

# 界壳论及其应用

曹鸿兴 封国林

系统论将世界视为系统与系统的集合，研究世界的任何部分，界壳论则把研究目标放在系统怎样通过其周界影响环境，以及环境通过周界反作用于系统。因此，可以说界壳论是系统科学的一个分支。

鸡蛋的外壳、地球的大气层、人的衣服、生物膜、国界和互联网中的防火墙等都是界壳现象，它普遍存在于物质世界和精神世界。界壳论是研究系统周界的一般性理论，即研究存在于系统周界中的某些共同规律及其在信息、工程、物理、生物、心理和哲学等领域中的应用。

本文从应用角度介绍界壳论，先通过实例来说明什么是界壳论，从界壳论的起源、演化及其应用范畴来说明界壳问题的普遍性，然后论述界壳论的基本原理，进一步叙述界壳论的种种应用实例，特别是其在气象中的应用。

系统论将世界视为系统与系统的集合，研究世界的任何部分，就是研究相应的系统本身及其与环境的关系。界壳论则把研究目标放在系统怎样通过其周界影响环境，以及环境通过周界反作用于系统。因此，可以说界壳论是系统科学的一个下属分支。对系统周界或边界的研究早已有之。在微分方程中的边值问题，早在19世纪就已提出，是早期的界壳论问题，不过，这里边界只是一个从属体，而不是研究的主体。从瓦特蒸汽机出现后，人们就研究各种各样的热工系统，研究这些系统的热量输入和输出以及怎样防止热量的损失。热工系统的各个环节都和界壳论的主要论题——交换和保护相联系。又如动物冬眠早为人们所关注，生物学家对此做了深入的观测和分析。冬眠的洞可以使动物免受或少受寒冷侵犯，同时，不吃不喝、减缓呼吸是动物用身体来卫护自己免于死亡。可以看到，动物冬眠时有双重界壳——洞和体表在起作用。界壳论是从演绎的角度来讨论这些早已存在的问题，加以从当代科学来统一地研究，创立新的概念和理论。

## 一、界壳现象

在现实世界中存在着大量的界壳现象。例如一个村庄或一个城市，只有为数不多的若干条道路与其周围相通，也就是，进出村庄或城市是受到约束的。在

现代，信息通道畅通与否反映了其城市的发达程度。一个细胞的细胞膜保证这个细胞可以存活下去并且可以与外界交换物质和能量，这都归因于离子在细胞膜中来回运动。在两个不同的国家或部落间存在深深的心灵隔阂，可以引起这两个国家和部落之间的持续冲突甚至战争。衣服是为防风保暖，但盔甲是为了防刀箭，盔甲是古代战争的重要防身手段。

在国家的边界上都有国防军把守，防止他国人进入。只有在若干口岸才准许人员、物资进出。而口岸的多少与繁忙程度往往是该国经济发展程度的反映。

动物几乎都有领土行为。一只动物到了某地会用尿把周围圈起来，防止其他动物侵入。一只外来昆虫误入蚁群就会被咬死，是动物的保护行为。又如猫的自我保护行为，只要房间里放个箱子，很快猫会将其占领。

不同宗教之间的沟壑是十分显著的，教义的不同、崇拜对象的不同以及仪式的差别，使得其难以沟通。于是各种不同类别的宗教都结成了几乎准封闭的界壳。为了世俗利益和权力，以及地盘的争夺，会发展成宗教战争。十字军东征就是历史范例。

