

CCID赛迪学术丛书

信息物理系统（CPS） 测试与评价技术

Testing and Evaluation Technology of
Cyber-Physical System

黄子河 主 编
康 锐 副主编



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

CCID赛迪学术丛书

信息物理系统 (CPS) 测试与评价技术

Testing and Evaluation Technology of
Cyber-Physical System

黄子河 主 编

康 锐 副主编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

信息物理系统 (CPS) 测试与评价技术 / 黄子河主编

— 北京 : 人民邮电出版社, 2016.1

(CCID赛迪学术丛书)

ISBN 978-7-115-40779-5

I. ①信… II. ①黄… III. ①控制系统—研究 IV.
①TP271

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第252510号

内 容 提 要

本书以信息物理系统 (CPS) 的可靠性测试与评价为主线, 在论述了 CPS 的概念内涵及主要特征的基础上, 给出了 CPS 可靠性测试与评价的技术框架, 然后从 CPS 的硬件可靠性、软件可靠性、网络连通可靠性、网络性能可靠性、信息安全、弹性、脆性以及运行质量与运行风险等多个角度论述了 CPS 可靠性测试与评价方法。

本书由中国软件评测中心、北京航空航天大学可靠性与系统工程学院、浙江大学赛博协同创新中心的专家学者联合完成。本书主要内容基于作者团队最新的研究成果, 可供各类 CPS 系统进行可靠性测试与评价时使用, 也可供 CPS 结构优化、建模分析时参考。

◆ 主 编 黄子河

副 主 编 康 锐

责任编辑 杨 凌

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京昌平百善印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 17

2016 年 1 月第 1 版

字数: 367 千字

2016 年 1 月北京第 1 次印刷

定价: 88.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

本书编委会

主 编 黄子河

副主编 康 锐

编 委 艾 骏 刘法旺 李 梓 李瑞莹 李大庆

巩 潇 宋 娟 陈淥萍 陆民燕 邹意然

张癸博 杨辰轩 杨 懿 周 峰 范兆霞

武文博 林元晟 骆俊瑞 骆明珠 赵文婧

黄 宁 曾 晋 曾志国

序

信息物理系统（Cyber Physical System, CPS）是复杂分布式系统、物联网、移动互联网、大数据、云计算、工业控制等技术融合的产物。它的应用范围十分广泛，涉及航空航天、石油石化、电力、水资源调度与污水处理、公路与轨道交通、先进制造、环境监测与灾害控制、远程医疗与辅助生活、城市管理、节能建筑和国防系统等重要基础设施的建设与管理。CPS 具有不同于一般系统的独有特征，体现在信息物理高度融合、系统功能交互涌现、动态结构自主演化、内外状态深度感知、网络实时适应控制等方面。

然而，无论是何种 CPS，安全与可靠运行是对其共性的最基本要求。本书以此为切入点，构建了 CPS 可靠性测试与评价技术框架，既研究提出了 CPS 组成部分的硬件、软件和网络可靠性的测试方法，更研究探讨了作为 CPS 整体特性的弹性、脆性等行为特征的测试方法。书中内容全面、系统、深入，既有创新，又非常实用，对各类信息物理系统，特别是工业信息物理系统（Industry Cyber Physical System, ICPS）的建设和运行具有重要借鉴意义。ICPS 是推动我国制造业转型升级、创新发展的重要物质基础，更是实现《中国制造 2025》发展目标的技术保障。但是，由于我国制造业基础薄弱，工业化进程中的可靠性、安全性老问题尚未完全解决，再加上信息化发展中的可靠性、安全性新问题，使得 ICPS 的可靠性、安全性研究显得尤其重要。

