

物质流分析的跟踪观察法

陆钟武

(东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110004)

[摘要] 流动, 是物质(如铜、铝等)流动和流体流动二者所具有的基本特征, 基于这个论点, 简要地回顾了流体力学中研究流体流动的两种方法, 即拉格朗日法和欧拉法; 相应地提出了物质流分析的两种方法, 即跟踪观察法和定点观察法。由于前者在文献中未见报道, 因此对它进行了重点说明。强调了物质流的跟踪观察法既适用于稳态物质流(产品产量不变), 也适用于非稳态物质流(产品产量增长或下降)。以钢铁产品生命周期的铁流图为例, 说明了物质流的跟踪模型。在引入了物质流的非稳度后, 提出了物质流各项指标的计算式, 以及它们之间的相互关系。以瑞典铅酸电池系统为对象, 计算了其中铅流的各项指标, 并进行了必要的分析。

[关键词] 物质流的研究方法; 物质流的跟踪观察法; 物质流的基本公式; 物质流的非稳度

[中图分类号] TF0 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)01-0018-08

物质流分析(substance flow analysis, SFA)是在一个国家或一个地区范围内, 对特定的某种物质(如铜、铝等)进行工业代谢研究的有效手段。所谓工业代谢是指将原料和能源转变成最终产品和废物的过程中, 一系列相互关联的物质变化的总称^[1]。所以, 物质流分析的任务是弄清楚与这些物质变化有关的各股物流的状况, 以及它们之间的相互关系。其目的是从中找到节省天然资源, 改善环境的途径, 以推动工业系统向可持续发展方向转化。做好物质流分析, 才有可能在资源和环境方面, 有理有据地提出供决策者参考的建议。

西方发达国家近年来在物质流方面做了大量工作。在一些重大问题上, 以分析工作为基础, 给政府和有关行业提出了不少有益的建议。发表的文章较多, 在本文的参考文献中, 列出了其中的一小部分: 文献[2~4]是钢铁方面的; [5~9]是铜、铅、锌、铝方面的; [10, 11]是PVC和纸张方面的。此外, 还有一些专著和总体论述的文章^[1, 12~15]。从发表的文章和专著可见, 西方发达国家在物质流分析方面已形成了一套成熟的方法,

积累了不少经验。

不久前, 我们在研究钢铁工业废钢资源等问题时^[16, 17], 提出了一种有别于文献中所见到的物质流分析方法。这种方法, 使用起来感到比较顺手, 可能会有较广阔的应用前景。因此, 笔者将着重阐明这种物质流分析方法。因只讨论物质流分析, 所以一般用物流分析一词代替物质流分析, 除非有特殊说明。

1 物流的研究方法

物料的流动与流体的流动有相同的基本特征, 那就是流动。因此, 回顾一下关于流体流动的研究方法, 对于进一步理解物料流动的研究方法是会有所裨益的。

大家都知道, 研究流体的流动, 有两种方法^[18]。第一种方法是拉格朗日法。这种方法的要领是在连续流动的流体中, 选定流体的一个质点作为观察对象。然后, 跟踪这个质点, 观察它在空间移动过程中各物理量的变化, 以获取这个质点在流动过程中的有关数据。为了了解流体流动的全貌,

[收稿日期] 2005-06-28; **修回日期** 2005-07-29

[作者简介] 国家科技攻关计划资助项目(2003BA614A-02)

[作者简介] 陆钟武(1929-), 男, 上海市人, 中国工程院院士, 东北大学教授

可依次改变观察对象，从一个质点转到另一个质点。

第二种方法是欧拉法。这种方法的关键是在连续流动的流体中，选定一个空间点作为观察点。然后，观察各瞬间流过这个空间点的流体的物理量，以获得这个点上有关数据随时间的变化。为了了解流体流动的全貌，可依次改变观察点，从一个空间点转向另一个空间点。

与研究流体流动的两种方法相对应，研究物料流动，也同样会有两种方法。当然，物料流动终究有别于流体流动，所以在研究物料流动时，必须注意到它本身所具有的特点，其中较为主要的有以下几点：**a.** 物料是沿着产品生命周期的轨迹流动的，一个生命周期是一个明显的段落，所以物流状况是呈周期性变化；**b.** 产品的一个生命周期，通常长达几年、十几年，甚至更长，所以为了获得较全面的信息，需要观察的时间跨度是较大的；**c.** 在流动过程中，物料的物态、形状、化学成分、物理性质等都在不断变化，所以只有针对其中的某一种物质（元素或稳定化合物）进行观察，才是可行的；**d.** 通常都是进行比较宏观的物流分析，物流量较大，所以选定的观察对象的总量也较大。

