

21 世纪 CPS (Cyber-physical Systems) 教育

美国国家科学院·工程院·医学院 报告

21 世纪 CPS 教育委员会
计算机科学与电信委员会
工程学与物理学部

美国国家科学院出版社
华盛顿特区
www.nap.edu

美国国家科学院出版社 第五街 500 号, 北卡罗来纳州凯克 360, 华盛顿特区 20001

此项活动得到了美国国家科学基金会 CNS-1341078 号的支持。本出版物中提出的任何意见, 调研结果, 结论或建议不一定反映了为项目提供支持的任何组织或机构的观点。

ISBN-13: 978-0-309-45163-5

ISBN-10: 0-309-45163-9

DOI: 10.17226 / 23686

本报告的其他副本可从国家科学院出版社出版, 第五街 500 号, 北卡罗来纳州凯克 360, 华盛顿特区 20001; (800)624-6242 或(202)334-3313; <http://www.nap.edu>

Copyright 2016 by the National Academy of Sciences. All rights reserved.

USA 印刷

建议引用格式: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016. A 21st Century Cyber-Physical Systems Education. Washington, DC: The National Academies Press. doi:10.17226/23686

美国国家科学院·工程院·医学院

美国国家科学院（National Academy of Sciences）成立于 1863 年，由林肯总统签署的国会法案创立，作为私人非政府机构就有关科技问题向国家提供意见。其成员均是做出卓越学术研究贡献的科学家，由同行选举产生。 Marcia McNutt 博士任主席。

美国国家工程院（National Academy of Engineering）于 1964 年根据美国国家科学院章程成立，就有关工程实践方面向国家提供意见。国家工程院的成员均是因其对工程学做出的非凡贡献而由同行选举产生。 C. D. Mote, Jr. 博士任主席。

美国国家医学院（National Academy of Medicine, 原国立医学研究所, the Institute of Medicine）于 1970 年根据美国国家科学院章程成立，就国家医疗卫生问题向国家提供意见。其成员由同行选举产生，均为医药卫生做出杰出贡献者。 Victor J. Dzau 博士任主席。

三院共同合作，作为**美国国家科学·工程·医学院**，为国家提供独立、客观的分析和咨询，并开展其他活动以解决复杂问题、公布公共政策决策。国家科学·工程·医学院还鼓励教育和研究，表彰对知识的突出贡献，增加公众对科学、工程学、医学等方面的了解。

美国国家科学·工程·医学院

报告（Reports）记录了其创作专家委员会的循证共识。报告通常包括调研结果、结论及基于委员会收集的资料和委员会审议意见所作出的建议。报告均经同行评议，且得到国家科学·工程·医学院的认可。

会议记录（Proceedings）记录了研讨会及其他集会上的演讲和讨论。会议记录中的陈述和意见是与会者的个人陈述和意见，未得到其他参与者，规划委员会或国家科学院，工程和医学院的认可。

有关国家科学·工程·医学院其他出品和活动的信息，请访问
nationalacademies.org/whatwedo

21 世纪 CPS 系统教育委员会

JOHN A. (JACK) STANKOVIC, University of Virginia, Co-Chair

JAMES (JIM) STURGES, Lockheed Martin Corporation (retired),
Co-Chair

ALEXANDRE BAYEN, University of California, Berkeley

CHARLES R. FARRAR, Los Alamos National Laboratory

MARYE ANNE FOX, NAS,¹ University of California, San Diego

SANTIAGO GRIJALVA, Georgia Institute of Technology

HIMANSHU KHURANA, Honeywell International, Inc.

P.R. KUMAR, NAE,² Texas A&M University, College Station

INSUP LEE, University of Pennsylvania

WILLIAM MILAM, Ford Motor Company

SANJOY K. MITTER, NAE, Massachusetts Institute of Technology

JOSÉ M.F. MOURA, NAE, Carnegie Mellon University

GEORGE J. PAPPAS, University of Pennsylvania

PAULO TABUADA, University of California, Los Angeles

MANUELA M. VELOSO, Carnegie Mellon University

Staff

JON EISENBERG, Director, Computer Science and Telecommunications
Board

VIRGINIA BACON TALATI, Program Officer

SHENAE BRADLEY, Administrative Assistant

CHRISTOPHER JONES, Associate Program Officer

For more information on CSTB, see its website at <http://www.cstb.org>,
write to CSTB, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 500
Fifth Street, NW, Washington, DC 20001, call (202) 334-2605, or
e-mail the CSTB at cstb@nas.edu

¹ NAS, National Academy of Sciences, 美国国家科学院

² NAE, National Academy of Engineering, 美国国家工程院

序言

CPS (Cyber-physical systems) 是由计算算法和物理组件无缝集成所构建的并依赖于这种无缝集成的工程系统。目前,在以运输(航空,汽车,铁路和海洋)、医疗健康、制造和能源网络等为代表的众多行业中,产品、系统、基础设施的功能和价值的提供日益依赖于 CPS 系统。CPS 系统的进步,能够催生出比人类更敏捷快速的通信和响应系统(例如,汽车自动碰撞避免功能)或比人类更精确的系统(例如机器人手术),能够实现对大型系统更好的控制和协调(如电网或交通管制),提高系统(例如智能建筑物)的效率,并使得许多科学领域的进步得以实现(例如捕获天文瞬变的自主望远镜)。CPS 系统能够比松散耦合、离散或手动操作的系统提供更丰富的功能,包括效率、灵活性、自治性和可靠性,但 CPS 系统也会带来与安全性(security)和可靠性(reliability)相关的漏洞。

在 CPS 科研项目的基础上,美国国家科学基金会(NSF)开始探索 CPS 的教育和培训要求。作为探索的一部分,NSF 要求美国国家科学·工程·医学院研究此课题、组织研讨会、并编制中期报告和最终报告以审查 CPS 的教育需求和教育内容(见补充资料 P-1)。本报告的研究结论希望知会以下机构及人员:可支持课程和学习材料开发的机构(包括但不限于 NSF);大学教师和行政管理人员;有 CPS 工作岗位需求的行业;目前及潜在的对相关知识基础、工作能力要求、就业机会和课程项目有需求的学生。

该报告研究了 CPS 新兴领域的知识内容及其对工程和计算机科学教育的影响。国家科学院发布了一些其他报告涉及方面更广,例如:更普及的工程教育的未来¹;如何克服障碍以完成 2 年和 4 年科学,技术,工程和数学学位²。

为了收集有关这些主题的观点及建议,21 世纪 CPS 教育委员会(委员会履历见附录 A)召集了两个研讨会,并收到了其他专家的简报(所有演讲者和简报

¹National Academy of Engineering, 2005, *Educating the Engineer of 2020: Adapting Engineering Education to the New Century*, The National Academies Press, Washington, D.C

²National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Barriers and Opportunities for 2-Year and 4-Year STEM Degrees: Systemic Change to Support Diverse Student Pathways* (S. Malcom and M. Feder, eds.), The National Academies Press, Washington, D.C., 2016, doi: 10.17226/21739

均列于附录 B 中，研讨会议程见附录 C)。委员会在 2015 年发布的中期报告³中总结了许多演讲和讨论。本最终报告还借鉴了自中期报告发布以来获得的另外一组简报（见附录 B）。依据这些收集到的信息，以及对目前 CPS 课程、课程材料、课程体系和本研究所编制的其他材料的审查，委员会的调研结果和建议均基于委员会的集体判断。

“概要 (Summary)” 一节中展示了本报告的主要内容、委员会的调研结果和建议。本报告第一章探讨了 CPS 教育的需要，第二章强调了开发 CPS 的人员所需的基本知识和技能。第三章提供了 CPS 教育中如何将这些基础纳入各种课程的例子，第四章讨论了如何开发并制度化课程体系。

Jack Stankovic 和 Jim Sturges, 联合主席

21 世纪 CPS 教育委员会

补充资料 P.1 任务书

一个专门委员会将就目前和将来的 CPS 教育需求进行研究。会议早期召开两次研讨会，以便收集信息和促进交流，并将编写一份简短的中期报告，以强调新兴的主题，并总结研讨会的有关讨论。委员会的最终报告将阐述了美国 21 世纪将有一批具有 CPS 专业人才的愿景。最终报告将探讨相应的教育要求，审查已经开展的工作，提出发展师资力量、学习材料和课程的战略和方案。它将考虑核心的、跨领域的及特定领域的知识。它将考虑与 CPS 相关的多种学科，以及如何促进多学科的学习和工作。在进行研究时，委员会将重点关注本科教育，并也考虑对研究生教育、从业人员培训和认证、社区学院、K-12 基础教育及非正式教育的影响。它将强调 CPS 科学、工程和技术人员所需的技能，但也将考虑有关 CPS 概论课程的更广泛需求。

³ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Interim Report on 21st Century Cyber-Physical Systems Education, The National Academies Press, Washington, D.C., 2015.

致谢

本报告的草案经过了众多具有不同视角和技术专长的专业人士的独立评审。这项独立评审的目的是提供坦率及批判性的意见，以协助本机构发布更为完善合理的报告，同时确保报告符合客观性、证据化的制度标准，符合调研经费使用规范。评审意见和报告草案须保密，以保护审议程序的完整性。感谢以下专业人士对本报告的评审。

Ella M. Atkins, University of Michigan,

Robert F. Brammer, Brammer Technology, LLC,

Harry H. Cheng, University of California, Davis,

Elsa M. Garmire, NAE¹, Dartmouth College,

Scott Hareland, Medtronics,

Mats P. Heimdahl, University of Minnesota, Minneapolis,

Ken Hoyme, Adventium Labs,

Edward A. Lee, University of California, Berkeley,

Jerome P. Lynch, University of Michigan,

Alberto Sangiovanni-Vincentelli, University of California, Berkeley,

Robert F. Sproull, NAE, University of Massachusetts, and

Yannis C. Yortsos, NAE, University of Southern California.

虽然上述评审人员提出了许多建设性的意见和建议，但是他们未被要求为本报告的结论或建议背书，也未在报告发布之前看到最终稿。本报告的评审由 Teradata 公司的 Philip M. Neches，ADI 公司（Analog Devices, Inc.）的 Samuel H. Fuller 负责，负责确保根据制度程序对本报告进行独立评审，所有评审意见均经过仔细考虑。本报告的最终内容由创作委员会和本机构承担全部责任。

¹ NAE, National Academy of Engineering. 美国国家工程院

目 录

概 要.....	1
一、CPS 的意义及人才需求	12
CPS 的意义	12
CPS 人才队伍建设	18
CPS: 一个新兴的学科	21
二、CPS 原理, 基础, 系统特性和补充技能	23
原理: 集成物理部分与信息部分.....	23
CPS 基础	25
系统特性.....	28
补充技能.....	30
三、掌握 CPS 知识的途径	32
关于目前 CPS 教育途径和计划的概述	33
K-12 基础教育计划	35
职业和社区学院.....	36
本科课程, 专业课程和计划.....	37
硕士学位课程.....	54
四、CPS 课程体系发展和制度化	55
吸引学生到 CPS 中来	55
招募、维持和发展相应师资力量.....	57
课程发展与资源.....	59
推动 CPS 学科和教育的发展	61

概 要

CPS (Cyber-physical systems) 是由计算算法和物理组件无缝集成所构建的并依赖于这种无缝集成的工程系统 (engineered systems)¹。CPS 可以是小而封闭的, 例如人造胰腺, 或非常大、复杂和互连的, 例如区域电网。CPS 工程²专注于管理 CPS 系统物理部分和信息部分彼此的相互依存关系和相互影响。随着低成本感知、强大的嵌入式系统硬件和广泛部署的通信网络的发展, 系统功能 (system functionality) 对 CPS 的依赖性大大提高。这些科技上的发展, 结合对具有 CPS 工程技术技能的从业人员的培养, 将使得更为强大、更具适应性、更为可信的系统的部署成为可能。

CPS 工程和 CPS 人才

CPS 如今已被广泛地部署和使用。有代表性的例子包括: i) 能够感知即将发生的事故、并执行各种任务来保护乘客安全的汽车 ii) 能够感知葡萄糖水平或心脏节律, 并介入干预以恢复正常身体功能的医疗器械。正如这些例子所示, CPS 能够支持具有重大经济和社会效益的关键任务, 同时也引起了重大的安全性和信息安全问题。然而, 如今 CPS 系统设计与实现的实践往往是专用性的, 即便是现有的有限的理论也并没未被得到利用, 也无法支持满足未来需求所应达到的复杂性、可扩展性、安全性、私密性, 互操作性、以及设计的灵活性和可操作性。

负责开发 CPS 但缺乏适当教育或培训的工程师, 对以下两方面的问题往往

¹定义来自美国国家科学基金会, 2016, “CPS 系统”, 项目征集 16-549, NSF 文件编号 nsf16549, 3 月 4 日。 https://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf16549。

²委员会使用术语 “CPS 工程” 和 “CPS 工程师” 来表示设计和建立 CPS 和具有这些技能的人所需的一系列技能和知识; 这些术语不限于一系列证书, 也不限于在 CPS 获得学位或认证的人

缺乏一定深度的、全面的理解：一方面是与 CPS 软件和硬件相关的技术问题，另一方面是物理系统建模、能源动力、驱动、信号处理和控制的技术。此外，虽缺乏适当且正式的有关 CPS 的验证及确保安全性、可靠性和私密性的方法的培训，这些工程师却可能就已经正在设计和实现生命关键的系统了。

具有适当教育培训经历且具备相关技能的从业人员，将能够更好地创造和管理下一代 CPS 解决方案。培养这种从业人员，需要注意对未来的从业人员从头开始进行所有相关技能的培训，并且将需要向现有的从业人员提供所需的辅助教育。

事实表明，工业界对 CPS 技能需求的综合数据难以获得，委员会无法进行系统调查以收集这些信息。作为替代手段，委员会依赖于行业专家的观点，包括向委员会进行简报的专家和研究期间召开的两个研讨会与会行业专家。从这些展示中还可以明显地看出，随着新的应用出现及更多研究工作的进行，CPS 领域将继续发展。

调研结果 1.1: CPS 是新兴的具有重大经济和社会效益的工程领域。交通运输、医药、能源、国防和信息技术等主要工业部门，越来越需要一支能够设计并工程化 CPS 产品和服务的从业人员队伍。这些产品和服务将信息元素（计算硬件和软件）与物理组件紧密结合在一起，并对它们的交互及对物理环境产生的影响进行管理。虽然很难量化具体的人才需求，但可以肯定的是需要更多具有 CPS 知识和技能的工程师。

调研结果 1.2: 未来的 CPS 工程师队伍应包含以下几类：（1）基础领域工程师（如电气和计算机工程，机械工程，系统工程和计算机科学）；（2）特定应用领域工程师（如航空航天和土木工程）；（3）专注于跨领域的知识和技能 CPS 工程师（即信息技术领域和运行于实体世界的物理系统）

大学所提供的课程计划/课程体系，能够反映出各个院校的观点和资源以及院校从学生和雇主身上看到的需求，转面也影响了 CPS 从业人员的教育背景。随着时间的推移和领域本身的变化和成熟，教育和雇主的需求将会共同演进、相

互协调。

调研结果 1.3: 鉴于大多数入门级的工程学和计算机科学的职位由本科生担任，所以将 CPS 纳入工程学和计算机科学的本科课程体系十分重要

建议 1.1: 美国国家科学基金会 (National Science Foundation) 与各大学应当一起支持与 CPS 相关的本科教育课程、课程项目及其他学习途径的创建和发展，让工程学和计算机科学毕业生有更多的机会获得设计 CPS 系统所需的知识和技能。此外，还需要辅以继续教育和硕士学位项目的方式，以提高现有 CPS 从业人员的技能水平。

