

# 应用型高校探索

第十六期

发展规划处编

2018年4月17日

---

● 2016年6月2日我国成为《华盛顿协议》正式缔约成员，这不仅为我国工程专业毕业生获得进入国际市场的通行证提供了可行性，而且将有力地促进我国工程教育面向世界。然而，按照《华盛顿协议》的共同要求，通过工程教育认证的工程专业不仅要深入理解和把握复杂工程问题，更要按照国际实质等效原则培养学生具有解决复杂工程问题的能力。从经济社会发展、经济全球化以及“一带一路”国家战略对工程教育提出要求的角度看，深刻地理解复杂工程问题并培养出具有解决复杂工程问题能力的毕业生，应该不仅仅是拟认证工程专业，而且也是我国高等教育所有本科工程专业当前和今后必须重视和做好的重要工作。

## 【本期导读】

如何理解和解决复杂工程问题——林健，清华大学教育研究院教授、博士生导师

# 如何理解和解决复杂工程问题

## ——基于《华盛顿协议》的界定和要求

清华大学教育研究院教授、公共管理学博士生导师 林 健

我国 2016 年 6 月 2 日成为《华盛顿协议》正式缔约成员，这不仅为我国工程专业毕业生获得进入国际市场的通行证提供了可行性，而且将有力地促进我国工程教育面向世界。然而，按照《华盛顿协议》的共同要求，通过工程教育认证的工程专业不仅要深入理解和把握复杂工程问题，更要按照国际实质等效原则培养学生具有解决复杂工程问题的能力。从经济社会发展、经济全球化以及“一带一路”国家战略对工程教育提出要求的角度看，深刻地理解复杂工程问题并培养出具有解决复杂工程问题能力的毕业生，应该不仅仅是拟认证工程专业，而且也是我国高等教育所有本科工程专业当前和今后必须重视和做好的重要工作。

本文从讨论复杂性是现代工程问题的本质入手，以《华盛顿协议》关于复杂工程问题特征的界定和解决复杂工程问题的能力要求为基础，依次分析复杂工程问题的特征和解决复杂工程问题的能力，而后重点从三个角度讨论如何培养学生解决复杂工程问题的能力，最后阐述如何考核评价学生解决复杂工程问题能力的培养效果，以期对相关院校工程专业提供参考和借鉴。

### 一、复杂性是现代工程问题的本质

1. 现代工程问题是一个复杂系统，具备复杂系统的诸多特性。

从客观世界自身存在的复杂现象、人类改造客观世界的需要以及人类自身组成的各种复杂关系，可以将复杂系统分为三类：复杂自然系统、复杂工程系统和复杂社会系统。其中复杂工程系统就是人类为了自身更好地生存和发展而在改造客观世界的过程中研究、设计、生产或制造的工程系统。人类经济、社会、环境的发展变化，使得人们面临的现代工程问题基本上是复杂工程系统，其复杂性的主要根源与其他复杂系统是一致的：一是系统规模，足够规模是产生复杂性的必要条件，但不是充分条件；二是系统结构，系统构成的多样性和差异性，尤其是层级结构，是系统复杂性的主要根源；三是系统的非线性性，即系统内部诸要素之间是相互作用的，它导致系统的复杂性；四是系统的开放性，即系统与外部环境存在相互关系，它也是系统复杂性的重要根源。由此可见，现代工程问题基本具备复杂系统的诸多特性。

2. 现代工程问题已经不是单纯的工程问题，需要综合考虑并协调多种非工程因素。

人类在改造客观世界的过程中面临着越来越多与工程本身无关的问题，包括人类自身的生存环境、健康安全、伦理道德、可持续发展等，这就使得现代工程问题的解决必须综合考虑和协调这些诸多非工程方面的因素，从长远和发展

的角度提出科学、可行的解决方案。

3. 现代工程问题的复杂性以及出现的新问题往往超越了现有的工程标准和规范。

现有的工程标准和规范是针对已经存在工程项目和人类可以预见的工程问题在材料、工艺、结构、流程、设计和技术等方面的技术标准、质量要求和操作规程，它往往不可能全面覆盖现代工程问题所涉及的诸多不可预见的因素和出现的新问题，这就需要工程师具备解决超越现有工程标准和规范的复杂工程问题的能力 and 素质。

4. 越来越多的现代工程问题不能直接用现有的工程方法和技术去解决。

随着现代工程问题复杂性的不断增加，使用现存的思路、已有工程方法和技术已经越来越不能给出比较满意的结果，甚至无法解决问题，因此，就必须从崭新的角度，采取新的技术路线、开发新的工程方法和技术或者组合各种工程方法和技术来处理这些工程问题。

5. 现代工程问题的解决需要传统工程领域之外的其他学科专业的介入和支持。

现代工程问题的出现，一方面遵循客观世界发展的自然规律和人类社会发展的需要，将涉及越来越多的领域、学科和专业；另一方面突破传统工程领域中的方法和技术的解决范畴。因此，现代工程问题的解决离不开其他学科领域或交

又学科专业的方法、技术和工具的支持和运用。

6. 模型是系统分析和研究现代工程问题的基础，模型的建立无章可循，需要有创造性。

实践表明，对现代工程问题从识别、分析到提出解决方案都需要能够借助模型对其内部诸要素及其联系以及内外部关系等进行分析研究，这种模型可以是抽象模型、物理模型、仿真模型等，取决于现代工程问题的复杂性和解决问题的需要。这就使得模型的建立往往无章可循，难以借鉴传统的思路或技术路线，必须根据问题的性质、特点和实际需要，在建模的思路、采用的方法和实施的技术上有创新和突破。

