

# 高端装备制造业技术创新效率测度与优化

曾 刚<sup>1,2</sup>, 耿成轩<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 经济与管理学院, 天津 300300; 2. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 江苏 南京 211106)

**摘 要:** 为了拓展多阶段 DEA 模型的应用, 文章充分发挥四阶段 DEA 模型和 Bootstrap 模型的优势, 利用组合分析模型对高端装备制造技术创新效率进行测度。DEA 模型选取 R&D 经费内部支出、技术引进经费支出、R&D 人员全时当量、研发机构个数作为投入指标, 有效发明专利数、利润总额作为产出指标, 同时考虑宏观经济水平、市场劳动力供给和金融支持等环境因素对效率的影响。结果表明: 不考虑环境和统计噪音, 高端装备制造业技术创新效率均值呈现显著的“U”型波动趋势。剔除环境因素和随机误差后, 组合模型实证发现产业效率呈非显著性“U”型变化, 创新水平差异不明显, 大部分介于 0.8~0.9 之间, 处于非效率状态; 技术驱动和环境因素对创新效率提升发挥双重作用。医疗仪器设备及仪器仪表制造等产业的技术进步指数(TC)均大于 1。

**关键词:** 高端装备制造; 四阶段 DEA; Bootstrap 模型; 投入产出

中图分类号: F273.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-292X(2021)03-0017-06

## Measurement and Optimization of Technological Innovation Efficiency in High-end Equipment Manufacturing Industry

ZENG Gang<sup>1,2</sup>, GENG Cheng-xuan<sup>2</sup>

(1. College of Economics and Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. China College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China)

**Abstract:** In order to expand the application of multi-stage DEA model, this paper gives full play to the advantages of four-stage DEA model and Bootstrap model, and measures the innovation efficiency of high-end equipment manufacturing technology with combinatorial analysis model. The DEA model selects internal expenditure of R&D funds, expenditure of technology import, full-time equivalent of R&D personnel and the number of R&D institutions as input indexes, the number of effective invention patents and total profit as output indexes, and considers the impact of environmental factors such as macroeconomic level, market labor supply and financial support on efficiency. The results show that: Regardless of the environment and statistical noise, the mean value of technological innovation efficiency of high-end equipment manufacturing industry presents a significant U-shaped fluctuation trend. There are significant differences between industries. With environmental factors and random errors being removed, the empirical results of the portfolio model show that the industrial efficiency presents a non-significant "U" shaped change, and the difference of innovation level is not obvious, most of which are between 0.8 and 0.9, in the state of inefficiency. Technological drive and environmental factors play a dual role in improving innovation efficiency. The technology progress index of medical equipment and instrument manufacturing is more than 1.

**Key words:** High-end equipment manufacturing; Four-stage DEA; The Bootstrap model; Input and output

### 一、引言

高端装备制造业是工业领域的标志性产业, 技术先进, 价值链高端。党的十九大明确提出要“加快建设制造强国, 加快

发展先进制造业”, 而高端装备制造是先进制造的核心。同美、日、德等发达制造强国相比, 中国高端装备制造存在巨大差距, 集中表现为: 原始创新不足, 装备服务体系不完善, 规模

收稿日期: 2020-09-18

基金项目: 天津市教委科研计划人文社科一般项目 (2019SK103)。

作者简介: 曾 刚 (1988-), 男, 江西新干人, 博士研究生, 研究方向: 战略性新兴产业创新管理;  
耿成轩 (1965-), 女, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 主要从事战略性新兴产业创新管理研究。

较小,产品竞争力弱等<sup>[1]</sup>。2015年5月,政府提出“中国制造2025”战略,力争破解制造业“大而不强”的格局。2016年8月,《装备制造业标准化和质量提升规划》发布,从行业标准规范为突破口刺激制造转型。技术创新是高端装备制造最显著的产业特征。人才、资本和土地等生产要素是技术创新活动的基本投入,研究其最优配置效率有助于提升产业的创新成果产出和水平。高端装备制造技术创新效率是衡量产业创新驱动的核心指标,研究如何促进效率提升有助于减少资源浪费,克服投入冗余和产出不足的现实问题<sup>[2]</sup>。

国内外对技术创新效率方法的探究成果丰硕。1972年,Afriat S N最早提出这一概念,他认为研发创新活动的投入和产出之比同生产边界显著关联。当前,主流的模型分别是参数估计和非参数估计的方法,包括 Aigner & Meusen 等(1977)提出的随机前沿模型(SFA) & Charnes 等(1978)年提出的 DEA 模型。例如 Nasierowski & Arcelus(2000、2003)采用两阶段 DEA 模型技术研究了创新活动的规模和资源配置对创新效率的影响<sup>[3,4]</sup>。Coelli 等(1999)利用产出距离函数改进随机前沿模型对多产出的企业技术效率进行了估计和预测。Rabb 等(2006)选取 50 家美国企业为样本运用 DEA 模型分析了其技术创新效率<sup>[5]</sup>。Liu 等(2004)等从研发的人力资源投入、资本配置和最优决策方案角度进行了系统研究<sup>[6]</sup>。吴传清等(2017)综合 Malmquist 模型和 Tobit 模型优势实证分析了长江经济带企业的创新效率<sup>[7]</sup>。沈能等(2018)基于 Hybrid DEA 和结构方程模型对中国不同区域的绿色创新效率进行了评价<sup>[8]</sup>。梁圣蓉等(2019)选取了 5 种不同的渠道的技术溢出纳入 Coe-Helpman 模型,同时实证验证了国际研发的绿色技术创新相率 and 这些不同渠道技术溢出的动态关联<sup>[9]</sup>。

