

Autodesk认证Revit讲师11年建筑设计院一线工作经验的总结

本书配套教学视频及其他教学资源获取方式见前言中的说明

基于BIM的Revit 建筑与结构设计案例实战

赠送18小时高清同步配套教学视频

✓ 134个操作技巧与绘图心得

✓ 教学PPT + QQ群答疑服务

卫涛 李容 刘依莲 主编

李清清 夏培 刘帆 汪曙光 姚驰 编著



清华大学出版社

应用信息物理系统

Applied Cyber - Physical Systems

桑·C. 徐 (Sang C. Suh)

[美] U. 约翰·塔尼克 (U. John Tanik)

约翰·N. 卡蓬 (John N. Carbone)

编著

阿卜杜拉·埃尔奥卢 (Abdullah Eroglu)

牛文生 译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书主要对信息物理系统的架构、信息物理系统的安全和隐私、信息物理系统的应用和设计方法、信息物理系统的工具和组件等方面进行了研究,目的是让读者深刻理解国际设计与过程科学学会研究人员在信息物理系统领域进行的变革性的和跨学科研究,并提供信息物理系统领域的尖端方法和技术。同时,本书将为实际工作中信息物理系统所面临的一些紧迫问题提供方法和解决方案。

本书主要面对计算和工程领域的研究者,也将有助于课程开发人员在该领域的课程开发。它将为研究生和大学的研究以及在该领域的教育计划奠定基础。

图书在版编目(CIP)数据

应用信息物理系统 / (美) 桑·C.徐 (Sang C. Suh)
等编著; 牛文生译. -- 北京: 航空工业出版社,
2017. 1

书名原文: Applied Cyber-Physical Systems
ISBN 978 - 7 - 5165 - 1155 - 8

I. ①应… II. ①桑… ②牛… III. ①控制系统—研
究 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 316219 号

北京市版权局著作权合同登记
图字: 01 - 2015 - 1638

Translation from English language edition:

Applied Cyber-Physical Systems

by Sang C. Suh, U. John Tanik, John N. Carbone and Abdullah Eroglu

Copyright © 2014 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

应用信息物理系统
Yingyong Xinxi Wuli Xitong

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017 年 1 月第 1 版

2017 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 14.5

字数: 337 千字

印数: 1—3000

定价: 48.00 元

序

信息物理系统是将计算系统与物理组件相融合的系统。这些系统包括航空航天系统，指挥、控制系统，制造系统，过程控制系统，机器人系统，通信系统，电网系统和生物医学系统等各式各样的系统。信息物理系统几乎已经渗透到每个工程领域，包括化工、电气、石油、电力、机械、土木、生物医学和航空航天工程。直到最近，赛博（信息物理系统一词中的 Cyber，在本书中将直译为赛博）组件和物理组件还没有实现无缝融合。由于计算已经普遍地存在于我们生活的各个方面，因此迫切需要将它们融合起来。此外，云计算和服务计算模型的出现对信息物理系统的发展起到了很大的促进作用。目前，大型工业自动化系统正借助云计算进行大规模并行计算。

多种计算技术必须一起工作，才能建立有效的信息物理系统。信息物理系统的核心是嵌入式处理器。目前，物理系统都集成了许多微处理器，如我们的家和车。这些微处理器需要特殊类型的网络和数据管理协议。例如，数据管理系统需要在配置高速缓存的主内存中运行，因此需要新颖的查询和存储能力。其次，无线计算设备和智能手机与物理组件紧密融合，对数据管理提出了新的挑战。云计算和面向服务的模型需要虚拟化和资源利用的新技术。

最后，但同样重要的是，安全和隐私是信息物理系统需要考虑的主要因素。我们听说过被动适应的恶意软件攻击我们的关键基础设施，如电网和智能仪表，有时一天几次。这些强大的恶意软件可以迅速改变它们的模式，包括它们的行为。因此，目前的杀毒产品不能检测到这样的恶意软件。我们需要的解决方案不仅要检测到这样的恶意软件，而且要从这样的恶意软件攻击中恢复，使任务能按时完成。人们正在探索研究强大的机器学习技术，通过学习对手的行为，使我们能够开发有效的解决方案来挫败对手。

此外，需要通过适当的控制来防止这种攻击。最后，我们需要保护个人隐私的解决方案。例如，通过接入到信息物理系统的智能手机，我们可以找到私人信息，如个人的位置。我们需要用于信息物理系统的隐私保护技术。该解决方案包括新的密码协议、安全隐私增强无线网络和数据管理技术。

