基于数据包络分析和主成分分析的产业技术创新能力差异化研究

齐兴达,李显君,刘丝雨,孟东晖

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室,北京 100084)

摘 要:为分析中国汽车产业技术创新能力现状及寻找其提升的路径,应用技术创新理论,构建产业技术创新能力分析模型,选取不同产业进行差异化研究。采用基于数据包络分析(DEA)和主成分分析(PCA)的双轨分析方法,从投入端和产出端引入6个影响产业技术创新能力的指标,构建评价指标体系,对我国汽车、家用视听设备和通信设备三个产业技术创新能力进行比对。研究结果表明,我国汽车产业技术创新能力处于中低水平,创新投入能力较弱,投入规模不足,产出能力不平衡;创新转化过程存在失效。

关键词:产业创新能力;绩效评价;主成分分析;数据包络分析

中图分类号:F407.471 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2015)03-1017-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201503049

Differentiation research on industrial technology innovation ability by DEA and PCA

QI Xing-da, LI Xian-jun, LIU Si-yu, MENG Dong-hui

(*State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: To analyze the technology innovation ability of China's auto industry, an analytical model is developed based on the theory of technology innovation. Using this model, the performances of technology innovation ability in auto industry, household audio-visual equipment industry and telecommunication equipment industry are evaluated. The model adopts a new and more sophisticated two-line approach based on Data Envelopment Analysis (DEA) and Principal Component Analysis (PCA). Furthermore, six factors are introduced into this model. The evaluation results show that the technology innovation ability of China's auto industry is in the low level, and it confronts insufficient innovation input and unbalanced innovation output. At the same time, the innovative transformation process faces inefficiency. Finally, several policy suggestions are proposed on improving the technology innovation ability of China's auto industry.

Key words: technology innovation ability; performance evaluation; principle component analysis; data envelopment analysis

收稿日期:2014-07-21.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71172007).

作者简介:齐兴达(1987-),男,博士研究生.研究方向:产业创新系统.E-mail:qxd06@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:李显君(1967-),男,副研究员,博士生导师.研究方向:产业创新系统,技术创新,竞争战略,创新战略,管理整合及业务流程再造,开放式创新与经营模式.E-mail:leexj@tsinghua.edu.cn

0 引 言

近十余年来,我国汽车产业超高速发展,自2009年起,汽车产销量达到世界首位。然而发展至今,产业发展"大而不强"的困境并未得到根本改善,突出表现在:①自主品牌汽车市场占有率不高;②产业依赖国外品牌和技术的局面依然严重;③"市场换技术"战略收效甚微,培养了制造能力但未培养起核心技术开发能力[1]。而在同样的国情下,我国家电制造和通信设备等产业却都具备了一定的国际竞争力。

为解释中国汽车产业发展呈现出的区别于历史规律的现象,本文借鉴产业创新系统理论框架[2],探讨和评价了中国汽车产业技术创新能力,并通过将其与同样资源和制度背景下的家电视听设备和通信设备产业技术创新能力对比,寻找汽车产业创新系统的不足,为国家制定汽车产业政策、完善产业结构提供依据。

已有的基于产业技术创新能力视角的传统研究主要集中于宏观层面上,多借鉴国家创新系统理论建立产业创新系统分析模型,对产业创新系统的构成、动态过程关注不够[3-5]。围绕技术创新能力评价的研究主要分为能力评价和效率评价两大类,缺少两者结合的全面评价[6]。

产业技术创新能力取决于系统创新投入、产出及转化效率。为合理评价三方面内容,本文提出了针对性的产业创新系统分析模型,并采用基于主成分分析(Principal component analysis,PCA)和数据包络分析(Data envelopment analysis,DEA)相结合的分析方法,综合评价产业技术创新能力。

1 基本方法

1.1 产业创新系统技术能力分析及绩效评价

产业创新系统是由与创新全过程相关的机构、组织和实现条件构成的网络体系,组成要素包括参与者、联结机制、技术和环境。其内部各个参与者之间的联系与相互作用关系不断变化。考虑到国内各产业处于近似相同的资源和制度环境,可将产业创新系统看作一个投入和产出系统,投入的资源经过产业创新系统内部各个要素之间相互作用,转化为创新产出。本文提出产业创新系统分析框架如图1所示。

