



智能工业指数

促进制造业的蜕变



目录

前言

内容摘要

引言

工业4.0:制造转型的催化剂

制造业:新加坡经济的核心支柱

推动国家经济增长和转型的重点项目

智能工业指数

3个基础模块、8大支柱以及16项评估指标

指数简介

实践工业智能化

展望未来

智能工业势在必行

评估工具:16项评估指标

致谢

参考文献

术语表

新加坡经济发展局与国际测试、检查、认证与培训机构TÜV SÜD联手创建
经由业界和学术专家组成的咨询团验证

前言

无论是生产业、物流业、航空业、公用事业等产业类,今日的任何工业正受大数据、机械技术、增材制造等种种科技的影响,从而推动实体工业与虚拟数字科技的融合,也就是普遍称为“工业4.0”。工业4.0可改变制造业的性质:以往独立的制造厂将会互联互通,形成集群的制造网络;人类在未来的工作岗位上将会与机器合作,管理智能化设施与全球供应链。这一切将为新加坡经济带来无限的商机。

尽管如此,不少企业仍在摸索如何着手所谓转型变革,各个工业领域转型的步伐也参差不齐。因此,新加坡经济发展局以及TÜV SÜD联手创造了经由专家验证的“新加坡智能工业指数”。该指数能为任何企业提供一个共用的框架,让企业更加得心应手开展并持续发展各自的转型计划。

除了加速推动新加坡工业的转型,此指标更是代表政府与企业、人民共同迈向先进制造时代的起点。让我们一同合力开创新加坡的未来!



新加坡经济发展局
主席
马宣仁医生

内容摘要

物理与数字世界的日益融合已促使制造业踏出工业4.0新时代的第一步。

工业4.0能改造提升生产过程以及供应链管理, 甚至重新定义制造价值链。全球任何企业都能掌握工业4.0所带来的优势, 变得更具效率、更敏捷、更快速。工业4.0也为新加坡开启了一扇机会之窗, 巩固我国为全球制造业中心的地位, 并实现本地制造业的转型。

智能工业指数

工业4.0的浪潮正席卷全球。根据普华永道 (PwC) 发布的《2016全球工业4.0调研》报告, 近四分之三受访企业预计他们的业务会在接下来五年高度数码化。然而, 麦肯锡 (McKinsey) 的《2017年数码制造业国际专家调研》报告却显示, 受访企业觉得阻碍工业4.0的采用, 主要原因来自于企业缺乏清晰的愿景、策略和有系统规划。

新加坡智能工业指数旨在协助企业克服这些挑战。该指数是新加坡经济经发局 (“经发局”) 与国际测试、检查、认证与培训机构TÜV SÜD (“TÜV SÜD”) 联手创

建, 而且经由业界和学术专家组成的咨询团验证。它旨在提供各类大小企业一套综合评估工具, 以便克服工业4.0所带来的挑战。此指数涵盖工业4.0的3大核心要素 (科技, 流程和企业组织), 同时致力在技术严谨性和可用性之间取得平衡。

指标分为3个层级: 最上层由科技、流程和企业组织3大基础模块组成。支撑这3大基础模块的中层是8大支柱, 以及底层的16项评估指标, 以便企业评估其设施智能化的程度。



图表1: 智能工业指数框架

指数简介

此指数列出了企业在工业4.0转型过程中的4个步骤，简称LEAD（Learn掌握、Evaluate评估、Architect构建、Deliver落实）：

- ① **Learn（掌握）**：掌握工业4.0的核心概念。指标不仅能帮助企业提高对工业4.0核心概念的理解，还能对个人、业务单位和企业合作伙伴之间建立通用术语。
- ② **Evaluate（评估）**：评估企业设施当前的整備度。有了指标所定义的16项评估指标，企业可一一评估当前的流程、系统以及组织结构，由此判断他们处于智能工业指数评估系统所设定的其中6个阶段。虽然企业应完成所有16项评估指标，但是每个指标的相对重要性仍取决于企业的需求以及所属的工业类别。
- ③ **Architect（构建）**：构建一份全面的转型蓝图。企业可利用指数进行对照检查，以确保已考虑所有的基础模块、支柱和评估指标。由于16项评估指标都列出如何采取相应的步骤，以逐步升上所设的6个发展阶段，智能工业指数能引导企业分阶段改进营业模式。这有助企业设计具高效益的措施与计划，并构成拥有明确发展阶段、目标和里程碑的蓝图。
- ④ **Deliver（落实）**：落实并持续发展转型计划。一旦企业制定其转型蓝图，此指数也可作为企业实时蓝图，供企业用以衡量和优化其工业4.0转型计划。

展望未来

即使起点因企业而异，无论任何工业类别、任何企业都能在工业4.0转型中受益。智能工业指数可为企业提供切实可行的框架，引导企业从何起步、扩大并持续发展工业4.0的规划。

引言

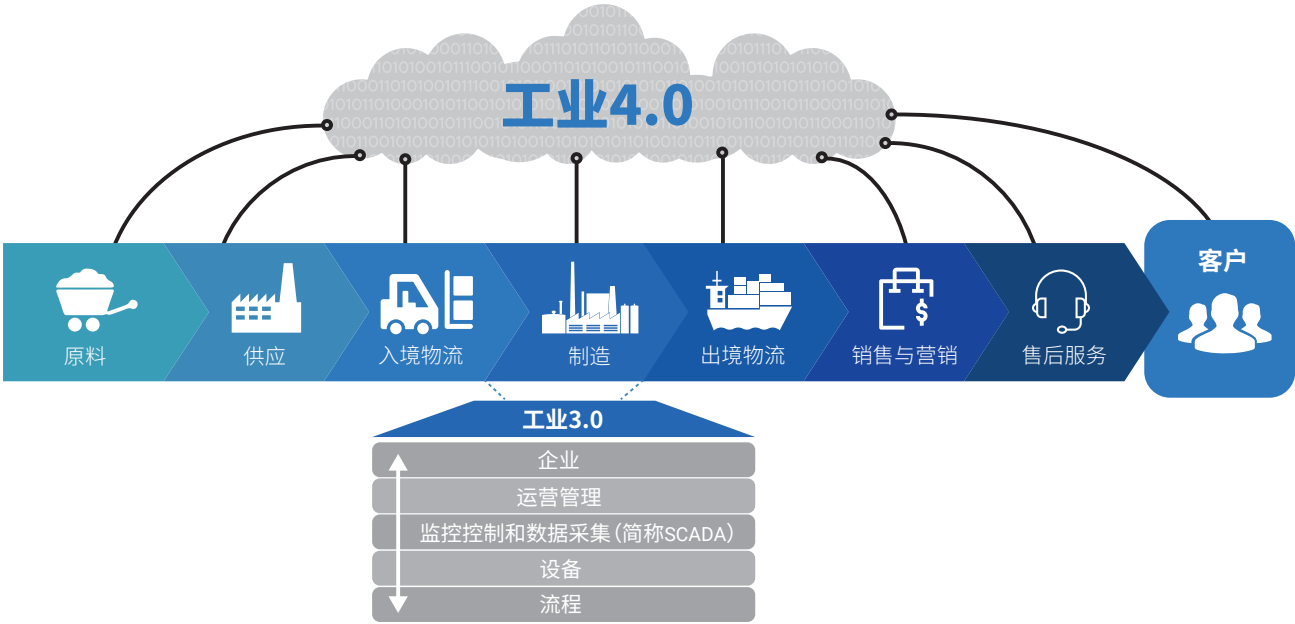
工业4.0:制造转型的催化剂

工业4.0正席卷而来。与之前工业革命所带来的新兴科技与技术例如机械化、大量生产与信息化不同的是，第四次工业革命将实现实体与虚拟世界的融合，创造下一代的信息物理系统，把企业带入创新与改革的新时代。

制造业已因工业4.0在多方面出现了根本的变化。曾经的程控逻辑如今转变成机械、设施互联互通的自治智能网络。曾经的静态程序如今转变成能应对实时需求，自动适应、自动调整的程序。曾经受严格控制的中央工厂管理系统更是转变为分散式的智能控制与决策系统，从而让制造链更灵活，企业也因此更具竞争力。

随着制造价值链（例如产品生命周期和供应链）的数码化，企业除了能够为消费者提供产品和服务，也能介绍新颖的服务和商务模式。新一代制造过程已与企业流程垂直整合，也与生产价值链横向链接，因此已不仅限于工厂了。如此的融合让企业能够更高效、灵活和快速地应付客户的需求。

总体而言，工业4.0带来的转变将彻底影响全球经济及企业：流程日趋数码化、一体化；设备、机械和系统可自主改善并优化流程和运作管理；员工和机器合力制造出高效率、灵活性及适应性强的智能设施。



