

DOI:10.16277/j.cnki.cn11-2502/n.2015.07.017

以技术成熟度为框架指导构建创新产业链

◎厦门大学能源学院院长、首批“千人计划”国家特聘专家 李宁



平潭企业家科学家创新论坛是促进产学研合作、提高科技成果转化、提升科技作为第一生产力的大好平台。论坛提出以发布创新技术和投资路线图的方式协助科学家和企业家对话交流，是非常好的倡议。我曾经作为技术专家参与美国能源部重大民用核能技术路线图和开发规划的制定与执行，其中三项后来都有中国政府部门、企业与科研机构的合作参与，如四代核能系统、加速器驱动嬗变和全球核能合作伙伴动议的先进核燃料循环等。在这过程中，我不仅对具体技术和路径有了比较全面的了解，而且通过规划和执行，意识到创新技术的开发和产业化有规律可循，有路径可走，有方法可依，有工具可用。

几年前，我在为比尔·盖茨创

投的核能技术开发公司规划行波堆技术开发示范时，也采用了技术成熟度体系，可以有效组织各种资源，把一个蕴含了极大潜力的技术概念逐步推向工程化设计、验证、示范和商业化应用。

由于航天与核能技术和系统高深复杂，开发应用周期长，因此对开发体系、路径、方法和工具有很高的要求。我们可以参考借鉴，经过适当的凝练和适应性修改简化转变成成为具有较为普遍指导意义和应用价值的系统。今天和大家分享我的一些思考和实践成果：以技术成熟度为框架指导建设创新产业链，邀请大家批评指正，共同推进实施创新驱动发展战略。

首先，我们来看一下正在成为主流的开发创新范式，说明为什么要构建创新产业链。

我认为创新是得到应用的发明，不只是新颖的创意或原型。因此创新不仅需要原创研究，还要完成开发和实现应用。

随着科学研究和技术开发的深入展开和相应资源和机构的广泛分布，创新已经从传统的企业内部封闭创新范式，演进为涉及社会各方的开放创新范式。技术和产品开发的来源不仅限于企业内部，应用基础研究的成果也不再局限在机构

内部等待转化开发。机构、行业 and 市场的刚性封闭界限被逐步打破，成为柔性互通的开放交换界面或混合共生体。

在开放创新的范式中，各种创新资源的参与大大增加了创新的多样性和驱动力，同时技术的来源、构成和开发变得多元复杂。要完成创新的全过程，并且使创新成为社会与经济发展的主要动力，必须有可以普遍适用的创新路径和方法，必须形成分工定位与合作模式明确合理的创新产业链。

现在，我把技术成熟度概念和应用介绍一下。技术成熟度是在融入系统或子系统前对发展中技术（材料、部件、装置等）的成熟程度的一个评估量度。我们采用美国国家航空航天局在1970年代实施阿波罗登月计划时提出的技术成熟度概念和阶段划分描述技术研发过程：

在基础技术和可行性研究（概念验证）阶段，基本原理被发现和报告（一级成熟度），技术概念和用途被阐明（二级），通过分析和实验验证概念的关键功能和特性（三级）。

在技术开发和示范（原理验证）阶段，先后在实验室环境中验证部件和试验台（四级），在模拟环境中验证部件和试验台（五级），在模拟环境中验证系统与子系统模型或原型机（六级）。

在系统与子系统开发和系统测试、启动和运行（性能验证）阶段，先后在运行环境下验证演示原型系统（七级），完成通过测试和验证演示的实际系统（八级），实际系统成功通过运行使用（九级）。

与技术成熟度相对应的是技术研发阶段性的产出，大致可以分为从概念验证阶段一至三级产出的报告、论文和专利，在原理验证阶段四至六级的设计、建造、模拟、分析及部件、台架和典型系统模型或原型，到性能验证阶段七至九级的原型机和实际系统的设计、建造、调试、运行和分析。