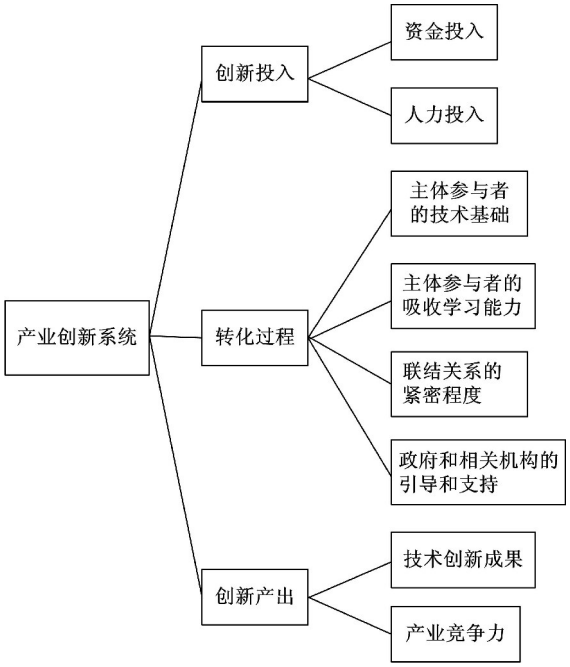


图1 产业创新系统分析模型

Fig. 1 Analytical model of the industry innovation system

1.2 基于PCA和DEA的绩效综合评价模型

PCA方法能对多个指标进行降维,并对主成分进行客观赋权得到综合得分。在用统计方法研究多变量问题时,过多变量会使数据计算量大,分析复杂。应用PCA方法可使最终评价指标少而精,且相互之间关系明确。本文从产业创新投入和产出角度进行指标选取,建立如下PCA评价模型:

$$P = f(I, O) = \sum I_i \times W_i \tag{1}$$

式中:P为产业创新系统投入产出综合评价值;f为产业创新系统投入产出能力评价方法;I为创新投入;O为创新产出;I_i为第i项指标;W_i为该指标的权重。

DEA是在"相对效率评价"概念基础上发展起来的一种新的系统分析方法,利用数学规划模型对具有多个输入和多个输出的决策单元之间的相对有效性进行评价[7-8]。DEA的优势在于能够处理多输入和多输出的有效性评价,不需要对各项指标的影响权重进行主观判断,能直接根据创新投入与产出指标的相关数据建立DEA评价模型,且不必确定输入和输出之间关系的显式表达式。本文建立DEA评价模型为:

$$H = f'(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{u}) \tag{2}$$

式中:H 为产业创新系统转化效率评价值;f' 为产业创新系统转化效率评价方法。

对于 j 个样本,每个样本有 m 种输入和 s 种输出,输入和输出向量为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj})^{\mathrm{T}}>0,j=1,2,\cdots,n\\ \boldsymbol{y}_j=(y_{1j},y_{2j},\cdots,y_{sj})^{\mathrm{T}}>0,j=1,2,\cdots,n\end{cases} \tag{3}$$

输入、输出权向量为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}=(v_1,v_2,\cdots,v_m)^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{u}=(u_1,u_2,\cdots,u_s)^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{4}$$

评价数学模型为:

$$h_j=\frac{\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}y_j}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}x_j}=\frac{\sum_{r=1}^{s}u_ry_{rj}}{\sum_{i=1}^{m}v_ix_{ij}},j=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

PCA 侧重对产业创新系统投入产出情况进行综合评价,而 DEA 侧重对产业创新系统转化过程效率进行评价[9]。采用双轨并行的评价模式建立二维评价体系,对产业技术创新能力进行分析,对产业创新系统技术创新能力及效率做出全面评价,如图 2 所示。

