

Industrie 4.0

Ulrich Sendler

【德】 乌尔里希·森德勒 / 主编
邓敏 李现民◎译

工业4.0

即将来袭的第四次工业革命
INDUSTRIE 4.0

* 格哈德·鲍姆 (Gerhard Baum)
曼弗雷德·布罗伊 (Manfred Broy)
胡梭桐 (Anton S. Huber)
鲁思沃 (Siegfried Russwurm)

霍尔格·伯切丁 (Holger Borchering)
马丁·艾格纳 (Martin Eigner)
赫伯特 K. 科勒 (Herbert K. Kohler)
马蒂亚斯·施通普弗勒 (Matthias St ü mpfle)

工业4.0

即将来袭的第四次工业革命

【德】乌尔里希·森德勒（Ulrich Sendler）◎主编

邓敏 李现民◎译

格哈德·鲍姆（Gerhard Baum）	霍尔格·伯切丁（Holger Borchering）
曼弗雷德·布罗伊（Manfred Broy）	马丁·艾格纳（Martin Eigner）
胡梭桐（Anton S. Huber）	赫伯特 K. 科勒（Herbert K. Kohler）
鲁思沃（Siegfried Russwurm）	马蒂亚斯·施通普弗勒（Matthias Stümpfle）

本书是费尔达芬工业峰会——系统领导 2030 年的配套用书，主题思想是：从经济和科学的角度，深入探讨怎样才能使中欧工业到 2030 年仍能保持一个成功的全球生产基地的地位。到 2030 年，互联网和其他服务联网的系统将使所有行业实现智能化，并取代传统的机械和机电一体化产品服务。本书每个章节都从非常特殊的角度表达了对工业 4.0 的独特看法，所有这些观点综合在一起可以为我们清晰地勾勒出目前工业产业发展所处岔路口的情形。

Translation from German language edition:

Industrie 4.0

by Ulrich Sendler

Copyright © 2013 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书未经出版者书面许可，不得以任何形式复制或节录、转载本书中的任何部分。

版权所有，侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2014-3238 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工业 4.0 / (德) 森德勒 (Sendler, U.) 主编; 邓敏, 李现民译. —北京: 机械工业出版社, 2014.7 (2014.8重印)
ISBN 978-7-111-47161-5

I. ①工… II. ①森… ②邓… ③李… III. ①工业生
产—智能控制 IV. ①F406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 130005 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 余红 张馨月 责任校对: 赵蕊

责任印制: 李洋

北京市四季青双青印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版 · 第 2 次印刷

170mm × 240mm · 13 印张 · 2 插页 · 250 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-47161-5

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

到 2030 年，互联网和其他服务联网的系统将使所有行业实现智能化，并取代传统的机械和机电一体化产品。我们必须清楚地认识到，在哪些领域，通过哪些产品和什么样的服务，可以使我們取得成功以及如何才能够做到这一点。

本书试图为这些问题给出一个答案。作者中不仅有虚拟产品开发和计算机科学院系的代表，而且还有自动化工业、电子、中型机械工程、汽车业和软件业等各行业的代表。每个章节都从非常特殊的角度表达了对工业 4.0 的独特看法。所有这些观点综合在一起可以为我们清晰地勾勒出目前工业产业发展所处岔路口的情形。

目 录

前言

- 第一章** 工业 4.0：通过系统生命周期管理（SysLM）控制工业的复杂性 乌尔里希·森德勒（Ulrich Sendler）/ 1
- 第二章** 软件：工业的未来 鲁思沃（Siegfried Russwurm）/ 28
- 第三章** 作为下一次工业革命基础的创新 格哈德·鲍姆（Gerhard Baum）/ 51
- 第四章** 中小型机械制造业——系统开发也是灵活和高度创新的 霍尔格·伯切丁（Holger Borcherding）/ 74
- 第五章** 使用基于模型的软件和系统工程作为一致性系统生命周期管理（SysLM）的元素 曼弗雷德·布罗伊（Manfred Broy）/ 99
- 第六章** 系统生命周期管理平台上基于模型的虚拟产品开发 马丁·艾格纳（Martin Eigner）/ 123
- 第七章** 数字化企业的目标：实现生产与产品研发的数字可视化 胡桢桐（Anton S. Huber）/ 152
- 第八章** 作为高档汽车关键指标的连通性 马蒂亚斯·施通普弗勒（Matthias Stümpfle）和赫伯特·科勒（Herbert Kohler）/ 170
- 跋 / 196

