



Views & Comments

工业机器人在智能制造中的角色

戴家鹏

Foxconn Technology Group, Shenzhen 518110, China

1. 智能制造观点

1.1. 智能制造——科技化与工业化的连接

通过考察近代工业制造的发展历程[1]可以获得对智能制造概念的理解。通常将1784年定义为第一次工业革命的里程碑，这是因为该时期蒸汽机诞生了（图1）。在早于1784的50年前，另有一位英国工程师Thomas Newcomen已发明了初期的蒸汽机。初期蒸汽机有许多效率方面的缺陷，也不易实现大量制造。后来出现了伟大的英国发明家瓦特（James Watt），他把蒸汽机里的冷凝设计改善为分离式的结构，大幅提升了蒸汽机的效率。瓦特同时也创新应用了机械式的速度调节器，进而能够自动控制蒸汽机运转的速度。这些技术上的突破使得蒸汽机被可靠地使用。另外，瓦特还得到了投资者Matt Boulton的支持，大量制造使得成本降低，产生了新一代的蒸汽动力引擎，带动了第一次工业革命。结合了工、技、贸，也就是“科技化”+“工业化”，奠定了

工业时代成功的基础。我们可以推论：一个成功的发展阶段要归功于科技与工业的结合。同样的，信息科技与工业化的结合会促进智能制造的发展，这也是“中国制造2025”的核心[2]。

1.2. 大量制造模式之 2.0，计算机逻辑控制之 3.0

在第二次工业革命中，大规模生产大幅度地提升了生产率，其基本模式为采用流水线来搭配以工业工程分工的生产技术。把生产制程拆分成多个工序，作业员在每个工序执行重复单一的动作，以提升整体的生产力。流水线提供了一个制造工序间传输的途径。例如，福特公司将这项技术与工业化一起用于底特律汽车制造，达到以较低的成本制造出数百万计的汽车。

第三次工业革命是由于计算机时代的来临。计算机协助制造业的代表为1969年的可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）[3]。尽管当时已有许多技术都结合了计算机与机器，但PLC使用简易、可

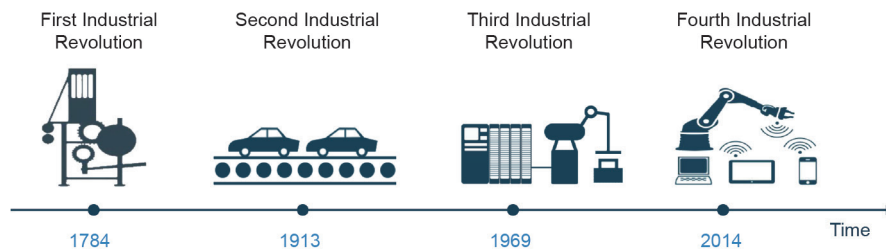


图1. 工业制造发展历程。

靠性高，可以容易地进行计算控制逻辑的编程。1969年，通用汽车（General Motors）的Hydra-Matics部门拟定出早期控制器规范，当时Modicon公司的Dick Morley展示了梯形逻辑的编程方法，这被许多自动化工程师所喜爱，另一位PLC创始人Odo Struger博士与其在Allen-Bradley公司的团队联合了当时一家名叫3I的小公司，依据通用汽车的规格也研发出逻辑控制器，并且注册了PLC的名称（3I后来被Allen-Bradley公司收购，Allen-Bradley又被并购成为了Rockwell Automation）。Allen-Bradley当时有远见地投资了自动化应用领域，全力支持PLC发展成为一个坚固、可靠且简单易用的自动化控制系统。PLC推出后10年，到1979年，PLC已经成为一个具有10亿美元规模的产业。