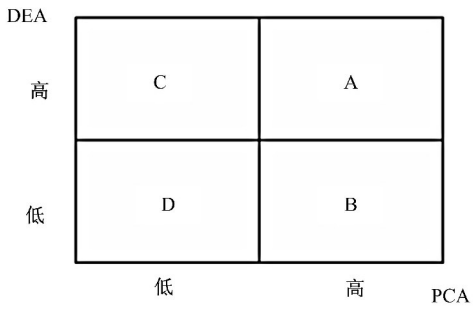


图 2　PCA/DEA 综合评价模型

Fig. 2　PCA/DEA Comprehensive evaluation model

1.3　评价指标体系

1.3.1　产业创新投入指标

产业创新投入是产业创新活动的根本来源,投入的人力与资金资源在产业创新系统内各个要素的相互作用中得到应用。产业创新投入指标主要用 R&D(Research and development)投入来衡量,包括经费投入和人力投入两个方面:

$$\text{R\&D 经费投入强度}=\frac{\text{R\&D 投入经费}}{\text{销售收入}}\times 100\% \tag{6}$$

$$\text{R\&D 人员投入强度}=\frac{\text{研发人员数}}{\text{从业人员总数}}\times 100\% \tag{7}$$

1.3.2　产业创新产出指标

(1)新产品产值率

新产品是产业及企业技术创新的重要产出之一,直接贡献于企业销售收入及产业竞争力。选取新产品产值率作为产业创新产出指标,可体现技术创新对产业技术持续进步的促进作用:

$$\text{新产品产值率}=\frac{\text{新产品产值}}{\text{总产值}}\times 100\% \tag{8}$$

(2)万人发明专利申请数

专利是技术创新活动的另外一种重要产出形式,体现产业技术创新能力积累和发展基础。专利分为发明专利、实用新型专利和外观设计专利,三种专利类型中,最能体现出其技术创新水平的是发明专利。考虑到产业规模的差距,选择当年万人发明专利申请数作为创新成果指标:

$$\text{万人发明专利申请数}=\frac{\text{发明专利申请数}}{\text{从业人员总数}}\times 10000 \tag{9}$$

(3)销售利润率

良好的产业利润状态是产业持续进行创新活动的基础,体现产业竞争力水平,选取产业销售利润率可以评价产业投资效益,反映产业创新活动的经济性:

$$\text{销售利润率}=\frac{\text{利润}}{\text{销售收入}}\times 100\% \tag{10}$$

(4)出口交货值占销售产值的比例

为评价产业竞争力的外在体现,选取产品出口情况作为另一评价指标,应用出口交货值占销售产值比例测度产业生产产品的出口水平,衡量产业国际竞争力:

$$\frac{\text{出口交货值}}{\text{销售产值}}\times 100\%$$

2　实证分析

2.1　样本产业及数据选取

本文选取汽车产业、家用视听设备产业以及通信设备产业三个产业作为样本,采用 2008～2012 年五年的数据,应用双轨评价模型围绕产业技术创新能力进行差异化研究。样本产业数据主要来自于中国汽车工业年鉴、中国科技统计年鉴、国家专利局,具体数据参见表 1。样本产业均为制造业中的高科技产业,具有知识密集、技术密集的特点,技术创新是这些产业发展的重要推动力,产业创新活动突出。