相信本书的出版能吸引更多来自工业界、学术界的专家学者关注信息物理系统的安全可靠问题，为中国制造业“两化融合”发展做出更大贡献。



中国工程院院士

浙江大学工业信息物理系统协同创新中心主任

前言

随着信息技术的不断迈进，在原有的世界里逐渐构造出一个复杂的信息空间（Cyber space），它与人类业已熟悉和习惯的物理空间（Physical space）并行发展，相互耦合，随着泛在互联（Ubiquitous Interconnection）、普适计算（Ubiquitous Computing）和增强现实（Augmented Reality）等技术的发展，使得信息与物理空间的紧密结合与频繁交互成为可能，从而形成一个有机的整体——信息物理融合系统（简称信息物理系统，Cyber Physical System, CPS）。

CPS 的概念一经提出，就受到了全世界的广泛关注，成为工业发达国家产业界、学术界、工程界的研究和投资热点。在当前世界范围内掀起的新一轮工业革命中，CPS 已经成为最前沿的交叉研究领域之一，是未来智能工厂、智能电网、智能医疗、智能家居、智慧交通、智慧农业、智慧城市与智慧地球等得以实现的基础。无论是美国的“先进制造业”战略、德国的“工业 4.0”战略、英国的“高价值制造”战略、欧盟的“第八框架计划——2020 地平线计划”，还是我国的“中国制造 2025”战略，都把智能制造，特别是抢占 CPS 技术制高点作为未来一个时期的主攻方向。

可靠性技术是研究系统故障机理与规律，以及预防、控制和纠正故障的通用技术。在国外，从第二次世界大战时期提出可靠性的概念至今，经过 70 多年的发展，可靠性已发展成为一门独立的技术学科，在系统研发与运行中发挥着重要作用。但是，CPS 的出现对可靠性技术的发展提出了新的挑战。一是 CPS 的结构演化对可靠性技术的挑战。与传统的可靠性研究对象不同，CPS 的功能单元可以按照一定的“规则”和“接口”要求，随时进入或离开系统，系统的功能单元数量是时变的，系统的结构是动态配置的，系统的边界是模糊的。而现有可靠性技术对研究对象的假设基本上是功能单元独立的、系统结构配置相对不变的、系统环境界定清晰的。所以，CPS 的结构特征几乎颠覆了现有可靠性技术的所有假设条件。二是 CPS 的任务多样性对可靠性技术的挑战。CPS 的使命任务（或具体使用过程中承担的任务）往往具有多样性，甚至由于人的介入还会存在一定的不可预知性。系统的任务多样性使得系统在执行特定任务中参与的功能单元以及各功能单元的工作载荷和环境载荷都具有不确定性。而可靠性的定义是“系统在规定的条件下、规定的时间内完成规定功能的能力”，其中的“三个规定”在面对 CPS 时几乎失去任何意义。三是 CPS 故障行为复杂性带来的挑战。CPS 的运行受到“物理—事理—人理”规则的控制，功能单元之间既存在紧耦合关系，也存在松耦合关系，当系统受到外界随机或者恶意的扰动时，扰动极

有可能通过系统预定的各种规则按照内部的各种耦合关系传播开来，形成大规模的级联失效，最终造成系统瘫痪。对于融合了信息、物理、社会的 CPS 而言，对其故障传播规律的认知是 CPS 可靠性研究的重大基础理论问题。