目前，除了正在进行的国家科学基金会和国防部的研究项目，为了促进和推动信息物理系统的研究，我们需要与正在开发物理组件的行业（如国防、汽车和航空航天业）更紧密的结合。因此，我们需要与政府、工业界和学术界建立牢固的伙伴关系，发展信息物理系统的高度创新和有效的解决方案。

虽然有各种各样有关信息物理系统的论文和书籍，但这是第一本全面概述信息物理系统发展成就的书。本书包括信息物理系统的架构、模型和基础设施、信息物理系

统的安全和隐私、信息物理系统的应用和设计方法、信息物理系统的工具和组件。这些高层次的论文不仅将推动对该领域的研究，而且将为实际工作中信息物理系统所面临的一些紧迫问题提供方法和解决方案。本书也将有助于课程开发人员在该领域的课程开发。它将为研究生和大学的研究以及在该领域的教育计划奠定基础。最后，它将对日益重要的信息物理系统的信息处理领域有很大的帮助。

由于迫切需要安全地将系统的信息和物理组件融合在一起，这本书将成为在计算和工程领域工作的人们必读之作。

美国得克萨斯州达拉斯
得克萨斯大学达拉斯分校埃里克约翰逊计算机科学与工程学院
网络安全研究和教育中心执行董事，计算机科学系杰出教授
伯瓦尼·杜莱辛甘 (Bhavani Thuraisingham) 博士
路易斯·A. 小比切尔 (Louis A. Beecherl Jr.)
e-mail: bhavani.thuraisingham @ utdallas.edu
<http://www.utdallas.edu/~bxt043000/>

前 言

本书为国际设计与过程科学学会 (SDPS) 主题系列图书的第二本书, 第一本是《生物医学工程: 医疗保健系统, 技术和技巧》。本书题为《应用信息物理系统》, 是由杰出编辑约翰·N. 卡蓬 (John N. Carbone) 博士, U. 约翰·塔尼克 (U. John Tanik) 博士和阿卜杜拉·埃尔奥卢 (Abdullah Eroglu) 博士编写。每位编辑在信息物理系统都具有某一方面专业知识。此外, 他们得到该领域的两名高级专家——国际网络安全专家伯瓦尼·杜莱辛甘 (Bhavani Thuraisingham) 博士和国际信息物理系统早期应用专家贝尔恩德·克莱默 (Bernd Kramer) 博士的支持。

总体来说, SDPS 主题系列图书的出版实际上是由诺贝尔奖得主, 已故的赫伯特·西蒙 (Herbert Simon) 在 SDPS 2000 主题演讲中为我们定义的: “我们已经很清楚地认识到, 在当代科学和工程中所尝试处理的许多系统都是非常复杂的。它们是如此的复杂, 以至于我们不能明显地认识到, 在现代科学与工程的发展过程中形成, 并为我们服务了四个世纪或更长时间的那些强有力的技巧和程序, 将使我们能够理解和处理它们。我们深深地认识到, 我们需要一个专门针对复杂系统的科学, 我们已经开始构建它……。”

自 1995 年以来, 国际设计与过程科学学会在保持其会员学科完整性的同时, 一直在构建有关复杂系统的设计和过程问题的科学基础。因此, 我们推介采用单一学科的解决方案无法解决的复杂问题的图书。由于我们的成员来自不同的学科, 从数学到医学, 所以我们不给系列图书提出任何学科界限。例如, 我们的 2010 年变革成就奖获得者史蒂文·温伯格 (Steven Weinberg) 博士是诺贝尔物理学奖得主, 而 SDPS 2000 此奖项的第一个获得者是已故诺贝尔经济学奖得主赫伯特·西蒙。另一方面, SDPS 2011 变革成就奖授予了来自伯克利的计算机科学家、模糊集开发者罗特夫·扎德 (Lotfi Zadeh) 博士和杰出工程师、韩国科学技术院 (KAIST) 研究中心主席、公理设计理论开发者南·徐 (Nam Suh) 博士, 而 SDPS 2012 变革成就奖授予了哈佛大学的艾德华·O. 威尔森 (Edward O. Wilson) 博士和得克萨斯大学达拉斯分校的伯瓦尼·杜莱辛甘博士。

