

# 能源投入产出模型的选择： 混合型还是价值型<sup>\*</sup>

张红霞

**[提 要]** 将投入产出技术用于能源问题的分析时，当前文献中有两类模型：混合型能源投入产出模型和价值型能源投入产出模型，其中价值型模型应用更为广泛。本文从能源平衡方程入手，对这两类模型的本质特点和差异进行了辨析，通过严格证明，得到如下结论：第一，在技术系数矩阵稳定的条件下，出现新的最终需求时，混合型能源投入产出模型仍然保证能源平衡方程的成立，具备一致性。第二，在技术系数矩阵和能源价格矩阵稳定的条件下，出现新的最终需求时，价值型能源投入产出模型无法保证能源平衡方程的成立。虽然价值型能源投入产出模型在初始构建过程中使用了能源平衡方程，但本质上是以价值单位的投入产出方程为根本出发点的，并没有考虑能源平衡方程在新的最终需求发生时是否仍然成立的问题，没有考虑能源使用的一致性。因此，一般情况下混合型能源投入产出模型更为合理。第三，在某些特殊情况下这两类模型等价：（1）当最终需求结构保持不变，而只有最终需求总量发生变化时；（2）当能源在各使用部门之间的价格完全相同时。这些结论为实际应用中如何选择恰当的能源投入产出模型提供了依据。

**[关键词]** 能源；投入产出模型；能源平衡方程

## 一、引言

能源问题以及由于能源使用导致的污染问题已经成为我国未来社会经济发展中的核心问题之一。投入产出模型作为一种系统科学分析方法，从20世纪70年代早期开始，就在这类问题的研究中得到了非常广泛和成功的应用。在现有文献中，当用投入产出技术分析能源问题时，主要通过以下两种途径构建模型。第一种途径是基于价值型投入产出方程构建的方法，它通过价值单位的投入产出平衡方程（方程中所有流量都以价值单位表示）与能

源平衡方程相结合的方式构建能源投入产出分析框架并得到完全能源强度，将其称为价值型能源投入产出模型。这类模型在实践中应用非常广泛。例如，用于分析国际贸易中隐含的能源或CO<sub>2</sub>；<sup>[1][2][3]</sup>与MRIO模型结合用于分析区域间贸易的影响；<sup>[4][5][6]</sup>分析居民消费对能源使用或CO<sub>2</sub>排放的影响；<sup>[7][8]</sup>分析不同产业的能耗或CO<sub>2</sub>排放；<sup>[9][10][11]</sup>分析结构变化对能耗或污染排放的影响<sup>[12][13][14]</sup>，等等。第二种途径是基于混合型投入产出模型（模型中实物单位和价值单位同时使用）构建的方法，其中，投入产出平衡方程的能源部门中间使用、最终需求和总产出等流量都以能源的实

<sup>\*</sup> 张红霞，中国人民大学经济学院，邮政编码：100872，电子信箱：zhanghongxia\_c@ruc.edu.cn。感谢匿名评审人提出的修改建议，笔者已做了相应修改，本文文责自负。

物单位计量,非能源部门的中间使用、最终使用和总产出等流量则以价值单位计量,以此为基础构建模型并得到完全能源强度。这种模型被称为混合型能源投入产出模型,也被用于分析贸易或居民消费中的隐含能源或CO<sub>2</sub>排放,<sup>[15][16][17]</sup>或用于绿色生产率、能耗强度或能源使用量的影响因素分析,<sup>[18][19][20]</sup>,等等。从已有文献来看,价值型能源投入产出模型的应用更为广泛。

根据数值模拟和实证检验,<sup>[21]</sup>很显然,对同一个问题,这两种方法的分析结果存在着显著差异。那么,它们之间最为重要的区别在哪里?哪种方法的分析结果更为可靠?对此,目前文献中的探讨仍旧不充分,仍然存在着争论。Herendeen首次构建了混合型能源投入产出分析框架,并提出能量守恒条件;<sup>[22]</sup> Miller and Blair分析了混合型和价值型能源模型在对能量守恒条件的满足上的差异,认为价值型能源投入产出模型只有当能源价格在所有使用者之间相同的情况下才满足能量守恒条件。<sup>[21]</sup>但这样的假定通常不成立,<sup>[18][20]</sup>例如居民所用能源的价格和工业所用能源的价格往往存在较大的差异,而混合型能源投入产出模型不需要这样的假定,因此混合型的模型更为合理。王会娟等人重新审视了Miller and Blair关于价值型能源投入产出模型和混合型能源投入产出模型在满足能量守恒上的差异,认为价值型的模型在满足能量守恒条件上没有问题,不能从是否满足能量守恒条件上来判断模型的优劣。<sup>[23]</sup>

Miller and Blair和Herendeen对两种模型差异的分析主要基于能量守恒条件,具体来讲,就是在满足能量守恒条件的情况下,反映在完全能源系数上,每个部门对一次能源的完全能源系数等于对二次能源的完全能源系数。<sup>[21][22]</sup>然而,Miller and Blair并没有对价值型能源投入产出模型不满足能量守恒条件给出清晰证明,也没有说明不满足能量守恒条件会导致的具体后果。并且,只有当一次能源只用于生产二次能源,并且某个部门不同时使用一次能源和二次能源的情况下,这一特征才能清晰呈现。<sup>[23]</sup>在现实中,实际情况往往不是这样,许