面对上述挑战，CPS 可靠性研究必须遵循继承与创新的发展原则，在借鉴已有的可靠性技术的研究成果基础上，结合 CPS 的特点开展可靠性理论的创新和技术方法的突破，以迎接上述挑战。具体说来有以下几点。一是要认识 CPS 的故障规律。传统的可靠性理论认为产品的故障具有随机性规律，但由于 CPS 的特点，完全用随机性对其故障规律进行描述具有一定的局限性，需要综合运用随机性、确定性、模糊性和复杂性理论来描述其故障规律。二是要建立 CPS 的可靠性度量指标体系。现有的可靠性指标主要用于度量机械化、电气化和自动化系统，对于信息化系统特别是 CPS 不太适用，既要补充用于度量整个 CPS 体系的可靠性指标，还要兼容度量网络连通和信息传输的可靠性指标，更要考虑度量 CPS 动态行为的可靠性指标。这样才能构成适应信息物理社会融合系统的新的可靠性度量指标体系。三是要突破 CPS 可靠性建模与分析方法。即从对象维（硬件、软件、软硬件、网络、体系）和认识维（故障随机性、故障模糊性、故障确定性和故障复杂性）的交互耦合关系角度研究新的 CPS 可靠性建模与分析方法，为 CPS 的结构优化、运行评价提供方法支撑。四是要构建 CPS 可靠性测试与评价手段。现有的可靠性测试系统仅适用单一设备、单一系统的可靠性评价，对 CPS 的可靠性测试与评价几乎不适用。需要研究开发新的 CPS 可靠性试验平台，平台至少要具备四个方面的功能：一是测试和评价 CPS 组成单元的突发和退化故障行为；二是测试和评价 CPS 的柔性和弹性行为；三是测试和评价 CPS 的弹性和脆性行为；四是测试和评价整个 CPS 的运行质量和运行风险。总之，CPS 的可靠性问题十分复杂，需要在深入研究和广泛应用实战的基础上才能逐步解决。

本书由中国软件评测中心、北京航空航天大学可靠性与系统工程学院、浙江大学赛博协同创新中心的专家学者联合完成。鉴于 CPS 属于正在蓬勃发展的一类新型系统，本书不可能把上述 CPS 可靠性的所有问题回答清楚，经过作者团队讨论，先基于已有研究成果，撷取最急迫和最现实的 CPS 可靠性测试与评价技术展开论述，以期起到抛砖引玉的作用。全书分为 10 章，第 1 章绪论论述了 CPS 的概念特征及可靠性测评的重要性；第 2 章详细论述了 CPS 可靠性测试与评价的技术框架；第 3 章、第 4 章分别论述了 CPS 中的硬件和软件可靠性测评方法；第 5 章、第 6 章分别论述了网络连通可靠性与网络性能可靠性测评方法；第 7 章论述了 CPS 信息安全的测评方法；第 8 章、第 9 章分别论述了 CPS 弹性和脆性的测评方法；第 10 章论述了 CPS 运行质量和运行风险的测评方法。

本书可供各类 CPS 系统进行可靠性测试与评价时使用，也可供 CPS 结构优化、建模分析时参考。希望本书能够为中国制造业创新发展和两化深度融合战略贡献微薄之力。

作 者

2015 年 9 月于北京

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	CPS 概述	1
1.1.1	CPS 的概念与内涵	2
1.1.2	与 CPS 相关的典型系统	4
1.2	CPS 的主要特征	8
1.2.1	信息物理高度融合	8
1.2.2	系统功能交互涌现	8
1.2.3	系统结构动态演化	9
1.2.4	内外状态深度感知	9
1.2.5	网络实时适应控制	9
1.3	CPS 的应用领域和应用前景	10
1.4	CPS 的典型事故案例分析	12
1.4.1	轨道交通系统事故案例	12
1.4.2	工业控制系统事故案例	15
1.4.3	电力系统事故案例	15
1.5	CPS 的测试与评价	16
1.5.1	CPS 测试评价的意义与必要性	16
1.5.2	CPS 测评的对策建议	18
1.6	参考文献	19
第 2 章	测试与评价技术框架	22
2.1	概述	22
2.2	质量及其特性	22
2.2.1	质量	22
2.2.2	质量特性	23
2.3	故障及其风险	26