第 1 章

工业 4.0：通过系统生命周期管理 (SysLM)

控制工业的复杂性

乌尔里希·森德勒 (Ulrich Sandler)^①

概 述 /

数年以来，工业界一直处于一场重大而根本性的变革之中。这一变革在德国被称为工业 4.0。德国政府已经宣布工业 4.0 为其高科技战略之核心部分，旨在确保德国未来的工业生产基地的

① 乌尔里希·森德勒

德国慕尼黑，弗兰廷大街 12 号，邮编 80689，电子邮箱：ulrich.sendler@ulrichsendler.de

地位。

变革的核心在于工业、工业产品和服务的全面交叉渗透。这种渗透借助软件，通过在互联网和其他网络上实现产品及服务的网络化而实现。新的产品和服务将伴随这一变化而产生，从而改变整个人类的生活和工作方式，尤其是改变了人类与产品、技术和工艺之间的关系。这也要求工业产品的开发和生产要有根本性的转变和调整，以便高质量地部署新工艺，并使其转化为具有经济上的益处。

为做到这些，工业界必须理解工业 4.0 的细节。诸如“第四次工业革命”“信息物理融合系统（CPS）”“智能技术系统”“物联网”等词汇究竟是什么意思？如何避免这些概念因为可能的滥用而成为空洞的口号？因为空洞的口号会阻碍而不是协助人们达到工业 4.0 的既定目标。

需要澄清的问题包括：工业 4.0 对于作为工业生产基地的德国来说其特殊意义何在？与此同时，展现给欧洲心脏地带——一块曾因十八世纪末的工业革命而在过去两百年的经济中举足轻重的土地——的机遇和风险是什么？

因为我们只拥有常规的开发和生产方法，以及现在的学校课程所培养出的专家，所以对于在一个跨学科的网络化系统中进行开发和生产的组织和领导还太缺乏准备。而这种系统正向市场走来。中学、应用技术性大学和综合性大学面对哪些要求？科研机构面对哪些要求？深造进修所又面对哪些要求？

最后一个是，今天为开发、测试和生产而实现的信息技

术系统是否足以支持我们现在谈论的这种变化？我们是否还需要些别的东西么？这些系统是否必须结合得更紧密？它们的开放性扮演何种角色？要做到在工厂切实地谈论“数字革命”，有哪些标准是必备的？因此，系统生命周期管理是切实可行的，这种管理实际上包含了产品、生产系统及两者关系的所有元素。

本篇导论将对上述议题做一般性探讨，并在此基础上，来自不同工业领域和科学领域的本书其他作者们将从各自的视角加以详细阐述。

1.1 对一个成功的工业基地的巨大挑战

在过去的几十年里，世界发生了戏剧性的转变。东西方的对应被由经济领头的政治全球化所替代，这在半个世纪前是不可想象的。这一转变给整个世界带来的结果是：国家、工业、政治和社会团体及组织都必须自我调整，以适应变化的框架条件。此外，由于这一转变，新的力量对比开始逐渐形成。上世纪后半叶，从所谓的第三世界里涌现出了全球性的具有决定性力量的政治和经济势力。几十年前，西方世界在政治和经济上的主导角色是不言而喻的，但现在却完全不是这样，西方世界已经长时间无法和当时的地位相提并论了。

每个区域对这种转变的反应都极不相同。就我们所谈论的话题来说，最令人感兴趣的是不同区域的工业是如何随之转变的。德国机械设备制造业联合会（VDMA）2013年1月的一张图（参见图 1.1）相当有启发意义。

