

从逆向工程到正向设计*

——中国高铁对装备制造业技术追赶与自主创新的启示

吕 铁, 江 鸿

(中国社会科学院工业经济研究所, 北京 100836)

内容提要:本文整合技术追赶的传统理论观点, 构造出基于技术学习的后发国家产业技术追赶分析框架, 并运用这一框架分析来自中国高铁装备产业的第一手调研数据。结果表明, 该产业能够在后发情境下快速发展出正向设计能力, 得益于四个主要因素, 即强调工程化和商业化的技术能力建设思路, 传承有序的人力资源积累和协调有效的长期合作机制, 持续完善、高效运转的行业试验体系, 以及密集试验、批量应用中发现问题与解决问题的高强度学习机制。本文进一步讨论了高铁装备产业对中国装备制造业发展正向设计能力、加快技术追赶速度的借鉴意义, 据此提出了相关政策启示。

关键词:正向设计; 技术追赶; 自主创新

中图分类号:F425 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2017)10—0006—14

一、引言

正向设计能力(Methe, 1995)是从用户需求出发确立顶层设计要求, 自上而下地分解、细化复杂产品(系统)功能, 确定产品功能结构、子系统和零部件解决方案, 形成可批量生产^①、稳定运行的商业化产品并实现全生命周期支持的能力。正向设计^②与逆向工程是制造业产品开发的两类典型模式, 但唯有前者才能引致真正的自主创新产品。传统的技术追赶研究将后发国家产业技术能力的形成过程简单划分为逆向工程和自主创新两个阶段(汪建成、毛蕴诗, 2007)。但对中国高铁装备产业等装备制造部门的观察和分析显示, 在这两个阶段之间存在着重大的能力断层, 而这一断层突出表现为正向设计能力的缺失。对于正向设计能力形成过程的分析, 有利于打开后发国家产业实现由逆向工程到自主创新跃迁的过程“黑箱”。

目前, 中国装备制造部门普遍结束了单一的OEM阶段, 但各部门的设计能力仍存在巨大差异。很多企业的自主设计活动停留在逆向工程阶段, 出于对技术标准、产品质量和知识产权的考虑, 不得不沿用仿制对象的供应商。在国产化率和全球份额增加的表象下, 是缺少自主性的普遍事实。例如, 除了移动智能终端SoC芯片、智能电视芯片等少数领域内的明星企业之外, 中国大多数集成电路设计企业不具备架构设计能

收稿日期: 2017-06-22

* 基金项目: 国家社会科学基金重点项目“推进我国工业创新驱动发展研究”(14AJY016)。

作者简介: 吕铁(1962-), 男, 辽宁盘锦人, 研究员, 经济学博士, 研究领域是产业经济, E-mail: lvtie8888@sina.com; 江鸿(1983-), 女, 江西九江人, 副研究员, 研究领域是战略管理, E-mail: jianghong@cass.org.cn。通讯作者: 江鸿。

^① 不少复杂产品(系统)是根据用户的个性化需求量身定做的, 生产数量十分有限。尽管这些产品的设计生产企业通常只进行单件小批生产, 但在技术和工程上具备大批量生产相同产品的能力。

^② 国外文献一般以“逆向工程”与“正向工程”相对, 以“逆向设计”与“正向设计”相对, 但细究其内涵, 两对词汇在多数情况下具有很强的互换性。尽管“逆向工程”和“正向工程”在中文文献中更为常见, 但考虑到本文的重点在于设计能力而非工程能力, 为避免歧义, 本文通篇使用“逆向工程”与“正向设计”的提法。

力,只能通过“抄板”亦步亦趋地再现国外设计,向特定供应商采购标准单元生产后低价竞售,产品严重同质化,产品升级换代主要跟随国外先进企业,难以在产品性能上超越仿制对象(魏少军,2016)。ADI等国外企业却可采用特殊的封装技巧或增加冗余电路的手法加大逆向工程的难度与成本,在既有产品设计被其他厂商高效复现之前即推出下一代产品,充分享受自主创新收益。与此相比,中国高铁装备、水轮机组等少数部门则已培育出正向设计能力,可设计生产满足最新异质性需求、性能达到甚至超过国际先进水平的自主知识产权产品。究竟是哪些因素促使这些部门率先冲破逆向工程窠臼、发展出正向设计能力?相关因素如何影响正向设计能力发展?这些问题对理解中国装备制造业技术追赶绩效差异、加快技术学习和技术追赶具有重要意义。

与回答上述问题的迫切需要形成鲜明对比的,是当前有关后发国家复杂装备制造业技术追赶研究的相对缺失。第一,现有研究关注了技术追赶过程中的技术学习,但侧重于回答后发国家应当学习“什么”或学到了“什么”,很少关注具体的学习实践“如何”进行,以及不同实践对建立和维持技术能力的意义。第二,现有研究致力于寻找普适规律,较少对理论进行情境化修正或整合。受“华盛顿共识”“东亚秩序”和“北京共识”的影响,后发国家技术追赶的政策和模式逐渐趋同,但技术能力差距却不断扩大(Cimoli等,2009)。这表明,去背景化的研究结论与成功的技术追赶之间不存在必然联系,新技术经济范式下的技术追赶需要更加情境化的研究。第三,现有研究较少关注复杂装备制造业,前述问题在这些部门的研究中尤为突出。目前,有关技术追赶的关键研究发现多数基于对电子、通信、家电、汽车等产业的考察。仅有的少数以复杂装备制造业为背景的研究停留于对技术追赶模式的概括描述和对技术追赶路径的阶段划分,缺少对技术学习实践和技术能力形成细节的刻画,也很少进行情境化分析。

本文以中国高铁装备产业这一典型的复杂装备制造部门为研究对象,探讨正向设计能力的形成过程,以期为推动中国装备制造业的技术追赶和自主创新提供参考。本文的主要贡献在于:(1)在既有理论研究的基础上,整合构建了“战略导向—资源配置—活动系统—学习机制”的后发国家技术追赶分析框架;(2)运用新构建的分析框架分析技术追赶过程中技术学习的资源基础、活动系统和运行机制,弥补了当前技术追赶研究对技术学习实践关注不足的缺陷;(3)全面收集了中国高铁装备产业的一手数据,将复杂装备制造业纳入技术追赶研究的图景之中,扩展了后发国家技术追赶研究的实证背景。

二、文献回顾与分析框架

发展正向设计能力是后发国家在深度嵌入全球产业链的开放环境中进行技术追赶的重要目标。正向设计能力与逆向工程能力同属产品设计能力(Razavi & Jamali,2010),都是技术能力的重要组成部分。但从同一产品的开发设计来看,逆向工程是以仿制对象为起点,旨在破解特定仿制对象的技术规范或技术数据包,使自身产品尽可能接近仿制对象。正向设计则是以用户需求为起点,旨在首先完整理解产品工作逻辑以及产品设计与产品性能之间的关系,在此基础上开发适用于不同需求的产品系列。因此,逆向工程有明确的仿制对象和知识搜寻范围,而正向设计的知识搜寻范围与应用方式均不确定,对设计能力提出了更高要求。具备正向设计能力的企业能够适时调整产品性能、完善产品谱系,满足异质性用户需求,掌握产品线扩展和供应商选择的主动权,使国际供应链资源由“不得不用”向“为我所用”再向“用舍在我”转变。因此,通过发展正向设计能力,后发国家企业能够彻底摆脱“受制于人”的普遍问题。

