制 (PID 控制) 根据被控量的测量值与标准值 (预期值) 的偏差 $e(t)$ 计算新的控制输入 $u(t)$, 具有原理简单、适应性强和鲁棒性强的特点, 在工业控制中得到了广泛应用, 如工业过程控制中 95% 以上的控制回路都具有 PID 结构, 且许多高级控制都以 PID 控制为基础。经由 PID 的控制输入

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\xi) d\xi + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (7)$$

其中, K_p 、 T_i 和 T_d 分别是比例、积分和微分系数。

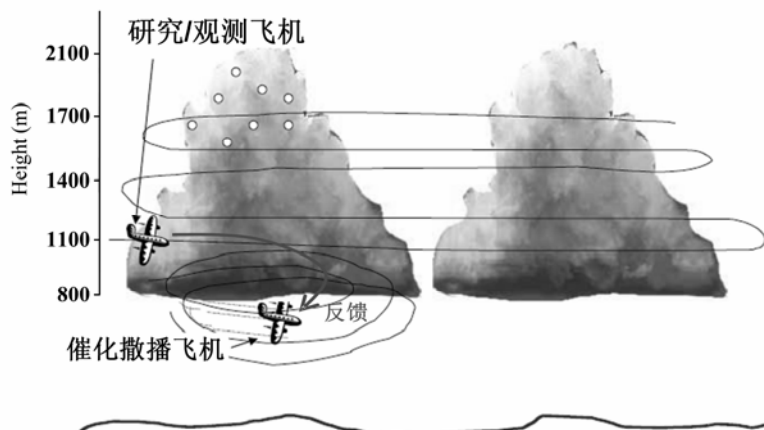


图3 引入反馈机制的人工增雨作业示意图

Fig. 3 Cloud seeding operation with feedback

比例控制是一种最简单的控制方式,其控制器的输出与输入信号成比例关系,比例控制只改变系统增益,增大比例系数可提高系统的开环增益,减小系统的稳态误差,从而提高系统的控制精度,但同时会降低系统的相对稳定性,甚至造成闭环系统的不稳定;微分控制中,控制器的输出与输入误差信号的微分(即误差的变化率)成正比关系,微分控制反映偏差的变化率,能预测误差变化的趋势,对有较大惯性或滞后的被控对象,比例微分(PD)控制器能改善系统在调节过程中的动态特性;积分控制的主要目的是使系统无稳态误差。PID也是本文选择的控制律。

此外,因催化剂的作用需要时间,该系统含滞后环节,当控制作用产生后,在滞后时间范围内,被控参数完全没有响应,使得系统不能及时随被控量进行调整以克服系统所受的扰动。滞后环节被公认为较难控制的过程,采用常规的反馈控制方法,难以取得显著效果,大滞后会降低整个控制系统的稳定性,难以达到控制目标,需采用补偿控制。本文采用 Smith (1957) 提出的补偿方案,实际应用中,给 PID 控制器并接一个补偿环节,在系统的反馈回路中引入补偿装置,将控制通道传递函数中的纯滞后部分与其他部分分离,其特点是预先估计出系统在给定信号下的动态特性,然后由 Smith 预估器

进行补偿,力图使被延迟了的被调量超前反映到调节器,使调节器提前动作,从而减少超调量并加速调节过程。最后,必须指出,人工影响天气问题关注的是有无效果,不须像工业或工程控制问题那样要求长期或全程稳定,控制似不必用公式(7)那样精细。

3 数值仿真

设催化剂为 AgI 粒子,每粒子半径均为 $0.1 \mu\text{m}$, 质量为 $m = 2.38 \times 10^{-14} \text{ g}$ 。针对冷云的人工催化过程,被控变量为:单位体积(单位: m^3)上增加的核化冰晶数;期望控制状态为:使云中有 $N_t = 10^4 \text{ m}^{-3}$ 冰晶(余兴和戴进, 2007);被控输入量为:AgI 播撒率(单位: g/s);假设环境温度为 -15°C , 则对应核化率约为 0.6(刘诗军等, 2005);催化剂的延迟作用时间: $\tau = 10 \text{ s}$ (如引入扰动 f 后,可有些变化);层状云分块的尺度取约百米的量级,并假设 $V_c = 5 \times 10^6 \text{ m}^3$, 则

$$k = \alpha / (m \cdot V_c) = 0.6 / (2.38 \times 10^{-14} \times 5 \times 10^6) \doteq 5 \times 10^6 \text{ g}^{-1} \text{ m}^{-3}. \quad (8)$$

