

信息与通信技术是否降低了企业能源消耗

——来自中国制造业企业调查数据的证据

张三峰, 魏下海

[摘要] 本文利用世界银行提供的中国制造业企业调查数据,考察了企业生产运营中应用信息与通信技术对企业能源消耗的影响及其机制。研究发现:控制其他条件不变,企业在生产运营中应用信息与通信技术的程度和能源强度之间存在显著且稳健的负向关系。考虑模型的内生性问题后,工具变量法回归结果表明,企业生产运营中应用信息与通信技术的程度每增加1倍的标准差,企业能源强度将降低0.23倍的标准差;面板数据固定效应回归结果还表明,企业信息与通信技术投资与其他生产机器及设备投资之比每提高1%,则企业能源强度降低5.88%。进一步的机制分析表明,企业应用信息与通信技术会通过促进企业技术、机器设备的更新和提升生产制造的柔性化,引致技术进步和结构优化,进而降低企业能源强度。中介效应模型检验发现,这两种中介效应可以分别解释企业应用信息与通信技术总节能效应的5.99%和12.32%。本文证实了企业层面“两化融合”深度化的节能效应,为“互联网+”促进中国企业节能减排提供了微观经验证据,也为中国制造业向高质量发展转型提供了政策启示。

[关键词] 信息与通信技术; 能源强度; 能源消耗

[中图分类号]F424 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2019)02-0155-19

一、问题提出

从“十一五”时期开始,中国政府开始把降低单位GDP能耗作为约束性指标,在“十三五”时期,中国政府又提出实施能耗总量和强度“双控”行动,明确要求到2020年单位GDP能耗比2015年降低15%,能源消费总量控制在50亿吨标准煤以内。与此同时,根据《中国能源统计年鉴》数据测算,2000—2016年中国工业能源消耗总量年均增长率为6.69%,同期制造业能源消耗量占中国工业部门能源消耗量的比例平均达到82.8%。因此,如何管控工业部门,尤其是制造业的能耗是“双控”行

[收稿日期] 2018-08-02

[基金项目] 国家自然科学基金青年项目“企业能力视角下价值链驱动企业自愿性环境管理及其环境绩效研究:以ISO14001认证为例”(批准号71603130);国家自然科学基金地区项目“能源偏向型技术进步与经济增长转型:理论机制及经验证据”(批准号71463022);江苏省社会科学基金重大项目“江苏制造业智能化转型升级研究”(批准号18ZD003)。

[作者简介] 张三峰,南京信息工程大学商学院副教授,南京信息工程大学江北新区发展研究院研究员,经济学博士;魏下海,华侨大学经济发展与改革研究院教授,经济学博士。通讯作者:张三峰,电子邮箱:zhangsanfeng1981@126.com。感谢第五届香樟经济学会议与会者的评论,感谢宋志刚博士、余泳泽教授、刘自敏教授、金刚博士和曹晖博士的帮助,特别感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见,当然文责自负。

动目标能否实现的关键。理论研究认为,技术进步和结构调整是工业部门重要的能源节约途径(史丹,2015,2018),采用更先进的生产技术完全能够解决工业发展中的高污染和高能耗问题(黄群慧,2014)。已有实证研究表明,技术进步对中国工业部门能源强度降低具有显著作用(Fisher-Vanden et al.,2006;王班班和齐绍洲,2014;林伯强和杜克锐,2014)。基于蒙特卡洛模拟,邵帅等(2017)认为技术进步是节能减排的必要途径,但这也需要企业更加注重节能减排技术的研发和应用及生产设备的“绿色”升级。

中国政府历来重视技术进步和结构调整对工业发展的作用,特别是为顺应“第三次工业革命”的潮流,中国政府在“中国制造 2025”中提出要通过信息化和工业化的深度融合来引领和带动整个制造业的绿色发展。2016年发布的《工业绿色发展规划(2016—2020年)》^①又进一步提出推动互联网与绿色制造融合发展,发展大规模个性化定制、网络协同制造、远程运维服务,降低生产和流通环节资源浪费,促进生产方式绿色精益化。这两份重要文件中都强调了信息与通信技术(Information and Communication Technology,ICT)对实现工业部门绿色发展的重要性。在生产运营中应用 ICT 是否降低了中国制造业企业的能源消耗,尤其是连接两者的内在机制是什么,成为值得深入探讨的问题。

从理论上讲,生产和生活中广泛应用 ICT 可以减缓能源消费持续增长的趋势,因为应用 ICT 提高了生产中投入要素的效率和非物质化(Berkhout and Hertin,2004),同时 ICT 本身蕴含的技术进步,不仅有助于消除生产过程的冗余和浪费,并且还能与企业其他的节能措施进行协同,从而提高能源利用效率(Moyer and Hughes,2012;Hilty and Aebischer,2015)。基于科学文献及对企业进行的访谈,Bunse et al.(2011)认为 ICT 产生节能效应是通过能源节约投资带来的财务成本节约或通过自动化控制生产流程来实现。在一篇综述性文献中,May et al.(2017)也认为应用 ICT 引致的生产过程自动化、基于 ICT 的生产控制及对企业生产流程与信息流的整合等,都可以减少企业能源消耗,提升能源效率。对于以上理论文献所得结论,国内外研究者进行了一系列实证研究。Romm(2002)分析了 1996—2000 年美国能源强度非预期性下降的原因,认为这主要是由于互联网在制造业、建筑业和交通运输业的应用,以及互联网向其他经济部门渗透引致的;在以东亚及 OECD 国家为研究对象的分析中,樊茂清等(2012)使用 1981—2005 年时间序列数据研究了 ICT 投资对中国 33 个产业部门能源强度的影响;Ishida(2015)采用 1980—2010 年时间序列数据,并运用自回归分布滞后模型分析了日本 ICT 投资、经济增长及能耗之间的关系;Schulte et al.(2016)基于 10 个 OECD 国家的 27 个工业行业面板数据分析了 ICT 资本对能源需求的影响。上述三项研究都发现 ICT 投资(资本)能显著减少大部分工业部门的总能源消耗。在企业层面上,Khuntia et al.(2018)对 300 家印度制造业企业 ICT 投资与能源消耗的截面数据研究表明,以运营为导向的 ICT 投资或设备可以有效降低企业能源消耗。在中国,随着应用 ICT 程度的不断加深,中国企业已经认识到通过适当使用 ICT 和 ICT 设备提高能源效率和设备利用率的重要性(Cai et al.,2013),开始在生产中应用 ICT 对企业管理流程进行重组,改进企业资源规划,协调设计和生产运营,促进生产过程成本的节约(杨德明和刘泳文,2018)。

总之,上述国内外研究者从理论及实证方面论证了 ICT 投资(资本)可以降低工业部门能源消耗的结论,并在理论上探讨了其中的影响机制。但囿于研究数据,已有文献对企业异质性因素的影响及应用 ICT 产生节能效应的机制,尚缺少深入的实证检验。

与应用 ICT 能显著降低企业能耗的观点相悖,还有一些研究者认为应用 ICT 产生的节能效果

^① 《工业绿色发展规划(2016—2020年)》(<http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757016/c5143553/content.html>)。

很有限,而且由于应用 ICT 产生的回弹效应甚至增加了能源消耗。相关文献主要采用地区或部门数据进行分析,Sadorsky(2012)运用 GMM 方法对 19 个新兴市场经济国家的面板数据进行分析后发现,以互联网用户数、个人电脑用户数和移动电话用户数衡量的 ICT 对电力消费有显著的正向影响, Kim and Heo(2014)对韩国、美国和英国的制造业进行分析后也得到同样结论。在针对中国的分析中,谢康等(2012)在对中国省际层面“两化融合”质量进行测算的基础上,检验了融合质量对地区单位产值的电力消耗和能耗的影响,结果发现,虽然融合可以减少单位地区生产总值电力消费和能源消耗,但这种影响很小,且不具有统计显著性。Zhou et al.(2018)使用三层结构分解方法和 31 部门投入产出表进行分析后发现,2002—2012 年 ICT 促使中国部门能源强度增加了 4.54%,不过,他们也发现生产中 ICT 投入产生的替代效应也在一定程度上降低了能源强度。