CPS 原理，基础，系统特性和补充技能

本章基于对现有课程、计划和教学材料的考察以及行业专家的评论中所强调的议题，总结了 CPS 工程师所需的知识和技能。本章慎重地将重点放在了核心原理和基础上，这也反映出将这些跨越信息和物理两个领域的材料整合且加入早已排得很满的工程学课程体系中是极具挑战性的。

委员会确定了 CPS 教育计划涉及以下四个大的领域：

- **原理**定义了物理部分和信息部分在以下方面的集成：通信和网络，实时分布式和嵌入式系统，硬件和环境的物理属性，以及人机交互等。
- **CPS 基础**，涉及以下方面（1）计算的基本概念，（2）实体世界的计算，（3）离散和连续数学，（4）交叉应用，（5）建模，（6）系统开发。
- **CPS 系统特性**，如信息安全和隐私；互操作性；可靠性和可依赖性；功耗和能耗管理；安全；动态和随机系统的稳定性和性能；人为因素和可用性
- **补充技能**

以上几个方面在下文中将简要概述（详细讨论见第 2 章）

CPS 原理

CPS 是将实体世界的应用、计算机硬件、信息网络三者联结在一起的工程。实体世界的基本原理包括物理学，数学建模，分析，算法以及涉及不确定性和风险的系统设计。计算机工程与科学（信息网络，Cyber）方面涉及嵌入式计算和通信硬件系统，软件编程及网络化。由于传感器是实体和信息网络之间的关键的硬件连接，因此了解传感器的特性和在现实世界中的行为以及对其产生的信号进行处理的技术是非常重要的。控制理论是 CPS 的重要基本原理；相关要素包括稳定性，优化以及如何控制分布式数字系统。

CPS 基础

根据以上基本原理，委员会确定了 CPS 总体课程里关键的以下六大类知识基础：

1. **基本计算概念**，特指超出几门入门编程课程之外的知识，如嵌入式硬件，数据结构，自动机理论和软件工程。
2. **对实体世界的计算**，包括理解实体世界的性质与特性，实时嵌入式系统，能量及存储等计算资源的约束
3. **离散和连续数学**，除微积分外，如微分方程，概率和随机过程以及线性代数。
4. **传感、驱动、控制、通信及计算的交叉应用**，这些应用体现出了物理-信息世界的交互在 CPS 中的核心地位，也反映了实时约束下对通信网络、传感、信号处理及驱动系统进行控制的重要性。
5. **控制、计算和通信融合的异构动态系统建模**，重点在于不确定性和系统异构性，包括线性和非线性模型，随机模型，离散事件和混合模型等技术，以及基于优化理论、概率论和动态规划的相关设计方法。
6. **CPS 系统开发**，尤其是安全关键系统、高可信系统和弹性系统的开发，需要具备“初始需求→测试→认证→在线使用”整个产品生命周期的视角，包括形式化检验与验证过程，以及能够适应系统演化的自适应设计。

调研结果 2.1: CPS 核心知识不仅涉及物理工程和信息系统的设计与实现方面的基础知识，而且还需要理解物理和信息部分是怎样对彼此造成影响的。

建议 2.1: CPS 教育课程应该提供一个能突出系统的信息和物理部分的相互作用的基础课程。现行大多数课程不强调这种相互作用，所以需要新课程和教学材料。

CPS 系统特性

许多 CPS 系统是大型、复杂，或还有安全关键的需求。成功地开发此类系统，需要掌握关于怎样使系统具有以下特性的相关知识。

- 信息安全及隐私
- 互操作性
- 可靠性及可信赖性
- 功耗和能耗管理
- 安全性
- 稳定性及效能
- 人的因素及可用性

这些主题最好在 CPS 总的课程安排的早期就引入，并在课程作业和课程设计中贯穿体现，因为工程实践表明，最佳的办法是在系统设计之初就解决这些问题。

补充技能

工程系统日益增长的规模和复杂性，意味着工程师需要与多学科专家进行越来越多的合作。“软”技能——如沟通、灵活性、团队合作及多学科合作能力——对 CPS 工程尤其重要，因为这项工作本质上是跨学科的。科学和工程学知识的频繁的变化更新，以及 CPS 相关的新知识的快速出现，要求 CPS 的课程和项目除了具体的技术和方法外，也需要强调持续性学习和批判性思维。

补充资料 S.1 CPS 授课途径

CPS 教学的潜在观点和途径包括以下内容：

- **将 CPS 融入 K-12 基础教育。**将一些知识纳入 K-12 基础教育课程中，例如初级的微积分、物理、编程或机器人技术，这可以减轻学生在本科学习阶段的繁重课程压力，而且绝对有助于学生在开始着手学习以 CPS 为重心的一系列课程之前做好准备。可以利用现有“科学，技术，工程和数学计划（STEM）”和 2016 年推出的“全民计算机科学计划”的机会，将 CPS 知识纳入美国 K-12 基础教育，使学生了解核心概念。

- **职业和社区学院计划。**这些计划在发展人力资本方面具有以下几个作用：通往 4 年制院校的过渡途径，职业培训及提升现有从业人员的技能。将 CPS 技术加入社区大学计划不仅能够创造通往 4 年制 CPS 学位的过渡途径，而且还可以培养出一批能够运营和维护日益复杂的 CPS 人力资源。正处于职业生涯中期的工程师也可能需要加强技能和知识，因为他们的工作日益涉及 CPS 相关知识。

- **将 CPS 融入工程学和计算机科学的概论课程。**大多数工程师需要对建立和维护 CPS 的复杂性有基本的了解。

- **本科阶段设置一门或多门 CPS 概论课程。**概论课程能够让学生对 CPS 有基本的了解，并了解 CPS 设计方面的关键挑战，这两点对那些出身于单一工程学科（即航空航天，土木和机械工程）的领域专家来说十分重要。

- **包含 CPS 专业或重点的工程课程。**像机械和航空航天工程等一些工程领域，虽然已经开始纳入一些 CPS 原理课程，但也可能需要更强的更成熟的 CPS 教学方法来教授 CPS 基础；此外，这对包括土木、化学和生物医学工程在内的其他领域也同样适用。

- **（新的）学士级别的 CPS 工程学位。**委员会认为需要培养一类新型的能够处理信息和物理方面的交叉问题的 CPS 工程师，以满足人力需求。

- **CPS 硕士学位。**目前专注于嵌入式系统或 CPS 的研究生课程计划比较少，且主要集中在电气工程或计算机科学。设立面向其他工程领域（如机械或土木工程）研究生的 CPS 硕士学位计划也是很有价值的。

- **CPS 博士项目。**CPS 硕士课程中的教学内容，可能足以满足针对未来教师的部分或全部培训要求。但是，考虑到对 CPS 师资队伍和工业界对博士人才的需求，以及持续性的学术研究基金对博士人才的需求，仅设置 CPS 硕士课程项目是不够的。这将会促使学术机

构设立 CPS 博士项目。若 CPS 学科遵循其他工程学科的一般规律，则具有 CPS 博士学位的工程师将会成为行业中重要的技术领导者，而且将会有更多的博士选择在工业领域工作，而不是继续投身学术研究。

掌握 CPS 知识的途径

获取 CPS 知识的途径将是多种多样的(见补充资料 S.1)。其中一个原因是，CPS 的从业人员中会同时包含两类专家：一类精通 CPS 原理，另一类是精于信息和物理世界交叉问题的新型工程师。另一个原因是，大学和学院也会基于现存的院系结构和课程体系，师资力量及现有资源而采取各种不同的途径开展 CPS 教育。

设计 CPS 学位的课程体系相当复杂且所涉方面极多，例如，要恰当地平衡物理部分、信息部分及一般 CPS 和应用知识。由于 CPS 学位的课程体系尚在起步阶段，随着 CPS 被更广泛地部署，课程体系无疑也会随之显著地发展、改善。另外，CPS 学位项目与大多数工程学学位项目都面临着一项挑战，即优化课程的主题，使之适合便于管理的四年制课程计划。

调研结果 3.1：目前院系结构、教师的专业能力及兴趣、课程体系均是多样化的，这表明支持 CPS 工程计划可采取多种可行和适当的模式。委员会设想，大学将(1)加入 CPS 内容以丰富现有的工程计划，(2)创建 CPS 概论课程，(3)创建新的 CPS 硕士学位计划，最终(4)发展新的本科 CPS 工程学位计划。

许多大学目前可能不具备建立广泛的 CPS 教育计划所需的专业能力和资源。在这些情况下，可通过多个院系的合作以开展那些可联合授课的课程。例如，关键的 CPS 内容可以被引入机电专业、机器人专业或交通运输专业的课程。这种做法有助于减少在将 CPS 注入工程学所带来的负担，并有助于建立实施 CPS 项目所需的课程。

调研结果 3.2: 由于 CPS 工程主要集中于系统的物理和信息方面的交互, 因此仅通过简单地组合现有课程的材料是不足以创建 CPS 课程体系的, 需要设计新的课程。

建议 3.1: 美国国家科学基金会 (National Science Foundation) 应当对那些规划了建立 CPS 工程学位所需途径和规划的大学教育计划的发展给予支持。

建议 3.2: 美国国家科学基金会 (National Science Foundation)、专业学会和大学管理部门应支持并考虑为以下各项工作分配相应的资源: 现有工程学课程项目中新增的以 CPS 为核心的课程的开发; CPS 工程学主修和选修的专业课程开发; 以及一套面向 CPS 工程本科学位计划的总体课程。

建议 3.3: 大学应当考虑为工程学和计算机科学相关的各专业领域的新生开设 CPS 导论课程。

建议 3.4: 工程类院校总体来说已经重新设计了相应的课程, 以强调基于项目的学习 (project-based learning)。基于项目的学习 (project-based learning) 课程对 CPS 教育至关重要, 所以应适当扩充这些课程使其支持 CPS 原理和基础。

CPS 课程体系制度化面临的机遇与障碍

创立成功的 CPS 教育项目面临许多障碍。CPS 的本质特性使得 CPS 为中心的课程体系的开发和教学都非常困难。此外, 虽然学生们可能对 CPS 技术及 CPS 使能的应用怀有兴趣, 但未必能意识到他们应该去寻找并学习那些突出强调 CPS 知识和技能的相关课程和计划。并且, 开展面向本科生的与时俱进的 CPS 教育, 需要对这个新兴交叉学科投入巨大的师资力量, 但目前并没有相应的机制对此提供支持, 相应师资力量的发展、招募及维持都非常困难。此外, 支持新的课程项

目需要一系列新的教学资源——从新的教科书到新的实验室设备。

吸引学生到 CPS 中来

对于本科教育阶段，一个关键方法在于向科学、技术、工程和数学（STEM）领域的学生揭示 CPS 领域的存在、CPS 与机器人和物联网等相关领域的联系、以及 CPS 形式化研究的潜在效益。将 CPS 引入所有工程学科（而不仅仅是计算机科学和电气工程学科）的大学新生的“工程学导论”课程中，对吸引学生学习 CPS 来说是一个重要的机会。

调研结果 4.1: 虽然高中及本科教育阶段已有许多 STEM 课程和计划包含了 CPS 的元素，但这些项目通常并未提供关于 CPS 原理和基础的广泛介绍，并且倾向于把重点放在过于简单的应用上或仅以原理为中心的内容上。

建议 4.1: 为了给未来的工作打好知识基础并使学生拥有更多的 CPS 就业机会，那些正在开发中的 STEM（科学、技术、工程、数学）教育计划，以及计划中从事教育和培训工作的老师均应考虑通过引入 CPS 概念以丰富这些计划的内容。

调研结果 4.2: 即将进入大学的学生们似乎对术语“CPS”、CPS 的概念、CPS 的工作机遇并不熟悉。但事实上，他们感兴趣的那些知名度很高的课程和 CPS 主题均有着广泛的联系，如机器人学、物联网、健康监护、智慧城市及工业互联网。

建议 4.2 对于正处于开发之中的 CPS 工程的课程和项目，在描述职业和课程以及选择用于课程和项目中的应用时，不妨考虑充分利用机器人学、物联网、健康医疗、智慧城市和工业互联网等领域的知名度及学生兴趣。

招募、维持及发展师资力量

教授 CPS 课程的教师如果能够利用 CPS 的某一个或几个特定方面的专业知

识,了解完整的 CPS 系统中其他方面的知识并了解特定领域和应用的具体需求,将使教学更加有效。当今 CPS 教育(和研究)的大部分工作,均是由少数教师们承担的。这些教师先前出身于 CPS 的相关领域,而后冒险进入这个新兴的、更加跨学科领域。

长远看来,学术机构将有机会招募到那些拥有 CPS 学位的、拥有 CPS 研究经验的、及具备 CPS 工业实践经验的人才以扩充 CPS 教师队伍。事实上,许多院校早已明确开始寻求这样的人才。发展这样一批教师队伍,需要科研基金和学术进阶机会的支持。美国国家科学基金会的 CPS 项目组催生了一个围绕 CPS 的学术团体,促进了学术界和工业界的联系。几个已被广泛认可的 CPS 学术会议的建立及一个新的 CPS 期刊的发行,这使得有多学科背景年轻的 CPS 教员将自己定位为 CPS 研究人员且仍满足学术评价标准变得更容易了。然而,建设必要的师资队伍来培养 CPS 工程师仍需要大量的时间和资金投入。

调研结果 4.3: 由于 CPS 是一个结合了多学科的新兴领域,并非所有的院校都具有足够的相应师资实力以教授 CPS 学位项目所需的所有课程。

建议 4.3: 美国国家科学基金会(National Science Foundation)应当通过提供教学拨款及奖学金来支持 CPS 师资力量的发展。

虽然进入 CPS 这个新兴领域具有挑战性,但年轻教师们成为行业领导者方面具有优势。由于领域的新兴性,年轻教师们不必与那些成熟领域中众多公认的领导者竞争。

开发所需的课程及教学材料

委员会在工作过程中发布了几本教材,这使委员会倍受鼓舞,然而现有的教科书,课程材料和实验室设施数量仍然十分有限。仅仅对现有课程进行重新组合并不能产生出 CPS 课程,同样地,目前现有的教材可能并没有完全将物理系统和信息技术的相互影响和作用纳入其中。此外,CPS 的复杂性通常要求学生充分理解物理环境是如何影响这些 CPS 系统的。虽然通过实际的模型可以了解一

些这样的知识，但是仍需要相应的实验平台来帮助学生理解物理环境能够对工程系统产生怎样的约束。这些实验平台的创建和维护成本很高，许多大学没有或不会分配相应的资源来创建这样的测试平台。

调研结果 4.4 如果要教授新的 CPS 课程或创建 CPS 计划，大学需要分配时间和资源来开发 CPS 课程资料，并提供必要的实验室空间和设备（包括虚拟实验平台和物理实验平台）。

调研结果 4.5 需要建设实验平台来为学生提供足够实际的应用和问题。既可以是虚拟平台，也可以是物理平台。这些实验平台应能支持远程访问和多院校共享，并支持院校与业界合作开发和运维。

建议 4.4 美国国家科学基金会、专业学会和大学应当支持 CPS 教材、课程模块（包括实验模块）和实验平台的开发和发展，并与工业界协同开发和维护实验平台。

随着 CPS 日益普及，对从业人员的 CPS 设计、开发及维护的能力要求会日益提高。对于 CPS 的物理部分、信息部分，尤其是物理与信息部分的相互影响和作用的充分理解能力将日益重要。具有这些能力的从业人员队伍将能更好地在当前及未来帮助工业界在各种各样的 CPS 应用中寻求进一步的发展。关于如何确保有志于 CPS 的工程师和计算机科学家具备当代 CPS 从业人员所必需的技能，本报告中的建议指明了相应的方法措施。