2.3.1	故障	26
2.3.2	风险	27
2.4	故障原因	32
2.4.1	内因	33
2.4.2	外因	44
2.5	故障传播行为	46
2.6	测评技术框架	47
2.6.1	测试方法	48
2.6.2	测评内容	49
2.7	参考文献	51
第 3 章	硬件可靠性测评技术	53
3.1	硬件可靠性测评方法	54
3.1.1	硬件可靠性测评目标	54
3.1.2	基于试验数据的可靠性测评	54
3.1.3	基于相似产品数据的可靠性测评	58
3.1.4	基于专家评分的可靠性测评	58
3.1.5	基于应力分析的可靠性测评	59
3.2	硬件维修性测评方法	59
3.2.1	硬件维修性测评目标	59
3.2.2	基于试验数据的维修性测评	60
3.2.3	基于模型推断的维修性测评	61
3.2.4	基于单元对比的维修性测评	62
3.2.5	基于时间累积的维修性测评	62
3.3	硬件电磁兼容性测评方法	63
3.3.1	EMI 测评	65
3.3.2	EMS 测评	65
3.4	硬件安全性测评方法	67
3.4.1	分析类测评方法	67
3.4.2	检查类测评方法	68
3.4.3	演示类测评方法	68
3.4.4	试验类测评方法	68
3.5	硬件耐久性 (寿命) 测评方法	69
3.5.1	硬件耐久性测评目标	69
3.5.2	基于模型计算的耐久性测评	70
3.5.3	基于试验数据的耐久性测评	71

3.5.4	基于现场信息的耐久性测评	71
3.5.5	基于工程分析的耐久性测评	72
3.6	硬件测试性测评方法	73
3.6.1	硬件测试性测评目标	73
3.6.2	基于试验数据的测试性测评	73
3.7	基于现场数据的硬件测评	75
3.7.1	故障数据统计	75
3.7.2	分析方法	77
3.8	参考文献	79
第 4 章	软件可信性测评技术	81
4.1	软件测试	81
4.1.1	概述	81
4.1.2	静态测试	84
4.1.3	动态测试	88
4.1.4	可信性测评	95
4.2	通用软件测试	100
4.2.1	软件开发与测试过程	100
4.2.2	单元测试	101
4.2.3	更高级别的测试	102
4.3	嵌入式软件测试	104
4.3.1	嵌入式软件	104
4.3.2	嵌入式软件测试	105
4.4	分布式系统测试	108
4.4.1	分布式系统	108
4.4.2	分布式系统测试	109
4.5	参考文献	115
第 5 章	网络连通可靠性测评技术	116
5.1	网络连通可靠性基本内涵	116
5.2	网络连通可靠性测评	119
5.2.1	经典算法	119
5.2.2	仿真算法	121
5.2.3	考虑实测数据	124
5.2.4	存在的问题	124
5.3	考虑无线特征的网络连通可靠性测评	125
5.3.1	无线网络拓扑结构分析	126

5.3.2	考虑无线特征的网络连通可靠性度量参数	127
5.3.3	测评模型及算法	127
5.4	典型案例分析	131
5.4.1	计算机通信网络可靠性测评	131
5.4.2	无线传感网络可靠性测评	135
5.5	参考文献	139
第 6 章	网络性能可靠性测评技术	142
6.1	性能可靠性定义及度量	142
6.2	正确可靠性测评	144
6.2.1	基本概念与参数	144
6.2.2	测试方法	146
6.2.3	评价方法	147
6.3	及时可靠性测评	148
6.3.1	基本概念与参数	148
6.3.2	测试方法	150
6.4	完整可靠性测评	152
6.4.1	基本概念与参数	153
6.4.2	测试方法	155
6.5	性能可靠性试验评估方法	156
6.5.1	确定故障判据	157
6.5.2	确定试验剖面 and 流量生成	158
6.5.3	试验数据收集	158
6.5.4	试验数据处理	158
6.6	典型案例分析	159
6.6.1	评价对象	159
6.6.2	网络性能可靠性参数选择	161
6.6.3	网络性能可靠性仿真计算	162
6.7	参考文献	164
第 7 章	CPS 信息安全测评技术	166
7.1	CPS 信息安全概述	167
7.1.1	CPS 信息安全威胁	167
7.1.2	与 CPS 相关的典型信息安全事件	167
7.1.3	CPS 与传统 IT 系统信息安全特点对比	170
7.1.4	CPS 信息安全需求与目标	171
7.1.5	CPS 信息安全面临的挑战	171

