



Views & Comments

21 世纪工程领域——重大挑战与重大挑战学者计划

C.D. Mote Jr.

Regents Professor, University of Maryland, USA; Past President, US National Academy of Engineering, USA

序言

工程的基本使命是“为用户进行创造”，这一使命已经毫不动摇地为人类、史前人类和其他生命形式，如昆虫、鱼类、鸟类和哺乳动物服务了数亿年。人类工程与其他生命形式工程的不同之处在于，人类具有一种独特的能力，能够去设想“为用户进行创造”，然后进行创造并最终实现，以满足重要的“用户需求”。其他生命形式很可能是通过进化过程从前辈那里学到了工程创造，如建造蚁穴、蜂巢和鸟巢。它们的创造更多的是对早期经验的学习复制，而不是运用智力应对新境遇。没有开辟新领域的用户进步限制了物种的进步。以上的生命形式是所有工程用户种类中的典范，但只有人类工程才能带来引领显著的用户进步的新的创造。

现代人类有30万年的历史，人类的语言可以追溯到5万年前，而智人在350万年前就从岩石上凿出了锋利的工具。350万年前，人类在所有生命形式中的地位并不突出。经过人类不断地“为用户进行创造”，通过新的想法、能力和价值来满足“用户需求”，从而促进人类的生活、知识和繁荣，人类在生命形式中的地位逐渐突出。其他生命形式无法与人类竞争，因为它们的思想、机会、行动和理解自身需求方面的适应能力有限。人类工程带来的如今的物种进步而不是灭绝的故事漫长且具有优势。因此在数千年后的21世纪，我们可以提问，人

类工程应该如何利用其全球主导地位来保护而不是剥削地球。这是本文背后的终极问题。

概述

20世纪是一个工程成就非凡的时期，世纪之交激发了美国国家工程院（NAE）与27个美国专业工程协会合作，表彰、排名和纪念其前20名的工程成就。NAE [1] 在2003年发布了成就卷，题名为《百年创新——改变我们生活的20项工程成就》（*A century of innovation: twenty engineering achievements that transformed our lives*），并在网站<http://www.greatachievements.org/>上进行了总结。该成就卷配有当时的照片，加深了人们对那个时期的了解，并使公众能够获得相关的信息。专业协会将这些成就按其重要性由高到低依次排列，最后的综合排名如表1所示。这份榜单对许多人来说是鼓舞人心的，因为这些成就都是在短短100年内取得的。

在该卷出版后，21世纪的工程创新立刻就成为了人们的兴趣所在，因为这是一个技术变革加速的世纪。因此，在2007年NAE成立了一个由18人组成的国际委员会[†]，由斯坦福大学的William Perry担任主席，他们设想21世纪可能会有哪些非凡的工程创造。然而，委员会的结论是，在新世纪要可信地确定非凡的工程创造并为其排名只能靠回顾实现，21世纪的加速变革使得人们甚

[†] 工程重大挑战委员会（Grand Challenges Committee for Engineering）：主席为 William Perry，成员包括 Alec Broers, Farouk El-Baz, Wesley Harris, Bernadine Healy, W. Daniel Hillis, Calestous Juma, Dean Kamen, Raymond Kurzweil, Robert Langer, Jaime Lerner, Bindu Lohani, Jane Lubchenco, Mario Molina, Larry Page, Robert Socolow, J. Craig Venter 和 Jackie Ying。

至无法预测变化最大的领域，更不用说预测其中最重要的领域。作为一种替代方法，委员会提出，他们可以根据目前对这个时代的工程挑战的理解，发表“21世纪工程领域需要实现的目标”，这并不是是一件微不足道的事。

当委员会着手这份声明时，它认识到了21世纪工程领域预测的两个附加的限制。首先，在2007年，工程已经是一项全球性的事业，而不是地方性或国家性的，因此百年的工程愿景必须放眼全球——这是历史上的第一次。其次，工程的每个领域和规模都可以用4个英文单词来描述，从而将工程的技术部分“创造（creation）和解决方案（solutions）”与工程的用户部分“人（people）和社会（society）”联系起来。然而，在整个20世纪和更早的时候，在美国的工程教育中只有两个词，即“创造”和“解决方案”，被用来描述工程，在许多人的脑海中工程本身亦是这样。如图1所示，相比用户部分，