图表 2：工业4.0的概念

“

新加坡智能工业指数这套框架，不但具有实用性，也保持概念与技术的严谨性，两者之间更是取得平衡。

埃尔朗根-纽伦堡大学 (University of Erlangen-Nürnberg)
-Ing Siegfried Russwurm教授

”

制造业：新加坡经济的核心支柱

推动国家经济增长和转型的重点项目

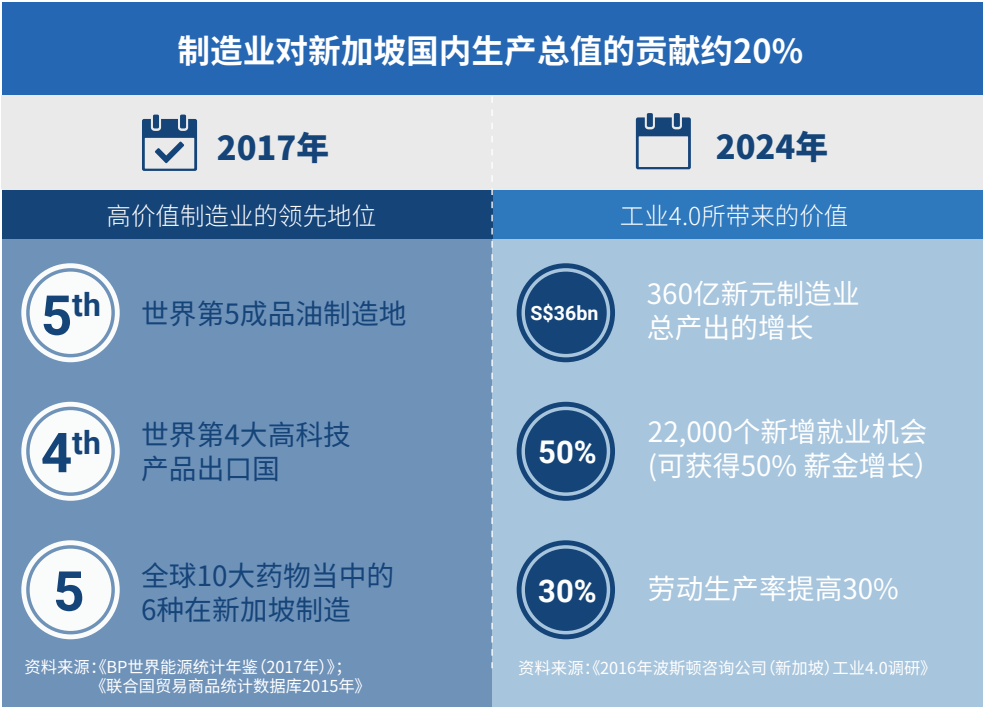
经过数十年的经济发展，新加坡的制造业渐渐多元化，而新加坡也分别在航空、半导体、化学和生物医药科学领域等占有领先地位。因此新加坡高价值制造业中心的地位才能获得国际企业的认可。例如，全球10% 集成电路芯片是由新加坡厂房制造、组装或测试；全球10大药物当中有6种是在本地制造。此外，尽管新加坡没有油气资源，但是裕廊岛（新加坡能源与化工的综合性基地）已成为世界第5大成品油制造地，化工产品出口量排在全球10强内。

新加坡因我国精深工程技术和创新能力而在《彭博创新指数2017》报告中的制造业增值组别里排名全球第5。我国继中国、美国和德国之后是世界第4大高科

技产品出口国。

波士顿咨询公司 (Boston Consulting Group) 的一项调查研究显示，到了2024年，工业4.0可为新加坡带来额外360亿新元制造业总产出、将劳动生产率提高30%，并创造22,000个全新就业机会。由此可见，工业4.0可以让新加坡巩固其全球制造业中心地位。

随着全球出现更多对创新密集经济体有利的生产条件，新加坡因拥有熟练技能的工作队伍以及创新的实力，从而成为各大企业构建并落实工业4.0转型计划的首选地点之一。



图表3: 工业4.0对新加坡制造业的影响

“

新加坡旨在成为全球制造业、创新科技的首选基地之一。由于新加坡独特优势在于企业、工业生态系统以及政府之间紧密的合作关系，因此企业能顺利地落实工业4.0的概念和科技，成功地面向新加坡以及周边市场。

新加坡经济发展局
助理局长
Lim Kok Kiang先生

”

智能工业指数

3个基础模块, 8大支柱和16项评估指标

目的

工业4.0正在兴起。根据经发局与埃森哲 (Accenture) 在2017年联合展开的一项调查, 在新加坡的能源、化工和公用事业领域中, 每10家制造商就有7家计划在2020年之前落实工业4.0转型方案。大多企业也认为工业4.0能大力提升组织效率和业务生产率。

然而, 国际和本地企业似乎还在摸索工业4.0的概念, 以及其转型所能带来的价值。因此, 能有效实施工业4.0因工业、企业而异。许多企业或许仍有不少疑问: 什么是工业4.0? 我的企业能如何从中受益? 我该从何开始推动工业4.0转型计划? 目前我的业务有哪些需改进的环节、未来有哪些机遇?

制定新加坡智能工业指数的目的就是希望能为企业一一解答这些疑问。该指数致力于平衡技术严谨性和实用性: 除了涵盖3个核心评估类别 (科技, 流程, 企业组织), 以便企业打造新一代设施, 也明确勾画每个阶段应达成的状态, 以及进入下个阶段所需采取的步骤。指标也为企业提供以下实践知识, 如:

- 关于工业4.0的基础知识以及该转型所能带来的优势
- 企业以及属下的设施工业4.0的整备度; 以及
- 企业该如何针对性地、循序地改进

智能工业指数由经发局与TÜV SÜD联手创建, 而且经由业界和学术专家组成的咨询团验证。

全球任何企业无论规模大小、离散或流程型制造、业务成熟度高低, 都能利用该指标拟定战略, 决定如何开始推动工业4.0转型计划、扩大业务规模、采取哪些措施来持续发展业务。

“

随着数码科技的发展日新月异, 以及制造业里的流程集成的趋势, 这正是企业推动工业4.0转型的最佳时机。工业4.0浪潮可为全球企业带来颠覆性科技, 以便创造高效率、数字综合性的智能设施。这对有意带头改进制造业的企业来说是一个难逢的机会。

西门子数码工厂、流程工业与硬盘
(Siemens Digital Factory & Process Industries & Drives)
执行副总裁
Raimund Klein先生

”

指数简介



图表4: 创建指数的过程

该指数首先进行有关工业4.0概念和框架的文献综述研究, 包括产业分析和格局报告, 商业调查以及由权威性协会和业界代表创建的行业模型。其研究的核心参考文献是来自于德国并是世界规模最大的产业网络Plattform Industrie 4.0制定的“工业4.0参考架构模型”(即Reference Architecture Model Industrie 4.0, 简称RAMI 4.0)。RAMI 4.0 已被视为工业4.0构架的参照标准, 获得业界协会和专家的认可。

除了参照RAMI 4.0, 该指数也参考德国科学与工程院 (German Academy of Science and Engineering, 简称acatech) 研发的工业4.0成熟度指数 (Industrie 4.0 Maturity Index) 以及德勤咨询公司 (Deloitte) 设计的Bersin人力资本发展模型。

接着, 为了确保新加坡智能工业指数有高技术严谨性和实用性, 制定过程中也征询了业界和学术界专家的专业意见, 从而进一步改良指数。其后便是与驻新加坡的跨国以及中小企业试验指数, 无论是离散型或流程型制造的企业。除了开发指数的核心团队, 企业的高级管理层以及工程与运营团队也一同参与试验指数。有了这些试验过程所获取的见解, 建议和反馈, 开发指数的核心团队便能继续优化指数。

“

新加坡智能工业指数为制造企业点明了工业4.0的意义, 指点该如何启动各自的转型计划。这也是全球首个由国家政府设计和开发, 旨在推动全国各工业领域升级转型的工业4.0工具。由于指数紧密契合工业4.0与其他全球制造倡议, 因此它未来可成为制造业的国际标准。

国际测试、检查、认证与培训机构 (TÜV SÜD) 管理委员会
管理委员会主席
-Ing Axel Stepken教授

”



图表5: 3个基础模块和8大支柱

3个基础模块和8大支柱和

智能工业指数所介绍的3个基础模块(科技, 流程, 企业组织)能让任何企业升级各自的制造设施, 有效地迎接未来挑战, 而支撑着基础模块的8大支柱代表了企业必须关注的关键领域。若企业忽略其中任何基础模块、支柱, 便无法充分实现工业4.0的潜力, 企业更是无法走向未来。

科技基础模块

蒸汽动力的发明催生了第一次工业革命; 电力则促成了第二次工业革命; 电子和信息科技系统则让企业通过生产自动化, 落实前所未有高精度、高效率的生产, 迎来了工业3.0。由此可见, 科技创新是过去工业革命的基石。