技术追赶是经济学与管理学研究的传统问题,东亚国家和地区更是近来的研究重点。相关研究主要围绕技术追赶的制度安排、机会与可能性、路径与模式、技术学习这四个主题展开,在前三个主题下均发展出了一些经典理论与模型。在制度安排的主题下,Johnson(1982)、Amsden(1989)、Wade(1990)等学者提出并

完善了“发展型国家”理论,认为政府干预市场是众多东亚国家和地区技术追赶的关键因素。在机会与可能性的主题下,Perez & Soete(1988)提出了“机会窗口”概念,认为后发国家可以利用新技术范式带来的“第二类机会窗口”实现技术追赶。不少学者运用并拓展了这一概念,提出商业周期、制度型市场等其他可能的机会窗口(Mathews,2005;Guiennif & Ramani,2012;魏江等,2016)。Borenztein(1998)和Blomstrom(1999)则提出了“发展门槛”观点,指出后发国家必须具有一定的技术能力和基础设施,才能有效利用先进技术所有者的技术外溢。在此基础上,很多相关研究也进一步探讨了产业的进入成本与进入时机(顾卫东,2008)。在路径与模式的主题下,Hobday(1995)的“OEM—ODM—OBM”模型和Kim(1980)的“引进—消化—提高”模型被广泛采用。一些研究特别关注后发国家跨越特定阶段的可能性,提出了路径跟随、阶段跳跃、路径创造等不同的追赶模式(Lee & Lim,2001)。

与上述研究相比,技术学习主题下的技术追赶研究在深度和系统性上都有所欠缺,停留于对知识来源、学习模式、学习内容的分类,缺少对技术学习实践及其作用机制的刻画与分析。(1)就知识来源而言,现有研究对源于国外技术引进和源于国内自主研发的知识与技术能力提升的不同关系多有探讨。部分研究强调技术引进对技术追赶早期阶段学习的重要性(Baskaran,2001;Zhang & Barbara,2001;张米尔、田丹,2008),部分研究强调自主产品平台对技术能力提升的重要性(路风、封凯栋,2004;徐雨森等,2008;路风、蔡莹莹,2010),部分研究则强调不同来源知识的协调利用和并行学习(Cho & Lee,2003;Lee等,2011)。然而,这些研究都只关注对不同来源知识的学习结果及其对技术能力提升的最终影响,对不同来源知识的技术学习机制、特别是技术学习如何促进由技术引进到自主研发的转变语焉不详。(2)就学习模式而言,现有研究多借鉴技术追赶路径的研究成果,探讨特定追赶阶段的学习模式。例如,陈劲(1994)认为,在“技术吸收—技术改进—自主创新”的不同阶段,存在着“干中学—用中学—研究开发中学”的动态转变;魏江等(2016)发现,企业会根据技术不连续性和制度型市场机会的差异,分别选择并进式、内控式、外植式和采购式四种学习模式。然而,这些研究仅注重学习模式的类型化,并未讨论不同追赶阶段或条件下技术学习实践和模式转变的机制与结果。(3)就学习内容而言,现有研究致力于讨论特定产品技术特性和特定技术追赶阶段要求的关键技术能力。例如,Kim及其合作者(Kim & Lee,1987;Kim,1997)发现,产品创新对复杂产品(系统)的技术追赶最为重要,工艺创新和产品开发对批量生产的消费品的技术追赶最为重要。吴先明、苏志文(2014)将技术引进后的内部融合分为技术迁移和技术提升两个阶段,认为前一阶段的学习重点是技术资源和研发方向整合,后一阶段的学习重点是技术水平和研发能力提升。然而,这些研究都没有深入阐述技术学习活动如何引致关键技术能力。

总体来看,尽管现有的技术追赶研究从制度安排、机会窗口等视角为复杂装备制造部门的技术追赶提供了具有一定解释力的概念,但既没有深入探讨真正引致正向设计能力跃迁的技术学习实践,也没有构造出基于技术学习的产业技术追赶分析框架。如果仅仅明确技术学习的重要性和阶段性特点,却不具体回答整个产业层次的技术学习活动实际“如何”进行以及其他技术追赶相关因素“如何”与技术学习活动相关联的问题,研究结论必然难以直接指导技术追赶实践。因此,有必要整合制度安排、机会窗口等视角与技术学习视角,形成更加全面、更具总体观的分析框架。

本文在延续技术追赶研究四个关键主题的基础上,构建出以技术学习为中心的后发国家技术追赶分析框架,并运用该框架分析中国高铁装备制造业由逆向工程到正向设计的转变。这一框架的理论逻辑在于,技术学习是各类因素影响技术追赶结果的最终环节。制度安排等因素既然能够作用于技术追赶,必然对技术学习活动存在实际影响,能够“投影”出技术学习活动分析框架。与技术追赶的制度安排、机会窗口与可能性、路径与模式、技术学习四个主题相对应,这一分析框架包括战略导向、资源配置、活动系统和学习机制

四个维度。具体而言,战略导向是指受产业政策等制度性安排影响的技术学习导向,决定了产业技术主体的活动目标。资源配置是指可以支持技术学习活动的资源存量及其配置机制,决定了产业技术主体在特定的“发展门槛”条件下是否能及时获取并调动资源,开展技术学习,回应技术追赶的“机会窗口”。活动系统是指在特定的产业技术追赶路径与模式下技术学习凭依的主要活动,由研发设备等硬件和活动组织等软件构成,其侧重点会因其行业技术创新的知识基础而有所差异。例如,科技驱动型产业的技术追赶活动体系更强调基础研究活动,而经验驱动型产业的技术追赶活动体系更强调试验验证活动。学习机制是指在上述因素的基础上,产业技术相关主体获取并内化技术知识、提升技术能力的机制。简言之,战略导向、资源配置和活动系统从目标、资源、活动方式等方面塑造了技术学习的环境;当环境较为有利时,学习机制将更加高效地发挥作用,支撑起后发国家的技术能力提升与技术追赶。

三、数据收集与分析

本文采用三角交叉方法收集数据,通过对中国高铁装备产业相关主体的访谈收集一手数据,辅以对公开报道、行业期刊、企业年报、内部文件等资料的广泛搜索。2015年7月至2016年7月期间,研究团队共进行了37次焦点小组访谈,所有访谈均有录音。为丰富基于不同视角的信息,提高研究的信度和效度,研究团队选择的受访主体广泛覆盖了高铁装备用户、高铁装备总成企业、配套企业、高铁建设企业、相关高校和科研院所^①。受访对象主要包括上述主体的高层管理人员、技术管理人员、项目管理人员和各个技术领域内的科研人员。所有访谈都采取非结构化形式,以确保更多的细节能从访谈中涌现。

