

# “国之重器”如何突破关键核心技术： 系统架构二元性<sup>\*</sup>

□ 欧阳桃花 曾德麟 郑舒文

**摘要：**“国之重器”实现关键核心技术突破，是打破国际封锁、保障战略安全与引领产业升级的核心命题。“国之重器”属于典型的复杂产品系统，然而，现有研究很少将其内部不同系统层级的开发作为独立的分析单元展开探讨。为此，本文基于系统架构视角，以中国载人航天工程与中国盾构机工程为案例，揭示其突破关键核心技术背后的共性逻辑。研究发现：载人航天以“总体系统稳定性”筑牢安全底线，以“关键系统突破性”驱动技术迭代；盾构机则以“总体系统突破性”打破垄断，以“关键系统稳定性”保障工程落地的同时推动国产化替代。由此本文提出系统架构二元性这一机制，即“国之重器”突破关键核心技术的内在逻辑是面向不同系统层级实现“稳定性”与“突破性”的辩证统一。进而尝试定义两类“国之重器”即服务国家战略的安全导向型和应对技术封锁的市场驱动型，并从技术风险性、市场差异性和行动逻辑性三个方面识别了系统架构二元性面向不同类别“国之重器”发挥差异化作用的边界条件。这一发现不仅为技术进步与后发追赶理论贡献了中国经验与智慧，也为我国破解“卡脖子”难题、以“国之重器”带动科技自立自强提供了实践参考。

**关键词：**国之重器；关键核心技术；系统架构二元性；载人航天；盾构机

## 引言

“国之重器”立足于国，造福于民，不仅事关国运国脉，而且关乎民族兴衰。党和国家领导人多次强调核心技术是“国之重器”，装备制造业是“国之重器”，重大科技创新成果也是“国之重器”，都要牢牢掌握在自己手里。新中国成立后，围

---

<sup>\*</sup> 本文作者衷心感谢本刊编辑部对文章的邀请以及对文章的宝贵建议和悉心修改。

绕国家重大战略需求，载人航天、高铁奔驰、C919一飞冲天等一批“国之重器”着力攻克关键核心技术，抢占事关长远和全局的战略制高点。这不仅为我国经济的繁荣发展和社会稳定进步提供了重要的安全保障，也为中华民族伟大复兴奠定了战略基石。不可否认的是，当下仍然存在诸如高端芯片、操作系统等关键核心技术被国外“卡脖子”的困境。换言之，我国关键领域核心技术受制于人的格局还没有完全改变。因此，总结中国较为成功的“国之重器”关键核心技术突破之道，将有助于为破解“卡脖子”困局、推动科技实力从量的积累迈向质的飞跃、从点的突破迈向系统能力提升，提供理论依据与实践启示。

从理论来看，“国之重器”符合复杂产品系统的基本定义，即高技术、高价值、单件或小批量定制、工程密集的大型产品、系统或基础设施（Hobday, 1998）。虽然现有研究已认识到了复杂产品系统自主开发对关键核心技术突破的重要推动和牵引作用，但整体来看多将复杂产品系统视为一个整体，进而关注该整体以外的因素如政府干预（陈劲等，2020）、创新网络（杨瑾和于妍惠，2022）、关键市场、核心用户（胡旭博和原长弘）以及组织学习（胡登峰等，2022）等方面对于关键核心技术的突破机理。这类研究忽视了复杂产品系统内部的复杂性，即复杂产品系统具有多层级特征（Hobday, 1998），存在于产品内部不同系统层级的多样化复杂性问题是制约技术突破的原点（Walker et al., 1988）。因此，有必要把复杂产品系统的内部开发单独作为一个过程加以分析（路风，2018）。而架构理论是聚焦于产品内部“分解与

链接”的设计思想（Ulrich & Eppinger, 1995; Ulrich, 1995; 藤本隆宏, 2002），有助于解释产品内各系统层级如何实现灵活顺畅和相互协调（Henderson & Clark, 1990），进而打开产品内部的“技术黑箱”。但传统的产品架构理论在应用中尚未加入“多层级系统”的意识而仅强调多个平行关系的组件与功能的映射关系。为此本文引入“系统架构”这一概念，将组件进行层级化设定，即一个用来执行基本功能的主集成（如后文里中国载人航天工程的“总体系统”）和一套支持这一集成的次集成（如后文里中国载人航天工程的神舟飞船“关键系统”）（郑舒文等，2024）。这些不同的集成块和它们之间的联系共同形成了一个系统架构，由此实现了技术的组合进化（阿瑟，2014）。因此“系统架构”的新视角，有助于回应本文所探讨的关键核心技术突破这一议题。

综上所述，本文旨在溯源关键核心技术突破相关理论的基础上，选择具有典型性的“国之重器”案例如中国载人航天工程以及中国盾构机工程，基于系统架构视角探讨“国之重器”何以突破关键核心技术。

## 一、关键核心技术突破的理论探讨

“何以突破关键核心技术”这一话题的理论根源还要追溯到技术进步与后发追赶等相关理论。因为，关键核心技术突破从本质来看是技术进步与后发追赶的具象化体现。

### （一）何为技术进步

技术进步作为驱动经济增长的根本动力，

受到经济学界、管理学界的持续关注。相关研究呈现出从技术外生性向内生性（Durlauf et al, 2001）、从重视有形资本投入（如资金、劳动力）向无形资本存量（如知识和人力资本）、从简单产品创新向复杂产品系统开发演进的基本态势（Uzawa, 1961；Change, 1990）。

其中，技术进步的内生性作为学术界对技术进步的普遍性认知出发点，其由内而生的过程和机制受到关注，阿罗的“干中学”模型和宇泽弘文的两部门模型（Arrow, 1962；Anzai & Simon, 1979），从内生技术进步视角修正了外生技术进步模型<sup>①</sup>。其研究将技术进步视为资本积累的副产品，即不仅厂商的投资及社会劳动资源的投入可以提高生产效率，劳动资源的“学习”也可以提高生产效率。然而，这一视角仅将技术进步定义为劳动生产率的提高，忽视了其作为产品质量改进和新产品诞生的重要表现形式及其背后动因。而罗默的内生增长论，则强调知识和人力资本存量的重要性，指出创新能使知识成为商品，人有意识的行为有助于带来新产品（Romer, 1990）。

后续主流研究更进一步提炼了技术进步的关键问题，强调经济行为因应激励结果（黄冬娅等，2021）。激励因素维度可分为解释技术进步的宏观维度与微观维度。宏观维度包括国家层面整体技术差距、环境参数调节对后发国家技术追赶的影响（黄先海等，2017），以及市场层面竞争机制、需求规模对创新活动的激励（Utterback, 1974；范红忠，2007）。微观维度则指向企业视角和网络视角，关注创新主体内部