7.2	传统信息安全测评方法	172
7.2.1	与 CPS 相关的信息安全标准	172
7.2.2	现有的 CPS 信息安全风险评估	173
7.3	CPS 信息安全实时测评	176
7.3.1	CPS 异常威胁实时监测	176
7.3.2	CPS 信息安全风险实时评估	182
7.3.3	CPS 信息安全风险预测方法	186
7.4	参考文献	188
第 8 章	系统弹性测评技术	190
8.1	概述	190
8.2	故障注入技术基础	190
8.3	故障注入技术的分类	191
8.4	故障注入系统的原理	193
8.5	CPS 系统中常用的容错机制	194
8.6	CPS 系统故障模型	195
8.7	CPS 系统中不同层次间故障的故障传播	196
8.8	故障注入的过程模型	197
8.9	CPS 故障注入系统结构	198
8.10	CPS 系统恢复能力测评指标选择	199
8.11	结论	204
8.12	参考文献	204
第 9 章	系统脆性测评技术	207
9.1	CPS 脆性测评流程	208
9.2	理论基础	209
9.2.1	基本度量值	209
9.2.2	常见的网络模型	210
9.3	单网	213
9.3.1	仅含连接边的单网	213
9.3.2	渗流理论	214
9.3.3	单网的级联失效	216
9.3.4	空间相关性导致的级联失效	219
9.3.5	含有连接边和耦合边的网络	220
9.4	含有耦合边的耦合网络	224
9.4.1	具有随机耦合边的耦合网络	224
9.4.2	存在空间距离相关的耦合边的耦合网络	231

- 9.4.3 度相似耦合 233
 - 9.5 存在连接边的耦合网络 234
 - 9.6 耦合网络体系 235
 - 9.7 改进措施 239
 - 9.8 参考文献 239
- 第 10 章 运行质量综合评价技术 242
 - 10.1 CPS 运行质量综合评估 242
 - 10.1.1 权重系数选择方法 242
 - 10.1.2 综合评价方法 247
 - 10.1.3 CPS 运行质量评估 250
 - 10.2 CPS 运行质量预测 251
 - 10.2.1 预测方法 251
 - 10.2.2 CPS 运行质量预测 256
 - 10.3 参考文献 257

第 1 章

绪论

1.1 CPS 概述

20 世纪 40 年代之后,系统科学在大型、复杂工程系统和社会经济需求的巨大推动下应运而生。作为现代科学技术体系的一大部门,系统科学经历了从“老三论”(系统论、控制论、信息论)到“新三论”(耗散结构理论、协同学、突变论)的发展。80 年代以后,非线性科学和复杂性科学的研究逐渐兴起,并成为当前系统工程技术领域的热点。近年来,嵌入式技术、分布式计算、移动通信、智能控制等各类工程技术的蓬勃发展和广泛应用都离不开系统科学的不断进步。在相关技术基础的不断积累与创新之下,计算机网络系统、工业控制系统、物联网、云计算平台、移动互联网、无线传感器网络、可穿戴设备等以信息通信技术 (ICT, Information and Communication Technology) 为助力的工程系统在人类的生产、生活中发挥着越来越重要的作用。因此,具备更多能力、能够在国际甚至全球范围内运行的大型复杂系统,如国家电网、空中交通管控系统、国家运输网、全球气候监控系统等的集成早已不成问题,各类大型复杂系统已逐渐成形。

