

列)。那么，被大多数文献所回避的技术引进与自主开发之间的关系到底是什么？此外，国务院批准的2004年《中长期铁路网规划》被公认为是中国开始高铁建设的标志，但无论是在国家批复还是规划的文本中，通篇都没有出现“高铁”的字眼。事实上，高铁建设是到2009年才迎来第一个高潮，又在2011—2013年经历了一个低潮期，然后才逐渐进入至今尚未结束的又一次建设高潮。可见政府对于高铁的发展方针不但数次发生重要变化，而且“一贯正确”的含义是不成立的。面对如此之大的起伏和甚至带有“自相矛盾”色彩的变化，如果不去追溯这些变化及其变化顺序的原因，就无从识别中国高铁成功的关键变量。如果脱离了中國高铁发展过程的语境，回避关键时刻和关键事件，任何解释都会是不可证伪的。

本文的目的是为理解中国高铁发展的成功迈出可经受经验证据验证的一步。本文虽然把在过程中发生的转向自主技术开发和形成以高铁替代传统铁路的“方针”定义为决定中国高铁成功的两个直接变量，但仍然为讨论什么是影响这两个转变的因素留下余地。此外，本文集中关注高速列车的技术领域。高速列车是高速铁路大系统中的一个子系统，却是最具技术含量的核心系统，也是从国外成套引进技术的领域，而且是发生事故时被关注的焦点（因为载人）。因此，分析中国高速列车技术发展的原因，可以帮助理解中国高铁发展的主要问题。

文章余下部分安排如下：第二节讨论中国高铁技术的来源以及从引进转向自主开发的原因；第三节追溯中国铁路装备工业在长期自主开发中积累的技术能力基础及其与引进技术的关系；第四节分析中国走上铁路激进创新之路的过程和原因；第五节指出，从部门管理转变为系统集成是解开体制矛盾的关键；第六节是结论部分，同时讨论中国高铁发展经验对于理论研究的挑战。

5.2 中国高铁技术政策的演变

中国的高铁建设是从大规模技术引进开始的。从2007年4月的全国铁路第

六次大提速首次使用时速 200 公里及以上的动车组，到京津客运专线、郑西高铁、武广高铁等新建线路于 2008—2010 年的相继开通，中国在第一批建成的客运专线上投入运营的动车组全部是统一被命名为“和谐号”的引进车型及其改进车型。因此，中国高铁技术的源头很容易被认为是来自引进。但在上述第一批新建的客运专线尚未开通之时，中国高铁的技术路线已经转向自主创新。2008 年 2 月，中国自主开发的 CRH380 系列立项。该系列的两个车型 CRH380A 和 CRH380B 在 2011 年 6 月建成的京沪高铁上投入运营，而且立刻成为世界上运营速度最快的动车组。那么，为什么中国高铁技术的发展突然从引进路线转向自主创新？为什么尚未完成对外国技术消化吸收的中国工业能够自主开发新型动车组？分析这些“突变”和“断裂”的前因后果是理解中国高铁技术之源的一个关键。

5.2.1 高速列车的技术引进

实际上，把中国高铁技术的迅速进步归因于“引进、消化、吸收、再创新”的说法来自官方自己的解释。2011 年 6 月底，全长 1 318 公里、设计时速 350 公里的京沪高铁（总投资超过 2 200 亿元）开通，它是当时世界上最长、最快的高铁线路，而且投入运营的列车是中国自主开发的 CRH380 系列。根据当时铁道部的说法，在京沪线上使用的 100 列动车组“全部由我国自主开发制造，整车国产化率达到 85% 以上”。但这个成就也引来“羡慕嫉妒恨”。2011 年 7 月初，日本媒体质疑中国高铁技术是“盗版新干线”，并对中国可能在海外申请专利表示关切。

中国铁道部旋即予以反驳，称中国高铁技术已经远远优于日本新干线。铁道部新闻发言人向媒体介绍说，中国高铁研发坚持政府主导，构建了“产学研”相结合的再创新平台，在不到 6 年的时间内，跨越了 3 个台阶：第一个台阶，通过“引进、消化、吸收、再创新”，掌握了时速 200~250 公里高速列车技术，标志着中国高速列车技术跻身世界先进行列。第二个台阶，在掌握时速 200~250 公里高速列车技术的基础上，自主研发生产了时速 350 公里高速列

车，标志着中国高速列车技术达到世界领先水平。第三个台阶，中国铁路以时速 350 公里高速列车技术平台为基础，成功研制生产出新一代高速列车 CRH380 型高速动车组，标志着世界高速列车技术发展到新水平^①。

从这个由《人民日报》报道的解释看，中国高铁技术发展的“3 个台阶”是从技术引进开始，每一个台阶都是下一个台阶的基础。既然铁道部都这样说，难怪许多公众会把技术引进当作中国高铁技术发展的源头。具有讽刺意味的是，正是因为把引进说成唯一来源，所以后来才加重了公众对高铁技术的怀疑：中国怎么可能从引进自己本来没有的技术开始，只用 6 年时间就“跨越”到世界先进水平？

严格从理论上分析，这个说法包含了两个因果关系：第一，高铁技术的最初来源是引进；第二，能够“再创新”的能力是通过“消化、吸收”引进的技术而生成的。但是，如果仔细分析中国高速列车的技术变化，那么这两个关系都不成立。

2004—2006 年的大规模引进高速列车技术的主要内容是从 4 个外国企业购买了 4 个车型及相应的技术转让，它们被铁道部统一命名为“和谐号”，具体分为 4 个 CRH 系列（CRH 是 China Railway High-speed 即“中国高速铁路”的缩写）。

1 型车，即 CRH1，由铁道部从加拿大庞巴迪公司（Bombardier Inc）购买 40 列。由于这批列车是由庞巴迪在中国的合资企业生产，所以没有技术转让费。

2 型车，即 CRH2，以新干线 E2-1000 为原型车，时速 200 公里，由铁道部向日本川崎重工业株式会社（Kawasaki Heavy Industries Ltd.）订购 60 列，由南车集团所属青岛四方机车车辆股份有限公司（以下简称四方股份或四方）受让并国产化，支付技术转让费约 6 亿元人民币（不含购车费，下同）。

5 型车，即 CRH5，时速 250 公里，是从法国阿尔斯通旗下的阿尔斯通交通运输公司（Alstom Transport）引进，转让给北车集团所属长春轨道客车股

^① 铁道部称高铁研发实行举国体制 技术超日新干线 . (2011 - 07 - 08) . <http://news.sina.com.cn/c/2011-07-08/04252277122.shtml>.

份有限公司（以下简称长客），技术转让费为9亿元人民币。

3型车，即CRH3，时速300公里。2006年第二轮招标后，铁道部从德国西门子公司（Siemens AG）购买60列CRH3（总价6.69亿欧元），转让给北车集团所属唐山轨道客车有限责任公司（以下简称唐客），技术转让费为8000万欧元。

除整车外，还有配套牵引系统、制动等系统及部件的生产转让。5型车的转让给北车集团的四方所，3型车的转让给中国铁道科学研究院（以下简称铁科院）和北车集团的永济厂，2型车的转让给株洲电力机车研究所（以下简称株洲所）和北车集团的永济厂等企业。

所谓“转让技术”的内容是：（1）对中国购买的高速列车进行“联合设计”。这种“联合设计”不是外方与中方一起从头设计一种过去没有的新车型，而是双方对中方购买的国外车型进行设计修改，以使其能够适应中国的线路特点。（2）外方提供中方购买车型的设计图纸。（3）生产引进产品的工艺。这部分属于制造体系的一部分，也是中方受益最大的部分。（4）对中国工程师和技术工人进行培训。

外方向中方转让的技术是使中方能够把给定产品制造出来的技术，而不是怎样设计和开发产品的技术^①。在这种情况下，如果引进是技术的唯一来源，那么中国铁路装备工业后来的发展路径就应该是按照外国车型设计来制造，并通过引进新车型来进行升级换代。但中国后来再没有引进过外国车型，而中国

① 长客的一位技术管理者是这样介绍从西门子受让技术的：“我们拿到的全部是西门子的制造图纸，连一张三维模型图都没有。我们拿到的是设计结果，没有过程。我们拿到的是现场施工图纸。因此，初期工艺引进了，我们学会了怎样把现成的零部件装上，但怎么设计的不知道。引进对我们设计的影响，第一是通过制造技术的引进推进了设计的进展，主要是通过结果反向推论，这就和我们自己的能力基础有关，算是偷艺的过程，西门子不会告诉你的。另外，我们通过培训侧面了解一些”（长客访谈记录）。四方的一位技术负责人则是这样描述的：“在与川崎的合作上，我认为川崎是个好老师。四方派了一个设计团队在日本学习了半年，其中也有前后学习了1年的人。日方不是教你设计的方法——如为什么这么设计，而是教你读图。他们不会告诉你为什么电路要以这个逻辑关系设计出来，而是告诉你这个执行机构的作用，以及此后有哪几个步骤要懂。日方的培训很细致，对于每一个图上的细节都会告诉你起什么作用的，”

的高铁技术却在后来的几年中发展迅速。我们以四方股份负责的2型车为例，描述一下这种变化。整个变化过程分为两个阶段，即对引进技术的“消化、吸收、再创新”阶段和自主开发阶段。

第一个阶段其实走了4步。(1) CRH2A（本段中以下各型号省去CRH）是对川崎重工原型车的“国产化”型号，完成时间是2004—2007年。中日双方对该型号进行了“联合设计”，其内容是针对中国线路特点进行适应性修改。为给此车配套，株洲所受让日本三菱的牵引变流器等电气系统技术。(2) 2B/2E（长编组），2007—2008年完成。这两个型号的主要变化是把原型车的8辆车编组变成16辆车编组，为此进行了安全性和适应性改造。2E是在2B的基础上设计的，改进为卧铺车。(3) 2C-I，2006—2008年完成。此车是在时速200公里的2A平台上，为京津线开发的时速300公里动车组，主要变化是动力配置——动车数量从原来的4节增加到6节，牵引总功率提升到7280千瓦，其他变化包括对速度提升的安全性评估和舒适度评估，以及内装的适应性改造。(4) 2C-II，2008—2010年完成，用于时速350公里的武广线、郑西线。动车组改用更大功率的交流牵引电机，从内装、转向架到牵引系统都做了改进。特别要指出的是，2C（I、II）使用的牵引逆变器、辅助牵引变流器、通风系统及列车网络控制系统已全部由株洲所提供。