的学习行动、组织结构变革以及主体间互动的结果（欧阳桃花等，2015；柳卸林和葛爽，2023）。

## （二）后发国家的技术进步：技术追赶

从现代世界经济发展史看，美国追赶英国（1870—1913年）、日本追赶美国（1953—1992年）和亚洲“四小龙”追赶西欧国家（1960—1995年），每一次跨越无不是技术进步推动的结果。21世纪伊始，随着以中国为代表的新兴经济体的崛起，学者们开始关注后发国家技术进步模式。相较于先发国家技术进步，后发国家技术进步呈现出不同的特征。一方面，后发国家强烈的技术追赶意识、较低的技术创新转换成本优势以及特有的“后发优势”，为其技术追赶提供了契机（郭熙保和文礼朋，2008）。另一方面，新技术并非无中生有地被“发明”出来的，是基于现有技术的基础上发展（被建构、被聚集、被集成）而来的，而现有技术又源自先前的技术。技术“组合”和“递归”的特征（阿瑟，2014），带来发达国家基于已有的先进技术进行持续迭代创新，而后发国家只能基于薄弱的技术基础缓慢前行，从而进一步拉大了发达国家与后发国家的技术差距。尽管存在技术“弯道超车”现象，但也无法摆脱技术本质及其发展的规律性。这也是后发国家即便加大技术研发力度与资金投入，依然无法短时间内赶超发达国家技术水平的重要原因。Luo和Tung（2007）提出了著名的跳板视角（Springboard perspective），认为新兴经济体中的跨国企

<sup>①</sup> 基于新古典增长理论的技术进步外生性视角，特别是由此衍生出“后发优势论”，强调后发国家通过大量投资并直接采用发达国家的既有技术，跨越一些不必要的发展阶段。

业可把国际扩张作为跳板来获取资源；郭艳婷等（2023）认为国际并购、依赖国外设计和核心设备进口已成为开放协同条件下后发企业快速实现技术追赶的关键起点。

总体来看，这些研究普遍认为后发国家的技术进步起点是技术追赶，而引进和模仿外国技术是后发国家实现技术追赶的途径。进而言之，这些研究似乎都有一个默认假设：技术是一件公共物品，可以免费享受或通过市场交易获得。但不可忽视，技术亦具有缄默知识性质，具有私有属性。掌握技术的先发企业或国家会阻碍技术扩散。而“国之重器”作为包含大量关键核心技术的复杂产品，其缄默知识远多于一般产品。因此，所谓“卡脖子”技术多出现在“国之重器”领域，且无法通过市场交易获得。由此可见，运用西方主流的经济学理论或后发国家的经济学理论指导中国技术进步的实践活动，都有其明晰的局限性。理论界迫切需要总结、提炼一套可以指导或诠释中国“国之重器”突破关键核心技术的知识体系和理论模型。

### （三）“国之重器”关键核心技术突破的矛盾情境

中国取得“国之重器”关键核心技术突破，往往面临两个相互矛盾的情境。第一，“国之重器”作为复杂产品系统，其关键核心技术突破一般被概念化为不间断的创新流，表现为一个不断试错、突破的过程（Prencipe, 2003）。由于创新流孕育于源自不同方向且交织在一起的多种技术路径，因此其突破轨迹相应具有极大

不确定性，以及碰撞交织所产生的破坏性。这要求中国对关键核心技术突破具有一定容错空间和试错成本。第二，“国之重器”关键核心技术突破还体现为一个极低容错率且几乎不可逆的过程。复杂产品系统的高投入、高产出、高风险特点，决定其试错机会极为有限，甚至要求一次成功（McAdam et al., 2008；袁家军, 2011）。而这对于中国来说，薄弱的技术积累与经济基础更加难以承受举国之力下“国之重器”关键核心技术突破中的方向性试错与修正。因为这不仅消耗经济、时间成本，更有可能对国家的战略安全乃至国际地位产生深刻影响。

由此可见，“国之重器”关键核心技术突破一方面需要突破、试错以收敛至最优解；另一方面又需要稳定、适应以守住安全底线。如何在突破与稳定中寻求平衡以实现“国之重器”关键核心技术突破，这是理论界的难题，也是实践界的挑战。

自21世纪以来，中国在载人航天和盾构机等“国之重器”领域展开探索，作为前沿的实践，一定程度上有助于破解上述理论难题、实现理论构建。本文旨在以二者为案例研究对象，探索“国之重器”何以突破关键核心技术。其中之所以选择中国载人航天工程，其案例典型性体现在：首先载人航天工程作为复杂产品系统，层级鲜明，如总体系统即工程整体以及关键系统如神舟飞船；其次回顾中国载人航天事业的起步情境，其与美俄（含苏联）之间的技术与经济落差显而易见<sup>①</sup>，但其成就显著，即相

<sup>①</sup> 苏联和美国将自己的航天员送入太空是在1961年，中国则是在2003年。不仅如此，中国载人航天工程立项之年（1992年），中国GDP总量是4269.16亿美元，美国是65203.27亿美元，约等于中国的15.3倍，美国人均GDP更是中国的69倍。

继突破和掌握天地往返、空间出舱、空间交会对接等载人航天领域关键技术，开展了一系列空间科学实验与技术试验，实现了技术的厚积薄发，牢牢占据了世界载人航天的重要一席。而之所以选择中国盾构机工程，其案例典型性体现在：首先中国盾构机作为复杂产品系统，层级同样鲜明，即总体系统即工程整体以及关键系统如主驱动系统、液压系统等；其次从中国盾构机的起步情境和成就来看，实现了从“天价进口”到“全球领先”华丽转身，即：21世纪初，中国隧道工程依赖进口盾构机，单台价格超3亿元，且维修受制于人。后来先后突破了刀盘、刀具、智能化控制系统等关键核心技术，实现整机自主设计制造，国产盾构机全球市场份额超60%，并反向出口至欧洲市场。

鉴于中国载人航天工程和中国盾构机工程在复杂产品系统层级属性、关键核心技术突破的起步情境和成就等方面的独特性，本文接下来将具体探讨二者如何通过系统架构设计平衡稳定性与突破性，以实现关键核心技术突破，其背后蕴含着怎样的作用机制与边界条件。

## 二、总体系统稳定性与关键系统 突破性：以中国载人航天 工程为例

中国载人航天工程作为典型的“国之重器”，从1992年9月21日正式启动以来，取得了从神舟一号到神舟十九号载人飞船的技术进步，实现了从短期空间实验室到全面空间站时代的辉煌成就。可以说，中国载人航天工程从远落后于先发国家的起点，用整整30年探索出