7. 集成和创新是解决复杂工程问题的主要思路。

系统集成是解决复杂工程问题的主要思路。首先，将复杂工程问题按照功能性质对其进行解剖分解；其次，在充分考虑局部与整体以及局部与局部之间的关系的基础上分别解决好各个子系统的问题，最后按照系统原理将各子系统集成以形成最终的解决方案。此外，在解决复杂问题的整个过程中需要始终贯穿着创新这条主线，这是因为，不仅复杂工程问题及其特性可能是前所未有的，而且解决复杂工程问题的工具、方法和技术也不一定是现存的。

## 二、复杂工程问题的特征分析

1. 关于“复杂工程问题”的界定。

《华盛顿协议》界定的“复杂工程问题”必须具有表 1

所述特征 WP1 和特征 WP2 到 WP7 的一些或全部。与此同时，华盛顿协议对本科毕业生提出了具体的知识要求，如表 2 所示。其中 WP 1 所需要的工程知识是指表 2 中的 WK3、WK4、WK5、WK6 和 WK8。与此类似，中国工程教育专业认证协会界定的“复杂工程问题”必须具备表 1 所述特征 CP1，同时具备特征 CP2 到 CP7 的部分或全部。

**表 1 复杂工程问题的特征**

属性	华盛顿协议 <sup>[1]</sup>	中国工程教育认证协会 <sup>[2]</sup>
需要知识的深度	WP1: 必须有深入的工程知识才能解决, 这些知识是指能够运用基本原理分析方法的一个或多个知识要求(指表 2 中的 WK3、WK4、WK5、WK6 或 WK8);	CP1: 必须运用深入的工程原理, 经过分析才可能得到解决;
冲突需要的范畴	WP2: 涉及大范围的或有冲突的技术、工程和其他问题;	CP2: 涉及多方面的技术、工程和其它因素, 并可能相互有一定冲突;
需要分析的深度	WP3: 没有明显的解决方案, 需要抽象思维及原创性分析以形成合适的模型;	CP3: 需要通过建立合适的抽象模型才能解决, 在建模过程中需要体现出创造性;
问题的熟悉度	WP4: 涉及不太常见的问题;	CP4: 不是仅靠常用方法就可以完全解决的;
适用准则的程度	WP5: 属于专业工程实践标准和规范涵盖范围之外的问题;	CP5: 问题中涉及的因素可能没有完全包含在专业工程实践的标准和规范中;
利益相关者参与程度及冲突要求的程度	WP6: 涉及多种不同的利益相关者群体, 他们具有广泛变化的需求;	CP6: 问题相关各方利益不完全一致;
相互依赖性	WP7: 属于高水平问题, 包含许多组成部分或子问题。	CP7: 具有较高的综合性, 包含多个相互关联的子问题。

从表 1 可以容易看出,《华盛顿协议》与中国工程教育专业认证协会分别界定的“复杂工程问题”具有两方面的相似性:一是两者对特征构成的条目数要求上是一致的;二是后者每一条特征属性的内涵与前者相应条目特征属性的内涵是基本相似的。由此不难看出,中国工程教育专业认证协会关于“复杂工程问题”的界定是基本参照《华盛顿协议》关于“复杂工程问题”的界定而制定出来的。

表 2 《华盛顿协议》认证专业提供的知识<sup>[1]</sup>

WK1:对适用于本学科的自然科学的系统的、基于理论的理解;
WK2:适用于本学科的支持分析和建模的以概念为基础的数学、数值分析、统计和计算机和信息科学的通识内容;
WK3:工程科学所需要的工程原理的系统的、基于理论的公式化表述;
WK4:为工程实践领域提供理论框架和知识体的工程专业知识,大部分处于本学科的前沿;
WK5:在实践领域支持工程设计的知识;
WK6:工程学科实践领域中工程实践(技术)的知识;
WK7:理解工程在社会中的作用和学科在工程实践中已确定的问题:工程师对公共安全的伦理和专业责任,工程活动对经济、社会、文化、环境和可持续发展的影响;
WK8:了解该学科研究文献的相关知识。

然而,逐条比较二者对应的特征可以发现,除了第 2、3、7 条特征的内涵是一致的外,其他各条特征内涵之间存在着一定的差异。第 1 条特征:WP 1 指出了工程知识的具体

内容,如表 2 中所示,而 CP 1 则将这些工程知识笼统地用“工程原理”表达;第 4 条特征:WP 4 用不常遇见的问题作为复杂工程问题的特征,而 CP 4 则用不能仅靠常用方法就可解决作为复杂问题特征,显然,WP 4 的定义更合适作为“问题”的特征,而常用方法的组合作为方法的创新,往往也能够胜任复杂工程问题的解决,这方面并没有被 CP 4 所涵盖;第 5 条特征:WP 5 的要求比 CP 5 的高;第 6 条特征:CP 6 只是强调各方利益的不一致性,而 WP 6 还强调各方需求的广泛的变化,这种“动态性”更能够准确表达复杂工程问题的特征。

尽管中国工程教育专业认证协会的界定与《华盛顿协议》的界定存在上述差异,但从《华盛顿协议》的实质等效性原则看,这些差异是允许并可接受的,它们并不会对各专业培养满足工程专业认证标准要求的毕业生产生根本性的影响。这是因为,实质等效性原则并不要求加入《华盛顿协议》的专业具备完全相同的产出和内容,而是要求这些专业培养出能够从业、并适合通过培训和实习获得职业胜任能力和注册资格的毕业生。

## 2. 复杂工程问题的特征分析。

充分认识和深刻理解复杂工程问题的特征,不仅有利于课程体系的改革、教学内容的选择、教学计划的制定、教学形式的组织和教学方式的采用,而且有利于系统地培养学生解决复杂工程问题的能力,同时直接关系到毕业要求的有效