一、CPS 的意义及人才需求

本章讨论了 CPS 的意义和对工业的重要价值，以及相关的人才需求。本章考察了 CPS 应用的一系列经济指标和提交给委员会的关于工业界所寻求的 CPS 技能的说明。

CPS 的意义

在过去的几十年中，工程界见证了一个重要变化：以前以纯机械或电（即物理）形式存在的元件，特别是描述逻辑、控制和决策的元件，越来越多地采用嵌入式系统和软件（即信息元件）的形式。缩写词 CPS，通常用来描述“由计算算法和物理组件无缝集成所构建的并依赖于这种无缝集成的工程系统。”¹在这个定义中，“Cyber”指的是系统内支持决策的计算机、软件、数据结构和网络等，“Physical”不仅仅表示物理系统部分（例如自动化汽车的机械和电气部分），还包括与系统交互的实体世界（例如道路，行人）。CPS 与当今的物联网（IoT）、工业互联网、智慧城市以及机器人和系统工程等领域都密切相关（见补充资料 1.1）。

一些新兴技术的发展趋势支撑着 CPS 部署的持续增长：

- 通信网络、数据库和分布式系统，允许物联系统的控制和决策能够以远程、协作和分布式的形式完成，这在几年前都还无法实现。
- 数据科学领域的发展使得收集、存储、分析和处理大量的真实世界的的数据成为可能。
- 组件和系统成本的降低允许在诸如家用恒温器和汽车制动器等日常设备中使用 CPS。例如，从用来预警洪水、地震等自然灾害，到提供更安全的汽车出行，更低成本的传感器正被全面运用。
- 更高可靠性的高速无线网络计划的广泛部署，为那些需要持续连接到互

¹定义来自美国国家科学基金会，2016，“CPS 系统”，项目征集 16-549，NSF 文件编号 nsf16549，3 月 4 日。https://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf16549。

联网的设备提供支持。

CPS 可以是小而独立的,如人造胰腺,也可以非常大和复杂,如区域能源网。许多 CPS 系统是关键基础设施或者涉及人身安全,它们给经济和社会带来了重要的影响(见补充资料 1.2)。在经济、功能、安全、效能、精确的控制与决策等方面带来前所未有的增强,CPS 提供了非凡灵活性。事实上,几乎所有的行业都已经欣然接受了 CPS。CPS 为物联网提供技术基础支撑,最近麦肯锡全球研究院一份关于物联网的报告简明扼要地阐述了 CPS 应用的经济价值,“市场炒作已经足够大了,然而实际价值可能会更大”²。麦肯锡报告估计,九个物联网应用场景中的全球潜在经济价值将在 2025 年达到每年 11.1 万亿美元——分别是人体,家庭,零售场景,办公室,工厂,工地,汽车,城市和其他外部场景³。高德纳咨询公司最近预测,从 2015 年到 2016 年,“连接的设备”数量将增加 30 个百分点,到 2020 年将增加 3 倍达到超过 200 亿台设备⁴。一个相关的概念是工业互联网,它将物联网和大数据分析结合起来应用于工业。2015 年一份来自通用电气和埃森哲咨询公司的报告中预测,到 2020 年全球工业互联网支出可能达到 5 亿美元,并到 2030 年,将为全球经济贡献多达 15 万亿美元⁵。同时,IT 公司正在越来越多地投资 CPS 领域,例如自动驾驶汽车(如 Google 和 Uber)和物联网(如 IBM)。

² McKinsey Global Institute, 2015, *The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype*, June, <http://www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>.

³ Ibid, p. 2-3.

⁴ Gartner, Inc., 2015, “Gartner Says 6.4 Billion Connected ‘Things’ Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015,” press release, November 10, 2015, <http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317>.

⁵ General Electric and Accenture, 2014, *Industrial Internet Insights Report for 2015*, <http://www.ge.com/digital/sites/default/files/industrial-internet-insights-report.pdf>, accessed November 1, 2016.

补充资料 1.1 CPS 相关领域

CPS 与以下领域密切相关，并构筑了一些有价值的技术愿景：

机器人学，主要关注能够自主或半自主与人类协作的包含传感器和执行器的系统¹。它涵盖了一系列主题，包括运动学、动力学和路径规划，机器人硬件和控制软件，感知、传感和状态估计，以及操纵器（机械手）和运载器（行走）的控制。许多机器人被看作 CPS，机器人领域也吸纳了许多 CPS 原理。同时，也有许多 CPS 并不是机器人，有一些研究主题是机器人领域独有的。

系统工程，主要关注复杂系统的设计与管理，也为 CPS 的发展，尤其是对建模和集成等主题做出显著贡献。然而，系统工程通常集中在大型系统的组织、管理和集成上，并不擅长解决物理系统与信息组件融合时具体的技术问题。

物联网 (IoT)，被定义为“基于标准和可互操作通信协议的，具备自配置能力的一种动态的全球网络基础设施，其中物理和虚拟设备都具有标识、物理及虚拟属性，使用智能接口，无缝集成到信息网络中，并经常传输与用户和周围环境有关的数据。”² 随着物联网的发展，它需要越来越多的 CPS 特性来促进物联网应用的发展，如控制，实时响应和安全关键操作等。物联网应用如智慧城市（见下文）正迅速变得更加复杂，也越来越依赖于 CPS。

工业互联网³ (Industrial Internet) 将物联网与收集和分析大规模数据的能力相结合，以管理和操作工业系统。

智慧城市希望，未来社区或者城市能够利用信息技术来更好地管理社区或者城市基础设施和资源，提高效率，提升生活品质。智慧城市需要依赖 CPS 技术如实时响应和控制，来增强城市感知和管理。

1 Institute of Electrical and Electronics Engineers, UAE Section homepage, http://www.ieee-uae.com/?page_id=267.

2 Ian Smith, ed., 2012, The Internet of Things 2012: New Horizons, Internet of Things European Research Cluster, Platinum, Halifax, U.K.

3 术语“Industrial Internet”由 GE 公司创造，但目前暂未得到广泛使用，类似的术语还有“Industrial Internet Consortium”。参考文献见： J. Leber, 2012, “General Electric Pitches an Industrial Internet,” MIT Technology Review, November 28, <https://www.technologyreview.com/s/507831/general-electric-pitches-an-industrial-internet/>

补充资料 1.2 CPS 驱动未来

CPS 可为下列领域带来重要的经济或社会效益：

- **交通运输**

CPS 技术已经被应用于汽车中,通过感知即将发生的事故并执行各种任务来保护乘客安全。CPS 技术将会极大减少每年由于人类过错导致的车祸死亡人数,显著降低由于道路拥堵造成的时间浪费和污染。应用于航空工业和地面机场安全的 CPS 技术能够缓解空中交通拥堵,并使得自主飞行器能安全地融入美国领空。

- **制造业**

现在需要的,和可以被设计和生产的产品正变得越来越复杂。虽然产品种类正在不断增加,但产品开发周期却越来越短。CPS 技术能够同时提高产品设计(比如通过软件定义更多功能)和制造(比如实现更强大、更高效的生产设备)效率。

- **卫生保健**

CPS 被应用于当今的医疗器械中,以检测葡萄糖水平或心率异常,并进行干预以恢复正常的机体功能。如果应用更广泛,CPS 还将帮助提高对老龄化人群的关注和照顾。CPS 的形式化描述和验证技术可以帮助设计更加经济、更易于认证和更加安全的医疗产品。

- **能源**

可再生电力资源的间歇性和不确定性,使得我们需要采用新的传感器、开关、仪表和基础设施来实现一个自适应的、安全的、弹性的、高效的和经济的配电系统,允许消费者管理自己的电力使用。

- **农业**

到 2050 年,全球人口预计将超过 90 亿,未来气候的不确定和不断变化,以及高达三分之一的食物损失和浪费率,要求生产食物、纤维、饲料和生物燃料的系统更高效。CPS 技术的运用能够提高整个价值链的可持续性和生产效率(减少浪费)。

1 Food and Agriculture Organization, 2011, Global Food Losses and Food Waste, Rome, Italy, <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/>, p. v.

谈到 CPS 的潜力和实现这一潜力的技术挑战，在 2008 年给科学与技术委员会的报告中，波音幻影工作室工程与信息技术副总裁 Don Winter 指出：

“CPS 在波音和航空航天工业普遍存在。它们在其他领域特别是汽车和能源管理也越来越普遍。CPS 对于我们的产品研发非常重要，同时它们的复杂性也正以指数速度快速增长。”⁶

Winter 表示，CPS 对于航空航天系统的贡献已经得到大幅度增长，对运输飞机的设计、开发、验证和认证的成本从 20 世纪 70 年代不到 10% 上升到 2000 年代的 50% 左右。

值得注意的是，尽管采用 CPS 会带来巨大的安全效益，但同时它也带来了新的风险。比如，虽然一个纯机械联动装置也容易发生故障，但它可能比分离的传感器和执行器由于软件错误、硬件故障或网络安全攻击而导致故障和损伤的危害要小。这些风险加大了对高技能劳动力的需求。

学术研究取得的基础进展将支持下一代可以被设计、实现、部署和维护的 CPS 满足新兴的功能和非功能特性需求。功能特性实现的进步可以激发新的解决方案，例如未来的解决方案将允许微电网交易具备更高的能源效率和故障预防功能（不仅仅是维护）。非功能特性（即信息安全、功能安全、可靠性和可依赖性）实现的进步将使得未来系统在面临风险的时候操作起来具备更高的可信度——例如，实现城市规模的可信的自治交通系统。

美国国家科学基金会（NSF）正在进行一项 CPS 研究计划，该计划得到了 2007 年 8 月和 2010 年 12 月总统科学技术顾问委员会的推动。⁷ 由于 CPS 应用的多样性及其对于许多领域的重要推动作用，美国国家科学基金会与多个联邦机构共同合作：美国国土安全部科学技术处、美国交通部联邦公路管理局和智能交通联合办公室、美国国家航空航天局航空研究任务理事会（ARMD）、美国

⁶ Don C. Winter, 2008, Testimony at a hearing on the Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program, Committee on Science and Technology, U.S. House of Representatives, July 31.

⁷ 来自总统科技顾问委员会，参考文献：Leadership Under Challenge: Information Technology R&D in a Competitive World: An Assessment of the Federal Networking and Information Technology R&D Program, August 2007, 及 Designing a Digital Future: Federally Funded Research and Development in Networking and Information Technology, December 2010, <https://www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp/pcast/docsreports>; and NSF, 2016, “Cyber-Physical Systems,” program solicitation 16-549.

国立卫生研究院的几个机构和中心，以及美国农业部国家食品与农业研究所。⁸

美国国家标准与技术研究院成立了 CPS 和智能电网项目办公室，负责研究和开发 CPS 系统及应用的结构、框架和标准。⁹其他联邦 CPS 研究计划包括美国国防高级研究计划局（DARPA）的自适应运载器制造（AVM）和高可信军事网络系统（HACMS）计划，以及美国交通部的互联汽车和智能交通系统计划。许多其他国家也有类似的 CPS 研究计划（见补充资料 1.3）。

补充资料 1.3 其他国家的 CPS 研究计划

以下是其他国家的信息物理系统（CPS）长期研究计划：

- 德国工业 4.0 战略计划旨在利用信息物理系统（物联网）的潜力来保持德国工业在国际的领先地位。工业 4.0 涵盖制造业、服务业和工业设计，一个重点是智能制造系统及过程，以及分布式和网络化的生产现场实现¹。

- 欧盟（EU）发起了一项由政府-社会资本共同集资的主要联合技术计划——2013 年投资于嵌入式系统与 CPS 的支出约 70 亿美元²——欧洲国家和工业界称之为嵌入式智能系统先进研究和技术项目³，随后并入集成电路技术计划，构成了欧洲智能系统集成技术平台（EPoSS），它明确了研发和创新需求，以及能够推动智能系统集成的政策要求。⁴当前欧盟科研和创新框架计划（地平线 2020）包括智能 CPS 研究计划以及相关领域的计划，如智能系统，自治系统，智能交通系统，工厂自动化，物联网和智能社区等。

- 韩国通过多个韩国国家信息技术促进局（NIPA）项目推动相关计划。CPS 同时也是 2015 年底韩国一个高级别信息通信技术政策论坛上的重要讨论内容⁵。

1 EU-Japan Center for Industrial Cooperation, 2015, Digital Economy In Japan and the EU: An Assessment of the Common Challenges and the Collaboration Potential, Tokyo, Japan, March.

2 National Institute of Standards and Technology, 2013, Strategic R&D Opportunities for 21st Century Cyber-Physical Systems: Connecting Computer and Information Systems with the Physical World, Gaithersburg, Md., January.

⁸ NSF, “Cyber-Physical Systems (CPS),” https://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286, accessed November 1, 2016.

⁹ National Institute of Standards and Technology, “Cyber-Physical Systems,” <https://www.nist.gov/el/cyber-physical-systems>, accessed November 1, 2016.

3 IEEE Control Systems Society, 2011, The Impact of Control Technology (T. Samad and A.M. Annaswamy, eds.), <http://www.ieeeccss.org>.

4 SUPA KT, “High Level Strategic Research and Innovation Agenda of the ICT Components and Systems Industries as represented by ARTEMIS, ENIAC and EPoSS (2012),” <http://kt.supa.ac.uk/market/artemis-eniac-eposs>.