在将 ICT 进行细化及考虑 ICT 对不同部门能源消耗的影响后,研究者们得到了更为有趣的结论。Collard et al.(2005)将 ICT 区分为信息资本和通信资本后,对 1986—1998 年法国服务业时间序列数据进行的分析发现,总体而言,法国服务业部门的电力消耗会随计算机硬件和软件的扩散而增加,但通信设备使用范围的扩展能显著降低电力使用强度。Cho et al.(2007)采用动态 Logistic 增长模型分析了 1991—2003 年韩国工业部门 ICT 投资等因素对 11 个部门电力消耗的影响,结果发现,在电力密集型制造业部门,ICT 投资通过电力对劳动力的替代减少了电力消耗,而在服务业和大部分其他制造业中,ICT 投资却增加了电力消耗。Bernstein and Madlener(2010)对 8 个欧盟国家的 5 个制造行业 1991—2005 年面板数据进行的研究也发现,ICT 只是在造纸业等三个能源密集型行业提升了能源效率,对食品制造业和纺织业能源效率的影响不显著。这些文献也启示后续研究应重视行业异质性的影响。

通过以上文献可以看出,虽然国内外研究者对 ICT 的节能效应进行了较多分析,但已有文献也存在一定不足:一是研究样本的限制。据本文所知,除 Fisher-Vanden et al.(2006)和 Khuntia et al.(2018)的研究,基于大样本微观企业数据对应用 ICT 产生的节能效应进行实证检验的研究较为匮乏,进而未能深入分析企业异质性因素所起的影响。二是对 ICT 降低能耗的影响机制缺少深入分析和检验。既有文献在技术进步能降低能源消耗方面取得了共识,但尚未在企业层面考察由于应用 ICT 带来的技术进步和结构优化对企业能耗的影响。三是实证模型中内生性问题的处理尚存不足。既有研究集中剖析了 ICT 与能源消耗或强度下降的关联,但忽略了对两者因果关系的探究。四是研究对象多集中在发达国家的工业部门,使研究者无法洞察中国企业应用 ICT 产生的节能效果。有鉴于此,本文使用世界银行提供的 2001 年和 2012 年中国制造业企业层面调查数据,考察在企业生产运营中应用 ICT 程度的提高是否降低了企业能源强度,并进一步分析生产中应用 ICT 影响企业能源强度的机制。

与已有文献相比,本文的边际贡献在于:①本文采用 1998—2000 年和 2012 年中国制造业企业层面数据,首次提供了在生产运营中提升应用 ICT 的程度可以减少企业能耗的微观证据,拓展了应用 ICT 对构建绿色制造体系影响研究的视域,为促进中国工业企业节能提供了新视角。②本文使用世界银行(2007)所构造的 2005 年城市 IT 指数作为 2012 年企业应用 ICT 的工具变量,尽可能地缓解了联立性偏误造成的内生性问题;同时采用基于 1998—2000 年面板数据的固定效应模型进一步缓解遗漏变量造成的内生性问题,从而探求了企业应用 ICT 与能源强度的因果关系,弥补了已有文献的不足。③本文厘清了生产运营中应用 ICT 对企业能源强度产生影响的机制,即应用 ICT 引致的技术进步效应和结构优化效应,将分别以促进企业技术及机器设备的更新和提升生产制造的柔性化两个具体渠道实现,并运用中介效应模型进行了验证。

二、内在机制分析与研究假说

作为一种通用技术(General Purpose Technology),本文认为 ICT 本身不仅具备技术进步的属性,而且在与其它生产技术存在互补性条件下将其引入企业生产运营中,会引发生产范式改进,促使业务流程再造,推动生产部门结构优化。

1. 通过企业应用 ICT 引致的技术进步降低能源强度

在生产运营中应用 ICT 可能在两个方面推动制造业企业的技术进步:一方面,ICT 作为一种生产要素投入生产运营中,可以发挥其本身蕴含的技术进步作用。当前,以信息技术为基础,以智能、绿色和低碳为特征的工业制造体系是技术创新的重要载体(史丹,2018)。金碚(2014)也认为应用 ICT 可以更高水平地实现工业设备的数控化和生产工艺及流程的科学化。Hilty and Aebischer (2015)发现作为较为先进的生产方式,ICT 不仅直接提高了企业生产能力,而且还通过提升产品和工艺的能源利用效率,降低单位产品的能源消耗。因此,将 ICT 的应用引入到生产制造环节中,会在短期内促进企业生产技术进步或要素使用方式的改变,从而降低企业的能源消耗。另一方面,ICT 与其他生产要素产生互补性,带动企业生产技术进步。熊彼特的创新理论认为生产要素的重新组合也是创新,如把一种从未有过的有关生产要素和生产条件的新组合引入生产系统(韩先锋等,2014),具体到制造业企业而言,将具有技术进步特征的 ICT 与其他生产要素进行融合,可以更为直接地促进企业生产要素的优化配置,推动企业生产范式的变革;同时企业将 ICT 嵌入生产运营中,还会在短期内促使企业在配套设备、基础设施乃至企业的组织结构上进行相应的调整,从而推动企业技术进步。

伴随着 ICT 与生产制造技术融合程度的加深,不仅依靠 ICT 本身蕴含的技术进步降低了能源消耗,而且应用 ICT 还通过技术外溢效应间接地促进了使用 ICT 部门的技术进步(樊茂清等,2012)。已有研究也发现,应用 ICT 可以在生产上实现过程自动化,这不仅消除了生产过程的冗余和浪费(Longo and York,2015),而且也是改变制造过程能耗模式的主要途径之一(May et al.,2017)。其实,将 ICT 嵌入企业生产过程时,不仅会提升生产的自动化水平,还有助于企业发现自身经营存在哪些对成本控制不利的环节,从而实现成本降低(杨德明和刘泳文,2018)。这在中国制造业企业的实践中也能得到印证,宝马公司在沈阳的铁西工厂通过将智能技术和工业电脑控制技术应用到汽车的制造环节,仅在涂装环节就实现节能 40%的目标(王政,2012)。

2. 通过企业应用 ICT 引致的结构优化降低能源强度

在生产运营中广泛应用 ICT 还将引致企业生产结构优化,这也契合了“生产技术进步是推动生产部门结构优化的根本动力”(韩先锋等,2014)的观点。由于 ICT 具备技术进步的属性,生产运营中应用 ICT 就会促使企业生产资源和要素进行重新配置,优化企业内部的生产体系和组织结构,进而显著提升资源配置效率。从产品的制造过程看,ICT 已经从单纯的生产加工环节应用延伸到产品整个生命周期(黄群慧,2014);从企业运营的层次看,ICT 也已从制造装备单元渗透到包括产、供、销及上下游供应链在内的整个生产制造系统(May et al.,2017)。当前,ICT 与制造业的深度融合,促使企业生产朝向网络化、小微化和平台化发展,通过形成工业物联网,实现工业产品的智能化和柔性化生产(金碚,2014;史丹,2018)。那么,在依托于 ICT 的柔性化生产体系中,ICT 的应用将重构生产运作过程,优化生产流程,促进企业生产部门的结构优化,从而提高能源效率和减少排放强度(Higón et al.,2017)。

在生产运营中应用 ICT 还有助于企业在组织的活动和流程中采用精益管理原则(Khuntia et

al., 2018), 通过精益管理使企业能根据生产过程中数据的采集与反馈, 实时安排生产计划, 优化库存, 使企业内部“人财物”与外部客户需求协同, 从而通过最大化内部流程的效率来减少总能耗。Rizzoli et al. (2015) 也认为通过应用 ICT 实现对物料投放、产品生产及销售的“精细化”管理, 不仅能敏捷地控制生产流程, 还能实时监控各环节能源消耗情况, 从而使生产设备平稳高效运行, 能源与其他生产要素合理配置。例如, 当企业的制造执行系统(MES)与 ERP 系统整合了企业的全部资源规划和业务流程时, 生产经理就可以更好地了解能源资源在流程中的使用情况。这不但优化了生产部门的结构, 还为管理者提供了在短期内如何优化生产流程来降低能源消耗的信息。此外, 应用 ICT 带来的结构优化还能提高企业产品和服务的效率与质量, 减少单位产品的生产成本(王永进等, 2017), Cai et al. (2013) 对 82 家中国企业所做的实证分析也表明, 应用 ICT 能有效缩短产品开发周期, 还能减少返工和产品报废率, 从而实现了在生产制造中节约能源。

综合以上分析, 本文认为, 企业应用 ICT 程度的提高通过 ICT 及其引致的技术进步和结构优化, 实现降低企业能源消耗的目标。从本质上看, 结构优化效应归根结底也是由应用 ICT 带来的技术进步促成, 因此, 这两种效应会相辅相成地降低企业能耗。但从两种效应的具体表现形式看, 技术进步效应可能更多体现为 ICT 本身在生产制造中所具备的“绿色化”技术特性(May et al., 2017), 以及伴随 ICT 的渗透和扩散, 对企业现有生产技术和机器设备的性能升级。结构优化效应则通过技术手段优化生产流程, 将 ICT 与生产制造流程相融, 促使企业实施更先进的生产管理模式和对现有生产模块进行有效的优化重组, 进而提升企业生产运营的柔性, 同时结构优化反过来又满足企业在技术和生产范式上创新的需求, 最终两种效应协同起来促使企业能源消耗减少。