实现。因此，有必要对复杂工程问题的特征进行逐条分析。

WP 1 分析：这条特征是所有复杂工程问题均必须具备的，其强调的核心是，复杂工程问题的分析解决必须深入运用工程原理和各种工程知识。本特征的内涵表现在四个方面：一是要求知识面广，包括系统的工程原理知识（WK 3）、处于前沿的工程专业知识（WK 4）、工程设计知识（WK 5）、工程实践知识（WK 6）或学科研究文献的知识（WK 8）；二是对知识的要求不再像过去那样是简单的“掌握”，而是要“运用”知识的原理；三是知识不能够“简单地”套用，而是要对知识“深入”的应用；四是对问题的解决不能“照搬方法”，而要“经过分析”。

WP 2 分析：这条特征强调的是，复杂工程问题自身必定涉及到多方面因素，这些因素间还可能存在冲突。从解决问题的角度分析，本特征的内涵表现在两方面：一是工程问题的复杂性使得问题的解决必须综合考虑包括技术、工程等多方面的因素，这些因素直接关系到复杂工程问题的有效解决；二是工程问题内部各要素间可能存在矛盾与冲突，这就需要理清它们之间的相互关系，明白可能的冲突点，找到解决矛盾的突破口，在解决矛盾和冲突的过程中解决复杂工程问题。

WP 3 分析：本条特征强调的是，解决复杂工程问题的难度，必须通过建模与分析才能解决。事实上，在认识问题之

前必须要能够界定问题，而分析复杂问题的有效手段是借助模型。本条特征的内涵表现在四个方面：一是复杂工程问题往往没有显而易见的解决方案；二是要根据解决问题的目标要求理清复杂工程问题的内部要素和外部联系；三是运用抽象思维和原创性分析对复杂工程问题进行界定、分析和提炼，进而形成适合分析和解决复杂工程问题的模型；四是建模的思路、手段和方法需要突破现有的局限，突出创新性。

WP 4 分析：本条特征强调的是，工程问题的复杂性往往表现在问题自身的不常见性。如果问题是经常性的或屡见不鲜，解决问题的方法自然已经形成，问题本身就会失去复杂性。解决具有本条特征的复杂工程问题要突破方法和学科上的思维定势，一方面要认识到传统的、常用的方法已经难以解决复杂工程问题，需要有新思路和新方法，事实上，存在着多种解决复杂工程问题方案和途径；另一方面，仅靠单一学科已经无法胜任复杂工程问题的解决，需要多学科知识、方法和手段的综合运用。因此，多学科领域的团队合作成为解决复杂工程问题的常态，要求成员间分工协作、优势互补、目标一致。

WP 5 分析：本条特征强调的是，复杂工程问题所涉及的因素已超越了专业工程实践标准和规范涵盖的范围。因此，要寻求对现有标准、规范、方法和手段的突破和变革。本条特征的内容表现在三个方面：一是日益复杂的工程问题受到

越来越多因素的制约，可能涉及到生态平衡、自然和谐、健康安全、工程伦理、经济发展等，这些因素会超越现有的专业标准和规范所包含的内容；二是解决这些复杂工程问题，就是要突破现有方式、方法和手段的限制，寻求解决思路、途径和方法的变革；三是在对现有标准和规范的突破和变革过程中，工程师要从经济社会发展和人与自然和谐的角度，注重工程伦理准则和职业道德规范。

WP 6 分析：本条特征强调的是，复杂工程问题涉及多个利益相关群体，他们各自的利益诉求既不一致又是广泛变化着的。因此，不仅要认识不同群体的利益冲突，还要重视不同利益的协调。也就是说，一方面要认识到，复杂工程问题涉及到社会社区规划、生态环境保护、相关行业利益、地区经济发展以及价值观念认同等多方面的利益，这些利益间的不协调和冲突将成为常态；另一方面要意识到，协调并处理各方的利益诉求，已经超越了传统意义上的工程技术范畴，需要把握主要矛盾，在各方利益中寻求平衡点。

本条特征与 WP 2 的区别在于后者是针对复杂工程问题自身内部的因素，而前者针对的是利益相关者直接的利益。

WP 7 分析：本条特征强调的是，复杂工程问题是由多个部分或子系统构成的高水平问题。因此，既要认识到这类问题的构成，又要处理好整体与局部的关系。也就是说，一方面要认识到，复杂工程问题是一种复杂系统，具备复杂系统

的各种特征，是由多个相互关联、相互依赖、相互制约、相互作用的子系统构成的整体；另一方面要意识到，解决复杂工程系统的核心是处理好各局部子系统与整体系统的关系，要遵循局部服从整体的原则，并以实现整体目标要求为出发点处理好局部之间的关系。

图 1 表达的是复杂工程问题及其具有的特征。正如《华盛顿协议》所规定，图中 WK 1 为任何复杂工程问题必须具备的基本特征，此外，一个复杂工程问题还应具备图中选择性特征 WK 2 到 WK 7 的一项或多项。这样，WK 1 与一项或多项其他特征进行组合就能够形成众多类型的复杂工程问题。