根据第 2 节中建模构建的仿真框图(见图 5),整定 PID 参数,仿真结果见图 6。由图 6a 可见,本文设计的控制回路与控制器达到了期望目标值

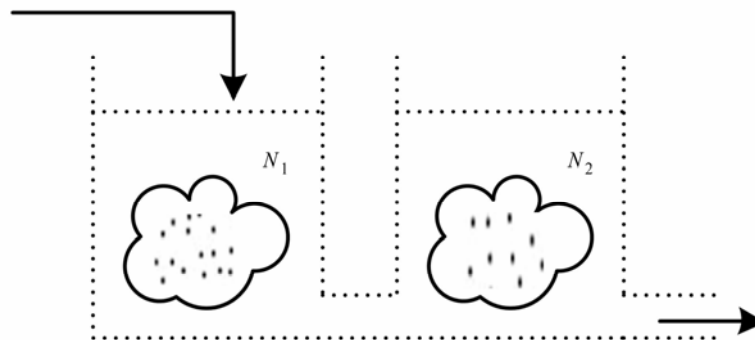


图4 多容过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multi-capacities process

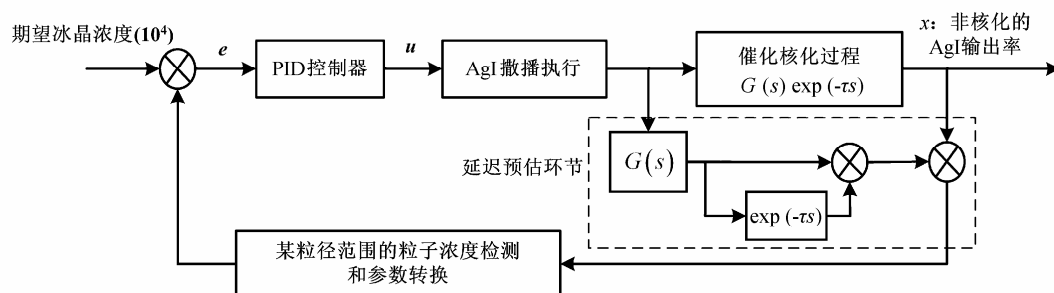


图5 仿真框图

Fig. 5 Simulation block diagram

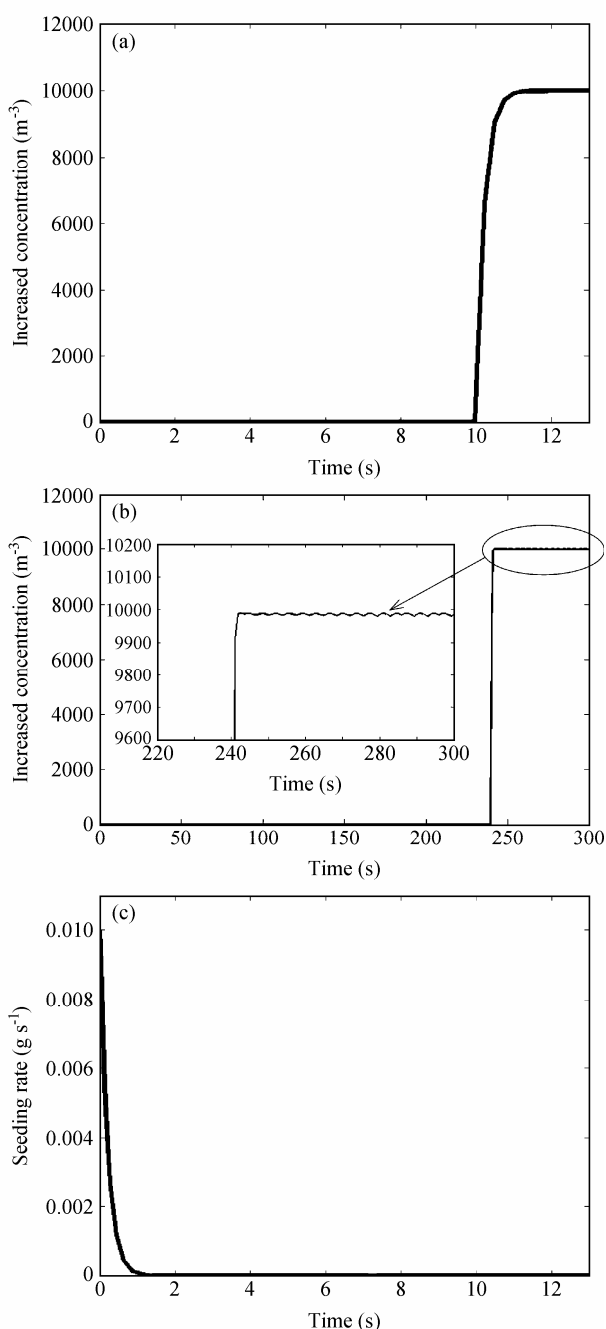


图6 仿真结果: (a) 冰晶浓度增加量 (延迟时间10 s); (b) 冰晶浓度增加量 (延迟时间240 s); (c) 催化剂播撒率

Fig. 6 Simulation results: (a) Increased concentration of ice crystal (delay time 10 s); (b) increased concentration of ice crystal (delay time 240 s); (c) seeding rate of AgI

10^4 m^{-3} ; 图 6c 为经由控制器后的输入量, 由该图可见, 催化剂的播撒率随作业时间呈负指数律下降, 输入量可很快下降到 0。这里要指出的是, 因模型的简化、假设边界和假设参数, 得出的催化剂播撒率可能非真实, 但变化趋势是物理合理的, 也进一步表明了第 2 节的原理的可行性。此外, 当催

化剂的延迟作用时间增加时, 如 240 s, 冰晶浓度也可较快增大到期望浓度, 但略有波动, 如图 6b 所示。

4 讨论与总结

人工增雨中存在作业主观性和效果检验两个典型问题, 而作业中缺少反馈机制是导致作业和效果检验产生脱节的主要原因。本文结合自然控制论的思想, 引入工程控制论研究人工增雨作业中“局部”优化的科学原理、方法与应用建模。首先指出, 因云降水过程的复杂性, 目前人工增雨作业都只针对某一具体过程, 例如人工影响云动力学参数或云微物理参数, 并作为效果指标。