根据以上分析, 本文提出:

假说 1: 其他条件不变, 企业在生产运营中应用 ICT 程度的提高, 会降低企业能源强度。

假说 2: 在企业生产运营中, 应用 ICT 程度的提高将引致技术进步和结构优化, 并分别通过促进企业生产技术及机器设备的更新和提升企业生产制造的柔性这两种具体的途径, 实现企业能源强度的降低。

三、研究设计

1. 数据来源

本文使用的数据来源于世界银行 2001 年和 2012 年在中国进行的企业调查。两轮调查均采用分层随机抽样方法, 分别对中国 5 个和 25 个城市^①的制造业、服务业和 IT 产业进行数据采集, 样本企业分别为 1548 家和 2848 家企业。调查问卷的内容主要涉及企业基本情况、创新与科技、融资, 以及企业的各项财务指标和雇佣状况等信息。在 2001 年的调查中, 还对销售收入等问题追问了过去 3 年的情况, 从而可以构建企业层面的面板数据。与中国工业企业数据库相比, 本文使用的企业调查数据具有自身独特优势, 因为在世界银行的这两轮调查中都有关于企业燃料和电力消耗的数据, 而且还对企业应用 ICT 情况及 ICT 投资情况进行了详细的询问。本文中城市和省际数据则分别来自相应年份的《中国城市统计年鉴》和《中国统计年鉴》。

2. 变量选取及描述性统计^②

(1) 被解释变量是企业能源强度(EE)。在调查问卷中, 有关于企业 2011 年在燃料和电力两个

① 2012 年的 25 个城市是合肥、北京、广州、深圳、佛山、东莞、石家庄、唐山、郑州、洛阳、武汉、南京、无锡、苏州、南通、沈阳、大连、济南、青岛、烟台、上海、成都、杭州、宁波和温州。

② 限于篇幅, 这里没有报告变量的描述性统计与典型事实分析, 感兴趣的读者可在《中国工业经济》网站(<http://www.ciejjournal.org>)公开附件下载。

方面的成本支出。据此,对于企业能源强度变量,借鉴 Bloom et al.(2010)对企业能源强度的度量方法,本文采用这两项成本加总后占企业销售收入的百分比进行衡量,即 $EE = ((\text{燃料成本} + \text{电力成本}) / \text{销售收入}) \times 100$ 。

(2)核心解释变量是企业信息与通信技术在生产运营方面的应用程度(*ICT*)。根据2012年问卷中关于信息与通信技术在企业生产和运营活动中的应用程度问题构建,与其他有关企业应用ICT的问题相比^①,本文认为,这个问题主要是针对ICT在企业生产运营过程中的应用程度设立,能够比较真实和客观地测度ICT在企业生产运营中应用状况和程度。企业回答这个问题的选项分别为“从不使用”、“很少使用”、“有时使用”、“经常使用”和“一直使用”,本文将这些选项依次赋值为1、2、3、4、5,数值越大意味着ICT在企业生产运营中应用程度越高。张龙鹏和周立群(2016)在分析“两化融合”的创新效应时也采用了这种度量方式。在运用1998—2000年面板数据进行的回归中,本文采用企业在ICT上的投资额与在生产用机器设备上的投资额之比来度量企业应用ICT程度。此外,本文还将回答为“从不使用”、“很少使用”和“有时使用”的赋值为0,回答为“经常使用”和“一直使用”的赋值为1,进一步检验应用ICT与否产生的节能效应。

(3)其他可能影响企业能源强度的控制变量:①企业成立年限(*age*),一般而言,成立年限较长的企业与新成立的企业在管理和生产中存在着系统性的差异,从而对企业能耗产生影响。本文采用截至2011年底受调查企业成立年数的自然对数进行度量。②企业总产出(*output*),已有研究表明总产出会产生正负两方面的效应,正的效应是企业产出规模的扩大需要企业投入更多的能源要素,负的效应是生产规模扩大带来的规模经济效应可能减少能源消耗并降低能源强度。本文采用2011年销售收入的自然对数进行度量。③人均资本存量(*capital*),资本存量对企业能耗也会产生正负两方面的影响,正的影响是企业人均资本密集度是影响企业生产效率的重要因素,会促进生产率的提升,由此引致的产出增加会消耗更多能源;负的影响是企业人均资本密度高也意味着企业生产会更多地依靠较为先进的机器设备,这又可能会降低企业能源消耗。本文采用截至2011年底企业的固定资产净值与正式员工数之比并取自然对数进行度量。④规模(*size*),本文采用2011年企业正式员工数的自然对数度量。这是因为规模经济的存在会影响企业能耗及效率。⑤国外技术授权(*lic*),一般来说,企业采用国外授权的先进生产技术将更有可能提升能源效率,降低企业能源强度。调查问卷中,有关于当前企业是否使用了除办公软件之外的外国公司技术授权问题,如回答“是”本文赋值为1,否则赋值为0。⑥企业研发(*rd*),采用过去3年企业内部是否有研发活动度量,如回答“是”本文赋值为1,否则赋值为0。这是因为企业内部创新行为,无论是管理方面的创新还是产品、生产流程的创新,都会提升企业内部知识存量,最终可能会对企业能耗产生影响。⑦非国有股份所占比例(*private*),一般而言,私营企业更可能采取措施来降低生产经营中的成本,从而可能对企业能耗产生影响。本文采用问卷中企业非国有股股东持股比例进行度量。⑧环境规制变量(*er*),本文采用中央政府公布的各省份在2011年万元GDP能耗降低率度量^②。这种度量方式的好处在于中央政府在制定节能减排目标时已经综合考虑到了各地区发展状况及环境现状等问题,从而使确定的节能目标指标在地区之间具有可比性,另外降低单位GDP能耗的目标是中央政府对地方政府的一个硬性考核要求,这有助于避免地方政府在执行环境规制政策中的扭曲问题,并且保证了环境规制政策的相对

① 在2012年世界银行中国企业调查问卷中,关于企业信息与通信技术应用的问题还包括企业网络进行销售占总销售的比例、企业是否采用ERP或其他管理软件等问题。

② 中华人民共和国国家发展和改革委员会公告(2012年第51号)(http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbgg/201212/t20121225_520027.html)。

外生性(卜茂亮等,2017)。^⑨能源与燃料价格(*price*),借鉴林伯强和杜克锐(2013)的度量方式,本文采用各地区原材料、燃料和动力购进价格指数(上年为100)度量。

此外,本文还在模型中控制了企业所在省份的虚拟变量(*dumprovince*,以北京市为参照组)和所属行业的虚拟变量(*dumind*,以食品加工业为参照组)。前者用以捕捉一些不可观测的地区因素(如地理区位或地方特定经济政策等的影响),后者可以控制行业特定因素。

3. 模型建立

借鉴已有关于企业能源消耗的研究文献(Bloom et al.,2010),本文建立如下回归方程:

$$EE_{jic} = \alpha + \beta ICT_{jic} + X'_{jic} \gamma + \mu_{jic} \quad (1)$$

其中, EE_{jic} 表示*c*城市、*i*行业中*j*企业的能源强度,为进一步分析ICT是否降低了能源消耗量,本文在稳健性检验中也对企业能源消耗量进行了检验。 ICT_{jic} 表示ICT在企业生产运营中的应用程度。 X'_{jic} 表示模型中其他影响企业能源强度的控制变量, μ_{jic} 是随机误差项。本文将标准误差聚类在企业4位代码的产品层面上纠正异方差,因为不同的企业生产相同代码的产品时,其采用的生产技术应该是相同或近似的,那么在这一层面聚类就有助于解决随机扰动项之间存在的相关性问题。在模型(1)中, β 是本文最为关心的系数,如果 β 在统计上显著为负,则说明企业在生产运营中提高ICT的应用程度,将有助于降低企业能源强度。

四、实证结果与分析

1. 企业应用ICT程度与能源强度的关系:基准回归结果

基准回归结果^①呈现在表1中。第(1)列是企业在生产运营中是否应用ICT与企业能源强度之间关系的检验结果。结果表明,在其他条件不变情况下,相对于未应用ICT的企业,在生产运营中应用ICT会显著降低企业能源强度。