从上述变化的序列看，四方实际上在“消化、吸收”原型车技术的阶段就已经开始“再创新”了（如长编组和京津线动车组）。更令人感到“意外”的是，对2型车的改进还没有结束时，四方就进入了第二个阶段——自主开发阶段。2008年2月，四方根据国家立项开始为京沪高铁自主开发时速350公里的高速动车组CRH380A（以下简称380A）。2010年12月3日，380A高速动车组在京沪高铁枣庄至蚌埠段试验运行的最高时速达到486.1公里^①。同年12

^① 四方开发的CRH380A已经通过美国的知识产权评估。在四方跟踪美国加州高铁市场的过程中，考虑引进中国高铁技术的美方对知识产权问题非常重视，于是对四方的产品进行了评估，由四方提供自己的技术条件和设计方案，美方检索出来所有相关技术专利900多项，再找专业人士评估是否侵权。最后，美方评估的结论是四方的产品没有侵权，说明CRH380A的技术已经超过日本新干线技术。

月，由四方、株洲所等单位联合设计的时速 500 公里更高速度试验列车下线（滚动台试验达到时速 600 多公里）。这就是铁道部称“中国高铁技术已经远远优于日本新干线”的底气所在。

关键的问题是，380A 和 500 公里动车组是不是从对 2 型车的改进而来？业内公认，区别一列动车组的知识产权归属要看车头造型、转向架的构造、车体强度密封、网络控制系统和牵引系统。我们从这 4 个关键部分来解析一下 380A 的技术变化，以确定它与引进技术的关系。

1. 车头造型

380A 的头型是四方自己设计的，与 CRH2A 的头型完全不同。头型的重要性不只是为了美观，更与列车的空气动力性和安全性高度相关。四方开发该头型的过程历经 5 个步骤：（1）形成初步概念（形成图纸和模型）；（2）筛选出 10 个进行初步仿真分析、计算、验证；（3）从仿真模型中选出 5 个做风洞模型试验，并进行精细化计算验证和模型实物验证；（4）再从中选出 2 个做 1:1 实物的工艺验证；（5）最后选定 1 个投入生产。很明显，按照这个流程开发出来的 380A 头型，不但与世界上任何列车的头型都不一样，而且在开发的起点上连四方的工程师也无法预料结果。

2. 转向架的构造

转向架的设计是决定列车安全的保证，因为其功能包括承载、导向、驱动、制动和牵引。当列车时速从 200 公里变成 350 公里时，对构架的承载能力、车辆运行的安全舒适性、悬挂系统的防震减噪、轮轨和制动装置的关系等问题就都必须重新找到解决方案，而且要解决相关装置和系统之间的匹配问题。因此，380A 的转向架必须重新设计。设计转向架不但要求有足够的技术积累，而且要求理解技术的科学原理——动力学、结构强度、一系列刚度等，此外还要求使用新的材料。

3. 车体强度结构

在高速运行条件下，要保证车厢的安全气密性和舒适性，就要提高“气密承载能力”，其技术关键是车厢壁板的结构（壁板由双层铝合金板通过一定形状的金属结构连接组成，结构连接点的中间是空的）。由于气密强度和速度是

幂次方的关系，所以速度越高则压力越大。在高速运行中气流产生的载荷能力对车体产生压力，可能使车体变形，变形时间长了就会导致车体断裂。由于380A的速度远超过CRH2A，所以它的壁板必须由开发者通过试验测出速度数据，再根据这些数据进行全新设计。

4. 网络控制系统和牵引系统

380A的网络控制系统和牵引系统仍采用日系标准和系统架构，由株洲所负责系统设计、升级和集成，并完成新牵引模块、新功能单元的开发，包括部分控制软件的开发和全部软件的集成。网络控制系统的主要作用是：实现各动力车的重联控制；实现全车所有由计算机控制的部件联网通信和资源共享；实现全列车的制动控制、自动门控制、轴温监测和空调控制等功能；实现全列车的自检及故障诊断决策。株洲所和株洲电机公司为380A提供的牵引系统轴功率已经超过400千瓦，而CRH2A的功率不到300千瓦。牵引系统主要参数的显著变化意味着主要部件要全部重新设计，包括变压器、牵引变流器、电机等。

380A的网络和牵引系统采用日系标准，反映出总体设计者看重使用2型车的经验。因此，虽然所有的核心部分都必须重新设计，但开发者还是尽量将新车置于使用2型车的经验基础之上，毕竟四方股份在此之前缺乏设计和使用成熟动车组的经验。但是，这样做并非必然，因为株洲所拥有自主开发的网络和传动平台，采用与日系不同的标准，而且被用于时速500公里更高速度的试验列车，其牵引功率达到600千瓦。

通过上述对四方高速列车技术变化的描述，可以清晰地看出，380A与2型车之间存在技术上的“断裂”，即前者不能被后者所充分解释。因此，对于自主开发阶段是以“引进、消化、吸收”阶段为唯一基础的官方说法，在逻辑上存在一个巨大的“黑洞”，因为它没有解释两个关键因素：第一，中国企业能够迅速对引进技术进行“消化、吸收、再创新”的前提条件是它们在引进之前就必须具有强大的技术能力基础。第二，开发380A和新一代高速动车组使用了与引进无关的核心技术，说明中国工业在引进之外还存在另外的技术来源，而且是更重要的来源。那么，为什么铁道部在大规模引进时从未提到这个

能力基础？为什么在后来的官方宣传和解释中也对此含糊其词？我们把目光转向决策层次。

5.2.2 从引进路线到自主创新路线的“突变”

正如四方在尚未完成“消化、吸收”的阶段就开始自主开发 380A 所反映的那样，中国的高铁技术发展是从引进路线“突然”转向自主开发的。

在中国的体制下，有关高铁的“国家”是一个“中央决策层—铁道部”的结构。铁道部是高铁建设的政府主管部门，但同时也是高铁的唯一运营商和系统集成者。这个“双重”身份当然使中央决策层（以下简称决策层）与铁道部在动机和利害关系等方面并不完全一致，但决策层不但掌握着对铁道部官员的任免权，而且掌握着高铁发展的最终决策权，包括对用地、投资以及建设规模的决定权。打个不完全恰当的比喻，“中央决策层—铁道部”的结构有点像公司总部与事业部之间的关系。决策层在有关高铁的技术、建设和运营可行性方面依赖铁道部提供的信息和解释，但如果决策层在认知或政治考量方面发生变化，则在任何时点上都可以做出不符合铁道部意愿的决策。此外，为高铁发展提供主要设备的企业全部是央企集团，它们虽然是需要被系统集成者（铁道部）协调的企业，但同时也具有与决策层沟通的独立渠道，有可能影响决策层对于高铁发展方针的判断。虽然铁道部处于影响决策的最佳位置，但如何使决策层相信自己的解释则是它一直面临的挑战。因此，这个决策结构为有关高铁建设方针的变化留下空间。

中国对发展高铁的规划始自 20 世纪 90 年代初。在傅志寰任部长期间（1998—2003 年），铁道部布置了一系列高速列车项目的开发。到傅志寰卸任时，中国发展高铁的准备明显依靠自主开发的道路，但何时能够大规模建设高铁的前景并不明朗。当时，争论了十几年的京沪高铁还没有在国家计委（发改委）正式立项。不过，那段“徘徊”并非铁道部能够左右。2003 年之后，新的中央决策层决心上马一系列的重大工程（包括核电和大飞机），这是中国高铁起步的背景。2003 年 3 月，铁道部提出实现铁路“跨越式发展”的方针，力争

在5年内使全国铁路的“提速里程达到20 000公里，覆盖全国主要地区”，“京沪、京广、京哈、京九、陇海、浙赣‘四纵两横’等干线提速客车最高时速的目标是200公里，达到发达国家铁路既有线客车提速水平”；货车运行时速也要“由目前不足80公里提高到120公里，与客车提速相匹配”^①。

要在短期内实现大面积提速，就需要有马上可用的技术手段。于是，大规模引进高速列车技术就成为在短期内实现“跨越式发展”的选择。铁道部提出：实现我国铁路技术装备现代化，是铁路跨越式发展的重点所在。我们的目标应该是采用先进、成熟、经济、适用、可靠的技术。所谓先进，就是技术不复制落后，不重复落后，技术水平要赶上发达国家；所谓成熟，就是要用定型的技术，而不是在试用阶段的技术；所谓经济，就是不但购买价格要合理，而且综合成本比较低；所谓适用，就是符合我国铁路的技术要求；所谓可靠，就是技术装备性能稳定，质量良好，能够保证运输安全。我们要加快铁路科技进步，立足高起点、高标准，把技术引进与自主创新结合起来，使我国铁路技术装备早日达到或接近发达国家水平。这一方针应用在机车车辆领域就是，“以客运高速、快速和货运快捷、重载为重点，系统地引进发达国家机车车辆的关键技术，进行消化吸收和系统合成，加快对我们机车车辆制造业的技术改造，创造中国铁路的‘奥迪’‘别克’和‘桑塔纳’，实现机车车辆的更新换代”^②。

铁道部以“跨越式发展”的语言表达出技术政策原则，即通过引进外国技术来发展高铁，同时排斥正在自主开发的技术和产品，这样的技术方针只能把中国铁路装备工业变成组装外国产品的工业。

当然，铁道部并不是要以外国技术替代中国技术，而是要以引进现成技术的便捷方式来实现“跨越式发展”，而“跨越式发展”的目标恰恰也是中央决策层希望实现的。2004年4月，国务院主持召开了一次关于铁路机车车辆和装备现代化的会议，专题研究中国铁路的客运、装备如何快速发展，如何实现现代化。会议决定要在更高的起点上实现中国铁路的创新，提出了引进先进技