本文数据处理步骤如下:在每次访谈结束后,研究团队立即将所有访谈录音转录为文本,并对当时所有访谈转录文本和二手数据等原始材料进行归纳式编码和分析。在此过程中,研究团队一方面根据编码过程中涌现的新主题调整访谈提纲,修正理论抽样计划;另一方面不断检视并调整原始编码和一级编码,在重复迭代之中提高一级编码的信度,为更高维度构念的汇总奠定基础。当数据出现理论饱和,无法再从新收集的数据中提炼出与正向设计能力及其提升相关的新见解时,研究团队即停止了数据收集,并对原始编码和一级编码进行了讨论与确认。基于前文发展的分析框架,研究团队进一步寻找一级编码之间的联系,分别抽取出与战略导向、资源配置、活动系统、学习机制等二级主题相关的一级节点,最后对二级主题进行三级编码,建构出各主题与正向设计能力提升之间的关系。为了降低整个编码分析过程中可能的偏见,研究团队采取了以下措施:第一,在编码完成后,请其他研究者独立评估三级编码和二级编码,并就有异议之处进行了深入讨论,在达成共识的基础上修正编码。第二,邀请中国铁路总公司等局内人士进行检验(Evered & Louis, 1981),以确保研究团队已对场域内的实际情况做出了合理解释。

四、中国高铁装备产业的正向设计能力发展

以准高速和高速^②动车组的技术进步为标志,中国高铁装备产业及其设计能力的发展经历了三个阶段。

^①各类受访机构包括:(1)高铁装备用户:中国铁路总公司、成都铁路局、太原铁路局;(2)高铁装备总成企业:青岛四方机车车辆股份有限公司(简称四方)、长春轨道客车股份有限公司(简称长客)、唐山机车车辆有限公司(简称唐车);(3)高铁装备配套企业:戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司、株洲电力机车有限公司、株洲电力机车研究所有限公司;(4)高铁建设企业:京福铁路客运专线安徽有限公司、铁建重工集团有限公司、中铁二局股份有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司;(5)高校与科研院所:西南交通大学(简称西南交大)、中南大学、中国铁道科学研究院(简称铁科院)。

^②综合各方定义和历史提法,本文将时速160~200千米称为“准高速”,时速200千米及以上称为“高速”。

1. 独立研发阶段(1990—2003年)

1995年前,原铁道部已开始组织研制准高速与高速列车,但尚未突破“机车+客车”^①路线,也未有国产准高速或高速动车组问世。1995年后,围绕铁路局招标项目和原铁道部部管项目,中国高铁装备研发人员广泛尝试内燃、摆式、电动等技术路线,开发出众多新型动车组。这些车型虽然具有“需求引致”的正向设计色彩,但并未从根本上摆脱逆向工程和少量试制的特点:(1)就车体和头型设计、牵引制动系统、转向架构造、网络控制系统四项决定动车组知识产权归属的核心设计而言,这些型号的不少核心设计源于对国外产品的模仿和改造。(2)这些型号产量极小,未形成批量生产能力。据研究团队统计,这一时期中国企业共推出13种新型动车组,总产量却不足40列,其中只有五个型号产量超过一列。(3)当时已投入或即将投入运营的五种电动车组都曾多次出现机破事故,难以满足稳定运行的商业化要求。

2. 引进学习阶段(2004—2008年)

围绕时速200千米和300千米动车组采购项目,原铁道部组织完成了动力分散型电动车组技术的全面引进。四方、唐车、长客分别与日本川崎重工(简称川崎)、德国西门子和法国阿尔斯通合作,联合设计生产CRH2A、CRH5A和CRH3C,并自行衍生出部分新型号,初步形成了CRH动车组产品系列。这些国产化型号虽然实现了大批量供应和商业化运行,但国内企业只能在原型车平台上进行小范围的环境适应性改进,不具备整车正向设计能力。首批次CRH高速动车组的优化改造只能以中外联合设计的方式进行,研发周期和产品性能取决于原型车的技术成熟度。例如,四方与川崎联合设计的CRH2A基于日本成熟平台,不仅率先下线,而且很快实现了稳定的商业运行。长客与阿尔斯通联合设计的CRH5A却因阿尔斯通此前没有成熟的动力分散型电动车组平台,对原型车进行了基础性修改,投入运行早期的故障率长期居高不下。中国高铁装备研发主体尚不通晓引进车型工作逻辑,自行完成的改进设计和型号衍生并未对原有平台进行大幅度改动,未达到正向设计产品的标准。以性能提升最为显著的CRH2C-1为例,尽管其速度(时速300千米)超过了引进车型CRH2A(时速250千米)一个等级^②,但其设计主要是将CRH2A从“四动四拖”结构恢复为日本原型车E2-1000的“六动二拖”结构^③,使动车数量从四节增加到六节。由于E2-1000原版时速已经达到275千米,CRH2C-1略做改进即“具备了提速到时速300千米的动力”(赵小刚,2014)。

3. 正向设计阶段(2008年至今)

以建设京沪高铁为契机,原铁道部和科技部共同组织研制时速350千米及以上高速动车组,于2010年完成了四类核心设计全部自主化的CRH380A、CRH380B和CRH380CL。此后,四方、长客、唐车又继续衍生出多种长大编组、高寒环境、强风沙环境的CRH380新车型。在CRH380系列研发过程中,中国高铁装备产业发展出整车层次的高速动车组正向设计能力,并运用这一能力自主开发出速度等级和环境适应性远超引进型号的全新动车组,形成了时速160~400千米的自主化产品序列。2017年6月,具有完全自主知识产权和技术标准体系的时速350千米“复兴号”中国标准动车组(简称标动)正式投入运营。这是中国高铁装备产业集中运用高速动车组正向设计能力的最新成果。标动包括四方的CR400AF和长客的CR400BF两个型号,但不同厂家产品可互联互通,相同速度等级动车组可重联运行,不同速度等级动车组可互相救援。这表

^①普通客运列车是由一辆客运机车(提供动力)和多辆客车(不带动力)构成的编组,客车数量可调整。动车组是由多辆动车(自身带动力)和多辆拖车(不带动力)构成的编组,编组中的动车与拖车数量固定。根据动力来源,动车组可分为内燃动车组和电动车组。根据动力分布方式,动车组可分为动力集中型动车组(动力装置集中安装在列车两头的车辆上)和动力分散型动车组(动力装置分布在列车的多个不同位置)。除特别说明外,后文所涉动车组均为动力分散型电动车组。

^②高速动车组每提升30~50千米时速,速度就上了一个等级,设计上要做出较大调整。

^③“四动四拖”指该型号动车组由四列动车和四列拖车构成,“六动二拖”指该型号动车组由六列动车和两列拖车构成。这是铁路系统内部描述动车组编组方式的普遍用法。一般而言,动车数量越多,动车组动力越大,最高时速越快。

明,中国高铁装备研发人员已因需开发出了不局限于引进平台的全套高速动车组工作逻辑,使脱胎于不同平台的标动实现了机械接口的物理互联、电气接口的数据互联、软件接口的逻辑互联和操作界面的互通、主要硬件的互换,确立了不同于“欧标”和“日标”的中国标准体系。

五、正向设计能力发展的促进因素及其作用

运用前文提出的技术追赶分析框架,考察高速动车组技术追赶过程中战略导向、资源配置、活动系统、学习机制四方面的特点,中国高铁装备产业正向设计能力的跃迁主要得益于以下因素。