5 U.S. Embassy in Seoul, Korea.

CPS 人才队伍建设

事实证明，委员会想要获得有关 CPS 技能和知识需求的全面数据是非常困难的。收集针对像 CPS 这样一个新兴的、高度跨学科的领域的系统信息是特别具有挑战性的。即使是收集小型公司的轶事信息也是同样困难，因为这些议题之间往往很难有清晰的界定。目前在美国还没有专门的针对美国工业对于 CPS 技能或者 CPS 相关的大学课程的需求的调查。目前的政府统计数据也没有提供足够的粒度来将 CPS 职位与其他计算机或工程职位分开。委员会无法对工业界或学术界进行系统调查以收集这些信息。

由于缺少 CPS 领域内人才需求的全面数据，委员会只能依靠研究期间召开的两个研讨会的与会行业专家的观点以及一系列简报。包括一些业界人士在内的所有研讨会演讲者或报告人的名单见附录 B。

代表各行各业的研讨会演讲者——汽车，农业，医疗设备，航天，以及大型工业集团和 CPS 工程软件工具供应商，讨论了产品不断变化的本质，他们工程师队伍所需要的新技能，以及他们在培养必需人才时所面临的挑战。补充说明 1.4 总结了他们的一些观点。来自不同行业的人士报告说，他们需要拥有 CPS 工程技能的人才。在某些情况下，由于缺少足够的具备 CPS 技能的人才，一些产品甚至无法被研发出来。还有一些来自工业界的专家指出，如果有更多受过 CPS 教育的求职者可用，那么他们公司的员工将被重组。

通用电气公司全球研究中心主任 Joseph Salvo 在谈到对 CPS 技能的需求时表示，“未来...几乎我们所有的员工都应具备这些能力。”问及福特汽车公司需要多少 CPS 工程师的时候，福特研发及高级工程部 Craig Stephens 回答说，“简单讲，比我们能得到的要多。”

考虑到 CPS 在整个工业界的普及,无论他们是否认为自己是这方面的专家,都有非常多的工程师正围绕着 CPS 工作。许多人并没有接受过 CPS 方面正规的教育或培训,如形式化方法,验证或者信息安全,他们可能也没有完全理解为生命安全关键系统设计软件或者物理系统所面临的挑战。

专用 CPS 系统的设计与实现存在着不满足可扩展性、安全和设计灵活性需求的风险。考虑到 CPS 在安全关键系统中的作用以及所有计算系统都会面临的信息安全挑战,这点应当受到关注。当今世界即使不是大多数,也有非常多的系统依赖于 CPS。因此,必须要把发展 CPS 学科及提供更专业的教育和培训放到优先位置。

开发高效的 CPS 解决方案需要合理地组合工程师队伍,包括设计实现复杂功能的开发人员,以及部署和维护长生命周期 CPS 解决方案的维护人员。工程项目本质上就需要具备不同技能的专家进行协作, CPS 项目也是如此。

因此,多种多样的教育和培训制度是必需的。所需的多学科技能将建立在工程学、计算机科学和信息技术领域的现有人才队伍的基础之上。为此,将来一部分工作将侧重于对现有技术人才队伍知识技能进行补充,另一部分则需要重点关注如何利用教育来培养具备全部必需技能的未来人才。

调研结果 1.1: CPS 是新兴的具有重大经济和社会效益的工程领域。交通运输、医药、能源、国防和信息技术等主要工业部门,越来越需要一支能够设计并工程化 CPS 产品和服务的人才队伍。这些产品和服务将信息元素(计算硬件和软件)与物理组件紧密结合在一起,并对它们的交互及对物理环境产生的影响进行管理。虽然很难量化具体的人才需求,但可以肯定的是需要更多具有 CPS 知识和技能的工程师。

补充资料 1.4 工业界对 CPS 技能人才需求的意见

研讨会中,来自多个工业领域的参与者和演讲者对 CPS 在工业界中日益增长的重要性和 CPS 技能需求提出了很多意见。其中包括:

- 汽车工业

福特研发及高级工程部 Craig Stephens 在描述为什么汽车工业界对于 CPS 人才的需求越

来越多时指出，尽管基础的汽车工程知识（如动力传动系，燃烧和排放）仍然是根本，但汽车工程师们同样还需要能够设计、开发和测试包括通信、传感以及更复杂计算机控制技术的系统。这些新技能在新的汽车应用中如电气化，车对车通信，主动安全功能以及自动或自动驾驶中尤为重要。Stephens 指出，汽车工业在提供必要的员工培训方面已经取得了成功，但是像福特这样的公司还是希望有朝一日加入公司的员工能具备更强的 CPS 基础。霍尼韦尔公司的 Dan Johnson 认为航空航天是另一个交通运输业，CPS 在其中扮演着越来越重要的角色。比方说，许多 CPS 密集型系统（例如飞机，机场，空中交通管制，维护和乘客服务）构成了空中交通环境。

- 农业和建筑设备

约翰·迪尔公司的系统架构师 Jon Williams 指出，农业和建筑设备业正变成 CPS 密集型行业。例如，迪尔公司生产部分或完全自动驾驶汽车，提供车辆间无线 MESH 和车载信息服务连接，远程更新和诊断产品故障，并正为其产品收集的农业数据开发新的应用。此外，Williams 还表示，现在的一个大型的工业化农场是一个系统中的系统（SoS），需要一套系统的方法来开发和部署产品与服务，这与关注单个产品的传统农场截然不同。

- 医疗器械

来自医疗器械公司美敦力公司的 Scott Hareland 讨论了医疗器械越来越强大的健康功能，包括监测和诊断患者健康状况，维持生命（起搏器），或者通过减轻疼痛感来改善身体状况等。他指出，今天的工程师们并没有具备开发未来医疗器械所需的所有能力。

- 航空航天

喷气推进实验室（JPL）负责设计、建造、部署和操作航天器系统，主要项目包括火星科学实验室“好奇号”火星车和“卡西尼”探测器等。喷气推进实验室的 David Nichols 和 Daniel Dvorak 共同描述了喷气推进实验室（JPL）对 CPS 技能的需求。入职 JPL 需要具备如下 CPS 技能：保证航天器自主性的任务形式化；装配、子系统及系统层级的工程设计；与自主控制（故障管理，验证和确认，以及任务作业）有关的设计活动；所有层级的系统工程；以及任务、软件和安全保证。JPL 倾向于在内部培养飞行工程师，因为 JPL 发现很难找到已经拥有所需 CPS 技能和其他工程技能的毕业生。事实上，JPL 新近招收的科学工程部门员工约五分之四都是近来的毕业生，JPL 打算通过参与实践项目和高级工程师指导的形式来培养这些新员工。

- CPS 开发工具

SimuQuest 是一家软件公司，开发的产品支持基于模型的系统工程。SimuQuest 的 John Mills 明确了他所寻找的员工所需具备的关键知识技能：受控对象建模，算法设计，控制系统设计，理解网络和工程流程。CPS 技能还有一个新的重点，包括非确定性，时序和延迟管理，以及协同仿真。Mills 指出，福特、通用电气和约翰·迪尔等大公司拥有足够的资源去为自己的员工培训 CPS 技能，但像 SimuQuest 这样的小公司就很难做到这点。

来源：Adapted from National Research Council, 2015, Interim Report on 21st Century Cyber-Physical Systems Education, The National Academies Press, Washington, D.C., doi:10.17226/21762.

CPS：一个新兴的学科

CPS 并不是一个新事物。事实上，可以借鉴计算机和软件工程的历史来看。对于 20 世纪 40 年代的电气工程师来说，计算机不可能会成为一件日用品。那时的计算机需要占据一个非常大的房间，里面装备有大量的加热的真空管，继电器，巨大的电源，打孔卡片读卡器和行式打印机。计算机工程领域慢慢才逐渐形成为一门单独的学科。软件工程后来也发展成为了一门单独的学科，以满足人们更加轻松和高效的计算机编程需要。如电气工程师们不再需要亲手搭建计算机一样，跨学科的工程师们也不再需要自己去搭建、编程和选用具有传感器和控制器（内置或外接）的小型处理器作为其他系统的组件——或者本身自成为一个系统，这已变得很平常。尽管设计小型的嵌入式系统的组件和工具并不难，但开发一个具有可验证的可靠性和安全性的大型系统所需要的技能和知识仍然是非常不容易的。

遵循类似的模式，CPS 包含了嵌入式系统、软件工程、控制系统、网络和系统工程等学科的组成部分。事实上，许多 CPS 的原理早已被纳入诸如航空航天和机械工程以及相关领域（如机器人技术）。这个新兴领域的专家将会是交叉学科的专家。

调研结果 1.2：未来的 CPS 工程师队伍应包含以下几类：（1）基础领域工程师（如电气和计算机工程，机械工程，系统工程和计算机科学）；（2）特定应用领域工程师（如航空航天和土木工程）；（3）专注于跨领域的知

识和技能 CPS 工程师（即信息技术领域和运行于实体世界的物理系统）

调研结果 1.3: 鉴于大多数入门级的工程学和计算机科学的职位由本科生担任，所以将 CPS 纳入工程学和计算机科学的本科课程体系十分重要。

建议 1.1: 美国国家科学基金会（National Science Foundation）与各大学应当一起支持与 CPS 相关的本科教育课程、课程项目及其他学习途径的创建和发展，让工程学和计算机科学毕业生有更多的机会获得设计 CPS 系统所需的知识和技能。此外，还需要辅以继续教育和硕士学位项目的方式，以提高现有 CPS 从业人员的技能水平。

二、CPS 原理，基础，系统特性和补充技能

本章高度概括了工程师所需掌握的 CPS 知识。本章借鉴了现有的课程、计划和教学资料，以及行业专家所讨论的重要议题。计算机科学，工程学和机器人学等领域也有许多类似的问题，但是 CPS 的重点在于 physical 和 Cyber 方面的融合。本章讨论这种融合和相关的原理

本章基于这些原理，确定了 CPS 学科的六个基础：基本计算概念、实体世界的计算、离散和连续数学、交叉应用、CPS 系统开发、建模。本章将围绕系统特性进行讨论，如规模，复杂性和安全关键特性。这些主题最好在 CPS 课程和计划的早期阶段中引入并贯穿始终，因为工程实践表明，从系统设计之初就解决这些问题是最佳的办法。本章结束部分是对 CPS 职业的所需补充技能的讨论：学习能力和批判性思维，软技能（soft skills）和企业家精神。

鉴于 CPS 的潜在内容广泛而且在不断演变，本章的重点是一般的原理，基础，系统特性和技能，而不是大量具体事实或技术。鉴于工程化 CPS 所涉及到的领域比较广泛，以及 CPS 新兴和快节奏性质，这种方法尤其重要。有了正确的知识基础，学生将有机会了解这项工作的新发展。

由于工程学的课程及课程体系已经成型，所以仅仅通过增加更多的学习材料以涵盖物理和信息维度是不可行的，更勿论增加一倍的教學材料这种简单做法。另外，并不是所有相关的主题都适合被编入 CPS 核心课程及相关的原理和基础。例如，机器人领域里的仿生学不宜被包括进 CPS 教育（相反，仿生学在机器人领域被视为代表性课程中的选修课，见补充阅读 3.4~3.7）。

原理：Cyber 部分与 Physical 部分的整合

CPS 的核心原理是一类工程学意义上的联结，是计算机工程学中的硬件和计算机科学中的信息（Cyber）在实体世界的应用上的整合与联结。实体世界的基本原理包括物理学，建模和现实中无法确定的因素（如不确定性和风险）。同时，计算机工程与计算机科学领域的原理涉及嵌入式系统、网络、编程和算法。因此，CPS 教育超越了传统的动力系统模型（常微分或差分方程），不仅体现在实体层面的物理影响，而且体现在“信息（Cyber）”与“实体（Physical）”的交叉与

交互上。

传感器是连接物理和信息世界之间的硬件桥梁，是从物理世界收集数据的主要设备。收集之后将其作为信息世界的输入。了解传感器的特性和原理很重要。理解传感器及物理世界的约束，并以适当的方式使用传感器同样重要。然而，用于简化系统开发的高级抽象通常具有隐藏关键物理世界原理的副作用，而程序员需要知道这些原理来确保它们开发的 CPS 正常工作。原始数据一旦收集，就通过信号处理技术进行处理。信号处理所需的原理包括线性信号和系统理论、模拟和数字滤波、时域和频域分析、卷积、线性变换（如离散傅立叶变换和快速傅里叶变换）、信号噪声和统计特征、机器学习、决策和传感器融合。在 CPS 中，与考虑传感器的可靠性一样，对于嵌入式 CPU 上的这些信号处理技术的实现，实时运行和安全关键特性是必须重视的。经典信号处理课程通常不会考虑这些问题。

控制是 CPS 的主要内容。控制理论的相关要素包括网络，混合系统，随机系统和数字系统控制技术的稳定和优化。在信息域中特别重要的是对分布式系统的控制和固有延迟的影响。

当今的网络、无线、实时、CPS 已嵌入到我们的经济和社会中，了解这些主题的基本原理对于 CPS 工程非常重要。学生需要知道的知识包括：

- 通信和网络**。需要理解 CPS 的物理层原理，协议，分层架构，了解无线通信的实际性能。

- 实时**。需要了解诸如实时调度理论，程序中的时间语义以及网络中的时钟同步等。

- 分布式系统**。CPS 在许多应用中的分布式性质和网络化应纳入 CPS 教育。即使传统工程或计算机科学课程涵盖了分布式系统和网络化，但这些课程往往不涉及 CPS 问题。CPS 将硬件实现与算法运行的软件相结合，全部在现实环境中运行。

- 嵌入式系统**。对嵌入式软件的原理、编程、算法、软件设计、方法和平台（架构和操作系统）进行有力的教学和培训工作，这些对于开发可靠和高质量 CPS 系统的信息组件是必需的。

- 物理特性**。了解并能够对环境的物理特性建模和硬件平台的非常重要。软

件设计原则应满足安全性、可靠性、实时性、风险管理、安全需求，这些解决物理世界实际问题的方法应该成为课程的一部分。

•**人机交互。**人机工程，人为环境控制以及对人类行为反应的理解和计算对于许多 CPS 来说非常重要。一个重要的设计原则是使 CPS 易操作、易控制和易维护。类似于其他工程学科，实践项目和跨学科的团队合作也是理解和应用核心原理的基础。

调研结果 2.1: CPS 核心知识不仅涉及物理工程和信息系统的设计与实现方面的基础知识，而且还需要理解物理和信息部分是怎样对彼此造成影响的。

建议 2.1: CPS 教育课程应该提供一个能突出系统的信息和物理部分的相互作用的基础课程。现行大多数课程不强调这种相互作用，所以需要新课程和教学材料。

第三章（补充阅读 3.2 至 3.7）提供了这种强调互动的课程示例。

CPS 基础

根据这些原则，委员会确定了 CPS 课程的六个重点（补充资料 2.1）。

•**基础 1: 基本计算概念**被列为 CPS 课程的一个重要基础。这旨在强调这样一个事实：CPS 所需的专业信息知识和技能，仅通过一两门程序设计课程是无法掌握的；这种知识和技能的掌握只能通过扎实的、以实体世界的真实案例为对象的计算训练。特别地，必须教会学生在信息部分如何对物理世界的特性进行处理以满足系统的一些特性（这些特性将在下一小节描述）。

•**基础 2: 面向实体的计算**，重点强调包括实体世界的特性和约束的必要性。真实世界的复杂特性常常引发软件解决不了的情况，从而导致失败；因此，以实体世界的规律为基础是十分必要的。软件设计和实现需要考虑到平台本身的资源限制以及现实情况对平台施加的条件。

•**基础 3: 离散数学和连续数学**，离散数学和连续数学，重点在于除了微积分外，CPS 工程特别需要的高等数学。这反映了 CPS 应用于连续和离散系统的事实，如何解决二者融合问题的知识至关重要。

•**基础 4：传感、驱动、控制、通信和计算的交叉应用。**需要包括控制、信号处理和嵌入式软件设计与实现方面的知识，这一点有望渗透到课程的各个方面。

•**基础 5：控制、计算和通信融合的异构动态系统建模，**重点在于不确定性和系统异构性，这样的工作尤其具有挑战性，因为物理和信息建模经常使用不同的和不兼容的模型。关注系统的物理和信息方面模型的合一和交互是必要的。

•**基础 6： CPS 系统开发** 确定从初始需求、认证到部署这一整个生命周期中开发 CPS 的要求。功能安全、弹性、信息安全和隐私等概念贯穿整个生命周期。

补充阅读 2.1 CPS 基础

基础 1. 基本计算概念

CPS 所需的专业信息知识和技能，仅通过一两门程序设计课程是无法掌握的，只有通过计算理论及实践方面的扎实的训练才能获得。对于以下列出的基本计算概念，应使用物理领域的案例来进行教学。

- 嵌入式硬件；
- 数据结构和算法；
- 计算模型，包括自动控制理论（与 CPS 相关的有限状态机）和离散事件系统；
- 程序设计；
- 软件工程和基于模型的设计；
- 实时操作系统和网络编程。

基础 2. 面向实体的计算

涉及了物理世界特性及约束的计算理论及实践基础，对 CPS 专业人才来说是必需的。真实世界的复杂性通常会使系统处于软件设计时未考虑到的状况，从而导致系统故障。CPS 软件的设计和实现，必须对平台本身的资源限制以及真实世界对平台的影响有充分的了解。学生需要理解以下概念：

- 传感器特性和信号分析；
- 在开放环境和多种模式下用传感器和执行器编程；
- 实时嵌入式系统；

- 资源管理及时间、内存、功率等限制；
- 保证系统可靠性的冗余和容错技术，

基础 3. 离散和连续数学

离散和连续数学需要成为所有 CPS 工程师必备的基本技能。这反映了一个至关重要的事实：CPS 既要处理连续的问题也要处理离散系统的问题，且掌握处理二者融合问题的技能非常重要。学生需要理解以下概念：