与 SDPS 的目标和愿景一样, 作为系列丛书的第二本书, 本书的目的是提供信息物理系统领域的尖端方法和技术。信息物理系统的概念构成了未来信息物理社会的支柱, 其中不仅包含了赛博和物理空间, 还包含了人类 (生理、心理空间)、知识、社会和文化。信息物理系统通过嵌入式硬件和计算机监视和控制物理系统, 集成了计算和通信能力。

撰写本书的目的是, 让读者深刻理解 SDPS 研究人员在信息物理系统领域进行的

变革性的和跨学科研究。信息物理系统面临的一个主要挑战是，在部署任何一个应用时缺乏能够集成嵌入式系统领域所有的近期取得的和预期在未来可能取得的进展的统一的框架来，以保持对系统之系统（SOS）部署的智能控制。这本书将通过提供各种不同种类的应用实例来解决这些问题。

我们祝贺杰出编辑们的出色工作，他们汇集了信息物理系统领域中如此多样化的专业知识。

SDPS 系列图书编辑

桑·C. 徐博士

穆拉特·塔尼克博士

本书研究的是我们都要面对的、即将到来的在 21 世纪及以后迅速发展的信息物理系统（CPS）冲击所带来的短期、中期和长期挑战。论文的重点是提供全球工业界和学术界领域专家的意见。这些论文被分成几组，帮助读者深入了解改善教育需要的重要背景信息、新概念、方法和解决方案，以及帮助我们改变思考和认知问题的方式，并获得最终解决方案的理念。在邀请主题专家提供见解上，我们特别考虑到了不同的主题，重点放在讨论信息物理系统相关设计、实现和可靠性的实际研究和解决方案的论文上。

没有来自全球不同领域作者的参与，这本书不可能完成。SDPS 会议起到了举足轻重的作用，它提供了 CPS 主题多样性思想并为本书提供了大量令人叹服的会议论文。我们希望这本书能够为这一领域持续研究提供实用性和推动作用，我们期待你的想法和观点。

桑·C. 徐

U. 约翰·塔尼克

约翰·N. 卡蓬

阿卜杜拉·埃尔奥卢

目 录

第 1 章	信息物理系统的演化:简要回顾	(1)
	贝尔恩德·J. 克莱默(Bernd J. Krämer)	
第 2 章	信息物理基础设施安全的跨学科方法需求	(4)
	吉姆·布罗迪·布拉泽尔(Jim Brodie Brazell)	
第 3 章	一种用于中学生和大学生信息物理系统教育的地区性方法和跨学科 方法	(14)
	克利夫·青特格拉夫(Cliff Zintgraff),卡罗琳·威尔逊·格林 (Carolyn Wilson Green),约翰·N. 卡蓬(John N. Carbone)	
第 4 章	信息物理系统和 STEM 的发展:NASA 数字航天员项目	(31)
	U. 约翰·塔尼克(U. John Tanik),西雷·阿尔昆·柯卡德 (Selay Arkun - Kocadere)	
第 5 章	从根本上简化网络安全	(46)
	丹·克鲁格(Dan Kruger),约翰·N. 卡蓬(John N. Carbone)	
第 6 章	用于动态、实时“需知”授权的信息物理系统架构	(56)
	詹姆斯·A. 克劳德(James A. Crowder),约翰·N. 卡蓬(John N. Carbone)	
第 7 章	信息物理系统安全性	(66)
	穆德·E. 卡里姆(Md E. Karim),弗·V. 菲哈(Vir V. Phoha)	
第 8 章	信息物理系统中的公理设计理论	(75)
	坚吉兹·托盖(Cengiz Togay)	
第 9 章	信息物理系统通信(沟通、交流)中粒度的重要性	(90)
	茱莉亚·M. 泰勒(Julia M. Taylor)	