当前,中国学者主要从企业绩效、产业升级和技术创新三个视角关注高端装备制造业发展。刘春英等(2013)对航空高端装备企业的绩效和创新能力进行了回归分析,通过主成分分析法发现两者存在时滞效应<sup>[10]</sup>。赫连志巍等(2016)重视企业绩效和人才胜任力的关联,结果发现心理契约能对高端装备企业的绩效和管理团队起到中介协调作用<sup>[11]</sup>。徐传谔(2018)等利用上市公司面板数据,构建二次函数模型,实证研究发现高端装备制造国有股权对企业绩效的存在“底部价值陷阱”影响<sup>[12]</sup>。张志元(2016)以高端装备制造业产业竞争力为切入点,分析了产业发展面临环境不优、动力断档的困境,提出打造产业集聚区、生态转型和构建开放型的产业体系的解决对策<sup>[13]</sup>。夏友富等(2018)从产业链角度提出了中国高端装备制造产业根据实际走“自主式”“渐进式”和“集群式”的发展道路,以世界一流企业为标杆,从技术内涵式实现创新<sup>[14]</sup>。陈瑾等(2018)利用评价指标虚拟验证“V”模型和层次分析法对中国高端装备升级路径进行评价,提出了产业发展的正向工程升级模式<sup>[15]</sup>。刘微微等(2014)建立了知识创新和技术创新二者耦合的高端装备制造企业测度模型,同时实证结果表明模型具有较高的可信度<sup>[16]</sup>。马胜利等(2015)剖析了装备制造业集群的负效应,通过静态博弈模型的解释结果对改善“知识溢出悖论”提出了针对性策略<sup>[17]</sup>。王成刚等(2018)采用双边匹配决策技术对高端装备转自企业的技术创新和组织创新进行了实证检验,同时针对要素之间不匹配问题提

出了解决对策<sup>[18]</sup>。

上述研究成果聚焦高端装备制造产业困境、内部创新机理和产出绩效,研究手段上既有数学建模的定量方法,也有规范研究的定性方法。显然,提升高端装备制造产业技术创新效率已经成为广泛共识。为了拓展多阶段 DEA 模型的应用,文章在已有研究的基础上引入多阶段 DEA 模型测度效率值,发挥参数估计和非参数估计两种方法的优势剔除环境因素对效率值的影响。同时,运用 Bootstrap 模型进行反复自抽样避免统计误差对效率值的干扰。采用科学方法客观、准确的估计高端装备制造企业的效率值,深入剖析产业创新力的内在动力因素,以期能给出有价值的现实意义。

## 二、研究方法:四阶段 DEA 和 Bootstrap 组合模型

### 1. 四阶段 DEA 模型

Fried 等(2002)拓展了经典 DEA 模型,提出了三阶段和四阶段 DEA 技术<sup>[19]</sup>。三阶段方法主要侧重于避免管理的运气因素对技术创新效率值的影响,四阶段模型能够有效地消除外部环境的干扰。对中国高端装备制造企业的技术创新效率测算,文章先利用 Fried 等提出的四阶段模型,先过滤环境因素带来的误差,同时借鉴龚锋(2008)<sup>[20]</sup>,陈池波等(2014)<sup>[21]</sup>等的思路,模型包括四个部分:

(1) 第一阶段:基于投入导向型 BCC 模型测度初始效率值

Charnes 最早提出了规模报酬不可变的数据包络模型,但是高端装备制造企业的创新活动会存在规模报酬递增或者递减的变化,因此,适合采用 Banker 提出的投入导向型经典 BCC 模型。根据模型原理,如果选取了  $i$  个高端装备企业样本( $DMU: i=1,2,\dots,n$ ),  $DMU$  的创新活动总共有  $j$  种创新投入要素  $x_{ij}(j=1,2,\dots,m)$ ,另有,产生  $r$  种创新产出  $y_{ir}(r=1,2,\dots,s)$ ,因此,初始技术创新效率值  $\hat{\theta}$  可表示为:

$$\hat{\theta}_i = \min_{\theta, \lambda} [\theta - \varepsilon(e^+s^- + e^-s^+)]$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n \lambda_i y_{ir} - s^- = \gamma_{ir}, \sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} + s^+ = \theta x_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \lambda_i, s^+, s^- \geq 0$$

(2) 第二阶段:运用 Tobit 模型分解松弛变量

建立  $M$  个 Tobit 回归模型 ( $M$  代表高端装备企业的创新投入要素的个数),其中,设定影响高端装备样本企业的环境变量作为解释变量,创新活动的投入总松弛量设为被解释变量。

$$\varphi_{mk} = \gamma_m + \delta_m \omega_{mk} + \mu_m$$

$$m=1,2,\dots,M, k=1,2,\dots,N$$

在上式中,  $\varphi_{mk} = (1 - \hat{\theta}_k) \varepsilon_{mk} + \hat{\varphi}_{mk}$  表示第  $m$  个投入要素的总松弛变量,  $\omega_{mk}$  表示外部环境变量的向量;  $\gamma_m$  代表常数项,  $\delta_m$  表示待估的系数,  $\mu_m$  表示误差项。