1.3. 工业 4.0——云移物大智网 + 机器人

2013年，德国工业4.0工作小组在汉诺威工业展会上提出了他们的工业4.0报告。2014年是第四次工业革命的开始，信息技术被引入制造业。在制造业中引入信息技术，有别于工业3.0的计算机化。信息化亦可描述为六大特点加上机器人作为代表。这六大特点为：云端、移动终端、物联网、大数据、智能分析和网络（简称为云移物大智网，即CMIDAN）（图2）。CMIDAN代表着虚拟世界的智慧，再加上机器人的实体动作就可以代表物理世界中实际完成任务的机制。CMIDAN和机器人技术共同对未来的智能制造产生更大的影响。这些冲击而产生的工业化成果是由众多智能制造相关从业者的共同努力而实现的，其在可见的未来还会持续不断地获得进步。

1.4. 智能制造的基本功

传统制造业者对于工业4.0及智能制造的实用性还是有些困惑。有些人也会问到如何去展开，以及投资是否可以回收，这些疑虑都是相当自然的，也有些企业已经走在前头并积极地制造环节导入智能技术。然而，新技术的导入是需要时间的，导入新技术时还需要把基本功准备好，也要进行内部流程改造及组织调整来促进实际效果，这些步骤可以简单地归纳为以下三点。

1.4.1. 一个共同追求——再工程化流程伴随导入智能制造

商业流程的再工程化是一套商业管理的策略，始于20世纪90年代[4]，其旨在为了强效改善客户服务及降低作业成本，而重新组织工作流程。智能制造的最终目的同样也是用智能来改善客户服务及降低成本。这就需要团队成员在共同追求的目标引导下共事。针对目标流程，利用CMIDAN进行再工程化，有效地建立智能制造。通常再工程化的流程包括采购端、组织端、设计端与质量端来辅助制造及管理。分析与改造流程将涉及众多部门去重新思考如何再次活化组织，减少不必要的内部阻力、浪费以及弊端，选取适当的标杆项目作为推动智能制造的示范，共识共事努力达到CMIDAN技术可以带来的效益。

1.4.2. 两个基本元素——有用的数据作为智能的起点、易用的分析协助迈进智能化

数据为构成智能的基本元素。精确、有时效性的数据是关键。太多不能使用的数据会造成干扰，只是显示



图2. 六大信息化特点（CMIDAN）+机器人（来自于郭台铭，富士康科技集团）。

数据不会产生价值，所以采集有效的数据是智能制造的基础之一。数据要配合清晰的逻辑分析才有意义，工业实体分析还需要对基础制程有所了解，分析工具若能方便使用，就会帮助使用者快速导出分析所要的算法。初步使用时可采用比较简易的算法，例如，统计及简单的控制演算使制造工程师获得信心，并且认识到数据及分析的潜在价值，明确了解智能化的好处。在获得足够经验后，就可以再探索和导入更复杂的人工智能分析工具。

1.4.3. 三个动作——底层数据的联结化、分析产生的行动化、辅助设计的整合化

制造系统的底层控制包括机器人、计算机数控机床（computer numerical control, CNC）、传感器、爪与逻辑控制装置，是主要的核心数据产出层。在工业3.0时期的工厂里，底层的许多机器已经具备通信的能力，但相较于工业4.0系统，尚未达到大量数据转换及联结的程度。在智能制造时代，数据产出及转换的能力有大幅提升。这个核心层将会使用更多传感器，如高分辨率影像（如8K影像）、力矩/扭矩/惯性/触觉/震动传感，进而捕捉制程的动作细节。在数据产出的核心层，数据传输装置、数据格式与通信协议联结来配合必须要做到的分析工作。

第二个动作是从数据的分析处理后，做出及时有效的行动来产生实际的改善。如图3中，控制的行动体现在调校优化生产流程，然后可以进行预测故障来优化生产流程。智能设备使用分析而产生行动的一个例子是预测性保养，这可以减少设备潜在的故障率及增加整体稼动率[5]。产品的趋势数据收集及分析目标是达成生产零故障率，从核心层产生出的大量数据加上强力分析再加上及时有效的实际行动来达到全面智