科技进步在带来世界工业与经济水平快速发展的同时也产生了很多难题,如环境压力亟须引进先进技术改善能源利用率、降低污染;基础设施的重复或过量建设造成了资源的极大浪费,需要优化资源的配置与管理;安全威胁从未停止,需要更加快速、有效的防御体系;人口老龄化需要更加有效地利用包括设备到医疗数据与信息的整个医疗系统等等。同时,这些难题也为科学技术的研究与发展带来了新的挑战,为人类社会工业化进程朝可持续化的方向提升、转型提出了新的要求。

综上所述,网络与信息技术对已经发展了两百多年的现代物理工程系统产生了强大的冲击。人们已经不能满足近 30 年来互联网所带来的人与人之间交互关系的改变。人们对各种工程系统和计算设备能力的需求也已不仅仅局限于系统功能的增加,而是更加关注系统资源的合理有效分配与系统效能的优化,以及服务个性化与用户满意度的提升。在这种需求的引导之下,科技与经济的双重推动力促使了新一代工程系统——Cyber-Physical System (CPS) 的诞生。

2005 年年末、2006 年年初，美国国家科学基金会（NSF，National Science Foundation）的 Helen Gill 提出了 CPS 的概念（CPS 一词引入到中国之后被翻译为“信息物理系统”或“信息物理融合系统”），用于描述计算与物理过程的融合。嵌入式计算机技术的应用与发展使我们能够将计算和通信功能按照特定的方式添加到物理系统之上。汽车电子系统与机械系统的成功结合就是早期成功的案例。计算机控制的汽车引擎的出现对低油耗与低排放汽车的出现都起到了关键作用。计算与物理组件的紧密结合技术优势对经济和社会的发展都产生了广阔且深远的影响。CPS 以计算、通信等信息系统与物理系统或过程的深度融合为主要特征，可将多个单独的系统个体联结起来构成具备新能力的复杂系统，使系统更加安全、高效，降低了建造新系统和运维这些系统的成本。NSF 计算机与信息科学和工程总监 Branicky 表示，“如同互联网改变了人与人之间的互动一样，CPS 将会改变我们与物理世界的交互方式。”

CPS 的概念一经提出就受到了全世界范围内的广泛关注，成为各工业发达国家政府、学术界与工程界研究和投资的热点。占据 CPS 技术的国际领先地位被认为是各个国家未来科技竞争力和振兴工业制造业的关键所在。无论是美国的“先进制造业”战略、德国的“工业 4.0”战略^①、英国的“高价值制造”战略、欧盟的“第八框架计划——2020 地平线计划”，还是中国的“两化深度融合”战略，都把信息化作为工业发展的目标，其实现的基础都是 CPS 理论与技术。当前在世界范围内掀起的新一轮工业革命中，CPS 已成为最前沿的交叉研究领域之一，是未来智能家居、智能工厂、智能电网、智能交通、智能医疗、智慧农业、智慧城市与智慧地球等实现的基础。

CPS 所带来的新型服务模式和解决方案得益于“互联网思维”的广泛应用，以及 ICT 需求的不断增加。这种潜力反过来也会引起市场、行业、商业部门和经济生态系统的动态变化，同时也会促进工业制造模式和商业模式不断改变。正如中国科学院院士何积丰所述：“下一代工业将建立在 CPS 之上，随着 CPS 技术的发展和普及，使用计算机和网络实现功能扩展的物理设备无处不在，并将推动工业产品和技术的升级换代，极大地提高汽车、航空航天、国防、工业自动化、健康/医疗设备、重大基础设施等主要工业领域的竞争力。CPS 不仅会催生出新的工业，甚至会重新排列现有产业布局。”在不远的未来，每个人都将享受以信息物理系统为核心的新一代科技创新给人类未来生活带来的节能、舒适、快捷与便利。

1.1.1 CPS 的概念与内涵

从 2006 年 CPS 的概念一经提出，至今很多国家的研究机构或学者对其进行了定义，这些定义均体现了学者或组织根据自己领域研究对 CPS 的理解，包含了“网络化的”、“分布式的”、“有线/无线连接的”、“复杂的”等特征性术语或形容词。显然，CPS 以系统科学为其理论基础，是一个抽象概念系统。一般认为，“CPS 是一个在环境感知的基础上，深度