①② 铁道部：《在部长办公会议上的讲话提纲》，2003年3月24日，打印稿。

术、联合设计生产、打造中国品牌以发展中国高速列车和高速铁路的思路^①。至此，铁道部拉开了中国高铁建设的大幕——以建设客运专线的名义开始推进高铁的建设，同时以令人惊愕的“果断”下马了所有铁道部以前安排的研发项目，开始了大规模引进。

2004年4月18日，中国铁路实施了第五次大面积提速，几大干线部分地段的线路达到时速200公里的要求，提速总里程16500多公里。2007年4月18日，全国铁路正式实施第六次大面积提速，时速120公里及以上线路延展里程达到2.2万公里，比第五次大提速增加近6000公里，其中时速160公里及以上提速线路延展里程达到1.4万公里，时速200公里线路延展里程达到6003公里，京哈、京广、京沪、胶济线部分区段时速达到250公里。这次提速最大的亮点是时速200公里及以上的“和谐号”动车组投入使用。到2008年年底，全国铁路有480列时速200公里及以上的动车组上线运行，覆盖全国17个省区市。两次提速的效果实际上超额完成了预定目标。

如果铁道部在决策层尚未下决心发展高铁之际，提出以建设客运专线实现客货运分开的思路，并以建设和运营高速客运专线的业绩使决策层逐渐形成以高铁解决中国铁路运力不足问题的方针，那么中国铁路装备工业就会向组装外国产品并只能依靠引进来升级换代的模式演进，不可能出现后来那样的自主创新。如果中国工业真的变成组装模式，那么中国高铁技术的发展也不可能获得后来实际上获得的成就——380A一出世就超过日本技术水平的事实就是明证。因此，如果严格按照铁道部原定的引进路线，中国高铁技术可能达到的水平只能比后来实际达到的水平更低。

2005—2006年，中央领导人不断表达了自主创新的想法。尤其是在2006年1月召开的全国科技大会上，总书记亲口提出要建设“创新型国家”。这个方针是在最高政治层次上提出的，它一举改变了衡量官员政绩的标准或参照

^① 这个会议未公开报道，是央视节目中透露的。见《铁道部副总工程师解密中国高铁诞生幕后》（2008年10月3日央视《对话》，<http://news.sina.com.cn/c/2008-10-03/135516392550.shtml>）。

系。从此，铁道部再不提“跨越式发展”，也再不提“桑塔纳路线”。相反，铁道部不得不向自主创新路线靠拢，把高铁技术的发展描绘成“引进、消化、吸收、再创新”的模式就是出于这个原因。

2007年4月中国铁路第六次大提速之后，铁道部发动了一轮宣传攻势。这些由铁道部提供原始信息来源的报道有几个重点：（1）引进技术的策略。包括铁道部在2004年动车组招标文件中提出的“三个必须”——外方关键技术必须转让、价格必须优惠、必须使用中国的品牌。报道特别强调了在第一轮招标中，西门子因坚持高价被淘汰出局，后来在第二轮不得不降价的故事，以示铁道部的成就。（2）引进带来了技术和管理。引进动车组带来的不仅是产品和技术，更重要的是大幅提升了国内技术人员的研发和操作水平，为今后进一步创新打下了基础。（3）通过联合设计对引进的车型进行了修改，实现了再创新。例如，长客对引进的阿尔斯通原型车做了大量修改，几乎等于设计了一款新车（如原型车宽度只有2.9米，难以满足国内大运量的要求，中方把宽度增加到了3.3米，整整多出来一排座位）。当时已在京哈线上投入运营的5型车，整车专利属于中国。最突出的例子是四方股份在引进日本时速200公里动车组后，成功实现再创新，自主设计制造时速300公里级别动车组（即京津线动车组）。

从这些报道看，铁道部当时能够讲清楚的仍然只是“引进”，包括为什么要引进、引进的内容以及引进的效果；虽然也提到了对引进技术进行“消化、吸收、再创新”，但从来没有解释为什么能够“再创新”以及是怎样“再创新”的。实际上，如果铁道部当时能够讲清楚“再创新”的问题，就可以获得更大的宣传优势。问题在于，当时铁道部的决策者头脑中本来就没有关于技术能力的概念和逻辑，也就说不出什么。这就更加证明，自主创新是在铁道部决策者的思维框架和政策意图之外发生的事件。但铁道部为洗刷自己的名声，确实越来越强调自主创新，不但逐渐放松了对自主开发的限制，而且极力推进时速350公里的高铁的开发和建设，以证明自己的成就。

2007年夏天，国务委员陈至立在视察高铁建设时指示科技部领导要关心高铁技术的发展和自主创新。此后，经过一段时间的准备，科技部和铁道部于2008年2月签署了《中国高速列车自主创新联合行动计划合作协议》（以下简

称“两部联合行动计划”)。为了支撑京沪高铁的建设运营,该计划旨在尽快建立和完善具有自主知识产权、时速350公里及以上、国际竞争力强的中国高速列车技术体系的支持措施,为此提出了几项原则。第一项就是“坚持自主创新”,规定“在巩固发展既有引进消化吸收再创新成果的基础上,进一步加大自主创新力度,形成适合中国国情、路情的具有自主知识产权的时速350公里及以上高速列车技术体系……”。其他原则包括:“坚持支撑国家重大战略需求”,“坚持产学研用相结合”,“坚持动员和集成全国优势科研及产业资源”,“坚持培育与形成自主知识产权体系”。从这些表述看,以自主创新原则建设京沪高铁已成为决策层的既定方针。

回顾历史,两部联合行动计划实际上代表了中央决策层对原来由铁道部主导的高铁技术发展的重大“干预”。该计划支持下的CRH380系列开发是中国高铁技术发展史上的一个转折点和里程碑,扭转了中国高铁技术发展的方向。它堵死了继续依靠引进来升级换代高速列车技术的大门,否则时速350公里的京沪高铁就需要继续从外国企业购买升级版的车型。这个变化使中国铁路装备工业的技术能力基础再次发挥主要作用。

5.3 中国工业的技术能力基础及其与技术引进的关系

中国高铁发展令人“意外”的一个主要原因是其技术进步的速度超乎预料。例如,在引进初期,川崎重工认为四方对引进技术的消化吸收需要16年,即8年消化、8年吸收,然后才能达到可以创新的阶段^①。但预期的第一个8年尚未结束,四方自主开发的380A不但已经在当时运营里程最长的京沪高铁线路上投入运营,而且被公认是当时世界上最先进的车型。由于中国高铁技术来自“引进、消化、吸收、再创新”的说法完全不能解释这种“突然加速”的力量来源,所以必须分析中国铁路装备工业的技术能力基础及其与引进技术

^① 根据四方访谈记录。

系统，其间又与大学合作开发了微机诊断、事故记忆和显示功能。1991年，株洲所把“韶山4”型0038号机车改造成微机控制车，完成30万公里运用考核。这台机车于1992年年初在宝成铁路投入运行后，虽然微机系统的用户界面、抗干扰能力仍有不足之处，但控制性能已达到设计要求。1997年，微机控制系统被批量应用于“韶山8”。

中国的前三代电力机车的主力机型（“韶山1”“韶山3”“韶山4”“韶山8”等）都实现了大批量的生产，每一代的功率级别都比上一代有明显提高。“韶山4”以后的中国第三代电力机车在功率级上实现了系列化、型谱化。

第四代：交流传动、高速机车和试验动车组。

中国电力机车的高速化从1995年开始提上日程。由于直流传动限制了机车的功率，所以实现高速化就必须采用交流传动技术。

1. 从直流传动向交流传动的转化：铁道部的“十年转换工程”

交流传动技术（交—直—交）从20世纪70年代初开始在西欧研发。该技术把电网中的交流电经整流变成直流电，再通过变流器（亦称逆变器）把直流电转换为三相交流电（过滤掉电网的波动电流），然后驱动三相异步牵引电动机。由于变换后的电能可使电机的额定电压随电网电压提升而提升，所以交流传动可以大大提高电力机车的效率。随着大功率半导体器件从晶闸管到GTO（可关断晶闸管）再到IGBT（绝缘栅双极型晶体管）的发展，交流传动成为划时代的电力牵引技术。

在外国的技术封锁下，株洲所自20世纪70年代就开始进行交流传动的理论研究和试验，在1989年完成当时国内最大功率（300千瓦）交流传动系统试验研究（包括整流器、变流器、异步电机和晶闸管等全部自主开发）。在铁道部组织的技术攻关中，株洲所于1995年开发出1000千瓦交流传动系统。1996年，该系统被装在株机厂和株洲所共同研制的AC4000（4根轴，每轴1000千瓦）交流传动原型车上。此车是试验车，但它对中国掌握交流传动技术具有里程碑式的意义。受这一成功的鼓舞，1998年铁道部决定加快交流传动技术的研发，争取到2008年实现转型，这被称为“十年转换工程”。

就在这个关键阶段，西门子利用中国政府鼓励引进外资的政治导向，企图

通过与株机厂建立合资企业的方式“封杀”中国交流传动技术的发展，即中方不得在合资企业之外再研发和生产交流传动的机车，而且还要限制株洲所。对于不同意这个条款但又必须根据政治需要与西门子建立合资企业的中方来说，使对方让步的关键就是尽快开发出自己的交流传动机车，打破对方以为可以垄断中国技术发展的想法（赵小刚，2014）。

1998年5月，广铁集团宣布建成中国第一条高速铁路广深线（时速200公里），因外国车太贵，便主动邀请株机厂研制动车组。为了给中国尚在开发的交流传动系统提供高速列车的基础，铁道部和株机厂通过国际招标，从总部设在柏林的安达公司（Adtranz）购买了10套交流传动系统，其中2套用于时速200公里的机车“九方号”，8套用于开发时速200公里的动力集中式动车组“蓝箭号”。

由于那时中国铁路还没有时速200公里的运行经验，使用了铁道部组织改造的一台“韶山8”的传动比和气动布局，由长客、四方和浦镇各提供一辆拖车，于1998年6月21日在京广线许昌至小商桥段进行高速试验，试验时速达到240公里。这是中国人第一次体验到时速200公里以上的国产车。这次试验采集了上亿个实验数据，增强了高速列车开发者和用户的信心，“九方号”和“蓝箭号”均于2000年研制成功，在广深线投入商业运行。