(3) 第三阶段:调整投入变量数据

利用  $\hat{\varphi}_{mk} = \gamma_m + \delta_m \varphi_{mk}$  对高端装备制造企业投入变量数据进行调整,计算公式为:

$$\varepsilon_{mk}^{adj} = \varepsilon_{mk} + [Max^k \{\hat{\varphi}_{mk}\} - \hat{\varphi}_{mk}], m=1,2,\dots,m, k=1,2,\dots,N$$

目的在于利用  $Max^k \{\hat{\varphi}_{mk}\}$  这一最大的拟合松弛量将样本置于

最差的环境条件。如果  $Max^k\{\hat{\varphi}_{nk}\}-\hat{\varphi}_{nk}=0$ , 则调整后的投入  $\varepsilon_{mk}^{adj}=\varepsilon_{mk}$ , 表示将样本处于最差的环境中, 未对初始投入进行调整。同理, 当环境较好时,  $Max^k\{\hat{\varphi}_{nk}\}-\hat{\varphi}_{nk}>0$ , 则调整后的投入  $\varepsilon_{mk}^{adj}>\varepsilon_{mk}$ , 相当于增加了初始投入。

(4) 第四阶段: 利用调整数据重新计算创新效率值  $\hat{\theta}$

利用公式(3)调整的投入数据和初始产出数据重新代入 BCC 模型, 新的效率值为  $\hat{\theta}'$ 。  $\hat{\theta}'$  代表将样本企业处于最不利的环境下所能实现的效率水平, 同时, 也表示高端装备企业的投入至少能降低  $(1-\hat{\theta}')$  的比例。

## 2. Bootstrap 模型

上述四阶段 DEA 模型可有效“过滤”环境因素对效率值的干扰, 且能通过松弛变量明确环境因素对效率值影响的大小和方向。不过, 这种模型依然存在某种偏误, 即无法避免统计误差对效率值的影响。因此, 为了消除这种不利的影响, 可以引入 Simar & Wilson 提出的 Bootstrap 模型<sup>[22]</sup>, 有效克服四阶段方法的不足。模型的基本做法如下:

(1) 计算 Bootstrap 初始效率值  $\hat{\rho}$

利用四阶段模型调整后的数据作为样本, 得到 Bootstrap 模型样本的效率值  $\hat{\rho}=(\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2, \dots, \hat{\rho}_q)$ 。

(2) 平滑化得到  $\hat{\rho}'$  的 Bootstrap 样本

采用重复自抽样法 (有放回) 得到规模为  $N$  的 native Bootstrap 样本  $\hat{\beta}=(\hat{\beta}_{1b}, \hat{\beta}_{2b}, \dots, \hat{\beta}_{qb})$ , 然后再对  $\hat{\beta}'$  平滑化处理, 得到 Bootstrap 样本  $\hat{\rho}''=(\hat{\rho}''_{1b}, \hat{\rho}''_{2b}, \dots, \hat{\rho}''_{qb})$ 。其中:

$$\rho''_{gb}=\bar{\rho}''_b+\frac{1}{\sqrt{1+\pi^2/\hat{\sigma}_{\rho'}}}(\bar{\rho}''_b-\hat{\beta}''_b), \quad \bar{\beta}''_b=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\beta''_{gb}$$

$$\rho''_{gb}=\begin{cases} \beta''_{gb}+\pi\sigma''_{gb}, & \text{如果 } \beta''_{gb}+\pi\sigma''_{gb}\leq 1 \\ 2-\beta''_{gb}-\pi\sigma''_{gb}, & \text{如果 } \beta''_{gb}+\pi\sigma''_{gb}>1 \end{cases} \quad (4)$$

在式(4)中,  $\pi$  代表平滑参数,  $\hat{\sigma}_{\rho'}$  代表  $\hat{\rho}'$  的标准差,  $\sigma$  代表随机误差项。

(3) 调整投入数据并重新计算

根据公式  $\tau''_{gb}=\left(\frac{\hat{\rho}'}{\hat{\rho}''_{gb}}\right)\tau''_{gb}^{adj}$ , ( $g=1, 2, \dots, N$ ), 同时有  $\rho''=(\hat{\rho}''_{1b}, \hat{\rho}''_{2b}, \dots, \hat{\rho}''_{qb})$ , 则可以对样本数据进行调整。

利用新调整的数据和原始的产出数据可以重新测算出第  $j$  家高端装备样本企业的效率值:

$$\rho''_{jb}=\min\left\{\begin{aligned} &\rho>0|y_i\leq\sum_{i=1}^N\gamma_iy_{ig}, \theta\tau''_{ij}\geq\sum_{i=1}^N\gamma_i\tau''_{ig} \\ &\sum_{i=1}^M\gamma_i, \gamma_i\geq 0, g=1, 2, \dots, M \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

(4) 重复平滑化和调整投入数据

即重复上述(2)、(3)步骤  $L$  次 ( $L=1000$ ), 得到每个高端装备样本企业的效率估计值  $\rho_g^{1A}$ :

$$biaS_g=\frac{1}{M}\sum_{b=1}^M\hat{\rho}''_{gb}-\hat{\rho}'_g \quad (6)$$

$$\rho_g^{1A}=\hat{\rho}'_g-biaS_g, \quad g=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