^① “工业 4.0”是德国政府《高技术战略》中的十大未来项目之一，被认为是继以蒸汽机广泛应用为标志的第一次工业革命、以电气化为标志的第二次工业革命和以自动化为标志的第三次工业革命之后，以基于 CPS 的智能制造为主导的第四次工业革命。

融合了计算、通信和控制能力的可控、可信、可扩展的网络化物理设备系统，它通过计算进程与物理进程相互影响的实时反馈循环实现信息世界与物理世界的深度融合和实时交互”。

图 1-1 展示了 CPS 的 3C 核心概念，CPS 的通信网络子系统包括传感器网络、泛在通信网络等。CPS 的计算子系统完成各种数据的存储、分析与处理任务；CPS 的控制子系统使用感知和计算子系统提供的信息，确定对物理世界的控制策略，协调各个执行器对物理世界对象的操作，实现对物理世界的协同控制。可以说，CPS 是一类“System of Systems”。

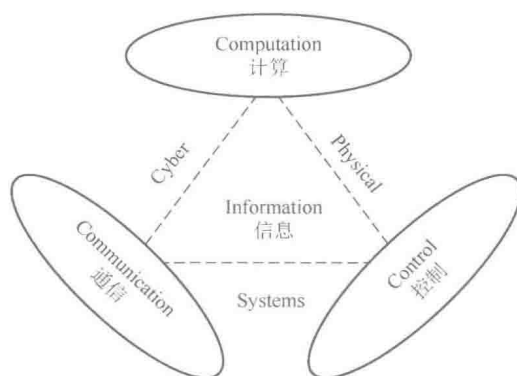


图 1-1 CPS 的 3C 核心概念

CPS 通过人机交互接口实现和物理进程的交互，使用网络化空间以远程的、可靠的、实时的、安全的、协作的方式操控一个物理实体。CPS 的典型逻辑架构包括物理层、网络层和决策层，如图 1-2 所示。

物理层，也称为感知执行层，包含物理系统或过程（也可能是人体或人群）、传感器、执行器等，主要负责感知获取物理系统及其所在环境数据以及执行系统控制命令。通过分布在物理系统及其所在环境内的嵌入式传感器和执行器与物理系统进行交互，对物质属性、环境状态等数据进行大规模分布式的数据获取与状态辨识，并通过数据传输层获取上层数据处理结果，反馈至执行器，根据控制命令进行操作，以适应系统与物理环境的变化。

网络层，也称为数据传输层，由若干通信基站和网络节点组成，负责将物理层感知的原始数据传输至信息中心，通信模式主要包括有线宽带、专用短程通信技术、3G/4G 以及无线通信技术等，同时网络层还需具有对海量信息进行实时、高效、安全的处理和管理的的能力。

决策层，也称为应用控制层，是 CPS 交互的核心部分。该层将从数据传输层获取到的信息进行抽象处理后，根据需求经过预设规则和高层控制语义规范的判断，生成执行控制命令，并将执行控制命令通过数据传输层实时反馈至感知执行层的底层物理单元，由执行器进行相关操作。应用控制层使 CPS 与行业专业应用相结合，实现广泛化、智能化的应用解决方案集合，如智能交通和智能电网等系统，也包含人机交互的接口，提供远程监控、视频显示、信息发布和人工干预控制的能力。