到1999年，株洲所完成1000千瓦级交流传动系统及GTO变流器、IGBT变流器等部件的研究。在此基础上，株机厂于2001年研制出“奥星号”高速机车，实现了交流传动、牵引电机和微机网络控制系统的自主化。此后，株洲所的系统又装在株机厂向哈萨克斯坦出口的电力机车上。“奥星号”生产了3台，在2005年完成100万公里考核后被废弃。

2. 高速动车组的研制

中国研制动车组的时间比一般人想象的要早得多。中国第一个电力动车组KDZ1是由长客、株洲所和铁科院于1988年研制成功的，试验时速143公里。但当时铁道部认为，动车组运输方式不适合国情，决定不鉴定、不推广，动车组最终被送返长客封存（后来成为研制“春城号”和“长白山号”的经验基础）。

“九五”期间，铁道部立项研制不同的高速概念车。株机厂于1999年牵头制成一系列直流传动的动力集中式动车组“大白鲨”（与商业化的“蓝箭号”几乎同步），株洲所在该车上首次实现中国动车组的微机网络重联控制。浦镇车辆厂牵头研制动力分散式动车组“先锋号”，使用了日本三菱电机的交流传动系统。该车于2001年出厂后在广深铁路线进行试验性商业运营，曾在秦沈客运专线上创造了当时国内最高时速292.8公里的纪录。

1998年，铁道部实施市场化改革，获得更大采购权的地方铁路局也出现订购动车组的热潮。除了“蓝箭号”，1999年4月交付的“春城号”动车组是由长客联合株洲所为云南省承办的昆明世界园艺博览会专门开发的，采用直流传动。1999年10月，郑州铁路局定制的“中原之星”动力分散式动车组正式立项，由株机厂、四方厂和株洲所联合开发，采用了株洲所的交流传动系统。该车于2001年9月与前述“奥星号”同时在株机厂下线，后在郑州—武昌线投入运营，时速160公里。

1999年8月，铁道部开工建设全长404公里的秦沈客运专线（2003年10月建成），同时提出为该线研制时速270公里的动力集中式动车组。该项目由国家计委立项，命名为“中华之星”，2001年开始研发。该车由株机厂负责总成，有一前一后两个动力车，拖车由四方和长客制造，交流传动系统和控制系统由株洲所提供。2003年1月至2004年12月，“中华之星”在秦沈客运专线累计运行53万多公里，冲刺试验达到321公里的时速。

2000年，铁路装备工业系统脱离铁道部并重组为直属国资委的南、北车两个集团后，上述国家立项的动车组都落入南车集团，于是北车集团自投资金，由长客开发时速200公里的“长白山号”动车组，它的制动、牵引和控制网络等3个系统从国外购入。该车于2004年9月在秦沈客运专线跑出254.5公里/小时的试验速度，2007年2月正式在沈大线运营。

以上内容由图5-1概括。2003年铁道部决定大规模引进技术之后，上述所有的高速机车和动车组项目都被迫退出历史舞台。

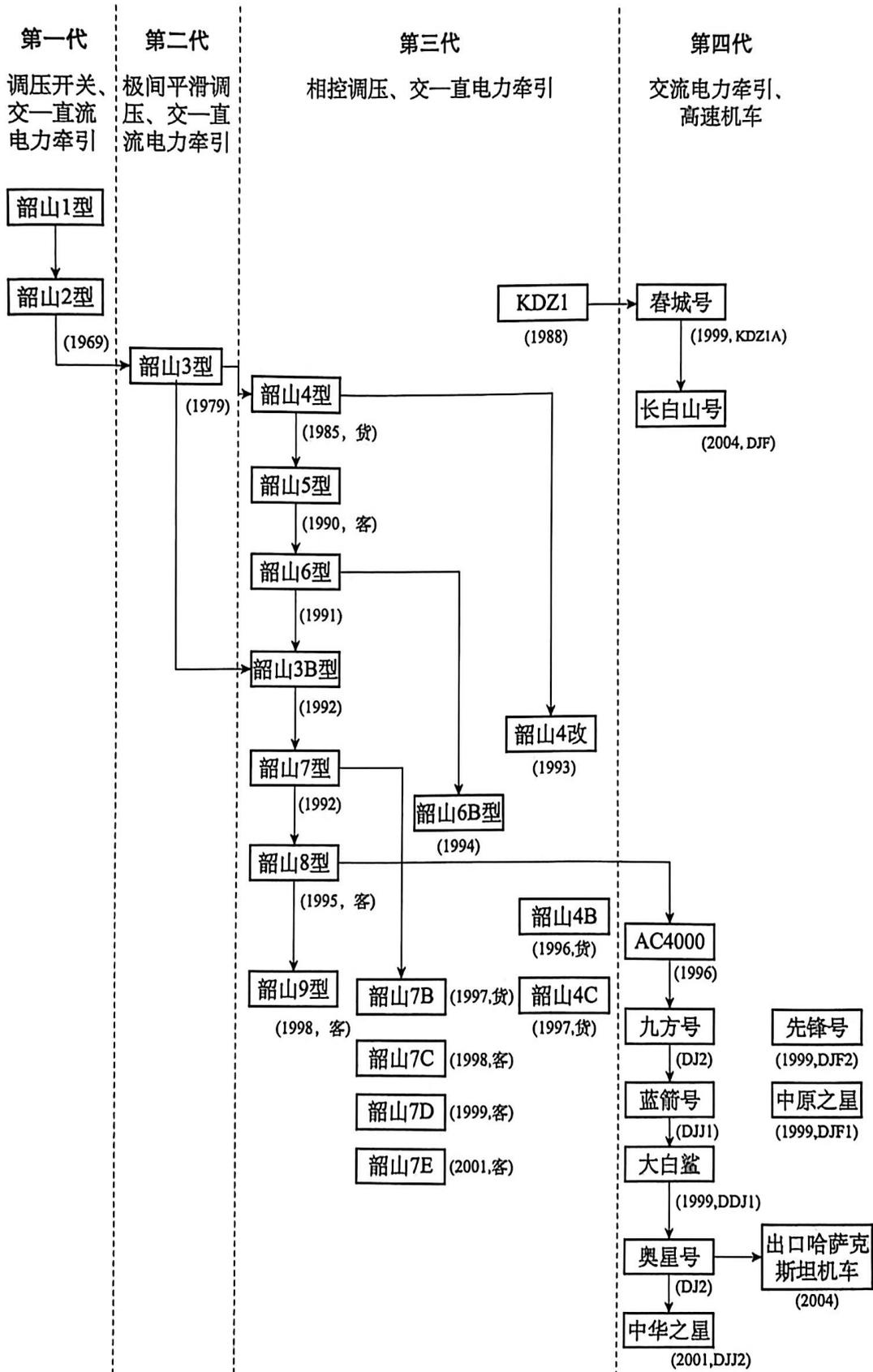


图 5-1 中国四代电力机车发展史

5.3.3 大规模引进与中国工业技术能力之间的互动

为分析中国铁路装备工业的能力基础与引进技术之间的互动机制，我们引入产品开发平台的概念框架（路风，2018）。这个框架的中心思想是：由于技术能力的成长离不开产品开发活动，所以分析产品开发平台的构造可以帮助理解技术能力的发展机制。产品开发平台包括三大要素：（1）产品序列。（2）专业研发团队。（3）技术支持系统。技术支持系统又分为：有形的技术支持系统，包括工作设施、工具和工程试验设备等；无形的技术支持系统，即积累起来的经验知识以及使之能够发挥作用的组织程序；外部技术支持系统，如外部供应商网络以及与研究机构的合作关系。因此，产品开发平台是一个包含了工作对象（产品序列）、工作主体（专业研发人员）和工作支持系统（设备和经验知识）的有组织的活动系统。

中国工业在大规模引进之前已经具有较强的技术能力基础，体现在能够在几十年里向铁路提供产品的开发平台。这说明中国工业已经具有正向设计产品的能力，并非像一些学者认为的那样，即这种能力是在引进之后才生成的（吕铁、江鸿，2017）。铁道部的大规模引进曾经使外国产品一度把自主开发的产品替代掉，但在引进路线很快被扭转的条件下，自主开发的新产品又使外国产品退居次要地位。这个短暂的变化如图 5-2 所示。技术引进只发生在产品开发平台的“产品序列”部分，没有或没来得及改变这个技术活动系统的其他部分。随着重新开始自主开发，“产品序列”又恢复了自主的性质，于是产品开发平台保持完整并继续发挥作用。在这种条件下，引进的“技术”只能通过与该技术能力基础的互动才能发生作用，这是其负面作用被抑制而正面作用被发挥的关键条件。

给定上述条件，在中国大规模建设高铁的前夜，技术引进起到两个自主开发尚未起到的作用：第一，使中国工业获得了完整的产品（高速列车）经验；第二，促使中国工业建立起现代化的制造体系。