表1 20世纪工程成就排名

排名	工程成就
1	电气化社会
2	汽车
3	飞机
4	供水和排水
5	电子产品
6	无线电与电视
7	农业机械化
8	计算机
9	电话
10	空调/制冷
11	州际高速公路
12	太空飞行
13	因特网
14	成像
15	家用电器
16	健康技术
17	石化技术
18	激光与光纤
19	核技术
20	高性能材料

All engineering can be described by its technical and user parts using only four words:



图1. 工程的技术和用户基础。

工程的技术部分占主导地位。

半个世纪前，我是工程系的一名学生，当时许多学生被工程学吸引，原因是这样他们就不必与“人和社会”（人的组织）打交道。工程教育中的人文和社会科学部分明显处于次要地位，甚至与技术部分脱节。这一现实已经造成了众所周知的负面结果。首先，工程教育使工程学学生与工程用户脱节，以及工程用户与工程脱节。由于没有认识到工程的确切责任是服务用户、人民和社会，因此工程教育是不完整的，更糟糕的是工程教育甚至具有误导性。对美国公众关于工程看法的定期调查证实，大多数公众不相信工程师会关心社会问题。其次，要纠正《21世纪工程重大挑战》（Grand Challenges for Engineering in the 21st Century）愿景（vision）中对工程认识的不足，必须在工程系统愿景陈述中将用户部分作为工程的目标突出显示。

下面的愿景陈述是工程系统解决方案的目的，该解决方案通过对象目标的满足来达到用户的需求。共同创建的工程设计及其性能和操作规范陈述了系统的愿景、目的和目标的顺序，如图2所示。

Perry委员会的主要任务是为工程领域的重大挑战创建一个长达百年的全球性愿景，确定工程的技术部分，即“创造和解决方案”明确地服务于用户部分，即“人和社会”。对这个问题的愿景陈述表达了他们的工程系统解决方案的目标为“人和社会”。这份声明抓住了对用户的关键承诺——全球愿景；地球上人类生命的延续；在可持续性、安全性、健康和乐趣或某种程度的生活质量方面向用户提供更好的服务。

图2中提到的目的是专门选择的“技术计划”，当与通过目标获得的解决方案结合在一起时，能确保满足上述愿景陈述，即对用户的关键承诺。目的的数量和说明超越了满足愿景所需的结果。实现愿景的特定目的不一定是唯一的。当把这些目标放在一起时，其可在指定的输入范围内满足每个目的。共同创建的工程设计及其性能和操作规范构成了系统的愿景、目的和目标。

Vision: Continuation of life on the planet, making our world more sustainable, secure, healthy, and joyful

Goals: Grand Challenges for Engineering

Objectives: Solutions that deliver each goal (the hard part)

图2. 愿景、目的和目标的层次结构与角色。

愿景——工程重大挑战

根据委员会的审议和结论，愿景提出了工程重大挑战的目标，或者简明扼要地说，是“21世纪工程需要实现的”用户问题。该愿景保证用户从工程、人民和社会问题中受益，但没有规定实现这些的技术问题。因此，愿景是工程系统解决方案中一般用户可以理解的非技术部分。因为针对目的所提出的技术基础会实现愿景，愿景是系统问题的基础。没有愿景，系统解决方案就没有指定的目标。我直接根据Perry委员会的报告和其中提供的材料以及这里提出的目的起草了上面的愿景声明。Perry委员会报告没有提出愿景，但如果它提出了愿景，很可能与这里的愿景相似。这些目的是委员会报告中的技术部分，其单独的解决方案在设计上将满足愿景中要求的用户需求。表2中所示的通过创造解决方案来满足的14个独立的目的被称为工程的重大挑战。