来到工业4.0时代, 科技依然至关重要。创新的数码科技, 如云计算, 机器学习以及物联网正在促使互联性超高工业模式的诞生。这紧密的互联性无非是因为集成了实体资产和设备与企业业务系统, 让动态数据持续联通, 也便于即时数据分析, 从而使企业更加灵活、敏捷。

因此, 智能工业指数里3大基础模块其科技模块需要细划为自动化, 互联性和智能化的三大支柱。因为, 企业若要达成其工业4.0转型的目标, 就必须高度自动化, 确保网络连接不中断, 以及落实智能化系统。



工业4.0其中一股颠覆性的力量莫过于数据 – 不断增长、增速、增值的数据。为了迈向下一个工业时代,传统制造企业必须改变它们对数据的看法。数据不再是屏幕上的一堆数字,而是可用以推动企业收入增长以及有助节省成本的战略性资产。倘若企业希望能顺利乘上工业4.0的势头,就应立即建设连通性和智能性的基础设施。

艾默生自动化解决方案,全球Plantweb 解决方案与服务 (Emerson Automation Solutions Global Plantweb Solutions & Services)

副总裁

Vidya Ramnath女士



自动化支柱

自动化是工业3.0的一大特点,指的是如何采用、利用科技来监控,管制和提供产品或服务。制造工程自动化不但为员工减少了重复性工作的负担,也间接提升他们的生产速度,质量和一致性。

虽然自动化是推动企业发展的一股强大驱动力,但是自动化所扮演的角色也正在改变。这是因为由于对小批货品和按需生产的需求不断上升,企业仅通过自动化而提高生产及运营效率是无法满足这需求的。因此,企业必须灵活而不能死板地采用自动化方案,才能快速适应不断变化的市场需求。随着自动化系统变得更加灵活,企业便能无需投入大笔资金或耗时间来改革或重新设计制造流程,而生产更多种类、小批量的产品。制造企业因此会更有能力适应迅速变化的客户需求、也更具竞争力,以便掌握全球各类商机。

互联性支柱

互联性衡量的是设备、机械和计算机系统之间的连通度,以便理解企业资产在通讯和数据方面的互通性。如同自动化支柱一样,互联性在这工业4.0的时代也呈现了新的意义。越来越多系统和终端正从有线、模拟格式转变成无线、数码格式。支持物联网(IoT)终端的质量和数量也同样飙升,从而生成大量的数据;云计算和无线基础设施的技术进步,从而让企业集中收集并管理数据。同样的,曾经独立或隔离系统,如今通过连接企业制造现场,制造设施和企业运营系统的组织级网络而变成综合性系统。

要实现这一切,互操作性则是关键,让企业轻易获取跨资产和系统的数据。企业必须标准化或利用互补的通信技术和通讯协议,建立更开放、更全面、更透明的通信网络。

这类互联性强的系统也使网络物理安全成为实现互联性支柱的一个重要环节。制造过程互联性愈高,该系统愈容易受攻击,其网络攻击的影响也或许更加严重。为了降低这方面的风险,企业必须建立稳固、有弹性的网络物理安全架构。

智能化支柱

如果说自动化犹如身体的肌肉,为工业4.0提供了强大的动力,而互联性是工业4.0的中枢神经系统,那么智能化就是主导一切的大脑了。自动化和互联性支柱着重建立设备,机器和计算机系统之间的联系,以便收集和整合数据,而智能化则着重其数据的处理和分析。现代制造业已不仅是为了寻找又高效率又低成本方案来提升业务;这些方案也得基于数据分析和智能化,才能让业务升级。

智能化支柱可带来的益处显著,影响广泛。有了云计算和数据分析等先进技术,企业就有能力处理大量数据,从而分析、诊断问题,以及找寻改进之处。通过机器学习技术,企业可利用高度智能化的系统,来帮助员工预测设备发生故障的概率以及需求模式的变化。当然,最为理想的,就是企业拥有能自主应对内外业务需求并执行决策的高智能系统。

流程基础模块

若要从升级转型中获得最大的价值，企业需要综合科技与高效、设计周全的流程。毕竟，运用科技来数码化一个设计拙劣的流程只是徒劳，最终只能换来设计拙劣的数码流程；相反的，若能把科技应用在设计周全的流程，这不单可提升业务效率，还能创造全新业务价值。

自现代制造业的开头，改良业务流程一向是企业降低成本，缩短产品上市的时间的途径。以往，企业为了改良流程，专注于提升个别流程的效率。但在工业4.0时代，源于将智能设施与生产价值链各阶段连接起来的新概念，改良流程的定义也包含综合与企业运营，供应链和产品生命周期相关的流程。

这三方面的综合最终融合为一体化的系统。届时，企业将能够在产品管理，生产和企业管理层面共享，处理和整合数据。这正是业务灵活性和效率的新跃进。

运营支柱

运营这第一个支柱包括策划和实行流程，以便生产产品和提供服务。业者最终的目标一向是要以最低的成本，把原材料和劳动力转化为产品和服务，即便是工业4.0时代也不例外。如今，企业能利用新科技和新方法更快地实现这个目标，取得更好的结果。例如，企业可以利用数据分析找出低效率流程并作出改良，从而减少浪费。或者，业者可以使用无线通讯科技连接离散的生产流程和系统，从而远程监控并分散控制资产。

供应链支柱

供应链管理的范围是从原材料的规划与管理，直至成品库存，也就是从生产源头至消费尾端。传统的供应链模式将在工业4.0改革转型下日趋数码化：供应链中的所有流程将通过传感网络连接起来，并且由中央数据中心和数据分析引擎集中管理。供应链数码化也让业者能透视整个供应链，并对成本，库存和运营相关的决定进行决策。

这将让供应链上所有的行业参与者受益，因为从投产至完成生产间相隔的时间缩短了；供应链由于能即时应对市场需求而变得灵活了；供应更为个性化；为内外合作伙伴提供更有效、更透明的供应。

产品生命周期支柱

产品生命周期是一个产品从最初的概念开发到被市场淘汰的整个过程，顺序阶段包括：产品设计、工程、制造、产品使用、售后服务、废弃处理等。任何制造链都必须有稳健的产品生产周期管理架构。不过随着产品生命周期缩短、市场对个性化产品需求提高，业者有必要在不同的产品生命周期阶段进一步推动整合和数码化的进程。

目前，企业可轻易通过日趋先进的数码工具，集合数据、流程、业务系统和劳力等资产的信息，从而创建统一的信息中枢系统。工业4.0同时引入了“数字孪生”（digital twin）的新概念：无论是产品生产周期的任何阶段，在数字虚拟空间中，形成如同物理实体空间的实体资产、过程及系统。数字孪生给予企业两大优势。首先，由于每个阶段所产生的大数据都能无缝地对接，因此各个阶段也能即时优化各自的流程，企业才能更有效地作出决策，又能缩短设计和工程周期，以便更快速地应对客户需求。其次，使用数字孪生解除了使用实体原型的局限性。有了数字孪生，在虚拟空间里，企业能以低成本快速地、大规模地创建和测试无数产品原型。

“

工业4.0是一个新的范例转变：以往企业着重于优化实体资产和系统；如今则着重于集合运营，业务和产品生产周期层面的大数据从而优化流程。无论是企业内部各部门，或企业与外部利益相关者如供应商和客户，工业4.0将加强跨功能整合、促进更密切的合作。

倍加福 (Pepperl+Fuchs) 首席执行官兼德国电气工程师协会 (VDE) 主席
-Ing Gunther Kegel 博士

”

企业组织基础模块

企业组织是工业4.0的第三个重要环节，基础模块。事实上，企业组织跟科技和流程其他两个基础模块一样重要。企业若要在竞争日益激烈的工业4.0时代里与时俱进，就必须调整其组织结构和流程，以确保其员工能适应转型的步伐。

在工业4.0时代，企业必须更注重可影响组织有效性的两大因素。第一、劳动力：从基层运营团队至到最高领导层。第二、治理企业运作的制度。只要把握好这两个因素，企业定能充分受益于工业4.0。

碰上死板的组织架构，缺乏一致性的执行手法和独立的流程，再能干的领导、员工们都会裹足不前。同样的，若没有适当地教育和鼓励企业职员，再开放的创新合作渠道也是毫无成效。

由此可见，企业必须改进人才就绪和组织的管理，才能有效地落实其工业4.0的转型计划。

人才就绪度支柱

企业工作团队推动和落实工业4.0计划的能力，也就是人才就绪度，这将是决定工业转型是否能实现价值的一大关键。越来越多企业的组织结构扁平化，决策机制高度分权，所以，建立一支灵活、优秀的工作团队，并且确保他们在职业道路上有充足的学习与发展机会是至关重要的。除了基层工作团队以外，领导管理层必须建立适当的制度或政策，才能让员工有自我提升的机会，与工业4.0的最新发展并驾齐驱。