关于第一个作用，说明如下：

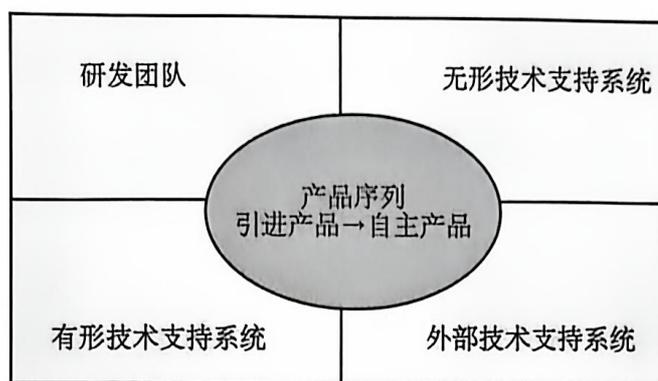


图 5-2 技术引进后的产品开发平台

虽然购买的外来产品设计只是信息，但如果能够理解其背后的因果关系，中国企业就可以节省为自主设计出一种完整产品而必须探索所有未知因素的时间。“完整”是指，由所有的技术方案组成的产品设计是基本成熟的、可靠的，而此前还在开发中的自主产品尚未成为完整的工作对象。产品开发平台被保持下来的关键作用是：中国技术团队已经具有对高速列车设计中的因果关系的认知，所以当他们在复制的意义上掌握引进的产品设计之后，他们也必然以自己的理解产生新的知识和技能。中国企业本来就具有开发高速列车的知识和技能，只是还缺乏将其做到可以投入运营的完整开发经验。一旦它们重新自主开发新产品，从理解成熟产品获得的新知识和技能就被补充到它们已有的知识和经验积累之中，它们则能够根据新的目标开发出不同于引进方案的新产品设计（拥有知识产权是其标志）。因此，花钱引进的实际作用是使外国企业把成熟产品的设计和制造信息向中方披露，使中方有机会去理解其中体现的完整经验。因此，中国高铁技术的飞速进步并非技术引进所直接导致的，而是中国工业的产品开发平台迅速吸收了外国设计所体现的经验，并将由此产生的新知识补充到自己原有的能力积累之中，再通过自主开发实现的。四方股份从“消化、吸收”2型车技术到开发出世界领先的380A的过程，完全印证了这个因果关系——引进的车型与新车型之间的确存在联系，但不是在技术上（因为380A的所有技术都必须自己做出来），而是在经验上。

上述分析可以解释为什么技术能力是不可能“引进”的，因为在特定开发实践中不断探索的研发团队及其成员之间的默契是组织特定的，不可能买来；

由经验知识和组织特定的流程所构成的无形技术支持系统是不可引进的；没有组织特定的团队和无形技术支持系统，本来可以构成有形技术支持系统的硬件设备也不过是一堆废铜烂铁，不能成为“系统”。这也印证了国际创新文献的主流看法：只有在技术引进是自主开发的补充而不是替代物的条件下，引进技术才能起到正面作用。

关于第二个作用，说明如下：

技术引进对于中国高速列车制造的提升作用是业内公认的。中国企业在引进前的制造过程普遍粗放，而生产引进车型的要求促使它们对制造体系——生产流程、质量保障、物料供应、操作规程——进行了大规模重组。不过，正如长客总工所讲，并不是中国人自己想不出应该怎样建立高效的制造体系，而是传统的观念和组织习惯阻碍了技术人员的努力。因此，这场重组并不是技术本身促成的，而是伴随着引进计划而来的大规模投资和自上而下的严格要求一扫这些障碍，迫使企业从领导到工人都接受改造。

制造能力和水平的提升对设计和产品开发没有直接作用，但当中国企业重新开始自主开发后，高质量的制造体系也就成为自主产品可靠性的保证。四方的负责人曾经解释说，在引进之前，企业长期进行自力更生式的产品开发，具有较强的解决问题能力，但研发的严谨性、制造和质量管控体系与外国企业有较大差距。在引进过程中，为制造引进产品而进行的体系建设，唤醒了企业整体的体系意识，促使企业重塑包括研发在内的各个体系。在新的经验和体系的基础上，新一轮的产品自主研发使企业的能力得到空前提高。

中国高铁技术转向自主开发之后的一个巨大变化体现在“外部技术支持系统”方面。在计划体制下，每个工业部门都有自己的研发体系，原来铁路装备的研发合作都是在铁路行业的科研体系之内进行的。这种格局在实施两部联合行动计划时被打破，国家科技计划（863计划、973计划、支撑计划等）以几大主机厂及其数百家配套企业的产品开发为落脚点，在高铁技术的关键领域布局项目，承担这些研究项目的机构包括大学、科研院所、国家级实验室和工程研究中心。长客开发的380B就是由中科院力学所对其设计进行了风洞试验，这是长客当年在开发“长白山号”时没有做过也没有认识到其意义的事。

总之，大规模技术引进的确起到了正面作用，但能够如此的原因却是全盘引进路线又被中央决策层扭回到自主开发路线上。因此，无论从历史经验上讲，还是从理论逻辑上讲，把“引进、消化、吸收、再创新”说成中国高铁技术迅速进步的唯一来源是不成立的。

5.3.4 两员“女将”的故事

有两位女工程师的故事^①生动地说明，中国铁路装备工业能够对引进技术进行“消化、吸收、再创新”的能力来自引进之前的产品开发能力和技术积累。

第一位是长客的总工程师赵明花。赵明花于1986年大学毕业后进入长客工作，一直是设计工程师。从1990年代末到21世纪初，赵明花主持了“春城号”和“长白山号”两个动车型号的设计开发。当铁道部为大规模引进而从线路上撤下“长白山号”并封存时，赵明花想不通为什么要放弃自己开发的产品而去引进外国产品。也许与此有关，她没有参与（或没有被允许参与）2004—2006年的大规模引进，也没有参与外方的培训。长客在“消化、吸收”从阿尔斯通引进的5型车（即CRH5）时遇到严重困难，出了许多问题，并因进展缓慢惹怒了铁道部，导致总经理被撤换。2007年，赵明花在长客最困难的关头被任命为技术负责人。正是在她的技术领导下，长客的“5型车”才顺利出厂。赵明花后来成为长客开发380B的项目负责人。

第二位是四方股份的副总经理梁建英。梁建英于1995年从上海铁道学院（后并入同济大学）毕业后进入四方工作，一直从事设计和产品开发。因为休产假，梁建英与赵明花一样也没有参与2004—2006年的大规模引进，没有参与对CRH2A（川崎重工的原型车）的“消化、吸收”过程，也没有接受过日方的培训（虽然她说“图纸还是要看的”）。但是从CRH2B开始，梁建英就成为后面所有型号的技术负责人之一，并且担任CRH2C的主任设计师和新一代动

^① 两个故事的信息来自2013年年初我们对长客和四方的访谈，两位人物的职务指的都是当时的职务。

车组 380A 的总体设计师。

很显然，这两位女工程师的能力都不是“技术引进”的“产物”，但她们都是对引进技术进行“消化、吸收、再创新”的主将和高手，而且分别是 380 系列两个车型的总师。因此，她们体现了中国铁路装备工业的产品开发能力。有意思的是，在我们的访谈中，赵明花和梁建英都把自己的能力看作理所当然。但对于第三方的观察者来说，她们的存在本身就是一个独立变量——她们的能力是独立于技术引进过程的自主开发经验的产物。当我们追问梁建英为什么当时公司领导会选中没有参与过引进的她来负责改造引进产品的总体设计时，她有点迟疑地回答：“可能是因为我有以前做过系统设计的经验吧。”可以肯定，梁建英能够对引进技术“动刀子”的资格是在此前的自主开发过程中获得的，也说明企业领导在选择技术负责人时所必然遵循的原则——有没有自主开发的经验比是否受过外方培训更重要。

从自主开发过程中成长起来的技术人员有着不依赖别人的习惯。赵明花反复告诉我们：“铁路人没有依靠国外技术的习惯。”还是在对 2 型车进行“消化、吸收、再创新”的阶段，有一次当梁建英问一位设计师为什么那样做时，对方回答说：因为日本人就是这么给的。梁建英大怒：“下次当我再问你为什么的时候，你如果再说就是因为日本人这么写的，我就让你们写检讨！”她认为，如果不思考为什么，就会造成思想上的惰性，老是说“因为日本人这么写的”就不会有进步，如果真的说不出为什么，就必须通过试验把原因验证出来。据她讲，在引进时，很多中国年轻设计师都会产生这种倾向，不得不纠正了很长时间。这说明引进容易造成依赖的心理和习惯。那为什么梁建英在面对日本人的方案时仍然要问“为什么”？她的回答是：“我长期从事开发工作，一毕业就来厂做研发，在工作中必须问‘为什么’，这是一种养成的习惯。”

两位女总师的经历和业绩生动地证明：中国铁路装备工业在引进之前就具有产品的正向开发能力。

5.3.5 自主技术的重生

技术能力基础不但在吸收引进技术上发挥了作用，而且也使自主研发的技

术在度过“灾变”后再次迅速进步——株机厂和株洲所的经历充分证明了这一点^①。这两个中国铁路装备工业的重要企业在铁道部大规模引进时受到系统性的打压，被排斥在2003—2006年所有有关引进的会议之外，只是因为它们在那个关头不识时务地没有拥护铁道部确定的引进路线。在大规模引进中，国产电力机车“韶山”系列被停产，株机厂被指定“消化、吸收”引进的机车，与动车组无缘；而株洲所被指定“消化、吸收”2型车的牵引和网络控制系统，与机车无缘。于是，两个企业的市场被大幅压缩。

2004年年底，铁道部从德国西门子、法国阿尔斯通和日本东芝分别引进电力机车（同时也引进内燃机车，本文不涉及），并相应命名为“和谐号”D1、D2和D3。（1）D1是对西门子EuroSprinter原型车的重新命名，它是8轴双机重联交流传动电力机车。虽然指定株机厂负责对其“消化、吸收”，但铁道部一次就进口了180台原装车，并没有给株机厂留下什么市场空间。（2）D2是由大同电力机车厂“消化、吸收”法国阿尔斯通的8轴交流传动电力机车。（3）D3是由大连机车厂“消化、吸收”日本东芝的电力机车。2007年，铁道部再次购买了500台西门子的6轴电力机车，命名为D1B，由株机厂按铁道部“以我为主”的要求进行总体设计。此外，大连机车厂负责“消化、吸收”庞巴迪的货运机车，命名为D3B型。至此，已经谱系化的“韶山”系列电力机车（还有“东风”系列内燃机车）全部停产。

铁道部分两次购买的西门子机车全部使用原装的交流传动系统。如前所述，株洲所自主开发的交流传动系统和网络控制系统是随着在AC4000、“奥星号”、“中原之星”、“中华之星”和出口哈萨克斯坦电力机车等产品上的应用而开始产业化的。当铁道部废弃这些产品后，株洲所的核心技术立刻丧失了应用机会，面临绝境（赵小刚，2014）。可见，如果铁道部原定的引进路线持续下去，中国的电力牵引核心技术将重演运-10被抛弃的命运。