本文是将反馈机制引入到作业中, 使成为一个可优化的“局部”控制系统, 随时检验控制效果, 以便不断调整作业, 以达到最优效果。以冷云的人工催化过程为例, 假设被作业云可以分块, 采用单容加延迟的模型来简化单块云中的催化核化过程, 建立在人工催化中应用控制论方法的框架和模型: 根据测算值与期望值的偏差调节催化剂播撒率 (各云块可能不同), 最终使云内增加的冰晶浓度达到设定的期望值。对单块云的假设模型, 设计控制律和整定控制参数进行数值仿真, 结果表明, 可达到期望值, 催化剂的播撒率应随时间以负指数律下降。这种“局部控制”方法, 可内嵌入自然控制论的大框架中, 达到整体目标, 使现有作业更科学化和客观定量化。

本文只讨论了工程控制论在人工增雨作业中的应用思路与过程, 揭示了控制论在科学作业中的潜力。对于现有人工作业方案和本文所提出的“局部”控制问题, 其检验的并非“增雨”本身, 而是云中的某种参数, 例如本文中的冰晶浓度增加量的期望值 N_t , 但 N_t 与预期的增雨量的关系并非一定。其次, 究竟要对哪些地方和哪些云块进行作业, 还将另作判断和决定。这些就不是“局部”控制方案所能解决的, 而必须用自然控制论的方法, 直接面对实际的大范围云降水过程和开边界、大滞后、分布式、且具有强非线性和不确定性的巨复杂系统。不过, 一谈到具体的作业问题, 就有许多实际的具体问题需要解决, 这些也必须包括到自然控制论框架的作业中去。目前的控制理论针对此类复杂系统有较大局限性, 系统本身就难以建模和相应的理论化; 工程控制的实现, 还极大地依赖于对系统输出量 (云动力学参数或云微物理参数) 的检测或探测

才能进行反馈,而这有待于针对云物理的探测理论发展和技术实现;此外,即便只针对云降水中的可干预的某一具体小过程,仍是工程量巨大的。虽存在上述问题,工程控制论的引入仍将是人工增雨作业的趋势,是解决目前存在问题的科学化和客观化手段。我们拟继续探索,下一步将采用较复杂的模式和方法,例如用一个含催化作用的云物理模式,研究基于模式输出数据的反馈控制。

致谢 本文由作者在“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)”的报告延伸和改写而成,作者衷心感谢该研讨会组委会和东道主吉林省气象局、吉林省人工影响天气办公室和金德镇主任的盛情邀请、提供的许多宝贵意见和帮助。