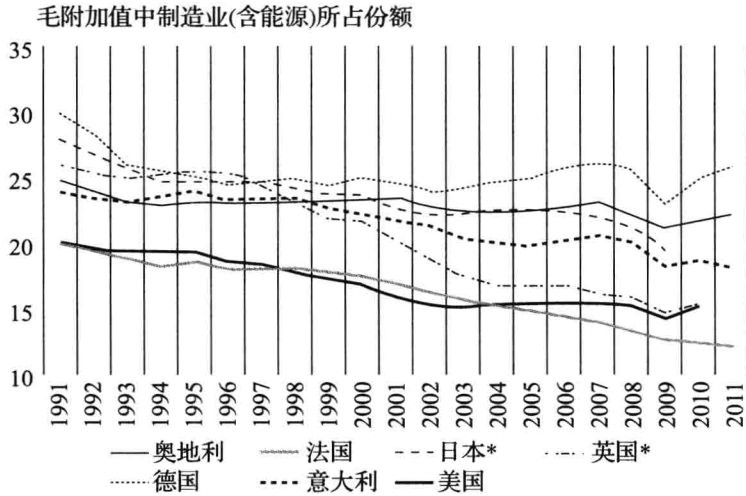


图 1.1 制造业份额的国际间比较 (来源: OECD, IW Köln, VDMA)

过去二十年间,在西方主要工业国当中,唯有德国和奥地利在制造业这一部分变化不大。这两个国家在 2011 年就克服了由 2008 年次贷危机所触发的经济崩溃。同样再次出现上升势头的国家只有美国,但仅仅是在一个极低的水平上。

20 世纪 90 年代初以来,德国毛附加值中工业部分占 25% 以上,这一比例在奥地利略低于 25% ,而在所有其他国家则明显向 20% 之下滑动,有的跌到了 10% 。

在过去的二十年间,许多人倾向于认为工业——尤其是制造业——预告了自己的终结。未来看起来属于服务业,特别是金融服务业。人们越来越多地在廉价的地方生产,不再大规模地使用昂贵的工厂设施、建筑、机器以及受过良好训练的工人。

在美国,高科技和软件产业是一个例外。在这个领域里,至

少在理念、发展和管理方面，美国可能还将持续保持其领先地位。但对于真正的制造业来说，美国远远算不上领先，这在汽车工业尤为明显。类似情况也发生在英国和法国身上。英国已经完全放弃了汽车工业。美国汽车业在政府强有力的干预下得以存活，但是距离稳妥的上升势头看起来还很遥远。

与此相反，制造业在德语区始终是最重要的经济元素（参见图 1.2）。德语区的工业尽可能全面地实现了自动化，而没有大规模外迁到工资和生活成本较低的国家去。今天，和基础的经济及政治重构相结合，到目前为止，我们这里成功做到了开发和生产具有经济效益的产品。然而这种成功不仅仅局限在经济方面：我们作为一个工业国一如既往地在这个世界上具有重要地位。无数公司和行业的产品都是国际市场上同类产品中的领头者。

工业分组	2010 年 企业数量	2010 年年平 均雇员数， 单位：千人	2011 年	和前一年 相比的变 化百分比	2010 年营业 额，单位： 十亿欧元 [⊖]	2011 年	和前一年 相比的变 化百分比
机械制造	6.165	908	931	2,5	173	201	15,7
电子技术	4.291	803	842	4,8	159	178	11,9
汽车和 汽车配件	1.041	675	694	2,8	248	270	9,0
化工	1.165	278	285	2,3	103	113	9,5
食品工业	5.230	419	426	1,7	120	131	9,0
加工工业	36.485	4.819	4.956	2,9	1.223	1.360	10,3

图 1.2 强劲的德国工业（来源：Statistisches Bundesamt, ZVEI, VDMA）

⊖ 1 欧元 = 8.4981 人民币。

尽管如此，一些行业仍不得不放弃领先地位，甚至基本上从市场消失，其中包括纺织工业、消费电子产品生产业、若干软件分支产业和集装箱船舶制造业。与此同时，在诸如汽车工业、飞机制造、医疗技术和其他高科技产业等分支内，机器和设备制造达到了一个新的高度，其产品在世界范围内前所未有地畅销。

出现这种现象的原因首先是产品极高的质量和可靠性；其次是产品的许多新用途和功能在全球竞争中显现出很大的优势；最后是基于产品或者作为产品附加值而提供的服务，而这些服务是其他竞争者所没有的。