能制造，处理大数据及进行深入计算时可能需要云端计算。

第三个动作是使用计算机辅助工具来整合设计。宏观的智能制造系统包含设计及制造规划。设计工具的使用，如计算机辅助设计/计算机辅助制造/产品生命周期管理（CAD/CAM/PLM）系统工具，可协助保留技术能力、降低失误及快速对工程变化进行反应。从生产中获得的数据可以协助建立信息物理系统（cyber physical system, CPS）（虚实整合系统）用来改善下一代产品的设计及制造。制造的数据也可与制造执行系统（manufacturing execution system, MES）沟通，CAD/CAM/PLM与MES系统可整体性地由计算机辅助整合实际的智能制造系统。

1.5. 工业自动化逐步进展

工业自动化系统的建立通常不是一步就能到位，而是要从初步模块尝试成功后，再经历数代的改善提升才能达到高性能、高可靠性的自动化工厂。从每次提升中所获得的知识再帮助整体自动化系统的设计优化，最终达到整厂自动化。在开发一般自动化设备时，也会先从一个单工站做起，有了制程经验后延伸多个工站进而连接成一条自动化生产线，取得更高的生产效益，然后，多条自动化生产线与自动物料输送整合，构成完整的生产楼层以达到“熄灯工厂”（lights-out factory）的阶段。这样的模式也不会永远不变，持续地调整及优化将会使得自动化车间克服更多不同的新挑战，向智能化迈进，从而提升竞争力。

1.6. 柔性化、再利用、快速爬坡的挑战

在智能制造领域里，柔性化、设备再利用的能力以及应对产能快速爬坡的挑战会持续不断地出现。所谓智能制造也就是要务实运用智能化来解决各个阶段产生的挑战。在构建工业3.0模式自动化系统时，标准的做法是使用运动模块，加上输入/输出传感器以及驱动器搭配PLC来达成自动控制。在未来加入智能CMIDAN+机器人后，达到柔性化、设备再利用以及应对快速爬坡的目标。新的模式将会增加模块的重复使用率，并减少非标设计。模块化可以提供智能的能力以及快速执行所带来的机会。工业机器人实质就是柔性化模块的代表，这对设备再利用以及应对快速爬坡的挑战是必然的趋势。因此，CMIDAN技术和机器人技术的结合可以推动智能制造，并进一步扩展到智能生活。

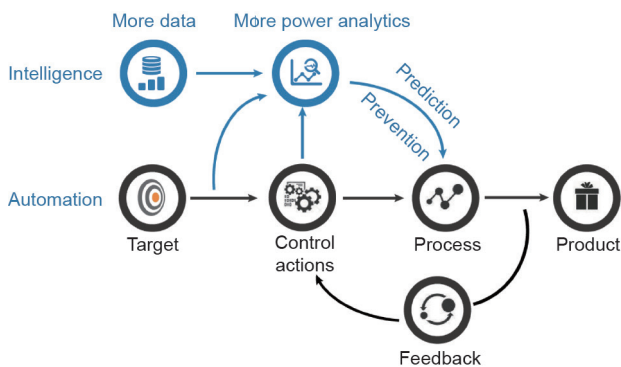


图3. 增加智能以预测变化。

2. 工业界的机器人在智能制造中扮演的角色

正如机器人之父Joseph F. Engelberger所说的：“只能做一件事的自动化机器并不代表机器人，机器人应该具备处理工厂里广泛任务的能力。”随着控制、驱动和传感技术的进步，机器人可以处理的工作范围不断扩大。但是，成功的应用必须由经济学驱动。