多部门往往同时使用一次能源和二次能源,一次能源也并不是只用于生产二次能源,例如煤炭除了用于电力生产,还用于居民消费。因此,实际的混合型完全能源系数往往不具备这一特征。而王会娟等人在论证价值型能源投入产出模型也可以满足能量守恒条件时,对于新的最终需求冲击的影响并没有说明,且其证明过程中的矩阵运算有误,因此其证明是不够恰当的。<sup>[23]</sup>并且,以上所得出的价值型模型与混合型模型等价的结论也是建立在能源价格在所有使用者之间无差异的假定条件之上的,而这一假定条件在实际中通常无法满足。<sup>[24]</sup>

满足能量守恒条件时所体现出来的“一致性”在于每个部门对一次能源的完全系数之和等于对二次能源的完全系数之和,而这一点只有在假设一次能源仅仅用于二次能源的生产而不会直接被其他部门所使用时才能满足,但在实际经济中,一次能源往往既用于二次能源的生产,同时又被其他非能源部门直接使用。因此,我们得不到可以清晰体现能量守恒“一致性”的完全能源系数矩阵,也就无法据此分析如果不满足能量守恒条件会有什么样的错误或不合理的结果出现,无法据此判断计算结果是否符合逻辑。并且,能量守恒条件是一组针对完全能源系数的方程,无法用于分析外生变量如何对能源—经济系统产生影响。因此,本文不用能量守恒条件探究价值型能源投入产出模型和混合型能源投入产出模型的差异,而是考虑另一种条件。实际上,对于能源投入产出模型而言,其核心条件是能源平衡方程,是否可以得到符合逻辑和具备一致性的分析结果,关键在于当给定新的外生变量(即新的最终需求向量)时,能源平衡方程是否仍然满足。能源平衡方程指的是,当不考虑能源的损耗和能源进出口时,每种能源的总产出量应该等于其总使用量,<sup>①</sup>体现在能源投入产出模型中,就是各个部门在生产中对能源的中间使用量与能源的最终需求量的合计应该等于能源的总产出量。能源平衡方程是利用能源投入产出模型进行分析的出发点和基本条件。因此,当模型的外生变量——最终需求发

① 如果考虑能源损耗和进出口,则只需要对能源平衡方程稍做调整即可。为了分析的方便,本文不考虑能源损耗和进出口。

生改变时,能源平衡方程是否仍旧成立就是检验一种能源投入产出模型是否符合逻辑、是否满足一致性的标准。与能量守恒条件相比,能源平衡方程更为简洁,更容易进行一致性分析,不需要对一次能源的使用去向附加任何假定条件。

因此,本文从能源平衡方程入手,对价值型能源投入产出模型和混合型能源投入产出模型在实际问题分析中的本质差异给出明确的证明和分析,为如何选择合理的模型提供理论依据。

二、价值型和混合型能源投入产出模型简介

参考 Miller and Blair 的描述,<sup>[21]</sup> 对价值型和混合型能源投入产出模型分别做一简介。价值单位的投入产出流量表和实物单位的部门间能源流量表分别如表 1 和表 2 所示。

为了分析的方便,假设前  $m$  个部门为能源部门,后  $n-m$  个部门为非能源部门。 $Z$  表示以价值单位计量的部门间流量矩阵,其第  $i$  行第  $j$  列的元素  $z_{ij}$  表示部门  $j$  生产中使用的部门  $i$  产品的价值数量; $f$  表示价值单位计量的最终需求列向量, $f_i$  表示部门  $i$  的产品用于最终需求的数量(以价值单位计量); $x$  表示价值单位的总产出列向量, $x_i$  表示部门  $i$  的价值单位计量的总产出。 $E$  表示能源部门对所有部门的以能源实物单位(例如万吨标准煤)计量的流量矩阵, $e_{kj}$  表示部门  $j$  生产过程中所使用的第  $k$  种能源的实物数量; $q$  表示能源部门以实物单位计量的最终需求向量, $q_k$  表示第  $k$  种能源的最终需求实物量; $g$  表示能源部门实物单位的总产出向量, $g_k$  表示第  $k$  种能源的实物总产出。

表 1 价值单位的投入产出流量表

项目		中间使用	最终需求	总产出
		1    ...    m    ...    n		
中间投入	1	$Z$	$f$	$x$
	...			
	m			
	...			
	n			

表 2 实物单位的部门间能源流量表

项目		中间使用	最终需求	总产出
		1    ...    m    ...    n		
中间投入	1	$E$	$q$	$g$
	...			
	m			

不考虑能源损耗和进出口,则第  $k$  种能源的能源平衡方程为:

$$\sum_{j=1}^n e_{kj} + q_k = g_k \quad (k=1,2,\cdots,m)$$

写成矩阵形式,为:

$$Ei + q = g \tag{1}$$

(一) 价值型能源投入产出模型

根据价值单位的投入产出表建立的价值型投入产出方程为:

$$x = (I - A)^{-1} f \tag{2}$$

式中, $A$  为直接消耗系数矩阵,其元素  $a_{ij}$  表示  $j$  部门 1 单位价值型产出所消耗的  $i$  部门的产品价值量,例如 1 万元农产品消耗了多少万元的电力; $A = Z(\hat{x})^{-1}$ ,“ $\hat{x}$ ”表示以向量  $x$  的元素为对角元

的对角矩阵,即  $\hat{x} = \begin{pmatrix} x_1 & & \\ & \ddots & \\ & & x_n \end{pmatrix}$ 。

价值型能源投入产出模型的构建从初始能源流量表的能源平衡方程出发,首先引入直接能源系数矩阵,为:

$$D = E(\hat{x})^{-1} \tag{3}$$

其元素  $d_{ij}$  表示部门  $j$  一单位价值量的产出所需要消耗的能源实物数量,例如 1 万元产出要消耗多少吨标准煤。将矩阵  $D$  代入到式 (1) 的能源平衡方程,得到:

$$Dx + q = g \tag{4}$$

将式 (2) 的价值型投入产出方程代入式 (3);