第 10 章	信息物理智能化中的焦点、突显和启动	(100)
	维克托·拉斯金(Victor Raskin)	
第 11 章	信息物理系统设计自动化中的适应性信息物理系统框架	(113)
	U. 约翰·塔尼克(U. John Tanik), 安吉利·贝格利(Angelyn Begley)	
第 12 章	信息物理生态系统:信息物理环境中以应用为中心的软件生态 系统	(126)
	大卫·E. 罗宾斯(David E. Robbins), 穆拉特·M. 塔尼克(Murat M. Tanik)	
第 13 章	用于预估和改进患者医疗保健质量的医院信用评分的风险评估和 管理	(133)
	穆罕默德·沙欣(Mehmet Sahinoglu), 肯尼斯·沃勒(Kenneth Wool)	
第 14 章	会话发起协议在多媒体通信中的应用:基于软件分析的服务器性能 评估	(150)
	曼苏尔·H. 安萨夫(Mansour H. Assaf), 玛昆达·威廉姆斯 (Maquada Williams), 桑尼尔·R. 达斯(Sunil R. Das), 萨登拉·N. 比斯瓦斯(Satyendra N. Biswas), 斯格特·莫顿(Scott Morton)	
第 15 章	主动状态控制原理:影响分析	(164)
	伊戈尔·恰加耶夫(Igor Schagayev), 约翰·N. 卡蓬(John N. Carbone)	
第 16 章	用于医疗保健的远距离无线数据采集传感器系统	(185)
	阿卜杜拉·埃尔奥卢(Abdullah Eroglu)	
第 17 章	射频识别装置系统的性能改进	(202)
	阿卜杜拉·埃尔奥卢(Abdullah Eroglu)	
第 18 章	用嵌入式系统的思维设计信息物理系统:可能吗?	(213)
	德尼兹·科卡克(Deniz Kocak)	

第1章 信息物理系统的演化：简要回顾

贝尔恩德·J. 克莱默 (Bernd J. Krämer^①)

“信息物理系统 (CPS)” 这个术语听起来感觉是一个全新的时髦术语，因为其越来越多地成为很多会议的主题，越来越多地出现在期刊文章、图书中。从语源学方面来说，“cyber-” 前缀源于古希腊词 “kybernesis”，其最初的意思是控制技能。随后演化成了拉丁词汇 “gubernare”，最后演化成了英语词汇 “govern”，即控制。这意味着我们在本书中所提到的系统，是指物理对象与计算机资源高度集成的系统，且物理对象与计算机资源之间可以不断进行协调。

斯提帕诺维茨 (Sztipanovits) 将信息物理系统研究定义为 “一门新的物理、生物、工程和信息科学的交叉学科”。在这一广义定义中，康拉德·祖斯 (Konrad Zuse) 成为了信息物理系统的先驱。为什么这样说？在 1941 年发明 Z3 (第一个具有完整功能的程序可控制的计算机) 不长时间，他开发了一个用于飞机机翼测量的专门装置。祖斯后来称这个装置为第一台实时计算机。这台自动计算机读取大约 40 个传感器的数值，进行模拟/数字转换器的工作，并在一个程序中将数值作为变量处理。从以上所述我们可以得出结论，实时能力、反应能力、控制工程、软件以及物理资源都是信息物理系统原本就涉及到的内容。

1948 年，诺伯特·维纳 (Norbert Wiener) 在他的《控制论：动物与机器的控制与通信》一书中提出一个新的术语，详细地阐述了人与机器的反馈概念，包括在技术方面、生物学方面以及社会系统学方面的反馈机制。1961 年，该书发布了第二版，并展示了维纳长远的眼光，因为他新增了两章有关 “学习与自我复制机器以及脑电波与自组织系统” 的内容，这些内容现在仍然是研究界流行的主题。比如：外太空探索或纳米技术中的自我复制；生物产生仿生学的多因子模型中的自组织，或 2012 年在柏林的国际设计与过程科学学会 (SDPS) 会议上，拉斐尔·安德拉 (Raffaello d'Andrea) 在其主题演讲要点中演示的分布式飞行区。远在 SDPS 确定其跨学科研究与教育使命之前就确定了，20 世纪 50 年代的控制论会议一直坚持不同学科的代表比例要均衡，这些学科包括数学、社会学、生理学及其他更多的学科。

克劳斯·帕斯 (Claus Pias) 很好地阐述了如今的 Cyber 一词的复兴，他说：“如

① Bernd J. Krämer

Scientific Academy for Service Technology, Hagen, Germany

e-mail: Kraemer@servtech.info

今这些对赛博的态度就好比过去对时髦外衣，刚开始穿时都感到不好意思（言外之意，后来无所谓了）。用“不好意思”一词来形容是不恰当的，因为我们现在所发现的远比 50 年前先进。我们建立起一个丰富的，有关实时系统和嵌入式系统的工程技术和知识；我们拥有一个从基于软件服务网页的信息网络、演化到人员与机构网络的万维网。我们发现了一些先进传感器和传动装置技术，我们创造了大量有关算法和软件工程的知识。体验现代信息物理系统研究好处的机会大大增加了；我们认为在不久的将来，通过遥控机器人进行外科手术将变为现实。物联网受到大量研究工作和资金的影响。汽车制造商开始在高档汽车中嵌入车辆防撞系统；建造低能耗建筑以及实现智能电网无缝集成可再生能源是一项很重要的政治任务，或者说是公共关注的问题。欧盟正在投入大量的资金用于智能工厂的研究和开发。比如，在 SDPS 2012 期间，欧洲的 IMAGINE 项目举办了一个动态制造网络端到端管理的研讨会，提出了该项目实现复杂动态制造网络有效配置（或重新配置）和管理的方法。