基于以上考虑，将研究物料流动的两种方法概述如下：

第一种方法，为了研究某种产品生命周期中的物流状况，选定一定数量的该种产品作为观察对象。然后，沿着这些产品生命周期的轨迹，对它进行观察。生命周期中各阶段流入和流出的有关物质质量都要弄清楚。

如果把物料的流动比喻成一条河流（图 1），那么用这种方法研究物流，就好比是坐在一条船上顺流而下，对选定的那些物料对象进行跟踪观察。跟踪的行程，至少要从某一个生命周期的起点一直

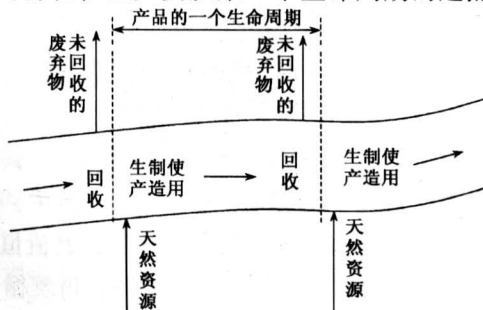


图 1 用河流比喻物流

Fig.1 Substance flow is likened to a river

到它的终点，途中经过产品的生产、制品的制造、使用和产品报废后的回收等 4 个阶段。这样，了解的情况和收集的数据，才比较完整，才便于做进一步的分析。必要时，甚至要连续观察一个以上的生命周期。

如图所示，在跟踪观察每一个生命周期的航程中，会看到两条支流：一条在它的始端，是向生产阶段输入天然资源的；另一条在它的末端，是向周围环境输出未回收的废弃物的。

这种方法的关键是跟踪观察，所以可称之为物流的跟踪观察法。

在这条物流的长河中，截取一个生命周期，得到的物流示意图如图 2 所示。它是建立物流跟踪模型的基础。

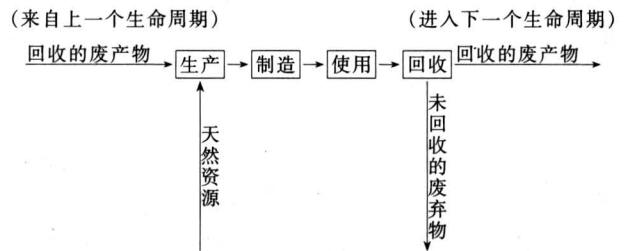


图 2 跟踪观察的物流示意图

Fig.2 Substance flow diagram obtained by following-observing method

第二种方法，为了研究某种产品生命周期中的物流状况，选定物流中的一个区间作为观察区。然后，观察这一区间内物流的变化。对这一区间内生命周期各阶段流入和流出的有关物质质量都要弄清楚。

如果仍用河流作比喻，那么用这种方法研究物流，就好比是站在一座桥上进行定点观察。这座桥的位置一般都选在某一年度的产品生命周期的始端，因为，从这里能观察到上一个生命周期的回收阶段和本生命周期的生产、制造阶段以及部分使用阶段。

这种方法的关键是定点观察，所以可称之为物流的定点观察法。物流的来龙去脉，可参见图 3。

在图 3 上，要做些说明的是“贮存、使用”这个环节。这是社会上的一个“物质库”（reservoir），而且是一种物质一个库，例如铜有铜库，铝有铝库。库中存有：**a.** 仍在使用的以往历年生产的产品；**b.** 已报废但并未进行解体处理的产品；**c.**

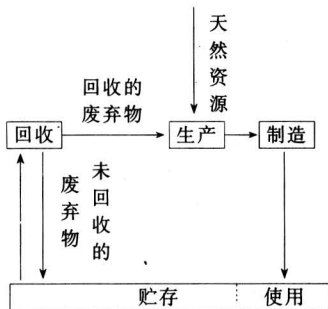


图3 定点观察的物流示意图

Fig.3 Substance flow diagram obtained by standing-observing method

未能回收的废弃物质。所以，这个库的存量很大，难以准确计算。在物流分析工作中，一般并不涉及库存总量，而只是根据物料的进出量，计算其净增值。

2 物流的跟踪模型

用跟踪观察法，建立的物流模型是物流的跟踪模型；而用定点观察法建立的是物流的定点模型。后者在文献中的报道较多，其中包括本文引言中已经提到的那些文章，但前者却几乎未见报道。因此，本节将专门对物流的跟踪模型做必要的介绍。