同时引入能源最终需求的隐含价格<sup>①</sup> (implied price)  $p_{fk} = \begin{cases} \frac{f_k}{q_k}, & \text{当 } q_k \neq 0 \\ 0, & \text{当 } q_k = 0 \end{cases}$ , 并构建矩阵  $\tilde{Q} =$

$[\tilde{q}_{ij}]_{m \times n}$ , 其中, 当  $i \neq j$  时,  $\tilde{q}_{ij} = 0$ , 当  $i = j$  且  $q_i \neq 0$  时,  $\tilde{q}_{ij} = \frac{1}{p_{fi}}$ 。则:

$$D(I-A)^{-1}f + \tilde{Q}f = g \quad (5)$$

从而

$$(D(I-A)^{-1} + \tilde{Q})f = g \quad (6)$$

$\varepsilon = D(I-A)^{-1} + \tilde{Q}$  就是基于价值型方法得到的完全能源系数矩阵。

通常, 不同部门使用能源的价格是不同的, 因此, 在表 1 能源部门价值单位的中间流量和表 2 能源的实物单位中间流量之间存在一个隐含能源价格矩阵  $P^E$ , 维度为  $m \times n$ , 其元素  $p_{kj} = \frac{z_{kj}}{e_{kj}}$ 。因

此, 有  $d_{kj} = \frac{a_{kj}}{p_{kj}}$ 。

## (二) 混合型能源投入产出模型

混合型能源投入产出模型首先根据价值单位的投入产出表和实物单位的部门间能源流量表构建混合单位的中间流量矩阵、最终需求向量和总产出向量:

$$Z^* = [z_{ij}^*]_{n \times n} = \begin{cases} e_{kj}, & \text{当 } k \text{ 为能源部门时} \\ z_{ij}, & \text{当 } i \text{ 为非能源部门时} \end{cases}$$

式中,  $z_{ij}$  表示从非能源部门  $i$  到部门  $j$  (为非能源部门或者能源部门) 的流量, 用价值单位衡量;  $e_{kj}$  表示从能源部门  $k$  到部门  $j$  (为非能源部门或者能源部门) 的流量, 用实物单位衡量。

$$f^* = [f_i^*]_{n \times 1} = \begin{cases} q_k, & \text{当 } k \text{ 为能源部门时} \\ f_i, & \text{当 } i \text{ 为非能源部门时} \end{cases}$$

式中,  $q_k$  表示能源部门  $k$  的最终需求实物量;  $f_i$  表示非能源部门  $i$  的价值单位的最终需求量。

$$x^* = [x_i^*]_{n \times 1} = \begin{cases} g_k, & \text{当 } k \text{ 为能源部门时} \\ x_i, & \text{当 } i \text{ 为非能源部门时} \end{cases}$$

式中,  $g_k$  表示能源部门  $k$  实物单位的总产出量;  $x_i$  表示非能源部门  $i$  价值单位的总产出量。

定义混合单位的直接消耗系数矩阵  $A^* = Z^* (\hat{x}^*)^{-1}$ 。由于  $n$  个部门中的前  $m$  个部门为能源部门,  $A^*$  的单位为  $\begin{bmatrix} \text{实物 / 实物} & \text{实物 / 价值} \\ \text{价值 / 实物} & \text{价值 / 价值} \end{bmatrix}$ 。则混合单位的模型为:

$$A^* x^* + f^* = x^* \quad (7)$$

其前  $m$  行对应的就是式 (2) 的能源平衡方程:  $Ei + q = g$ 。进一步:

$$x^* = (I - A^*)^{-1} f^* \quad (8)$$

则混合单位模型的直接能源系数矩阵  $\delta$  为:

$$\delta = G(\hat{x}^*)^{-1} A^* \quad (9)$$

完全能源系数矩阵为:

$$\alpha = G(\hat{x}^*)^{-1} L^* = G(\hat{x}^*)^{-1} (I - A^*)^{-1} \quad (10)$$

式中, 矩阵  $G$  的维度为  $m \times n$ , 其第  $k$  个对角元素为第  $k$  个能源部门实物单位的产出量  $g_k$ , 其余元素为 0。则可知矩阵  $G(\hat{x}^*)^{-1}$  的维度也为  $m \times n$ , 其对角元素为 1, 其余元素为 0。

对能源问题的分析过程中, 能源平衡方程 (即能源用于各产业部门的中间使用与最终需求的合计等于能源总产出量) 是否成立, 是我们检验模型选择是否合理、是否具有一致性的关键条件。接下来, 笔者围绕能源平衡方程, 分析价值型能源投入产出模型和混合型能源投入产出模型在新的最终需求出现时是否满足能源使用的一致性, 即在新的最终需求条件下, 能源平衡方程是否仍然保持成立。

## 三、两种能源投入产出模型的一致性分析

### (一) 混合型能源投入产出模型的一致性分析

首先分析混合型能源投入产出模型的一致性。实际应用中, 一个能源投入产出模型的能源系数都建立在已知的能源投入产出表基础上, 必然满足以

<sup>①</sup> 这是根据能源实物最终需求和价值最终需求推出的一种价格, 不同于能源的实际市场价格, 因此称为隐含价格 (implied price)。



已知表为基础的能源平衡方程,即某种能源的中间使用量与其最终需求使用量的合计等于其总产出量,即:

$$g^{old} = \delta x^{*old} + q^{old} \quad (11)$$

式中,上标“old”表示已知年度的投入产出变量。

如果现在有新的最终需求  $f^{*new} \neq f^{*old}$ ,假设技术系数保持稳定,可以证明,在满足新的最终需求  $f^{*new}$  的情况下,能源平衡方程依然成立,得到定理1。