对生产运营中应用ICT程度与企业能源强度关系的检验呈现在表1的第(2)—(4)列。从第(2)、(3)列可以看出,无论是否控制省份和行业虚拟变量,企业ICT应用程度与企业能源强度都存在负相关关系,并在1%水平上显著。本文的研究假说1得以基本证实。本文的基准回归结果与樊茂清等(2012)采用行业层面数据所得结论一致。企业应用ICT程度的提高之所以可以降低能源强度,提升能源效率,可能的解释是作为一种新生产要素,ICT的投入会通过其自身蕴含的技术提升企业生产率,同时通过ICT在生产流程中的扩散和渗透,企业生产工艺或技术水平也能得到提升,这些先进的生产工艺或技术一般来说又都是能源节约型,最终就表现为生产运营中应用ICT程度提高,企业能源强度下降。例如,在Fisher-Vanden(2003)对75家中国钢铁企业所进行的分析中,就发现通过采用基于ICT自动控制等技术的连续铸造法,这些钢铁企业实现了铸造设备的更新和生产的自动化,这一自动化的生产技术带来了非常大的能源节约,据他们估计,连续铸造法比传统铸锭技术节约了70%的能耗。金碚(2014)也认为通过信息化可以促进工业生产更快地提高生产效率,增强产品精致化和实现生产绿色化。那么,本文的这一结论意味着将ICT渗透和融合到生产运营中,既提升了企业生产运营信息化程度,又能产生技术进步效应,从而促进企业向低能源消耗的生产方式转变。

^① 为了进一步缓解由于变量度量而造成的异方差问题,本文对企业能源强度变量进行了1%分位数以下和99%分位数以上缩尾(Winsorize)处理。对回归模型进行的方差膨胀因子(VIF)检验显示,本文的核心解释变量及所有控制变量的VIF都小于多重共线临界标准(10)。

由于企业能源强度变量存在删截特征,本文还采用 Tobit 模型进行回归,结果汇报在表 1 第(4)列。结果表明,替换回归方法后,所得结论与使用 OLS 回归结果相一致,企业应用 ICT 程度变量与能源强度显著负相关,再次表明在生产过程中提高 ICT 的应用广度和深度,可能是企业提升能源效率的有效途径。

表 1 企业应用 ICT 程度对能源强度影响的基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	OLS	OLS	OLS	Tobit
ICT_{t-1}	-1.2557*** (0.3269)			
ICT		-0.5307*** (0.1176)	-0.5219*** (0.1362)	-0.5219*** (0.1340)
控制变量	是	是	是	是
行业	是	否	是	是
省市	是	否	是	是
N	1195	1195	1195	1195
Adj-R ²	0.2652	0.2374	0.2680	

注:括号里为在企业四位代码产品层面的聚类标准误;*、**、*** 分别表示在 10%、5%和 1%水平上显著;控制变量包括企业成立年限、总产出、规模、人均资本存量、国外技术授权、企业研发、非国有股份占比、环境规制和能源价格等;限于篇幅,略去常数项。下同。

2. 内生性问题处理

本文中的模型(1)可能存在内生性问题:一是一些不可观测的生产经营问题可能同时影响企业应用 ICT 程度和能源强度,存在遗漏变量问题;二是生产中能源强度较小的企业往往可能就是技术先进的企业,这样的企业在生产经营中应用 ICT 程度往往也较高,因而存在联立性偏误。

本文先尝试运用工具变量方法缓解其中的内生性问题。具体而言,采用 2005 年世界银行在中国 120 个城市^①进行的“营商环境”调查数据构建 IT 指数($ictindex$)作为 2012 年企业应用 ICT 的工具变量。采用 2005 年城市层面的 IT 指数作为工具变量基于如下三点考虑:一是满足工具变量的“相关性”条件。企业在生产运营中采用的技术往往与该城市同行业企业生产技术有一定的渊源,那么 2005 年的城市—企业层面 IT 指数不仅反映了过去该城市企业 ICT 的应用状况,而且也会影响 2012 年所在城市企业生产运营使用 ICT 的状况。二是符合工具变量“外生性”假设要求。因为 2005 年的城市—企业层面 IT 指数对于 2012 年企业的能源强度影响程度较小。三是基于数据的可获取性。截至目前,世界银行在中国进行过 4 轮企业层面调查,分别是 2001 年(5 个城市)、2003 年(18 个城市)、2005 年(120 个城市)和 2012 年(25 个城市),但 2001 年及 2003 年两轮调查的城市分别为 5 个和 18 个,难以与 2012 年的调查进行匹配。更重要的是在 4 轮调查中,仅在 2005 年的调查问卷中同时包含有企业接受正规 IT 培训的劳动力比例和企业经常使用计算机工作的员工比例问题。因此,按照世界银行(2007)的方法将这两项不同的指标在城市—企业层面进行加总,然后计算加总后的地区平均值,进而得到城市—企业层面的 IT 指数。

^① 世界银行 2012 年调查的 25 个城市都包含在 2005 年所调查的 120 个城市中。

需要说明的是,在“恰好识别”的情况下,很难从统计上验证工具变量的外生性假设是否得到满足^①。本文借鉴方颖和赵扬(2011)的思路,将企业能源强度同时回归于企业应用 ICT 程度和工具变量。如果工具变量仅通过企业应用 ICT 程度间接影响企业能源强度,那么在上述回归方程中,控制企业应用 ICT 程度的情况下,工具变量应该对企业能源强度影响不显著。验证工具变量“外生性”的回归结果,结果显示本文的工具变量城市—企业层面 IT 指数不显著,企业应用 ICT 程度变量显著为负。同时,当企业能源强度与企业应用 ICT 程度、城市—企业层面 IT 指数分别进行回归时,两者都很显著。这说明本文的工具变量并不直接影响企业能源强度,而仅仅通过企业应用 ICT 程度影响企业能源强度。

但是有研究者认为上述逐步检验的方式不够稳健(林建浩和赵子乐,2017),在放松了工具变量的外生性条件下,Conley et al.(2012)认为工具变量可以是近似外生的。本文进一步采用 Conley et al.(2012)提出的近似零方法(LTZ)进行检验,回归结果再次表明,在近似外生的情况下,企业应用 ICT 程度变量依然显著为负。这再次表明本文所选工具变量满足了外生性假设。

本文采用两阶段最小二乘方法对模型(1)进行估计。结果汇报在表 2 中,第(1)列中的一阶段回归结果表明本文选择工具变量与内生变量显著正相关,满足相关性假设;第(2)列中的二阶段回归结果则显示企业应用 ICT 程度变量的系数符号为负,并且在 5%水平上显著,这与基准回归结果一致。研究假说 1 再次得以证实。

本文认为,企业提高应用 ICT 的程度,可以在三个方面发挥降低企业能源强度的作用:①在生产运营中广泛应用 ICT 需要对已有的生产设备进行维护或替换,更新替代过时管理技术,从而提升了企业的生产技术;②ICT 融入到生产中,将通过流程再造或精简完善生产过程,进而优化生产流程和要素配置;③企业提高应用 ICT 程度带来的技术进步,及对生产流程和要素配置的优化,不仅实现对原材料的投入和产品的生产进行精确控制,而且还实现最小化产品废品率或最大化原材料产出率,从而在提升企业生产率的同时,降低企业能源强度。本文的结论与谢康等(2012)采用中国省级层面数据所得结论并不完全一致,他们的研究虽然发现工业化与信息化融合可以降低单位 GDP 电力消费和能源消耗,但影响力较小,且不显著。而本文的回归结果则表明,控制其他条件不变,企业应用 ICT 程度每增加 1 倍的标准差(1.42),则企业能源强度将显著降低 0.23 倍的标准差^②。如果考虑到中国工业部门能源消耗强度超出世界平均水平的 40%(魏楚和郑新业,2017),尤其考虑到 2011 年中国制造业部门巨大的能源消费量^③,那么,这个显著下降水平对中国工业总能源消耗下降的贡献就不容忽视。总之,本文的回归结果意味着在工业企业中推进“两化融合”,将产生巨大的节能效应,有助于实现企业经济绩效与环境绩效的“双赢”。

此外,本文利用 Kleibergen and Paap(2006)的 LM 统计量进行不可识别检验,结果在 1%水平上拒绝了“工具变量不可识别”的原假设;同时,根据 Kleibergen and Paap(2006)的 Wald F 统计量和 Cragg-Donald Wald F 统计量进行的弱工具变量检验也表明,在只有一个内生变量的情况下,这两个统计量的值均大于 Stock and Yogo(2005)提供的 10%水平上的临界值,因此,可以强烈拒绝工具变量是弱的原假设。本文继续利用 Anderson-Rubin 的 Wald 检验,结果再次在 5%水平拒绝了“内生回归系数之和等于 0”的原假设,这更进一步说明本文选择的工具变量与内生变量之间存在