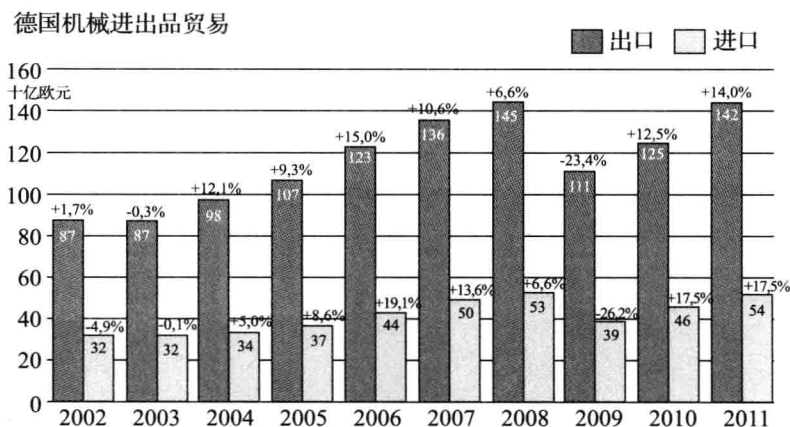


图 1.3 机械进出口比例 (来源: Statistisches Bundesamt, VDMA)

我们的工业界是如何做到这些的？一是由于开发和制造过程的高度可靠性，这些过程的自动化程度很高。二是在于极富效率的新技术投入，特别是信息技术工具在工程、产品验证、生产规划、运转和制造上的应用，这也是我们的工业不同于竞争对手的

地方。德语区是全球相关信息技术系统供应商最重要的市场是不无道理的。三是得力于在几乎所有种类的产品上熟练地使用嵌入式软件。正是这些革新性的功能和服务，才使得我们的产品在全球如此的畅销（图 1.3）。

与此同时，产品的开发和制造所必需的程序的复杂性也在不断增加。传统的方法、手段和结构不足以稳定地控制这种复杂性。这就解释了工业 4.0 概念在德国提出为什么并非出于巧合。中欧工业界有充分的理由有意识地把他们的程序、方法和工具放到检验台上。在很多情况下，甚至是数十年以来基本保持不变的商业模式也无法保持现状。复杂的、智能的、网络化的技术体系强迫人们找到新的商业模式。

这一挑战涉及整个制造业及其产品的整个生命周期。工业 4.0 的含义并不仅仅是让生产更智能、更有效、更快速以及更经济——那会使人忽略掉我们工业界最重要的资产：工程学，以及工程师们在开发创新性的产品和生产系统时所表现出的非同寻常的能力。工业 4.0 目前在媒体、展会和议会里获得的极大关注有助于战胜这一挑战。

1.2 工业 4.0 的定义

2012 年 10 月，产业经济研究联盟及其工业 4.0 工作小组提交了他们的最终报告草案《确保德国未来的工业基地地位——未来计

划“工业 4.0”实施建议》。自此，在各种会议及展会上极少有不谈论工业界眼下所面临的挑战的。讨论中相当频繁地涉及到一些含义不甚明确的概念，在对其作出确切界定之前最好不要使用。

工业 4.0 首先是一个在营销技术角度上来说十分高效的概念，其传播速度快到令人诧异。有人对此大加渲染，突然之间全世界都想告诉你，他们的产品恰好反映了工业 4.0 的理念。因为工业 4.0 而举办了那么多会议，这种情况已经很久没出现过了。

这个概念为什么这么成功？或许是因为它和 Web 2.0 以及 Web 3.0 有相同之处：因为它让人想起某种安装数量极大的软件的新发行版；因为许多人眼里的制造工业是一种以机器、设备、油脂和钢屑为代表的陈旧事物，而现在突然变成了某种恰好符合这个以软件、互联网、机动性和云计算为代表的摩登时代的事物。

这个概念的影响一直到达社会和政治高层，这是有益的，因为工业界应对挑战会因此变得简单一些，而这一挑战实际上是和现今的变革相关联的。同时，这个概念含义不清，有多种解释也并非坏事。麦麸会从麦子上脱落，种子会发芽破土。关于工业 4.0 的争论越多，这一概念明确的一天就会越快到来。