表1 样本产业数据

Table 1 Data of sample industries

样本产业	研发人员投入强度/%	R&D经费投入强度/%	销售利润率/%	新产品占总产值比例/%	出口交货值占销售产值比例/%	万人发明专利申请数/(件/万人)
视听设备(2008)	3.69	1.76	2.94	41.42	53.17	19.50
视听设备(2009)	3.02	1.57	3.70	41.88	48.34	23.17
视听设备(2010)	3.74	1.38	5.38	32.69	50.02	26.95
视听设备(2011)	2.99	1.86	4.20	43.52	48.36	22.31
视听设备(2012)	4.04	1.53	3.93	38.12	46.75	30.46
汽车(2008)	5.93	2.07	4.92	32.55	9.64	123.56
汽车(2009)	7.52	1.93	7.09	32.89	5.47	143.69
汽车(2010)	7.69	1.62	8.45	32.56	5.06	185.13
汽车(2011)	7.73	1.61	8.19	32.93	5.72	207.15
汽车(2012)	8.04	1.32	8.31	32.47	5.45	237.99
通信设备(2008)	11.45	2.58	3.78	37.79	58.69	234.92
通信设备(2009)	10.36	2.92	6.45	48.21	52.63	185.81
通信设备(2010)	9.78	3.08	7.40	42.97	50.88	132.53
通信设备(2011)	9.58	3.06	5.26	39.30	47.44	150.19
通信设备(2012)	9.26	2.92	5.10	36.63	51.23	149.65

2.2 PCA求解过程及结果

首先对样本数据进行KMO(Kaiser-meyer-olkin)和Bartlett球形检验,结果如表2所示。可见,KMO的值大于0.4,Bartlett球形检验的显著性水平$P<0.001$,P为产业创新系统PCA的模型评价值,说明各变量之间的相关性显著,适合用主成分分析法。

表2 KMO及Bartlett球形检验结果

Table 2 Inspection results by KMO and Bartlett

KMO检验值		0.404
Bartlett球形检验	卡方检验	77.630
	自由度	15
	显著性水平	0.000

应用主成分分析法得到:主成分f_1的权重为0.56;主成分f_2的权重为0.44。于是得到PCA模型的数学评价模型为:

$$P=0.56f_1+0.44f_2 \tag{11}$$

f_1主要受研发人员投入强度、研发经费投入强度、新产品占总产值比例和出口交货值占销售产值比例4个指标影响;f_2主要反映销售利润率指标情况。

由PCA模型得到的评价结果如表3所示。从得分结果可见,通信设备制造业产业创新系统投入产出能力实力较强,且比较接近,五年平均得分为0.706。汽车产业创新系统投入产出的能力较弱,平均得分为0.314,低于通信设备制造业。

表3 样本产业PCA模型评价得分结果及排名

Table 3 Results and rankings of sample industries by PCA

样本产业	总得分	标准化得分	排名
通信设备(2009)	1.52	1.00	1
通信设备(2011)	1.37	0.94	2
通信设备(2008)	0.78	0.71	3
视听设备(2012)	0.42	0.58	4
通信设备(2012)	0.07	0.44	5
通信设备(2010)	0.05	0.44	6
视听设备(2010)	0.01	0.42	7
汽车(2009)	−0.19	0.34	8
汽车(2010)	−0.23	0.33	9
汽车(2011)	−0.27	0.31	10
汽车(2008)	−0.31	0.30	11
汽车(2012)	−0.32	0.29	12
视听设备(2011)	−0.90	0.07	13
视听设备(2008)	−0.91	0.07	14
视听设备(2009)	−1.09	0.00	15

分别计算各产业的各主成分得分三年的平均值如表4所示。结合以上计算结果,可以得出如下结论。

(1)汽车产业技术创新投入能力落后

主成分f_2主要受研发人员投入强度、研发经

表 4　样本产业各主成分得分三年平均值及排名

Table 4　Results and rankings of main components by PCA

样本产业	f_1		f_2	
	平均得分	排名	平均得分	排名
汽车	0.51	2	0.15	3
视听设备	0.37	3	0.17	2
通信设备	0.59	1	0.85	1

费投入强度两个指标的影响,新产品占总产值比例和出口交货值占销售产值比例对该主成分也有一定贡献。汽车产业的该主成分得分排名靠后,五年平均得分排名为样本产业中最后一名,反映出汽车产业在产业创新投入能力上有所欠缺。

(2)汽车产业技术创新产出能力失衡发展,产品国际竞争力弱

汽车产业在主成分 f_2 上的排名靠后也反映出汽车产业在新产品占总产值比例和出口交货值占销售产值比例两个指标上表现欠佳,新产品开发能力和产品出口能力弱于其他产业,产业国际竞争力不强。