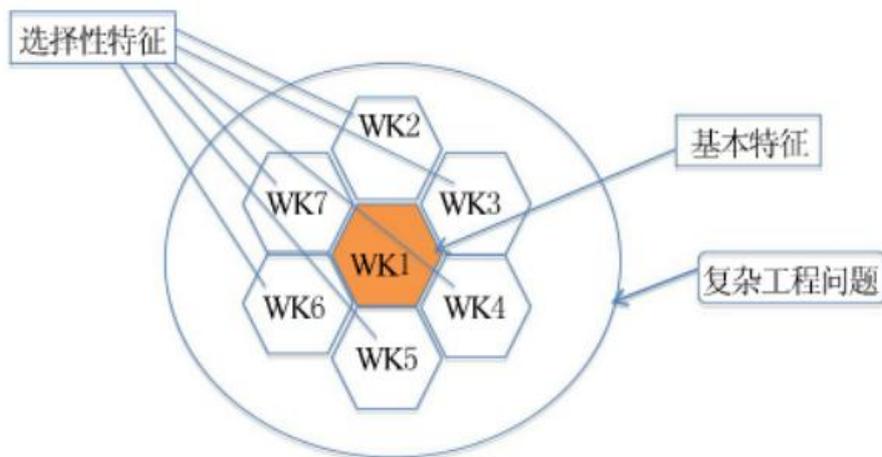


图 1 复杂工程主其具有的特征

工程教育的主要目标就是要培养学生能够深入运用工程原理和各种工程知识，分析和解决具有上述特征要求的复杂工程问题。为了实现这一目标，工程专业必须回答三个问题：① 如何选择、准备或设计具有上述特征的用于工程师培养的复杂工程问题；② 如何围绕复杂工程问题设计和实

施主要教学环节，如课程设计、综合设计、项目参与、企业学习、毕业设计等；③ 如何把复杂工程问题所需要的工程原理和各种工程知识在主要教学环节中充分地深入的运用，以培养学生分析解决复杂工程问题的能力。

### 三、解决复杂工程问题的能力要求分析

#### 1. 《华盛顿协议》规定的毕业生素质。

解决复杂工程问题的能力是工程专业合格毕业生必须具备的最本质的素质或要求。针对工程师培养的需要和现代社会对工程师的要求，《华盛顿协议》对通过4至5年的学习获得毕业文凭的毕业生提出了知识和素质的要求，分别如表2、表3所示。事实上，毕业生素质是对毕业生所应具备的各种能力的清晰、简明的阐述，表3中的WA1至WA7、WA10等8项要求均是直接针对解决复杂工程问题而提出的能力要求，它们分别反映出对毕业生在解决复杂工程问题的能力要求的不同方面。

表3 《华盛顿协议》规定的毕业生素质

区别特征	Attribute Profiles for Washington Accord Graduate
工程知识	WA 1：应用数学、自然科学、工程原理和工程专业知识解决复杂工程问题；（分别指表2中的WK 1到WK 4）
问题分析：分析的复杂性	WA 2：能够应用数学、自然科学和工程科学的基本原理，识别、表达、研究文献和分析复杂工程问题，以获得被证实的结论；（WK 1到WK 4）
设计 / 开发解决方案：工程问题的广度和独特性，即问题的原始程度以及解决方案被识别和规范的程度	WA 3：适当考虑公共健康、安全、文化、社会、环境，设计复杂工程问题的解决方案以及设计满足特定需求的系统、构成（部件）或（工艺）流程；（WK 5）

调查研究：调查和实验的广度和深度	W A 4：运用基于文献研究的知识（W K 8）和包括实验设计、数据分析和解释、以及信息综合等研究方法，开展复杂问题调查研究以得到有效的结论；
现代工具的使用：工具适用性的理解水平	W A 5：针对复杂工程问题，开发、选择和使用适当的技术、资源、和现代工程和 I T 工具，包括预测和模拟，并理解其局限性；（W K 6）
工程师和社会：知识和责任的水平	W A 6：应用相关背景知识的论证分析，评价专业工程实践和复杂工程问题解决方案对社会、健康、安全、法律和文化问题的影响以及产生的责任；（W K 7）
环境与可持续发展：解决方案的类型	W A 7：理解和评价针对复杂工程问题解决方案的专业工程工作对环境和社会可持续发展的影响；（W K 7）
伦理：理解和实践水平	W A 8：运用伦理原则，在工程实践中遵守职业道德和规范，履行责任；（W K 7）
个人和团队工作：团队中的角色和多样性	W A 9：在各种团队和多学科背景下有效地发挥个人、成员和领导角色的作用；
沟通：根据从事活动类型的沟通水平	W A 1 0：能够在复杂工程活动中与工程界和全社会进行有效沟通，例如，能够理解和撰写有效的报告和设计文档，做有效的展示，给出和接收清晰的指令；
项目管理和财务：不同类型活动需要的管理水平	W A 1 1：展示对工程管理原理和经济决策的认知和理解，并应用到作为一个团队成员和领导者自己的工作中，在多学科环境下管理项目；
终身学习：准备继续学习及其深度	W A 1 2：认识到在最广泛的技术变化的情景下独立地开展终身学习的必要性，并具备在这种情景下的终身学习能力。

## 2. 解决复杂工程问题的能力要求分析。

对于拟认证工程专业而言，为了更好地制定本专业的毕业要求和开展学生解决复杂工程问题能力的培养工作，就需要对华盛顿协议上述 8 条素质要求的本质内涵有深刻的理解和把握。

WA 1：本条能力聚焦工程知识，强调的关键是能够将所学的各种知识“用于”解决复杂工程问题，而不是像以往要

求那样只是“学习了”知识；同时，“复杂性”在工程问题的体现是能力培养的关键。

WA 2：本条能力聚焦问题分析，强调分析复杂工程问题是一项复杂工作，不仅需要应用多学科的基本原理，而且要从甄别确认、表达描述、通过研究文献等几方面分析复杂工程问题，并且获得明确且清晰的结论。其中基本原理指的是基本理论、基本规律和基本性质，这些构成某一学科最本质的东西。

WA 3：本条能力聚焦设计/开发解决方案，强调复杂工程问题的独特性即原始程度及其涉及外部因素的广泛性。因此，在设计或开发复杂工程问题的解决方案时，一方面要适当充分地考虑这些外部诸多非技术因素，另一方面要因复杂工程问题与以往问题的差异而注重在设计或开发环节体现创新意识。

WA 4：本条能力聚焦调查研究，强调针对复杂工程问题而开展的调查和实验研究要具有一定的广度和深度，以得到有效的研究结果。这里调查指的是开展文献研究而获得研究复杂工程问题所需要的信息和数据等，研究指的是实验设计、数据分析和解释以及信息综合等分析性研究。