了后发国家的复杂产品系统关键核心技术突破之道。

载人航天工程属于典型的大型复杂产品系统，其关键核心技术突破历程主要反映在总体系统与关键系统两大层级的系统架构设计与管理活动。前者反映出后发国家重大战略目标，决定着关键核心技术突破的路线方向；而后者则是关键核心技术突破的物理载体，深刻影响路线方向确定后，技术突破的迭代效果。因此，本文将复杂产品系统的总体系统设计与关键系统研制，作为中国载人航天突破关键核心技术的重要分析阶段，探讨其面临的关键挑战与破解方式。

### （一）总体系统的关键核心技术突破

本部分旨在分析中国载人航天工程的初始系统架构选择是什么以及背后的考量。这一问题之所以重要，是因为复杂产品系统总体方案具有全局性与不可逆性。中国航天系统工程是集科学层次的理论问题、技术层次的开发问题、工程层次的产品问题研究于一体的复杂产品系统。复杂产品系统要想突破关键核心技术比一般项目更具复杂性、挑战性、风险性。20世纪90年代，国内对载人航天工程的技术知识积累极其匮乏，同时又遭遇西方技术封锁、经济百业待兴。在此背景下，中国载人航天工程应该如何选择技术路线以及技术的初始架构呢？

对于中国载人航天工程来说，其总体系统关键核心技术突破的挑战核心表现为总体设计。总体设计是一种工程综合，而综合意味着为了达到工程任务的要求要进行“权衡”（路风，2019）。不同国家由于资源禀赋与战略目标的差异，载人航天工程总体设计所涉及方案实际

上可能有多种技术组合。这些技术组合方案没有绝对的正确性，因此识别中国载人航天总体设计的关键问题，并提出适配的破解方式，就成为后发国家技术进步能否“行稳”起步的关键。

载人航天作为复杂产品系统，具有规模庞大、系统复杂、需要突破的关键技术多等特点，对系统可靠性和安全性提出极高要求（袁家军，2011）。一方面，与火箭、人造卫星等“无人”的航天工程相比，载人航天总体设计存在根本性的技术难点——需要化解航天员在太空环境下面临的高真空、极端高低温和空间辐射等威胁，实现把航天员送入太空、再安全接回来的

首要需求。这意味着载人航天的总体设计需要追求系统安全性。另一方面，载人航天工程的高阶系统层次链显著（Wheelwright, 1985）。每一层系统都有独特的功能，但单一系统功能又是不充分的，只有多层级系统相互配合，才能实现工程目标。常见的载人航天可分解为八大关键系统（见图1），每个关键系统有各自的功能需求。这意味着载人航天的总体设计还需要满足系统多功能性。而起步之初的中国尚处于国内经济与工业基础较为薄弱、载人航天技术又长期被封锁等约束条件下，如何兼顾总体设计的系统安全性与系统多功能性，成为载人航天关键核心技术突破如何起步的关键挑战。

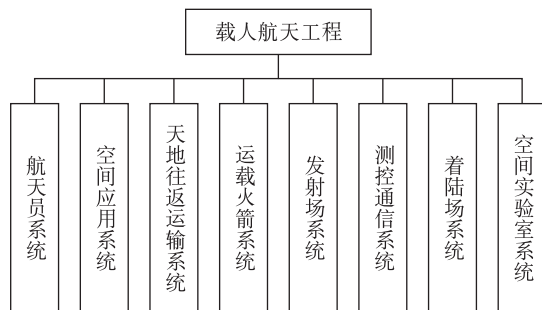


图1 载人航天工程系统架构

资料来源：作者绘制。

对于载人航天这样高度复杂的工程而言，系统安全性与系统多功能性的矛盾必然存在，须通过“综合妥协”来实现，而这种“综合妥协”就集中体现在工程总体设计中，选择什么样的初始系统架构，是总体设计阶段最大的挑战。那么，中国的载人航天工程是如何破解这一挑战的呢？

将国家重大战略目标转化为初始工程研制需求。载人航天工程的总体设计类似于形成产品概念的过程，其实质上是对工程所要达到整

体目标的规定。很显然，该目标不完全由技术决定，而是同时取决于对所承担任务的定义，所以载人航天的总体设计必须包含对国家需求的解读，并将国家需求转化为初始工程研制需求。在“863”计划启动之初，国家把航天技术列为7大重点领域之一，提出尽快发展我国载人航天事业的要求。如何解读“模糊”的国家战略目标，关键在于围绕技术战略方向做出取舍，处理好“急需”与“必需”的关系。就中国载人航天工程而言，“急需”是面向近期目

标，尽快“送中国人上天”，实现中国载人航天零的突破。而“必需”则面向长期目标，突破载人航天工程发展过程中不可或缺的关键核心技术，如出舱活动、交会对接等技术。考虑到彼时中国正处于各行各业都在谋发展的改革开放初期，国家决定先集中有限资源满足载人航天工程的“急需”，确定了难度适中、起步快、周期短、便于组织的初始研制需求。

基于初始工程研制需求，设计稳健的总体方案。对标这一初始研制需求，中国载人航天工程历经以下两个阶段选择了适合国情的总体方案：(1) 走技术民主之路。1987年，围绕“用什么载人工具把中国人送上天”这一问题，“863”委员会面向全国征集方案。经过历时一年的专家论证，最终从60多家论证单位所提出的11个方案中，选出了“机派”和“船派”两个方案（李鸣生，2009）。(2) 严谨科学地反复论证。根据我国的国情、国力和技术基础，委员会和航空航天工业部一致认为“船派”作为一个技术上稳妥、经济上合算、研制周期短、便于协调运转的方案，不仅能够解决当下“急需”，还能突破建设空间站所“必需”的关键技术，减少未来的研制难点与风险。

中国载人航天工程在资源有限与时间紧迫的双重约束下，放弃航天飞机方案，走载人飞船之路，由此确立稳健可行的总体方案，这成为技术进步的起点。该方案不仅确立了总系统以“保障航天员安全”为基本原则，同时也通过总系统的分解将这一原则分配至各个分系统中，由此明确各分系统的功能与相互关系。例如，匹配关系，重点关注功能、界面以及技术接口的适配度，以实现共同目标。例如发射场

系统与运载火箭系统相匹配，共同致力于将飞船、空间实验室等送上既定轨道，实现“上得去”；闭环关系，这类分系统一般作为复杂产品系统发挥整体性功能的最后一个环节，致力于保障其他分系统实现各自功能的闭环。例如着陆场系统则承担航天器回收、航天员救援的重任，确保航天员和载人飞船“回得来”。