(3)汽车产业具有较强盈利能力,但不能真实反映产业竞争力

主成分 f_1 主要反映销售利润率指标情况和万人发明专利申请数,在该主成分的得分排名中,汽车产业位于中游,反映出汽车产业具有较强的盈利能力。结合前文,可发现汽车产业新产品开发能力和出口能力较弱,汽车产业创新产出能力不平衡。

(4)汽车产业专利产出数量较多,质量水平处于中游,与通信产业具有一定差距

从数量上看,汽车产业专利产出能力尚可,但专利水平与其他产业相比存在差距,尤其是高水平专利的产出能力较弱。这种技术创新产出和产业竞争力之间的不平衡,反映出产业创新系统内部缺少对核心技术的研发投入,以及协同大学、科研机构共同开展的基础研究缺乏。

综合分析样本产业创新产出能力多个指标,可发现我国汽车产业创新产出能力存在结构性缺陷,处于失衡发展状态。一方面,"市场换技术"政策的多年实施,导致我国汽车产业主导地位由合资企业牢牢占据,自主品牌竞争力弱,市场接受度低。市场的发展为汽车产业不断突破产销量、销售收入纪录提供了基础,但没有转化为汽车产业竞争力的整体提升;另一方面,汽车产业技术创新产出中缺乏高水平专利,导致产业竞争力无法提升,科研成果产业化效率较低,产业创新系统内部联结机制不完善,导致创新系统内部各主体缺乏互动。

2.3　DEA 求解过程及结果

采用 EMS(Efficiency measurement system)软件进行 DEA 模型运算,计算结果如表 5 所示。

表 5　DEA 模型评价有效性结果

Table 5　Efficacy results and rankings by DEA

样本产业	综合有效性/%	纯技术有效性/%	规模有效性/%
汽车(2008)	67.80	80.00	84.75
汽车(2009)	75.20	85.90	87.54
汽车(2010)	90.30	100.00	90.30
汽车(2011)	91.20	100.00	92.30
汽车(2012)	92.25	98.52	92.12
视听设备(2008)	100.00	100.00	100.00
视听设备(2009)	100.00	100.00	100.00
视听设备(2010)	100.00	100.00	100.00
视听设备(2011)	100.00	100.00	100.00
视听设备(2012)	100.00	100.00	100.00
通信设备(2008)	100.00	100.00	100.00
通信设备(2009)	100.00	100.00	100.00
通信设备(2010)	81.90	82.40	99.39
通信设备(2011)	80.35	81.75	99.50
通信设备(2012)	78.36	83.45	97.26

从效率评价结果可以看出,在样本产业中,家用视听设备产业创新系统转化效率最优,连续五年均为 DEA 有效。通信设备制造产业五年平均综合有效性达到 88.12%。汽车产业五年平均综合有效性为 83.35%,排名靠后,且连续五年非 DEA 有效。表明汽车产业内部存在创新转化过程技术失效或者规模失效问题,需要调整和改进以下创新投入和转化过程。

(1)汽车产业创新系统资源配置效率整体欠佳,但总体呈上升趋势

本文选取的 DEA 模型中,纯技术有效是指产出相对于投入达到最大化,即该 DMU(Decision making unit)位于生产函数曲线上。反之,在相同投入条件下,产业创新系统产出未达到最大值,在转化过程中存在资源配置缺陷。

汽车产业 2008 年和 2009 年均为非纯技术有效性,2010、2011 年达到纯技术有效性。说明 2008 年和 2009 年汽车产业创新系统的创新产出

不足,产业创新转化过程存在资源配置问题。2010年后实现纯技术有效,即达到当年创新投入条件下的最大产出,产业创新系统内部资源配置逐渐趋向合理。

(2)汽车产业创新系统投入规模仍有较大进步空间

DEA模型中规模有效是指该样本产业的创新投入规模合理,投入增长的百分比与产出增长的百分比近似,产业投入产出处于最佳状态。非规模有效包括规模递增和规模递减状态。其中规模递减状态表明样本产业技术创新产出指标增幅不及投入指标增幅,创新资源存在浪费,样本产业内部存在结构和转化过程缺陷,需控制创新投入规模,优化资源配置。