## 二、界壳论的提出与发展

界壳论由中国学者曹鸿兴于1988年提出，已有专著出版，且召开过全国性学术讨论会及出版论文集，互联网上也已有许多有关界壳论的介绍和研究。提出界壳理论是由于受到自然现象和周围环境的启发。例如龟、鳖、蜗牛长有一个坚硬的甲壳用以保护自己，尽管它们因此而行动缓慢，却正是这重甲壳保护了它们免受吞噬，以致繁衍生息，在与地球环境和生态的残酷斗争中保存下来，没有灭绝。又如，当你工作在某一个单位，你就在这单位登记在册，不能随便离开，要受到该单位规章制度的种种约束。单位就是约束你的一个界壳。你生活在特定社会中，呆在特定国家，生活在某个城市或乡村，你就生活在特定的界壳中。这些界壳现象需要从物理、数学、生物学和社会学等角度来研究。而学术分支一旦被提出，就有不断

深入研究的潜力。

界壳论的第一篇文章为《界壳现象及其学术框架》，2002年正式发表于《集对分析与界壳论的研究与应用》一书中。有关界壳论的第一本专著《系统周界的一般理论——界壳论》于1997年出版，奠定了界壳论发展的基础。而2011年出版的《界壳论精要及其应用》一书则已显示出其发展的丰富内容。*Modeling of System Boundary: Periphery Theory*一书即将出版，预示着该项研究正向国际化迈进。界壳论是界壳现象的模型化，2008年以前主要以描述连续的微分方程作为模型化的手段，由于微分方程的数学难度，限制了它在许多学科中的应用。此后，提出了界壳量化的原理和数学方法，开辟出了更多应用领域，尤其是人文科学中的应用途径。

### 三、界壳及其理论

界壳理论是研究系统周界的一般性理论，它并不具体研究个别系统周界，而是研究存在于系统周界中的共同规律。界壳论认为系统是由若干相互作用的部分组成的复合体，与系统相邻并与之依附的部分称为环境或者外界，分隔系统与环境的边界称为周界。无论从系统向环境或是从环境向系统的物质、能量、信息的传输都必须经过这一周界。系统周界对系统的生存、调控和演化起着关键作用，甚至是决定性的作用。如果系统的周界具有：

- 1) 卫护系统的生存和发展，
- 2) 进行环境和系统间的交换，

则把这样的周界称为界壳。界壳论研究界壳的普适性规律，从一般意义上研究界壳的结构、功能和行为。例如，界壳论不研究城墙是怎么建的，城门用什么建；只研究城墙的一般性功能，即防卫敌人，且通过城门，人员和物资得以进出，以维持城里人的生存。

界壳论从一个全新观点来讨论诸如系统平衡和发展、生命生存、种族冲突、信息安全等不同学科中的问题。可以说，界壳论是一块正待开拓的科学处女地。

### 四、界壳要素

周界中卫护系统的部分称为界壁，其交换功能的部分则称为界门或通道。无论界壁还是界门都占有空间维度。因此，本质上界壳是在环境和系内之间占有空间或相空间的特定位置。可以说界壳是空间意义上的物理概念。

#### 1. 开放度

从结构上讲，界壳由界壁（ $W$ ）和界门或通道（ $P$ ）组成。设系统的周界记为 $L$ ，其周长为 $l$ ，定义

界壳开放度 $\rho$ 为通道宽度 $p$ 与周长 $l$ 之比，即

$$\rho = p/l. \quad (1)$$

开放度 $\rho$ 是界壳论的基本概念。界门大小取决于多种因素，例如家居的门的宽度和高度就取决于人的身高和身宽，以及家具大小；海关多寡取决于进出人员和物资的多少。显然，开放度是结构上的，对不同的物质、能量和信息，开放度是不同的。例如古代城门只限制人员和物资的进出，却不能阻止阳光的进入；也就是说，作为生命十分需要的阳光这一能量，城墙对它而言是全开放的，即 $\rho=1$ 。

#### 2. 交换率

另一个重要的界壳要素是交换率，它是功能上的，是对能量、物质或信息通过界门能力的量度。例如A机场的空运量远远大于B机场，人跑步时的空气交换量比平静时要大。

交换率 $\alpha$ 定义为通过界门交换的实际量 $E_s$ 与存在于环境和系统中的可交换量 $E_c$ 之比：

$$\alpha = E_s/E_c. \quad (2)$$

这是一个较为抽象的定义，对于具体问题要设计适合该问题的交换率。交换包括输入和输出两部分。净交换量则是输入和输出之差。输入和输出是一个极为广泛的概念，从某个城市的能源粮食供应、垃圾的运出和处理，到食物、空气进入人体和粪便、汗液的排出等。