1.2.1 第四次工业革命

根据现在维基百科（Wikipedia）上的解释，工业革命这个概念最早在 18 世纪中期开始使用，用以描述在经济和社会环境、劳动和生活状况上发生的深刻而持久的变革，人类由此从农业社会进入工业社会。

社会学家和经济史专家用第二次工业革命来描述 20 世纪初经济、生产和劳动上的转变，促成这一转变的是密集的机械化、电的广泛使用以及商品大宗生产的出现（泰勒制和福特制）。

20 世纪 70 年代中期，因为可编程逻辑控制器的使用而导致产品和生产自动化产生巨大进步，此即第三次工业革命。

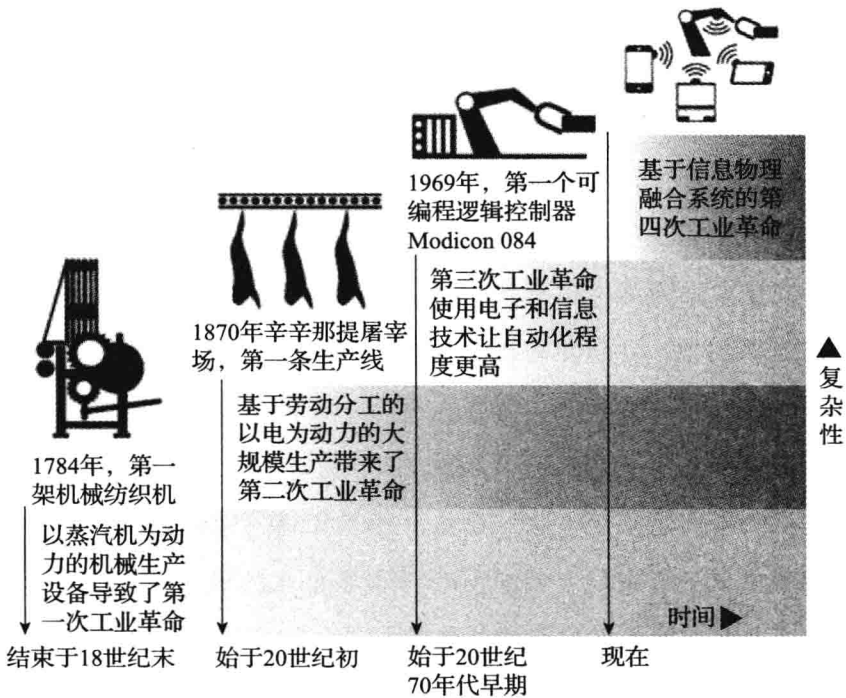


图 1.4 工业 4.0 工作小组描绘的第四次工业革命（来源：DFKI 2011）

现在是第四次工业革命（参照图 1.2）。实际上有很多迹象表明，这次变革有理由被认为是和第二次及第三次工业革命一样具有划时代的意义。软件不再仅仅是为了控制仪器或者执行某步具体的工作程序而编写，也不再仅仅被嵌入产品和生产系统里。产

品和服务借助于互联网和其他网络服务，通过软件、电子及环境的结合，生产出全新的产品和服务。越来越多的产品功能无需操作人员介入，也就是说它们可能是自主的。传统产品被具备至今尚不明了的特性的技术系统所替代（图 1.4）。

然而，常被论及的一个问题是：这里使用“革命”这个概念是否理由充足？或者说，如果不说“革命”而说“演化”，会不会显得不太恰当？问这个问题是有道理的，因为可以确定的是，我们正经历其开端的这场变革不会在短期内取得进展，它将延续数十年。而促发这场变革的技术元素并非什么新东西，特别是软件及传感器、执行器等电子器件。它们最迟自第三次工业革命起就存在了，而万维网也有几十年历史了。

但事实是，到现在为止的三次工业革命从开始到结束都经历了几十年。就这点而言，时间跨度不一定能成为反对第四次工业革命概念的论据。人们仍可以就此辩论。对于工业界以及工业基地德国或者中欧来说，这一争论并不像下面这个问题那样具有迫切的现实意义：它们应该如何对待这场公认的根本性变革？应当把它当作是革命性的还是演变性的？