汽车产业2008年~2012年均为非规模有效,创新产出增幅持续低于创新投入增幅,产业内部创新过量投入,资源利用低效,缺乏合理配置。同时,汽车产业为非纯技术有效,系统内部存在创新资源分配失衡问题,导致产业内部创新能力分布不均衡。

2.4 DEA/PCA综合评价结果分析

将两种评价结果综合于DEA/PCA坐标中,得到各样本产业分布情况如图3所示(图中方框中的数字表示年份)。根据双轨分析模型,结合上述分析结果,将分布划分为4个象限。

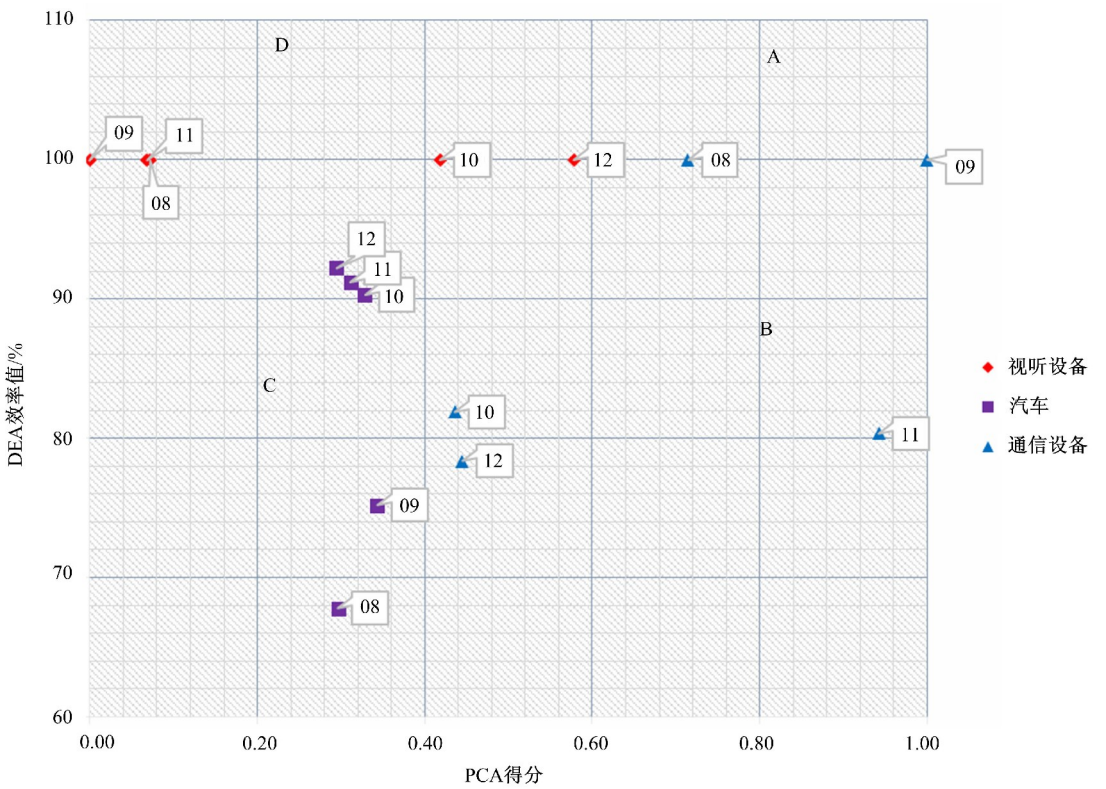


图3 DEA/PCA综合评价结果

Fig. 3 Comprehensive Evaluation results by DEA/PCA

综合比较样本产业双轨评价结果可以发现,汽车产业创新系统技术创新能力总体而言处于中等偏下水平,汽车产业2008年和2009年二维分析结果分布在C象限,PCA和DEA效率水平较低,直观反映出汽车产业创新投入和创新产出相对不足,产业创新系统内部各主体缺乏有效联结,资源无法高效利用和优化配置。自2010年起,汽车产业技术创新转化效率有所提高,创新转化过程实现技术有效,资源配置合理,整体投入规模有所下降,产业发展趋于理性。