#### 3. 界壁抗力

界壁是用来卫护系统的，其卫护功能的大小可以用抗力来表示。例如，乌龟壳的抗力显然比蜻蜓的外壳抗力要大。从这些例子可以归纳出界壁抗力 $R$ 是界壁结构 $C$ 、外在攻击 $A$ 和系统状态 $D$ 的函数，即：

$$R=f(C, A, D)。$$

针对不同的问题可以定义相应的界壁抗力。例如设计一个水坝就可以用相应的水力学方程来计算；酒桶的破损强度可以用实验来确定。确定界壁抗力在实际问题中是十分重要的。

### 五、界壳的数学描述

界壳可由微分方程和离散界元的量化来定量描述。在控制论和系统论中，微分方程是描述系统状态变化的主要手段，作为系统一部分的周界，显然可以用微分方程来描述。尤其是偏微分方程，它对系统边界的描述，也正是界壳论所需要的。但怎样把这些有关成果应用到界壳论，至今尚处初创阶段。现举一例说明。

在虫口模型中，可以加进一个开关参数 $\delta$ ，即

$$x_{n+1} = (\lambda + \delta)x_n(1 - x_n), \quad (3)$$

式中,  $\lambda$ 为模型参数, 构造一个可以依据 $x$ 增量自动调整的参数 $\delta$ ,

$$\delta = \begin{cases} 1 & (x_{n+1} - x_n) / (x_n - x_{n-1}) < 1 \\ 0 & (x_{n+1} - x_n) / (x_n - x_{n-1}) \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中, 当 $x$ 的增加量等于或超过前一刻的增加量时, 关闭开关, 参数 $\delta=0$ , 阻止系统外的物质、能量或信息进入; 当 $x$ 的增加量低于前一刻的增加量时, 开关打开, 参数 $\delta=1$ , 允许系统外的物质、能量或信息进入。显然这是一个界门交换随着系统状态而变的自适应模型。

离散界元量化的基本原理为: 设界壳元素为界元 $u$ , 其卫护度为 $\mu(u)$ , 交换度为 $v(u)$ , 也就是对每一个界元 $u$ 都给定一对值 $[\mu(u), v(u)] \in [0, 1]$ ,  $\mu(u)+v(u) \leq 1$ 。由此导出界壳的各种量度和计算公式。

$\mu, v$ 可以根据专业知识事先给定, 如同模糊集合论中给定隶属函数那样; 也可以运用量测数据来计算。有了 $\mu, v$ , 就可以对界壳的总卫护度和总交换度进行对比分析。也可以对不同界壳做定量比较, 进一步可分析界壳功能的时间演化, 并建立数学模型, 对未来制作预报。界元量化为界壳论在多个科学分支, 特别是在社会科学、人文科学中的应用提供了有效的数学工具。

## 六、界壳论的应用

由于界壳论的研究对象是系统的周界, 而系统是一个普适概念, 系统也必然由它的周界来与其环境相分隔, 因此界壳论的应用自然十分广泛。从物质世界到精神领域, 从自然科学到社会科学, 可以是描述性应用, 也可以是数学性应用。已应用的领域有: 水文水资源、农业生态、交通运输、经济系统、热工工程、网络安全、抽象代数、核物理、矿产和体育等。