图4是一张典型的物流跟踪模型。选定的观察对象是一个国家或地区在某一年（第 τ 年）内生产的全部钢铁产品。图中标出的各股物流的流量，都不是实物流量，而是按各种实物的铁含量分别折算成的铁流量。所以，这张图也就是钢铁产品生命周期的铁流图。

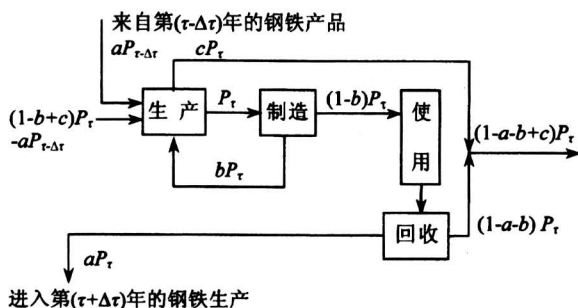


图4 物流的跟踪模型

(以 P_τ t 钢铁产品为观察对象)

Fig.4 Following-observing model of substance flow (P_τ ton of steel products as observing object)

图中，第 τ 年的钢铁产品产量为 P_τ t，经制造

阶段后，形成的钢铁制品量为 $(1-b)P_\tau$ t，同时产生加工废钢 bP_τ t。这些加工废钢全部返回生产阶段重新处理。钢铁产品经使用 $\Delta\tau$ 年后报废，形成废旧废钢 aP_τ t。这些废旧废钢作为原料进入第 $\tau+\Delta\tau$ 年的钢铁生产过程。与此同时， $(1-a-b)P_\tau$ t 废弃物未被回收，而进入环境之中。

同理，进入第 τ 年钢铁生产中去的废旧废钢 $aP_{\tau-\Delta\tau}$ t，是从第 $\tau-\Delta\tau$ 年的钢铁产品中演变过来的。

第 τ 年钢铁生产的各种排放物为 cP_τ t。

按铁元素平衡可知，第 τ 年钢铁生产还需铁矿石为 $(1-b+c)P_\tau - aP_{\tau-\Delta\tau}$ t。

请注意，图4中有以下几点假设：**a.** 加工废钢是在钢铁产品生产出来的同一年就全部返回生产阶段去重新处理的；**b.** 钢铁产品的寿命都是 $\Delta\tau$ 年；**c.** 回收的废旧废钢是在产品报废的当年，即第 $(\tau+\Delta\tau)$ 年就返回钢铁生产中去的；**d.** 废旧废钢的回收率 a 值不随时间而变。

现就 a, b, c 3个参数的定义和计算式，做如下说明。

为此，令第 τ 年的钢铁产品经 $\Delta\tau$ 年后，演变成的废旧废钢量为

$$A = aP_\tau,$$

第 τ 年钢铁制品制造过程中产生的加工废钢量为

$$B = bP_\tau,$$

第 τ 年钢铁生产过程中的铁损失量为

$$C = cP_\tau.$$

以上3式可分别改写为

$$a = \frac{A}{P_\tau} \quad (1a)$$

$$b = \frac{B}{P_\tau} \quad (1b)$$

$$c = \frac{C}{P_\tau} \quad (1c)$$

式(1a, 1b, 1c)分别是 a, b, c 3个系数的定义式。

现对系数 a 做进一步说明。系数 a 是铁的循环率，因为它说明的是在 P_τ t 钢铁产品中，得到循环利用的那一部分废钢所占的比例，其值恒小于1。必须提醒读者，在不同的文献中，物质循环率的定义很不相同，不可混淆。

也许有人要问，为什么在图4上只能见到加工废钢的循环路线，而见不到废旧废钢的循环路线

呢？这是因为在图上只画了一个生命周期（从第 τ 年到第 $\tau + \Delta\tau$ 年），并没有把它上游和下游的生命周期全都画出来。如果把一个接着一个的生命周期都画出来，那就能一目了然了！