定理1:在技术系数矩阵  $A^*$  稳定的条件下,混合型能源投入产出模型满足一致性,即对于新的最终需求  $f^{*new} \neq f^{*old}$ ,能源平衡方程仍成立。

证明:在技术系数矩阵  $A^*$  稳定的条件下,对于新的最终需求向量  $f^{*new} \neq f^{*old}$ ,有:

$$x^{*new} = (I - A^*)^{-1} f^{*new} \quad (12)$$

此时能源的中间使用量为:

$$\delta x^{*new} = G^{old} (\hat{x}^{*old})^{-1} A^* (I - A^*)^{-1} f^{*new} \quad (13)$$

根据  $G$  矩阵和  $x^*$  的定义,有:

$$G^{old} (\hat{x}^{*old})^{-1} = G^{new} (\hat{x}^{*new})^{-1} \quad (14)$$

而能源中间使用量与最终使用量的合计为  $\delta x^{*new} + q^{new}$ ,将式(13)和式(14)代入  $\delta x^{*new} + q^{new}$ ,有:

$$\begin{aligned} & \delta x^{*new} + q^{new} \\ &= G^{old} (\hat{x}^{*old})^{-1} A^* (I - A^*)^{-1} f^{*new} + q^{new} \\ &= G^{new} (\hat{x}^{*new})^{-1} A^* (I - A^*)^{-1} f^{*new} + q^{new} \\ &= G^{new} (\hat{x}^{*new})^{-1} [(I - A^*)^{-1} - I] f^{*new} + q^{new} \\ &= G^{new} (\hat{x}^{*new})^{-1} (I - A^*)^{-1} f^{*new} \\ &\quad - G^{new} (\hat{x}^{*new})^{-1} f^{*new} + q^{new} \\ &= G^{new} (\hat{x}^{*new})^{-1} x^{*new} - q^{new} + q^{new} = G^{new} i = g^{new} \end{aligned}$$

即对于新的最终需求  $f^{*new}$ ,仍然有:能源中间使用量+最终使用量=能源产出量。证毕。

## (二) 价值型能源投入产出模型的一致性分析

假设有一个新的价值单位的最终需求  $f^{new}$ ,价格体系和技术系数矩阵  $A$  保持稳定,最终需求

部门对能源需求的实物量为  $q^{new}$ ,能源最终需求的隐含价格向量为  $p_f$ ,保持稳定,则  $f^{new}$  对应一个混合单位的最终需求向量  $f^{*new}$ 。

定理2:在直接消耗系数矩阵  $A$  和能源隐含价格矩阵  $P$  稳定的条件下,价值型能源投入产出模型满足价值型投入产出平衡方程,是价值型投入产出平衡方程按价格矩阵进行调整的结果。

证明:设能源中间使用的价格矩阵为  $P^E =$

$[p_{kj}]_{m \times n}$ ,  $p_{kj} = \frac{z_{kj}}{e_{kj}}$ ;最终使用的价格矩阵为  $\tilde{P}_f = [\tilde{p}_{kj}]_{m \times n}$ ,当  $i=j$  时,  $\tilde{p}_{kj} = p_{fk}$ ,当  $i \neq j$  时,  $\tilde{p}_{kj} = 0$ 。价值型的直接消耗系数矩阵  $A = \begin{pmatrix} A^E \\ A^N \end{pmatrix}$ ,其中  $A^E$  表示各部门对能源的直接消耗系数矩阵,即  $A$  的前  $m$  行;  $A^N$  表示各部门对非能源部门的直接消耗系数矩阵,即  $A$  的后  $n-m$  行。给定一个新的最终需求向量  $f^{new}$ ,根据价值型能源投入产出模型,能源中间使用与能源最终使用的合计为:

$$Dx + q^{new} = D(I - A)^{-1} f^{new} + \tilde{Q} f^{new} \quad (15)$$

将式(15)的能源使用根据能源中间使用价格矩阵  $P^E$  和最终使用的价格矩阵  $\tilde{P}_f$  转换为价值单位表示的使用量,其中用符号“ $\times$ ”表示两个矩阵元素对应相乘的运算,令矩阵  $\tilde{I} = [\tilde{I}_{ij}]_{m \times n}$ ,当  $i=j$  时,  $\tilde{I}_{ii} = 1$ ,当  $i \neq j$  时,  $\tilde{I}_{ij} = 0$ ,则有:

$$\begin{aligned} & (P^E \times D)(I - A)^{-1} f^{new} + \tilde{P}_f * \tilde{Q} f^{new} \\ &= A^E (I - A)^{-1} f^{new} + f^{Enew} \\ &= \tilde{I} A (I - A)^{-1} f^{new} + f^{Enew} \\ &= \tilde{I} ((I - A)^{-1} - I) f^{new} + f^{Enew} \\ &= \tilde{I} x - \tilde{I} f^{new} + f^{Enew} = x^E \end{aligned}$$