## 三、变量选取、样本选择与数据来源

### 1. 模型的变量的选取

(1) 投入变量

对高端装备企业技术创新效率的精准评估, 借鉴刘伟等(2013)、刘晖等(2015)的做法<sup>[23,24]</sup>, 选取 R&D 经费内部支出、技术引进经费支出、R&D 人员全时当量、研发机构个数作为具体的投入指标。

(2) 产出变量

主要考虑科技和经济两个方面的产出。参考已有成果, 分别选取有效发明专利数、利润总额作为科技和经济产出的二级指标。这两项指标有助于反映高端装备企业发展的真实质量。

(3) 环境变量

在环境变量指标选取方面, 根据国内大部分研究, 通常采用人均 GDP 反映经济发展的水平。市场劳动力供给用从业人员平均人数代表, 有利于高端装备不同子产业的比较。金融支持选取银行业各金融机构贷款余额与当地 GDP 之比作为评价指标。

文章的评价指标体系如表 1 所示。

表 1 评价指标体系

指标分类	一级指标	二级指标	单位	符号
投入指标	资本	R&D经费内部支出	万元	RDFEE
		技术改造经费支出	万元	TECH
	劳动	R&D人员全时当量	人年	RDT
	土地	研发机构个数	个	REINST
产出指标	科技产出	有效发明专利数	件	PATENT
	经济产出	利润总额	亿元	TPROFIT
环境变量	宏观经济水平	人均GDP	元	ANGDP
	市场劳动力供给	从业人员平均人数	人	LAB
	金融支持	银行业各金融机构贷款余额与当地GDP之比	比值	FINANCE

### 2. 数据来源及描述性统计

中国尚未有专门针对高端装备产业的统计制度。基于数据的可得性、完整性和科学性, 文章根据《中国高技术产业统计年鉴》对照战略性新兴产业发展重点, 重新梳理高端装备制造样本。主要分成航空航天器设备、医疗仪器设备仪表、电子通信设备和计算机办公设备四个领域。考虑年鉴的时效性, 时间跨度为 2011—2016 年。另外, 利用《中国统计年鉴》和《中国金融年鉴》获取环境变量数据。为了避免缺失数据对评价结果的不利影响, 删除了数据不全的产业数据。最终, 文章研究总共包括 114 个样本共 1026 个观察值。

样本的描述性统计见表 2。

表 2 2011—2016 年投入产出及环境数据描述性统计

变量	最大值	中间值	最小值	均值	标准差	样本数
RDT	730681.40	26057.28	747.30	64292.51	117342.50	114
RDFEE	24376050.00	885690.00	13439.00	2137266.00	3989790.00	114
TECH	4028069.00	85894.50	1004.00	337588.00	670372.00	114
REINST	394590.00	252.50	8.00	8195.26	37941.88	114
TPROFIT	10301.80	337.55	11.40	831.46	1563.80	114
PATENT	257234.00	4440.50	44.00	18226.89	39737.84	114
ANGDP	5.38	4.44	3.51	4.43	0.65	114
LAB	13543225.00	599858.00	24899.00	1401067.00	2641792.00	114
FINANCE	2.03	1.80	1.71	1.85	0.12	114



表3 不考虑环境和统计误差的创新效率值

序号	决策单元	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	均值
1	医疗仪器设备制造	1.00	0.96	0.78	1.00	0.89	1.00	0.94
2	仪器仪表制造	0.81	0.65	0.71	0.83	0.97	0.92	0.81
3	飞机制造	0.20	0.23	0.22	0.26	0.41	0.37	0.28
4	航天器制造	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	通信终端设备制造	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.54	0.92
6	广播电视设备制造	1.00	0.91	0.71	0.95	0.69	0.60	0.81
7	雷达配套设备制造	0.77	0.83	0.49	0.58	0.59	0.54	0.63
8	视听设备制造	0.53	0.44	0.51	0.53	0.41	0.57	0.50
9	电子器件制造	0.74	0.55	0.68	0.81	0.61	0.72	0.68
10	半导体器件制造	0.86	0.86	0.60	1.00	0.69	0.54	0.76
11	集成电路制造	0.67	0.45	0.42	0.67	0.61	0.94	0.63
12	电子元件制造	0.79	0.68	0.72	0.76	0.80	0.68	0.74
13	其他电子设备制造	0.84	0.84	0.72	0.86	0.84	0.92	0.84
14	计算机零部件制造	0.83	1.00	0.85	1.00	1.00	0.95	0.94
15	办公设备制造	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