3 物流的基本公式

在物流跟踪模型中， $P_{\tau-\Delta\tau}$ 与 P_{τ} 的比值，说明了一个生命周期中产品产量的变化。所以，可以用它作为物流非稳态程度的判据。故令

$$p = \frac{P_{\tau-\Delta\tau}}{P_{\tau}} \quad (2)$$

并称之为物流的非稳度。稳态物流的 $p = 1$ ；非稳态物流的 $p \neq 1$ ；产量增长的物流 $p < 1$ ；产量下降的物流 $p > 1$ 。

将图 4 中各股物流量均除以 P_{τ} ，并考虑到式 (2)，则得图 5。

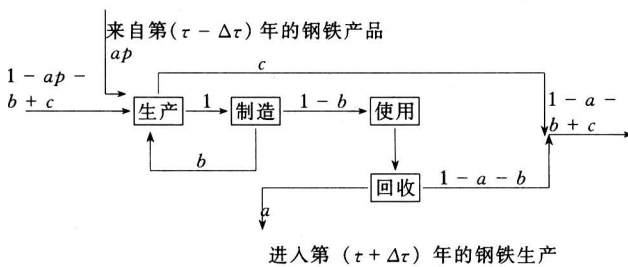


图 5 单位产品的物流跟踪模型

(以 1 t 钢铁产品为观察对象)

Fig.5 Following-observing model of unit product flow
(1 ton of steel products as observing object)

按图 5，可直接写出与该物流有关的工作指标计算式，并导出它们之间的关系式。现将其中主要的几个罗列如下：

单位钢铁产品的铁矿石投入量

$$R = 1 - ap - b + c \quad (3)$$

我们把 R 称作铁矿石指数。

单位钢铁产品的铁损失量

$$Q = 1 - a - b + c \quad (4)$$

我们把 Q 称作铁损失指数。

由式 (4) 可见， Q 值仅决定于 a, b, c 3 个系数，与 p 值无关。

不难看出， R 和 Q 二者之间的关系，如下式所示

$$Q = R + a(p - 1) \quad (5)$$

顺便提一下，从式 (5) 可以得出一个重要的

结论，即若 $p = 1$ 或 $a = 0$ ，则 Q 必等于 R ，亦即在稳态流情况下，或报废物质不循环的情况下，投入的铁矿石中的铁，最终将在钢铁产品的一个生命周期中，全部转为废弃物和污染物中的铁，进入环境之中。

单位钢铁产品的废钢用量

$$S = ap + b \quad (6)$$

我们把 S 称作废钢指数。

不难看出， R 与 S 之间的关系如下式所示：

$$R = 1 - S + c \quad (7)$$

式 (7) 也是一个重要的关系式，因为它说明了钢铁生产中铁的两个来源，即铁矿石和废钢的数量关系。

以上是从图 5 中直接写出的 3 项指标的计算式，以及它们之间的部分关系。考虑到资源效率和环境效率是两个重要概念，我们将式 (3) 和式 (4) 改写一下，得到以下两式：

铁的资源效率

铁的资源效率，是指投入单位铁矿石所能生产出来的钢铁产品量。所以， R 的倒数就是铁的资源效率 r ：

$$r = \frac{1}{R}。$$

将式 (3) 代入上式，得

$$r = \frac{1}{1 - ap - b + c} \quad (8)$$

铁的环境效率

同理， Q 的倒数就是铁的环境效率 q ：

$$q = \frac{1}{Q}。$$

将式 (4) 代入上式，得

$$q = \frac{1}{1 - a - b + c} \quad (9)$$

式 (3) ~ 式 (9) 是物流的一些基本方程式。其中式 (3)，式 (4)，式 (6)，式 (8)，式 (9) 分别说明了物流的某一项工作指标与物流变量之间的关系，而式 (5)，式 (7) 分别说明了某两项工作指标之间的关系。

对以上公式不必逐个详加解释，现仅以式 (8) 和式 (6) 为例予以说明。

式 (8) 是铁的资源效率 r 与 p, a, b, c 4 个变量之间的关系式。为了更清楚地了解该式所描述的主要规律，设 $b = c$ ，则式 (8) 化简为

$$r = \frac{1}{1 - ap} \quad (8')$$

按式 (8') 做图得图 6, 该图横坐标为铁的循环率 a , 纵坐标为铁资源效率 r , 图中每一条曲线对应一个 p 值。

由 $p < 1$ 的各条曲线可见, 提高 a 值可使 r 值上升, 但上升幅度较小。即使 $a = 1.0$, 在 $p = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 4 种情况下, r 也只能分别达到 1.25, 1.67, 2.50, 5.00。