- 图论和组合；
- 概率，统计和随机过程；
- 逻辑；
- 线性代数；
- 微积分和微分方程。

基础 4. 传感、驱动、控制、通信及计算的交叉应用

由于物理（Physical）与信息（Cyber）的交叉是 CPS 系统的焦点和核心，并且 CPS 系统严重依赖于对通信网络、传感、信号处理及驱动系统的实时控制，所以此项基础至关重要。该课题需要渗透到课程的各个方面。控制、信号处理和嵌入式软件设计与实现的知识是这项基础的核心，并涉及以下主要方面：

- 控制原理，包括线性和非线性系统，随机系统，自适应控制，系统识别，混合控制；
- 动态系统的控制优化和最优化；
- 网络概念，包括无线通信，同步和异步通信以及 ad-hoc 网络；
- 实时分析，包括描述真实世界信息源的任务模型，时间触发或事件触发控制，使用噪声数据进行决策；
- 使用控制、计算和通信模型的信号处理；
- 安全性，可靠性；
- 安全隐私；
- 物理特性对软件需求的影响；
- 人机交互及人类行为有关的人机工程；
- 网络化控制。

基础 5. 控制、计算和通信融合的异构动态系统建模

CPS 建模需要对控制，通信和计算的全面了解，重点是模块化，抽象化，不确定性和异

质性的表示和说明。相关技术包括线性和非线性模型、随机模型和离散事件和混合模型，同时也需要基于最优化理论、概率论和动态规划的设计方法学。主要概念包括：

- 物理世界的特性，包括不确定性和风险；
- 计算设备的特性，包括计算和功率限制；
- 通信系统的特性，包括无线通信的限制；
- 差错检测和校正；
- 融合物理和计算的建模；
- 信号与系统和有限状态自动机之间的共性。

基础 6. CPS 系统开发

CPS 产品开发的整个生命周期的各个阶段都强调安全关键性、高可信性和弹性。这需要开发者具备“初始需求→测试→认证→在线使用”整个产品生命周期的视角。

- 安全，弹性，信息安全和隐私；
- 需求开发；
- 安全案例及危害分析；
- 形式化检验与验证；
- 基于模型的设计和工具；
- 系统设计，包括系统演化和生命周期认证的设计；
- 物联网或云计算等平台；
- 在实验室及预期环境中测试 CPS。

系统特性

构建在不确定性和可接受的风险控制下高可信系统，需要了解如何解决相关设计问题（即安全性，可靠性和可依赖性）。例如，如何设计城市规模的自主运输系统，最小安全问题，让人们可以放心地使用它。委员会也注意到了目前已运行的系统的差距，例如网络攻击的脆弱性以及互操作性差。最好在 CPS 早期课程中介绍以下特性及相关的设计方法，并引入贯穿到 CPS 课程和计划中。

•**安全隐私**。所有基于信息技术的系统都会受到网络攻击。许多 CPS 系统是非常脆弱的，因为它们位于开放环境中，或者它们可以无线通信。确保设计这些系统的人员熟悉安全和隐私风险技术来保护这些 CPS 系统至关重要。

•**互操作性**。特别是在大规模 CPS 中，系统将由许多组件构成，这些组件来自于不同供应商，部分可能有不同的实体运行情况。实现 CPS 的全部目标将需要异构组件和系统之间具有互操作性。而实现互操作性则需要掌握如何定义和使用共同架构、标准化接口和数据标准等方面的知识。

•**可靠性和可信性**。许多 CPS 系统将成为我们日常生活的一部分，CPS 的实用化要求很高的可靠性和可信性。由于许多 CPS 设备的计算能力、内存和资源有限，这会带来一些新问题出现。最好的系统是设计之初就考虑了可靠性（和安全性），而不是在测试期间不断地修复系统。CPS 还需要具备鲁棒性，以应对设计之初可能难以量化的不确定性。为了确保这些不确定性能够得到解决，必须在实施阶段跟踪并处理这些不确定性。

•**功耗和能耗管理**。一些 CPS 组件紧凑的尺寸和自主操作，使能耗管理非常关键，应该优先设计考虑。

•**安全**。随着 CPS 在日常生活中的应用，确保 CPS 对人类和环境的操作是安全的非常重要。与这些行为相关的风险应该是可以被评估和管控的。

•**稳定性和性能**。由于 CPS 是动态的、随机的，它的稳定性包含系统的线性或非线性，带宽，采样率，系统的极点和零点，模型的噪声和不确定性，以及传感器和执行器的局限性（例如噪声或饱和）。

•**人机工程和可用性**。人机工程设计，人机环境友好以及对人类行为及反应的理解和计算，对于许多 CPS 应用来说都很重要。例如，一些关键 CPS 系统用于老年人医疗保健，以保障老年人的健康和福利

为了确保系统在不确定性和可接受的风险程度的情况下安全运行，这些特性都需要被考虑进去。由于针对 CPS 的网络攻击盛行，可用性差和互操作性不足，加强 CPS 这些方面的教育非常重要。

绝大多数 CPS 进行开发时必须考虑到这些系统特性。因此，这些概念需要交织在一个顶尖的 CPS 课程的各个部分。构建具备这些特性的软件和硬件系统所面临的挑战对于计算机科学和工程领域来说并不是未知的。探索这些挑战，并

学习如何确定系统是否具有这些特性，对于更好地部署 CPS 至关重要。

补充技能

2004 年美国国家工程院（NAE）关于工程未来的报告强调了工程教育对科学和工程知识步伐变革的影响以及产品周期缩短的影响。

一个人不可能在四年工程课程中，学到所需要知道的一切。当新的技术出现时，基本原理也不是固定的。工程师将必须再次接受教育，工程学校也要通过教他们如何学习以使他们为新技术的出现带来的变化和挑战做好准备。¹

这一意见对 CPS 这样一个新兴的、迅速变化的领域尤其适用，并建议 CPS 课程和计划需要强调持续的学习，对技术的批判性思考以及具体的技术和方法。

NAE 报告还指出了工程系统规模和复杂程度的不断增长，这意味着工程师应该与多学科专家合作。报告描述了在这种环境下有效工作所需的“软技能”：

这些团队的基本特点包括和技术人员及公众进行有效的沟通，包括使用技术进行交流的能力，以及对全球市场和社会背景的复杂性理解能力。灵活性、接受变化和相互尊重也是至关重要的。例如，基于不同的专业领域工程师们可以一起解决困难，一旦问题得到解决，可分散开，然后应对新的挑战，又可以重新组合解决问题。²

由于 CPS 的工程计划本质是跨学科的，这些技能对于 CPS 学科尤其重要。我们有非常多的机会教导学生如何有效地团队合作，特别是在毕业设计中的项目活动中。

与 CPS 相关的工程学教育的另一个趋势是企业家精神的融入。Byers 等人 2013 年发表的一篇文章观察到：从学校仅仅学到技术知识已经远远不够；为了在市场和业务压力下取得成绩，工程师们应该具备企业家精神。对于毕业后不久从事创业的工程师来说，创业教育能使他们在产品设计、开发、原型设计、技术趋势和市场分析等方面具有扎实的经验。这些技能有助于他们在起步中获得成功，参加过创业培训的学生加入知名公司也可以更好地成为得力的团队成员和管理

¹National Academy of Engineering, 2004, *The Engineer of 2020: Visions of Engineering in the New Century*, The National Academies Press, Washington, D.C., p. 24.

²同上，第 34-35 页。

者，并能作为改革者更好的辅助雇主³。

事实上，为这项研究举办的研讨会上的几位发言者指出，工程学学生越来越希望成为企业家。考虑到 CPS 和相关领域及其应用的潜在经济效益，将企业家精神培训嵌入到 CPS 工程教育的需求可能不断增加。企业家精神培训自然应该融入到顶尖课程或其他基于计划的课程中

³T. Byers, T. Seelig, S. Sheppard, and P. Weilerstein, 2013, Entrepreneurship: Its role in engineering education, *The Bridge* 43(2):35-40.

三、掌握 CPS 知识的途径

第一章指出，几乎所有的工程领域都将受到广泛使用的 CPS 的影响，并且从业人员将包括精通 CPS 原理的领域专家，以及擅长信息（Cyber）和物理（Physical）交叉领域的新型工程师—CPS 工程师。这表明需要创造多种可掌握 CPS 知识的途径，以满足对 CPS 人力资本的需求。每个大学或学院将根据情况采取许多不同的途径。

该报告预测了各种从业人员需求、实施 CPS 课程和项目相关的挑战以及大学已经开展的一系列方法，提出了多种可供选择的方案。硕士级别的项目是一个不错的替代方案，尤其是对短期来讲（逻辑上可能是最容易实现的）。这并不意味着可排除对本科阶段 CPS 教育的需求，以及对 CPS 学士课程项目及学位的长期需求。鉴于绝大多数工程师都是在学士级别，将所有 CPS 教育都推迟到硕士级别似乎并不可行。

最后，大学提供的方案的组合将反映出个人机构，资源和大学对学生和雇主的需求的看法，反过来又影响了 CPS 从业人员的教育背景。随着时间的推移，由于领域本身的变化和成熟，雇主需求的教育和 CPS 技能将共同发展和改善。

尤其值得注意的是，许多大学目前可能没有专门知识或资源来建立广泛的 CPS 教育项目。在这些情况下，一个有用的替代方案是在几个系之间建立更有限的合作伙伴关系来实施共同授课的课程。例如，关键的 CPS 内容可以被引入机电一体化，机器人技术或运输课程。随着时间的推移，这样做可以帮助减少与工程中注入 CPS 相关联的负担，并建立实施 CPS 计划所需的课程。例如，一个包括计算机科学与机械工程的学生以及传统控制理论在内的理论课程将会产生一个 CPS 所需的新课程。

调研结果 3.1：目前院系结构、教师的专业能力及兴趣、课程体系均是多样化的，这表明支持 CPS 工程计划可采取多种可行和适当的模式。委员会设想，大学将（1）加入 CPS 内容以丰富现有的工程计划，（2）创建 CPS 概论课程，（3）创建新的 CPS 硕士学位计划，最终（4）发展新的本科 CPS 工程学位项

目。

建议 3.1: 美国国家科学基金会 (National Science Foundation) 应当对那些规划了建立 CPS 工程学位所需途径和计划的大学教育项目的发展给予支持。

在本章中，委员会预先提供了掌握 CPS 知识的几种途径。应该强调的是，这些都仅是示例，委员会希望相关机构能从不同的角度看待广泛的可能的解决方案。本章探讨以下获得 CPS 知识的方法：

- 将 CPS 融入 K-12 基础教育
- 职业和社区学院项目，
- 将 CPS 融入工程学和计算机科学的概论课程
- 本科阶段设置一门或多门 CPS 概论课程
- 涵盖 CPS 核心内容的特定领域的学位计划
- 本科级别 CPS 学位，
- 硕士级别 CPS 学位。

关于目前 CPS 教育途径和项目的概述

委员会高兴地发现，从计算机科学到电气工程系，都已开始有组织地开展各种各样的 CPS 计划模式。此外，一些领域范围已经创建了支持 CPS 设计的计划，例如智能基础设施领域的土木工程硕士学位计划。表 3.1 给出了 CPS 学术课程的一个小样本。

目前已有的少数 CPS 学位计划均是研究生计划，这使人们相信，在开始研究 CPS 之前，必须成为一个领域的专家。例如，目前的课程要求学生完成电气或计算机工程学士学位，然后再尝试通过学习 CPS 的信息部分来增强现有的学习水平；或先完成信息部分，再添加物理部分。

目前已有一些以 CPS 为核心的本科课程计划，但 CPS 还并未被列为一个独立的学位计划。此外，还有认证计划以及认证专业，以作为对学位计划的补充。

表 3.1 CPS 或嵌入式系统中的项目示例

大学/院系	样本课程	学位名称
宾夕法尼亚大学计算机与信息科学系	CIS 540: 嵌入式计算原理 CIS 541: 面向生命安全关键的嵌入式软件应用	嵌入式系统工程学士学位
伊利诺伊理工	CS 556: CPS: 语言和系统 CS 557: CPS: 网络和算法	专业从事CPS的计算机科学硕士
科罗拉多大学, Boulder 电气, 计算和能源工程系	ECEN 5613: 嵌入式系统设计 ECEN 5023: 移动计算和物联网安全	嵌入式工程专业硕士项目 (30 小时) 或证书 (9 小时)
爱荷华州立大学工学院	CprE 558: 实时系统 CprE 588: 嵌入式计算机系统	嵌入式系统毕业证书
伊利诺伊大学电气与计算机工程学院	ECE 486: 控制系统 CS 431: 嵌入式系统	信息物理系统本科选修
纽约大学工学院	CS 2204: 数字逻辑和状态机设计 EL 5483: 实时嵌入式系统	本科计算机科学学士学位, 计算机硬件和嵌入式系统选修
加州大学伯克利分校	EECS 149.1x: CPS (Cyber-physical systems)	开放在线课程

例如, 加州大学圣克鲁斯分校的工程学院将 CPS 系统导论课程列为工程学课程的一部分。该课程总体概述了 CPS 的概念和工具, 例如“连续时间和离散时间系统的建模和分析工具, 有限状态机, 状态流, 时间和混合自动机, 并发, 不变式, 线性时序逻辑, 验证, 和数值模拟”等概念¹。该课程对 CPS 的建模与分析进行了介绍。在通过工程和科学实例归纳了一些典型的系统之后, 该课程引入了几种连续时间系统和离散时间系统模型。主要关注点在于对物理过程建模的微分方程模型。课程引入了有限状态机和状态流, 并结合物理模型。讨论了所得模型对嵌入式系统设计和分析的应用。有了这个基本背景, 课程进一步引进了更先进的定时自动机和混合自动机模型。然后, 引入并使用线性时序逻辑对系统的行为进行描述和规约。线性时序逻辑是该课程使用的主要工具。关于对线性时序逻辑公式可满足性进行分析研究及数值验证的工具, 课程结合许多应用进行了介绍。

另一个例子是加州大学伯克利分校的“嵌入式系统导论”课程, 该导论课程向学生介绍了与物理过程交互的计算系统的设计和分析。本课程教材采用的教科书是由两名伯克利分校教师撰写的²。

¹ 加州大学圣克鲁斯分校, “CMPE249: 信息物理系统概述,” <https://courses.soe.ucsc.edu/courses/cmpe249>, 12月5日, 2016.

² E.A. Lee and S.A. Seshia, 2015, Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach,

对大多数大学提供的课程进行的调查显示，目前的课程不足以满足对具有熟练 CPS 技能的开发工程师的需求。这些课程很少强调任务关键或安全关键系统，并且实际的项目工作往往忽略了容错和鲁棒性。另外，这些课程项目过于注重开发新的系统，而忽略了对测试及维护现有系统所需的工具和技术充分理解。这些缺陷是由于各种问题导致的，包括跨学科或多学科方法缺乏，基于应用的工作不够，软件工程方法有限，以及整体的、组合的、系统级考虑不到位。另外，在传统的工程课程中，并没有考虑相互依赖关系。在这些方法中，系统被分解成组件，学生虽然对它们进行设计，但是不会考虑两者之间的联系。除了这些分析技能，CPS 还需要基于对组件的充分理解及多学科视角而进行系统综合的技能。

国家标准与技术研究所赞助的关于 CPS 未来机遇的研讨会的一份报告鼓励大力加强 CPS 学位计划的工程课程体系，强调系统科学、工程学，并加强对多学科研究的重视³。建立多院系的 CPS 学位和资源将有助于建立和维持 CPS 未来的人力资本，目的是为 CPS 建立更正式的教学和训练方法。

建议 3.2: 美国国家科学基金会 (National Science Foundation)、专业学会和大学管理部门应支持并考虑为以下各项工作分配相应的资源：现有工程学课程项目中新增的以 CPS 为核心的课程的开发；CPS 工程学主修和选修的专业课程开发；以及一套面向 CPS 工程本科学位项目的总体课程。

K-12 基础教育项目

在科学、技术、工程和数学上的扎实基础，加上接触 CPS 概念和应用，可以（1）向学生介绍在 CPS 领域可能的职业生涯；（2）为学生提供在 CPS 或其它 STEM 大学课程取得成功所需的基础，以及（3）通过给予学生领先优势，让他们更容易将完整的 CPS 课程融入到 4 年的大学学习中去。STEM 核心课程（如

Second Edition, <http://LeeSeshia.org>.