### 1. 市场

当一个公司在某个方面很强大时, 那就会围绕着这个强点形成流程、资源的协同方式, 这种方式很像一种壳, 让壳里面的东西被强化, 搁置壳外面的东西。当胶片相机是柯达、佳能等主要利润来源的时候, 它很难去做数码相机, 因为这是新技术, 要冒风险, 初期利润又低, 正常情况下一般人是不去做的, 这是墨守成规的企业形成的自我约束界壳。所以, 突破市场的往往是小企业, 在原来的战场拼杀不过该领域的领军企业, 就只能先做点另类的东西, 付出辛苦工作, 但只要技术有潜力, 到后来就可能成为时代的主宰。

### 2. 军事

冷兵器时代, 士兵和将领都穿上盔甲, 以防刀枪

刺入。而在热兵器时代, 则发明了坦克, 既能攻又能防。中国的城墙和西方的城堡都是为防敌人进攻而建的。且有门洞可以出入, 以进行人员和物质的交流。中国的长城则是汉民族为防异族入侵而建的。长城上设有多处关口, 如山海关、居庸关和嘉裕关等, 同样是为交流物资和信息而设。到全球化时代, 则出现了导弹防御系统。针对信息战, 设立防火墙。既要让有用信息进入系统, 又要拦截病毒、木马和黑客等的入侵。总之, 一部军事技术史, 也是一部界壳论原理的应用和成长史。

### 3. 生物

生物中有各种各样的界壳现象, 从细胞膜到宏观物体, 形成种种界壳套。可以说, 生物是界壳论的活生生的模板。这里仅举“生物入侵”一例来说明。生物入侵是指某种生物从外地自然传入或人为引种后成为野生状态, 并对本地生态系统造成一定危害的现象。

## 七、界壳论在气象中的应用

气象部门作为一个系统来研究, 显然不同于诸如铁道、水利等部门, 占主导地位的是信息流而不是物流。气象信息的交换都需通过“气象界门”, 否则无法进出气象系统。可以说, 气象部门是一类典型的信息型界壳系统。例如, 不少受灾群众因缺乏快速通信设备而不能及时得到气象预报, 遭到伤害乃至死亡; 又如, 城市热岛效应就是因为向外散热通道太窄, 以致热量堆积在系统(城市)内的结果。在气象中已有的应用领域有: 气象灾害、设施农业气象、统计气象、天气预报和气象服务等。

### 1. 气候温室效应

大气圈是地球生命的保护层。大气使地球表面温度维持在适合生命发生、发展的范围。自工业革命以来, 向大气排放二氧化碳、甲烷等温室气体, 使大气能透过太阳短波辐射, 而地面长波辐射被增加了的温室气体反射了回来。于是地球热平衡遭到破坏。形象地比喻, 原来的大气是一条薄被子, 现在, 由于温室气体增加, 大气变为一条厚被子, 地表热量散发不到地球以外的空间去。所以气候温室效应是一个典型的界壳论问题。散热通道不畅, 地球必然增温。

### 2. 大气的螺旋结构

从界壳论来探讨大气中的螺旋状结构(图1)。根据界壳论, 系统边界要有足够的开放度和交换率, 以便让足够的环境能量进入系统, 系统才能生存和发展。也就是试图从系统的能量平衡方程导出大气的螺旋状结构。

通过边界 $s$ 进入系统的能量应满足:

$$-\int_s MV_n ds \geq 0, \quad (5)$$

式中 $M$ 为动能、位能和势能之和再加压力 $p$ ,  $V_n$ 为法向速度。在临界情况下上式取等号, 对二维流场引入速度势, 在一定假设条件下, 可以导出一个泊松方程, 齐次情况下即讨论拉普拉斯方程的解, 其中它的一个调和函数解即为对数螺线, 即有