综上，通过将“模糊”的国家重大战略目标转换为初始工程研制需求，统筹后发国家技术进步中的“急需”与“必需”，并最终形成稳健的总体方案来破解载人航天工程总体设计的挑战。可见，兼顾了系统安全性与系统多功能性的总体设计，成为中国载人航天工程“行稳”的起点。

## （二）关键系统的关键核心技术突破

载人航天工程总体设计完成之后，开始各关键系统的研制，这代表整体工程从纸面布局转入实体制造阶段。现有文献与工程实践都表明，关键系统（或零部件）常常成为后发技术进步的最关键制约因素（李显君等，2018；欧阳桃花和曾德麟，2021）。原因在于，技术发展中的路径依赖性决定了复杂产品系统最初的顶层设计往往会为后续创新提供一个基本框架。这些后续创新（如关键系统或零部件研制）极有可能依赖于最初的技术体系并对其进行补充，从而再难以产生重大突破，多表现为开展利用式创新活动、改进现有设计（Mowery & Rosenberg, 1999）。那么在此背景下，中国载人航天工程在关键系统研制层面面临何种挑战？又是如何克服路径依赖性从而化解挑战的呢？

在中国载人航天工程的八大分系统中，载人飞船处于工程总系统的关键位置，从而面

临相应的挑战：一方面，载人飞船系统作为中国载人航天的起步工程，极有可能在既有技术知识积累的引导下，沿用总体方案的稳健性思路、继承成熟性技术。然而对于后发国家来说，要想扭转起步晚、资源有限的劣势实现奋起直追，那么局部初始技术的先进性可能是必不可少的。另一方面，这个关键系统作为整个工程建设期内技术迭代的主要载体之一，影响着中国载人航天工程的技术进步节奏。这意味着面向中国载人航天工程“三步走”战略的各阶段目标，关键系统要考虑打破前序活动序列、实现阶梯式技术进步而非循环式技术进步（Gomory, 1992）。

上述两方面意味着中国载人航天工程关键系统的研制既要保证初始技术先进性，同时还要追求可持续迭代性。这就要求该系统的技术架构不仅要能够满足高起点的起步需求，更需要具备良好的可扩展性，为后续的技术升级留下足够的空间。针对载人飞船系统的架构设计，中国决定从最先进的第三代飞船起步，采用了当时独一无二的“三舱一段式”架构设计（见图2）<sup>①</sup>。该架构不仅先进于美国和苏联在载人航天起步时所采用的“单舱式”及“两舱式”架构，甚至比当时第三代载人飞船的代表——苏联“联盟号”的“三舱式”架构设计更具优势。

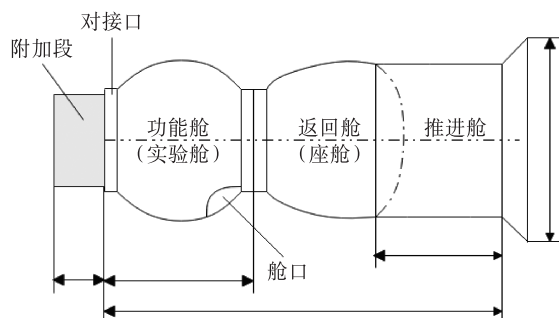


图2 载人飞船系统的“三舱一段式”架构设计示意图

资料来源：作者结合钱振业2013年出版的《中国载人航天技术发展途径研究与多用途飞船概念研究文集》绘制。

“三舱一段式”舱位设计一步到位即可容纳3人，为未来载人航天的多人协作奠定空间基础。同时飞船总体积比“联盟号”大13%，航天员乘坐更舒适。适用性强，可一船多用。不同于“联盟号”飞船只作为天地往返用，任务完成后轨道舱与返回舱分离，坠入大气层烧毁；神舟系列飞船的轨道舱在完成载人在轨飞行任

务后，还可作为一个小型无人空间站、卫星或下一次所发射飞船的对接目标航天器在轨运行长达半年之久。尤其值得一提的是，从神舟一号到目前的神舟十六号，都是在“三舱一段式”架构基础上完成的技术迭代。综上所述，高起点的系统架构化解了初始技术先进性与可持续迭代性的矛盾。

<sup>①</sup> 推进舱是飞船的动力系统，里面装有飞船的电源、发动机燃料贮箱等设备；返回舱是航天员座舱和指令舱，供航天员从地球出发和返回地面时乘坐，也是天地间联系的信息枢纽；轨道舱是航天员生活和工作的场所；附加段是为将来与另一艘飞船或空间站交会对接做准备用的，在载人飞行及交会对接前，也可以安装各种仪器用于空间探测。

拾级而上的技术进步节奏。由于载人航天工程的技术难度大，时间跨度长，因此后发国家在基础薄弱等多重约束条件下，形成拾级而上的技术进步节奏至关重要。它指的是后发国家在工程建设周期内，以关键核心技术突破为标志性节点，追求不间断的阶梯式技术进步。拾级而上的技术进步节奏之所以重要，其原因在于两点：首先，技术“组合”和“递归”的特征（阿瑟，2014），要求后发国家的技术进步需遵循高秩序性，即只有先突破某些关键基础技术，才能去追求更高层次的突破。例如：中国先后突破的载人天地往返技术、航天员出舱活动技术和空间交会对接技术三大载人航天基本技术，分别由神舟五号、七号与八号飞船进行首次验证。其次，从复杂产品系统的实施效果上看，在较长的总体建设时间内有节奏地获得阶段性成果，将更利于各方资源的汇聚、信心的增强和技术声誉的积累，有助于工程建设主体获得更多的资源去持续推进项目。

基于此，梳理载人飞船关键系统拾级而上技术进步节奏，具体如下：（1）从无人到有人：神舟一号到四号无人试验飞船的成功发射，有助于改进八大分系统之间的协调性，为最终实现神舟五号载人飞行提供了可靠性极高的方案设计；（2）从一人一天到多人多天：神舟五号到神舟七号，中国载人航天工程逐渐形成了多人多天协作的系统架构，并突破了舱内活动以及出舱活动等所需关键技术，为开展空间实验以及空间站的部件组装提供支持；（3）从轴向对接到径向对接：神舟八号到神舟十五号不仅

与“天宫”进行多次交会对接，为“三步走”战略的收官之作即建立中国空间站助力；更重要的是持续突破号称“万里穿针”的交会对接技术，实现从好比与“天宫”直道赛跑的轴向对接，到与之弯道赛跑且为手动控制的径向对接的技术跨越。而神舟十六到神舟十九则为空间站的长期稳定运行提供了保障。