同时，为了掌控工业4.0 高动态和数码化的运营，企业整体工作队伍必须具备多元技能，拥有高度适应能力。要做到这一点，企业必须制定有系统的人才发展计划。这计划不仅要契合企业的业务和人力资源目标，也必须有助营造自主学习和个人发展的企业文化。最终，企业就能成功地打造一支高技能、具有自主学习动力的工作团队和核心领导，使任何转型计划发挥最大的作用。

企业组织结构与管理支柱

一个企业的组织结构勾画出企业用以分配，管制和协调每一项职务和职责的内隐与外显规则和政策。由此可见，组织结构能影响企业里各个工作团队的行为和互动以及落实企业目标的策略。就如工业生产的成功与否取决于流程设计的好坏，一个企业能否达成功达目标则取决于其组织结构。

在工业4.0的转型中，决策权将更分散，信息共享更为普遍，而企业内部团队之间或与对外合作伙伴会的合作机会更多。长远来看，企业能更灵活地作出业务决策，更快速应对市场变化。

管理则主要是如何动员工作团队，为共同目标合作。工业4.0已推翻了不少工业根本，而企业管理方面也不例外。企业必须具有强有力的领导层，清晰的发展策略和治理框架，才能如鱼得水般畅游这日益复杂、高度互联互通的世界。企业一旦有了稳健的企业组织结构与管理，将能更灵活、更具协作能力，还能赋予企业更大的能力，有效地设计和落实工业4.0战略。

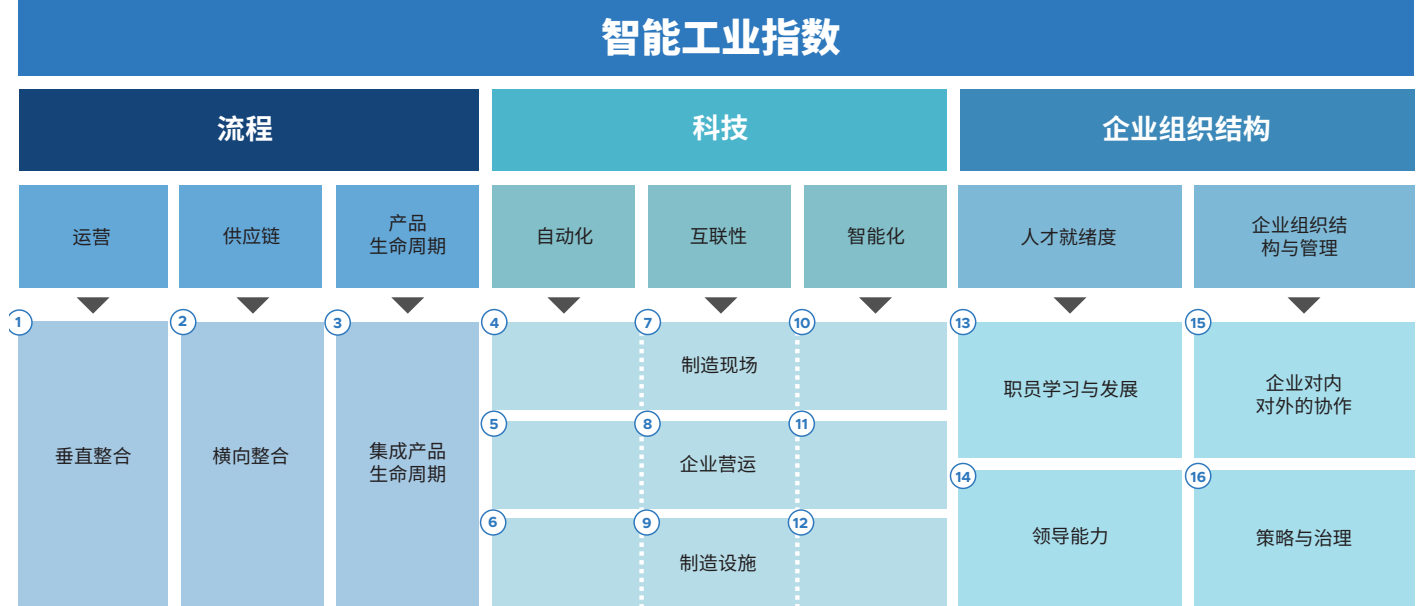
“

企业必须认真对待工业转型，为前所未见的工业未来奠定好数码化基础，无论是目前的工业4.0，乃至第N版的工业改革。工业N时代的核心特征是通过高度智能化、互联互通的产品和环境来打造全方位数码化的价值链，以及创新核心能力和根深的企业文化。此外，除了大力推动数码化进程，企业也必须对企业人才，组织结构和流程作出调整，迎向“万物皆联”的未来。

埃森哲咨询公司 (Accenture)
执行董事长
Senthil Ramani先生

”

16项评估指标



图表6：16项评估指标

支撑最上层的3大基础模块和中层8大支柱的是底层的16项评估指标,可供企业评估当前其设施智能化的程度。下面简要概述16项评估指标的内容。欲知评估指标框架的完整内容,请查阅第22页。

评估指标1:流程——垂直整合

根据德国国家科学与工程院 (acatech) 对工业4.0 理念的定义,垂直整合是数字化工厂应具备的三大主要特征之一,指的是其工厂里自动化金字塔中,所有层级流程和系统的垂直整合,以建立一个互联互通、端到端的数据线程。该指标旨在评估流程、系统以内与之间是否存在正规的连接以及连接的的紧密度,同时也把数据交换和分析的方式纳入评估范围。

若要符合垂直整合指标的最高水平,在生产和运营层的所有操作和信息系统必须集成自动化又可互操作的柔性网络,从而实现无缝的数据交换,分析和决策的理想状况。这将会加强企业流程与系统的交流,提升灵活性与运营效率,让业者能够针对资源供应、运营需求或产品类别等各种变化,作出更快速、更协调的反应。

评估指标2:流程——横向整合

横向整合是工业4.0的另一主要特征,指的则是在生产价值链上,企业内部和与其他利益相关者流程的横向整合。该企业流程包括:需求规划、采购、物流以及售后服务;而价值链上的利益相关者则包括:供应商,商业伙伴以及客户。

与垂直整合相同,横向整合指标评估的是生产价值链上是否存在正规的信息连接,以及数据交换和分析的方式。由于企业流程和系统越来越细分、越来越数碼化,横向整合评估指标为企业勾画出最理想的状态:企业内部流程和与供应商和合作伙伴流程的整合,以创建一个可互操作、开放的网络。这有便于整个价值链上的所有利益相关者相互协调和优化他们的流程,任务和决策。除了能够提高生产力和缩短交货期之外,这样经整合的价值链还有助创建新业务和运营模式。

评估指标3:流程——综合性产品生命周期

综合性产品生命周期评估的是生产产品全过程中所涉及的劳力、流程和系统与彼此的整合度。该指标也评估企业如何在产品生命周期的不同阶段收集、管理和分析数据。其阶段包括:设计与研发、工程制造、生产、产品使用、售后服务,废弃处理等。

要在综合性产品生命周期评估下达标,企业必须利用数碼工具和系统来建立一个任由企业团队以及其企业的联盟网络访问的“生产信息主干”。

在最理想、先进的情况,企业可为其流程和资产构建“数字孪生”,在虚拟生产环境中免除实体生产环境的各种限制。企业可借此缩短开发周期,改进现有系统,还能更快速地、更大规模地推出新流程和产品。

评估指标4至12

评估科技基础模块则得在3种不同的场合衡量：制造现场，即生产和管理产品的场合；企业运营，处理行政工作之处；以及制造设施、生产现场如厂房或设施。

评估指标4至6：自动化——制造现场，企业运营和制造设施

自动化指标评估的是制造现场，企业运营和制造设施的自动化程度和灵活度，以及各个系统之间的整合程度。较基本的评级代表该企业着重于生产和支援流程的整体自动化水平；较先进的评级则代表该企业着重于灵活自动化，有能力灵活重新调整流程，或为机器设定新任务。这样一来，企业就能在更短的周转时间内，生产更多样化的产品。

若获得最先进的评级，这意味着企业的所有自动化系统已融合为一体，并动态地相互沟通。

评估指标7至9：互联性——制造现场，企业运营和制造设施

互联性指标主要评估所有设施，机械和系统之间的互连程度。

这些资产和系统之间有了正规的连接，企业需提升该连接网络的互操作性、安全、速度和灵活性。这除了让连接的系统能无缝地沟通，企业也能根据不断变化的需求，动态地进行重新配置。满足了这几点，该企业才能晋级较高的评级。