1. 战略导向:强调工程化和商业化的技术能力建设宗旨

批量生产自主研发、性能成熟的商业产品是2004年后中国高铁装备研发的根本宗旨。这改变了整个产业的技术能力演进方向,使其快速向兼具技术和经济合理性、满足规模化需求的正向设计路径收敛。强调“先进、成熟、经济、适用、可靠”的大规模技术引进引致了成熟、完整的正向设计理念。铁科院首席研究员王悦明在受访时指出,2004年前,铁路局招标研制的众多准高速或高速列车型号都以创新示范为目标。这些型号往往“一型一列”,即使“只在局管范围内跑旅游线路”,多数型号也“经不住跑”。而在原铁道部主抓的三个国家级高速电动车组项目中,“大白鲨”和“先锋号”均属试验样车,没有批量生产计划;唯有“中华之星”在立项之初即以批量生产、长期运营为目标。2004年后的技术引进是中国高速动车组研发全面要求“批量、固化”的起点。对研发人员来说,CRH系列型号不再“只是研究一个样车,考虑一项性能”,而是要将批量生产可行性和长期运营可靠性纳入全盘考量。

值得注意的是,对工程化、商业化速度与效果的追求常常使后发国家陷入对国外成熟产品的逆向工程之中。然而,大规模技术引进并没有淡化中国高铁装备产业的自主研发意愿,而将这种意愿引向了规模生产的正向设计产品。尽管不少人士诟病原铁道部在技术引进时要求前期研发的非CRH型号全体下马,但其初衷并非完全放弃自主开发。否则,2004年、2005年的两次招标就不会明确要求以中外联合设计的方式对引进车型开展适应性改造,也不会设置“技术转让实施评价”考核环节。中国高铁装备产业的自主研发意愿从未消失,在完成对CRH系列的技术吸收后,即被迅速导入CRH380系列的正向设计之中。

2. 资源配置:传承有序的人力资源积累和协调有效的长期合作机制

中国高铁装备正向设计能力的载体是各尽其能的产学研人才队伍,是将这些人才组织起来的产业活动体系。这不仅保存和拓展了中国高铁装备产业的知识 and 能力基础,而且促使各方以并行工程的方式深度合作,加快科学研究、产品开发、生产制造之间的迭代循环过程。

(1) 早期自主研发项目形成的人才储备,从人力资源供给上保证了技术引进与消化吸收的效率效果。而这批宝贵的技术人才得以保全,应归功于管理者抱负和大规模技术引进。据受访的四方技术中心研发人员回忆:“1998年到2003年是最困难的时期,每年都停工。停工期间,全厂干部和职工都拿400元基本工资,实际到手256元,但所有技术人员工资照发,因此,四方的技术人员没有断层。”大规模技术引进“不仅带来了技术提升,更在关键时刻留住了人才”。被及时保存和激活的个人经验与组织记忆,极大提高了知识获取和应用速度。铁科院一位车辆研究专家在受访时指出:“2004年前培养的这批人真正造过车。他们来引进,看一样的图纸,听一样的说明,但理解快得多,清楚得多。”川崎曾认为四方需要16年时间才能完成对引进技术的消化吸收,但中国高铁装备产业只用五年时间即已实现了正向设计。

(2) 超越铁路系统传统边界的产学研长期合作,使铁路系统内外的相关人力资源被有效组织起来,服务于高铁装备技术突破与正向设计。2004年前,中国轨道交通装备的产学研合作在范围和理念上存在明显局限。列入“九五”攻关计划的“先锋号”和“中华之星”都是原铁道部部属工厂、院校和科研机构的合作成果,

完全不涉及铁路系统之外的机构。大规模技术引进之后,这些局限均被打破:一是原本局限于铁路系统内部的合作扩展到铁路系统之外。2008年,原铁道部和科技部组织了铁路系统内外的25所高校、11家科研院所、51家国家重点实验室和工程研究中心开展协作,共同支撑起CRH380自主创新。这一合作模式也延续到了此后的高铁装备正向设计活动之中。二是原本局限于单个科研项目的短期合作扩展为企业主导的长期合作。四方总工程师梁建英指出:“技术引进之前,我们也参与一些合作项目,但态度是很被动的。有时候有技术难题,但不愿意找外面的单位合作,总觉得自已也能做出结果。后来在引进中发现,很多技术,特别是前沿技术和理论基础,必须有外部支持,才能更上一层楼。我们的创新模式有了很好的转型,和高校、科研院所开展稳定的长期合作。”铁路系统实现政企分开改革后,高铁装备创新体系中的行政力量逐步减弱,行之有效的产学研合作机制因企业对外长期合作理念的兴起得以维持和发展,继续服务于产品正向设计。

3. 活动系统:持续完善、高效运转的行业试验体系

对基于经验性知识的装备制造部门而言,试验活动是产学研各方主体开展研发与技术学习的基础体系。正向设计因其向前发展的建构本质,所需试验的种类繁、体量大、密度高,对试验设施、试验思路和试验组织都提出了全新要求。中国高铁装备试验得以快速进入探索与验证并举的正向设计阶段,是不断完善的试验硬件与同步提升的试验理念、试验规范、试验组织等软件相辅相成的结果。

(1)根据本土需要建设或升级的众多试验台与实验室,意味着中国高铁装备产业具备了国际领先而又极具适用性的仿真测试环境与台架试验条件。截至2015年底,中国共有18个运行或在建的国家级高铁相关试验平台。1995年建成的西南交大牵引动力国家重点实验室因其“在运行时速才几十千米的时代”建设450千米时速轮轨滚动振动整车试验台的超前意识,在各型号准高速和高速列车研制中发挥了不可替代的作用。西南交大张卫华教授在访谈中表示,如果没有400千米以上时速的整车台架试验准备,中国高铁动车组开发不可能如此顺畅地进入350千米乃至更高时速的线上试验阶段。其余17个试验平台中,有15个在2004年大规模技术引进后启建。尽管受建设周期限制,目前只有半数完成验收,但功能和精度均达到了国际顶尖水平。

(2)2004年后新建的众多线路带来了全球仅见的超大体量、复杂条件现场试验窗口和数据获取机会。从试验规格来看,2002年用于“中华之星”性能测试的秦沈客专山绥试验段长度64.1千米,与法国TGV冲高试验段处于同一长度量级,但在最高试验速度上仍相去甚远。此后,建造标准更高的京津、武广、郑西、京沪等线则创造了大量时速300千米以上的超长试验段。从试验周期来看,每条新线都提供了在建期间的多段、多次试验段试验窗口期,全线铺通后的长距离全线试验窗口期,以及投入运营后的跟踪试验期。更重要的是,这些线路的建设时间相互衔接、建造标准逐步提升、运行环境差异较大,在整体上保证了近十年来兼具连续性和差异性的不间断线上试验。从试验工况来看,无论是地质和气候,还是运行距离和开行密度,中国高铁运行条件之复杂堪称全球之最。遍历各种环境的线上试验为中国高铁装备产业带来了无可匹敌的问题库和数据库。受益于此,标动正向设计才有能力同时应对“长距离持续高速运行、开行密度较高、载客流量较大以及高寒、多雪、高原风沙、沿海湿热、雾霾、柳絮等环境”的苛刻要求。

(3)测试与分析并重、验证与探索并重、短期研制与长期跟踪并重的理念,是引领中国高铁装备试验全方位支持正向设计的首要因素。第一,中国高铁装备试验的测试活动与分析活动素来在人员和组织上高度统一,有助于研发人员深入解读试验结果,加快试验与设计的迭代过程。相比之下,原为全球第一的德国慕尼黑黑滚动振动试验台只是“作为试验工具存在,只提供测试数据,不做任何分析”(沈志云,2014)。第二,2004年技术引进之初,中国高铁装备研发人员已有意向试验体系中注入探索性和长期性元素,在高铁联调联试、动态检测等验证性试验阶段增加科研试验。第三,自2008年京津城际通车起,中国高铁装备研发人员