通过接下来的特点介绍，将使我们和信息物理系统的定义更加清晰：提到的很多应用领域本身是分布式的，且都配备有线或无线通信设施。组件绝大部分都是自制的，且需要协调和控制。用于动态和预期交通安全、工厂和过程控制或医疗等关键领域的信息物理系统必须是高可信的系统在可靠性、可用性、安全性和保密性方面具有很高的要求。

当然，欧洲委员会并不是唯一一个寄希望于下一代信息物理系统的机构。美国国家科学基金（NSF）从 2006 年开始支持这类的研究。它资助诸如基于传感的自主系统、分布式机器人、自主运输工具（包括陆上与空中）及用于生活辅助的环境设施。2010 年 12 月，受总统科技顾问委员会报告中关于设计一个数字化未来的建议的鼓舞，NSF 很快启动了一个新的信息物理系统项目。在 2010 年中期到 2012 年 1 月期间，德国教育与研究部以及德国工业部门设立了开发“综合信息物理系统研究日程”的合作研究项目，该联盟包括德国的主要工业部门和研究机构，研究了发展信息物理系统在技术、投资、经济、政治和社会方面的挑战，以及来自技术发展趋势的影响。

除对不同应用领域的更深入研究外，对信息物理系统的新的研究也需要新的跨学科的工程方法。比如针对我们所谈到的混合系统，它包括了电子、机械、软件、其他技术组件，因此集成系统建模的新方法、相关的设计理论及设计、分析及仿真工具都是不可缺少的。然而，信息物理系统不是自成一体、孤立的技术元件的组合物，通常是被嵌入到了社会环境中形成了一个社会技术系统。在这样的系统中，人们被嵌入到复杂的组织结构中，并与复杂的基础设施相互作用，以执行其工作程序。对人为因素的整体分析（包括交互界面的可用性和功能，本能的机器操作、人机的无缝交互）在避免错误的系统行为中是最重要的因素。

需要针对不同教育水平开设相关知识领域的新课程。国际设计与过程科学学会开辟了跨学科工程教育，但是信息物理系统仍需做更多工作，特别是实际应用领域中人机界面交互方式的设计，与信息物理系统的无缝嵌入应用领域等方面发展的新设计方法学科。我们也需要理解并指导如何在信息物理系统中将自适应性和环境的感知融为

一体。

本书作者对上述问题做了详细介绍，具有很高的科学和实践能力。他们站在一个新的立场，使我们对这充满挑战领域中的很多未知方面有了进一步的了解。非常感谢这本书的编者，他们努力地了解这一技术领域，将本书分成了合理的章节，并且为每一章节找到了杰出的作者来编写。

参考文献^①

- [1] Sztipanovits, Janos (2007). 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer - Based Systems (ECBS'07), pp. 3 - 6, IEEE Computer Society.
- [2] Pias, Claus (Ed., 2003): Die Macy - Konferenzen (the Macy Conferences) 1946 - 1953. Berlin: Diaphenes (in German).
- [3] Pias, Claus (2003): Zeit der Kybernetik - eine Einstimmung (Time of Cybernetics—To Get Attuned). In [2], pp. 9 - 14 (in German).
- [4] Geisberger, Eva, Broy, Manfred (Eds., 2012): agendaCPS—Integrierte Forschungsagenda Cyber - Physical Systems (in German), Springer, series acatech Studie.