在选择帮助讨论这一点的极端情况下，在任何地方实现这一愿景声明都将通过提高可持续性、安全性、健康和乐趣或生活质量来改善地球上人类的生活。虽然实现这一愿景声明将在这4个领域推动地球的发展，但该声明没有声称要根除或避免影响任何问题。地球上的生命在这4个领域中的进步并不排除局部进步的平衡。然而，这些愿景确实解决了工程如何通过满足目的和达成目标来明确地服务于“人和社会”。

目的——工程重大挑战

表2中呈现的目的是由重大挑战委员会确定的技术问题，其同步解决方案满足实现可持续性、安全性、健康和乐趣的愿景要求。如果目的的解决方案范围扩大，则愿景的满意度范围也会扩大，反之亦然。对于那些不能同时获得目的解决方案的领域，愿景的实现需要在个例的基础上进行评估。

Perry委员会发现，为领域中的14个目的创建解决方案是实现愿景所需的最低要求。当你回顾这些目的时，你能将它们与满足4个愿景期望（可持续性、安全性、健康和乐趣）中的一个或多个联系起来。推进目的的解决方案可以提高愿景和用户目标的满意度以及对“人和社会”的服务。其他目的也可以确保实现愿景，因此可能是实现愿景的备选方案。目的不一定是唯一的，其他候选因素如成本、可用性、可靠性、安全性等

可能成为有吸引力的替代选项。

目标——工程重大挑战

愿景和目的建立之后，将通过目标为每个目的创建解决方案，如图2所示。但是，Perry委员会未提出实现每个目的相对应的目标，也未提出实现该愿景的每个目标的相对重要性。

我们建议为这些目标提出两种不同但都合理的解决方案。其中一种方案是把每个目的的目标当成一个“工程系统问题”。此方案的A组工程师团队已拥有为目的的开发目标解决方案所需的必备能力，如图2所示。另外B组工程师团队当前尚不具备为该目的的开发目标解决方案所需的能力，因此，B组团队的目标将需要先准备承担实施工程系统计划的适合劳动力，随后开发出目标解决方案。因为这是一个长期的、全球性的问题，所以选用尚未具备实现目标所需的能力的劳动力（B组），或者选用已具备实现目标所需的能力的劳动力（A组），似乎都是可行的选择。最终，B组将为A组提供劳动力，或者他们将简单地合并。

表2 21世纪工程领域的重大挑战

序号	目标
1	让太阳能更经济
2	利用聚变供能
3	开发碳封存方法
4	提供清洁用水
5	管理氮循环
6	修复与改进城市设施
7	发展健康信息学
8	制造更好的机器
9	大脑逆向工程
10	防止核恐怖
11	赛博空间安全
12	增强虚拟现实
13	促进个性化学习
14	制造科学发现工具

Approaches to objectives:

Initiative group: creates solutions—direct
(everywhere on the planet!)

Talent group: creates the workforce—indirect
(prepares youth for vision & goals)

图3. 目标通过A组和B组实现各自目的的路径。

重大挑战学者计划——打造人才团队

2008年，在NAE发布的《21世纪工程重大挑战》[2]中，Perry委员会仅在其中提出了愿景和目的，却没有对目的的实现、排名或实施进行讨论，也没有为重大挑战提供解决方案，而是将目的解决方案和愿景实施的问题留给后人。之后，Thomas Katsouleas先生（杜克大学工程系主任）、Yannis Yortsos先生（南加州大学工程系主任）和Richard Miller先生（欧林工程院前校长）得出结论：如果21世纪工程领域的发展方向要朝着实现《21世纪工程重大挑战》中的愿景和目标的方向迈进，那么现在是时候将工程学学生和工程学教育系统引入其中。如果这些挑战要对21世纪的工程产生影响，那么现在的学生未来将可能成为实现这一目标的工程师。因此，他们实施了重大挑战学者计划（GCSP）。当前的工程教育课程总体上缺少对学生应当具备应对工程重大挑战风险所需的理解力和职业素质要求，因此这一计划旨在着重培养工程专业学生的这一素质。GCSP有潜力推动工程和工程学教育成为21世纪社会需求的中心。