也即:在稳定的价格矩阵下,价值型能源投入产出模型得到的能源中间使用的价值量和最终使用的价值量之和恰好等于价值型投入产出平衡方程中能源部门的总产出。证毕。

也就是说,价值型能源投入产出模型虽然在构建过程中使用了能源平衡方程,但其本质上是以价值型投入产出平衡方程为根本出发点建立的,将价

值型投入产出平衡方程对应能源部门的部分用价格进行调整就可以得到价值型能源投入产出模型。因此,它并没有考虑能源平衡方程在新的最终需求发生时是否仍然成立的问题,没有考虑能源使用的一致性。

综上,混合型能源投入产出模型保证能源平衡方程的成立,满足一致性;而价值型能源投入产出模型保证价值型投入产出平衡方程的成立。显然,对于实际的能源问题的分析而言,准确反映实物量的能源使用与产出关系的能源平衡方程更为重要。从这个意义上讲,混合型能源投入产出模型更为合理。

而在某些情况下,价值型能源投入产出模型与混合型能源投入产出模型等价,也满足能源平衡方程。

### (三) 两种能源投入产出模型等价的条件

为分析两种能源投入产出模型在什么情况下等价,首先定义“对应价格向量”。

定义1:对应价格向量。对给定的价值单位投入产出流量和混合单位投入产出流量,在混合单位的总产出与价值单位的总产出之间存在一种“价格”关系,笔者将其定义为“对应价格”,也即,对于  $x = (I - A)^{-1}f$ ,  $x^* = (I - A^*)^{-1}f^*$ , 向量  $p$  使得  $x = \hat{p}x^*$ , 称  $p$  为对应价格向量。

与隐含价格类似,对应价格不是真实的价格,而是表示混合单位的总产出和价值单位的总产出之间的一种转换关系,这种转换关系的背后决定因素是能源在不同使用者之间的价格。

对于原最终需求向量  $f^{old}$  和其对应的混合单位最终需求向量  $f^{*old}$ , 分别有:

$$x^{old} = (I - A)^{-1}f^{old}$$

以及

$$x^{*old} = (I - A^*)^{-1}f^{*old}$$

则存在对应价格向量  $p^{old}$ , 使得:

$$x^{old} = \hat{p}^{old} x^{*old}$$

对于新的最终需求向量  $f^{new}$  和它所对应的  $f^{*new}$ , 同样有  $x^{new} = (I - A)^{-1}f^{new}$  以及  $x^{*new} = (I - A^*)^{-1}f^{*new}$ , 存在  $p^{new}$  使得  $x^{new} = \hat{p}^{new} x^{*new}$ 。

对价值单位的能源模型,能源中间使用与最终使用的合计为:

$$\begin{aligned} Dx^{new} + \tilde{Q}f^{new} &= E^{old}(\hat{x}^{old})^{-1}x^{new} + q^{new} \\ &= E^{old}(\hat{x}^{*old})^{-1}(\hat{p}^{old})^{-1}\hat{p}^{new}x^{*new} + q^{new} \\ &= \delta(\hat{p}^{old})^{-1}\hat{p}^{new}x^{*new} + q^{new} \\ &= \delta\hat{x}^{*new}(\hat{p}^{old})^{-1}p^{new} + q^{new} \end{aligned}$$

根据定理1,有  $\delta x^{*new} + q^{new} = g^{new}$ , 满足能源平衡方程,因此,价值型能源投入产出模型是否满足能源平衡方程取决于是否  $p^{new} = p^{old}$ 。当  $p^{new} = p^{old}$  时,  $(\hat{p}^{old})^{-1}p^{new} = 1$ , 则  $Dx^{new} + \tilde{Q}f^{new} = \delta x^{*new} + q^{new} = g^{new}$ 。

由于联系价值单位的能源部门间流量矩阵与实物单位的能源部门间流量矩阵的通常不是一个价格向量,而是能源价格矩阵,因此,通常情况下  $p^{new}$  和  $p^{old}$  不相等。但是,在如下两种情况下二者相等。

第一种情况:当  $f^{new} = \lambda f^{old}$ , 其中  $\lambda$  为大于0的标量时。这意味着此时新的最终需求结构与原最终需求的结构相同,且由于价格稳定,有  $f^{*new} = \lambda f^{*old}$ , 从而有:

$$x^{new} = (I - A)^{-1}f^{new} = \lambda(I - A)^{-1}f^{old} = \lambda x^{old}$$

$$\begin{aligned} x^{*new} &= (I - A^*)^{-1}f^{*new} = \lambda(I - A^*)^{-1}f^{*old} \\ &= \lambda x^{*old} \end{aligned}$$

$$x^{old} = \hat{p}^{old} x^{*old}$$

$$x^{new} = \lambda x^{old} = \lambda \hat{p}^{old} x^{*old} = \hat{p}^{old} x^{*new}$$

即当最终需求总量发生变化而最终需求结构不变时,  $p^{new} = p^{old}$ , 价值型能源投入产出模型与混合型能源投入产出模型等价。

第二种情况:当能源价格在所有使用者(包括所有中间使用者和最终使用者)之间保持一致时。这也意味着此时联系价值单位的能源部门间流量矩阵与实物单位的能源部门间流量矩阵的能源价格是一个向量,而不是一个矩阵。设  $p^e$  为能源价格向量,令  $\bar{p} = \begin{pmatrix} p^e \\ 1 \end{pmatrix}$ , 1的维度为  $n-m$ , 其元素全部等于1,则有:

$$\begin{aligned} A^* &= Z^* (\hat{x}^*)^{-1} \\ A &= Z(\hat{x})^{-1} = \hat{p} Z^* (\hat{x}^*)^{-1} (\hat{p})^{-1} = \hat{p} A^* (\hat{p})^{-1} \\ L^* &= (I - A^*)^{-1} \\ L &= (I - A)^{-1} = (I - \hat{p} A^* (\hat{p})^{-1})^{-1} \\ &= \hat{p} L^* (\hat{p})^{-1} \\ x &= (I - A)^{-1} f = \hat{p} L^* (\hat{p})^{-1} f \\ &= \hat{p} L^* (\hat{p})^{-1} \hat{p} f^* = \hat{p} x^* \end{aligned}$$