#### 四、实证结果分析

##### 1. 第一阶段：考虑环境和随机误差的 BCC 模型结果

首先，利用 BCC 模型和原始的投入产出数据，可以计算出在不考虑环境和随机误差的情况下 15 个高端装备制造产业的技术创新值，根据 DEA-SOLVER Pro5 软件测算结果见表 3。在 2011—2016 年间，航天器制造和办公设备制造 2 个产业的技术创新效率值均为 1，处于技术有效状态，不存在投入冗余。表明这两个产业技术创新效率处于生产前沿面之上，技术效率能够为产业高质量发展带来强劲动力支持。医疗仪器设备制造、通信终端设备制造、计算机零部件制造 3 个产业年均效率值均大于 0.9，存在一定的投入冗余，但是总体处于效率较高状态。不过，飞机制造和视听设备制造 2 个产业在样本期间效率均值分别为 0.280 和 0.499，均低于 0.5，存在明显的产出不足现象，产业发展低效率现象明显。这和产业发展的现状吻合，例如，中国围绕 C919 的国产大飞机制造还处于生产研发阶段，距离商业运营还需一段时间，相应产出值必然较低。其他产业的技术创新效率均值大部分介于 0.6~0.9 之间，创新效率均处于生产前沿面之下，产业提质增效潜力巨大。

##### 2. 第二阶段：面板 Tobit 模型剔除环境因素的估计

为了有效“过滤”环境因素对效率值的影响，利用式(2)对投入数据进行调整。文章主要考虑宏观经济水平、市场劳动力供给和金融支持三个方面环境因素的影响。模型的被解释变量选取投入松弛变量，解释变量为环境因素，利用  $M$  个（文章  $M=4$ ）拟合模型重新调整投入数据。如果两者呈正相关，则说明环境因素有利于投入要素的提高；反之，不利于投入要素的增长。将调整数据代入 Eviews8.0 软件包，得到面板 Tobit 模型估计结果如表 4 所示。

表4 Tobit 模型估计结果

变量	R&D经费内部支出(RDFEE)	技术改造经费支出(TECH)	R&D人员全时当量(RDT)	研发机构个数(REINST)
人均GDP (ANGDP)	781239.4*** (3.372)	77003.69*** (1.777)	11592.66*** (2.448)	-25436.310 (-1.141)
从业人员平均人数 (LAB)	1.418*** (37.529)	0.236*** (33.354)	0.043155*** (55.859)	0.005*** (4.664)
银行业各金融机构贷款余额与当地GDP之比(FINANCE)	-1789172*** (-3.187)	-180268.1*** (-1.716)	-25671.780*** (-2.237)	61861.3*** (4.156)
常数项	-2602.140	-2320.538	-1948.627	-1992.297
对数似然率	1289790*** (19.23)	241298.1*** (18.36)	26371.31*** (20.53)	34199.66*** (21.98)

注：\*、\*\*和\*\*\* 分别表示在 10%、5%和 1%的水平上显著；括号内为 Z 统计值。

通过分析宏观经济水平(ANGDP)、劳动力供给(LAB)和金融支持(FINANCE)三个环境变量对 RDFEE、TECH、RDT 以及 REINST 四个投入冗余变量的分析，可以得到以下结论：

##### (1) 宏观经济水平(ANGDP)

该变量对所有投入变量均有显著性影响，显著性水平大于 5%。从作用的方向来看，宏观经济水平对资本变量(RDFEE、TECH)具有正向影响。这表明社会经济水平越高，资金存量越高，对于资本密集型的高端装备制造产业更容易从银行、证券等多元资本市场获取资金，从而高端装备制造产业更容易提高资本要素的投入。同理，对 RDT 的影响也显著为正，经济水平越好，劳动者愿意投入的劳动量越高。但是，ANGDP 变量对 REINST 投入变量的影响不显著，说明宏观经济水平对高端装备制造业研发机构数作用不明显，可能的解释是高端装备制造业对技术创新具有刚性需求，受宏观经济形势影响有限。

##### (2) 劳动力市场供给(LAB)

该变量对所有投入冗余变量的影响均为正，且通过 1%的显著性检验。市场劳动力供给水平越高，高端装备制造投入变量越大。高端装备制造产业处于制造业价值链最顶端，对人力资本需求旺盛，尤其是集聚大量知识技能型劳动者。当外部宏观劳动力市场能够提供充分的人力资源，高端装备制造产业更能够克服高端人才不足短板，通过智力创新扩大产出，有利于产业技术创新水平的提升。因此，外部劳动力市场水平对于高端装备制造产业创新效率投入水平的影响难以忽视。

##### (3) 金融支持(FINANCE)

该变量对三个投入变量 R&D 经费内部支出(RDFEE)、技术改造经费支出(TECH)、R&D 人员全时当量(RDT)均有显著性影响，不过方向是负的。金融支持(FINANCE)对研发机构个数(REINST)影响显著，作用为正。说明金融环境因素对高端装备制造四个投入冗余变量有较明显的影响。如果按照原始的投入计算，将使得决策单元处于不公平的环境中，得到的效率值将出现偏差。

##### 3. 第三、四阶段：“烫平”环境因素的技术创新效率

在第三阶段可以利用第二阶段的 Tobit 拟合模型重新调整投入数据，再利用调整后的数据重新代入 BCC 模型，不难得到四阶段“烫平”环境因素后的技术创新效率值，统计结果如表 5 所示。