即创造性地对所有投入运营的新车型开展全生命周期的跟踪试验和数据采集。西南交大张卫华教授和徐志根教授解释说：“列车性能会蜕变，而且每列车在每条线上的表现都不一样。跟踪运营列车，从一级修到四级修^①，性能变化规律掌握一清二楚，不但对养护有好处，对指导设计更有作用。”

(4)有力的试验组织、清晰的试验规范和相应的组织惯例，使高铁装备试验体系得以在极高的试验密度下有序运转。作为后发竞争者，中国高铁装备产业在追赶过程中面对着试验量更大、时间更紧的挑战，只有加大试验密度，才能使研发人员尽早“认识到产品设计表征出来的特征”，加快正向设计进度。这一期望得以实现，最初得益于原铁道部集中管理的组织安排。曾全程参与CRH380系列研制工作的四方技术中心受访人员回忆说：“当时做试验，不需要层层审批，而是报到原铁道部动车组项目联合办公室（简称动联办），马上安排。”此外，早在CRH380上线试验之时，中国高铁装备产业即以确立试验规范为要务。原动联办成员、现中国铁路通信信号上海工程局集团有限公司总经理宋晓风回忆说：“武广线试验有四项要求，第二项就是建立联调联试机制和整套标准，将来为其他线所用。”由此，中国高铁及早确立了涵盖科研试验、型式试验、产品检验、联调联试、运行考核、跟踪试验的详细试验规范，非正式协同惯例也逐渐生成。动联办于2011年撤销后，试验规范与相关惯例仍然延续下来，成为协调高密度试验的主要机制。

4. 学习机制：密集试验、批量应用的高强度技术学习

面对日、德、法三国差异化的高速列车设计，中国高铁装备研发、设计、制造、试验各参与单位以深刻理解不同车型运行原理、融会形成自主设计思想为目标，开展高强度并行学习，在试验效率、问题识别、工作逻辑、设计工具、标准确立等方面快速改善，在短时间内引致了正向设计能力的突变。

(1)通过基于高密度并行试验的“试验中学”(Thomke, 2003; Thomke & Reinertsen, 2012)，中国高铁装备研发人员迅速增强了试验技术，提高了试验效率，为产品改进和正向设计提供了适时、优质的数据支持。试验效率是整个试验周期（设计、实施、分析）所获信息的价值与成本比(Thomke, 1998)，虽与试验速度有关，但绝不等同于此。如果试验设计或操作不合理，试验速度反而有损试验效率。在铁科院国家工程实验室工作的丁福焰举例说：“现在的测试系统都很先进，采数据、出报告好像很容易。但实际上影响因素很多，包括机械、安装、研判等等。即使是摩擦系数这么简单的参数，如果把握不当，做一天试验，测出来的数据根本是错的。”由此可见，试验效率取决于试验技术，后者则与经验学习紧密相关。

同时引进多国高速动车组并辅之以大范围的产学研合作，使中国高铁装备产业得以兼具并行试验速度较快和串行试验促进学习的优点(Thomke等, 1998)。组建多个项目团队、分别攻关指定型号，这属于典型的并行安排，有利于在短期内完成大量试验，但不同团队难以获取其他团队的同期经验，容易造成各团队“背对背”试错的冗余试验，影响学习效果和试验技术改进。若采取减少单轮试验量、增加试验轮次的串行安排，则难免降低试验速度。与此相比，前述的产学研合作机制、尤其是科研人员的跨团队活动，增强了中国高铁装备试验团队之间的实时信息交流，在保证并行试验速度和密度的同时，获得了原本在串行试验中才能达到的学习效果。就试验设计而言，据西南交大张卫华教授介绍：“标动共有16个速度档，161个工况，2000多个组合。虽然不是每个组合都做了试验，但也做了上千个组合。”研发人员并非不计成本地做加法，而其增删取舍试验设计的基础就是前期积累的试验技巧和相关知识。就试验操作而言，负责标动线路试验的大西高铁试验指挥部受访人员表示：“试验大纲比较粗，通过现场优化才能将互不干扰的试验内容并行安排，不至于因某项试验出现问题而荒废整天的试验时间。而在并行安排中如何进行试验穿插，就取决于长

^①目前中国动车组修程分为一级检修到五级检修五个等级。每次运行结束（一般1~2日）后执行一次一级检修，每运行三万千米（或每月）执行一次二级检修，每运行45万千米（或每年）执行一次三级检修，每运行90万千米（或每三年）执行一次四级检修，每运行180万千米（或每六年）执行一次五级检修。

期练出来的经验。”

(2)通过工程实践与设计实践反复迭代的“干中学”(Arrow, 1962),中国高铁装备研发人员在设计输入和设计工具上取得了大量突破,形成了具有鲜明中国特征的自主化正向设计平台。在访谈过程中,不少技术专家指出,“车辆设计知识是高度依赖经验积累的,很难从书上或者国外学到”。从2004年前的自主研发到大规模、多源头的技术引进和消化吸收,经验知识积累大大加速,主要体现在三个方面。

一是识别核心问题。影响高速动车组性能的因素极其庞杂,不可能也不必要全部纳入模型。确认核心问题及其影响因素是合理简化设计模型的先决条件,而不同问题和要素的相对重要性往往在产品开发和工程实践中才能显现。例如,尽管文献广泛提及空气动力学问题,但中国高铁装备研发人员却是在广深线提速过程中才真正认识到这一问题的重要性。铁科院首席研究员王悦明回忆:“广深线提速前,我们看过国外文献,知道空气动力学研究是基本要求,但从上到下都不重视。没想到,在160公里到200公里的低时速下已经出现很多问题。准高速列车和老式客车交会,把对面的木头窗子都吸过来了。我们意识到空气动力学的确是高速情况下的大问题,原铁道部才会支持相关研究,为后来的高速动车组打下了基础。”中国高铁装备研发人员对气密强度的认识则是在武广线试验中得到深化的。铁科院原副院长康熊研究员介绍说:“当时我在四方的车上,过隧道时能感觉到晃动很大。后来用传感器测,侧墙板最大内移达到12毫米,疲劳问题严重。”针对这一问题,四方技术中心副主任孙彦表示:“从日本引进的CRH2A时速只有250公里,根本没发现气密强度的问题,日本人当然也不会主动提醒。所以,在研发CRH380A的前身CRH2C-350时,车体气密强度的要求就沿用了之前的4000帕。结果,CRH2C-350在武广线上过隧道后,车体和门窗全都变形。我们在排查后发现,气密强度是造成此情况的主要指标。”认识到这一问题后,四方投入大量研究资源,“在车体重量仅增加4%的情况下”,将CRH380A的“气密强度从4000帕提高到6000帕”(矫阳,2011)。得益于经验性的问题识别和定义,中国高铁装备产业才能在迫切的追赶要求下,最大程度地减少过冗余、过试验、过设计造成的浪费,将有限资源聚焦于“真正的问题”。