即此时无论最终需求向量怎么变化，都会存在同样的  $\hat{p}$ ，联系价值型产出  $x$  和混合型产出  $x^*$ 。这种情况下，价值型能源投入产出模型与混合型能源投入产出模型等价，具备一致性。

四、数值说明

本文用数值例子来说明混合型能源投入产出模型和价值型能源投入产出模型的差异以及两种等价情况。数值说明中价值单位的投入产出流量表和实物单位的能源流量表都来自 Miller and Blair 的文献。<sup>[21]</sup>

(一) 混合型模型和价值型模型的差异

考虑表 3 和表 4 两个部门价值单位的投入产出流量表和实物单位的能源流量表。可以看出，能源价格在各个使用部门之间存在差异，能源中间使用

的价格矩阵为  $P^E = (0.5 \quad 0.4)$ ，最终使用的价格矩阵为  $\tilde{P}_f = (0 \quad 0.625)$ 。计算可得，基于价值型模型的直接能源强度为  $D = (0.6 \quad 0.833 \ 3)$ ，完全能源强度为  $\epsilon = (1.181 \ 8 \quad 1.545 \ 5)$ ；基于混合型模型的直接能源强度为  $\delta = (0.6 \quad 0.416 \ 7)$ ，完全能源强度为  $\alpha = (1.263 \ 2 \quad 1.894 \ 7)$ 。

表 3 两部门的价值单位的投入产出流量表  
单位：百万美元

项目	小机械	能源	最终使用	总产出
小机械	10	20	70	100
能源	30	40	50	120

资料来源：Miller and Blair 的文献。<sup>[21]</sup>

表 4 两部门的实物单位的能源流量表  
单位：千兆 BTU

项目	小机械	能源	最终使用	总产出
能源	60	100	80	240

资料来源：Miller and Blair 的文献。<sup>[21]</sup>

假设价格体系保持不变，有一个任意的新的最终需求出现，为  $f^{new} = \begin{pmatrix} 200 \\ 600 \end{pmatrix}$ ，所对应的等价的混合单位最终需求为  $f^{*new} = \begin{pmatrix} 200 \\ 960 \end{pmatrix}$ ，则分别用价值型方法和混合型方法模拟为了满足这个最终需求所需要的能源量，如表 5 所示。

表 5 数值说明——两类模型的差异

项目	能源中间使用		能源最终使用	中间使用＋最终使用	总产出
	小机械	能源			
能源价格（百万美元/千兆 BTU）	0.5	0.4	0.625	—	—
价值型产出（百万美元）	127.27	363.64	600	1 090.91	1 090.91
价值型方法计算的能源使用（千兆 BTU）					
能源	254.54	909.09	960	2 123.64	—
混合型方法计算的能源使用（千兆 BTU）					
能源	248.42	863.16	960	2 071.58	2 071.58

表 5 中的结果表明，如果有新的最终需求向量  $f^{new} = \begin{pmatrix} 200 \\ 600 \end{pmatrix}$ （对应  $f^{*new} = \begin{pmatrix} 200 \\ 960 \end{pmatrix}$ ）出现，基于

混合型模型计算的能源总产出量为 2 071.58 千兆 BTU，而混合型模型所得到的能源中间使用与最终使用的合计为：248.42 + 863.16 + 960 =

2 071.58 千兆 BTU, 等于能源总产出量, 仍旧满足能源平衡方程, 具备一致性。而基于价值型模型计算的结果则与混合型模型的结果显著不同, 其中间使用与最终使用的能源合计为 2 123.64 千兆 BTU。将中间使用按照价格体系转化为价值量, 恰好等于价值型投入产出方程的结果,  $254.54 \times 0.5 = 127.27$ ,  $909.09 \times 0.4 = 363.64$ , 合计等于 1 090.91, 为价值型投入产出方程计算的能源部门总产出。也就是说, 基于价值型能源投入产出模型得到的能源使用量不考虑能源平衡方程, 而是满足价值型投入产出平衡方程, 其各部门的中间使用是将价值型投入产出模型得到的中间流量除以相对应的价格得到的。

对于能源模型而言, 能源实物流量满足能源平衡方程是最根本的要求, 混合型能源投入产出模型的结果是合理的。很显然, 按照价值型能源投入产出模型得到的能源使用量并不等于实物产出量, 其结果是不可靠的。与混合型能源投入产出模型相

比, 使用价值型能源投入产出模型得到的结果往往会出现偏差, 会大于或者小于合理的分析结果, 使得结论的可靠性降低。

## (二) 两种等价情况

1. 各部门最终需求按同一增长速度增长。接下来笔者说明如果各部门最终需求按照统一的速度增长, 则价值型能源投入产出模型可以得到满足能源平衡方程的结果, 且与混合型能源投入产出模型得到的结果相同。

假设所有部门的新的最终需求都是原最终需求的 3 倍, 则  $f^{new} = 3 \times \begin{pmatrix} 70 \\ 50 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 210 \\ 150 \end{pmatrix}$ , 对应的等价的混合单位最终需求为  $f^{*new} = 3 \times \begin{pmatrix} 70 \\ 100 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 210 \\ 300 \end{pmatrix}$ 。分别用价值型方法和混合型方法模拟为了满足这个最终需求所需要的能源使用量, 如表 6 所示。