2.1. 十年磨一剑，机器人需持续升级

机器人之父Joseph F. Engelberger与搭档George Devol在1959年推出了世界上第一台工业用机器人Unimate，用在美国新泽西州特伦顿（Trenton, New Jersey）的铸铁件工厂做上下料移栽[6]。这项新技术吸引了通用汽车（General Motors）的注意，进而其尝试用机器人来进行车身的点焊工作。这项应用开发了10年之后，1969年，汽车行业首次大量导入17台Unimate机器人用于美国俄亥俄州Lordstown的汽车工厂作车身点焊，这10年付出的努力终于达成了这个重要里程碑！后续也推广到其他厂区。然而，业界的竞争者也没有停歇，12年之后，到了1981年，具备高机动性与易维护的电动马达机器人已比油压式的Unimate更受欢迎。Unimate机器人最终在汽车点焊领域内消失了。时至今日，汽车点焊行业门槛已提高，已经发展成为一项系统性的产业。这样的经历告诉我们，不能沉溺于产品初期的成功，所有行业都必须持续不断地创新。即便是行业巨人，也只有不断地进步才能留在战场上。

2.2. PUMA——一款隐退的机器人，延续了40年的老传奇

1977年，Engelberger收购了Vicarm，一家由Victor Scheinman创立的公司，该公司生产由小型机控制的电动机器人手臂，并将其更名为Unimation West。他进一步将Vicarm的设计发展为一款机器人，命名为可编程通用机器装配（programmable universal machine for assembly, PUMA）。相较于Unimate，PUMA用的是电动马达及微电脑处理，其体积小且灵活，被试验用于组装的制造过程。PUMA同时也与各类视觉系统及自动流水线连接，执行流水线追踪与拣包的工作。这类机器人与视觉整合的智能应用成为多年来机器人研究开发的经典课题[7]。PUMA也成为教科书上机器人操作与控制的经典范例，其运动学上的设计在往后的40年间仍然蔚为风潮。

虽然PUMA以其灵巧性及编程能力引领流行，但它在尝试进入组装产业时，却没有达到最初的期望。与此

同时，一个更简单、更便宜的机器人设计，即选择柔性装配机器人手臂（selective compliance assembly robot arm, SCARA）的机器人在实际产业中更有效地导入了。在日本，SCARA参与制造了大量录像机（video cassette recorder, VCR）播放器与汽车零件[8]。在这里得到的教训是，在组装行业中，自动化的成本因素最为关键，额外智能虽然有好处，但是成本在实际组装行业还是优先考虑的因素。在当今与未来的组装应用中，基本的成本因素依旧不变。此外，机器人的尺寸对小零件组件很重要——越小越好。

机器人与人类并肩工作的想法最初被认为是PUMA的应用，尽管它当时没有成功。现在协作机器人在体积、轻量、编程、安全与灵巧等方面都有提升，然而精益求精的组装流程仍然是以更低的成本及更快的速度来达成更高的产出为目标。组装自动化事实上仍然是个相当有挑战的知易行难课题，远远比许多人的评估还要有挑战。对于机器人导入组装的经济考虑还是大过机器人智能。

2.3. 系统整合机器人

感谢多年以来机器人领域的大学教育及相关教科书普遍化，使编写程序语言及控制机器人的知识得以广泛传播[9]。市面上也有众多的开源程序与工具使控制机器装置的门坎得以降低，但是能够进行机器运动与在工业界开创机器人事业之间存在着显著差异。传统的机器人企业已在服务端、应用端、开发端、教育训练端建立声望，并能够与供应链合作共同降低成本，这样才有机会持续站稳。机器人行业仍然需要搭配外围的系统整合才有发挥空间，努力加入有特色的应用功能才会有市场机会（图4）。虽然系统整合机器人（system-integrated robot, SIR）可能灵活性较低，但它们可以实现比标准机器人更高的产量和更低的成本，因此，SIR定位于专用机器人和传统机器人之间，旨在服务特定的应用。

2.4. 针对3C产业的自动化机器人

凡是与计算机、通信、消费电子相关的产品及服务皆可称为3C产业。这是个庞大的产业，有着大量设备及作业员需求。3C产业近代的成长体现在智能手机的使用日益增加，智能手机从根本上改变了人们沟通交流的方式。