GCSP是对现有所有工程项目的补充，旨在培养多文化、多学科的学生团队，以创建全球性问题的解决方案，从而为人类和社会服务。简而言之，GCSP培养学生拥有面对工程重大挑战的全球视野。自2009年提议以来，GCSP的大学成员不断增加。

图4显示了GCSP计划的4个特征。这些特征对于重大挑战的最终成功至关重要。首先，GCSP是对任何国家/地区的任何大学提供的任何传统工程项目的补充。该计划帮助学生理解和准备当今时代协作性、多文化、多学科的全球工程行动，如（但不限于）工程重大挑战。作为一个教育桥梁，GCSP将每个国家的工程项目扩展到全球范围。其次，该项目促进学生对工程重大挑战的理解，从而为之后他们激励全球社区的工作奠定基础。再次，工程重大挑战的愿景的采纳实际上取决于GCSP在全球范围内的成功扩展，因为未来将由这些学生及其继任者把工程重大挑战思想推广到全世界的社区、大学和社会。通过这样做，他们可以帮助塑造全球工程教育的未来。最后，那些完成了大学学业，并希望继续以专业人士和（或）志愿者的身份与GCSP结盟的学生，将

有机会通过不断壮大的GCSP社区支持未来的学生。

为了方便执行，GCSP必须清晰、简单并要注重学生的必备核心能力，而当前一般的工程学课程并没有这种要求。学生的能力是从教育经历中获得的。对于学生而言，GCSP并不是关于计划的管理。每个参与GCSP的大学管理者管理自己相应的课程。每所大学在以下方面拥有自主决定权：学生录取、教学方法、评估学生能力的方法；依据学生在每项能力颁发重大挑战学者证书；向美国NAE主席推荐有资格获得重大挑战学者奖的学生等。NAE主席会以个人祝贺信的形式认定每位合格的学生为重大挑战学者。

若申请举办GCSP，请访问GCSP网站（www.engineeringchallenge.org/GrandChallengesScholarsProgram.aspx）。申请者需要提供大学选拔学生计划的信息，以确保学生5项能力（图4）的培养发展以及计划的成功举办。

学生能力

如图4所示，GCSP能力是对现有任何教育计划的补充，可以帮助学生在全球范围内与其他国家的学生和专业人士参与联合工程合作[†]。这是21世纪工程要求的一项重要能力。该计划的基础是学生成绩，而不是行政运行程序，因此任何计划都可将其作为教育补充。每所大学自主决定其行政程序并自主决定学生录取、课程准备，以及学生在5项能力领域（图4）中每个领域的最终能力（通常大多数都不是工程学课程的正常组成部分）。

通过与来自不同文化、不同学科和不同观点视角的人相互交流，学生最终能够真正理解这5项能力。早在两千多年前，孔子针对这一点提出建议：“不闻不若闻之，闻之不若见之，见之不若知之，知之不若行之。”[‡]要理解通过个人参与获得的能力，不仅仅需要聆听、阅读、写作或分担责任。在当今全球互联的世界里，为了成功开展合作，人际交往强调了适应的复杂性和必要性。

每所主办大学都拥有并运行其批准的GCSP。以重大挑战为主题的计划设计将确保5项能力之间的一致性和连通性。GCSP不是规定性的计划。它以结果为基础

[†] 绝大多数工程教育项目都是在本国文化中培养学生从事工程工作，尽管工程作为一项全球性事业，但几乎可以确保如今的工程学学生在21世纪能够在全世界范围内工作，无论他们是否相信这一点。

[‡] 编者注：经查，是荀子的名句。

- **Characteristic of the program:** *program* and *experiences* supplementing engineering education to underpin Grand Challenge problem solutions→**based on student competencies**
- **University role in the program:** each university admits its students, prepares its students, and determines their competency in each of five areas
- **Five student “competency” areas in all GCSP programs:**
 1. **Talent competency**—mentored research/project experience on a Grand Challenge-like topic
 2. **Multicultural competency**—understanding the social viability required for all solution implementations in the intended culture
 3. **Multidisciplinarity competency**—understanding/appreciating multidisciplinarity gained primarily when creating team-based solutions and experiences
 4. **Business competency**—creation of viable business/entrepreneurship models required for local solution implementation
 5. **Social consciousness competency**—understanding the program serves the needs of people and society, such as through service learning and engineers without borders