① 工具变量外生性检验的结果可在《中国工业经济》网站(<http://www.ciejournal.org>)公开附件下载。

② 计算方法为 $(\hat{\sigma}_{ICT}/\hat{\sigma}_{EE}) \times \hat{\beta}$ 。

③ 根据《中国统计年鉴》(2012)数据测算,2010 年中国制造业部门消耗能源约为 1.88 亿吨标准煤,占当年能源消费总量的 58%。

较强的相关性。通过表 2 中汇报的三种检验,本文可以有信心地推断本文所采用的工具变量是合适的。

表 2 企业应用 ICT 程度与能源强度关系的工具变量回归结果

	(1)	(2)
	一阶段回归	二阶段回归
<i>ICT</i>		-1.0863** (0.4945)
<i>ictindex</i>	3.3875*** (0.4484)	
控制变量	是	是
行业	是	是
省份	是	是
N	1195	1195
不可识别检验		
Kleibergen-Paap rk LM 统计量	17.406***	
弱工具变量检验		
Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量	49.048***	
Cragg-Donald Wald F 统计量	60.239*** [16.38]	
稳健弱识别检验		
Anderson-Rubin Wald 检验	5.2900**	
Adj-R ²		0.2539

注:小括号里为在企业四位代码产品层面的聚类标准误;*、**、*** 分别表示在 10%、5%和 1%水平上显著;中括号里是 Stock-Yogo 检验在 10%水平上的临界值;控制变量与表 1 中的相同,限于篇幅,略去常数项。

对于遗漏变量造成的内生性问题,本文运用基于面板数据的固定效应模型予以缓解。具体而言,采用 2001 年世界银行在中国 5 个城市(北京、成都、广州、上海和天津)对 1548 家企业进行的调查数据进行检验。在 2001 年的调查中,调查员详细询问了受访企业在 1998—2000 年有关 ICT(不包括办公设备)投资、企业销售收入、出口、能源消耗、雇佣人数及 R&D 等方面的情况,据此本文根据这些指标建立一个 3 年期非平衡面板数据。

在具体的固定效应回归中,本文以企业每年在 ICT 方面的投资额与企业生产用机器设备的投资额之比(*IVICT*)度量企业 ICT 应用程度。一般而言,如果企业在 ICT 方面的投资额与企业生产用机器设备投资额之间的比值越大,那么,这在一定程度上意味着企业生产中应用 ICT 的程度将越高。本文构建的回归模型如下:

$$EE_{jict} = \alpha + \beta IVICT_{jict} + X'_{jict} \kappa + city_c + year_t + \zeta_{jict} \quad (2)$$

其中, EE_{jict} 表示 c 城市、 i 行业中 j 企业第 t 年的能源强度,其度量方式与回归模型(1)能源强度测度方式相同。 X'_{jict} 表示一系列控制变量,包括企业成立年限(*age*)、规模(*size*)、总产出(*output*)、产能利用率(*capacity*)、企业是否出口(*export*)和是否有 R&D 支出(*rd*)。企业成立年限、规模和总产出三个变量的度量方式与模型(1)相同,企业产能利用率变量采用问卷中关于企业的产能利用率问题度量;对于出口变量,如果企业产品出口额不等于 0,本文将其重新赋值为 1,否则赋值为 0;R&D 变

量也采用类似的度量方式。在模型(2)中,还控制了企业所在城市的虚拟变量(*city*)和年份虚拟变量(*year*),以缓解不可观测的不同城市的能源或环境政策,及随时间而变化的宏观经济环境对企业能源强度的影响。 ζ_{ict} 表示随机误差项。

回归结果呈现在表3中,第(1)、(2)列结果表明,其他条件不变情况下,企业在ICT方面的投资与其他生产机器设备投资之比越高,则企业能源消耗越会显著降低。并且企业ICT投资与其他生产机器设备投资之比每提高1%,则企业能源强度和能源消耗量将分别降低5.88%和0.30%。考虑到1998—2000年这段时期,ICT在制造业的应用及扩散尚处于开始阶段,那么这一回归结果意味着即使在ICT扩散的初始阶段,如果将ICT应用于生产制造中,伴随着ICT在生产制造中应用程度的提高,企业单位能源消耗将显著下降。在表3第(3)列中,本文采用企业能源消耗与企业原料等中间投入品和劳动力成本之比度量企业能源强度(Bloom et al.,2010),结果发现虽然企业应用ICT程度的提高对企业能源强度的影响较小,但依然在5%水平上显著为负。

总之,通过对模型中联立性偏误和遗漏变量问题的处理,本文的回归结果都表明,企业应用ICT程度的提高对降低企业能源强度和能源消耗都有显著影响。

表3 企业应用ICT程度与能源强度关系的行业固定效应回归结果

	(1)	(2)	(3)
	能源强度	能源消耗量	替换因变量
<i>IVICT</i>	-0.0588* (0.0289)	-0.0030*** (0.0008)	-0.0001** (0.0000)
控制变量	是	是	是
城市	是	是	是
年份	是	是	是
N	926	952	948
Adj-R ²	0.0858	0.0593	0.0301

注:括号里为在企业所属行业层面的聚类标准误;*、**、***分别表示在10%、5%和1%水平上显著;控制变量包括企业成立年限、总产出、规模、人均资本存量、产能利用率、企业研发和出口等,限于篇幅,略去常数项。下同。

3. 稳健性检验

(1)采用能源要素投入成本除以企业原材料及劳动力两项成本之和来衡量企业能源强度。这种度量方式的好处是可以消除具有竞争优势或垄断地位的企业通过控制产品价格,从而降低能源投入要素成本所占比例问题(Bloom et al.,2010)。回归结果汇报在表4的第(1)列,结果显示在其他条件不变情况下,企业生产运营中应用ICT程度变量与能源强度负相关,并在1%水平上显著,这也说明无论企业是否在市场中具有垄断地位,提高企业生产运营中应用ICT的程度,都有助于降低企业能源强度。本文的假说1再次得到验证。

(2)采用全要素能源效率替换能源强度。在基准回归中,本文采用企业能源成本除以销售收入测量能源强度是单要素分析法,这种测量方式的缺点是忽视了劳动、资本两种投入要素的贡献。结合使用的数据,本文采用OLS方法对企业全要素能源效率进行测算。具体而言,将企业销售收入作为产出(*Y*),同时以企业固定资产净值、企业雇佣的正式员工人数和企业能源投入成本作为资本(*K*)、劳动(*L*)和能源(*E*)三种生产要素。本文假设企业生产函数形式为Cobb-Douglas生产函数形式:

$$Y_j = A_j K_j^\alpha L_j^\beta E_j^\gamma \quad (3)$$

对(3)式取自然对数可以将其转化为线性形式: $y_j = \alpha k_j + \beta l_j + \gamma e_j + v_j$ (小写字母表示取自然对数),对这个线性方程进行估计,通过计算残差可测得企业的全要素能源效率。然后将测得的全要素能源效率作为回归模型(1)的被解释变量,对模型(1)进行回归。结果汇报在表4第(2)列。结果显示企业应用ICT程度变量与企业全要素能源效率正相关,并在1%水平上显著。这也许意味着企业在生产中广泛应用ICT会促使资本、劳动和能源三要素在生产中更加协调,优化了生产要素的配置,从而提升企业全要素能源效率。

(3)考虑能源消耗总量。上文的能源强度度量了企业单位产出的能源消耗情况,那么在应用ICT程度提高时是否也同时降低了能源消耗总量。为此,本文进一步将企业2011年在燃料和电力两个方面的成本支出加总,然后取自然对数作为企业能源消耗的度量^①。回归结果呈现在表4的第(3)列。结果发现,企业提高应用ICT的程度不仅会降低单位产出能源消耗,而且还降低了企业生产中能源消耗总量。由于企业在生产运营中应用ICT更可能是以耗费电力为主,本文还将燃料排除后,单独采用电力成本支出的自然对数度量企业能源消耗。结果汇报在表4的第(4)列,结果再次发现生产运营中应用ICT程度变量与电力消耗也存在显著负相关关系。