表5 四阶段 DEA 模型结果

序号	决策单元	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	均值
1	医疗仪器设备制造	0.989	0.988	0.984	0.975	0.977	0.973	0.981
2	仪器仪表制造	0.975	0.97	0.968	0.948	0.944	0.939	0.957
3	飞机制造	0.978	0.982	0.982	0.968	0.974	0.965	0.975
4	航天器制造	1	1	1	1	1	1	1
5	通信终端设备制造	0.993	0.951	0.93	0.886	0.871	0.829	0.910
6	广播电视设备制造	0.993	0.99	0.985	0.975	0.978	0.973	0.982
7	雷达配套设备制造	0.999	0.999	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998
8	视听设备制造	0.958	0.955	0.955	0.917	0.927	0.923	0.939
9	电子器件制造	0.924	0.919	0.913	0.86	0.853	0.861	0.888
10	半导体器件制造	0.993	0.992	0.99	0.983	0.986	0.983	0.988
11	集成电路制造	0.985	0.984	0.981	0.975	0.976	0.986	0.981
12	电子元件制造	0.854	0.829	0.826	0.759	0.785	0.756	0.802
13	其他电子设备制造	0.982	0.975	0.966	0.939	0.953	0.941	0.959
14	计算机零部件制造	0.932	0.949	0.947	0.916	0.955	0.948	0.941
15	办公设备制造	0.994	0.993	0.992	0.987	0.99	0.988	0.991

对比第一阶段 DEA 模型结果,可以发现不考虑环境因素的影响之后,15 个高端装备制造产业技术创新效率值发生很大的变化,2011—2016 年间,各个子产业的效率均值介于 0.802~1 之间,方差为 0.053。而第一阶段的均值在 0.499~1 之间,方差为 0.199。这说明,如果将所有的高端装备制造产业置于相同的外部环境状态,产业的创新效率差异将明显缩小。

根据模型结果可知,除电子元件制造效率值外,其他产业技术创新效率值相对集中,介于 0.5~1 之间。通过调整数据,高端装备制造产业技术创新效率值差异性明显降低。这表明中国发展高端装备制造业宏观经济水平、金融政策和人力资源等环境因素支持必不可少。

#### 4. 剔除环境和统计误差的 Bootstrap 模型结果

基于四阶段模型的基础,将高端装备制造产业的外部环境调整到相同的水平,为了减少随机误差的影响,利用 Bootstrap 模型进一步优化,重新测算,可以得出高端装备制造产业真实的技术创新效率值,相关结果如表 6 所示。

表 6 四阶段 DEA 和 Bootstrap 组合模型结果

序号	决策单元	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	均值
1	医疗仪器设备制造	0.848	0.847	0.809	0.805	0.832	0.815	0.826
2	仪器仪表制造	0.876	0.839	0.847	0.986	0.845	0.817	0.868
3	飞机制造	0.893	0.814	0.823	0.818	0.909	0.885	0.857
4	航天器制造	0.832	0.824	0.908	0.829	0.946	0.856	0.866
5	通信终端设备制造	0.829	0.896	0.952	0.852	0.896	0.887	0.885
6	广播电视设备制造	0.877	0.864	0.885	0.887	0.918	0.856	0.881
7	雷达配套设备制造	0.803	0.81	0.967	0.755	0.733	0.942	0.835
8	视听设备制造	0.808	0.823	0.824	0.916	0.934	0.814	0.853
9	电子器件制造	0.888	0.785	0.858	0.892	0.892	0.917	0.872
10	半导体器件制造	0.817	0.984	0.91	0.817	0.918	0.822	0.878
11	集成电路制造	0.871	0.81	0.836	0.901	0.933	0.928	0.880
12	电子元件制造	0.819	0.711	0.784	0.795	0.877	0.783	0.795
13	其他电子设备制造	0.889	0.879	0.88	0.879	0.973	0.976	0.913
14	计算机零部件制造	0.862	0.83	0.924	0.821	0.809	0.818	0.844
15	办公设备制造	0.959	0.813	0.912	0.916	0.815	0.829	0.874

对比第四阶段模型计算结果,可以看出剔除随机误差冲击之后,高端装备制造产业技术创新效率整体出现变化,整体效率值略有降低,86.67%的产业效率均值介于 0.8~0.9 之间。除电子元件制造和其他电子设备制造外,排名前三位的是通信终端设备制造、广播电视设备制造、集成电路制造,均值分别是 0.885、0.881、0.88;排名后三位的是计算机零部件制造、雷达配套设备制造、医疗仪器设备制造,均值分别是 0.844、0.835、0.826。

对比一阶段和四阶段模型计算结果,如图 1 所示,剔除环境因素和随机误差后,组合模型的运算结果呈现振幅较小的动态波动规律,而一阶段 DEA 模型结果比较粗糙,不同产业的差异性显著,尤其是飞机制造和航天器制造之间的差距太大,产业效率值呈现不规则的波动态势。而组合模型结果总体低于四阶段模型结果,所有产业的技术创新效率均小于 1,产业的投入冗余现象依然存在。这说明外部环境和随机误差对高端装备制造产业的技术创新效率值影响很大,只有剔除这些因素才有助于客观评价产业真实的效率水平,科学反映产业内生创新动力高低,采取有效措施提升资源配置能力。