从总体趋势上看,汽车产业创新系统技术及规模转化效率提高明显。表现在二维评价结果向坐标轴上方移动。2010年汽车产业已从C象限进入到D象限,但仍需进一步努力才能达到A象限水平,实现产业技术创新投入产出能力的提升以及转化效率的提高。需要适当扩大创新投入,并在转化过程中合理利用创新资源,提高创新投入产出能力和创新转化效率。

3　结束语

结合产业创新系统理论，建立了产业创新系统投入产出分析理论框架，基于数据包络分析和主成分分析方法建立了双轨评价模型，从创新投入产出能力和创新转化效率两个角度全面评价了产业技术创新能力。研究表明：我国汽车产业技术创新能力基础弱，发展较快，在总体投入保持不变甚至略有下降的背景下实现了创新转化效率的提升；与其他样本产业相比，汽车产业技术创新产出能力发展十分不平衡，依托国内市场潜力，保持了较高的产销量、利润率，但产业竞争力持续孱弱，突出体现在高水平专利产出能力和出口能力与其他产业差距较大；汽车产业创新系统投入规模没有达到最佳，在优化产业内部资源配置的前提下仍需增加研发投入。

针对以上分析，提升我国汽车产业技术创新能力，需从以下几方面着手：在产业创新的输入端，既要重视资金、资源的投入，也要重视知识、技术和人才的投入；加强对基础科学、核心技术研发突破的支持力度，鼓励各主体协同参与创新活动，加强系统联结机制及反馈机制；在产业创新的转化阶段，着重强化创新网络作用，构建技术交流平台，促进内部交流协作；整合创新资源，优先支持自主品牌企业开展技术引进活动；从产业创新输出角度，进一步完善专利法律法规，保护创新者，提升创新主体对高水平技术的投入；鼓励汽车企业参与国际竞争，采取一定补贴政策支持自主品牌汽车产品出口，提高汽车企业的国际知名度及竞争力。

参考文献：

[1] 李显君，庞丽，徐可. 价值转移、路径创新与企业竞争优势——基于中国汽车企业的实证分析[J]. 中国软科学，2010(1)：102-126.
Li Xian-jun, Pang Li, Xu Ke. Industrial value migration, path innovation and competitive advantage: empirical analysis based on China's automotive firms [J]. China Soft Science, 2010(1): 102-126.

[2] Malerba F. Sectoral Systems of Innovation: Concepts, Issues and Analyses of Six Major Sectors in Europe[M]. UK: Cambridge Press, 2004.

[3] Freeman C. The "National system of innovation" in historical perspective[J]. Cambridge Journal of Economics, 1995(19): 5-24.

[4] Dodgson M, Rothwell R. The Handbook of Industrial Innovation [M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Company, 1994.

[5] Park K H, Lee K. Linking the technological regime to the technological catch－up: analyzing Korea and Taiwan using the US patent data[J]. Industrial & Corporate Change, 2006, 15(4): 715-753.

[6] Chang Y C, Chen M H. Comparing approaches to systems of innovation: the knowledge perspective [J]. Technology in Society, 2004, 26: 17-37.

[7] Van Looy B, Debackere K. Policies to stimulate regional innovation capabilities via university- industry collaboration: an analysis and an assessment [J]. R&D Management, 2003, 33 (2): 2-7.

[8] Zhu J. Data envelopment analysis vs. Principal component analysis: an illustrative study of economic performance of Chinese cities[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 111(1): 50-61.

[9] 刘丝雨. 中国汽车产业创新系统绩效评价及比较研究[D]. 北京：清华大学机械工程学院，2013.
Liu Si-yu. The Performance evaluation and comparative study of sectoral systems of innovation in China auto industry[D]. Bejing: School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, 2013.