综上所述，载人飞船关键系统经历了无人试验飞船的协调配套—多人多天协作的优化稳定—突破交会对接的持续成长等技术迭代、渐进明晰的过程。借助拾级而上的过程，使得关键系统研制既是现有技术边界内的高起点，又为之后载人航天工程的技术迭代预留了足够空间。关键系统实现初始技术先进性与可持续迭代性，推动中国载人航天工程关键核心技术突破从“行稳”到“致远”。

### 三、总体系统突破性与关键系统稳定性：以中国盾构机为例

盾构机是世界上最先进的全断面隧道施工特种专业机械，已广泛用于铁路、地铁、公路、市政、水电等隧道工程，被称为“世界工程机械之王”。2005年之前，中国绝大多数盾构机市场被国外品牌垄断。如今，中国90%的市场、全球2/3的市场由中国铁建重工集团股份有限公司（简称铁建重工）、中铁装备等几家中国头部企业所占有，成为中国攻克“卡脖子”技术的一道最亮丽的风景线。2021年，在盾构机全

球 5 强榜单中<sup>①</sup>，中国有 4 家企业上榜，其中铁建重工超越世界知名厂商——德国海瑞克，位居榜首。这标志着中国盾构机工程开始领跑世界。

中国盾构机的关键核心技术突破，起步于成熟的总体系统模仿，却不止于此，而是在总体系统取得突破性创新的基础上逐步实现关键系统（如主轴承、液压）的稳定性创新。二个系统层级的创新共同奠定了中国盾构机在世界的领跑地位。基于此，本部分旨在延续前述思路，重点复盘中国盾构机代表性企业铁建重工的创新行为，从总体系统和关键系统两个层面探讨关键核心技术突破的挑战及破解之道，以期提炼其背后的特色理论。

#### （一）总体系统的关键核心技术突破

一般来讲，后发国家对于复杂产品的总体系统设计的实现多起步于逆向工程。因为相较于以用户需求为起点、需要完整理解产品工作逻辑的正向开发，逆向开发有明确的仿制对象和知识搜寻范围，对后发国家来说技术能力的要求适中，是看似简单却也最为基础的。其一定程度上为后续将仿制对象融入本土自主创新过程提供一个可供改进和迭代的产品原型。

然而，对于中国盾构机来说，其起步期所模仿的西方成熟产品即土压平衡盾构机主要适用于城市内软土隧道的挖掘，而中国三级阶梯的复杂地势地貌则决定了该产品无法满足山岭隧道硬岩的挖掘需求。例如，著名的“引松供水”工程，该工程全长 263.45km，其中施工的

二期隧道 22.6km，挖洞直径达 7.9km，是吉林省有史以来输水线路最长、投资金额最大、施工地质最复杂的引水工程之一。其难度在于产品不仅需要穿过硬度不一的岩层，还要经过多条断裂带的复杂地质。正是这一区别于先发国家所独有的地质特征，决定了铁建重工即使试图引进先发国家的先进产品如被称为“掘进机之王”的 TBM（Tunnel Boring Machine，全断面硬岩隧道掘进机）再进行逆向开发，也难保对地质的充分适配。更何谈先发国家往往对先进产品采取技术独占机制，或以贸易壁垒阻碍后发国家引进，或采用特殊的封装技巧以加大逆向工程的难度（吕铁和江鸿，2017）。可见，中国盾构机要想真正满足国内市场的复杂需求，面临的核心挑战是：如何冲破逆向工程窠臼、实现面向总体系统的正向设计？

自 2010 年起，以铁建重工为代表的中国盾构机企业开始正向攻克 TBM 的总体设计：

承接国家级课题，开展战略导向式预研。国家意志是关键核心技术突破的启动器与加速器，主要通过预研课题招标立项的形式提供产品研发的战略导向并配备充足的资金要素、培育必要人才。这有助于后发国家掌握关键核心技术的原理性知识，为后期市场驱动的技术商业应用与竞争打下了坚实基础。例如：2012 年，已在行业内初露头角的铁建重工积极响应科技部号召，作为牵头部门中标科技部 863 计划重要课题，研究“大直径硬岩隧道掘进设备（TBM）关键技术研究及应用”。该项目不仅坚定了铁建重工正向设计 TBM 总体系统的信心，

<sup>①</sup> 前五强依次为铁建重工集团、德国海瑞克集团、中铁装备、中交天和与上海隧道。该数据由全球工程机械 50 强峰会组委会和《中国工程机械》杂志联合发布。

还让其更好地吸引了当时对 TBM 有研究兴趣的专业团队，如浙江大学、中铁十八局等。

组建创新联合体，定义适应极硬岩地质的新型架构：前期的联合预研为 2014 年铁建重工再次携手具有丰富 TBM 施工经验的中铁十八局中标“引松供水”工程奠定了基础。面对该工程所对应的岩石强度高（最大抗压强度 200MPa）、断层破碎带多等挑战，铁建重工在自身的技术基础上，与上游的科研院所和供应商、下游的施工单位及用户构建创新联合体，共同设计全新的敞开式 TBM 总体系统。例如，铁建重工联合中铁十八局团队首创“多级滚刀+强化刀间距”系统布局，刀盘推力提升至 3500 吨，较进口机型效率提高 30%，适应花岗岩连续掘进。此外，铁建重工与天津大学、浙江大学、中南大学等大学机构强强联合，研制智能导向与地质预判系统。具体集成国产化“岩机交互”算法，通过振动传感器实时分析岩层变化，提前调整掘进参数，避免卡机风险。此前进口 TBM 卡概率达 15%，而国产敞开式 TBM 则可控制在 3% 以下，极大降低了国产 TBM 的维护成本和周期。

总之，铁建重工借助承担国家 863 项目的契机，吸引了上游供应商与科研院所开展相关技术原理的攻关，铁建重工作为集成商负责整体方案的设计与产品的集成总装，下游则联合中铁十八局等施工单位进行产品的验证与反馈，形成一个产学研用闭环的创新联合体。该创新联合体凭借正向设计打破中国在 TBM 领域对发达国家的进口依赖，体现出了盾构机架构在总体系统层面的突破性策略。

## （二）关键系统的核心技术突破

技术生命周期理论表明，总体系统的性能

升级可能超出原有关键系统的设计阈值，进而迫使企业追加成本定制关键系统或倒逼相关供应商技术迭代。这将对研制成本和周期提出不小的挑战。但如若不调整则有可能影响整个系统架构的稳定性和可靠性。在此背景下，当铁建重工以突破性策略实现 TBM 总体系统的正向设计后，其关键系统的核心技术突破面临何种挑战又该如何化解？