二是构建工作逻辑。高速动车组的架构高度模块化(Baldwin & Clark, 2000),其性能提升需要同级组件的优化匹配和自下而上的有效集成。正向设计能否形成符合用户期望的整车工作系统,实现这一设计的生产成本是否合乎预期,取决于研发人员对各级组件之间静态依赖关系和特定场景下动态调用关系的定义。这些关系的结构化表达,就是车辆工作逻辑,也是正向设计的精华所在(沈志云,2014)。由“中华之星”等早期型号到CRH380系列和标动,中国高速动车组工作逻辑急趋复杂。以信息传输为例,铁科院首席研究员王悦明介绍说:“‘大白鲨’的信息传递量和机车拉客车差不多,主要是一条开门线和两个司机室的控制线需要全列贯通。CRH型号则是每条信息都要传到主控车和其他列车。”中国高铁装备研发人员通过反复调试不同应用条件下的引进车型故障逻辑,逐步加深了对高速动车组工作逻辑的认识,随后根据实际运行条件自行设置逻辑或改写原有逻辑^①。在密集的“试错—改错”过程中,中国高铁装备研发人员掌握了部件级、产品级、系统级等各层次硬件和嵌入软件、应用软件的联通、控制、监测、诊断等关系。目前,标动已经达到了“长客造和四方造车辆均能接收、执行、反馈对方主控车指令”这一“从未有过的信息传递和处理水平”。考虑到车速越高,“需要及时观察、判断的情况越多,对可靠性和实时性的要求越高,软件接口越多”,不同厂家车辆之间互联互通的事实反映出中国高铁装备研发队伍已具备了自

^①以长客为例,一位受访技术人员表示:“CRH5A故障很多,阿尔斯通解决不了,只能和长客分享控制程序,但这些程序本身就有缺陷。比如列车关门时,不管哪扇门,只要最后关,就关不上。反复排查,发现关门时空调还在打新风,车内有正压。我们增加一条新逻辑,设定关最后一扇门的瞬间空调停止,问题消失。5型车的类似问题几百上千件,我们一点点解决。掌握逻辑,用了整整七年。现在,至少在中国条件下,我们对5型车逻辑的理解比阿尔斯通好。”

主开发全套车辆工作逻辑的能力。

三是发展设计工具。高速动车组是众多组件交互形成的大型装配体,结构复杂、关联量大、参数繁多是其设计模型的固有特征。在明确关键变量及其关联关系的基础上,内置了逐层级关联关系的设计工具可固化产品工作逻辑、实现组件协同变形,帮助研发人员根据特定用户需求自顶向下地生成设计模型,减少设计工作量,丰富产品多样性。而要发展出正确传递并表达设计信息的优质工具,并保证其可读性、稳定性、后续开发与维护便利性,则有赖于研发人员在建模方法、设计参数、程序结构、实现方法上的实践经验。就建模方法和设计参数而言,西南交大徐志根教授表示,高校实验室的“支撑作用之一,就是确定设计用参数。我们根据基础理论和实验室数据建立模型,在大系统动力学的基础上做一个设计平台,为工厂提供动力学参数。工厂拿到这些参数,就能设计车辆”。就程序结构和实现方法而言,不少设计软件和设计环境“都是通过搞动车组,一点点摸索、一点点琢磨、一点点建立起来的”。例如,长客副总工程师李军反映:“2006年底,长客派队去唐车参与CRH3A的消化吸收,了解到西门子用的是ELCAD三维设计软件,就联系软件公司,咨询设计步骤,再按照步骤自己摸索着搭建设计平台。为了测试平台是否有效,就把西门子给的生产图纸拿来,看能不能生成一样的图纸。如果不行,根据两头的结构和结果,继续推测、调整。2007年我们完全复原了西门子的车体设计。这就证明,我们有了自主的设计平台,而且和西门子的平台至少在工程化上是等效的。标准动车组设计的所有分析计算模块,都是这样建立起来的。”

(3)通过运行、维护技术来源各异的多种列车型号的“用中学”(Mukoyama,2006),中国高铁装备研发人员对各种设计理念在特定条件下的具象差异有了更为深入、直接的认识,提升了依据应用环境确立设计标准的水平。研究表明(Von Hippel & Tyre,1995),新装备有80%的问题都是出乎设计人员预料、在投入使用后才首次发现的,而解决这些问题所需的信息也隐藏在使用环境之中。在访谈过程中,来自不同单位的标动研发人员均表示,他们是在“融合国内现有四个平台的设计理念的基础上,综合对实际应用情况和应用需求的了解,确定了适合国内环境的设计要求”。标动网络控制系统中的监测设置就是应用现实推动设计变化的典型。受访的标动线路试验人员介绍说:“日系车强调人的作用,很多监测项目由人工完成,不包含在监测系统之内,因此,对管理精细程度要求高,检修频率高。德系车强调硬件的作用,监测事无巨细,需要的检修人员少,但操作复杂,容易报故障。”这两种理念本无高下之分,也各自延伸出了适用的配套模式^①。然而,一旦落实到他国环境中,管理者或操作者对这些问题响应和处置方式的态度却可能截然不同。“有些铁路局不喜欢欧洲车型,因为报警、停车太频繁;但是,有些铁路局认为小问题都报警也没关系,心里踏实”。为摸清用户偏好与成因,标动研发团队广泛调研国内装备应用单位,最终在一线经验的基础上建立起全新的适用性自主标准。“在体系架构上,我们比德国更强调监测,安全监测点从引进车型的1000多个增加到标动的3000多个。但在信息展示上,我们把监测信息分成了给司机、给随车机械师和给段上检修人员的部分。司机不会被频繁的报警打扰,随车机械师则能全面掌握车辆状态”。

六、研究结论与政策启示

1. 研究结论

本文运用基于技术学习的技术追赶分析框架,考察中国高铁装备研发由逆向工程转为正向设计的全过程,得出了如下结论:(1)从战略导向看,扭转以往以探索实验和产品示范为主的研发导向,将批量生产自主研发、性能成熟的商业产品作为根本宗旨,是该产业形成正向设计能力的前提。(2)从资源配置看,数十年

^①以轴温监测处置为例,受访的标动研发人员表示:“日本车轴温再高也不停车,只是加个熔断器,因为日本线路短,轴温再高,也能很快到站。欧洲车详细监测轴温和两轴温差,结果不对立刻报警、停车,启动预案。”

传承有序的人力资源积累和协调有效的长期合作机制,是该产业形成正向设计能力的基础。(3)从活动系统看,根据科研与工程需要持续完善的试验体系,特别是同步提升的试验理念和组织水平,是该产业形成正向设计能力的重要支撑。(4)从学习机制看,同时引进多国技术促成的“试验中学”“干中学”“用中学”等高强度并行学习,是该产业形成正向设计能力的主要途径。

高铁装备产业的借鉴意义,在于明确四类关键因素的作用以及如何营造具备这些促进因素的制度与产业环境,而不在于对政府主导型技术追赶模式的简单复制。尽管“统一招标、单头对外、指定承接方和转让方”的顶层设计被视为中国高铁装备产业避开引进依赖陷阱的关键制度安排,但只有在同时满足市场规模、引进来源、技术周期、吸收能力等多种条件的前提下,这类安排才可能达成目标。(1)中国是高铁装备的最大市场,具有整合国内需求、提高买方谈判能力的天然优势。相比之下,石油装备、大飞机等产品的国际买家数量多、份额大,中国无法通过掌控最终市场附加技术转让条款。(2)拥有高铁装备技术的国际供应商较多,愿为争取订单接受技术转让要求。而很多装备制造部门或是面临长期、严格的国外技术封锁(如航空发动机),绝无技术引进的可能性;或是国内需求逼近国际技术前沿面(如特高压成套设备),缺少可供借鉴的成熟技术。(3)高铁装备是产品架构相对稳定的长生命周期产品,引进当代或前代产品可为国内企业赢得技术追赶必要(尽管依旧紧迫)的窗口时间。大规模集成电路等短生命周期产品部门则很难寻觅到类似机会,如没有持续稳定的大规模产业投资,难以通过技术引进在产品换代前完成从逆向工程到正向设计的转变。(4)高铁装备技术引进的成功离不开已有的知识基础。20世纪80年代原铁道部也曾两次组织机车技术引进,但当时铁路系统整体“技术水平还比较低下,要将引进技术大面积国产化的难度极大”(赵小刚,2014)。若没有20世纪90年代的知识积累,高速动车组研发人员不可能将嵌入在引进装备中的缄默知识迅速内化为正向设计能力。