图4. 重大挑战学者计划概述。

并且运行灵活。“21世纪工程师”的理念确保了机构执行计划的灵活性。

NAE的作用是去激发和促进运动、倡导愿景、召集利益相关者和有关方面、参与社区互动和变革。NAE对GCSP的运作不承担任何责任，也不为任何GCSP提供资金支持。它主持批准新计划的举办、存档记录并定期主持区域会议。它还所有的GCSP举办年度会议，其中包括可能对计划的发展感兴趣的相关方。它还可以促进对GCSP的理解和在全球范围内扩展，以帮助促进GCSP的最终成功。然而，每项GCSP都独立于NAE和其他GCSP。

重大挑战学者计划网络

截至2019年12月16日，美国有75个大学组织开展了已批准的或正在审查的GCSP，另外有83所大学表示有兴趣开展该计划。在国际上，有17所大学计划已经批准或正在审查中，另外53所大学正处于探索创建计划过程中。已批准或即将获取批准的国际计划分别位于阿布拉比酋长国，澳大利亚，巴西，加拿大，中国内地、香港和台湾，意大利，印度，黎巴嫩，马来西亚，荷兰，罗马尼亚，新加坡和英国。其他国家和地区，如哥伦比亚、印度尼西亚、以色列、爱尔兰、哈萨克斯坦、俄罗斯、韩国和越南，也正在探索开发该计划。

一个由重大挑战奖学金项目组成的全球生态系统，作为一个由多种多样、独立、独特的项目组成的网络，与其他有兴趣采用相互学习的最佳实践的项目形成共生关系，是非常可取的。通过GCSP在全球范围内扩展这

一生态系统以接触到更年轻的工程师，这也是实现重大挑战的全球实施的一个重要契机。

工程专业的学生将GCSP视为工程界及其专业未来的发展方向，并对全球GCSP表示出最大的兴趣。GCSP为学生带来了前所未有的机会，如：

- 致力于全球视野和全球解决方案；
- 引入“人和社会”，提出全球工程解决方案，作为工程界的期望；
- 认识到文化对工程解决方案的可行性至关重要；
- 认识到经济因素往往是解决方案是否可行的决定性因素；
- 认识到多学科、多文化的工程团队对复杂的系统解决方案的变革性；
- 准备在全球范围内从事重大挑战以外的工程事业；
- 认识到工程计划愿景可控的原因。

总结与讨论

(1) 工程重大挑战是由地方解决方案组成的一项全球计划。该计划跨越全球，或者即使在一个小的国家内，GCSP也需要许多地方解决方案的协调合作。

(2) 在参与美国GCSP的学生中，一半以上是女性和少数族裔，他们受到用户对“人和社会”关注的吸引和启发。

(3) 尽管研究生很可能会从应对全球挑战的准备工作中受益匪浅，但是让本科生做好这种准备工作并不是工程教育的正常特征。

(4) 当今的学生能够接受GCSP愿景包括的工程技

术和用户责任。

(5) GCSP将每个国家的工程项目扩展为全球性项目，培养学生的多文化、多学科的创新能力，为人类和社会服务。

(6) 世界上任何地方的任何大学都可以实施GCSP。

(7) GCSP帮助当今工程师为应对21世纪的工程问题做好准备，GCSP对其非常重要。

(8) 工程重大挑战愿景的实现取决于GCSP在全球范围内的采纳度。GCSP在全球范围内的采纳结果既能

帮助工程师应对工程重大挑战，又能将GCSP拓展至全球范围。

References

- [1] Constable G, Somerville B. A century of innovation: twenty engineering achievements that transformed our lives. Washington, DC: Joseph Henry Press; 2003.
- [2] National Academy of Engineering. NAE grand challenges for engineering. Washington, DC: National Academy of Engineering; 2008.