在开放式 TBM 设计中，铁建重工通过总体系统的正向设计定义了适应复杂地质的新型架构，但关键系统如主驱动、液压系统若同步以自研为主进行突破，将面临三重挑战：一是技术复杂度倍增：总体系统的突破性已占用大量研发资源（如开放式 TBM 在总体设计层面的研发投入超 1.2 亿元），若关键系统同步自研，需额外解决材料、工艺、控制算法等跨学科问题，超出企业短期技术储备；二是集成验证风险：复杂产品的关键系统耦合性极强，例如极硬岩刀盘推力提升至 3500 吨后，若主驱动电机扭矩不足或液压系统压力波动，可能导致刀盘卡死甚至结构损坏。先发国家的成熟关键系统（如西门子电机、派克液压泵）通过长期工程验证，可降低集成失败概率；三是工期与成本失控：引松供水工程工期仅 24 个月，若关键系统自研周期过长（如主驱动国产化需 3—5 年），将直接导致项目违约或胎死腹中。可见，此时若关键系统再采取突破性策略，轻则降低掘进效率（如液压系统故障使月进度从 900 米降至 300 米），重则引发工程事故（如主驱动失效导致隧道塌方），进而使后发企业丧失市场信任，陷入“创新—失败—退出”的恶性循环。

对此，铁建重工当机立断通过“进口成熟

关键系统及部件兜底”以平衡总体系统突破性所蕴含的潜在风险，这主要表现在对主驱动系统和液压系统的引进中。如：针对主驱动系统，铁建重工引入德国西门子大扭矩变频电机（功率3800kW）和瑞典SKF定制轴承，确保刀盘在200MPa极硬岩地层中连续掘进的扭矩稳定性；针对液压系统，铁建重工则采用美国派克汉尼汾高压液压泵（压力42MPa），保障推进系统在复杂岩层中的动态响应精度。这一系列行动有助于打破后发企业在复杂产品关键核心技术突破中的瓶颈即“技术能力—市场机会”的不匹配（Mathews, 2002）。换言之，铁建重工选择进口成熟部件，本质是通过“技术引进—工程验证”缩短学习曲线、降低试错成本以把握机会窗口（Lee & Lim, 2001; Teece et al., 1997）。此外，该行动还有助于隐性知识获取，即进口部件隐含的工艺标准（如SKF轴承的渗碳层深度控制）为后续国产化提供参照基准。例如，通过拆解分析SKF轴承，铁建重工反向推导出极硬岩工况下的材料疲劳寿命模型由此服务于产品的自主迭代升级。同时，铁建重工还与上述供应商签订“性能兜底”协议，例如西门子承诺电机故障率低于0.5‰，否则承担连带责任。这一协议不仅对相关供应商所提供的产品质量和安装效率提出约束和保障，也有助于构建国际品牌背书机制从而快速获得工程方信任，打破“国产装备不可靠”的认知壁垒，为后续自主产品推广铺路。

总体来看，以引进成熟关键系统为主的稳定性策略使开放式TBM国产化率在初期达到85%，但其背后存在关键隐患，即：核心部件仍受制于供应商如西门子电机维修仍需德国工

程师现场支持，但维修周期、成本却难以估量。这印证了后发追赶理论中的“引进依赖陷阱”——技术引进若仅停留在技术使用层面，可能延缓自主创新能力积累（路风，2018）。为此，铁建重工“未雨绸缪”，在引进的同时，通过“接口解析—数据反哺—渐进替代”的路径推动国产适配。具体表现为：首先铁建重工积极解析西门子变频电机的通信协议（如PROFIBUS DP），由此逐步开发兼容性国产控制器；其次在工程验证过程中铁建重工积极采集TBM的实时掘进数据（如刀盘振动频谱、液压压力波动），反向优化国产液压阀组参数，使推进效率提升12%；再次初期在非核心模块（如除尘风机）实现国产化，积累经验后向关键系统（主驱动、液压）延伸。而上述行动背后的理论逻辑符合技术溢出效应（Technology Spillover），即“外部知识内部化”（许晖等，2024），例如通过针对进口系统的知识解码与重构，逐步掌握精密铸造、伺服控制等隐性技术，构建国产关键系统的工艺数据库。最终2015年，拥有自主知识产权的国产首台敞式TBM在铁建重工顺利下线，并应用于吉林省引松工程。该TBM取得最高日掘进56.61米、单月掘进1280米的挖掘纪录，均创造了国内同类隧道施工的挖掘纪录。

综上所述，铁建重工凭借“引进成熟方案+国产适配优化”的稳定性策略化解了关键系统核心技术突破的挑战，由此体现了后发追赶的典型智慧，即：一方面通过技术引进实现可靠性、安全性背书，以可控工期、成本和产品性能快速响应市场；另一方面利用技术溢出和渐进替代，逐步瓦解外部依赖，实现自主可控。

## 四、结论与启示

### （一）结论

本文通过追溯中国载人航天工程和中国盾构机工程的关键核心技术突破历程，探究其何以取得如此辉煌成就。本文有如下两个发现：

第一，系统架构二元性即总体系统与关键系统在设计研制中实现“稳定性”与“突破性”的辩证统一，是“国之重器”得以突破关键核心技术的核心机制。具体而言，“国之重器”作为复杂产品系统，不同于大规模制成品的简单层级特征，其高度层级特征决定了相应的关键核心技术突破问题需要聚焦技术系统内部、分层探讨。为此，本研究基于系统架构视角，面向“国之重器”的总体系统和关键系统两个层级，分别探讨其关键核心技术突破的挑战及化解之道。由此发现，对于中国载人航天工程而言，顶层设计稳定的总体系统是关键系统突破的前提，关键系统持续突破是实现总体系统功能的保障，二者共同推动中国载人航天工程30年的持续进步。对于中国盾构机而言，正向设计总体系统是突破逆向工程窠臼、满足本土复杂地质的必由之路，而关键系统以引进成熟方案为基础稳步实现国产适配则是工程如期落地的可靠保障，二者共同推动中国盾构机工程实现从“跟随”到“引领”的跨越。

这一发现显著区别于现有研究所强调的通过突破性创新“弯道超车”（蒋瑜洁等，2021），这类研究多将复杂产品系统看作一个“技术黑箱”，而“绕过黑箱”关注复杂产品系统外部的要素及作用，如提出实现突破性创新的核心在

于掌握“核心用户”和“关键市场”，这有助于关键核心技术突破（霍影等，2023）。类似的结论一定程度上忽视了复杂产品系统内部的不同系统层级可能面临不同的复杂性问题，这很难用突破性或稳定性“一概而论”。事实上，稳定性与突破性这一组二元关系奠基于马奇和西蒙共同提出的有限理性假设之上（March，1991），是探索式和利用式二元创新活动在复杂产品系统关键核心技术突破中的变体。以往研究多强调二者作为一组对立且独立的行动，按空间差异或时间顺序实现分离性共存（彭新敏等，2017；寿柯炎和魏江，2018）。而本文将其统一于复杂产品系统的不同层级中，即以系统架构视角实现了二元性的自洽性均衡。这不仅对二元性理论起到了补充，同时创造性从系统架构二元性机制打开了复杂产品系统关键核心技术突破的理论“黑箱”。