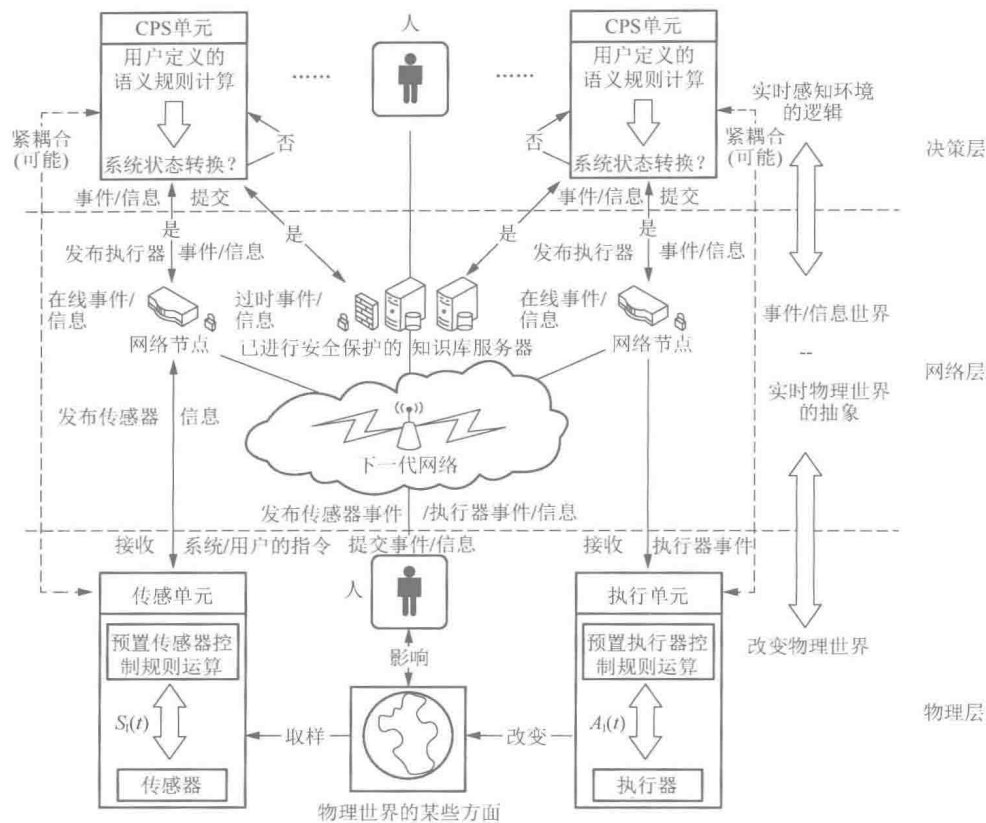


图 1-2 CPS 的典型逻辑架构

现代的 CPS 要求具备“全面感知、可靠传输、实时处理、智能控制”的四大基本逻辑功能，多学科与多技术融合是其主要特点。在全面感知方面，以 MEMS（Micro-Electro-Mechanical System，微机电系统）为代表的新型传感器和传感器网络等技术为 CPS 提供了对物理世界的范围广、种类多样的协同感知与监测能力。在可靠传输方面，异构网络融合技术为 CPS 提供了将物理层的信息进行实时、可靠、安全传输与交换的基础。在实时处理方面，海量信息处理与数据挖掘技术、高性能计算机与信息安全技术为 CPS 提供了实时存储、处理数据，正确、深入地认知物理世界的基础与安全保障。在智能控制方面，自学习、自适应与鲁棒控制等智能控制和分布式控制技术为 CPS 通过感知数据的认知计算和推理，正确、深入地认知物理世界，实现信息层与物理层的交互与融合提供了解决方案。

1.1.2 与 CPS 相关的典型系统

CPS 是在计算机系统、嵌入式系统、工业控制系统、无线传感器网络、物联网、移动互联网、网络控制系统和混杂系统等现代工程系统的基础上演化发展而成的，而不是凭空出现、一蹴而就的。何积丰院士说：“CPS 的意义在于将物理设备联网，特别是连接到互联网上，使得物理设备具有计算、通信、精确控制、远程协同和自治五大功能。”因此，除传统的物理系统工程技术外，CPS 还包含了将来无处不在的环境感知、嵌入式计算、网络