³ 国家标准与技术研究所, 2013, 二十一世纪战略研发机遇 信息物理系统: 连接物理世界的计算机和信息系统, Gaithersburg, Md., January, http://www.nist.gov/el/upload/12-Cyber-Physical-Systems020113_final.pdf.

微积分和物理学) 及以编程和机器人等为主题的课程, 它们都可用 CPS 内容来扩展。此外, 机器人等领域的应用提供及时且很有吸引力的机会来广泛地推动 STEM 教育和专门地介绍 CPS 内容。例如, 加州大学戴维斯分校集成计算和 STEM 教育中心 (C-STEM) 开发了基于使用机器人开发工具包的“CPS 原理与设计”课程⁴, 其目的是激发学生对计算和 CPS 的兴趣。此外, 可以提供关于 CPS 的概论课程作为高中职业技术教育的高阶课程。

在 K-12 基础教育中, 没有一个强大的 STEM 教育, 未来的 CPS 学生将处于相当的劣势。此外, 考虑到将 CPS 所需的广泛知识纳入四年制本科学位课程中的挑战, 在 K-12 基础教育阶段引入基础材料具有相当大的益处。微积分和物理学已经被强调和标准化, 特别是对于对 STEM 职业感兴趣的学生。相比之下, 编程, 机器人学和其他与 CPS 相关的主题并没有被明确定义或制度化。一些努力旨在将计算机科学和计算思维引入全国范围的 K-12 基础教育, 它可能会为引入 CPS 概念和基础提供机会, 其中最近和最广泛尝试是“全民计算机科学行动”倡议。

职业和社区学院

社区学院在为学生提供教育机会方面发挥多重作用。对于一些人来说, 这是获取 4 年制学院和本科学位的途径。因此, 应当使参加这些机构的工程计划的学生了解 CPS, 并且安排适当的课程以便他们能为在以后的四年计划中进行这一领域的学习做好更充分的准备。此外, 这些项目必须足够严格, 以确保学生可以成功进入学士计划。

对于其他人, 社区学院提供施工, 汽车修理和其他类似工作的职业培训。越来越多的职业将需要了解 CPS 基础知识, 以便安装和维护依赖 CPS 的先进系统。这些依靠职业教育的工作包括汽车维修, 暖通空调安装和维护以及医疗保健。职业和社区大学教育将需要发展和改善, 以发展新技能, 并结合新知识来支持这些不断变化的专业和新领域, 如太阳能系统、风力发电系统和宽带通信系统的设计、

⁴加州大学戴维斯分校集成计算和 STEM 教育中心, “C-STEM Math-ICT Pathway,”

<http://c-stem.ucdavis.edu/curriculum/ict-pathway/>, 11 月 1 日, 2016.

安装和维护。一个例子是 Washtenaw 社区学院⁵成立了一个高级交通中心，正在努力开发课程，创造职业培训机会，加强社区学院和大学围绕网联汽车和先进交通系统的互动。

人们还利用社区学院来学习新知识，获得新技术。因此，社区学院可以为已经获得相关学科学位（例如计算机科学，电气工程或机械工程）的职业中期专业人士提供增强他们在 CPS 领域的技能的方法。一套教育模块可以被塑造成继续教育课程。如果为这些相关工程领域制定了工程师许可制度，那么这些被塑造的课程很可能用于满足国家继续教育的要求。

本科课程，专业课程和计划

本节考虑将 CPS 纳入本科教育的各种方法。首先讨论将 CPS 内容添加到工程和计算机科学本科生入门课程的方法，以及创建可提供对 CPS 更深入的介绍的导论课程的方法。然后，转向讨论如何将 CPS 专业添加到现有工程计划中，以及创建 CPS 本科方案的一些可选择的方法。最后，讨论了灵活的课程作业的必要性，实际动手操作的作业对学习 CPS 的重要性，以及对创建教授 CPS 的新课程的需求。

目前的工程课程已经包含大量的内容，无法容纳太多的新课程，因此本报告提议的课程体系中，为 CPS 设计的新课程将取代一些现有课程。在新的 CPS 专业课程中，本报告建议的课程将部分取代现有的专业课程。例如，学生可以选择为 CPS 设计的新的专业课程，而不必再选择控制、软件工程或网络的专业课程。对于 CPS 学位，示例课程会包含新课程，这些课程将替代衍生它们的课程。

工程学与计算机科学导论课程

如第一章所述，越来越多的曾经简单的实体或简单的信息系统现在整合了彼此的组件。例如，机械和航空航天工程师将不可避免地需要将其设计与系统控制和自动化相结合。因此，工程师将需要对物理和信息技术的整合以及建立和对维护 CPS 的复杂性有基本的了解。

⁵ Washtenaw 社区学院, “高级交通中心,” <http://sites.wccnet.edu/atc/>, 11 月 1 日, 2016.

大多数工程计划（如果不是全部的话）为新生工程学生提供进入导论性工程课程的机会。其中大多数是领域特定的——各个工程系或学院均各自开发和教授此课程。这些课程为学生提供了该领域的概述，同时还教授基本的工程技能和解决问题的方法。鉴于 CPS 的广泛应用及其对更传统学科的影响，委员会建议，这些课程应包括对 CPS 的复杂性的讨论，并介绍一些关键的 CPS 概念。

委员会认识到这些课程已经包含了许多教学材料。然而，CPS 教育是可以利用其中的一些材料进行体现的。例如，其中许多课程包括实践项目或长达一学期的项目。通过提供来自真实世界的项目任务，可将 CPS 概念融入进来。航空航天工程学生可以研究无人驾驶控制。土木工程学生可以研究智慧城市。机械工程师可以探索机器人。引导学生面对一体化带来的挑战，且系统的开发不会是在一个封闭的系统（真空）里，而应考虑到外部影响，包括人为因素，现实世界的限制以及软件和物理学的局限性。

建议 3.3: 大学应当考虑为工程学和计算机科学相关的各专业领域的新生开设 CPS 导论课程。

新的 CPS 概述课程

鉴于 CPS 所需的广泛知识，概述课程的结构可能采取几种方法。一种方法是从 CPS 的多学科领域中选择基于模块的课程。这样的课程可以包括传感器网络，嵌入式计算，信号处理，控制理论和实时系统的模块。对于包含两门课的课程，可从安全和隐私、基于模型的设计、形式化方法、混成系统以及数据科学和机器学习之中选择多个模块。在模块化方法中，强调每个模块不应该完全独立于其它模块，类似原则和概念也强调不同模块之间的交互。另一种方法可强调 CPS 的安全关键方面，包括容错，基于模型的设计，并行和分布式算法，计算模型，形式化规约和验证方法，实时系统和混成系统（在控制理论中引入）。第三种方法可侧重于建模，设计和分析，所有这些都来自多学科的方法——明确关注信息（Cyber）和物理世界之间的相互依存关系。主题可能包括连续和离散的动力学，混成系统，并行计算模型，嵌入式系统，多任务和实时调度，时间逻辑，模型检验和定量分析——都强调信息（Cyber）系统与物理系统的集成。

无论采用何种方法，概论课程都应强调整合物理与系统信息方面的复杂性，并至少涉及第二章概述的基础和系统特性。补充资料 3.1 提供了一些高年级本科生概述课程的例子。任何这样的课程和项目列表，只是对美国 and 全球已开发和提供的一系列不断发展的课程的抽样。主题列在补充阅读 3.1 中，但值得注意的是所有课程都包括实践项目或实验室工作，不仅强调课程主题，而且还包括信息（Cyber）和物理世界的整合。

CPS 专门化的传统工程学计划

将 CPS 原理纳入传统的本科工程方案（如航空航天，土木，机械和化学工程等等）课程中，也会使这项传统计划从中受益。在一些领域，如航空航天和机械工程，虽然已将 CPS 原理纳入，但主要侧重于物理世界的角度。因此，增加信息元素及其与物理元素的相互作用的知识将是不小的挑战。同样具有挑战性的是（1）确保将 CPS 原理纳入课程的必要变更符合美国工程与技术认证委员会（ABET）的要求，以及（2）确保学生可做好通过国家工程和测量工程学考试委员会（FE）考试的充分准备。

CPS 原理目前纳入领域专业课程的程度因学科而异。本科土木和机械工程课程要求学生在前两年内参加类似的数学，自然科学和基础工程与科学课程。第三年主要是将学生引导到各自学科的具体专业领域。例如，在土木工程中，这些具体专业领域包括结构，岩土工程，交通运输，环境，水文，水利和建筑工程。机械工程选修领域的例子包括机器人和控制，热流体系统，制造和固体力学。在第四年，大多数学生通过选择重点关注其中的一个选修领域，从而发展专业化。毕业设计课程（capstone design course）通常也是第四年课程的一部分。

补充资料 3.1 概论课程示例

例 1：CIS 541/441：面向生命关键应用的嵌入式软件

Insup Lee, 宾夕法尼亚大学

这个概论课程是在计算机和信息科学系内部进行的，重点是实时问题。目前要求的先修课程是 C 或 Java 编程，以及计算机体系结构或操作系统导论。该课程还包括一系列

实现安全关键的嵌入式系统的项目，如起搏器或输液泵。

课程主题

CPS 导论

- CPS 应用程序
- 特点和挑战

需求、建模和分析

- 基于模型的开发
- 需要获取和建模
- 状态机，定时自动机
- 属性和模型检验
- 用户心理模型
- 架构描述语言
- 代码生成和综合

实现范式和技术

- 实时操作系统
- 编程范型和语言
- 组合与基于反馈的实时调度
- 计算机系统中的反馈控制
- 虚拟机，监控程序，内核隔离
- 组件，嵌入式系统的即插即用功能
- 混合关键系统
- 分布式实时系统概念：排序，全局时间，时钟同步
- 安全和隐私

验证，检验和认证

- 测试覆盖和生成
- 基于模型的测试
- 闭环测试
- 运行时监控和验证技术
- 人机交互
- 模块化和循证认证
- 危害分析，保证案例

讲义

- CPS 导论
- 实时嵌入式系统导论
- 实时操作系统，虚拟机，监控程序
- 实时调度：EDF，RM，服务器，优先级反转
- 多处理器实时调度
- 实时编程语言和范式
- 分布式实时系统：全局排序，全局时间，时钟同步
- 计算机系统中的反馈
- 医疗 CPS
- 起搏器挑战问题
- 保险案例
- 医疗器械质量问题—FDA 观点
- 形式化建模和模型检验
- 扩展有限状态机，定时自动机
- UPPAAL 工具集：定时自动机和定时 CTL，模型检验
- 状态机的代码生成/综合
- 测试，测试覆盖，测试生成
- 实时测试，基于模型的测试，闭环测试
- 运行时验证
- 架构描述语言，AADL
- 人机交互：用户界面
- 用户心理模型
- 项目介绍：起搏器建模和实现，保障案例和演示

例 2: EECS 149 / 249A: 嵌入式系统导论

Edward A. Lee 和 Sanjit A. Sehsia, 加州大学伯克利分校

这个导论课程是在电气工程与计算机科学学院开设的。先修课程包括信息装备与系统设计或信号与系统, 计算机体系结构、离散数学。本课程包括一系列实验室实践, 它们最终成为一个必须涉及课程中不同主题的团队项目。(见 <https://chess.eecs.berkeley.edu/eecs149/index.html>。)

课程主题**计算模型**

- 有限状态机
- 线程
- 常微分方程
- 混成系统
- 离散事件
- 数据流

基本分析, 控制和系统仿真

- 仿真
- 可达性分析
- 控制器综合
- 连续时间系统估计

与实体世界交互

- 传感器/执行器建模和标定
- 多实时流的并发性
- 软件中非精确数据处理

嵌入式平台

- 实时操作系统
- 执行时间分析
- 调度
- 并发性

分布式嵌入式系统

- 协议设计
- 可预测网络
- 安全性

讲义

- CPS 概述
- 传感器和执行器
- 基于模型的设计和连续动力学
- 内存体系结构
- 输入和输出
- 模态行为和离散系统建模
- 扩展和时间自动机
- 状态机组成
- 分级状态机
- 规约和时间逻辑
- 状态机比较
- 可达性分析
- CPS 中的时序逻辑
- 多任务
- 操作系统, 微内核与调度
- 调度反转
- 执行时间分析
- 同步, 反应和数据流模型
- 嵌入式系统的安全性
- 网络嵌入式系统

补充资料 3.2 侧重 CPS 的机械工程 4 年制本科方案

数学与自然科学（9 门课程）

- 微积分 I
- 微积分 II
- 矢量微积分
- 微分方程
- 线性代数
- 概率与统计
- 物理 I（力学与动力学）
- 物理 II（电和磁）
- 普通化学

传统机械工程课程（13 门课程）

- 工程图形与设计导论
- 力学 I: 静力学
- 力学 II: 动力学
- 固体力学
- 流体力学
- 热力学
- 系统动力学
- 工程材料科学
- 实验技术
- 机械工程系统实验
- 传热学
- 设计, 材料和制造
- 工程经济学

CPS 相关课程（5 门课程）

- 计算导论
- 电路与电子学
- 工程中的计算方法
- 电路、电子与仪器实验
- 专题设计（Capstone Design, 或称毕业设计, 以 CPS 为重点的项目）

CPS 技术选修课程（5 门课程）：

- CPS 原理
- 网络化嵌入式系统编程
- 信号与系统
- 动态系统控制

- 基于模型的系统工程

与 CPS 相关的机械工程选修课范例：

- 运动建模与控制
- 机器人
- 仿生设计
- 跨学科的设计学
- 生物医学仪器
- 机械电子学
- 传感器网络

社会科学，经济学、人文（8 门课程）

补充资料 3.3 侧重 CPS 的土木工程四年制本科方案

数学与自然科学（10 门课程）

- 微积分 I
- 微积分 II
- 矢量微积分
- 微分方程
- 线性代数
- 概率与统计
- 物理学 I（力学与动力学）
- 物理学 II（电和磁）
- 普通化学
- 科学选修课（生物学或地球科学）

传统土木工程课程（13 门课程）

- 工程图学导论
- 力学 I：静力学
- 力学 II：动力学
- 固体力学
- 流体力学
- 热力学
- 环境工程
- 土木工程材料
- 限定选修课（从结构工程，建筑管理，环境工程系统，水利工程，岩土工程，交通工程中选 4 门课程）

- 工程经济

与 CPS 相关的课程 (3 门课程)

- 面向工程的计算
- 土木工程系统 (以 CPS 为重点的开发)
- 专题设计 (Capstone Design, 或称毕业设计, 以 CPS 为重点的项目)

技术选修课 (6 门课程)

目前的土木工程课程中几乎没有专注于 CPS 概念的本科选修课程。如果重新设计, 目前的一些选修课程可以纳入 CPS 原理, 包括:

- 地理信息系统
- 交通规划与设计
- 基础设施修复
- 环境地球科学
- Subsurface Characterization
- 环境系统设计
- 建筑信息建模
- 概念结构设计
- 结构工程的计算与图形工具
- 结构系统测试与模型

CPS 中心的建议选修课¹:

- CPS 原理: 可持续的基础设施
- CPS 原理: 城市规划
- 信号和系统
- 面向土木工程系统的传感器网络
- 基于模型的系统工程
- 结构安全监测

社会科学, 经济学, 人文学科(8 门课程)

¹ 这些课程的设计必须结合本报告第 2 章中基础的定义

补充资料 3.2 和 3.3 中给出了两类课程示例, 其中一个针对机械工程, 另一个针对土木工程。这两个例子基于几所大学的现有课程, 从中我们可以看出, 与土木工程课程相比, 机械工程课程在一定程度上已经存在更多的以 CPS 为核心的核心课程和技术选修课程。然而, 为了让本科生更好的了解 CPS 中的信息部分以及信息与物理部分之间的交互 (定义见第二章), 这些现有的课程可能需要被重新设计。

在这两类课程中都提出了新的以 CPS 为中心的课程。这样的课程仅作为示例，还有很多强调 CPS 的特定领域的课程可被定义。鉴于当今的 ABET 认证过程具有灵活性，又因为预计这些课程将主要成为技术选修课替代方案的一部分，所以满足 ABET 认证要求或者让学生充分准备以通过 FE 考试应该是个不大的问题。事实上，一些“新的”课程主题（例如信号和系统、传感器网络和结构安全监测）已经作为少数本科工程课程中的选修课。这种灵活性还将有助于在领域发展的过程中适应 CPS 课程的变化。

CPS 本科（学士学位）课程方案

委员会提供了一个例子来说明 CPS 学士学位可能的课程要求，如补充资料 3.4、3.5 和 3.6 所示。由于许多混杂因素，即使不考虑资源限制，设计一个 CPS 学位也是相当复杂的。虽然制定的课程是基于第二章的基础概述和系统特征，但是设计一个理想课程体系也是非常困难的，主要原因如下：

- 它需要太多的现有课程来满足 CPS 足够的深度要求。因此，如果设计不好学位课程计划，无论是实体（Physical）还是信息（Cyber）方面最终都不会得到足够的重视。
- 个人专长会影响其对课程设置的优化。例如，对于一个控制理论专家来说，仅有一门单一的控制课程达不到他们期望的学习深度。可能需要一门基本的控制课程加上一门嵌入式系统控制课程才可满足要求。

补充资料 3.4 四年制，40 门课程的 CPS 本科（学士学位）课程计划

数学与自然科学（10 门课程）

- 微积分 I
- 微积分 II
- 微分方程
- 线性代数
- 概率与统计
- 逻辑学
- 物理学 I（力学与动力学）
- 物理学 II（电路）
- 化学或生物学

- 离散数学

CPS 核心课程（12 门）

- CPS 导论（新生实验课）
- 计算机编程
- 数据结构和算法
- 可编程物理系统
- 软件工程
- 基于模型的系统设计
- 异构计算模型
- 形式化方法与综合
- 资源感知实时计算
- 控制系统
- 优化方法
- 数字信号处理

研讨与设计课程（分 2 学期，2 门课程，Capstone Design，或毕业设计）

设计课程应包括以下内容:

- 行业参与
- 跨领域跨学科团队，包括工商管理

CPS 选修课（2 门课程）

可选主题：不确定性推理，安全性，隐私，无线传感器网络，计算机体系结构，操作系统，数据库，数据科学，云计算，通信网络，网络科学，网络控制，弹性系统，信息论，机器学习，人工智能，优化，机器人学，随机系统，自适应系统

社会影响的选修课（3 门课程）

- 与特定专业无关的领域背景
- 知识产权意识
- 伦理学
- 可选主题：现代航空电子，汽车系统，机器人学，智能建筑物，智能交通，智能电网，医疗器械，空中交通管制，无人机

社会科学与人文学科（8 门课程）

自由选修课（3 门课程）

委员会强调，所提供的例子是根据对这些复杂性的理解而制定的,只是作为示例而不作为规范化的课程。注意事项和重要说明将在下一节中给出。

补充资料 3.4 提供了本科生 CPS 学位课程的一个例子。所制定的示例假定本科课程数量限制在 40 门内，以便在可在 4 年内获得学位。为了支持 CPS 中的物理基础，一套数学和自然科学课程必不可少。补充资料 3.4 中列出了十门这样的

课程。课程的制定也要具有灵活性，以便学生如果想要放弃任何早期的课程，还可以用选修课替代。补充资料 3.4 还提供了 12 个可以作为新专业的核心课程的例子。不同的大学可能会选择不同的方式来构建这些材料，但重要的是这些课程中的内容。

根据学院或大学的划分，计算机科学与工程可能位于自然科学、工程学院或计算机学院内。而 CPS 计划却在计算机科学和电气工程计划中有组织地发展。从计算机科学的角度（参见补充资料 3.5）⁶，或者从电气和计算机工程的角度划分 CPS 课程（参见补充资料 3.6），所得到的结果将会有所不同。这些课程中的一部分课程将提供物理和信息之间紧密耦合的教学，但各自具有不同的重点。大多数大学允许跨越适用于电气与计算机工程和计算机科学学位的课程，这往往会使这种差异模糊，同时为学生提供灵活性，以便他们在研究 CPS 时获得所期望的平衡。

补充资料 3.5 四年制，40 门课程的 CPS 本科学位课程—电气工程方案

数学与自然科学^{1,2}（11 门课程）

- 微积分 I 和 II
- 微分方程
- 线性代数
- 概率与统计
- 逻辑学
- 物理学 I（力学与动力学）
- 物理学 II（电磁学）
- 化学或生物学
- 数学选修（分析，代数，图论）
- 自然科学选修课（统计学，生物化学，系统生物学）

CPS 导论（1 门课程）

- 新生实验室课程，强调使用 CPS 系统进行实践，多学科的团队合作

计算基础（5 门课程）

- 可编程的实体系统
- 异构计算模型

⁶ 如果计算机科学系位于另一所大学，基于计算机科学项目的 CPS 项目可能无法正式安置在工程学院。然而，与工程部门之间进行重要的互动是必须的，以此来保证涵盖 CPS 物理实体方面的全面程度。

- (分布式) 算法
- 形式化方法和综合
- 资源感知实时计算

CPS 核心 (7 门课程)

- 数字信号处理
- 网络
- 随机系统 (估计, 检测, 推理, 适应)
- 基于模型的系统设计
- 低年级实验课程 (物联网实验室, 机器人, 传感器网络, 医疗器械)
- 控制系统
- 优化

CPS 选修课 (任选 3 门课程)

可选主题: 安全, 隐私, 数据科学, 云计算, 网络, 网络控制, 弹性系统, 信息论, 机器学习, 人工智能, 优化, 自适应系统

研讨与设计课程 (分 2 学期, 2 门课程, Capstone Design, 或毕业设计)

设计课程应包括以下内容:

- 行业参与
- 跨领域跨学科团队, 包括工商管理

社会影响的选修课 (3 门课程)

- 与特定专业无关的领域背景
- 知识产权意识

可选主题: 现代航空电子, 汽车系统, 机器人学, 智能建筑, 智能交通, 智能电网, 医疗仪器, 空中交通管制, 无人机

社会科学与人文学科 (7 门课程)

自由选修课 (2 门课程)

¹更广泛地接触连续和离散数

²压缩微积分对 k-12 基础教育的影响

课程说明与注释

■ 课程的灵活性

在如今的工程学院中, 需要面向学生强调课程灵活性。越来越多的大学正在增加选修课的机会, 并减少规定课程的数量。提高工程课程的灵活性, 能够为学生提供更多的机会, 使得他们通过概述课程、工程选修课、辅修课或证书来探索 CPS, 同时避免了前面章节中讨论的认证问题。

相应地, 委员会的示范课程中提供了灵活性。例如, 课程示例中描绘了两个

CPS 技术选修课, 三个社会影响选修课, 八个人文学科和三个不受限制的选修课。
灵活性还存在于如何讲授 CPS 导论和课程计划中。

补充资料 3.6 四年制, 40 门课程的 CPS 本科学位课程方案—计算机科学

数学与自然科学 (11 门课程)

- 微积分 I
- 微积分 II
- 微分方程
- 线性代数
- 概率与统计
- 逻辑学
- 离散数学 (CS 数学基础)
- 物理学 I (力学与动力学)
- 物理学 II (电磁学)
- 生物学或化学
- 物理实验课程

CPS 导论 (1 门课程)

- 新生实验课程, 强调使用 CPS 系统进行实践, 多学科的合作

CPS 工程基础 (6 门课程) 从下列课程中选六门:

- 可编程的实体系统/嵌入式控制系统 (2 次编程课程后) —— 涉及不确定性, 风险管理, 可靠性, 可依赖性和安全性
- 网络嵌入式系统——包括无线网络, 传感器网络, 实时和控制输入, 分布式系统和通信网络
- 基于模型的开发——建模, 逻辑, 形式化方法和综合, 但都是面向 CPS 的
- 线性, 反馈和控制系统
- 数字信号处理
- 随机系统 (估计, 检测, 推理, 适应)
- CPS 的人机交互
- 优化
- 电路

CS/CPS (9 门课程)

- 计算机编程, 语言和技术 (I 和 II)
- 数据结构和算法
- 计算机体系结构
- (实时) 操作系统
- 算法和复杂度

•从下列课程中选择三门:

- 数据库 (CS)
- 网络和安全
- 计算机网络
- 计算机安全
- 软件工程 (CS)
- 机器人
- 人工智能 (CS)
- 机器学习 (CS)
- 高可信 CPS 应用程序的功能安全性, 信息安全性, 隐私性

研讨与设计课程 (分 2 学期, 2 门课程, Capstone Design, 或毕业设计)

设计课程应包括以下内容:

- 行业参与
- 跨领域跨学科团队, 包括工商管理

社会影响选修课 (2 门课程)

- 技术与社会
- 工程与科学伦理学

社会科学与人文学科 (7 门课程)

自由选修课 (2 门课程)

■ 实验室和动手实践的意义

基于项目的学习在目前大学工程课程中越来越多。CPS 特别适合动手学习活动和实验室工作, 基于项目的学习似乎特别适合于传递信息和物理整合问题的复杂性。在本科教育结束后, 仅依靠理论训练和等待课程设计项目, 可能无法将所有的概念很好地结合起来, 所以持续的针对实际问题进行理论学习的实际应用才是关键。现在课程大纲的常见做法是包括家庭作业、考试和项目。课程计划旨在通过汇集课程中引入的多个概念来解决具体的现实问题。在基于项目课程的创新性的例子中, 在实验室中教师与学生接触, 促进学生的创造力、团队合作和最终产品的有效完成。学生选择真正的实际问题, 在团队合作中为这些问题建立完整的典型的解决方案。学生构建硬件, 通过现有的硬件组件组成新的硬件, 并学习将硬件与有效的软件集成, 以形成真实问题的解决方案。

除课堂项目外, 学生还通常需要完成设计课程项目 (capstone projects), 在需要概念整合和与具有多领域专业知识的学生团队合作的大型项目中, 总结他

们学习的知识。还有一些连接多个课程项目例子。

建议 3.4: 工程类院校总体来说已经重新设计了相应的课程，以强调基于项目的学习（project-based learning）。基于项目的学习（project-based learning）课程对 CPS 教育至关重要，所以应适当扩充这些课程使其支持 CPS 原理和基础。

面向 CPS 的项目课程由于可用的硬件和软件的极快变化而变得非常具有挑战性。在这种情况下，重复使用的定义项目任务的传统方法就会失效。讲授这些项目课程需要对定期购买新的硬件和软件做预算，并且需要大量的技术支持和专业知识来保证同步的可能性。以管理人员和实验室技术人员的形式对课程提供重要的机构支持，在这种情况下，这些课程才能可持续的发展。

■ 新课程的需求

仅将现有课程收集到新的 CPS 课程中去是不够的。新的 CPS 规划是远远不够的。如果采取这种方法，学生不会真正地接触到或者理解物理和信息互动问题的错综复杂。为了做出易懂的描述，如大多数标准的计算机科学课程不包括实时编程，即使这个主题对于构建与物理世界交互的 CPS 至关重要。

另外一个例子，有关控制的标准课程通常忽略了实现控制器的计算模型。那些确实涵盖控制系统的计算实现的课程（通常称为数字控制系统），一般都有不切实际的计算模型。换句话说，他们假设有无限的计算资源或者陈旧的计算模型。此外，控制系统的典型入门课程不教授学生如何定义形式化需求及将控制纳入现代 CPS 应用程序中使用的设计流程。

调研结果 3.2: 由于 CPS 工程主要集中于系统的物理和信息方面的交互，因此仅通过简单地组合现有课程的材料是不足以创建 CPS 课程体系的，需要设计新的课程。

因为这是非常重要的一点，所以通过以下几个例子来说明如何修改传统课程以涵盖 CPS 所需的主题：

- **控制论。**电气工程中的控制理论课程强调了线性和非线性反馈系统的稳定性，性能，优化和设计等主题。混合控制是 CPS 的重要课题，在这些课程中受到越来越多的关注。CPS 所需的其他主题是将控制理论与网络、实时分布式系统、人机工程、安全性和软件等连接起来。一些具有物理、信息和网络元素的 CPS 实例可以作为对控制实例的补充，包括物理，信息和网络元素。需要了解如何在软件中实现控制策略并且解决实时性能和安全性问题。CPS 课程的重新设计将提供足够的基础知识，并添加所需的附加主题，同时降低对一些传统主题的强调，例如稳定性证明。
- **软件设计与编程课程。**传统课程中使用的示例应用程序，通常对物理世界的不确定性，实时性和安全性挑战并不作充分的考虑。对于 CPS 来说，学生学习使用传感器和执行器编程是十分重要的。例如，了解传感器的属性要比了解隐藏在高级应用程序接口后面的属性重要。例如，错误地处理着陆器触地传感器的瞬态信号的软件可能导致火星着陆器过早地“认为”已经接触到表面，从而在它与火星表面相距很远的地方关闭反推进火箭，导致任务失败。学生必须学会以鲁棒和安全的方式进行编程，包括如何实现反馈控制器和使用不同复杂程度的信号处理技术。将实时性原理应用于系统设计和实现截止时间至关重要。当人为操控可能会使人类或主要系统处于危险之中的情况时，需要特别注意与用户互动的 CPS 软件。
- **概率与随机过程。**概率性、不确定性和风险性的基本原理适用于 CPS 类型的物理世界系统、噪声传感器、信号特性，以及在非确定性环境中运行的硬件和软件组成的系统的总体风险评估和管理。还需要具有对决策的概率性与不确定性的使用与编程的知识。那些能够向学生展示如何将关键原理应用于 CPS 领域的课程变得越来越重要，这些 CPS 领域包括智能电网、喷气发动机控制或医疗系统等。

补充资料 3.7 CPS 硕士学位课程计划

CPS 核心（7 门课程）

- CPS 介绍
 - 概述所有核心课程及其与 CPS 的关系
- CPS 架构
 - 传感器，执行器，网络，分布式计算
- 嵌入式和实时系统
 - 强调对有线和无线网络的噪声传感器数据进行可靠实时的计算
- 形式化方法
 - 形式化计算模型，包括离散和模拟计算
 - 形式化规约和验证
- 信号处理
 - 硬件和软件上的数字信号处理
 - 以网络上的分布式信号处理为重点。
- 反馈控制
 - 物理和计算过程的建模
 - 稳定性，安全性，活性和其他规约的设计技术
 - 硬件实现
- 不确定性推理
 - 不确定性、统计推断、检测和估计的建模基础