评估指标10至12：智能化——制造现场，企业运营和制造设施

智能化评估指标主要评估信息技术与操作技术系统的能力，探测并诊断任何系统偏差，以便应对不断变化的需求。若处在较基本的评级，这代表该企业实施了基本智能化，拥有处理大量数据以及检测与预设参数偏差的能力。计算机算法和电脑模型不断推陈出新，因此电脑系统愈来愈能探测偏差、识别可能造成偏差的原因，甚至预测系统故障会几时发生。最终，若想达到最高的评级，该企业的信息技术与操作技术系统必须能自主学习和适应新需求，同时还能自行作出优化流程、资产和资源的决策。

评估指标13：组织——职员学习与发展

职员学习与发展策略旨在提升企业员工的才能与技能，以实现企业运营达最佳状态的目标。在工业4.0时代，制定这方面的策略尤其重要，因为新科技和新流程将彻底改变员工的工作性质以及所需的技能。传统的工程技能必须辅以数码新技能，如数据分析、系统整合，以及软件开发，才能满足工作的需求。

长远来说，企业的整个工作队伍都必须能够自信地运用数码科技。因此他们可能需掌握数码分析与解读、自动化管理等的技能。他们也必须习惯与智能机器和系统共同管理业务运营，并适应人类与机器之间的全新交互方式。

作为衡量工作队伍是否做好智能化准备的其中一项标准，职员学习与发展指标主要评估企业提供的学习与课程的质量。任何职业、职能总会随着时间而改变，因此企业应为员工提供不断学习的机会，而有系统地实行并维持其学习与课程，才能帮助员工提升现有技能，也掌握新技能。

除此之外，要确保员工为适应转型做好高度准备，企业所制定的学习发展课程一定要契合业务需求，同时也要与人力资源的其他功能相结合，例如职员招聘和职业发展规划。企业还必须根据员工和业务团队提供的反馈和意见，动态更新学习发展课程，并且积极帮助员工准备好掌握未来所需的技能。所以，企业若能制定综合性、前瞻性的学习发展课程，就能建立一支高效、能迎接未来的工作队伍，以管理和维持工业4.0转型计划。

评估指标14：企业组织——领导能力

领导力指的是企业核心管理是否踊跃利用最新制造业概念和科技，以确保企业与时俱进、保持竞争力。企业转型可不是一蹴而就的事，最需要的就是持续地演变和适应。因此，企业需要坚强、有实力和智慧、富有决心的核心领导层，才能设定明确的愿景，带领企业实现转型的目标。若要企业转型充分发挥价值，企业可采用更扁平的组织结构，以及分权决策模式。

该指标的基本评级不但要求企业管理层熟悉最新的制造业概念和科技，也评估企业是如何获取这方面的知识。例如，企业可建立良好的流程和系统，供其职员吸收有关最新制造业趋势、概念和科技的资讯。

随着企业不断的晋升评级，指标也将评估该领导团队是否有能力自主设计、落实和调整转型策略，以长期发展企业的业务。

评估指标15:企业组织——企业对内对外的协作

企业对内对外的协作指的是企业与内部团队和外部合作伙伴通力实现共同目标和愿景的过程。由于企业的系统和科技形成了紧密的网络,所以大大降低了合作的成本。企业必须有效合作并迅速适应这工业4.0带来的变化。同时,高度网络化彻底改变了企业之间的竞争模式,也加速了变革的步伐。

然而,合作不能光靠技术,也需要企业搭建相应的企业文化和制度结构。因此,企业对内对外的协作指标评估的是企业内部是否设立了正式的渠道,可供旗下职员共享信息、展开合作,以及鼓励职员合作、促进合作项目的制度结构。

例如,较扁平的组织结构可让决策速度变得更快;鼓励合作的奖励制度可推动工作队伍展开更有效的合作。评估指标的最高评级要求企业内部有能力建立跨部门团队,也甚至包括合作伙伴和客户在内。其队伍则有共同的目标,资源以及关键绩效指标(KPI)。

有了高效、透明的合作结构,企业可享有多种优势:借助合作结构带来的多元专长和资源,来应对复杂又涉及多方利益相关者的项目;长远来说,从原本着重于内部竞争,转为拥有共同目标,责任和目标的企业文化。

评估指标16:企业组织——策略与治理

策略与治理指标评估企业如何为了实现长远的目标而设计并落实其计划,包括:确定业务重点、制定战略蓝图、设定包含规则,实践和流程的系统,以将企业愿景转化为实际业务价值。

因此,指标的不同评级能分辨企业发展和落实策略以及建立稳健管理模式的能力。企业须有这两种能力,缺一不可,才可应对流程、系统和职员之间日益紧密的相互关系所产生的复杂性。

不同的评级因此代表一个企业的自然发展进程:从最初把工业4.0转型设定为战略重点,到后来开发、落实、扩展,以至不断改善策略和治理模式。

除此之外,企业须立下明确的愿景和最终目标,同时建立一致的指导原则和支撑架构。这有助企业作出决策和判断哪计划能实现最终目标,使企业有效地减低风险、成功地在变革中导航。

“

工业4.0应是任何首席领导层置于首位的重点项目。要推动企业转型就必须要有强有力的领导能力,才能把企业不再只关注运营需求,而是转向如何为抓紧明日的机遇而打好基础。

Univac
首席执行官
Amos Leong 先生

”

指数简介

实践工业智能化

能否将概念转化为实际商业价值，是测试任何指数实用性的最佳试金石。所以，新加坡智能工业指数旨在帮助企业从实际出发，列出企业可立即采取的4个步骤，简称LEAD (Learn掌握、Evaluate评估、Architect构建、Deliver落实)：

- ① **Learn (掌握)**：掌握工业4.0的核心概念并建立通用术语，方便各方共同合作。
- ② **Evaluate (评估)**：评估企业和其设施当前工业4.0的整备度。
- ③ **Architect (构建)**：构建一份全面的转型和实行蓝图。
- ④ **Deliver (落实)**：落实并持续发展转型计划。

LEAD 框架所列出的步骤将引导企业如何在工业4.0时代中，开启转型之旅，扩大规模，以及维持业务增长。



图表7: LEAD 框架

“

智能工业指数使我们公司制造业团队能盘点我们在哪些方面做得不错、哪些方面还得改进。公司便可以在这个基础上，合力建立一个共同的工业4.0 愿景和战略，采取果断的行动，踏上漫长的转型之路。

Becton Dickinson Singapore
新加坡生产总监
Hashim Baba先生

”

“

虽然工业4.0已经存在多年了,但是许多制造业公司对这概念还是很陌生,尤其是中小型企业。无论企业规模的大小,新加坡智能工业指数是一套又容易使用又实用的参照框架,因此企业能轻易学习并在厂子里应用这些新理念。

人民米粉厂私人有限公司 (People Bee Hoon Factory)
董事
Desmond Goh 先生

”

掌握工业4.0的核心概念并建立通用术语,方便各方共同合作。

若企业要为工业转型打下坚实的基础,就必须深入理解工业4.0的核心概念。然而,根据麦肯锡 (McKinsey) 2016年和2017年《全球工业4.0专家调查》,不少制造业者仍不确定该如何落实工业4.0转型,尤其在起步阶段。另外,调查结果显示,多于半数的受访业者认为他们仍未做好工业4.0转型的准备。阻碍他们推行工业4.0策略的最大原因包括:对工业4.0的概念缺乏了解,或没有制定一套明确的转型蓝图和策略。

即便是在已经启动工业4.0转型计划的企业里,往往也只有其管理层或内部几位专家对工业4.0有所理解。企业若要推动真正的变革,就一定要确保内部更多雇员能与工业4.0接触,并通晓这个全新的概念能如何对他们的日常工作带来积极正面的影响。

智能工业指数旨在帮助企业巩固其机构对工业4.0的知识。

首先,指数的3个基础模块、8大支柱和16项评估指标,可供企业参考理解工业4.0的核心概念和基本原则,包括:

- 工业4.0的主要原则,概念和科技;
- 工业4.0能给企业带来的实际收益和商业价值;以及
- 供企业使用的说明指南,来逐步引导企业以务实的方式,实现理想目标。

其次,指数能为各参与方建立通用术语。工业4.0概念所产生的新技术术语和专用名词可能让许多企业感到困惑,所以无助于他们理解工业4.0。因此,一套易懂又标准化的术语和相应定义能让企业和其员工对工业4.0有共识,并促进企业内部和外部合作伙伴与客户之间更有效的沟通。

一套通用术语也有助确保科技供应商与制造商之间,能够一同找出有待改进的环节,定下需优先处理的事项,以及制定全面的转型路线图,因而更直接、更有效地合作。

“

在不少企业里,各别的科技或运营团队对于工业4.0的理解可能有显著的差异。即是对工业4.0不陌生的企业里,这知识恐怕局限于某几位或某些团队。所以,企业总体对于这概念的理解参差不齐。智能工业指数可以为企业打下良好的基础,让大家建立共识,迈向共同愿景。