$$\chi(r) = -k_1\theta - C_2 \ln r, \quad (6)$$

式中,  $\chi$ 为速度势,  $r$ 和 $\theta$ 为距离和夹角,  $k_1$ 、 $C_2$ 为常数。



图1 云的螺旋状结构

### 3. 大气可预报性

大气可预报性是气象学的一个经典问题, 一直在学术上受到重视。若在初始场上有误差, 则对大气运动方程积分经多长时间, 误差倍增或更大, 这一时间长度称之为可预报性。Thompson和Lorenz等研究了大气可预报性, 奠定了动力可预报性的理论基础。至今, 一般认为, 逐日天气预报的可预报时效为2~3周。后来把可预报性扩展到统计可预报性, 乃至统计-动力可预报性。由于对可预报性的定义和研究方法不同, 可预报性研究多种多样, 结论差别也不小。这里, 用界壳论原理来探讨大气可预报性, 显然, 不同于上述传统方法, 可以说是研究大气可预报性的另类途径。

把开放度的概念引伸到时间维度, 定义可预报度

$$\zeta = 1 - \mu,$$

式中,

$$\mu = [(n-1)\beta T + q] / (n\beta T + q), \quad (7)$$

式中,  $n$ 表示用初始观测值 $x_0$ 对时段 $T$ 的天气作第 $n$ 步预报,  $\beta$ 为与气象变量有关的系数, 可取 $\beta = |b|$ ,  $\beta = 1/C_v$ 等,  $b$ 为变量的一阶自回归系数,  $C_v$ 为变量的变

差系数,  $q$ 为由观测 $x_0$ 的时刻到预报制作时刻的时段。称 $\zeta$ 为界壳论意义下的大气可预报度。 $\zeta$ 为研究信息(如温度、湿度、气压等)经过通道 $q$ 来做 $T$ 时段天气预报所具有的可预报度, 由于 $q$ 越长, 制作预报时利用的观测信息离得越远, 显然其可预报度越小, 故式中采用 $(1-\mu)$ 的形式。取 $\beta=1$ , 式(7)变为

$$\zeta = 1 - [(n-1)T + q] / (nT + q), \quad (8)$$

当取 $\beta = |b|$ 时, 若 $\beta=1$ , 则 $b=1$ , 即自回归系数取1, 即变量下一时刻的预报量等于初始时刻的实测值, 再下一时刻的预报量仍等于初始时刻的实测值, ……, 如此下去。因此可以称它为“呆子”预报, 即“呆子”预报的可预报度。

取 $T$ 为24h, 若制作24h预报, 则 $n=1$ ; 做48h预报, 则 $n=2$ , 依此类推。计算中取 $q=1, 2, 3, 4$ 。由此用式(8)进行计算。结果表明, 不管预报日数 $d$ 长短, 随 $q$ 增加, 可预报度 $\zeta$ 值减小, 这在 $d=1$ 时最明显。同时, 用同一初始观测值做预报, 随着预报步数增加, 可预报度 $\zeta$ 值随之减小。

进一步对可预报度数据做黄金分割, 发现天气可预报度中存在黄金分割率。把逐日预报长度分成1~3d, 4~8d和9~20d三段, 最长只能报到21d, 因为这是最后一个分割点, 且预报度已小于0.05。根据现在的天气预报水平, 1~3日为逐日天气预报的可信段, 4~8日为预报可参考段, 9~20日为开发段, 21日为预报时效极限值。显然, 这些结果与传统可预报性的研究所得是相当一致的。

致谢: 本文由全球变化研究国家重大科学研究计划(2012CB955902)和国家自然科学基金(41375079)共同资助。

#### 深入阅读

- 曹鸿兴. 1997. 系统周界的一般理论——界壳论. 北京: 气象出版社.
- 曹鸿兴, 陈国范, 封国林. 2001. 界壳论在气象中的应用. 气象科技, 29(3): 46-50.
- 曹鸿兴, 封国林, 蔡秀华, 等. 2011. 界壳论精要及其应用. 北京: 科学出版社.
- 赵克勤, 曹鸿兴. 2002. 集对分析与界壳论的研究与应用. 北京: 气象出版社.

(作者单位: 曹鸿兴, 中国气象科学研究院、国家气候中心; 封国林, 国家气候中心、扬州大学物理与技术学院)