表 6 数值说明——对各部门的最终需求按同一速度增长

项目	能源中间使用		能源最终使用	中间使用+最终使用	总产出
	小机械	能源			
价值型方法计算的能源使用（千兆 BTU）					
能源	180	300	240	720	—
混合型方法计算的能源使用（千兆 BTU）					
能源	180	300	240	720	720

结果表明, 如果各部门最终需求按照相同的速度增长, 则价值型模型与混合型模型的结果相同, 且都满足能源平衡条件和能源使用的一致性要求。而各部门的最终需求按照相同的速度增长意味着只有最终需求总量的变化, 最终需求的结构保持不变。即, 如果我们只考虑最终需求总量的变化, 忽略其部门结构的改变, 则价值型模型和混合型模型之间无差异。

2. 各部门使用能源的价格一致。保持两部门的价值流量不变, 能源总产出量不变, 只对能源的实物流量表稍作改变: 能源部门使用的能源量和最终需求部门使用的能源量做了交换, 如表 7。

可以看到, 此时能源的价格在所有部门间 (包

括中间使用部门小机械和能源, 也包括最终使用部门) 都相同, 都是 0.5 百万美元/千兆 BTU。计算得到价值型模型的直接能源强度为  $D = E(\hat{x})^{-1} = (0.6 \ 0.666 \ 7)$ , 完全能源强度为  $\varepsilon = (1.090 \ 9 \ 1.272 \ 7)$ ; 混合型模型的直接能源强度为  $\delta = (0.6 \ 0.333 \ 3)$ , 完全能源强度为  $\alpha = (1.090 \ 9 \ 1.636 \ 4)$ 。

表 7 两部门的实物单位的能源流量表 单位: 千兆 BTU

项目	小机械	能源	最终使用	总产出
能源	60	80	100	240

假设有一个任意新的最终需求,  $f^{new} = \begin{pmatrix} 300 \\ 800 \end{pmatrix}$ , 价



格体系稳定，对应等价的混合单位最终需求  $f^{*new}$  算能源的中间使用、最终使用和总产出，结果见表 8。  
 $= \begin{pmatrix} 300 \\ 1\ 600 \end{pmatrix}$ ，分别用价值单位和混合单位的方法计

表 8 数值说明——能源价格在各使用部门之间无差异的情况

项目	能源中间使用		能源最终使用	中间使用＋最终使用	总产出
	小机械	能源			
价值型方法计算的能源使用（千兆 BTU）					
能源	363. 64	981. 82	1 600	2 945. 46	—
混合型方法计算的能源使用（千兆 BTU）					
能源	363. 64	981. 82	1 600	2 945. 46	2 945. 46

显然，该数值模拟说明，在各部门使用能源的价格一致的情况下，价值单位的能源投入产出模型与混合单位的能源投入产出模型得到的结果完全相同，并且都满足能源平衡方程，即：能源中间使用＋能源最终使用＝能源总产出量，满足一致性。

五、结论

本文对两种能源投入产出模型——混合型和价值型之间的本质差异进行了分析，证明混合型能源投入产出模型在新的最终需求冲击下仍能保证能源平衡方程的成立，而价值型能源投入产出模型虽然在初始的构建过程中使用了能源平衡方程，但是新的最终需求冲击下无法保证能源平衡方程的成立。原因在于价值型能源投入产出模型的方法本质上是以价值型投入产出平衡方程的成立为出发点和根本条件的，是在价格稳定的条件下将价值型投入产出平衡方程用价格进行调整得到的，不考虑在新的最终需求下能源平衡方程是否仍然可以成立。而对于实际能源经济问题的分析而言，能源平衡方程的成立更为根本和重要。因此，从这个意义上讲，一般来说在实际的能源经济问题的分析中，采用混合型的能源投入产出模型更为合理。如果采用价值型模型，得到的结果则可能出现偏差，大于或者小于合理结果。

本文进一步分析了价值型能源投入产出模型和混合型能源投入产出模型等价的两种特殊情况。第一种情况是当各部门最终需求按照统一的增长率变化的时候，即假设新的最终需求结构不变。第二种情况是当能源价格在各个使用部门之间无差异的时候，而这通常都是难以满足的，仅对于规模很小、涉及的产业数量也很少的经济体有可能成立。

因此，利用能源投入产出模型进行分析的问题主要有以下几类：第一类是分析分产业的或者分产品类别的最终需求（例如居民消费、出口等）中隐含的完全能源使用量或者化石能源碳排放量。这类分析由于涉及不同类别的最终产品需求的影响，不能保证最终需求结构不变，因此，使用混合型能源投入产出模型更为合理。第二类是分析能源使用量、综合能耗强度或者综合碳排放强度的变化和影响因素。这类研究往往要涉及不同时期的比较，即涉及最终需求的总量变化，又涉及最终需求的结构变化，因此，选择混合型能源投入产出模型也是更为合理的。第三类是研究某些经济总量变化对能源使用量的影响。此时，可以假定只有最终需求总量的变化，而最终需求结构不变，可以使用价值型能源投入产出模型。例如，研究居民收入增加所带来的总消费增长对能源消耗的影响，可以假定居民消费结构不变，此时选择价值型模型也是合理的。

参考文献

[1] A. A. Gasim. The Embodied Energy in Trade: What Role Does Specialization Play? [J]. Energy Policy, 2015, 86.