劳斯莱斯新加坡 (Rolls-Royce Singapore)
组装和测试处处长
Allan Ferrie先生

”

评估企业和其设施当前工业4.0的整備度

在转型的过程中,掌握工业4.0核心概念虽然是重要的第一步,但是,单凭这是无法让企业制定有效的转型策略。企业必须先了解它当前的状态,才能找出需改进的环节,从而决定如何改进。为了协助企业对其设施进行全面的评估,智能工业指数里有一套16项评估指标的评价矩阵(第22页至第37页),只需1至2天的时间完成。

在进行评估之前,企业应该先考虑下述,整个评估才能提供有意义的结论:

- **评估范围:** 企业必须廓清评估范围,选择评估整个厂房或是各别产品类的制造过程。选择后者适用于生产多种产品的企业,因为每个产品类可能有独特的生产流程,或处于不同的成熟阶段。
- **何方评估:** 定下了评估范围后,企业须要确定需参与评估过程的利益相关者。鉴于指数评估的全面性,按理想情况,企业应选择跨部门的团队进行评估,团队当中可包括厂房总监,或运营部门,数码化部门以及物业部门的高级主管等。
- **如何评估:** 有些企业现有的厂子会有新旧系统共存,因此进行评估时,需要各别评估厂子里的设施。例如,在评估制造设施自动化程度的时候,已完全自动化的暖通空调系统(HVAC)可获得第3评级,而仍需要人工操作的照明系统却取得第2评级。在这情况下,该企业总体的自动化评估指数应该是第2或3评级,决定完全取决于企业。

在评估的同时,企业必要铭记图标8列出的5条评估原则,尤其是第3条原则。除此之外,虽说企业应该慎重对待所有16项评估指标,但是事实上,每个评估指标的重要性和适用性要视各别企业的需求和成本概况而定,所以每一个评估指标不一定同等重要。

比方,要是物业花费占了企业整体运营费用中很大的比例,该企业就应优先检讨与设施相关的评估指标;若是人力成本所占的比例较高的话,企业或许更关注如何制造现场自动化的评估指标。

从更广的层面上,对不同工业的企业来说,每个评估指标的重要性也是相对的。在能源与化学工业领域里,购买原材料大约占据成本的七成。因此,这领域里的企业自然较专注于横向整合,以提高供应链的效率。在半导体的工业领域里,要控制洁净室(clean room)的室温和湿度得耗费大量的电力。因此,制造设施自动化对这类企业是一个重要的评估指标,因为能减低开支。

考虑了上述的之后,企业便可开始进行评估。企业应以开放的态度评估现有的流程、系统和组织结构,并且在各16项评估指标中以第1至6的评级来决定企业目前处在什么阶段。工业转型是一个阶段性的过程,因此不用分数反而以评级来代表各阶段的范围,或许更为贴近企业转型的实际情况。

评估原则

- ① 智能工业指数可供企业理解其设施当前的状况,而不是未来的潜力。
- ② 智能工业指数目前以工业4.0概念为参考点。若日后出现其他适用的制造与工业的概念和科技,就应当考虑在内。
- ③ 即使每个支柱、评估指标的重要性和适用性,可能因企业目前和未来的需求,以及所属的工业领域而有所不同,企业也应一一慎重进行所有16项评估。
- ④ 企业不应一味地争取在所有评估指标都获得最高的第5评级,而是应该根据各自的业务需求和目标,争取晋升更高的评级。
- ⑤ 评估过程并非一次性,而是需要企业持续地使用该指数来评估转型的进程。

图表8:评估原则

“

为了配合我们公司的《智能企业》计划,我们已投资了不少,以期在速度、生产力和质量方面取得更大的进步。我们认为这套指数是个实用的工具,可帮助我们实现更大的业务价值。它不单推动我们去探索过去不曾考虑涉及的领域,也让我们以更具针对性的方式来落实工业4.0策略。

英飞凌科技 (Infineon)
新加坡制造厂总监
Laurent Filipozzi先生

”

构建一份全面的转型和实行蓝图

根据普华永道 (PwC) 发布的《2016全球工业4.0调研》报告,接下来的5年里,国际工业企业计划在全球往工业4.0方面投入年均9070亿美元。如今,越来越多企业开始启动或扩大工业转型计划。恰好智能工业指数可引导企业设计全面的工业4.0转型策略和蓝图,确保企业从正确的基础上起步。

在构建这步骤,智能工业指数能从两方面切实协助企业。首先,指数可以作为一份对照检查的清单,让企业能循规地、慎重地过目3个基础模块、8大支柱和16项评估指标。虽说每个评估指标的相对重要性可能有所不同,但是企业务必把所有评估指标都考虑在内,以照顾到所有方方面面。所以,即便企业最终决定优先考虑某些评估指标,而放弃其他评估指标,但是这份清单能确保企业没草率下这决定。

除此之外,许多工业企业由于专注在满足指数的各个项目,却经常忽略相辅或相邻的领域,失去了改进这方面的机会,错失了可能获取额外益处的良机。企业之所以忽略相辅或相邻的领域是因为:一,企业通常只专注于处理跟手头的问题直接相关的领域。例如,若企业未能实行工业转型的原因出至于聘请许多从事重复性工作的低技能员工,那么该企业会把焦点放在自动化制造现场。二,企业或内部的团队一般都着重处理熟悉的环节。例如,仓库管理团队自然会专注于如何改进供应链。因此,作为一份对照清单的智能工业指数,能让企业有系统地扩大他们现有或未来的转型计划。

其次,智能工业充当企业的指南,把工业4.0转型过程分解并加以实现。有许多有关工业4.0的框架虽然阐明了实现工业转型的最终理想状态,但能够指导企业如何实行转型的框架屈指可数。因此,这些企业,尤其已拥有大量工厂设施的企业,或许没法缩小目前与理想状态之间的差距。企业必须考虑其设施的限制性,例如业务持续性、系统分散性和设施新旧程度等,因为这些因素可大大影响该企业推动转型的规模和可行性。

有鉴于此,智能工业指数里的16项评估指标列出了明确的定义与说明,以帮助企业有系统地设计具有影响力的计划,并构建有明确的进程阶段、时间和目标的执行计划。

“

很多时候,企业过于倾向推动制造现场自动化,反而在其他同等重要的环节投入太少了,比方说流程设计和员工技能。智能工业指数十分实用:企业能利用它来复查核对,以确保没有任何评估指标被忽略,才能确保工业4.0转型计划的收益达至最佳效果。

罗克韦尔自动化 (Rockwell Automation)
制造总监
Yeoh Pit Wee先生

”

“

其实大家眼前都存在着不少工业4.0的愿景,也有数不尽又创新的解决方案来实现这些愿景。然而,要把这些愿景转化为实际、可行的步骤,又要为业务带来实质价值,并不容易。所以,能制定一套明确的蓝图,以确认最适当的应用科技以及执行计划,来实现短期和长期的目标,将对任何企业有很大的帮助。

葛兰素史克 (GlaxoSmithKline)
新加坡制造总监
Lim Hock Heng先生

”

落实并持续发展转型计划

任何转型计划,无论规划得多好,到最后必须执行到位,才能算是一项成功的计划。企业一旦制定好转型蓝图,接下来就需要部署合适的基础设施、系统和流程。企业必须决定最佳战略才能实现在各别阶段和计划项目设定的目标。

为确保转型计划持续保有影响力,企业可以利用指数作为一份可供企业参考对照的蓝图,让企业长期用以测量和改善转型计划。推动转型的工作不应该是一项短期计划,而是需要企业付出长时间努力才能实现的战略。即使企业在启动转型初期取得一些立即见效的成果,企业也应该部署合适的系统,以维持这样的效

益。转型策略必须不断调整和改进。因此,企业应考虑成立跨部门的中央团队来执行计划、监控进度、评估绩效,以及找出日后可改进的地方。

“

跟我们一样,许多企业已经踏上转型之旅。智能工业指数除了可帮助我们应对当前的运营问题,也是一个实用的框架,有助于引导我们日后作出任何决策,以确保转型继续维持影响力。此外,指数能确保我们一直朝正确的方向迈进,时刻关注最紧要的事项。

Chevron Oronite
亚太区制造与供应总经理
Goh Koon Eng先生

”

展望未来

智能工业势在必行

由于各别企业的能力和野心都不一样,所以有意推动工业4.0转型的企业往往是从不同的起跑点出发:一些企业或许需要全面改革其运营、流程和业务模式;另一些则可能需要扩大业务目标,探讨开拓相近的业务领域。尽管如此,无论企业来自哪个领域或从哪个起跑点出发,所有大小规模的企业必能从工业4.0转型中受益。