WA 5：本条能力聚焦现代工具的使用，强调能够针对复杂工程问题的特征，开发、选择和使用恰当的技术、资源和各种现代工具，并了解这些工具的不足和局限性。其中“开

发”是指在现有工具不足以满足需要时，或者对该工具进一步挖掘、强化、提升其功能，或者研究、设计和制造新的工具“资源”是指除了技术和工具外的其他可用于解决复杂工程问题的物质的和非物质的手段。

WA 6：本条素质聚焦工程师和社会，强调工程相关背景知识的论证分析在评价专业工程实践和复杂工程问题解决方案对外界社会影响的作用以及工程师对这些影响所应承担的的责任大小。

其中“影响”既不能够泛泛而谈，也不能够过于宏观地讨论工程与社会的关系，而是要针对一个具体的“专业工程实践”活动或“复杂工程问题解决方案”的“影响”；“应承担的责任”不仅要针对具体的“工程”本身，还要延伸到工程师身上。

WA 7：本条素质聚焦环境与可持续发展，强调针对不同的复杂工程问题解决方案，能够理解和评价专业工程工作对环境和社会可持续性发展的影响。其中“理解”不是宏观的理解和讨论，而是能够针对具体的“解决方案”；而“评价”是本条要求的关键。

WA10：本条能力聚焦沟通，强调能够在各种所从事的复杂工程活动中与工程界和全社会进行有效沟通。需要注意的是，应该针对不同的沟通对象采取不同的沟通方式，这样才能取得有效的沟通效果。

为了准确把握以上各条素质要求并开展学生解决复杂工程问题能力的培养工作，基于以上分析，可以将这些素质要求分别概括为表 4 中的能力或素质。

**表 4 解决复杂工程问题需要具备的能力和素质**

编号	能力/素质	类型
WA1	多学科知识应用能力	专业能力
WA2	复杂工程问题分析能力	
WA3	复杂工程系统设计与开发能力	
WA4	文献研究与实验分析能力	
WA5	现代工具使用能力	
WA6	工程师的社会责任意识	综合素质
WA7	环境与可持续发展意识	
WA10	沟通交流能力	社会能力

《华盛顿协议》的上述解决复杂工程问题的能力素质要求与整个毕业生素质一样，旨在帮助像中国这样的《华盛顿协议》正式签约成员和其他临时成员制定出一套以结果为导向的认证标准。仔细比较《华盛顿协议》的毕业生素质与中国工程教育专业认证协会的毕业要求，容易发现二者具有两方面的相似性：一是条目数相同，均为 12 条；二是后者每一条的内涵与前者相应条目的内涵是基本相似的。由此也不难看出，中国工程教育专业认证协会的毕业要求是基本参照《华盛顿协议》的毕业生素质而制定出来的。

然而，可能出于对《华盛顿协议》毕业生素质的理解上的差异以及中国工程教育具体情况的需要，在 12 条毕业要求中，除了第 1 和第 5 条完全一致外，中国工程教育认证协

会毕业要求的其他条目与《华盛顿协议》毕业生素质的对应条目均存在或多或少的差异。但是，由于《华盛顿协议》的毕业生素质本身并不构成认证资格的一种“国际标准”，而只是为各认证组织描述实质等效性资格结果提供一种被广泛接受的共同参考，这些差异是允许并可接受的。

拟认证工程专业的解决复杂工程问题的能力要求（以下简称“能力要求”）作为该专业毕业要求的核心部分，应该与毕业要求的其他条目一道制定，但均要遵循三点要求：①能力要求必须完全覆盖认证组织以《华盛顿协议》毕业生素质为基础制定关于毕业要求的基本要求；②能力要求要符合专业所在学校的人才培养定位，体现学校的服务面向、办学优势和专业特色；③要有行业企业的专业参与制定并发挥实质性的作用。

#### 四、解决复杂工程问题能力的培养

学生解决复杂工程问题能力的培养是一项系统性、全局性的工作。它不应该只是一门课程的目标，也不应该是一位教师的责任，它需要工程专业担任教学的全体教师、从事教学管理的全体职员、专业负责人、专业所在院系领导以及学校相关部门的共同努力才能胜任和完成的。在具体开展能力培养工作之前，需要将能力要求予以分解和落实。

能力要求的分解和落实就是要将工程专业制定的每条能力要求分解和细化成为对知识、能力或素质的明确、清晰

和具体的要求，简称指标点或标准点，达到能够判断或衡量是否实现的程度，以成为相关课程或教学环节的教学目标和衡量教学效果的标准。

指标点与课程或教学环节的关系是：一个指标点需要一个或多个课程或教学环节的先后实施才能实现，因此，这个指标点就成为相关课程或教学环节共同的教学目标；一门课程或一个教学环节往往不以一个指标点为唯一教学目标，它的实施也为其他指标点的实现作出贡献，因此，这门课程或教学环节的教学目标可以由多个指标点组成。

解决复杂工程问题能力的培养工作应该从能力培养、培养过程和培养模式三个不同角度共同着力，才能取得理想的效果。

### 1. 从学生能力培养的视角

能力导向是当代社会对高等教育人才培养产出的共识。从学生能力培养的视角，要将学生解决复杂工程问题能力的培养作为工程专业各项教育教学活动的共同目标，也就是说，工程专业所有的教育教学活动，都应该围绕着学生能力的培养而设置、安排和实施，以达到逐条地实现能力要求的目标。