第二，进一步提炼系统架构二元性的理论边界可以发现，技术风险性、市场差异性和行动逻辑性作为三个边界条件，决定着系统架构二元性在诠释“国之重器”突破关键核心技术的实践中存在一定差异性，即“总体系统稳定性与关键系统突破性”和“总体系统突破性与关键系统稳定性”，如表1所示。进而言之，三个边界条件之所以存在且引发系统架构二元性的作用机制差异性，还有溯源至“国之重器”的产品分类，即：（1）如中国载人航天工程一类“国之重器”，其服务国家战略的安全导向型产品特征，决定了其必须通过总体系统的稳定性克服后发国家资源约束、确保零容错率，进而达成“送中国人安全上天再返回”的目标以确保航天员生命安全、维护国家声誉。与此同

时为巩固国家在航天领域的战略安全地位与核心竞争优势，中国载人航天工程还需要通过关键系统的突破性实现技术积累、尖端攻关与迭代创新。(2) 如中国盾构机一类“国之重器”，其应对技术封锁的市场驱动型产品特征，决定了其风险适中，因此可以通过总系统的突破性抢占因独特地质需求而带来市场先机，以自主创新突破先发垄断；与此同时针对关键系统可以采取稳定性策略即引进国外先进设备，这

不仅有助于工程保质保量如期交付，同时也可借力通过技术溢出效应实现关键系统的逐步国产替代。

但殊途同归，虽然两类工程的产品特征不同，由此所对应的系统架构二元性作用机制和边界条件有所差异，但最终都较好地实现了安全（战略安全、工程安全）与效率（技术突破效率、市场交付效率）的兼顾，这也是“国之重器”突破关键核心技术的内核所在。

表1 “国之重器”分类与系统架构二元性的边界条件识别比较

产品分类与系统架构二元性	服务国家战略的安全导向型“国之重器” 如中国载人航天工程	应对技术封锁的市场驱动型“国之重器” 如中国盾构机工程
	总体系统稳定性与关键系统突破性	总体系统突破性与关键系统稳定性
技术风险性	零容错、高风险：航天员生命、国家声誉	允许局部试错、中风险：工程延误、设备维修
市场差异性	非市场化导向，涉及国家战略安全	市场化导向，遭遇先发国家垄断
行动逻辑性	平衡资源约束与持续进步： · 以总体系统稳定性克服后发国家资源约束、保证工程安全； · 以关键系统突破性实现技术积累与持续进步	平衡自主创新与安全可控： · 以总体系统突破性满足本土市场需求、打破先发垄断，实现自主创新； · 以关键系统稳定性保障工程安全交付并以技术溢出实现国产替代

## (二) 实践启示

系统架构二元性是建构在经典理论如产品架构和二元理论之上而又符合中国独特情境的本土知识体系。本文希望该知识体系源于本土实践而又能进一步指导本土实践。

首先从整体来看，面向事关重大战略和安全的工程和技术，不能哪方面被“卡”才重点突破哪里。而是要从引领性、前瞻性的布局出发，关注总体系统与关键系统的设计。特别是要从关键核心技术突破的源头入手，坚持基础研究自由探索和导向“两条腿”走路，特别是针对目前目标导向基础研究不足的现状，应加强目标导向的基础研究，重视从国家重大

需求中凝练科学问题，以国产大飞机工程为例，一方面要以当代大型飞机总体系统技术需求为牵引，开展关键技术预研和论证；另一方面要聚焦系统集成、关键系统如动力系统和试验系统的设计、开发和制造，为研制大型客机做好技术储备。

其次具体到不同类型的国之重器，要结合上述案例所探讨的边界条件，充分借鉴所对应的不同系统架构二元性作用机制。例如：

一方面，大飞机、重型燃气轮机、深海探测装备等作为服务国家战略的安全导向型“国之重器”以国家安全、技术威慑为核心目标，其关键核心技术突破需遵循“总体系统稳定性

兜底安全、关键系统突破性积累势能”的路径，通过成熟架构规避系统性风险，同时在关键系统中嵌入前沿技术，逐步构建技术制高点。这类领域需警惕“过度保守”陷阱——若完全依赖传统架构，可能错失技术代际跨越的机会窗口，因此需在总体稳定框架下，选择若干高价值关键系统（如核燃料循环技术、航空发动机增材制造）集中突破，形成非对称竞争力。

另一方面，芯片、光刻机、高端医疗器械等作为应对技术封锁的市场驱动型“国之重器”直面技术垄断与市场壁垒，需以“总体系统突破性重构规则、关键稳定性保障落地”为路径，通过突破性设计打开市场缺口，借助成熟关键系统降低商业化风险，逐步实现全产业链自主可控。此类领域需避免“全盘自研”陷阱——若盲目追求100%国产化，可能因技术验证周期过长而错失市场窗口。因此，可优先在总体设计、智能算法等长板领域突破，同时在精密传感器、高端轴承等短板领域阶段性进口，最终通过“市场收益反哺研发”实现全链条替代。

#### 作者简介

欧阳桃花：北京航空航天大学经济管理学院教授、博士生导师，国家社科基金重大项目首席专家，教育部学位中心首席案例专家。于神户大学获得博士学位，研究方向为企业战略管理、产品创新与组织变革。主持国家社科重大项目、国家自科重点项目等纵向课题25项。出版《国之重器：如何突破关键技术》《航空航天复杂产品的创新生态系统研究：组织二元能力视角》等专著6部，于I&M、《管理世界》等高水平期刊发表80余篇研究案例论文。20余篇

教学案例获得全国百篇优秀管理案例、清华大学“卓越案例开发者”等奖项，2篇案例被哈佛案例库和毅伟案例库收录。

曾德麟：北京交通大学经济管理学院副教授、硕士生导师。于北京航空航天大学获得博士学位，研究方向为数字化创新与国之重器技术进步，论文发表在《管理世界》《管理科学学报》、International Journal of Information Management等期刊。

郑舒文（通讯作者，E-mail: by2008129@buaa.edu.cn）：中国民航管理干部学院安全保卫系讲师，研究方向为技术创新与管理，论文发表在《管理世界》《科研管理》《科学学与科学技术管理》等期刊。