从制造的观点来看，智能型手机由背壳、前屏幕、印刷电路板（printed circuit board, PCB）和内部零件组成。背壳材料由塑料发展到金属，如镁合金、铝合金、

不锈钢、钛合金，还有其他非金属材料，如玻璃、蓝宝石与玻纤材料。单就背壳的制程，从压铸出金属原型到表面抛光处理，可包括上百个步骤。针对背壳制程的机器人自动化还是在脏污、危险、无聊（dirty, dangerous, dull, 俗称“3D”）的环境中使用。3C产业的一个特性就是生产期间快速地爬坡与快速下坡。这需要大量的设备制造能力及设备调度以达到快速规划、设计、加工、测试及最终调机导入。典型的3C机器人应用见图5（a），现阶段以及潜在的组装作业应用见图5（b）。针对3C产业，机器人的机会仍然会再持续增长。

制造多样式显示屏的面板需要投入大量的资金。大多数的面板制程需要在无尘环境中执行，用到高可靠性的设备及独门的制程知识背景。制造面板的制程需要使用特殊定制化及高精度的设备，精密黏合玻璃与触控面板，以达到生产力及可靠性的要求。PCB与表面贴装技术（surface mount technology, SMT）组件同样也需要精密的设备与系统进行生产。机器人的机会则存在于多样且次要的上下料及物料输送任务。

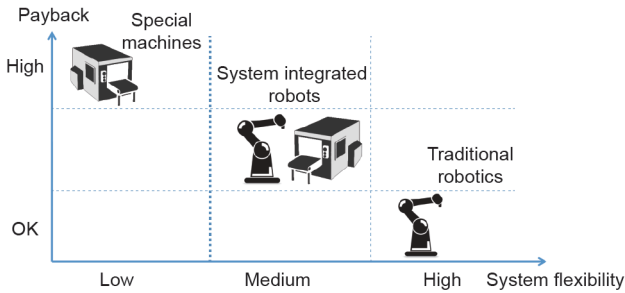
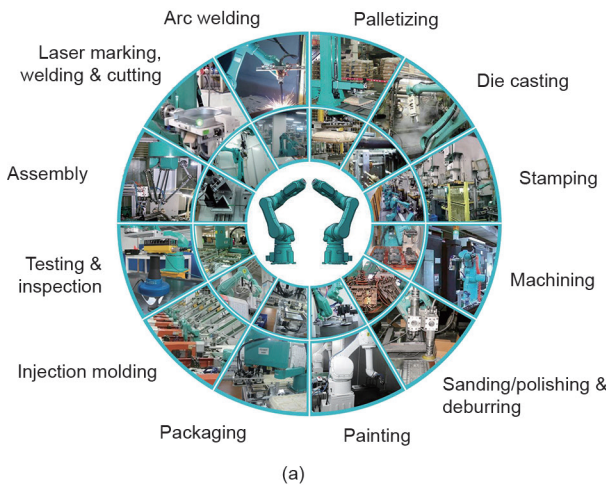


图4. 系统整合机器人。



2.5. 3C 产业的 3C 需求

组装业一向被认为是机器人应用的巨大潜在市场。当3C产品的需求数量上升，急需快速架设生产所需的流水线与工作器具，作业员按照工作流程的标准作业程序（standard operating procedure, SOP）执行重复但有限的任务。这样的量产模式是典型的工业2.0范例。工业3.0则包含了控制系统，但未完全将大部分组装自动化，如同汽车产业的终端组装作业，至今仍然依靠着双手在整洁的车间里组装最终的汽车部件。这些组装作业相当依靠人工操作，可是当作业员的需求数量增大，为了减轻招募作业员的压力，导入自动化的想法会不断地产生，这就需要制造业者有智慧地进行长期规划并投入开发。人工的优势在于灵巧性、快速的视觉/触觉反馈以及弹性化，机器人组装的挑战很大，当人工成本增加到某一阶段，机器人应用于组装的优势将会明朗化。