2. 政策启示

针对中国装备制造业技术追赶在战略思路、资源配置、活动系统等方面的需求与缺陷,政府应通过引导和服务的方式,持续参与到中国装备制造业正向设计能力发展促进因素的积累之中。

(1)破除大量装备研发项目停留于首台(套)示范的现象,从扩大国内需求、分散用户风险的角度出发,加快自主设计装备的规模化商业应用。对大飞机、航空发动机等难以从资本市场获得足量产业投资的重大技术装备制造部门,长期维持甚至加强结构性支持政策,既要通过持续性的财政补贴、首台(套)保险等手段将自主设计装备“扶上马”,更要运用阶段性的销售保护、政府采购、出口信贷等手段“送一程”,增强自主设计装备的市场预期,甚至如原铁道部在高铁动车组招标中所做的那样,直接为国内后发企业创造初期市场。对产业资本门槛较低但市场不确定性同样很高的其他装备制造部门,以强化质量保证体系和风险规避机制为目标,尽快出台普惠性支持政策。相关政策不必制定支持目录,而应引导装备制造企业通过市场手段将自主设计新产品推向商业化。

(2)加大装备制造业专用性人力资本投资,预防复杂装备及其关联部门的专用性人才流失与断层,避免个人层次的激励不足影响产业层次的正向设计能力发展。受历史原因影响,国有企业无疑是目前中国复杂装备制造业专用性人力资本的蓄水池。近年来,中国装备制造业用人规模持续增长,但国有企业员工激励水平却有逐步下滑的趋势,人才流失特别是青年骨干流失加剧。针对这一现象,政府应加快推进国有企业考核体系和薪酬体系改革。短期来看,在保留工资总额限制的前提下,一方面应根据企业的实际效益和战略地位,为关键企业配备具有市场竞争力的工资总额;另一方面应在企业内部健全员工绩效动态考核机制,切实根据考核结果分配工资总额,以务实的态度最大化绩效薪酬的激励作用。长期来看,必须全面建立起基于硬预算约束的国有企业治理机制和管理体系,给予国有企业自行调整薪酬总额的权力,彻底消除员工

收入和激励水平之间的矛盾。需要注意的是,政府不应出于对国有企业人才流失的担忧而设置违背市场原则的流动障碍,致使装备制造业的人才吸引力下降,自主研发后继乏力。同时,政府也应以加强人力资本供给为目标,提高学科教育质量、激发青年投身装备制造类专业和相关高校培养更高素质新生力量的动力,在产业层次上保证人才梯队的完整性和自主研发的可持续性。

(3)建设行业试验平台与数据库,重塑共性技术供给体系,加强装备制造业跃升到正向设计所必需的试验数据与共性技术的积累和扩散。中国装备制造业的部门创新体系正由政府主导转向企业主导。这在总体上有利于提高创新效率,但也给硬件投资大、组织成本高的正向研发试验和溢出效应强、直接收益低的共性技术研究带来了投入不足的隐忧。政府应充分利用当前资金相对充裕和全球高素质人才快速流动的有利条件,尽快夯实公共性的行业试验体系与共性技术研发体系。首先,将各级公共性试验资源整合到行业试验平台之中,提供无利或微利的试验服务。其次,建设行业试验数据库,运用试验平台补贴附加要求(如部分数据公开要求)等措施,鼓励参试机构共享试验设计、试验数据、试验规范和试验技术,在全行业范围内增强知识积累和学习效应。最后,前瞻性地推进装备制造业共性技术供给体制改革,保证共性技术研发、扩散和共享过程中公共性和效率性的平衡。

参考文献:

- [1] Amsden A H. Asia's Next Giant: South Korea and Late Industrialization[M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [2] Arrow K J. The Economic Implications of Learning by Doing[J]. The Review of Economic Studies, 1962, 29, (3): 155 - 173.
- [3] Baldwin C, Clark K. Design Rules (Volume 1): The Power of Modularity[M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2000.
- [4] Baskaran A. Competence Building in Complex Systems in the Developing Countries: The Case of Satellite Building in India [J]. Technovation, 2001, 21, (2): 109 - 121.
- [5] Blomstrom M, Sjöholm F. Technology Transfer and Spillovers: Does Local Participation with Multinationals Matter? [J]. European Economic Review, 1999, 43, (4 - 6): 915 - 923.
- [6] Borenstein E, Gregorio J D, Lee J W. How does Foreign Investment Affect Economic Growth? [J]. Journal of International Economics, 1998, 45, (2): 115 - 135.
- [7] Cho H D, Lee J K. The Developmental Path of Networking Capability of Catch-up Players in Korea's Semiconductor Industry [J]. R&D Management, 2003, 33, (4): 411 - 423.
- [8] Cimoli M, Dosi G, Stiglitz J E. Industrial Policy and Development: The Political Economy of Capabilities Accumulation [M]. Oxford Toronto: Oxford University Press, 2009.
- [9] Evered R, Louis M R. Alternative Perspectives in the Organizational Sciences: 'Inquiry from the Inside' and 'Inquiry from the Outside' [J]. Academy of Management Review, 1981, 6, (3): 385 - 395.
- [10] Guinnif S, Ramani S V. Explaining Divergence in Catching-up in Pharma between India and Brazil Using the NSI Framework [J]. Research Policy, 2012, 41, (2): 430 - 441.
- [11] Hobday M. Innovation in East Asia: The challenge to Japan [M]. Aldershot, Hants: Elgar, 1995.
- [12] Johnson C A. MITI and the Japanese Miracle: The Growth of Industrial Policy, 1925—1975 [M]. Stanford, California: Stanford University Press, 1982.
- [13] Kim L, Lee H. Patterns of Technological Change in a Rapidly Developing Country: A Synthesis [J]. Technovation, 1987, 6, (4): 261 - 276.
- [14] Kim L. Imitation to Innovation: The Dynamics of Korea's Technological Learning [M]. Harvard Business Press, 1997.
- [15] Kim L. Stages of Development of Industrial Technology in a Developing Country: A Model [J]. Research Policy, 1980, 9, (3): 254 - 277.