智能工业指数为企业提供一个条理分明的方法,以启动、扩大和维持转型计划。虽说指数中的3个基础模块、8大支柱和16项评估指标会因为各别行业而相对重要性有所不同,但指数为企业建立了一种通用术语,以提高企业的内部协作,鼓励企业与外部合作伙伴进行创新合作项目。有了智能工业指数,企业可以根据LEAD 框架中的4个步骤而立即果断行动,勇敢地踏上转型、促进业务增长的旅程。

评估工具:16项评估指标

流程基础模块 运营支柱 垂直整合指标			
垂直整合指标评估的是其制造设施里自动化金字塔中，所有层级流程和系统的垂直整合，以建立一个互联互通、端到端的数据线程。			
评级		定义	评级说明
0	未确定	未确定垂直流程。	采用非正式或临时安排的方法，各别管理并执行资源规划和技术生产流程。
1	已确定	垂直流程借助模拟式工具人为制定和执行。 ¹	采用正式的指示各别管理并执行资源规划和技术生产流程。
2	数码化	垂直流程借助数码工具人为制定和执行。	采用操作技术 (OT) 和信息技术 (IT) 各别管理并执行资源规划和技术生产流程。
3	经整合	数码化垂直流程和系统在自动化金字塔中的各阶层获得安全整合。 ²	管理资源规划和技术生产流程的操作技术 (OT) 和信息技术 (IT) 系统已正式连接, 但各别功能的数据和信息交接则主要是人为操控。
4	自动化	经整合的垂直流程和系统都自动化, 只需有限的人为干预。	管理资源规划和技术生产流程的操作技术 (OT) 和信息技术 (IT) 系统已正式连接, 但各别功能的数据和信息交接则主要是机械操控 (设备、机械和计算机系统)。
5	智能化	自动化垂直流程和系统主动分析数据并作出合适反应。	操作技术 (OT) 和信息技术 (IT) 系统已整合, 并经由数据分析给予的洞察而优化流程。

¹ 模拟式指的是数码化时代之前, 用以收集、储存和共享信息的方式 (例如: 纸质追踪系统)。
² 工业自动化金字塔 (industrial automation pyramid) 将系统分5层: 现场层、控制层、生产层、运营层和企业规划层。请查术语汇表中自动化金字塔一词以了解详情。

流程基础模块 供应链支柱 横向整合指标			
横向整合指标评估的是在生产价值链上，企业内部和与其他利益相关者流程的横向整合度。			
评级		定义	评级说明
0	未确定	未确定供应链流程。 ³	采用非正式或临时安排的方法各别管理并执行企业运营流程。
1	已确定	供应链流程借助模拟式工具人为制定和执行。	采用正式的指示各别管理并执行企业运营流程。
2	数码化	供应链流程借助数码工具人为制定和执行。	采用信息系统各别管理并执行企业运营流程。
3	经整合	在生产价值链上，企业合作伙伴和客户的数码化供应链流程和系统获得安全整合。	管理企业运营流程的信息系统已正式连接，但各别功能的数据和信息交接则主要是人为操控。
4	自动化	经整合的供应链流程和系统都自动化，只需有限的人为干预。	管理企业运营流程的信息系统已正式连接，但各别功能的数据和信息交接则主要是机械操控。
5	智能化	自动化供应链流程和系统主动分析数据并作出合适反应。	信息系统已整合，并经由数据分析给予的洞察而优化流程。

³ 供应链流程指的是从起源点到消费点，管理原材料、库存、货物与服务阶段的流程。

流程基础模块 | 产品生命周期支柱 | 综合性产品生命周期指标

综合性产品生命周期指标评估的是生产产品全过程中所涉及的劳力、流程和系统与彼此的整合度。该过程包括：设计与发展、工程制造、生产、客户使用体验、售后服务、产品丢弃等。

评级		定义	评级说明
0	未确定	未确定产品生命周期流程。 ⁴	采用非正式或临时安排的方法各别管理并执行产品生命周期流程。
1	已确定	产品生命周期流程借助模拟式工具人为制定和执行。	采用正式的指示各别管理并执行产品生命周期流程。
2	数码化	产品生命周期流程借助数码工具人为制定和执行。	采用数码工具各别管理并执行产品生命周期流程。
3	经整合	在产品生命周期的个阶段上,产品生命周期流程和系统获得安全整合。	管理产品生命周期流程的信息系统已正式连接,但各别功能的数据和信息交接则主要是人为操控。
4	自动化	产品生命周期流程都自动化,只需有限的人为干预。	管理产品生命周期流程的信息系统已正式连接,但产品生命周期各阶段的信息交接则主要是机械操控。
5	智能化	产品生命周期流程和系统主动分析数据并作出合适反应。	管理产品生命周期的数码工具和系统彻底整合,并经由数据分析给予的洞察而优化流程。

⁴ 产品生命周期是一个产品从最初的概念开发到被市场淘汰的整个过程,顺序阶段包括:产品设计、工程、制造、产品使用、售后服务、废弃处理等。

科技基础模块 | 自动化支柱 | 制造现场自动化指标

制造现场自动化指标评估企业如何在产品生产与管理的地点，应用科技来监测、管理和执行产品与服务的生产和供应。

评级		定义	评级说明
0	全无	重复性生产 ⁵ 和支援流程 ⁶ 未自动化。	生产流程人为操作。
1	基本	重复性生产和支援流程部分已自动化,但需要一定的人为干预。重复性的支援流程未自动化。	生产流程借助设备,机械和计算机系统人为操作。
2	先进	重复性生产流程已自动化,但有有限人为干预。重复性的支援流程未自动化。	生产流程主要由设备,机械和计算机系统操纵,但仍需人为干预以启动和结束各别流程。
3	全面	重复性生产流程已全面自动化,无需人为干预。重复性的支援流程部分已自动化,但需要一定的人为干预。	生产流程完全自动化,由设备,机械和计算机系统操作,而只有发生突发事件才需人为干预。
4	灵活	自动化生产流程可通过即插即用自动化系统重新配置。重复性的支援流程部分已自动化,但需要一定的人为干预。	设备、机械和计算机系统可以按照需求而快速又轻易地进行改装、重新配置,以及重新设置以应对新任务。发生突发事件时,只需有限的人为干预。
5	融合	灵活生产和支援流程与企业设施自动化平台融合,形成高度自治网络。	设备,机械和计算机系统灵活性强,也与企业运营和制造设施系统正式整合,以便动态的跨域互动。

⁵ 生产流程指的是用以生产半成品或成品的一系列标准化程序。

⁶ 支援流程指的是用以互交材料或数据,但非直接用以生产半成品或成品的一系列标准化程序。

科技基础模块 | 自动化支柱 | 企业运营自动化指标

企业运营自动化指标评估企业如何在业务运营的地点,应用科技来监测,管理和执行各项流程,包括:销售与营销、需求规划、采购、人力资源管理与规划等。

评级		定义	评级说明
0	全无	企业运营流程未自动化。	企业运营流程人为操作。
1	基本	企业运营流程部分已自动化,但需要一定的人为干预。	企业运营流程借助计算机系统人为操作。
2	先进	企业运营流程已自动化,但仍需有限人为干预。	企业运营流程主要由计算机系统操纵,但仍需人为干预以启动和结束各别流程。
3	全面	企业运营流程已全面自动化,无需人为干预。	企业运营流程完全自动化,由计算机系统操作,而只有发生突发事件才需人为干预。
4	灵活	自动化企业运营流程适应性强。	计算机系统可以按照需求而快速又轻易地进行改装、重新配置,以及重新设置以应对新任务。发生突发事件时,只需有限的人为干预。
5	融合	灵活企业流程与制造现场和设施的自动化平台融合,形成高度自治网络。	计算机系统灵活性强,也与制造现场和制造设施系统正式整合,以便动态的跨域互动。

科技基础模块 自动化支柱 制造设施自动化指标			
制造设施自动化指标评估企业如何在厂房内应用科技来监测，管理和执行各项流程，包括：暖通空调系统 (HVAC)、冷气空调、保安、照明等各项系统。			
评级		定义	评级说明
0	全无	制造设施流程未自动化。	制造设施流程人为操作。
1	基本	制造设施流程部分已自动化，但需要一定的人为干预。	制造设施流程借助设备、机械和计算机系统人为操作。
2	先进	制造设施流程已自动化，但仍需有限人为干预。	制造设施流程主要由设备，机械和计算机系统操纵，但仍需人为干预以启动和结束各别流程。
3	全面	设施流程已全面自动化，无需人为干预。	制造设施流程完全自动化，由设备，机械和计算机系统操作，而只有发生突发事件才需人为干预。
4	灵活	自动化制造设施流程适应性强。	设备，机械和计算机系统可以按照需求而快速又轻易地进行改装、重新配置，以及重新设置以应对新任务。发生突发事件时，只需有限的人为干预。
5	融合	灵活制造设施流程与制造现场和企业自动化平台融合，形成高度自治网络。	设备，机械和计算机系统灵活性强，也与制造现场和企业运营系统正式整合，以便动态的跨域互动。