(4)替换核心解释变量。从广义上看,企业应用ICT的程度还可以体现在企业原料采购、生产、配送及售后服务等多个环节中采用ICT。因为通过ICT可以对产、供、销的全过程以及企业所有资源进行协调,使企业能够实施更先进的流程,实现“实时响应”的供应和需求综合管理流程(Khuntia et al., 2018)。也就是说,应用ICT的深化可以在整个供应链上优化企业资源,帮助企业进行精细化管理,在企业内部形成结构优化效应,促进企业能源强度降低。在调查问卷中,有关于企业资源计划(ERP)系统、供应链管理(SCM)系统和客户关系管理(CRM)系统这些信息管理系统软件(Software)是否被应用的问题,据此,如果企业对该问题回答“是”则赋值为1,否则赋值为0。并将其作为核心解释变量,然后对模型(1)回归,结果呈报在表4第(5)列,结果发现企业是否采用管理软件变量系数显著为负,表1中基准回归结果再次被证实。这也说明企业在经营管理中采用ERP等企业资源及供应链管理系统,将通过在生产运营的诸多环节进行优化,实现生产过程节能。这与Ollo-López and Aramendía-Muneta(2012)使用2009年英法德等欧洲6国企业层面数据所得结论相似,他们就发现在企业中应用ERP与SCM软件、RFID技术显著降低了企业能源强度,但他们也发现应用CRM反而恶化了能源效率。

(5)考虑企业规模的影响。不同规模的企业生产中能源需求各异,伴随企业规模的增大,规模经济会降低企业能源强度(Bloom et al., 2010)。本文依据世界银行对调查企业的界定^②,将雇佣人数小于100人的企业界定为中小型企业,否则界定为大型企业。然后再分别进行回归,结果汇报在表5第(1)、(2)列。结果表明,企业生产运营过程中应用ICT的程度与企业能源强度显著负相关,这与表1中基准回归结果及先前的稳健性检验结果一致。同时,本文还发现对大型企业而言,企业应用ICT的回归系数的绝对值大于中小型企业的回归系数的绝对值,这表明规模较大的企业应用ICT会产生更大的节能效应。

① 本文稳健性检验中的不同方式度量的被解释变量与基准回归中的被解释变量存在显著相关性,检验结果可向作者索取。

② 世界银行对企业规模定义分为3类:小微企业(雇佣5—9人)、中型企业(雇佣20—99人)和大型企业(雇佣超过100人)。

表 4 替换变量度量方式的稳健性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	替换因变量	全要素能源效率	能源消耗总量	电力消耗量	替换自变量
<i>ICT</i>	-0.0268*** (0.0065)	0.0279*** (0.0060)	-0.1054*** (0.0226)	-0.1035*** (0.0209)	
<i>software</i>					-0.6612* (0.3511)
控制变量	是	是	是	是	是
行业	是	是	是	是	是
省份	是	是	是	是	是
N	1180	1216	1216	1287	1202
Adj-R ²	0.2501	0.9064	0.6033	0.5770	0.2525

(6)考虑企业成立年限的影响。一般而言,成立年限短或者进行过技术改造的企业,在生产及管理上更高效。例如,成立年限较短的企业倾向于采用较先进的机器设备和技术进行生产,而先进的设备和技术一般来说又是能源节约型的。当然,成立年限较长的企业在生产管理中相关的制度相对完善,并且对能源节约的管理意识也可能较高,这或许能降低企业能源强度。本文根据企业成立年限的平均值(样本企业的平均成立年限为 12.07)将样本企业区分为两组,如果企业成立年限低于成立年限的均值,本文将其界定为处于成长期企业,反之界定为成熟期企业,然后分别进行回归,结果汇报在表 5 第(3)、(4)列。回归结果表明,两组企业中企业应用 ICT 程度与企业能源强度都呈显著负相关关系。前文表 1 中的基准回归结果再次得到印证。

表 5 区分企业规模与成立年限的稳健性检验

	(1) 中小型	(2) 大型	(3) 成长期	(4) 成熟期
<i>ICT</i>	-0.4568** (0.1745)	-0.6298*** (0.1876)	-0.5552*** (0.1908)	-0.5036** (0.2021)
控制变量	是	是	是	是
行业	是	是	是	是
省份	是	是	是	是
N	645	550	773	422
Adj-R ²	0.2508	0.2825	0.2777	0.2490

4. 行业异质性分析

已有研究发现,在不同的行业中,企业应用 ICT 的程度和能源强度都表现出了明显的差异。为此,本文进行如下行业异质性分析。

从企业资本密集程度看,不同行业在生产过程中使用的资本密集程度具有差异性,例如,为保障产品的品质,在精密仪器仪表及装备制造行业的生产过程中会更多的采用自动化设备进行生产,

而在劳动密集型行业中,企业可能倾向于采用劳动代替资本进行生产。为此,本文参照戴觅等(2014)的分类方法,将样本企业分为资本密集型、劳动密集型和中间行业三个类别,并将中间行业作为参照组。然后,将企业应用 ICT 程度变量与资本密集型、劳动密集型两个虚拟变量进行交互($ICT \times capital$ 、 $ICT \times labor$)。结果汇报在表 6 中第(1)列。结果表明,其他条件不变情况下,企业应用 ICT 程度变量的系数在 5%水平上显著为负。同时,本文还发现,相对于中间行业,应用 ICT 程度变量与资本密集型行业、劳动密集型行业的交互项的系数一负一正,但都不显著。这表明相对于中间行业而言,企业应用 ICT 产生的节能效应,在资本密集型和劳动密集型行业中不存差别。本文的这一结论也意味着无论是在资本密集型行业,还是在其他任何制造业行业中推进“两化融合”都将有助于中国工业节能目标的实现。

从企业能耗高低看,中央政府在《2010 年国民经济和社会发展统计报告》中将“化学原料及化学制品制造业等 6 个行业界定为高耗能行业”。据此,本文根据企业所属行业的 2 位代码,如果属于这 6 个行业,本文就将其界定为高耗能企业,并赋值为 1,否则为低耗能企业,并赋值为 0。然后,将能耗高低虚拟变量与企业应用 ICT 程度交互($ICT \times high$)。回归结果展示在表 6 第(2)列,结果依然表明企业应用 ICT 程度与企业能源强度的关系显著为负。同时,应用 ICT 程度变量与高能耗行业虚拟变量的交互项系数为负,但不显著,这意味着企业应用 ICT 带来的能源强度的下降,在不同能耗行业中可能不存在差异。

表 6 企业应用 ICT 程度影响企业能源强度的行业异质性检验

	(1) 资本密集程度	(2) 能耗高低
<i>ICT</i>	-0.4499** (0.2252)	-0.4938*** (0.1437)
<i>ICT</i> × <i>capital</i>	-0.3104 (0.2705)	
<i>ICT</i> × <i>labor</i>	0.0806 (0.2738)	
<i>ICT</i> × <i>high</i>		-0.0843 (0.2481)
控制变量	是	是
行业	是	是
省份	是	是
N	1195	1195
Adj-R ²	0.2684	0.2674

五、企业应用 ICT 程度对能源强度影响的机制检验

根据前文的内在机制分析,企业应用 ICT 程度提高之所以可以产生节能效应,是由于生产运营中应用 ICT 产生了技术进步效应和结构优化效应。本文认为,这两种效应将分别通过支持企业更新技术及机器设备和提高企业生产运营的柔性而产生。本文将通过构建中介效应模型对上述两种影响机制进行检验。在调查问卷中,有关于 ICT 对企业内部创新活动的支持程度问题:一是对引入用

于产品或工艺改进的新技术和机器设备 (*tec-equ*) 的支持程度;二是对采取措施提高生产柔性 (*flexible*) 的支持程度,对应的选项分别是“从不使用”、“偶尔使用”和“大量使用”,据此本文对这三个选项分别赋值为 1、2、3,数值越大表明 ICT 对该项活动的支持力度就越大,因此也越可能产生技术进步效应和结构优化效应。

本文采用温忠麟和叶宝娟(2014)修订 Baron and Kenny(1986)的逐步法后提出的中介效应检验方法,这种方法在研究中已被广泛采用(林建浩和赵子乐,2017)。本文的中介效应检验方程有三个,其中方程(4)与前文回归方程(1)相同:

$$EE_{jic} = \alpha + \beta ICT_{jic} + X'_{jic} \gamma + \mu_{jic} \quad (4)$$

$$mediation_{jic} = \rho + \varphi ICT_{jic} + X'_{jic} \kappa + \omega_{jic} \quad (5)$$

$$EE_{jic} = \phi + \beta' ICT_{jic} + \psi mediation_{jic} + X'_{jic} \eta + \xi_{jic} \quad (6)$$