多学科知识应用能力的培养：实现这条能力要求的关键在于教学内容的选择和教师的配备。首先，数学、自然科学、工程原理等课程的教学内容必须与工程学科相关，是本学科

所需要的，能够用于或有助于复杂工程问题的解决。因此，应该结合工程专业的性质和需要，尤其是本专业复杂工程问题的特征精心地选择教学内容。强调教学内容的关联性在当前提高实践教学课时比例，理论教学课时有限的情况下尤其重要。其次，配备了解或熟悉工程专业的任课教师对提高课程和教学内容在解决复杂工程问题的作用上至关重要。在教学实践中，数学和基础课程任课教师的问题尤为突出，他们往往不针对某一工程学科开课，或者轮流给不同专业教学。因此，课堂例题、课程作业等不能够直接或间接地联系到工程问题的解决。通过固定任课教师，以使他们能够逐年了解和熟悉工程专业，是解决这方面问题的有效做法。

复杂工程问题分析能力的培养：实现这条能力要求的关键在于复杂工程问题的选择和教师的工程能力。首先，教师提出的复杂工程问题必须符合表 1 的界定，它们应该主要源于工程实践，可以是已经解决了的复杂工程问题，这样不仅能够真实地训练学生识别、表达、研究和分析复杂工程问题，而且有利于将学生的分析结论与实际问题结论相比较。此外，教师自身的工程实践经历和分析解决复杂工程问题的能力是胜任培养学生本条能力的关键。事实上，教师的工程能力不足是我国高校普遍存在的问题，涉及多方面的因素，关键在高校和院系的政策措施。

复杂工程系统设计与开发能力的培养：这条能力是上条

能力的继续和延伸，实现这条能力要求的关键在于复杂工程问题的设计和教师的工程创新能力。首先，用于培养学生这条能力的复杂工程问题不应是现有问题的简单复制，它必须具有一定的新颖性和独特性，同时涉及外部诸多因素，因此，学生除了要能够综合平衡内外部各方面要素外，还必须具有创新意识，才能拿出解决方案。其次，教师的工程创新能力，包括承担或参与复杂工程问题的解决、复杂工程系统的设计以及新产品的开发等经历对培养学生本条能力至关重要。

文献研究与实验分析能力的培养：实现这条能力要求需要有足够的文献资料、充足的实验设备和数据分析条件。文献资料应该注重与本学科复杂工程问题直接相关的原始文献，如以往各种工程项目、工程系统，尤其是大型、复杂工程问题的设计方案、实验数据、分析报告等，这些文献资料对新的复杂工程问题的研究具有重要的参考和借鉴作用。实验设备，如学校工程训练中心等基础实验场所和院系专业实验室等，能够用于检验具有创新意识的实验设计方案的有效性。数据分析条件，包括相关数据处理和分析软件和工具等，对于获得正确有效的结论是必须的。

现代工具使用能力的培养：实现这条能力要求需要工程专业做好三方面的工作。①通过广泛调研和比较分析，系统全面地了解解决本专业复杂工程问题需要的各种技术、资源和现代工程和 IT 工具，然后将这些技术和工具逐一落实到

相关的课程或教学环节；②要求相关任课教师设计和提出适当的复杂工程问题，使学生在解决问题的过程中运用和掌握这些技术和现代工具；③要设置现代工具使用的综合性课程，课程包括各种类型的复杂工程问题，教师指导学生自主选择、综合运用各种现代工具并了解各自的特点和不足。

工程师的社会责任意识的培养：实现本条素质要求需要工程专业做好两方面工作。①通过通识教育课程的设置使学生在认识、思想和观念层面上系统全面地理解表 2 中 WK 7 规定的关于工程师对公共安全的专业责任以及工程活动对经济、社会、健康、安全、法律和文化问题的影响；②在上述各条能力（WA 1 到 WA 5）的培养过程中，要求所有相关任课教师有意识地培养、强化并形成学生在分析和解决复杂工程问题时应用相关的背景知识的论证分析，自觉地将专业工程实践和复杂工程问题解决方案与对外部诸因素的影响和自身的责任相联系，培养学生的社会意识和责任意识。

环境与可持续发展意识的培养：实现本条素质要求需要工程专业做好与工程师社会责任意识培养相类似的工作。①通过通识教育课程使学生深刻理解复杂工程问题解决方案对环境和社会可持续发展的影响；②在各条能力培养过程中，逐渐地培养学生在解决复杂工程问题的每时每刻都要注意评价和重视专业工程工作对环境和社会可持续发展的影响，以最终形成学生的环境与可持续发展意识。

沟通交流能力的培养：实现本条能力要求不可能通过一门课程或一个教学环节的实施，而是需要在上述各条能力的培养过程中，有意识地、不断地培养和提升学生这方面的能力。具体而言，可以从两方面入手：一是在培养学生上述能力的相关课程和教学环节中，通过教学组织形式安排、课程作业要求和课堂研讨和展示等，培养学生与同学和教师的有效沟通；二是在学生识别、分析和解决复杂工程问题的过程中，在收集数据、获取信息、寻求资源和获得指导的过程中，利用、设计和创造各种可能的条件和机会与工程界和社会各界进行各种形式和多种方式的沟通和交流。

## 2. 从人才培养过程的视角

从大学教育的先完成通识教育再进行专业教育的过程看，工程专业必须充分地认识到：能力和素质的培养和提升不应该仅仅是专业教育的责任，也应该是通识教育的任务，需要二者相辅相成、共同作用、合力完成。通识教育负责基本知识的学习、基本原理的理解和基本技能的掌握，提升对事物本质规律的认识和理解，培养形成正确的观念、意识和精神，对于学生综合素质的培养以及解决能力培养上的认识和观念问题至关重要，是能力培养不可或缺的组成部分。专业教育强调专业知识的学习、专业意识的形成和专业能力的培养，它以通识教育为基础和支撑，一方面在通识教育阶段获得的基本技能和初步能力的基础上，培养和提升各种专业