#### 5. 高端装备子产业创新效率聚类分析及动态变化

为了深入描述中国高端装备制造产业创新差异,利用剥离环境因素后的调整后数据,根据高端装备制造产业分类方法,

将样本分成:医疗仪器设备及仪器仪表制造,航空、航天器及设备制造业,电子及通信设备制造业,计算机及办公设备制造业。将聚类后的数据重新利用 Bootstrap 模型进行测算。如表 7 所示,在四大产业中,计算机及办公设备制造业效率值最高(0.92),航空、航天器及设备制造业效率最低(0.82)。这和当前定性研究的结论基本一致,近年来,中国联想、小米、华为等计算机大型企业不断加大研发投入,创新产出增大,全球市场份额占有优势;而中国的航空航天产业,尤其以航空制造产业还处于创新投入阶段,产出较少,相应表现出的效率值略低。

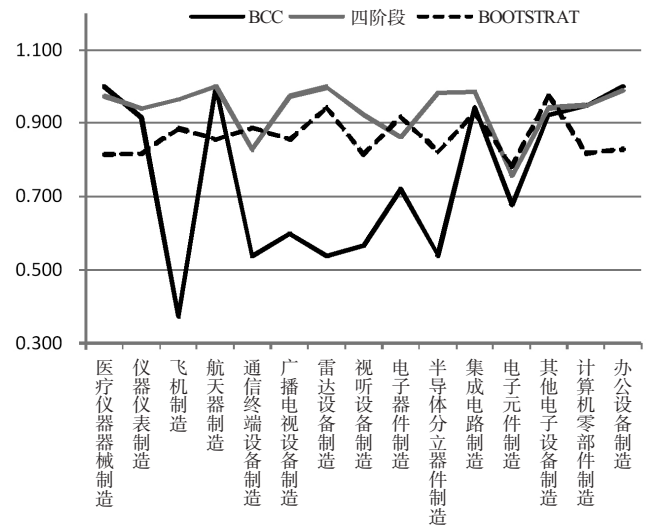


图 1 2016 年三种模型结果对比

注:限于篇幅,重点分析 2016 年结果,其他年份类似。

进一步分析四大高端装备产业创新效率的动态变化,运用 Fare 等<sup>[25,26]</sup>提出的 Malmquist 模型计算其 2011—2016 年的技术创新综合效率并进行分解。经过 MAXDEA

表 7 高端装备四大子产业效率均值

子产业分类	技术创新效率平均值	标准差	置信区间	
医疗仪器设备及仪器仪表	0.91	0.13	0.734	0.986
航空、航天器及设备制造业	0.82	0.35	0.771	0.953
电子及通信设备制造业	0.89	0.11	0.765	0.897
计算机及办公设备制造业	0.92	0.21	0.690	0.904

专业版,相关计算结果见表 8 (仅选取 2016 年结果分析)。从 Malmquist 指数  $MI$  来看,计算机及办公设备制造业最高为 1.54,航空、航天器及设备制造业和电子及通信设备制造业的  $MI$  值均为 1.10,所有产业的  $MI$  值均大于 1,说明相比上一时期,所有产业的创新生产活动均有所提高。另外,从  $MI$  的分解情况来看,四大产业均呈现技术进步指数( $TC$ )大于技术效率指数( $EC$ )且大于 1 的产业特征。说明技术进步

表 8 四大子产业的 Malmquist 指数及分解

子产业分类	Malmquist 指数( $MI$ )	技术效率指数( $EC$ )	技术进步指数( $TC$ )
医疗仪器设备及仪器仪表	1.47	0.97	1.51
航空、航天器及设备制造业	1.10	0.80	1.36
电子及通信设备制造业	1.10	1.04	1.06
计算机及办公设备制造业	1.54	1.06	1.45

因素已经成为高端装备制造产业生产前沿向前移动的重要驱动力量。因此,注重技术创新尤其是原始创新和



颠覆性创新是推动产业革新的动力源。

## 五、研究结论

文章改进经典的 BCC 模型方法,引入四阶段 DEA 模型,剔除环境因素引致的测量偏误,同时利用 Bootstrap 模型克服统计误差,通过组合模型的方式评价了高端装备制造产业技术创新效率。研究选取 2011—2016 年统计年鉴数据,验证模型的有效性,分析了高端装备制造产业技术创新效率现状及差异。最后得出的具体结论如下:

第一,剥离环境因素和统计噪音之前,采用一阶段 BCC 模型测算表明:在 2011—2016 年间,15 个高端装备制造业技术创新效率均值呈现显著的“U”型波动趋势。航天器制造、办公设备制造效率均值最高为 1,处于技术有效,视听设备制造和飞机制造技术创新效率均值则不足 0.5,分别为 0.499 和 0.28,测算显示各产业之间差异显著。

第二,剥离环境因素之后利用四阶段 DEA 模型可知,除电子元件制造外,其他 14 个产业技术创新效率值总体呈均匀分布特征,各产业之间差异明显变小。另外,从实证检验的结果来看,宏观经济水平、劳动力供给水平和金融环境支持等因素均对高端装备制造技术创新投入要素产生显著性影响。

第三,剔除环境因素和随机误差之后,综合四阶段 DEA 和 Bootstrap 模型技术,中国高端装备制造业总体技术创新水平呈非显著性“U”型变化,产业创新水平相近,大部分介于 0.8~0.9 之间,投入冗余现象普遍。通过 Bootstrap 模型调整,总体降低了四阶段效率得分,实现有效地纠偏。