选修课（3 门课）

- 计算机和网络安全
 - 利用计算的物理性质覆盖攻击（例如时间，温度，辐射）
- 混合系统
 - 包含离散和连续组件的系统的建模，验证和控制
- 网络控制系统
 - 有线和无线网络的控制
 - 延迟、数据包冲突和协议对性能的影响
- 计算机体系结构
- 系统工程
- 传感器网络

- 医疗嵌入式系统
- 机器人技术
- 机器学习
- 数据建模

硕士学位课程

专注于嵌入式系统或 CPS 的理学硕士学位较少。尽管已经存在一些课程，委员会仍认为提供课程计划的一个示范将会对课程规划有帮助，特别是对许多现有课程中侧重的是电气工程或计算机科学。另一种可能性是将 CPS 专业课程添加到机器人学研究生课程中。

补充资料 3.7 给出了一个在一年内可以获得的理学硕士学位方案。虽然一般情况下学生需要 1 至 2 年才能完成所有的要求，其中伴随着一些研究。课程分为所需的核心课程和选修课。对于一学期制的系，学生需要完成八门课。希望在一年内完成理学硕士学位的学生，需要在秋季学期和春季学期分别修完四门课程，或者在秋季学期、冬季学期和春季学期各修完三门课程。这种理学硕士学位还需要完成一个项目，这种项目应当体现出设计一个能在现实世界中够可靠工作的 CPS 系统的挑战。

四、CPS 课程体系发展和制度化

为了满足当前及未来对 CPS 人才的需求，可采取多种措施和方式以建立和促进 CPS 计划。一是在 K-12 基础教育阶段和大学导论课程的早期引入 CPS 概念和应用。二是建设所需的师资队伍，这一点很有挑战性，因为许多大学的传统学术制度中很少有合适的机制支持大量的教员投身于交叉学科领域。此外，CPS 课程教学所需的资源可能有限，包括教材、实验平台和实验室空间。本章讨论学术机构、工业界（补充资料 4.1）和美国国家科学基金会在加强大学生 CPS 教育方面所能采取的措施。

补充资料 4.1 工业界在发展 CPS 课程项目中的作用

尽管开展 CPS 课程的大多数工作发生在学术界，工业界同样也发挥着重要作用。工业界可能扮演的角色包括如下：

- 鼓励行业专家以客座讲师、兼职和访问教员等身份参与其中来支持 CPS 计划的发展。
- 提供关于 CPS 课程及课程体系设计的持续的反馈，为学生在工业界实习和工作做准备。
- 提供财务或实物支持，用于开发课程材料、项目和先进的实验平台。

吸引学生到 CPS 中来

学生最初被吸引到 CPS 中来很可能是通过接触 CPS 相关的技术领域（如机器人、无人车和物联网），或者那些可解决国家和全球问题的应用（如可持续性、环境问题和健康等领域）。除此之外，学生们可能需要在这些主题和 CPS 的学科之间找到一些联系。

正如在第三章讨论的，扎实的 K-12 科学、技术、工程和数学（STEM）基

础及对 CPS 概念及应用的接触，均有助于吸引学生并让他们对大学 CPS 学习有所准备。显然，K-12 的一些课程向学生介绍 CPS 概念，很多课程则是基于机器人学¹。通过使用具体的 CPS 案例，这些课程有效地引入 CPS 概念并强调它们和 STEM 教育要素的联系。

在本科教育阶段，可以通过再次建立 CPS 与相关技术领域的联系来强化 CPS 概念。正如第一章所推荐的，此报告对 CPS 的介绍可以作为新生“工程学导论”课程的一部分。不过，虽然教师需要强调的重点是这些领域里的 CPS 基础知识，但对激起学生兴趣的其他相关主题也不必回避。

学生（尤其是大学生）能很敏锐地察觉与各种不同工程学科相关的工作机会和薪资。因此，向高中生、大学生和研究生推广 CPS 毕业生的工作需求和报酬也将促进该领域的发展。来自工业界的特邀讲师能够使导论（和其他 CPS）课程与时俱进、有吸引力，同时让学生有机会接触工业界。

调研结果 4.1: 虽然高中及本科教育阶段已有许多 STEM 课程和计划包含了 CPS 的元素，但这些计划通常并未提供关于 CPS 原理和基础的广泛介绍，并且倾向于把重点放在过于简单的应用上或仅以原理为中心的内容上。

建议 4.1: 为了给未来的工作打好知识基础并使学生了解 CPS 就业机会，那些正在开发中的 STEM（科学、技术、工程、数学）教育计划，以及计划中从事教育和培训工作的老师均应考虑通过引入 CPS 概念以丰富这些计划的内容。

调研结果 4.2: 即将进入大学的学生们似乎对术语“CPS”、CPS 的概念、CPS 的工作机遇并不熟悉。但事实上，他们感兴趣的那些知名度很高的课程和 CPS 主题均有着广泛的联系，如机器人学、物联网、医疗健康、智慧城市及

¹ Examples include such as the FIRST Lego League (<http://www.firstlegoleague.org/>), which brings STEM robotics to younger children starting in the 4th grade, First Robotics (see <http://www.usfirst.org/roboticsprograms/frc>), the University of California, San Diego, COSMOS program (<http://www.jacobsschool.ucsd.edu/cosmos/index.shtml>), or RoboCup Junior (<http://rcj.robocup.org/>), accessed November 1, 2016.

工业互联网。

建议 4.2 对于正处于开发之中的 CPS 工程的课程和计划，在描述职业和课程以及选择用于课程和计划中的应用时，不妨考虑充分利用机器人学、物联网、健康医疗、智慧城市和工业互联网等领域的知名度及学生兴趣。

招聘、维持和发展相应师资力量

CPS 不仅跨学科，而且处在多学科的交叉点上。那些教授基础性、专业性或基于工程的 CPS 课程的教师们需要对 CPS 范围里的各种学科都有所了解。CPS 教师不仅应在 CPS 的某一方面有专长，也应有能力将他们的专长与完整的 CPS 系统中其他方面的知识，以及特定领域和应用的具体需求这三者结合起来。招募、维持和发展师资力量的措施简要讨论如下：

招聘教师

CPS 领域研究的升温将带来更多的、CPS 专业的新教师。从长期看来，理想的教师招聘将要求（1）CPS 学位或专业毕业；（2）有从事 CPS 研究的经历。教师的另一个来源则是有 CPS 技术行业经验的专业人士。此外，我们预期教师岗位要求将明确提及 CPS 教育与研究。事实上，现在已有一些大学在他们招募新教员的要求中包括了 CPS。

目前及不远的将来，在 CPS 教育体系完善建立起来之前，CPS 教员招聘将要求院系寻求在专业领域具有足够深度又兼顾广度的教员。招聘人员将寻找积极主动、魅力非凡的教员，这类教员在吸引学生学习 CPS 上扮演着重要的作用。招聘还要求开放教学职位，这将不可避免地导致来自传统研究领域对这些职位的竞争。

必须承认的是，当前学生的教学资本已经十分有限，高校可能不情愿在现有课程计划下把 CPS 当作一门新学科，因为这会带来额外的限制。如此一来，新的雇用岗位往往仅愿意提供给能教授大学现有核心课程的人员。因此，开发一个专门的 CPS 学位课程项目将会为雇用有 CPS 教育和研究背景的人员创造良好机

会。

留住教师

当前学术体系，尤其是终身教职和职称晋升的评选，非常依赖于教师在自身研究领域的研究深度及在特定学科范围内的学术成果发表情况。CPS 教员将会有更广的研究范围，他们的研究成果可能在多个不同的学科领域发表，因而现有的升职标准可能会限制以 CPS 为研究主题的教师的职业发展。然而所幸的是，目前已有一些被广泛认可的 CPS 会议(如 CPS Week)，教材以及 ACM CPS 汇刊。这些事件和出版物使得 CPS 研究团体得以不断扩展。有多学科背景年轻的 CPS 教师可以将自己定位为 CPS 研究人员且仍可满足学术评价标准。有趣的是，考虑到该领域的新颖性，年轻教师们成为行业领导者方面具有优势，因为他们不必与那些成熟领域中的众多公认的领导者竞争。

教师发展

那些在自己领域有着卓越成就并且在取得终身职位后投入到这个更具有交叉性领域的教师们，对现有的 CPS 教育和研究贡献很大。在将来，委员会希望新的初级教员能发展成为 CPS 教育工作者。鉴于本调研报告所涉及的方面已非常广，委员会并未对 CPS 博士项目的发展进行深度探究。比如，委员会并未考虑，博士生必需的许多培训在多大程度上可以被硕士级别的课程教育内容所覆盖。然而随着时间的推移，如果对教员和研究资助机会的需求程度能持久保持，那么研究机构期望建立 CPS 的博士项目也将变得理所当然。此外，如果 CPS 也遵循其他工程学科的模式，那么博士级工程师将成为工业界重要的技术领导者，更多博士将投身工业界，而非继续追求学术生涯，从而进一步促进对 CPS 博士计划的需求。

虽然新的专业 CPS 教员数量在不断增加，教学模块的使用仍可能有助于减轻教育工作者时间和资源上的一些限制。委员会设想，擅长多个 CPS 学科的教员可以设计和共同教授新课程或构建课程模块，这样给学生联合讲授复合的素材。这种联合教学的机会将使联合教学的教员发展成为日益精通 CPS 的教育工作者。美国工程教育家协会等专业组织可以帮助促进 CPS 创新教学的发展，开展会议追踪来促进关于 CPS 教育最佳实践的信息交流。

行业专家可以在客座讲师、兼职和访问教员等方面为 CPS 项目的发展作出

贡献。一个领域的专家与其他领域的专家合作教授模块化课程时，跨学科教学的机会就产生了。

大学、工业界和国家实验室务必要对优秀的 CPS 计划导师给与肯定和奖励。例如，一些基于项目的课程让学生去解决那些涉及真实物理系统的、需要集成安全保密方案的、定义明确的问题，此类课程意义重大。学生们将面临的挑战是如何设计和开发行之有效的解决方案。此外，本科生的以 CPS 为中心的研究经历，以及工业界和国家实验室的暑期实习项目，将进一步促进本科 CPS 学科的发展。当学生选择接受 CPS 教育时，需要有优秀的导师鼓励学生去探究 CPS 工程，并用职业发展机会激励他们。离开了这些优秀的导师，此类课程的成功无从谈起。

调研结果 4.3: 由于 CPS 是一个结合了多学科的新兴领域，并非所有的院校都具有足够的相应师资实力以教授 CPS 学位项目所需的所有课程。

建议 4.3: 美国国家科学基金会 (National Science Foundation) 应当通过提供教学拨款及奖学金来支持 CPS 师资力量的发展。

课程发展与资源

第三章列出了本科阶段从概论课程到完整的学位课程的一些选项。这些选项的共性，一是需要新的或重新设计的课程来讲授 CPS 的复杂性，一是动手操作的机会必不可少，它是巩固重要概念和整合所学知识的关键。

为了支持新的教育课程，大学通常需要合适的资源，包括新的教材、实验平台和实验室空间。但现有的用来支持 CPS 的教材、课程材料和实验室设施数量有限。

教材对于教授精心设计的概论课程至关重要，但很少有教材提供 CPS 的完整概述。在此期间出版的几本教材让委员会备受鼓舞。Edward Lee 和 Sanjit Seshia 在加利福尼亚大学伯克利分校开展导论课程时，由于根本找不到满足他们需求的教材，于是编写了一本新的教材 *Introduction to Embedded Systems: A*

*Cyber-Physical Systems Approach*²。Rajeev Alur 于 2015 年出版了另一本教材 *Principles of Cyber-Physical Systems*³。

用于标准工程课程（如控制或信号处理）的传统课程教材可能并未完全包含物理系统对信息技术的影响，反之亦然。正如 CPS 课程将需要大幅重新设计，其教材亦是如此，它们有时可以通过在现有材料上补充 CPS 资料、习题和实验项目来完成。

此外，CPS 很复杂，学生需要充分理解物理环境是如何影响系统的。真实模型可以提供一些这方面的知识，但动手参与通过项目来学习对于理解 CPS 复杂性是不可或缺的，而且参与复杂的跨学科项目有助于开发系统思维。能否为学生提供这样的机会取决于是否有合适的设备。

一种选择是构建实验室，学生可以与多学科团队合作共同开展综合 CPS 项目；另一种选择是为学生提供支持物理与计算组件协同设计的实验平台，以此来证实将仿真与实验相结合的优势。对于学生来说，接触实验平台很重要，它们是工业实践的关键要素。工业实验平台的一个典型例子是硬件在环仿真，它结合仿真和物理设备（如果可能的话）来降低实验成本和复杂性，同时提高物理组件的灵活性，而仿真则无法提供足够的保真度。然而，实验平台的创建和维护费用很高，许多大学没有或不会分配资源来创建这样的实验平台。院校之间以及与工业界的合作有助于共同分担成本、利用现有资源并确保实验平台反映行业实践前沿状况。

调研结果 4.4 如果要教授新的 CPS 课程或创建 CPS 计划，大学需要分配时间和资源来开发 CPS 课程资料，并提供必要的实验室空间和设备（包括虚拟实验平台和物理实验平台）。

调研结果 4.5 需要建设实验平台来为学生提供足够实际的应用和问题。既可以是虚拟平台，也可以是物理平台。这些实验平台应能支持远程访问和多

² E.A. Lee. and S.A. Seshia, 2015, Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition, <http://LeeSeshia.org>.

³ R. Alur, 2015, Principles of Cyber-Physical Systems, MIT Press, Cambridge, Mass.

院校共享，并支持院校与业界合作开发和运维。

建议 4.4 美国国家科学基金会、专业学会和大学应当支持 CPS 教材、课程模块（包括实验模块）和实验平台的开发和演进，并与工业界协同开发和维护实验平台。

促进 CPS 学科和教育的发展

正如上面讨论的，在提升学生对 CPS 就业机会的认识方面，我们仍大有可为。在工业界，虽然对 CPS 技能需求的意识越来越高，但关于有效构建 CPS 所需的全套技能尚未达成共识。

对 CPS 研究的持续支持允许学生把他们研究生时期的研究重点放在 CPS 上，这转而会产生能建立和讲授这门学科的下一代初级教员。同时，对 CPS 的研究也会产生会议和期刊论文、创造新想法和派生新公司。所有这些科研经费的副产品有助于将 CPS 定义为一门公认的学科，并引起技术社区的重视。随着 CPS 专业和学位课程的出现以及 CPS 工程师对工业的重大贡献，CPS 将越来越受到重视。

CPS 领域内的人员可以通过接触工业界、准备材料和参加研讨会来拓宽对 CPS 的认识，包括 CPS 是什么（和 CPS 不是什么）、CPS 的复杂本质、雇用受过 CPS 正式教育的人能获得什么。这样的教育可能是被动的（例如网上的材料），也可能是主动的（比如通过研讨会或研讨班）。

在大学，推动 CPS 教育一般是自下而上发生，即教员将 CPS 资料纳入课程并开发 CPS 课程。然而，正如任何新兴的交叉学科领域，这些主动性要想扎根，来自大学领导者和管理者鼓励和支持是至关重要的。许多大学行政部门已经在推动与 CPS 密切关联的教学和研究，例如强调有直接社会影响的工程应用的课程、面向跨部门团队合作和复杂真实系统的工程项目。另外，大学行政部门还可以提供必要的人员、实验室空间和启动资金来支持新兴或已在计划中的 CPS 教育。