能力和社会能力，另一方面在通识教育形成的正确的态度、观念和意识的基础上，进一步培养全局视野、责任意识、奉献精神 and 职业道德。

从学生能力的形成和提升过程看，工程专业还应该认识到：能力的培养是一个逐渐形成、综合作用和螺旋上升的过程。按照人类认知和学习规律，能力培养的逐渐形成过程要经历从知识学习到初步能力形成再到目标能力形成这样一个渐进的、动态的连续过程。在这个过程中，每一条能力的培养都不是一个单独的教育教学活动，它需要多门课程或教学活动的综合作用，需要这些课程的前赴后继、不断强化、相互作用、共同发力和效果集成，才能够实现各条能力要求。能力的培养不是简单的直线提升，而是要经历螺旋式上升的过程，包括从基本技能到动手能力、从动手能力到实践能力、再从实践能力到创新能力、最后从创新能力到综合能力。

从整个大学学习过程看，必须将能力培养贯穿于学生四年学习的始终。在这方面，除了专业培养方案安排的教育教学活动外，可以着重考虑以下几点：①从大一起就给学生提供机会进入各类实验室，逐渐从公共实验室、基础实验室到专业实验室，鼓励和支持学生参与各种实验和设计活动；②从大一起就在双向选择的原则下给学生配备导师，要求教师关注学生的个性特点，鼓励学生参与教师的科研等学术活动；③为学生提供各种校外实习和学习机会，从生产实习、

社会实践、顶岗实习到企业学习，鼓励和支持在真实的工程环境下提升各种能力；④注重发挥学生课外学习的作用，如：鼓励学生参与各种学生社团活动，培养学生的社会能力；鼓励学生参与各种科技竞赛活动，培养学生的创新意识和能力；⑤为学生提供在境内外和校内外的各种文化、科技、教育、体育等方面的学习和交流活动，使学生在与不同文化、经历、背景和民族的人的交流中开拓视野、丰富知识和学会包容。

### 3. 从人才培养模式的视角

从人才培养模式的视角，为了更好地培养学生解决复杂工程问题的能力，需要重点做好三方面的工作：课程体系的整合重组或改革；教学组织形式和教学方式改革；实践教学体系的构建或完善。

#### （1）课程体系的整合重组或改革。

工程教育专业认证通用标准规定的课程体系包括7个部分的课程模块，每个模块均应该在学生解决复杂工程问题的能力培养上具有专门的功能，如表5所示。因此，要通过对原有的课程体系进行整合重组或改革，使得各个模块均能够在学生解决复杂工程问题能力培养上发挥应有的作用。

整合重组或改革后的课程体系作为一个统一体，必须将学生解决复杂工程问题能力的培养贯穿于整个课程体系之中，这就对专业培养方案的制定和每位任课教师均提出要

求。一方面，专业培养方案的制定必须严格遵循学生能力形成的规律并充分考虑不同能力之间的内在联系，注重课程之间在能力培养上的逻辑关系，合理有效地安排各门课程，使每门课程及相关模块在学生能力培养上的功能得到充分发挥；另一方面，每位任课教师需要清醒地了解所授课程在能力培养上与其他课程尤其是先导课程和后续课程的关系，这样才能突出课程重点，在逐渐、不断提升学生能力的过程中起到预期的作用。

**表 5 课程体系各模块在学生解决复杂工程问题能力培养上的功能**

课程模块	课程模块在学生解决复杂工程问题能力培养上的功能
数学与自然科学课程	能够应用课程知识和基本原理,识别、表达、分析和解决复杂工程问题。
人文社科类通识教育课程	能够在从事工程设计时综合考虑经济、社会、环境、法律、伦理等各种制约因素,并了解应承担的责任;能够与业界和社会进行沟通交流。
工程基础类课程	能够应用多学科知识及其基本原理,选择与使用恰当的现代工具,系统深入地识别、研究、表达、分析和解决复杂工程问题。
专业基础类课程	
专业类课程	能够创新性地研究、设计、开发、评价并实现复杂工程系统。
工程实践环节	培养学生的工程实践能力和创新能力。
毕业设计	培养学生的工程意识、协作精神以及综合应用所学知识解决实际问题的能力。

课程体系改革能够为学生能力的培养打下坚实的基础。但是，要使得各课程模块上述功能能够充分发挥并相互作用

以取得预期的整体效果，离不开与改革后的课程体系相配套的教学组织形式和教学方式的改革。

## （2）教学组织形式和教学方式改革。

工程专业目前普遍采用的教学组织形式和教学方式在学生解决复杂工程问题能力的培养上存在的问题是效果不佳。教师不仅要主动地将工程问题的复杂性融入各种教育活动和教学环节中，通过教学设计将复杂工程问题的特征展现给学生，更需要通过行之有效的教学组织形式和教学方法逐渐培养学生形成分析和解决复杂工程问题的能力。

教学组织形式和教学方式改革涉及以下几方面工作。首先，复杂工程问题的选择和设计。这方面要注意三点：一是要围绕教学内容和教学目标的需要；二是要满足复杂工程问题的特征要求；三是复杂性和难度要循序渐进。其次，课堂上注重采取研讨式和参与式的教学方式。这方面需要注意的是：一要激发学生主动参与解决复杂工程问题的兴趣和积极性；二是要通过分组和分工合作的方式提高每个学生的参与度。第三，在有利于识别、分析和研究复杂工程问题的环境和氛围中组织和开展教学活动。这需要教师能够充分利用包括提出复杂工程问题的企业，校外工程实践基地、工程专业实验室等场所，灵活地实施教学。第四，课外注重采取小组学习和合作学习的方式。这不仅能够弥补课堂教学课时不够的缺陷，更重要的是给予学生更大的空间、更多的时间、更灵活