第四,环境因素和技术驱动是高端装备产业技术创新效率提升的重要动力源。除去环境因素的影响后,利用调整数据,经过聚类分析和分解 Malmquist 指数,结果表明医疗仪器设备、仪器仪表制造,航空、航天器及设备制造业,电子及通信设备制造业,计算机及办公设备制造业四大子产业的技术进步指数(TC)均大于 1,技术创新作用明显。

因此,得出高端装备制造升级的政策建议:第一,优化产业内部创新管理,合理配置投入资源,提升产业效率,减少投资冗余,有效控制运作成本。第二,注重区分环境差异,利用东部地区发达的宏观经济优势和供给侧改革契机,推动发展高端装备产业集群,促进产业优化升级。第三,持续提高技术进步,建立颠覆性创新和原始创新激励机制,鼓励高端装备企业打造技术创新核心竞争力。

## 【参考文献】

- [1] 吴雷. 高端装备制造业创新绩效评价研究 [J]. 科技管理研究, 2015, 35(15): 51-56.
- [2] 范德成, 杜明月. 高端装备制造业技术创新资源配置效率及影响因素研究——基于两阶段 Stochastic 和 Tobit 模型的实证分析 [J]. 中国管理科学, 2018, 26(01): 13-24.
- [3] Nasierowski W, Arcelus F J. On the stability of countries' national technological systems [M]. Springer, Berlin, 2000: 97-111.
- [4] Nasierowski W, Arcelus F J. On the efficiency of national innovation systems [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2003(37): 215-234.
- [5] Rabb R A, Kotamraju P. The efficiency of the high-tech economy: Conve-

- ntional development indexes versus a performance index [J]. Journal of Regional Science, 2006, 46(3): 545-562.
- [6] Liuc C, Chen C Y. A two-dimensional model for allocating resources to R&D programs [J]. Journal of American Academy of Business, 2004, 5(1): 459-473.
- [7] 吴传清, 黄磊, 文传浩. 长江经济带技术创新效率及其影响因素研究 [J]. 中国软科学, 2017(05): 160-170.
- [8] 沈能, 周晶晶. 技术异质性视角下的我国绿色创新效率及关键因素作用机制研究: 基于 Hybrid DEA 和结构化方程模型 [J]. 管理工程学报, 2018, 32(4): 46-53.
- [9] 梁圣蓉, 罗良文. 国际研发资本技术溢出对绿色技术创新效率的动态效应 [J]. 科研管理, 2019, 40(3): 21-29.
- [10] 刘春英, 余青青. 我国航空装备业自主创新能力与绩效间关系的实证研究——基于上市公司数据 [J]. 中央财经大学学报, 2013(7): 53-58.
- [11] 赫连志巍, 袁翠欣. 高端装备制造业创新团队胜任特征与企业绩效关系研究 [J]. 科学学与科学技术管理, 2016, 37(2): 99-112.
- [12] 徐传湛, 张海龙. 高端装备制造业国有股权比例的“底部价值陷阱”研究 [J]. 求是学刊, 2018, 45(1): 51-58.
- [13] 张志元. 供给侧改革背景下提高我国先进装备制造业竞争力研究 [J]. 当代经济管理, 2016, 38(12): 52-56.
- [14] 夏友富, 何宁. 推动我国装备制造业迈向全球价值链中高端的机制、路径与对策 [J]. 经济纵横, 2018(4): 56-62.
- [15] 陈瑾, 何宁. 高质量发展下中国制造业升级路径与对策——以装备制造业为例 [J]. 企业经济, 2018, 37(10): 44-52.
- [16] 刘微微, 孙茹. 高端装备制造业企业知识创新与技术创新耦合度测度研究 [J]. 科学学与科学技术管理, 2014, 35(7): 16-22.
- [17] 马胜利, 王伟光, 姜博. 装备制造产业集群中的知识溢出悖论——基于静态博弈的一种分析 [J]. 技术经济与管理研究, 2015(7): 104-108.
- [18] 王成刚, 石春生, 李坤. 企业组织创新与技术创新匹配决策关系研究 [J]. 科研管理, 2018, 39(S1): 245-253.
- [19] Fried H O, Lovell C A K, Schmidt S S. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis [J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 5(17): 157-174.
- [20] 龚锋. 地方公共安全服务供给效率评估——基于四阶段 DEA 和 Bootstrapped DEA 的实证研究 [J]. 管理世界, 2008(4): 80-90.
- [21] 陈泊波, 盛国勇. 我国省域农业生产技术效率测度分析——基于四阶段 DEA 和 Bootstrapped DEA 的实证研究 [J]. 科技进步与对策, 2014, 31(2): 50-54.
- [22] Simar, Wilson. Statistical inference in nonparametric frontier models: The state of the art [J]. Journal of Productivity Analysis, 2000(13): 49-78.
- [23] 刘伟, 李星星. 我中国高新技术产业技术创新效率的区域差异分析——基于三阶段 DEA 模型与 Bootstrap 方法 [J]. 财经问题研究, 2013(8): 20-28.
- [24] 刘晖, 刘铁芳, 乔哈, 等. 我国战略性新兴产业技术创新效率研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2015(9): 2296-2303.
- [25] Fa R. Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Industrialized Countries [J]. American Economic Review, 1994(84): 66-83.
- [26] Fa R. Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Change in Industrialized Countries: Reply [J]. American Economic Review, 1997(87): 1040-1043.

(责任编辑: HKL)