^① 株洲还有一家重要企业，即株洲电机公司，它是2004年合并株机厂的电机分厂、变压器分厂和株洲所的电机部分而成立的，主要提供牵引电机和变压器。限于篇幅，本文没有对它单独介绍。

2008年年末，铁道部同意南车集团和株机厂提出的开发6轴7200千瓦交流传动货运电力机车的建议，并允诺400台的订单（赵小刚，2014）。在项目启动会上，株机厂提出的第一技术方案是与株洲所合作并采用中国的交流传动系统，这就是D1C，它与购买自西门子的D1、D1B毫无关系，实际上拥有韶山“血统”。但是，因为当时铁道部坚持任何产品开发必须与“引进、消化、吸收”国外先进技术联系在一起，所以为D1C提供了交流传动系统和网络控制系统的株洲所不得不“造假”，把三菱电机的专家拉过来做方案评审，让他们签字以认定该方案属于联合设计，结果弄得日本人还很不乐意：“不是自己设计的东西怎么去认可呢？”这是中国铁路装备工业在大规模引进之后最大的一次“技术造假”，只不过是把自己的原创技术说成源自引进。

D1C的开发创造了业内奇迹，仅用6个月就完成从设计、试验到装车的流程，于2009年6月份下线交付使用。这个机车为株机厂赢得了巨额订单，到2012年年底已经出厂约1500台，远超所有其他型号的机车。相比之下，从西门子引进的D1和D1B，没生产多少就因卖不出去而停产（价格贵得多，事故率更高）。拥有韶山“血统”的D1C的出色市场业绩，可以说是中国50年电力机车自主开发的能力积累对“引进是唯一技术来源”迷信的一次“示威”。尤为重要的是，D1C使株洲所自主开发的交流传动系统和网络控制系统第一次实现了大批量产业化。

2012年，株机厂又开发了D1D型准高速交流传动客运电力机车；同年，为神华集团研制的大秦线2万吨重载机车开始交付。此后，株机厂又开发了“深度国产化”的8轴双机重联交流传动电力机车，这款被命名为D11的重载机车目前已经成为株洲厂的主力产品。这一系列的事实证明：没有全盘技术引进，株机厂在电力机车领域照样可以达到世界先进水平，有能力“按照客户的要求开发产品，不管是4个轮子、6个轮子还是8个轮子，也不管对车体宽度有什么要求”^①。

株洲所因为主要为列车提供核心系统，所以比整车制造企业更少为人所

① 根据株机厂访谈记录。

知，但它的倔强也不亚于株机厂。即使在铁道部废弃所有的中国车型和核心系统后，株洲所仍然坚持自主创新，于2006年完成1200千瓦IGBT牵引传动系统的开发，后来又有了1600千瓦的系统。这些技术在国家转向自主创新方针后，迅速支持了高速列车的自主开发。2008年，株洲所抓住全球金融危机带来的机会，收购了英国电力半导体公司丹尼克斯75%的股权。2014年6月20日，株洲所投资16亿元在株洲建成中国第一条8英寸IGBT芯片生产线，使它的电力牵引技术达到芯片级。今天，株洲所生产和销售的电力牵引变流器超过世界上任何企业。

株洲所以对列车网络控制的研究早于中国对动车组的研发，从1987年起就开始研发列车微机控制系统，1992年用英特尔的486CPU搭建了列车网络平台，1997年开始研究具备网络通信、车载控制以及诊断等功能的网络技术，而且一直跟踪欧洲标准。株洲所长期自主研发的网络控制系统比从日本引进的2型车网络平台更具有优势，网络化结构更先进。日本的网络化结构是按照20世纪70年代美国军方的ARCNET标准开发的，到引进时就已显落后。在为2型车开发“备胎”时，株洲所以自主技术研制了完整的替代系统。株洲所在电力机车和时速500公里超高速试验动车组上采用的是具有完全自主知识产权并符合欧洲标准的TCN技术，与日本技术无关，同时引入了更有发展潜力的工业以太网技术，进一步加大了领先优势。今天，株洲所的网络化控制平台更加开放，其硬件和软件（包括底层驱动、中间件软件和应用软件等）全部是自主开发，可以开放给第三方应用，整车企业可以在这个平台上编写自己的应用软件。株洲所的网络控制系统已经达到世界先进水平，广泛应用到机车、城轨车辆、高速动车组和城际动车组上。中国是最新的10G以太网协议的发起国之一（发起国包括欧洲一些国家和日本），而株洲所是中国唯一参与单位。株洲所已经成为世界交流传动和列车网络控制领域少数几个拥有自主技术的企业。

5.4 中国铁路激进创新的动力

中国是世界上第一个也是迄今唯一展示出以高铁替代传统铁路趋势的国

5.5.1 开发标准动车组背后的动机

中国高铁技术发展的最新重大事件是中国标准动车组的开发。不过，在产品和技术换代的背后，也包含着中铁总重夺高铁技术主导权的动机。

标准动车组项目由铁道部从 2012 年开始组织有关制造企业、高校和科研院所讨论概念，南车、北车都是发起方。这一情况出现的背景是：中国高速列车技术在经历了最初阶段的发展之后，确实面临着统一标准的需要。例如，分别从 4 个外国企业引进的车型不但各有标准，而且也存在对中国应用场景的适应性问题；自主开发的 380A 和 380B 也不能重联，车上的很多技术配置（如座位的摆放）和主要的产品配套规格也不一样，带来很多运营管理上的不便。于是，在统一标准的前提下开发新一代动车组逐渐被提上日程。但在今天中国标准动车组的成就受到广泛宣传时，需要指出一个被掩盖的问题：中国的动车组之所以曾经是不标准的，原因就在于大规模引进。

标准动车组的开发显然是一个在目标、做法和利害关系等方面发生过变化的演进过程。在 2013—2014 年相继完成总体技术条件制定和方案设计后，时速 350 公里的标准动车组于 2015 年 6 月 30 日正式下线。2017 年 6 月 25 日，中国标准动车组被正式命名为“复兴号”，两款时速 350 公里的车型 CR400AF 和 CR400BF（分别从 380A 和 380B 的技术平台演进而来）于第二天在京沪线正式双向首发。2017 年 10 月，中铁总宣布正式启动时速 250 公里的“复兴号”的研制工作。2018 年 12 月，中铁总公布了“复兴号”的车型谱系，包括 3 个速度等级：时速 350 公里的 CR400、时速 250 公里的 CR300 和时速 160 公里的 CR200。目前，“复兴号”已经全面上线，逐渐替代掉以前的各种动车组，380 系列也已经停产。在整体技术指标上，“复兴号”动车组保持着世界先进水平。

不过，开发标准动车组也成为中铁总重夺高铁技术主导权的过程。在项目早期阶段，由于南车、北车两个集团的车型存在差异，所以在确定技术方案时存在着争论。这些争论只有铁道部/中铁总能够“裁断”，因为它是唯一的用户，也只有它能够主持新车型的运行考核。尽管统一标准本身并不意味着系统

集成者一定要主导列车技术的开发，但随着项目的进展，中铁总逐渐成为组织者和技术决策者，采取的方式是：先由中车集团下属的企业向中铁总报送关键的技术规格和参数，再由中铁总通过铁科院的评审来决定是否采纳。因此，中铁总的作用并不限于制定接口标准以及从运营服务角度提出指标要求，而是通过“统一标准”来决定高速列车的所有技术方案。

主导高速列车技术可以收获很大的政治效果，因为列车不但是高铁系统最重要的技术领域之一，而且是公众形象最明显的技术领域。回顾历史，即使铁路装备工业早已从铁道部分离出来，铁道部还是通过2004—2006年的大规模引进完全主导了铁路机车车辆的技术发展路线，其动机很大程度上是为了政绩。在那个过程中，铁道部直接安排制造企业的引进、制造和销售，在决策上把南北车两个集团挤到边缘地位。当中央决策层以2008年开工的京沪高铁建设为契机，把高铁技术发展的方针定为自主创新后，铁道部的主导权被限制。特别是在2011年刘志军案和“7·23”事故之后，铁道部的谨小慎微反倒凸显了科技部在推动高铁技术进步上的作用和地位。当中铁总从高铁低潮期的打击中逐渐恢复过来后，开发标准动车组就成为重夺主导权的机会。

科技部对于开发标准动车组持不同立场，认为380系列已经在自主创新上达到相当的高度，本来应该在这个基础上继续进步，而回过头来做标准动车组实际上又回调了一些性能指标。这个立场同样包含着对政绩的考虑：把“复兴号”当作新一代动车组，那会不会否定科技部支持“和谐号”380系列的政绩？当然，历史是无法否定的，尤其是技术演进的历史。科技部支持开发的380系列是中国高铁技术发展的转折点和里程碑，它扭转了组装外国车型的引进路线，使中国企业完成了开发高速列车的全流程并诞生了跻身世界先进行列的380动车组，也使中国工业的产品开发平台得到巩固和提高。没有这些进步，标准动车组是开发不出来的。但是，在中国的体制下，部门之间的“摩擦”和“政绩竞争”仍然是现实，标准动车组的开发确实又把科技部挤到边缘位置。

在对中国标准动车组的广泛宣传报道中，官方媒体显然根据中铁总的消息来源将其解释为“由中国铁路总公司牵头组织研制、具有完全自主知识产权、

达到世界先进水平的”车型，开发的目的是“打造适合中国国情、路情的高速动车组的设计、制造平台，实现高速动车组技术全面的自主化”。于是，“复兴号”就成为中铁总以“总设计师”身份领导的新一轮自主创新，它既可以把全盘引进和科技部支持自主开发的历史“翻页”，又可以让中铁总重新主导高速列车的开发。这个主导权还有助于中铁总推行一项“总体战略”。2018年11月，一家中国媒体在报道株机厂开发出口动车组（详细介绍见下文）时援引一位“中铁总人士”的话说，中国标准动车组的研制目的就是要提升中国企业在国际市场上的竞争力，以高速动车组出口为突破口，带动工务工程、牵引供电、通信信号、运营管理等成套技术走出去，为中国高铁海外战略目标提供技术支撑。该人士说：“在高铁走出去项目上，我们不仅仅是车辆某一个项目的走出去，要做到全产业链走出去，因此必须遵循中国标准，不宜自立门户。”^①

于是，就技术创新而言，有关高铁体制的一个关键问题是：高铁的系统集成者与高速列车的开发者之间应该是什么关系？

5.5.2 高速列车开发企业的独立作用

为回答上述问题，我们沿着 5.3.5 那部分的内容，再次回顾株机厂的创新历程所提供的经验证据。在那个非常困难的阶段，因为仅靠消化吸收西门子机车无法生存，株机厂开始在铁道部的“势力范围”之外寻找市场，主要有两个方向：国内城市地铁市场和国际市场^②。正是在国际市场上，株机厂创造了两

^① 路炳阳. 株机研发新高速动车：不属复兴号系列 中铁总不持态度. 中国经营报，2018-11-24. [http://finance.sina.com.cn/roll/2018-11-24/doc-ihpevhck3959716.shtml? cre = tianyi&mod=pcpager_society&loc=4&r=9&doct=0&rfunc=3&tj=none&tr=9](http://finance.sina.com.cn/roll/2018-11-24/doc-ihpevhck3959716.shtml?cre=tianyi&mod=pcpager_society&loc=4&r=9&doct=0&rfunc=3&tj=none&tr=9).