由 $p = 1$ 曲线可见, 在提高 a 值的过程中, r 值上升较快, 而且愈来愈快。式 (8') 表明, 在极端情况下, $a = 1$ 而 $r = \infty$ 。

由 $p > 1$ 的两条曲线可见, 在提高 a 值的过程中, r 值的上升比 $p = 1$ 时更快。在 $p = 1.2, 1.4$ 两种情况下, 按式 (8') 计算, 当 a 值分别达到 0.833 和 0.714 时, r 值已趋近 ∞ 。

此外, 必须指出, 图 6 是在假设 $c = b$ 的条件下画出来的, 所以 r 值都在 1.0 以上, 然而, 在 $c > b$, 而且 a 值较低时, 很可能出现 $r < 1$ 的情况。

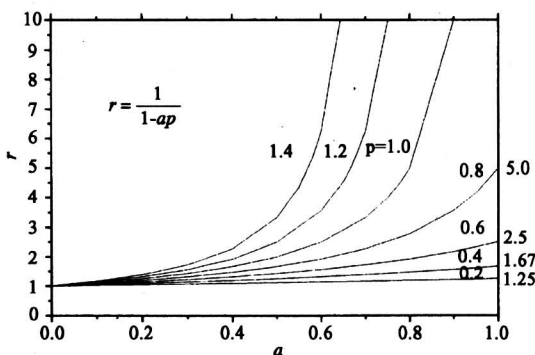


图 6 资源效率 (r) 图

Fig.6 Illustration of resource efficiency (r)

总之, 在研究物流的资源效率时, 不仅要考虑物流内部的 a, b, c 等变量, 而且还要把物流的非稳度 p 这个受制于外部条件的因素考虑在内。在物流内部条件相同的情况下, 资源效率最低的是产量增长的物流, 而且产量增长得愈快, 愈是如此; 资源效率最高的是产量下降 (或不久前曾下降) 的物流, 而且下降得愈快 (或下降幅度愈大), 愈是如此; 居中的是产量保持不变的物流。在考察各国资源效率的高低时, 这条规律是不可不特殊关注的; 否则可能会得出不客观的结论。

式 (6) 是废钢指数 S 与 p, a, b 3 个变量之间的关系式。不难理解, 废钢指数 S 是在不考虑

对外贸易的情况下, 衡量一个国家钢铁工业废钢资源充足程度的判据: S 值愈高, 废钢愈充足, 反之亦然。为了更清楚地了解该式所描述的主要规律, 设 $b = 0.05$, 则式 (6) 简化为

$$S = ap + 0.05 \quad (6')$$

按式 (6') 做图得图 7。该图横坐标为铁的循环率 a , 纵坐标为废钢指数 S ; 图中每一条直线对应一个 p 值。

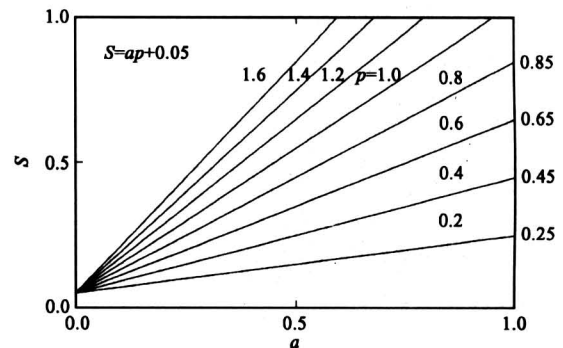


图 7 废钢指数 (S) 图

Fig.7 Illustration of steel scrap index (S)

由 $p < 1$ 的 4 条直线可见, 提高 a 值, 可使 S 值上升, 但上升幅度较小。在极端情况下, 即使 $a = 1.0$, 废钢指数 S 值也只能分别达到 0.25, 0.45, 0.65 和 0.85。

$p = 1$ 时, 直线的斜率较大, 当 a 值提高到 0.95 时, S 值就等于 1.0。

$p = 1.2, 1.4, 1.6$ 3 条曲线的斜率更大, 按式 (6') 计算, 这 3 条线与 $S = 1.0$ 横线相交处的 a 值分别为 0.79, 0.68 和 0.59。