① 本书所有参考文献均按原版书排版，内容不进行修改。——译者注

第2章 信息物理基础设施安全的跨学科方法需求

吉姆·布罗迪·布拉泽尔 (Jim Brodie Brazell^①)

2.1 引言

尽管信息物理系统是21世纪经济、民用和民主发展的平台和引擎，但也是战争、恐怖主义、犯罪等方面的一个新领域。赛博空间的保护与持续增长对于社会文明进步必不可少，也是人类追求的最崇高的目标。同时在过去的十年里，利用信息物理系统能够威胁日常生活的安全及私密性这一事实已经广为人知。

对赛博的开发利用可以导致信息被窃取、隐私泄露、服务中断，甚至通过赛博空间对自然世界产生物理影响。赛博攻击不只局限于赛博空间领域，它同时也可以阻止、监视或破坏机器、电机等物理实体以及计算机控制的物理过程，对持续的经济增长和发展带来消极影响。

2011年3月11日，《纽约时报》报道了研究人员能够对汽车实施远程攻击，通过在汽车内部的嵌入通信系统控制汽车的关键系统。如今很多汽车都配置了蜂窝电话连接和蓝牙无线技术，对于黑客来说，通过远程可以控制不同功能（如门锁、刹车），追踪汽车位置，窃听车内谈话内容以及监视汽车运行数据。这种黑客攻击表明，可以利用赛博空间影响赛博空间以外的物理过程。

20世纪后期，交通的设施、能源、水务以及工业系统等物理基础设施都与数字计算和网络通信集成在一起。因此，控制汽车、水过滤、石油提炼、电网，甚至消费电子产品的过程已经从机械和模拟系统变为类似机器人并集成数字通信和控制系统的系统。

嵌入式系统中的计算和连接物理过程和数字控制的大量分布式计算应用被统称为信息物理系统。信息物理系统由传统系统（如，监视控制与数据采集（SCADA）），以及新出现的被视作第四代计算机（信息物理系统和基础设施）的大规模分布式智能系统组成。由于计算机和网络暴露在攻击下，现代“信息物理”系统与传统“信息物理”系统都非常脆弱。

^① Jim Brodie Brazell

Ventureramp, Inc, 9515 S. Saddle Trail, San Antonio, TX 78255, USA

e-mail: Jimbrazell@ventureramp.com

大部分的传统信息物理系统都没有设计保密功能。近来出现的安全漏洞包括“超级工厂”（Stuxnet）病毒和沙蒙（Sharmoon）病毒，“超级工厂”病毒破坏了伊朗浓缩铀处理过程中的西门子可编程逻辑控制器。沙蒙病毒攻击了沙特阿拉伯的 Aramco 国家石油公司和卡塔尔 RasGas 天然气公司，使得 30000 台计算机无法正常工作，这已经被认为是由莱昂·帕内塔（Leon Panetta）所标识的迄今为止对私营部门最具破坏性的网络攻击^[2]。

尽管沙蒙病毒没有像“超级工厂”病毒那样攻击物理控制的系统，这款恶意软件在成功破坏管理阿拉伯石油领域的计算机系统后，下一步的目标就是破坏信息物理系统。例如，赛博间谍已渗透到了美国的电网中，驻留了可以破坏电网或使电网中断的软件工具，美国国家安全的证据表明间谍可能来自中国、俄罗斯和其他国家^[3]。

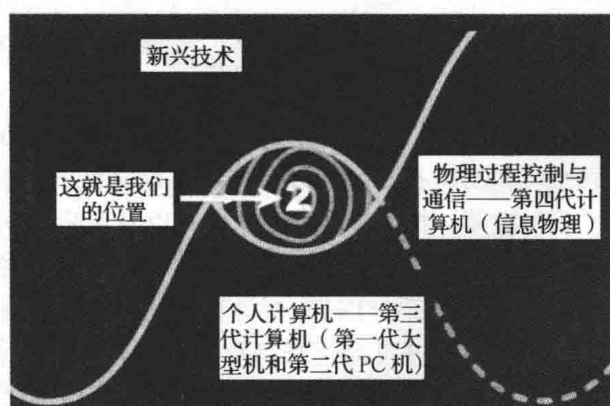


图 2-1 新兴技术：第四代计算机

信息物理系统是一个跨学科的工程设计过程——集电子、软件、计算机与电机控制于一体的机电一体化学科的产物。因此，信息物理系统和跨学科设计对于集成度日益增长、应用日益普及的系统的安全性非常重要。跨学科研究通常是对多个学科交叉部分进行研究，通过过程和设计的科学化来促进技术系统、组织系统和社会系统的转化和进步。

2.2 信息物理系统概念

21 世纪，提供基本生活服务的基础设施已经被信息物理系统控制，且依赖于信息物理控制系统。商业、军队、政府以及民间团体也依赖于联网运行的计算机和远程控制的物理过程（信息物理基础设施）的完整性和柔韧性。

美国行政令 13010 将“基础设施”定义为相互依赖的网络和系统构架，包含了可识别的行业、机构（包括人和程序），以及可靠的产品和服务的物流分发能力，对美国的国防和经济安全、各级政府乃至整个社会履行职能必不可少的能力^[4]。