一个国家、一个地区或者一个行业如果不能意识到这场变革的核心以及其中隐藏的潜能，或者没有找到应对之道，那么也许其他新的行业、国家和地区在新技术可能性的基础上会取而代之，获得领先地位。眼下在德国的我们处在一个岔路口上：要么我们认识到这次新技术的机遇，并将其转化成经济上成功的新产品和服务，要么就去冒经济可能长期衰退的风险。

1.2.2 信息物理融合系统，或者“智能技术系统”

信息物理融合系统这个概念首先在美国被提出。2006 年年底，美国国家科学基金会（NSF）宣布该系统为国家科研核心课题。信息物理融合系统被定义为由具备物理输入输出且可相互作用的元件组成的网络。它不同于未联网的独立设备，也不同于没有物理输出输入的单纯网络（图 1.5）。

从嵌入式系统向信息物理融合系统演化

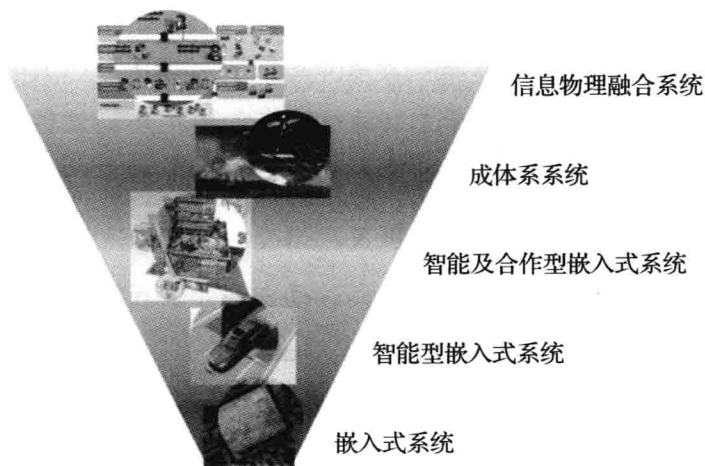


图 1.5 向信息物理融合系统演化

（来源：维尔纳·达姆教授，曼弗雷德·布洛伊教授）

网络化合作是机电一体化里面出现过的概念，但是对于电子器件（特别是传感器和执行器）以及配备了机械部件的嵌入式软件之间的网络化合作来说，还需要引入新的概念，因为（无线）网络化使得全新的产品功能和特性成为可能，而这些新事物是机电一体化的定义所

不包含的。（这里完全不考虑如下情况：机电一体化的定义中没有出现软件，因为这个定义出现的时候，计算机科学还不存在。）

这种系统有一个最有名、传播最广的例子：智能手机。如果说得幽默一点，智能手机比电话要聪明得多，因为人们虽然也用它来打电话，但是这几乎是智能手机最次要的功能了。它首要的功能是建立和互联网的无线连接。借此人们可以上网冲浪，以及在路途上保持万维网内的互动。人们还可以在任何地方撰写、发送和收取邮件。通过 GPS，智能手机可以知道自己在地球上的位置，由此可以在几乎任何地方导航。此外内建的微型罗盘使得智能手机得知自己所在方向，为诸如定位和识别某方向上的地点或建筑等提供了可能。成千上百种被称为 App 的小型软件供人下载使用，这些软件可以实现几乎所有想得到的功能。

电子器件微型化、计算机及存储介质的性能飞跃使得现在的小体积和无线功能成为可能，而这些在几年前还不可能。在几乎所有工业领域开发和制造这类系统就是工业 4.0 的目标。

信息物理融合系统这个概念尚和新系统的本质有关，而“智能技术系统”的提法就更大胆了。它把系统新的能力阐释为“智能的”——这个形容词基本上只能用于有思想、有创造力的人类自身。所有的技术系统，包括那些最复杂的，都仅仅是人类智能的结果。它们能做的事都是人类已经设计和发明出来的。从这个意义上讲，那些最先进的技术系统也完全谈不上是智能的。

尽管如此，这个概念仍有其一定的合理性。由于各种技术系统的网络化，尤其是通过它们在无人介入的情况下自主执行某些