^② 地铁建设归口建设部和发改委，各城市对于地铁车辆的采购都有自主权。株机厂早在 2001 年就开始生产地铁和城轨车辆，逐渐在传动系统、网络控制系统、电机和变压器等核心部件上都实现了自主化（主要由株洲所提供）。到 2013 年年初，生产地铁车辆的产能已经占到株机厂总产能的 30%~40%，而株洲所的牵引系统长期占据中国地铁市场的 60%。在国际市场上，2009 年 10 月，株机厂战胜庞巴迪和阿尔斯通，获得土耳其伊兹密尔 3.5 亿美元的轻轨列车订单。2012 年和 2014 年，株机厂又分别获得土耳其安卡拉市的 25 亿元人民币的地铁车辆项目和安卡拉地铁 3 号线订单。株机厂同期还向印度的新德里、孟买和古尔冈 3 个城市出口了地铁设备。

项可以回答我们问题的重要业绩：南非机车和出口动车组。

2012年10月，株机厂击败8家竞争对手，获得南非国家交通运输集团(Transnet)的95台21E型电力机车订单，价值近4亿美元。这是南非首次从中国采购机车，也是中国电力机车首次登陆非洲，同时也是当时国内企业获得的最大的电力机车海外订单。这款机车非常难做：(1)南非铁路是“窄轨”(轨距1065毫米)，对机车的平衡性、稳定性要求更高；(2)由于南非铁路的电网是25千伏交流电压和3千伏直流电压交错，所以要求机车采用“双流制”，在电压交错路段进行电流切换并保持运行；(3)电力机车不仅要能实现8台机车重联，还要与内燃机车重联(在某些上坡的路段需要内燃机车的助推)，为此需要由电力机车向内燃机车发送无线指令(以配合增减速)。毫无悬念，这么复杂的“双流制”电力牵引系统是由株洲所提供的——没有做过从直流到交流的全部传动系统的企业连门都摸不着。南非原来使用欧洲的蒸汽机车和内燃机车，用上中国的好车后就再也受不了旧车了。2014年3月，Transnet宣布株机厂中标南非“史上最大”的机车采购招标，合同金额21亿美元，包括新购349台22E型机车以及增购100台21E型机车(22E比21E的马力更大)。到2018年年末，南非铁路上跑的机车已全部是株洲电力机车，采购总量达到544台。此后，株机厂又得到一个维修保养的大单，加上此前的机车销售，株机厂在南非的销售规模已达人民币200多亿元。

株机厂最令人意外的业绩是创造了中国动车组的出口第一单。2011年7月，株机厂获得近40亿元人民币的38列马来西亚城际动车组(动力分散式)大单，用于吉隆坡最繁忙的南北城际线运营。这些动车组的时速是160公里，却是在“米轨”上运行的，相当于标准轨(轨距1435毫米，中国采用)的时速300公里动车组。2012年10月，株机厂又与马来西亚捷运公司签订安邦线20列120辆轻轨车辆销售合同。2015年7月，株机厂的东盟制造中心在马来西亚建成投产，它是中国铁路装备的首个海外制造基地。2017年4月，株机厂又从马来西亚交通部获得13列混合动力电动车组和9列现代超级动车组两个项目22列动车组订单，订单金额折合人民币13.2亿元。同年8月2日，由株机厂牵头组成的联合体与马来西亚国家基建公司签署了吉隆坡轻轨三号线42辆列

车的供应合同。株机厂已成为马来西亚轨道交通装备发展最大的推动者，提供了其市场份额 80% 以上的产品。

2015 年 11 月，株机厂向马其顿交付首列符合欧洲铁路互联互通技术规范（TSI）的动车组。该项目的 6 列时速 160 公里动车组由马其顿国家铁路公司于 2014 年 6 月与株机厂签约订购，将在贯穿马其顿南北并途经首都斯科普里的既有线上运营。该线路全长约 215 公里，承担马其顿国内 80% 的铁路运力。目前，株机厂正在完成多个欧洲订单（包括俄罗斯、奥地利、塞尔维亚、马其顿），为此还开发了双层动车组。

株机厂的出口动车组与铁道部引进的动车技术没有任何关系——株机厂既没有接受过动车组的技术引进，同时也被排除在中国的高铁市场之外。那么，它凭什么本事会成为第一个出口动车组的中国企业？

株机厂开发高速动车组的技术能力来自被铁道部废弃的自主开发动车组的经验——它的出口动车组（动力分散式）是基于“中原之星”的技术平台开发出来的；“复兴号”谱系中的“绿巨人”动车组（动力集中式）也是由株机厂基于“中华之星”的技术平台开发出来的^①。实际上，在铁道部决定大规模引进时，“中原之星”已经投入运营，而“中华之星”的技术已经趋近于成熟，只是为了全盘引进而将其强行废止。尽管产品被废弃，但通过自主开发积累起来的知识、经验和技能未灭，通过开发两个车型建立的技术平台还在，于是“老兵不死”——原来“中原之星”和“中华之星”都没有“死”，而是在新一代产品上获得重生。

只要有能力，创新就没有止境。近年来，株机厂首创多款新产品。2012 年 8 月，株机厂开发出世界首台超级电容储能式电力牵引轻轨列车。这款车利用城市轻轨规律性站停的旅客上下车时间，在站台只需要充电 30 秒就可以支持列车行进到下一站（超级电容的特性是能够瞬间充电，而储存时间很短）。由于线路上不需要架设电网，所以这种轻轨交通节约道路用地，可实现与公路交

^① 中铁总将“绿巨人”的生产重新分配，由株机厂和大连机车厂制造动力车，客车则由其他车辆厂制造。

中国高铁已有的成就是在不完美的体制下取得的，但要想使这个成就延续下去，就需要让这个体制更完美。如果当事主体不能靠自己的力量改进，就有理由以国家的力量迫使它们改进。

5.6 讨论和结论

本文的目的是通过分析性地追溯中国高铁的实际发展过程，为从理论上讨论这项伟大成就的原因提供一个可验证的经验性研究基础。本文的分析起点是界定中国高铁能够被公认为成功的两个关键因素——以自主创新为主的技术进步和以高铁替代传统铁路的激进创新道路。但是，这两个因素在开始建设高铁的起点上并不存在，而是在此后的过程中才出现的。因此，它们也就被本文定义为过程性变量。正是通过对这两个“转变”的描述和分析，本文揭示出在解释中国高铁的成功时被广泛忽略的因素——中国铁路装备工业的技术能力基础和国家对于发动铁路激进创新的关键作用。这些分析否定了“引进、消化、吸收、再创新”是中国高铁技术进步之源的流行性说法。

本文认为，采用事后解释无助于理解中国高铁发展的成功。所谓“事后”，指的是对事件的成功或失败已经形成基本社会共识之后。相应地，“事后解释”指的是研究者并不深入观察和分析事件的发展过程，而是从事后的结果出发，为其原因“找出”一般性的解释。事后解释有两种表现。

第一种表现是以事后表现出来的做法作为事件成功或失败的解释变量。例如，从中国高铁发展的“事后”看，国家或政府发挥了重大作用——既引进了技术又实施了自主开发，等等，于是就有文献对这些成功因素进行罗列。但这种解释无法说明这些做法之间的关系，更不可能说明行动主体为什么会采取这些做法。例如，把中国高铁的技术进步归因于“引进、消化、吸收、再创新”的说法就是对技术引进和自主开发两种做法的罗列，它既无法解释为什么中国高铁发展会在特定时刻从技术引进转向自主开发，也无法解释两者之间的关系对于技术进步的作用是什么。

第二种表现是以“普世真理”的框架来解释事件的结果。例如，在主流经济学的框架下，既然经济激励和有利于市场交换的制度重要，那么从这个框架出发，中国高铁的成功就一定是做对了这些事。这种解释似乎没有错，但也没什么用（严格地讲是无法证伪），因为它无视在特定语境下影响了事件结果的特定变量。例如，与中国汽车工业相比，以央企为主的中国铁路装备工业在市场化和经济激励的程度上都更低，但中国社会对后者的成功形成共识，却对前者充满争议。事实上，铁路装备工业与其他任何中国工业一样，都处于基本相同的制度框架或条件之下，因而很难以制度来直接解释特定工业在特定阶段发展绩效的差异。如果限定时间和空间，那么脱离工业发展特定过程的制度解释不过是常量解释变量。