装配厂面临的另一个挑战是占地面积。随着大量产品的生产，占地面积非常大。因此，自动化和机器人系统必须紧凑以节省空间。装配中机器人技术的另一个挑战是感官能力。人类工作者可以使用许多认知能力，如视觉和触觉，诸如此类的能力在装配操作中的许多任务中是必需的。简单来说，3C产业的要求也可以用“3C”的形式概括：成本、紧凑和认知。

2.6. 移动机器人及移动机器人系统

自动驾驶小车（automated guided vehicle, AGV）在工厂里协助运送待组装的部件及接受命令，执行弹性的任务。当产品或制程变换时，它们可以被再次编程并

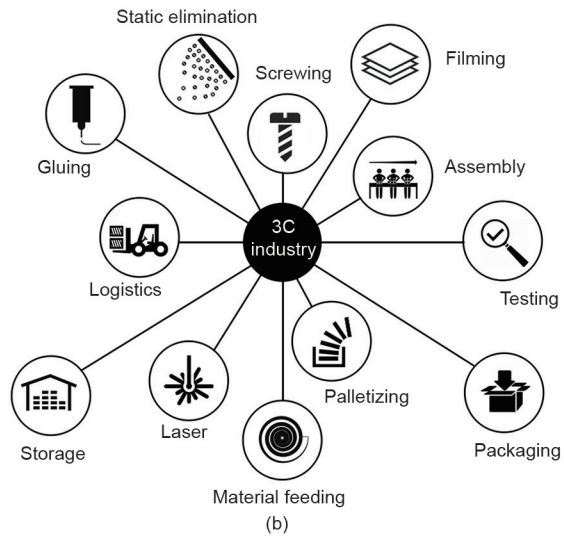


图5. 3C产业制程。

完成任务。这样的特性可以将它们归类为机器人，或更确切地称之为移动机器人（mobile robot, MR）。一个“熄灯工厂”通常会有一些移动机器人或流水线协助搬动产品及组件（图6）。移动机器人与自动化生产线及主控机器人进行连接，进而达到沟通与协作，促使整体工厂自动化。在这个情形中，移动机器人成为了一个移动机器人系统（mobile robot system, MRS），可以主持物流计划、呼叫、排程与故障处理。不同的车间有不同的需求，这需要许多定制化来配合MRS。如同组装自动化，成本对工厂导入MR及MRS的意愿有很大的影响。MR及MRS尚有很大发展的空间。这也是个分布式的市场，有些是高端、高度功能性的系统，也有些是低端、精简的系统，所提供的服务与支持也是非常多样化，从积极支持到完全不提供支持，这分布式的市场可能将会迎来更多的创新及商业模式。MR与MRS是在完善智能制造中自动化机器人的重要伴侣。

2.7. 工业机器人智能——分配式与连接式

科幻小说与电影激发了人们对机器人的幻想，因其有高度智慧及类似人类的思考与行为。但是工业机器人是用来辅助制造，并不是为了达到单机的高智慧。单机智慧与分配式智能其实是不同的开发理念。虽然非常特殊的计算机或机器人可能能够赢得国际象棋比赛或自动驾驶汽车，但这并不代表工业机器人也必须往此智能模式方向发展。事实更像是Moravec的悖论：“使计算机在智力测试或玩跳棋时表现出成人级别的表现相对容易，但要展现出一岁儿童的认知能力及机动性就相对困难甚至不可能。”[10]在工业机器人的应用里，机器人在工厂执行的任务是局限性的物理动作，而不是高智慧的判断。从科学家针对移动步法所做的研究来看，工业机器人的动作还是相对简单的。工业机器人的智能部分可以

以“Agent”（“代理”）的方式来看，任务分配至控制系统的底层进行处理，加上传感器、视觉影像、逻辑控制与通信共同协作而达成底层级（或称为核心层）的精简有效的控制系统。系统里众多的“代理”相互沟通进而产生了一个群体智能。这个群体智能可以通过高速的串口通信连接，这样在现实世界里才是工业机器人的智能。