检验的步骤如下:①第 1 步是检验方程(4)中的系数 β ,如果显著,则中介效应成立,并进行后续检验。②第 2 步依次检验方程(5)中的系数 φ 和方程(6)中的系数 ψ ,如果两个都显著,则意味着间接效应显著,并进行第 4 步检验。如果至少 1 个不显著,则进行第 3 步检验。③第 3 步用 Bootstrap 法直接检验原假设: $\varphi \times \psi = 0$,如果显著,则间接效应显著,进行第 4 步。否则停止分析。④第 4 步检验方程(6)中的系数 β' ,如果不显著,则直接效应不显著,表明模型只存在中介效应,如果显著,则需要进行下一步检验。⑤第 5 步比较 $\varphi \times \psi$ 和 β' 的符号,如果符号一致,则意味着存在部分中介效应,并汇报中介效应占总效应的比例 $\varphi \times \psi / \beta$ 。如果符号相异,则存在遮掩效应,此时要报告间接效应和直接效应之比的绝对值 $|\varphi \times \psi / \beta'|$ 。

中介效应检验结果汇报在表 7 中,对于企业应用 ICT 所引致的技术进步效应,表 7 第(1)列第 1 步检验结果表明企业应用 ICT 程度变量的系数为负,并在 1%水平上显著,这意味着应用 ICT 程度对企业能源强度的影响存在中介效应。在第(2)和第(3)列第 2 步依次检验中,本文发现企业应用 ICT 程度变量对中介变量作用显著。这与已有文献研究结论一致,企业应用 ICT,通过优化要素组合及降低技术转化成本,促进了企业技术进步和创新(韩先锋等,2014;张龙鹏和周立群,2016)。但中介变量 (*tec-equ*) 的系数不显著,本文继而采用 Bootstrap 法检验间接效应是否显著,结果拒绝原假设,这表明间接效应显著,即应用 ICT 程度提升将通过支持企业生产技术和机器设备更新降低能源强度。第 4 步和第 5 步检验表明 $\varphi \times \psi$ 的系数符号与 β' 的符号一致且显著,这意味着中介变量存在部分中介效应,前文理论分析中本文的假说 2 得以验证。这意味着作为一种有偏的技术进步,企业在生产运营中广泛应用 ICT,不仅引发生产范式的变革,还会促进企业更新生产技术和机器设备,这都有助于降低企业能源强度。根据第 5 步,本文的检验结果还表明由 ICT 应用引致的技术进步的中介效应占总效应的比例为 5.99%。

对于通过支持企业生产运营柔性 (*flexible*) 产生的结构优化中介效应检验。表 7 第(4)列也表明中介效应存在。第(5)列结果表明,企业应用 ICT 程度提升可以显著促进企业生产运营的柔性。可能的原因是企业在生产运营中更多应用 ICT,通过与其他生产要素进行组合及重构业务流程,进而触发产生新的生产范式,这将使企业在应对市场需求变化中能灵活调整生产节奏,进而提升企业生产运营柔性和组织运行效率(王永进等,2017)。第(6)列显示,生产运营的柔性变量系数为负,并在 10%水平上显著,表明中介变量的间接效应显著。同时企业应用 ICT 程度变量也显著为负,因此,可以推定生产运营的柔性变量对降低企业能源强度的影响具有部分中介效应。本文微观机制分析中提出的研究假说 2 再次被证实。这也意味着提升企业 ICT 应用程度,促进 ICT 与生产运营各个流程的深度融合,不仅提高了企业生产柔性水平,使企业可以根据市场需求变化实时调整生产运营计

划,而且这种敏捷的流程控制在其他条件不变情况下,使企业单位产出的能源消耗下降。本文的检验结果还表明中介效应占总效应的比例为 12.32%。

表 7 企业应用 ICT 程度影响企业能源强度的机制检验

	更新技术与机器设备			提升生产运营的柔性		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>ICT</i>	-0.5219*** (0.1362)	0.1837*** (0.0191)	-0.5274*** (0.1578)	-0.5219*** (0.1362)	0.1451*** (0.0200)	-0.4981*** (0.1527)
<i>tec-equ</i>			-0.1703 (0.2482)			
<i>flexible</i>						-0.4432* (0.2345)
控制变量	是	是	是	是	是	是
行业	是	是	是	是	是	是
省份	是	是	是	是	是	是
Bootstrap test	Z=-3.54, P=0.000			Z=-4.86, P=0.000		
N	1195	1138	1017	1195	1140	1020
Adj-R ²	0.2680	0.3371	0.2930	0.2680	0.2382	0.2950

六、结论与启示

在“十三五”规划中,中国政府强调“推进信息技术与制造技术深度融合,促进制造业朝高端、智能、绿色方向发展”。中国企业实践的个案也发现生产运营的信息化促进了节能减排^①。然而,具有普遍意义的微观层面经验证据较为匮乏。基于世界银行提供的 2001 年和 2012 年中国制造业企业调查数据,本文采用普通最小二乘法、工具变量法和面板数据固定效应模型,实证检验了中国制造业企业在生产运营中应用 ICT 的程度对能源强度的影响。

本文发现,整体而言,在其他条件不变情况下,提高企业生产运营中应用 ICT 的程度显著降低了企业能源强度。这意味着,将制造业企业生产运营过程与 ICT 的“融合”纳入企业的发展战略,不仅能促进企业生产技术进步和流程优化,还能为企业提供实时监测能源消耗的工具和手段,从而降低企业能源消耗。稳健性检验表明,本文的回归结果不随估计方法和变量度量方式改变而变,也未因样本企业的行业属性、资本密集度、规模大小和生命周期而异。本文影响机制分析中提出的企业应用 ICT 引致的技术创新效应和结构优化效应,分别通过支持企业生产技术与机器设备更新和提升生产运营柔性度产生中介作用,并且这两种中介效应占总效应的比例分别为 5.99% 和 12.32%。

本文的研究结论对企业经营管理和政府政策制定有以下四点启示:一是生产经营中应用 ICT 能促使企业生产方式与组织形态发生变革,为制造业企业带来“信息化红利”。因此,中国制造业企

^① “两化融合”促进节能减排经验交流会 (http://www.gov.cn/gzdt/2010-09/28/content_1712265.htm)。

业应以政府的信息化示范工程为契机,在企业管理中通过应用 ICT,实现生产与控制的智能化和自动化,提高管理效率,降低企业能源消耗。二是重视应用 ICT 对产业链的整合。鼓励骨干企业探索利用 ICT 建立能源综合与循环利用体系,如引导行业中的大型企业运用物联网技术整合产业链上下游企业,促使中国企业生产价值链向生态产业链转变。三是加快推进“两化融合”战略,促进中国工业企业实现生产过程的精确控制,减少能源消耗。在具体的推进中,应总结“典型企业”实施的经验与成熟的技术,然后逐步向众多中小型工业企业辐射,以降低战略实施的成本与风险。四是在政府政策支持方面,各级政府可通过设立企业信息化扶持基金的方式,加大对制造业企业信息化建设的支持力度。特别是工业节能减排领域,应安排专项资金激励企业利用 ICT 改造传统生产设备和工艺,这不仅有助于企业生产技术进步和管理创新,而且还能促使企业向“清洁生产”方式和绿色制造模式转变,最终走上高质量发展之路。

[参考文献]