技术成熟度体系经过多年的发展和应用，已经开始被许多国家政府部门、跨国企业等采纳使用，包括美国国防部、能源部、波音公司等，中国国防科工局、中航集团、中核集团等。美国宇航局系统化应用该体系的商业化成功的案例之一，是在1980年代从最基础的流体力学计算模拟研究开始，历经二十多年的按照技术成熟度提升路径，循序渐进，把完成开发与验证的喷气机引擎降噪技术引入大型客机。有心观察者可以在最新的波音787梦幻系列客机上看到引擎喷气口波浪形的边缘，就是该技术的体现。

通过理论探索和实践验证，发现技术成熟度可以是讨论和量化成熟度的共同语言，提供对引入技术进行风险评估的框架，补充开发项目的管理或跟踪系统。技术成熟度从最早的评估工具，演化成可以用于研发规划和管理的工具，应用于部件或系统层面，设定测试进度，帮助客户和供应商懂得要求，容易估量变更的影响，了解对设施和能

力的要求。

我逐步意识到技术成熟度体系作为经过大量理论和实践验证有效的技术开发评估、规划和管理工具，可以指导更为广泛普遍的创新。我开始把技术成熟度从单个技术开发的应用中提升到科技转化的体系层面，把它作为一个尺度和框架来定位分工，设计构建创新产业链，并且在实践中应用验证。

根据技术开发各个阶段的主要任务，其相应的主流功能机构分别是对应技术成熟度一至三级工作的高校和科研机构，从事技术与应用基础研究；对应四至六级的技术与应用研发机构，从事技术开发与功能示范；对应七至九级的企业产品开发部门，从事系统集成示范与产业化。

随着技术成熟度的提高，其产出效益的社会性逐步降低，对应公共投入比例下降；相应的企业性逐步提高，对应企业投入比例上升。

根据以上阶段性定位、功能和效益分析，三大阶段的投资和执行主体应该分别为政府及公众和事业单位或其它形式非盈利性组织、公共投入与私营（风险）投资合伙支持的事业单位和初创企业、企业或产业投资和生产企业。技术发展需要的技能和资源需要在不同阶段和机构间衔接或流通，而技术应用创造的价值应该根据各个阶段和机构的投入与承担的风险合理分配，使得不同阶段和机构之间的衔接和转移能够得到有效的完成和保障。在这样的模型中，技术开发和转化的递进通衢得到明晰的表征。

这样的定位分工和相应的需求、技术与价值的衔接和转移，就形成

了一个系统的创新产业链。

在这样的产业链架构分析中，我国目前产学研结合不密切、科技转化效率低的原因和机理就变得比较清晰了：由于对应各个阶段功能定位的机构大都比较侧重内部的产出和评估，而对于跨越阶段、完成转化需要的界面衔接和传递不理解、不重视或不知道如何操作，同时政府各主管部门之间缺乏有效的协作体制和机制，整个技术开发成熟的过程缺乏前后段或上下游的功能与利益的连接和反馈，因此各个阶段的工作都容易陷入分离和低水平重复。比如高校会倾向从政府科技部门获取项目和经费，以论文和专利数量为评价主要指标，但对于成果质量和转移缺乏途径和动力；而企业则多局限于引进和使用成熟技术和工艺，对技术开发的投入比例极低，造成技术开发和示范机构缺乏市场需求的牵引和利益的驱动。这些现象的存在，我想主要原因之一应该还是没有认识到建设创新产业链的必要性和可行性。

为了能够普及推广技术成熟度评估系统，方便实际应用，我们开发了基于网络的软件工具，并为企业提供评估咨询服务和培训。

这个框架和我们已经在实践中采用的方法有很多类似之处，但是我们采用源于航天技术开发的体系，有比较细致的分级、发展、应用、研究和验证，结合对应的开发工作和产出，提出专业分工定位，社会性和企业性变化，以及连接的界面和模式，形成创新产业链的框架。我真切希望和有志同道的科学家和企业家一起来探索建设完善，为实现创新驱动发展战略贡献力量。STIG