- [2] B. Zhang, Z. M. Chen, X. H. Xia, X. Y. Xu, Y. B. Chen. The Impact of Domestic Trade on China's Regional Energy Uses: A Multi-regional Input-output Modeling [J]. Energy Policy, 2013, 63.
- [3] G. Machado, R. Schaeffer, E. Worrell. Energy and Carbon Embodied in the International Trade of Brazil: An Input-output Approach [J]. Ecological Economics, 2001, 39.
- [4] X. Sun, J. Li, H. Qiao, B. Zhang. Energy Implications of China's Regional Development: New Insights from Multi-regional Input-output Analysis [J]. Applied Energy, 2017, 196.
- [5] Y. Zhang, X. Bian, W. Tan, et al. The Indirect Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emission Caused by Household Consumption in China: An Analysis Based on the Input-output Method [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163.
- [6] 崔日明, 王磊. 中国能源消耗国际转移的实证研究——基于对进出口产品内涵能源的四维度估算 [J]. 经济理论与经济管理, 2013, (4).
- [7] 胡鞍钢, 郑云峰, 高宇宁. 中国高耗能行业真实全要素生产率研究 (1995—2010) [J]. 中国工业经济, 2015, (5).
- [8] 蒋雪梅, 祝坤福. 基于内外资企业能耗强度差异的工业节能潜力分析 [J]. 管理评论, 2017, (1).
- [9] 李世奇, 朱平芳. 产业结构调整与能源消费变动对大气污染的影响——基于上海投入产出表的实证分析 [J]. 上海经济研究, 2017, (6).
- [10] 庞军, 高笑默, 石媛昌, 孙文龙. 基于 MRIO 模型的中国省级区域碳足迹及碳转移研究 [J]. 环境科学学报, 2017, (5).
- [11] 王长建, 张小雷, 张虹鸥, 汪菲. 基于 IO—SDA 模型的新疆能源消费碳排放影响机理分析 [J]. 地理学报, 2016, (7).
- [12] 谢建国, 姜珮珊. 中国进出口贸易隐含能源消耗的测算与分解——基于投入产出模型的分析 [J]. 经济学 (季刊), 2014, (7).
- [13] 张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响 [J]. 经济研究, 2010, (4).
- [14] 宗刚, 陈鸣, 韩建飞. 交通运输设备制造业碳排放变动研究 [J]. 统计研究, 2014, (11).
- [15] G. J. Treloar. Extracting Embodied Energy Paths from Input-output Tables: Towards an Input-output-based Hybrid Energy Analysis Method [J]. Economic Systems Research [J]. 1997, 9 (4).
- [16] S. Lindner, D. Guan. A Hybrid-unit Energy Input-output Model to Evaluate Embodied Energy and Life Cycle Emissions for China's Economy [J]. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18 (2).
- [17] S. Xie. The Driving Forces of China's Energy Use from 1992 to 2010: An Empirical Study of Input-output and Structural Decomposition Analysis [J]. Energy Policy, 2014, 73.
- [18] 李坤望, 孙玮. 我国进出口贸易中的能源含量分析 [J]. 世界经济研究, 2008, (2).
- [19] 吴开尧, 朱启贵, 刘慧媛. 中国经济产业价值型能源强度演变分析——基于混合型能源投入产出可比价序列表 [J]. 上海交通大学学报 (哲学社会科学版), 2014, (5).
- [20] 夏炎, 杨翠红, 陈锡康. 基于可比价投入产出表分解我国能源强度影响因素 [J]. 系统工程理论与实践, 2009, (10).
- [21] R. E. Miller, P. D. Blair. Input-output Analysis: Foundations and Extensions [M]. Cambridge University Press, 2009.
- [22] R. Herendeen. Affluence and Energy Demand [J]. Mechanical Engineering, 1974, (96).
- [23] 王会娟, 陈锡康, 杨翠红. 三种能源投入产出模型的分析与比较 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, (6).
- [24] H. Weisz, F. Duchin. Physical and Monetary Input-output Analysis: What Makes the Difference? [J]. Ecological Economics, 2006, 57 (3).

(责任编辑: 杨万东)

## CHOOSING ENERGY INPUT-OUTPUT MODELS: HYBRID TYPE OR MONETARY TYPE

ZHANG Hong-xia

(School of Economics, Renmin University of China)

**Abstract:** In literature, there are two ways to apply input-output technique to analyzing problems related to energies, the hybrid type energy input-output model and the monetary type energy input-output model. In this paper, the features and differences of two types of energy input-output models are studied and proved from the viewpoint of energy balance equations. The main conclusions are as follows. Firstly, when the matrix of technology coefficients is stable, the hybrid type energy input-output model still satisfies the energy balance equations, and keeps consistency under the impact of new final demands. Secondly, for the monetary type energy input-output model, if the matrix of technology coefficients and the matrix of energy prices keep stable, the monetary input-output equations are satisfied, and the energy consumptions are the results of adjusting monetary input-output equations by the matrix of energy prices, when there is a vector of new final demands. It means that although the energy balance equations are used in the process of constructing a monetary type energy input-output model, its fundamental starting point is not the energy balance equations, but the monetary input-output equations. Therefore, a monetary type energy input-output model does not take energy balance equations into consideration, and does not consider whether the energy balance equations are still satisfied when a vector of new final demands comes out and whether the energy consumptions are consistent. In this sense, a hybrid unit energy input-output model is more reasonable than a monetary type energy input-output model. Thirdly, it is proved that in some special cases, the monetary type energy input-output model is equivalent to the hybrid unit energy input-output model. The arguments provide guidelines for choosing a proper model when using energy input-output technique.

**Key words:** energy; input-output model; energy balance equations