2.8. 在彩虹尽头寻找黄金，面对残酷的现实

设备制程是从零组件供应链、自动化机器人、工厂车间，最后到使用者（图7）。此过程像是一道绚烂的彩虹，吸引许多人对此行业关注并抱以期待。当彩虹出现，爱尔兰民间故事中的小精灵（Leprechaun）就会忙碌地把黄金藏在彩虹的尽头，人们便汲汲营营地去寻找黄金。有些“黄金”也许存在于制造工厂与终端客户之间，有些“黄金”也可能存在于零组件供应链与自动化系统整合之间。“机器人的彩虹假设”可以理解为：“智能能够提升起机器人彩虹，使之又高又美，但是真正的黄金还是藏在彩虹的尽头。”智能也可以提供铲子及工具协助挖掘“黄金”，这样可能使“黄金”比较容易被寻获。

（1）为了寻获“黄金”，有些人希望找到机器人的

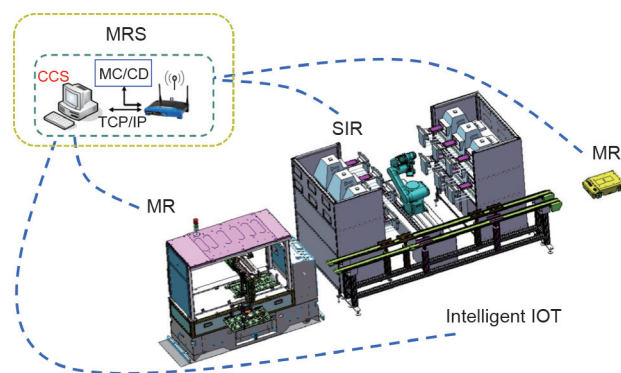


图6. 智能工厂中的MR与MRS。

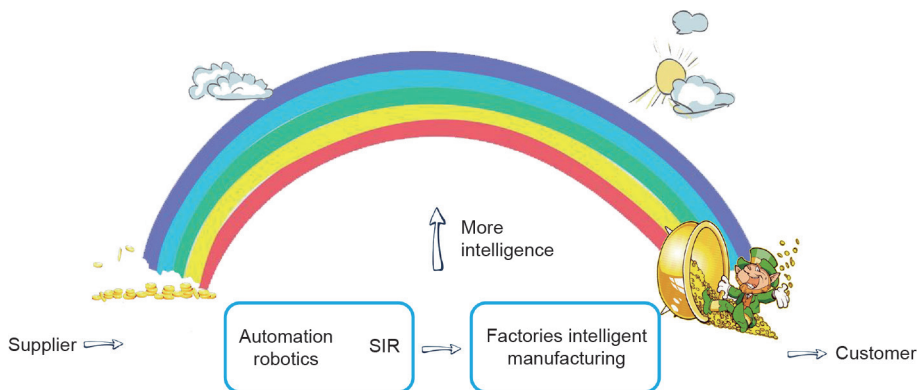


图7. 彩虹尽头的“黄金”。

“杀手级应用”。但小精灵Leprechauns是调皮的，让人们无法轻易地找到“杀手级应用”。持续“耕耘”、技术开发及系统组件能够帮助有效且成功地找到这些应用，这样才有可能接近隐藏的“黄金”。但是为了获得真实的结果需要相当多的持续努力。至于“杀手级应用”可能不是“找”来的，而是要实际辛苦地“耕耘”才会领悟到。

(2) 对于智能制造与工业机器人来说，能够协助解决制造过程中的问题是首先要考虑的。或者说，工业机器人最大的贡献是在于对制造业生产力的改善而不是机器人自身的获利。

(3) 推动制造业自动化的计划，如“中国制造2025”计划，加快了自动化，并将其扩展到更多地方和更广泛的经济领域。这些举措可能成为自动化设备制造商和零部件供应商的财富。生产高质量的部件和模块需要付出艰苦的努力和精湛的工艺。