#### 项目资助

本论文获得国家社科基金一般项目（项目编号：24BGL035）“复杂产品市场中后发企业超越追赶的最优区分模式研究”资助。

#### 参考文献

- [1] 布莱恩·阿瑟：《技术的本质》，曹东溟、王健译，浙江人民出版社2014年版。
- [2] 陈劲、阳镇、朱子钦：《“十四五”时期“卡脖子”技术的破解：识别框架、战略转向与突破路径》，《改革》，2020年第12期。
- [3] 范红忠：《有效需求规模假说、研发投入与国家自主创新能力》，《经济研究》，2007年第3期。
- [4] 郭熙保、文礼朋：《从技术模仿到自主创新——后发国家的技术成长之路》，《南京大学学报（哲学·人文科学·社会科学）》，2008年第1期。
- [5] 郭艳婷、郑刚、刘雪峰等：《复杂产品系统后发企业如何实现快速追赶？——中集海工纵向案例研究

(2008~2021)》,《管理世界》,2023年第2期。

[6] 胡登峰、黄紫微、冯楠等:《关键核心技术突破与国产替代路径及机制——科大讯飞智能语音技术纵向案例研究》,《管理世界》,2022年第5期。

[7] 黄冬娅、刘万群:《技术进步何以产生?关于技术进步的四个理论视角》,《新视野》,2021年第2期。

[8] 黄先海、宋学印:《准前沿经济体的技术进步路径及动力转换——从“追赶导向”到“竞争导向”》,《中国社会科学》,2017年第6期。

[9] 霍影、江晓林、孙辉:《基于关键核心技术突破的后发企业突破性创新研究》,《中国科技论坛》,2023年第2期。

[10] 蒋瑜洁、郭婷、王尚可等:《新兴国家如何实现突破性技术创新:基于中美V2X专利数据对比分析》,《科学学研究》,2021年第10期。

[11] 李鸣生:《千古一梦:中国人第一次离开地球的故事》,作家出版社2009年版。

[12] 李显君、孟东晖、刘暉:《核心技术微观机理与突破路径——以中国汽车AMT技术为例》,《中国软科学》,2018年第8期。

[13] 柳卸林、葛爽:《中国复杂产品系统的追赶路径研究:基于创新生态系统的视角》,《科学学研究》,2023年第2期。

[14] 路风:《论产品开发平台》,《管理世界》,2018年第8期。

[15] 路风:《走向自主创新:寻求中国力量的源泉》,中国人民大学出版社2019年版。

[16] 吕铁、江鸿:《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》,《经济管理》,2017年第10期。

[17] 欧阳桃花、胡京波、李洋等:《DFH小卫星复杂产品创新生态系统的动态演化研究:战略逻辑和组织合作适配性视角》,《管理学报》,2015年第4期。

[18] 欧阳桃花、曾德麟:《拨云见日——揭示中国

盾构机技术赶超的艰辛与辉煌》,《管理世界》,2021年第8期。

[19] 彭新敏、郑素丽、吴晓波等:《后发企业如何从追赶到前沿?——二元性学习的视角》,《管理世界》,2017年第2期。

[20] 寿柯炎、魏江:《后发企业网络节点与组织学习平衡模式的演化》,《科研管理》,2018年第11期。

[21] 许晖、李阳、王冶等:《大型复杂产品系统自主创新的模式与机制——基于“华龙一号”的探索性案例研究》,《管理世界》,2024年第9期。

[22] 袁家军:《航天产品工程》,中国宇航出版社2011年版。

[23] 郑舒文、欧阳桃花、曾德麟等:《技术进步中的系统架构二元性研究——以中国载人航天工程为例》,《科学学与科学技术管理》,2024年。

[24] Anzai, Y., & Simon, H. A. 1979. The theory of learning by doing. *Psychological Review*, 86 (2): 124 - 140.

[25] Arrow, K. J. 1962. The economic implications of learning by doing. *The Review of Economic Studies*, 29 (3): 155 - 173.

[26] Clark, K. B., & Henderson, R. M. 1990. Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. *Administrative Science Quarterly*, 35 (1): 9 - 30.

[27] Durlauf, S. N., Kourtellos, A., & Minkin, A. 2001. The local Solow growth model. *European Economic Review*, 45 (4): 928 - 940.

[28] Fujimoto, T. 2002. 製品アーキテクチャの概念・測定・戦略に関するノート. CIRJE - J - 78.

[29] Gomory, R. 1992. The technology - product relationship: Early and late stages. In N. Rosenberg, R. Landau, & D. C. Mowery (Eds.), *Technology and the Wealth of Nations*: 383 - 394. Stanford: Stanford University Press.

[30] Hobson, B. 1998. Product complexity, innova-

tion and industrial organisation. *Research Policy*, 26 (6): 689 – 710.

[31] Lee, K. , & Lim, C. 2001. Technological regimes, catching – up and leapfrogging: Findings from the Korean industries. *Research Policy*, 30 (3): 459 – 483.

[32] March, J. G. 1991. Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization Science*, 2 (1): 71 – 87.

[33] Mathews, J. A. 2002. Competitive advantages of the latecomer firm: A resource – based account of industrial catch – up strategies. *Asia Pacific Journal of Management*, 19 (4): 467 – 488.

[34] McAdam, R. , O’Hare, T. , & Moffett, S. 2008. Collaborative knowledge sharing in composite new product development: An aerospace study. *Technovation*, 28 (5): 245 – 256.

[35] Mowery, D. C. , & Rosenberg, N. 1999. *Paths of Innovation: Technological Change in 20th – Century America*. Cambridge: Cambridge University Press.

[36] Prencipe, A. 2003. *Corporate Strategy and Systems Integration Capabilities: Managing Networks in Complex Systems Industries*. New York: Oxford University Press.

[37] Romer, P. M. 1990. Endogenous technological

change. *Journal of Political Economy*, 98 (5): S71 – S102.

[38] Teece, D. J. , Pisano, G. , & Shuen, A. 1997. Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18 (7): 509 – 533.

[39] Ulrich, K. T. , & Eppinger, S. D. 1995. *Product Design and Development*. New York: McGraw – Hill.

[40] Ulrich, K. 1995. The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, 24 (3): 419 – 440.

[41] Utterback, J. M. 1974. Innovation in industry and the diffusion of technology. *Science*, 183 (4125): 620 – 626.

[42] Uzawa, H. 1961. On a two – sector model of economic growth. *The Review of Economic Studies*, 29 (1): 40 – 47.

[43] Walker, W. , Graham, M. , & Harbor, B. 1988. From components to integrated systems: Technological diversity and interactions between the military and civilian sectors. In *The Relations between Defence and Civil Technologies*: 17 – 37. Dordrecht: Springer.

[44] Wheelwright, S. C. 1985. Restoring the competitive edge in US manufacturing. *California Management Review*, 27 (3): 26 – 42.