- [16] Lee K, Lim C. Technological Regimes, Catching-up and Leapfrogging: Findings from Korea Industries[J]. Research Policy, 2001, 30, (3): 459 – 483.
- [17] Lee K, Jee M, Eun J-K. Assessing China's Economic Catch-Up at the Firm Level and Beyond: Washington Consensus, East Asian Consensus and the Beijing Model [J]. Industry and Innovation, 2011, 18, (5): 487 – 507.
- [18] Mathews J A. Strategy and the Crystal Cycle[J]. California Management Review, 2005, 47, (1): 6 – 31.
- [19] Methe D T. Moving into the Technological Fast Lane: From Reverse to Forward Engineering Through the Establishment of Innovation Communities in Korea[C]. Proceedings for Operating Research and the Management Sciences, 1995.
- [20] Mukoyama T. Rosenberg's "Learning by Using" and Technology Diffusion[J]. Journal of Economic Behavior and Organization, 2006, 61, (1): 123 – 144.
- [21] Perez C, Soete L. Catching up in Technology: Entry Barriers and Windows of Opportunity[A]. Dosi G, Freeman C, Nelson R, Soete L. (ed.) Technical Change and Economic Theory[C]. New York: Pinter Publishers, 1988.
- [22] Razavi H, Jamali N. Comparison of Final Costs and Undervalues between Reverse and Forward Engineering Products [C]. The 2nd International Conference on Engineering System Management and Applications, ICESMA, 2010.
- [23] Thomke S H. Managing Experimentation in the Design of New Products[J]. Management Science, 1998, 44, (6): 743 – 762.
- [24] Thomke S H, von Hippel E, Franke R. Modes of Experimentation: An Innovation Process and Competitive Variable[J]. Research Policy, 1998, 27, (3): 315 – 332.
- [25] Thomke S H, Reinertsen D. Unlocking Innovation Through Business Experimentation[J]. Harvard Business Review, 2012, 90, (5): 84 – 94.
- [26] Thomke S H. Experimentation Matters: Unlocking the Potential of New Technologies for Innovation[M]. Boston Massachusetts: Harvard Business School Press, 2003.
- [27] Von Hippel E, Tyre M J. How Learning by Doing is Done: Problem Identification in Novel Process Equipment[J]. Research Policy, 1995, 24, (1): 1 – 12.
- [28] Wade R. Governing the Market: Economic Theory and the Role of Government in East Asian Industrialization[M]. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1990.
- [29] Zhang W, Barbara I. Managing the Product Development of China's SPC Switch Industry as an Example of CoPS[J]. Technovation, 2001, 21, (6): 361 – 368.
- [30] 陈劲. 从技术引进到自主创新的学习模式[J]. 北京: 科研管理, 1994, (2).
- [31] 顾卫东. 我国汽车产业技术赶超的进入成本[J]. 北京: 经济管理, 2008, (1).
- [32] 矫阳. “中国面孔”是这样雕塑的[N]. 北京: 科技日报, 2011-10-22.
- [33] 路风, 蔡莹莹. 中国经济转型和产业升级挑战政府能力——从产业政策的角度看中国 TFT-LCD 工业的发展[J]. 北京: 国际经济评论, 2010, (5).
- [34] 路风, 封凯栋. 为什么自主开发是学习外国技术的最佳途径? ——以日韩两国汽车工业发展经验为例[J]. 北京: 中国软科学, 2004, (4).
- [35] 沈志云. 我的高铁情缘——沈志云口述自传[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2014.
- [36] 汪建成, 毛蕴诗. 技术改进、消化吸收与自主创新机制[J]. 北京: 经济管理, 2007, (3).
- [37] 魏江, 潘秋玥, 王诗翔. 制度型市场与技术追赶[J]. 北京: 中国工业经济, 2016, (9).
- [38] 魏少军. 2015 年中国集成电路设计业的发展情况[J]. 上海: 集成电路应用, 2016, (1).
- [39] 吴先明, 苏志文. 将跨国并购作为技术追赶的杠杆: 动态能力视角[J]. 北京: 管理世界, 2014, (4).
- [40] 徐雨森, 洪勇, 苏敬勤. 后发企业技术能力生成与演进分析——以中国华录·松下公司 DVD 视盘机产业发展为例[J]. 天津: 科学学与科学技术管理, 2008, (5).
- [41] 张米尔, 田丹. 第三方技术源对跨越追赶陷阱的作用研究[J]. 北京: 科学学研究, 2008, (2).
- [42] 赵小刚. 与速度同行: 亲历中国铁路工业 40 年[M]. 北京: 中信出版社, 2014.

From Reverse Engineering to Forward Engineering

——The Implications of High-Speed Railway Equipment Industry on Technological Catch-up and Independent Innovation in the Chinese Equipment Manufacturing Industry

LYU Tie, JIANG Hong

(Institute of Industrial Economics of the Chinese Academy of Social Sciences, Beijing, 100836, China)

Abstract: The capability of forward engineering decides to a large extent the level of autonomization and competitiveness of equipment manufacturing industries, in which final products are highly modular and providers of final products are more integrators than manufacturers. Most Chinese equipment manufacturing industries have gone through the stage of OEM and started OBM businesses, yet a large proportion of OBM enterprises rely on reverse engineering for product design. China witnesses a sharp increase in localization rates and global market shares of equipment products, whereas many providers of these products are not completely independent in the selection of core suppliers and are still under the control of overseas suppliers. Meanwhile, a handful of Chinese equipment manufacturing industries, such as the high-speed railway (HSR) equipment industry and the hydro-generator industry, have successfully established forward engineering capabilities in the past two decades.

Given the representativeness of the Chinese HSR equipment industry in terms of quick and successful shift from reverse engineering to forward engineering, this paper aims to explore the following questions: (1) What are the key factors contributing to this shift in the latecomer industry? (2) What are the influences of each factor on the establishment of forward engineering capabilities? (3) What are the boundary conditions under which these factors exert influence? Is it possible for other Chinese equipment manufacturing industries to replicate the story of the HSR equipment industry? To answer these questions, we conducted in total 37 focus group interviews with enterprise managers, R&D engineers, and lab workers in HSR equipment manufacturers and suppliers, as well as academic researchers, industry experts, and government officials who have been involved in HSR equipment development, manufacturing, and operation. These interviews were enriched by a broad search for secondary sources such as archives, newspaper reports, industry journals, yearbooks, and firm documents.

Drawing on a pre-developed four-dimension analytical framework and the data described above, we identify four key factors contributing to the rapid accumulation of forward engineering capabilities in the Chinese HSR equipment industry. First, the strategic orientation that emphasized commercialization and mass production of mature products, rather than small-scale production of experimental products, shaped the R&D efforts and the development of technological capabilities. Second, the continual accumulation of specific R&D human resources since the early 1990s and the government-led cross-sectional strategic collaboration collectively enhanced the resource base for capability building. Third, the ever-improving experiment conditions, experiment methods, and experiment organization kept the entire experiment system and the learning mechanism running at high efficiency. Fourth, the simultaneous introduction of different technological trajectories from three countries fostered intensive parallel learning – learning by experimenting, learning by doing, and learning by using, which accelerated the speed of learning and technological catch-up of the entire industry. In addition, we compare the Chinese HSR equipment industry with some other Chinese equipment manufacturing sectors to find out the boundary of our findings. It is found that the government should make efforts to build institutions and environments bearing the four key contributing factors above. However, the government-led mode of technology import and catch-up can only be replicated under particular conditions that are characterized by very large domestic market size, strong competition between incumbent firms, long technology life cycle, and existing absorptive capacity.

Key Words: forward engineering; technological catch-up; independent innovation

JEL Classification: L92, O33

DOI: 10.19616/j.cnki.bmj.2017.10.001

(责任编辑:王海兵)