(4) 相比起小型制造企业，大型制造企业（large manufacturing enterprise, LME）通常有较多的技术资源及内部市场。为了掌握新的技术与加速自动化，LME会倾向于研发自己的机器人，或与相关伙伴结盟又或并购机器人领域的公司，来快速建立自主的机器人事业，同时也加快了自身智能制造的脚步。

(5) 广泛物联网（internet of things, IOT）应用是必然的趋势，对于非传统型的机器人企业来说，应用更多强大的以ARM（Advanced RISC Machine）为基础的控制与认知设备，是一个创新的机会，向支持互联网的机器人添加人工智能也有可能开启新的应用模式。但是面对残酷的现实，高智慧的机器人不一定代表高获利。

(6) 3C产业能够催化新奇机器人系统或SIR搭配分布式智能系统的建立，以达到成本、体积和认知上的要求。通过网络或云端加入人工智能的能力可扩展部分SIR的应用领域。

在20世纪80年代，伴随着初期美国的“机器人热潮”，当时有超过200家机器人公司，这些公司后来渐渐

地消失了[11]。现在，中国有着超过千家的机器人公司，人们似乎被无处不在的机器人市场所吸引。在未来的几年后会有所变化。专注于工匠精神及基本功的公司会在该行业中前行，逐步完善，永续发展。

3. 总结

在英国数学家路易斯·卡罗尔（Lewis Carroll）的《镜中奇遇记》（*Through the Looking Glass*）一书中，红皇后对艾丽斯说到：“现在你看，你用尽了气力奔跑只为了让你留在原地。”同样可以领悟到：在产业中发展及实现机器人制造不是件易事，为了持续停留在智能制造里的脚步，我们用尽了努力只能让自己停留在原地而已！若期望前进，则需要发扬更踏实的工匠精神去发展、创新，还要加上适当的投资才有希望。这样结合技术与投资就有机会带来有影响力及长远的改变。

Reference

- [1] Plattform-i40.de [Internet]. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy; c2018 [cited 2017 May 15]. Available from: <https://www.plattformi40.de>.
- [2] The State Council of China. China Manufacturing 2025. Beijing: The State Council of China; 2015. Chinese.
- [3] Ball K. How programmable logic controllers emerged from industry needs [Internet]. Downers Grove: CFE Media; 2008 Sep 1 [cited 2017 May 15]. Available from: <https://www.controleng.com/single-article/howprogrammable-logic-controllers-emerged-from-industry-needs/273261.html>.
- [4] Hammer M, Champy JA. Reengineering the corporation: a manifesto for business revolution. Eng Manage 1993;3(5):205.
- [5] Lee J, Bagheri B, Kao HA. Recent advances and trends of cyber-physical systems and big data analytics in industrial informatics. In: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics; 2014 Jul 27–30; Porto Alegre, Brazil; 2014.
- [6] A tribute to Joseph F. Engelberger—the father of robotics [Internet]. Ann Arbor: Robotic Industries Association; c2018 [cited 2017 May 15]. Available from: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/>.
- [7] Engelberger JF. Robotics in practice management and applications of industrial robots. New York: Springer, US; 1980.
- [8] Stark J. Handbook of manufacturing automation and integration. Boston: Auerbach Publishers; 1989.
- [9] Choset H, Lynch KM, Hutchinson S, Kantor G, Burgard W, Kavraki LE, et al. Principles of robot motion: theory, algorithms and implementations. Cambridge: The MIT Press; 2005.
- [10] Brynjolfsson E, McAfee A. The second machine age—work, progress, and prosperity in a time of brilliant technology. New York: W. W. Norton & Company, Inc.; 2014.
- [11] Day CP. Who framed roger robot. SME Paper 1989 Jan:TP89PUB364.