总之, 在研究废钢指数时, 不仅要考虑 a, b 等变量, 而且还要把 p 这个重要因素考虑在内。在其他条件相同时, 废钢指数最低的是钢铁产品产量增长的物流, 而且产量增长愈快愈是如此; 废钢指数最高的是产量下降的物流, 而且下降得愈快愈是如此; 居中的是产量保持不变的物流。在考察各国钢铁工业废钢资源的充足程度时, 这条规律是不可不特别关注的。否则, 不可能正确地理解为什么有些国家钢铁工业的废钢资源充足, 或者很充足, 而另一些国家则废钢短缺, 或严重短缺。我们以前的工作完全说明了这一点^[16,17]。

最后, 必须指出, 式 (3)~式 (9) 不仅适用于以钢铁产品为对象的物流, 而且也适用于针对其他产品的物流。

4 实例分析

要想用跟踪模型进行物流分析，物流的非稳度 p 值必须是已知的。本文选用了文献 [9] 所描述的瑞典铅酸电池模拟系统中的稳态铅流作为分析的对象；它的非稳度 $p = 1$ 。该系统中的各组成部分都有详细地介绍，其中包括开采、冶炼、电池制造、使用以及废电池中铅的回收、重熔等，而且数据详实。

图 8 是根据这些数据，按图 4 的模式绘制的铅产品生命周期中的稳态铅流图，其中表明了每股铅流的年流量，铅产品的年产量为 22 472 t，它的使用寿命为 5 a。图中用生产阶段概括了原生铅和再生铅两个生产环节，这样做是为了使画面更为简明易读。

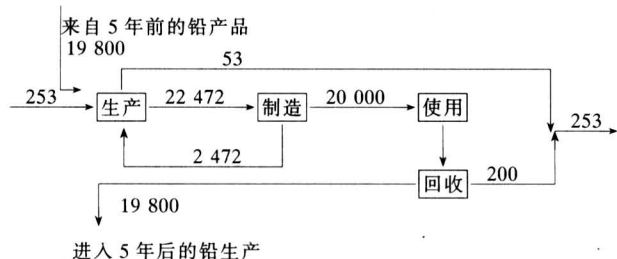


图 8 铅流跟踪模型 (t/a)
(瑞典铅酸电池模拟系统)

Fig.8 Following-observing model of lead flow (t/a)
(Swedish lead-acid battery system)

按图 8 中所标数据，可知在这个物流中铅的资源效率

$$r = \frac{22\,472}{253} = 88.82,$$

铅的环境效率

$$q = \frac{22\,472}{253} = 88.82,$$

可见，这个物流的工作水平是很高的。

此外，由图 8 可见，铅矿石的投入量（以铅量计）与整个生命周期中铅的损失量是相等的，都等于 253 t。这是上文中提到的稳态流的一个特点，请参见式 (4) 及其说明。

若将图 8 中各股铅流量均除以铅的年产量，即 22 472 t/a，则可得到单位铅产品的铅流图（图 9）。

对比图 9 与图 5，可直接写出

$$\begin{aligned} a &= 0.881\,1, \\ b &= 0.110\,0, \\ c &= 0.002\,4, \end{aligned}$$

这样，就可对该物流做如下的外延性分析了。在分析工作中，设 $b = 0.110\,0$ 及 $c = 0.002\,4$ 均为定值。

1) 在稳态流情况下 ($p = 1$)，按式 (8) 计算各 a 值下的 r 值，然后做图，可得图 10 中的曲线 1。线上的“*”点是该铅酸电池模拟系统的“工作点”。由图可见，如果能将 a 值在现有基础上再稍微提高一点，那么 r 值还能上升很多。相反， a 值的微小下降，就可能引起 r 值的大幅下降。

2) 如果瑞典铅酸电池模拟系统中的铅流是非稳态的，那么情况就会不大相同。例如，图 10 中曲线 2 是非稳态 $p = 0.6$ 时， r 与 a 之间的关系曲线。在这种情况下，即使铅的循环率维持在原有的 $a = 0.881\,1$ 高水平上，铅的资源效率也会从 88.82 降为 2.75（见曲线 2 上的圆点）。这个差别是多么悬殊啊！