私营部门拥有并经营着约 85% 的对国家实体和经济的安全至关重要的基础设施和资源^[5]。信息物理系统处于民营公司及国有基础设施设计、制造、安装和运行的核心位置，然而这些系统很容易受到网络攻击。这些信息物理的基础设施包括物理上集中的工厂（如制造和处理工厂），物理上分布的基础设施（如电网和管线），还有消耗和运输这些工厂和基础设施的产出物的运载工具（如卡车、飞机、轮船）。

定义——信息物理系统利用信息技术（计算机、软件和网络）来管理指导物理系统及过程的通信和控制（反之亦然）。信息物理系统包括传统的模拟系统与数字系统，比如监视控制与数据采集、机器到机器（M2M）的计算、工业控制，总的来说就是指所有利用自动控制技术的嵌入式系统。

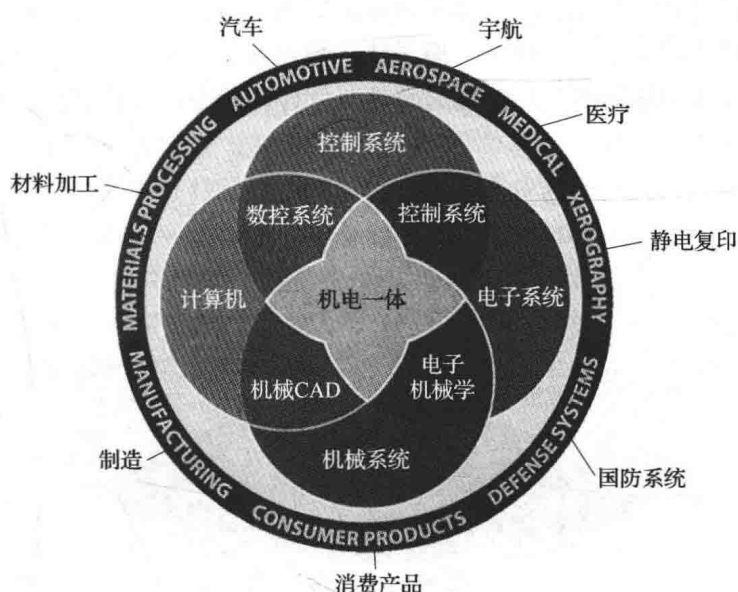
信息物理系统的使用案例很多，比如跨耳蜗移植、心脏起搏器的去颤器、汽车防抱死制动系统、天然气管道阀门的计算机控制系统、武器的计算机控制系统、制造厂与炼油厂的计算机控制系统、大坝上用来控制泵的计算机系统以及吊桥电机控制系统。信息物理系统的应用已经迅速扩展到了公共领域和私人领域。

信息物理系统包括了家用电器，甚至包括通过远程连接家庭自动化系统或汽车的数字移动电话。信息物理系统在功能不断增强以及成本不断降低的情况下逐渐向前发展，同时也出现了一些新的管理政策、技术标准、商业模式以及风险。据特萨定律（Tesar's Law）估计，紧密耦合的信息与物理系统（智能作动器）的性能价格比在过去的 20 年里增长了 8 倍，这与摩尔定律（Moore's Law）对计算机处理器的估测一致^[6]。信息物理系统的性能指标反映了工业部门通过自动化获得更好的经济效益。在“大萧条时期”，许多公司增加了在自动化方面的投入，从而开启了一个新的以信息物理控制系统（它们对于自身提供的很多服务都是透明的）的普及为特征的自动化时代。

在过去，工业控制、物理安全、网络安全、环境控制、消费产品、汽车、重型设备、国防系统作为各自独立且截然不同的行业和市场存在，具有相对独特的基础设施和技术体系。

今天，由于人们事实上已经接受了标准化的模块化硬件和软件以及在很多系统中采用因特网协议作为基本的通信方法，信息物理系统在安全和技术构架方面的基础技术正逐步统一。但是，传统的信息物理系统以及后来新出现的系统的设计都没有将安全性考虑进去，很多连接开放式网络系统及过程（如互联网）的信息物理过程也未曾将安全考虑进去。信息物理控制系统的普及性以及其作为基础设施的核心的固有特性，我们有必要转变对这些系统的认识，也就是从对物理方面的安全问题关注向对以系统设计和过程为中心的关注转移。