- [1]卜茂亮,李双,张三峰. 环境规制与出口——来自三维面板数据的证据[J]. 国际经贸探索, 2017,(9):40-53.
- [2]戴冕,余淼杰, Madhura Maitra. 中国出口企业生产率之谜——加工贸易的作用[J]. 经济学(季刊), 2014,(2): 675-698.
- [3]樊茂清,郑海涛,孙琳琳,任若恩. 能源价格、技术变化和信息化投资对部门能源强度的影响[J]. 世界经济, 2012,(5):22-45.
- [4]方颖,赵扬. 寻找制度的工具变量——估计产权保护对中国经济增长的贡献[J]. 经济研究, 2011,(5):138-148.
- [5]韩先锋,惠宁,宋文飞. 信息化能提高中国工业部门技术创新效率吗[J]. 中国工业经济, 2014,(12):70-82.
- [6]黄群慧. “新常态”、工业化后期与工业增长新动力[J]. 中国工业经济, 2014,(10):5-19.
- [7]金碚. 工业的使命和价值——中国产业转型升级的理论逻辑[J]. 中国工业经济, 2014,(9):51-64.
- [8]林伯强,杜克锐. 要素市场扭曲对能源效率的影响[J]. 经济研究, 2013,(9):125-136.
- [9]林伯强,杜克锐. 理解中国能源强度的变化——一个综合的分解框架[J]. 世界经济, 2014,(4):69-87.
- [10]林建浩,赵子乐. 均衡发展的隐形壁垒——方言、制度与技术扩散[J]. 经济研究, 2017,(9):182-197.
- [11]邵帅,张曦,赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. 中国工业经济, 2017,(3):44-63.
- [12]史丹. “十二五”节能减排的成效与“十三五”的任务[J]. 中国能源, 2015,(9):4-11.
- [13]史丹. 绿色发展与全球工业化的新阶段——中国的进展与比较[J]. 中国工业经济, 2018,(10):5-18.
- [14]世界银行. 政府治理、投资环境与和谐社会——中国 120 个城市竞争力的提升[M]. 北京:中国财政经济出版社, 2007.
- [15]王班班,齐绍洲. 有偏技术进步、要素替代与中国工业能源强度[J]. 经济研究, 2014,(2):115-127.
- [16]王永进,匡霞,邵文波. 信息化、企业柔性产能利用率[J]. 世界经济, 2017,(1):67-90.
- [17]王政. 信息化再造汽车产业[N]. 人民日报, 2012-07-02.
- [18]魏楚,郑新业. 能源效率提升的新视角——基于市场分割的检验[J]. 中国社会科学, 2017,(10):90-111.
- [19]温忠麟,叶宝娟. 中介效应分析——方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014,(5):731-745.
- [20]谢康,肖静华,周先波,乌家培. 中国工业化与信息化融合质量——理论与实证[J]. 经济研究, 2012,(1):4-16.
- [21]杨德明,刘泳文. “互联网+”为什么加出了业绩[J]. 中国工业经济, 2018,(5):80-98.
- [22]张龙鹏,周立群. “两化融合”对企业创新的影响研究——基于企业价值链的视角[J]. 财经研究, 2016,(7):99-110.
- [23]Baron, R. M., and D. A. Kenny. The Moderator-mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations[J]. Journal of Personality and Social Psychology, 1986,51(6):1173-1182.

- [24]Berkhout, F., and J. Hertin. De-materialising and Re-materialising: Digital Technologies and the Environment[J]. *Futures*, 2004,36(8):903-920.
- [25]Bernstein, R., and R. Madlener. Impact of Disaggregated ICT Capital on Electricity Intensity in European Manufacturing[J]. *Applied Economics Letters*, 2010,17(17):1691-1695.
- [26]Bloom, N., C. Genakos., R. Martin, and R. Sadun. Modern Management: Good for the Environment or Just Hot Air[J]. *Economic Journal*, 2010,120(544):551-572.
- [27]Bunse, K., M. Vodicka., P. Schönsleben., M. Brühlhart, and F. O. Ernst. Integrating Energy Efficiency Performance in Production Management-gap Analysis between Industrial Needs and Scientific Literature [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011,19(6-7):667-679.
- [28]Cai, S., X. Chen, and I. Bose. Exploring the Role of IT for Environmental Sustainability in China: An Empirical Analysis[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013,146(2):491-500.
- [29]Cho, Y., J. Lee, and T. Y. Kim. The Impact of ICT Investment and Energy Price on Industrial Electricity Demand: Dynamic Growth Model Approach[J]. *Energy Policy*, 2007,35(9):4730-4738.
- [30]Collard, F., P. Fève, and F. Portier. Electricity Consumption and ICT in the French Service Sector[J]. *Energy Economics*, 2005,27(3):541-550.
- [31]Conley, T. G., C. Hansen, and P. Rossi. Plausibly Exogenous [J]. *Review of Economics and Statistics*, 2012, 94(1):260-272.
- [32]Fisher-Vanden, K. Management Structure and Technology Diffusion in Chinese State-owned Enterprises[J]. *Energy Policy*, 2003,31(3):247-257.
- [33]Fisher-Vanden, K., G. H. Jefferson, M. Jingkui, and X. Jianyi. Technology Development and Energy Productivity in China[J]. *Energy Economics*, 2006,28(5-6):690-705.
- [34]Higón, D. A., R. Gholami, and F. Shirazi. ICT and Environmental Sustainability: A Global Perspective[J]. *Telematics and Informatics*, 2017,34(4):85-95.
- [35]Hilty, L. M., and B. Aebischer. ICT for Sustainability: An Emerging Research Field [A]. Hilty L., and B. Aebischer. *ICT Innovations for Sustainability*[C]. Berlin: Springer, 2015.
- [36]Ishida, H. The Effect of ICT Development on Economic Growth and Energy Consumption in Japan [J]. *Telematics and Informatics*, 2015,32(1):79-88.
- [37]Khuntia, J., T. Saldanha., S. Mithas, and V. Sambamurthy. Information Technology and Sustainability: Evidence from an Emerging Economy[J]. *Production and Operations Management*, 2018,27(4):756-773.
- [38]Kim, J., and E. Heo. Effect of ICT Capital on the Demands for Labor and Energy in Major Industries of Korea, US, and UK[J]. *Environmental and Resource Economics Review*, 2014,23(1):91-132.
- [39]Kleibergen, F., and R. Paap. Generalized Reduced Rank Tests Using the Singular Value Decomposition[J]. *Journal of Econometrics*, 2006,133(1):97-126.
- [40]Longo, S. B., and R. York. How Does Information Communication Technology Affect Energy Use [J]. *Human Ecology Review*, 2015,22(1):55-72.
- [41]May, G., B. Stahl., M. Taisch, and D. Kiritsis. Energy Management in Manufacturing: From Literature Review to a Conceptual Framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,(167):1464-1489.
- [42]Moyer, J. D., and B. B. Hughes. ICTs: Do They Contribute to Increased Carbon Emissions [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2012,79(5):919-931.
- [43]Ollo-López, A., and M. E. Aramendía-Muneta. ICT Impact on Competitiveness, Innovation and Environment[J]. *Telematics and Informatics*, 2012,29(2):204-210.
- [44]Rizzoli, A.E., R. Montemanni., A. Bettoni, and L. Canetta. Software Support for Sustainable Supply Chain Configuration and Management [A]. Hilty L., and B. Aebischer. *ICT Innovations for Sustainability* [C]. Berlin:

- Springer, 2015.
- [45]Romm, J. The Internet and the New Energy Economy [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 36(3):197-210.
- [46]Sadorsky, P. Information Communication Technology and Electricity Consumption in Emerging Economies[J]. Energy Policy, 2012,(48):130-136.
- [47]Schulte. P., H. Welsch, and S. Rexhäuser. ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries[J]. Environmental and Resource Economics, 2016,63(1):119-146.
- [48]Stock, J. H., and M. Yogo. Testing for Weak Instruments in Linear IV Regression[A]. Andrews, D.W.K., and J.H. Stock. Identification and Inference for Econometric Models: Essays in Honor of Thomas Rothenberg[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [49]Zhou, X., D. Zhou, and Q. Wang. How Does Information and Communication Technology Affect China's Energy Intensity? A Three-tier Structural Decomposition Analysis[J]. Energy, 2018,(151):748-759.

Does Information and Communication Technology Reduce Enterprise's Energy Consumption—Evidence from Chinese Manufacturing Enterprises Survey

ZHANG San-feng¹, WEI Xia-hai²

- (1. School of Business, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Institute of Economic Development and Reform, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the survey data of the World Bank on Chinese manufacturing enterprises, this paper studies the impact of information and communication technology(ICT) on the production and operation of enterprises on energy intensity, as well as the influencing mechanism. Holding other factors constant, the study finds that the application of ICT in enterprise production and operation has a robust and significant negative relationship with energy intensity. Considering endogenous problems, IV method estimates that every time the standard deviation of the application of ICT in enterprise production and operation increased by 1 time, the enterprise energy intensity would decrease by 0.23 times. Fixed effect regression results also show that with every 1% increase in the ratio of enterprise's investment in ICT to its investment in other production machinery and equipment, the energy intensity of the enterprise decrease by 5.88% accordingly. Further mechanism analysis shows that the application of ICT in enterprises lead to technological progress and structural optimization respectively by the update of enterprise technology and machine equipment and the enhancement of production and manufacturing flexibility, so as to reduce enterprise energy intensity. The test of the mediating effect model shows that these two mediation effects can respectively explain 5.99% and 12.32% of the total energy saving effect of enterprise application ICT. This paper verifies the in-depth energy-saving effect of "integration of information technology and industrialization" at the enterprise level, providing micro empirical evidence for "internet plus" to promote energy-saving and emission-reduction of Chinese enterprises, and policy inspiration for China's manufacturing industry to transform to high-quality development.

Key Words: information and communication technology(ICT); energy intensity; energy consumption

JEL Classification: Q41 O13 L60

[责任编辑:王燕梅]