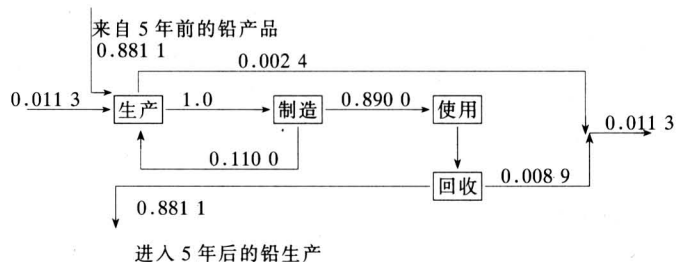


图 9 单位铅产品的铅流跟踪模型
(瑞典铅酸电池模拟系统)

Fig.9 Following-observing model of unit lead product
(Swedish lead-acid battery system)

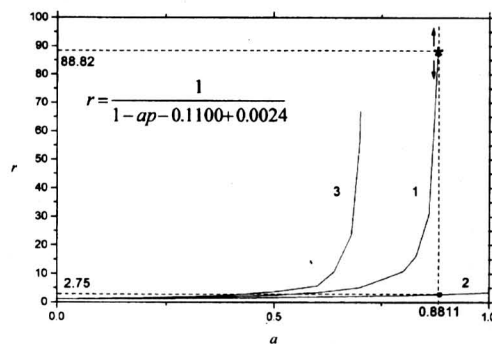


图 10 案例中 r 与 a 之间的关系

曲线 1 $p = 1.00$; 曲线 2 $p = 0.60$; 曲线 3 $p = 1.25$

Fig.10 Relationship between r and a
in the case study

curve 1 $p = 1.00$; curve 2 $p = 0.60$; curve 3 $p = 1.25$

曲线3是非稳度 $p = 1.25$ 时 r 与 a 之间的关系曲线。按式(8)计算,在 $a = 0.71$ 时, r 值就已接近 ∞ 。也就是说,如果铅的循环率仍维持原有的 $a = 0.881$,那么,不仅铅的生产有可能全部使用回收的废铅作为原料(如冶金技术允许如此),而且还有较多剩余的废铅可供出口,或储备。

同理,对于铅流的其它工作指标以及它们之间的关系,也可做类似的分析,在此不再赘述。

总之,用物流的跟踪模型和由此导出的若干基本方程式,对非稳度不同的各种物流,进行其工作指标及相关问题的分析,都是比较方便的。

5 结语

以流体流动的两种研究方法,即拉格朗日法和欧拉法为起点,经过对比分析,提出了物质流分析的另一种方法,并对它做了必要的说明。这种方法的核心是物质流的跟踪模型。在此之前,我们曾按照这个思路研究了个别实际问题,但从来没有像本文这样对这种方法本身做过原原本本的说明。

现在看来,这种方法有以下几个值得提到的特点:

物质流跟踪模型,比较直观易懂,因为它是产品生命周期中物质流的如实写照;

从这种模型可以导出用于物质流分析的一组方程式,而且它们都很简单;

用这种模型,既可以对稳态的,也可以对非稳态的物质流进行分析,而且所用的方程式和方法都完全相同。

我们相信,物质流分析的这种方法会有较好的应用前景。但无论如何,它还在发展的初期,需要逐步完善和提高,在实际中反复检验。这方面的工作目前一直在进行。笔者十分希望与大家共同协作,把这方面的工作做得好些。