的方式，与同学一道或相对独立地分析、研究和解决复杂工程问题。第五，鼓励学生充分运用互联网平台及数据库资源，获取有利于复杂工程问题解决的各种数据、信息和文献。

### （3）实践教育教学体系的构建或完善。

实践是工程的本质，实践是创新的基础，没有系统和充分的实践，解决复杂工程问题能力的培养只能是纸上谈兵。因此，学生解决复杂工程问题能力的培养需要有一个功能全面的实践教育教学体系，可以由基础实践模块、专业实践模块、综合实践模块和职业实践模块构成，并通过普通实习、教学实践、工程训练、创新竞赛、社团活动、企业学习、项目研究和社会服务等实践教育资源整合和开发而成。

为了充分发挥实践教育教学体系在培养学生解决复杂工程问题能力上的作用，应该注意以下几点：一是学生的实践教育教学活动要贯穿大学学习的全过程，这个过程与学生能力的培养和形成过程同步；二是实践内容应该做的由浅入深、由点到面、由简单到复杂，以适应学生从掌握基本技能、具备动手能力和实践能力、拥有创新能力到最终形成解决复杂工程问题能力的过程；三是要求进入专业培养方案中的所有课程，包括通识教育课程和选修课程，尽可能安排相关的实践环节，为学生提供从广义教育实践到具体工程实践的多种机会和选择；四是在专业培养方案之外，根据本校具体实际和工程专业的条件，尽可能安排不同形式和类型的实践活

动，以满足学生兴趣和个性需求。

## 五、解决复杂工程问题能力的考核评价

学生解决复杂工程问题的能力要求的实现，除了需要按照上述要求和建议实施课程和教学环节外，还需要有对实施效果的考核评价，其目的在于确保相关课程及教学环节的教学质量能够达到课程教学目标即相关能力分解后的指标点的要求。

高等学校对课程教学效果的考核评价往往采取文理科的方式，其中最常用的一种就是通过卷面考试的形式、让学生书面回答若干问题来衡量课程教学目标的要求的实现程度。但对以各种能力培养为主的工科教育而言，尤其是要考核评价学生解决复杂工程问题能力的培养效果时，就需要采取最能够表现能力要素的方式来准确考核评价课程学习效果。

事实上，一门课程或一个教学环节的考核评价方式的选择和确定要遵循三个原则：有效性、多样性和可行性。有效性是指该考核评价方式能否客观准确地评估出拟定课程或教学环节的教学目标的实现程度，它与能力要求的指标点密切相关，也就是说，不同的能力指标点要求应该采用不同的考核评价方式。多样性是指考核评价某一课程或教学环节教学目标的方式应该是多种多样的，可以有课程设计作品、系统开发结果、问题研究成果、综合性作业、专题研讨、实

验报告、项目答辩等等多种形式。可行性是指一种考核评价方式是否合适用于对拟定的课程或教学环节进行评估，即在条件、时间、人力和资源上是否可行。

基于第三节对解决复杂工程问题能力要求的分析并考虑到各自的构成要素，表 6 分别给出针对《华盛顿协议》提出的 8 条能力素质要求的考核评价方式。

**表 6 考核评价解决复杂工程问题能力素质要求的方式**

能力/素质	相应的考核评价方式
WA1	课程作业、专题分析报告、专项研究报告、书面考试
WA2	系统建模与分析报告、复杂问题分析报告、综合性作业、专题研讨
WA3	课程设计作品、系统开发方案、复杂部件设计作品、工程项目研发成果、设计/开发方案答辩、专题研讨
WA4	实验研究报告、文献研究报告、系统设计与数据分析报告、系统信息处理与分析报告、专题研讨、课程作业
WA5	使用各种现代工具解决复杂工程问题的方案、报告、作品、模型和综合性作业等
WA6	复杂工程问题解决方案可行性分析及社会影响报告
WA7	复杂工程问题解决方案对环境和可持续发展影响的分析报告
WA10	撰写综合性报告、项目设计方案展示、团队角色表现

表 6 中针对每一条能力素质要求的考核评价方式都不是单一的，事实上，不仅对每一能力素质要求，甚至对某一课程或教学环节教学目标实现程度的评估也应该并可以由几种不同的考核评价方式从不同角度进行。这一方面是由于课程教学目标往往包含多个能力要求的指标点，针对不同的

指标点可能需要不同的考核评价方式；另一方面是因为一种考核评价方式可能难以胜任对多个指标点要求的评估。

需要着重指出的是，针对解决复杂工程问题能力要求的考核评价方式的选择和确定还要注重两方面问题。首先，要处理好过程性评价和结果性评价的关系。教师们往往不可能仅仅通过课程结束后一次的考核评价就能够完全准确地掌握学生解决复杂工程问题能力的培养效果，必须考虑到学生在能力素质形成过程中的投入情况和能力素质的提升程度。因此，注重培养过程的评价并加大其结果在整个课程成绩中的比重，不仅能够有效地激励学生在整个学习过程中的投入，也能够更全面客观地评价学生能力素质的培养效果。第二，评价主体的邀请。在表 6 中列出的各种方式中，应该鼓励邀请自身在相关能力素质方面优秀的教师或专家，如企业中工程能力强的工程师，参加对相关课程的考核评价，以使得对学生解决复杂工程问题能力的培养能够更好地达到行业企业的要求。

对复杂工程问题的界定和理解会随着现代社会的迅速发展而做出适当的调整 and 变化，但对学生解决复杂工程问题能力的培养将始终是全球高等学校所有工程专业的核心任务，这与其是否准备接受工程教育专业认证无关。本文在这方面的研究是一种探索和尝试，不仅希望能够为相关院校的工程专业在理解复杂工程问题和开展学生解决复杂工程问

题能力的培养工作方面提供参考，更希望这些专业的教师和相关专家学者能够加入本专题的进一步研究。