称之为“事后解释”，是因为这些解释只能在事后做出，否则没有意义。例如，在中国社会对于高铁充满争议的阶段，仅仅罗列高铁建设的实际做法并不能证明这些做法是对还是错，而“普世真理”对于一个充满不确定性的演进过程更是无关痛痒。换句话说，事后解释因为脱离对于特定行动的理论判断而缺乏预测能力，也就无法回答中国高铁发展在某个关头面临的特定问题——技术发展是应该走引进路线还是自主开发路线？政府是应该加大投入还是谨慎为之？为什么高铁的未来作用在很大程度上取决于系统层次上的创新，而在系统集成者和技术开发者之间形成稳定的创新边界是改进体制的关键？等等。因此，事后解释者没有能力参与政策辩论，只能等待结果形成之后才能采取立场。此外，事后解释因为忽视在实践中产生的特定问题，所以无助于找到通向理论创新的“桥梁”。更重要的是，因为事后解释脱离了特定事件的特定过程，所以其最终不能帮助识别决定事件结果的关键变量。

中国高铁在短短十几年里取得的伟大成功是行动所造就，尤其是被那些符合正确原则的行动所造就。中国高铁的建设发生于中国经济高增长的年代，铁路运输的瓶颈和国家投资能力的增强为发动高铁建设提供了条件。这个过程虽然是从大规模引进技术开始，但在国家层次上发生的一次回归“政治正确”的变化又把高铁的技术进步重新置于中国工业的能力基础之上，使技术引进成为自主开发的补充而不是替代，而国家对铁路（系统）市场的集中控制保证了中

国工业的技术学习过程；一旦高铁的发展绩效得到证明，中国就在特定的条件下和特定事件的触发下走上以高铁替代传统铁路的激进道路，随之而来的大规模建设为中国工业提供了持续技术创新的应用机会，而且是世界上独一无二的机会。回顾这个过程，令人惊奇的不是其发展速度之快，而是这些行动竟然“碰巧”地组合起来（速度是这个组合的结果）。本来其中的单独每一个充其量只是个必要条件，但在特定的条件下，这些因素“鬼斧神工”般地组合在一起，它们的共同作用构成一个强大的充分条件，使中国高铁的发展产生出领先世界的势头。理解产生这个组合的原因才是解释中国高铁成就的关键，也是把“教训”结合进有意识的政策中的关键。

行动当然涉及行动者的动机。在高铁发展的过程中，铁道部有动机，中央决策层有动机，企业有动机，所有参与的个人也有动机。但是，如果把这些性质不同（政治、部门和企业）、层次不同（组织和个人）和作用不同（思考宏观经济政策和个人多挣点奖金）的动机都归于以个人效用函数来衡量的经济激励，那么这个由行动者在一系列政治、经济和组织因素的影响下选择战略的过程就变得不可理解，顶多是事后画的一幅漫画^①。事实上，囿于静态均衡框架，主流经济学在过去和现在都没有能够成功地解释过技术进步，尤其是像中国高铁那样的重大技术成就，而且如果它坚持这个框架，将来也不会。毕竟，如肯尼思·阿罗本人所言，“但当然，由知识和程序的连续转变所包含的动态性并没有进入阿罗—德布鲁的世界”（Arrow, 2006）。对于理解充满不确定性的创新过程，个人经济激励的解释完全无法替代从战略、组织和技术创新等领域去理解行动及其后果的理论。

本文从中国高速列车的开发绩效与“技术来源于引进”说法之间的矛盾切入，然后通过追溯铁路装备工业的历史和高速列车的技术变化过程，证明引进不是中国高铁技术进步的唯一来源，而且只是因为政治变化重新确立自主创新的方针，才使引进产生了正面作用。这个分析建立在国际创新学界的主流理论基础之上，同时也以“产品开发平台”的概念框架进一步揭示了引进与自主开

^① 对主流经济学关于经济激励假设的批评，见 Simon (1991)。

发之间的作用机制，更加充分地证明中国高铁的技术成就源于自主开发的努力。但是，本文对于中国形成铁路激进创新的原因只有描述性的概括，并没有做出进一步的理论贡献，其原因之一是这个现象的新颖性——只是最近几年的有关经验证据变得明显时，笔者才可能“发现”这个问题。这也说明，对于中国高铁为什么成功的研究还有很大的空间。在未来这个方向的理论探讨中，最具挑战性的议题是国家作为创新者的命题。就中国高铁发展所揭示出来的国家作用来看，除了本文涉及但没有深入探讨的制度条件外，对于理解中国走上铁路激进创新的原因，还有3个因素也是值得进一步深究的。

一是意识形态对于决策的影响。在本文追溯的过程中，一个重大事件是中央决策层在2006年提出自主创新方针，它改变了高铁的技术路线。虽然本文无法专门讨论这个政治变化，但可以指出一个现象：在中国的政治体制和社会中，存在一种根源深厚的“政治正确”——如果中国高铁技术不是以自主开发为主，那么中国社会就不会认为它是一项伟大成就。对于一个发展中国家来说，存在这样的民意基础并不寻常。事实上，21世纪初中国从大规模引进技术开始发展高铁并非“意外”，因为它反映了决策层当时的政策倾向，例如同期中国发展核电的计划也是从大规模引进开始。给定那时中国已经在依靠引进技术的道路上走了20多年的背景，应该令人“意外”的反倒是为什么会发生这种政治变化。由于变化本身不能解释变化，所以在技术政策从自力更生摆向依靠引进再摆回自主创新的变化背后，一定是存在更深层次的因素。本文姑且把这个因素称为由开国一代领导人奠定的大国基础结构，它既包括政治和经济的制度框架，也包括相应的意识形态根源。因为中国共产党夺取政权的道路是依靠独立自主，中华人民共和国的奠基是依靠独立自主，中国工业体系的建立是依靠独立自主，所以“独立自主”就成为这种“政治正确”的意识形态根源。这种基础结构与政治权力的合法性如此密切相连，致使有关改革的最“激进”的政策主张也始终不能突破由其所决定的框架。因此，每当中国被迫回答根本性的问题时，这种意识形态根源就会使政策摆回独立自主的方向。没有这个条件，也就没有国家成为创新者的决策基础。

二是国家作为行动者的意义。国家行动的必要性在于发动根本性的技术变

化（如以新能源替代传统能源），因为市场机制难以提供发动这种变化的动力。美国建设高铁的困难其实来自错综复杂的利益关系对发动大型基础设施建设的制约，这个障碍回应了美国经济学家奥尔森关于分利集团阻碍经济发展的经典主题（Olson, 1982）。由于这个主题暗示分利集团也是市场经济的产物，所以如果国家不能行动，则一个经济体的技术进步终将受阻。在中国，虽然曾经出现过铁路“市场化”的议论，但只是当国家承担建设的高速铁路形成网络效应之后，地方政府和社会资本（大致相当于市场力量）才可能进入这个领域。目前时不时被议论一下的铁路部门高负债，只不过反映了高铁投资的回报期超长。当高铁建设的结果是优良资产时，当这些资产属于国家时，那么，由拥有货币发行主权的国家来发动这种建设不是最合理的吗？事实上，中国能够以激进方式大规模建设高铁的重要原因是国家成为具有战略远见的决策者、长期风险的承担者和技术创新网络的创造者。“政府—市场”的二分法无助于理解这个问题，因为它无关真实世界。因为“市场不可能做到一切”与“国家不可能做到一切”同样真实，所以更可能富有成效的研究方向是“政府—市场”在推进技术创新过程中的互相渗透，而不是互相画地为牢。

三是激进创新的效果。如果国家作为创新者的行动具有经济合理性，那么中国铁路激进创新就至少能够成为一个正面的证据。当然，在高铁的效果尚未充分显现的条件下，本文只能以预言但符合逻辑的方式来陈述。铁路是现代经济体必不可少的大型技术系统，它对国民经济的影响是全局性的。在世界上第一个铁路网（美国）建成大约 150 年之后，中国以高铁替代传统铁路的意义不会亚于第一次建成铁路网对于那个时代的意义。一些人以美国因航空业发达、人口密度小等“资源禀赋”条件而不需要高铁为由，贬低中国高铁技术进步的意义。但仅仅就技术而言，高铁技术影响到重载货运、地铁和城际轻轨（如动车组以及通用的电力牵引、网络控制、电网、道床乃至智能驾驶等技术）。因此，在高铁技术领域的落后将阻碍在轨道交通所有领域的技术进步——这个前景将会变得越来越明显。更重要的是，以高铁替代传统铁路包含着现代意义上的“互联互通”含义，这与通信技术领域的 5G 在本质上具有相同的含义，所以高铁是通向新工业革命的基础设施之一。国际主流创新文献公

认，激进创新带来的大部分经济收益是在漫长的后续改进过程中才得以全部实现的。因此，我们今天对于中国高铁成就的讨论只不过是在见证一个新时代的开始。

中国高铁的发展对于中国学术界的终极教训就是：中国正在创造历史，大量新的实践层出不穷，它们不断突破已有理论所能够解释的范围。因此，我们面对的是一个高度动态的过程——仅仅在几年之前，包括本文作者在内的所有人还都不可能意识到中国高铁的发展是一场激进创新，只是因为实践尚未至此。因此，学术研究应该是一个发现的过程，而不应该是自认为不用做足够的经验研究就可以用现有的（实际上是古老的）理论框架解释一切的“智力特权”。

参考文献

中文文献：

程鹏，柳卸林，陈傲，等，2011. 基础研究与中国产业技术追赶：以高铁产业为案例. 管理评论，(12).

冯灵，余翔，2015. 中国高铁破坏性创新路径探析. 科研管理，(10).

贺俊，吕铁，黄阳华，等，2018. 技术赶超的激励结构与能力积累：中国高铁经验及其政策启示. 管理世界，(10).

江鸿，吕铁，2019. 政企能力共演化与复杂产品系统集成能力提升：中国高速列车产业技术追赶的纵向案例研究. 管理世界，(5).

李浩鸣，邓晓丽，2009. 追寻轨迹 1959—2009：南车株洲电力机车研究所有限公司变革求新发展之路. 长沙：湖南大学出版社.

林善波，2011. 动态比较优势与复杂产品系统的技术追赶：以我国高铁技术为例. 科技进步与对策，(14).

林晓言，张爱萍，郝亚平，2017. 中国高铁技术创新三螺旋理论研究. 北京交通大学学报（社会科学版），(2).