参考文献

- [1] Ayres R U. The greening of industrial ecosystems[A]. Industrial metabolism: Theory and policy[M]. (edited by Allenby B R, Richards D J.) Washington, DC: National Academy Press, 1994
- [2] Michael D F. Iron and steel recycling in the United state in 1998[R]. Open file report, 1999. 01~224. U S Geological Survey. US Department of the Interior
- [3] Michaelis P, Jackson T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector. (Part 1: 1954-1994) [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2000, (29): 131~156
- [4] Michaelis P, Jackson T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector (Part 2: 1994-2019) [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2000, (29): 209~230
- [5] Kapur A, et al. The contemporary copper cycle of Asia [J]. J Mater Cycles Waste Manag, 2003, (5): 143~156
- [6] Melo M T. Statistical analysis of metal scrap generation: The Case of aluminum in Germany [J]. Resources, Conservation and Recycling, 1999, (26): 91~113
- [7] Spataro S, et al. The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows [J]. Ecological Economics, 2002, 42(1, 2): 27~42
- [8] Spataro S, et al. The contemporary European Zinc cycle: 1 year stocks and flows [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2003, 39(2): 137~160
- [9] Karlsson S. Closing the technospheric flow of toxic metals: Modeling lead losses from a lead-acid battery system for Sweden [J]. Journal of Industrial Ecology, 1999, 3(1): 23~40
- [10] Kleijn R, et al. Dynamic substance flow analysis: The delaying mechanism of stocks, with the case of PVC in Sweden [J]. Ecological Economics, 2000, 32(2): 241~254
- [11] Sundin E, et al. Materials and energy flow analysis of paper consumption in the United Kingdom (1987-2010) [J]. Journal of Industrial Ecology, 2001, 5(3): 89~105
- [12] Ayres R U. Metals recycling: Economic and environmental implications [J]. Resources, Conservation and Recycling, 1997, (21): 145~173
- [13] Graedel T E, Allenby B R. Industrial ecology [M]. NJ: Prentice Hall, 2003
- [14] Hansen E, Lassen C. Experience with the use of substance flow analysis in Denmark [J]. Journal of Industrial Ecology, 2002, 6(3,4): 201~219
- [15] Kleijn R. In = Out, the trivial central paradigm of MFA [J]. Journal of Industrial Ecology, 1999, 3(2, 3): 8~10
- [16] 陆钟武. 关于钢铁工业废钢资源的基础研究 [J]. 金属学报, 2000, 36(7): 728~734
- [17] 陆钟武. 论钢铁工业的废钢资源 [J]. 钢铁, 2002, 37(4): 66~70
- [18] 许唯德. 流体力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 31~34

The Following-observing Method for Substance Flow Analysis

Lu Zhongwu

(SEPA Key Laboratory on Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

[Abstract] The fundamental argument set forth in the paper is that flow is the common feature of fluid flow and substance flow. In view of this, a short review of two ways of describing the motion of fluid in fluid-dynamics was given: one of them was developed by Lagrange, and the other-by Euler. Correspondingly, two methods for substance flow analysis were advanced: one of them is “following-observing” method, and the other-“standing-observing” method. The exposition was focused on the former, because it is the new one, on which no information could be found in literature. It is emphasized that the following-observing method is applicable not only for studying steady substance flow (constant output of product), but also for unsteady substance flow (increasing or decreasing output of product). The following-observing model of substance flow was explained by using iron flow diagram in the life cycle of steel products. Introducing the degree of unsteady-state, a set of basic equations for calculating the indexes of substance flow and the relationship between them were derived. The lead flow in Swedish lead-acid battery system was analyzed as a case study, including the calculation of indexes of lead flow.

[Key words] methods of substance flow analysis; following-observing method for substance flow analysis; basic equations for substance flow analysis; degree of unsteadiness of substance flow

《中国工程科学》2006 年第 8 卷第 2 期要目预告

- | | |
|--|--|
| 上海港外高桥区现代集装箱码头建设
集成创新技术 包启帆等 | 森林火险与气象因素的多元相关性及其
分析 宋卫国等 |
| 物理光学的若干进展 黄志询 | 复杂产品虚拟样机综合集成型决策支持
系统研究 陈曦等 |
| 装甲用镁合金抗弹性能表征体系探讨
..... 才鸿年等 | HEAE 气溶胶出口温度控制的实验研究
..... 张永丰等 |
| 智能 MC-CDMA 系统中空频联合盲多用户
检测算法 傅洪亮等 | 细水雾抑制熄灭障碍物油池火的有效性
研究 房玉东等 |
| 广义近似空间与粗糙分类代数 刘永红 | 西部城市竞争力评价研究
——以新疆博乐市为例 罗巧灵等 |
| 预腐蚀后拉伸超载对 LC4CS 铝合金疲劳
性能的影响 蒋荟等 | 基于可视化仿真的水电工程动态信息
管理与控制方法 钟登华等 |
| 气体分布板开孔结构对流化床干燥性能
的影响 刘巍等 | 基于中国传统的项目管理研究 周红 |
| 船体结构疲劳寿命的评估 李靖宇等 | 危险品物流的安全管理 罗一新 |
| 基于 MCMC 稳态模拟的 Weibull 共享异
质性模型及其可靠性应用 林静等 | |