参考文献 (References)

- Cooper W A, Brintjes R T, Mather G K. 1997. Some calculations pertaining to hygroscopic seeding with flares [J]. *J. Appl. Meteor.*, 36 (11): 1449–1469.
- Czys R R. 1995. Progress in planned weather modification research: 1991–1994 [J]. *Rev. Geophys. Suppl.*, 33: 823–832.
- Drofa A S. 2006. Formation of cloud microstructure during hygroscopic seeding [J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 42 (3): 326–331.
- Guo X L, Zheng G G. 2009. Advances in weather modification from 1997 to 2007 in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (2): 240–252.
- Hess W N. 1974. *Weather and Climate Modification* [M]. New York: Wiley, 842pp.
- 胡志晋, 严采馨, 王玉彬. 1983. 层状暖云降雨及其催化的数值模拟 [J]. *气象学报*, 41 (1): 79–88. Hu Zhijin, Yan Caifan, Wang Yubin. 1983. Numerical simulation of rain and seeding processes in warm layer clouds [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 41 (1): 79–88.
- 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.
- 雷恒池, 曾庆存, 李仑格, 等. 2001. 从自然控制论看黄河上游人工增雨 [J]. *气候与环境研究*, 6 (4): 391–399. Lei Hengchi, Zeng Qingcun, Li Lunge, et al. 2001. Investigation of artificial precipitation augmentation at the upper reaches of the Yellow River based on natural cybernetics [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 6 (4): 391–399.
- 廖菲, 洪延超, 郑国光. 2006. 影响云和降水的动力、热力与微物理因素的研究概述 [J]. *气象*, 32 (11): 3–11. Liao Fei, Hong Yanchao, Zhen Guoguang. 2006. Research reviews of dynamic, thermodynamic and microphysical factors affecting cloud and precipitation [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (11): 3–11.
- 刘诗军, 胡志晋, 游来光. 2005. 碘化银核化过程的数值模拟研究 [J]. *气象学报*, 63 (1): 30–40. Liu Shijun, Hu Zhijin, You Laiguang. 2005. The numerical simulation of AgI nucleation in cloud [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (1): 30–40.
- 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.
- 苗东升. 2006. 从控制自然到自然控制 [J]. *河池学院学报* (哲学社会科学版), 26 (1): 7–10. Miao Dongsheng. 2006. From controlling nature to controlling naturally [J]. *Journal of Hechi University* (in Chinese), 26 (1): 7–10.
- Morrison A E, Siems S T, Manton M J, et al. 2009. On the analysis of a cloud seeding dataset over Tasmania [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48 (6): 1267–1280.
- 钱学森, 宋健. 1980. *工程控制论* [M]. 北京: 科学出版社, 1100pp. Qian Xuesen, Song Jian. 1980. *Engineering Cybernetics* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1100pp.
- Rosenbluth A, Wiener N, Bigelow J. 1943. Behavior, purpose and teleology [J]. *Philosophy of Science*, 10: 18–24.
- Shinsky F G. 1996. *Process Control Systems: Application, Design, and Tuning* [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 439pp.
- Smith O J M. 1957. Closer control of loops with dead time [J]. *Chemical Engineering Progress*, 53 (5): 217–219.
- Stith J L, Detwiler A G, Reinking R F, et al. 1990. Investigating transport, mixing and the formation of ice in cumuli with gaseous tracer techniques [J]. *Atmospheric Research*, 25 (1–3): 195–216.
- Vonnegut B, Chessin H. 1971. Ice nucleation by co-precipitated silver iodide and silver bromide [J]. *Science*, 174(4012): 945–946.
- Wiener N. 1948. *Cybernetics* [M]. Boston: MIT Press, 194pp.
- Wiener N. 1954. *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society* [M]. Massachusetts: Da Capo Press, 199pp.
- 杨洁帆, 雷恒池. 2010. AgI 焰剂对层状云催化的数值模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 15 (6): 705–717. Yang Jiefan, Lei Hengchi. 2010. Simulation of AgI seeding on stratiform cloud with category model [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (6): 705–717.
- 余兴, 戴进. 2007. 层状云飞机增雨催化剂用量研究 [J]. *气象科技*, 35 (1): 115–118. Yu Xing, Dai Jin. 2007. Investigation on catalyst dosage in aircraft cloud seeding in stratiform clouds [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 35 (1): 115–118.
- 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.