信息物理系统的设计以控制理论（20 世纪 50 年代由麻省理工学院的诺伯特·维纳提出）为基础；1969 年，日本安川（Yaskawa）运动控制公司的高级工程师哲朗一（Tetsuro Mori）推动了机电一体化设计的实践；1995 年，C. V. 拉玛莫斯（C. V. Ramamoorthy）博士、雷蒙德·叶（Raymond Yeh）、穆拉特·塔尼克（Murat Tanik）博士、乔治·科兹莫斯基（George Kozmetsky）（1917—2003）及来自国际设计与过程科学学会的其他博士提出了设计与过程学（见图 2-2）。

图 2-2 美国 Rensselaer 理工研究所机电一体化模型^[7]

作为一个研究领域，信息物理系统设计和持续性跨越了很多行业、技术领域以及教育领域。例如，工程设计和制造安装、操作、维护取决于传统上与“机电学”相关的机械、电子学、计算机、软件领域的融合。信息物理系统扩大了自动化范围，可以在同等劳动力效率情况下全时段减少劳动力投入，且只需要“技能提升的”设备操作员、技工、工程师以及具有多学科、多技能和跨学科知识的科学家^[8~10]。这种跨学科能力需求构成了下一代科学、技术、工程和数学（STEM）劳动力的核心。

跨学科性植根于设计和过程学。不仅作为一门学科，在解决没有现成答案的非结构化问题方面，跨学科代表了知识与人类能力的融合。融合必要的资源与人类技能对设计和创造未来是有效的。

例如，现在还缺乏有关信息物理系统和安全性的队伍与学术教育项目。机械工程项目通常在大学里进行，没有更多地考虑数字通信与控制理论，大部分机械系统比如汽车、火车、飞机、卫星、火箭、洗涤设备、衣服烘干机、自动洗碗机、洒水系统，甚至很多玩具现在已经集成了数字通信、机械系统与过程控制。这些系统的设计在安全性上没有优势，也没有考虑到实际上所有的机械现在都是全球通信网络的有效延伸。

跨学科研究有助于开发安全的固态芯片和部件，以满足商用和军用标准。可以定义网络安全部件（类似于今天计算机中央处理器（CPU）所使用的 ID 方法）的新标准^[11]。我们现在设计所有的设备和装备时，一开始就要考虑它们和网络的相互作用、从部件级到系统级的安全性。

信息物理基础设施的持续性需要一个更广的针对诸如人-机合作类应用的系统设计和过程科学的方法。从学术的角度来看，信息物理系统安全性涉及社会科学、汇聚

科学、工程、信息技术以及生命科学等领域的学科。从系统的角度来看,信息物理系统趋向于在集成人类、生物、化学、原子能、超声波、声波、重力、磁性、光学、射频、电磁、X 射线领域的研究与应用的硬件与软件设计中统一信息、通信、密码学理论^[2] (见图 2-3)。



图 2-3 美国国家科学基金会：改变社会“结构”，构建新结构^[13]

关键基础设施方面对信息物理控制系统依赖性的增加意味着,除了普通的财产保护方案以外,还需要一个安全过程方法。设计一个新的针对信息物理系统的设计、制造、实现及可持续性的过程方法需要多个部门的协作。在信息物理系统安全领域中,现在未能满足的需求就是创建一个为了整体的利益,可以让多个部门有效协作与管理,同时不牺牲每个参与者的自主性的新过程。

2.3 网络物理劳动力需求

信息空间是一个平台,自“阿波罗计划”以来——几乎覆盖了商业、工程、生命科学、物理科学、社会科学职业以及版权产业(艺术产业)的所有形式,在这个平台上已经创造了美国和全球的财富。

根据美国总统科学技术顾问委员会(PCAST)报告“设计我们的数字未来”,增加“网络与信息技术(NIT)”领域各学历层次的毕业生必须作为国策重点考虑。而且,PCAST 报告指出,“所有的迹象——所有历史数据、相关数据”都表明 NIT 是美国科学和技术就业的主力,而且在对 NIT 技能的需求与技能的供给之间仍然有很大缺口^[14]。

根据劳工统计局的统计,2008—2018 年,NIT 预计占有 STEM(科学、技术、工程和数学)就业数量的 52%~58%,预计的 NIT 就业情况将产生 762700 个工作岗位,增长量比经济中所有职业平均值的 2 倍还要多^[15]。

对关键基础设施保护的新要求则表明,需要进行技术培训,对网络安全职业进行