科技基础模块 | 互联性支柱 | 制造现场互联性指标

制造现场互联性指标评估的是在产品生产与管理的地点，企业的设施、机器和计算机系统之间的互联程度，以便无缝的沟通与数据交接。

评级		定义	评级说明
0	全无	生产资产和系统还没连接。	设备、机械和计算机系统无法相互沟通或交换信息。
1	连通	生产资产和系统通过多种资讯通信科技和协议连接起来。	没通过正式的网络连接以便设备、机械和计算机系统相互沟通或交换信息。
2	交接	互联的生产资产和系统可通过多种资讯通信科技和协议相互操作。	设备、机械和计算机系统无界限相互沟通或交换信息。
3	安防	生产资产和系统能相互操作，又有安全措施。	设有高度戒备且具韧性的安防框架，避免未经授权的侵入或扰乱，以便让设备、机械和计算机系统相互沟通或交换信息。
4	实时	生产资产和系统能相互操作又安全，也能实时互沟通。	设有高度戒备且具韧性的安防框架，避免未经授权的侵入或扰乱，以便让设备、机械和计算机系统能实时相互沟通或交换信息。
5	扩展	生产资产和系统能相互操作又安全，也能实时互沟通，而且扩展性高。	现有网络可以快速又轻易地重新配置，以适应现有设备，机械和计算机系统所作出的任何调整。

科技基础模块 | 互联性支柱 | 企业运营互联性指标

企业运营互联性指标评估的是在业务运营的地点、企业的设施、
机器和计算机系统之间的互联程度, 以便无缝的沟通与进行数据交接。

评级		定义	评级说明
0	全无	企业信息系统还没连接。	计算机系统无法相互沟通或交换信息。
1	连通	企业信息技术系统通过多种资讯通信科技和协议连接起来。	通过正式的网络连接以便计算机系统相互沟通或交换信息。
2	交接	企业信息系统可通过多种资讯通信科技和协议相互操作。	计算机系统无界限相互沟通或交换信息。
3	安防	企业信息系统能相互操作, 又有安全措施。	设有高度戒备且具韧性的安防框架, 避免未经授权的侵入或扰乱, 以便计算机系统相互沟通或交换信息。
4	实时	企业信息系统能相互操作又安全, 也能实时互沟通。	设有高度戒备且具韧性的安防框架, 避免未经授权的侵入或扰乱, 以便计算机系统能实时相互沟通或交换信息。
5	扩展	企业信息系统能相互操作又安全, 也能实时互沟通, 而且扩展性高。	现有网络可以快速又轻易地重新配置, 以适应现有计算机系统所作出的任何调整。

科技基础模块 | 互联性支柱 | 制造设施互联性指标

制造设施互联性指标评估的是在厂房内,企业的设施、
机器和计算机系统之间的互联程度,以便无缝的沟通与进行数据交接。

评级		定义	评级说明
0	全无	设施资产和系统还没连接。	设备、机械和系统无法相互沟通或交换信息。
1	连通	设施资产和系统通过多种资讯通信科技和协议连接起来。	通过正式的网络连接以便设备,机械和计算机系统相互沟通或交换信息。
2	交接	设施资产和系统可通过多种资讯通信科技和协议相互操作。	设备、机械和计算机系统无界限相互沟通或交换信息。
3	安防	设施资产和系统能相互操作,又有安全措施。	设有高度戒备且具韧性的安防框架,避免未经授权的侵入或扰乱,以便设备,机械和计算机系统相互沟通或交换信息。
4	实时	设施资产和系统能相互操作又安全,也能实时互沟通。	设有高度戒备且具韧性的安防框架,避免未经授权的侵入或扰乱,以便设备,机械和计算机系统能实时相互沟通或交换信息。
5	扩展	设施资产和系统能相互操作又安全,也能实时互沟通,而且扩展性高。	设有高度戒备且具韧性的安防框架,避免未经授权的侵入或扰乱,以便设备,机械和计算机系统能实时相互沟通或交换信息。

科技基础模块 | 智能化支柱 | 制造现场智能化指标

制造现场智能化指标评估的是在产品生产与管理的地点，企业如何通过处理和分析数据，以便优化现有的流程来创建新应用程序、产品与服务。

评级		定义	评级说明
0	暂无	未使用操作技术和信息技术系统。	未使用任何电子或数码设备。
1	预编	操作技术和信息技术系统按照预编程序执行任务和流程。	设备、机械和计算机系统能够根据预编程控逻辑来执行任务。
2	识别	计算机化的操作技术和信息技术系统能探测异常。	设备、机械和计算机系统能够在系统偏离预定参数时，通知操作员。
3	诊断	计算机化的操作技术和信息技术系统能探测异常，并诊断可能导致异常的原因。	设备、机械和计算机系统能够在出现系统偏差时通知相关人员，并且列出可能造成该偏差的原因。
4	预测	计算机化的操作技术和信息技术系统能诊断问题，并预测资产和系统未来的状态。	设备、机械和计算机系统能够预测偏差，提早通知相关人员，并且列出可能造成偏差的原因。
5	灵活	计算机化的操作技术和信息技术系统能诊断问题，并预测资产和系统未来的状态，最终自主执行适应变化的决策。	设备、机械和计算机系统能够预测偏差并诊断其原因，然后独立判断并执行决定，以提高企业运营以及资源效率。

科技基础模块 | 智能化支柱 | 企业运营智能化指标

企业运营智能化指标评估的企业如何通过处理和分析数据，以便优化现有的业务运营流程来创建新应用程序、产品与服务。

评级		定义	评级说明
0	暂无	未使用企业系统。	未使用任何电子或数码设备。
1	预编	企业信息技术系统按照预编程序执行任务和流程。	企业计算机系统能够根据预编程控制逻辑来执行任务。
2	识别	企业信息技术系统能探测异常。	企业计算机系统能够在系统偏离预定参数时，通知相关人员。
3	诊断	企业信息技术系统能探测异常，并诊断可能导致异常的原因。	企业计算机系统能够在出现系统偏差时通知相关人员，并且列出可能造成该偏差的原因。
4	预测	企业信息技术系统能诊断问题，并预测资产和系统未来的状态。	企业计算机系统能够预测偏差，提早通知相关人员，并且列出可能造成偏差的原因。
5	灵活	企业信息技术系统能诊断问题，并预测资产和系统未来的状态，最终自主执行适应变化的决策。	设备，机械和计算机系统能够预测偏差并诊断其原因，然后独立判断并执行决定，以提高企业运营以及资源效率。

科技基础模块 | 智能化支柱 | 制造设施智能化指标

制造设施智能化指标评估的是在厂房内,企业如何通过处理和分析数据,以便优化现有的流程来创建新应用程序、产品与服务。

评级		定义	评级说明
0	暂无	未使用操作技术和信息技术系统。	未使用任何电子或数码设备。
1	预编	操作技术和信息技术系统按照预编程序执行任务和流程。	设备、机械和计算机系统能够根据预编程控逻辑来执行任务。
2	识别	计算机化的操作技术和信息技术系统能探测异常。	设备、机械和计算机系统能够在系统偏离预定参数时,通知相关人员。
3	诊断	计算机化的操作技术和信息技术系统能探测异常,并诊断可能导致异常的原因。	设备、机械和计算机系统能够在出现系统偏差时通知相关人员,并且列出可能造成该偏差的原因。
4	预测	计算机化的操作技术和信息技术系统能诊断问题,并预测资产和系统未来的状态。	设备、机械和计算机系统能够预测偏差,提早通知相关人员,并且列出可能造成偏差的原因。
5	灵活	计算机化的操作技术和信息技术系统能诊断问题,并预测资产和系统未来的状态,最终自主执行适应变化的决策。	设备、机械和计算机系统能够预测偏差并诊断其原因,然后独立判断并执行决定,以提高企业运营以及资源效率。

企业组织基础模块 | 人才就绪度支柱 | 职员学习与发展指标

职员学习与发展指标评估企业如何制定系统与流程，以提升员工的才能与技能，实现企业运营达最佳状态的目标。

评级		定义	评级说明
0	非正式	非正式导师学徒制是工作队伍主要的学习与发展方式。	未有正式的学习与发展课程，以培训新加入和现有的工作队伍。
1	系统化	通过正式的培训制度帮助员工掌握技能为工作队伍主要的学习与发展方式。	有了明确起点和终点的正式学习与发展课程，但课程内容限于技能培训。
2	持续性	设有结构分明的学习与发展课程，以帮助员工持续提升或增强技能。	设有结构分明的学习与发展课程，以帮助员工持续提升或增强技能。
3	经整合	支持持续学习与发展的课程与企业业务和人力资源部门的需求相应。	采用持续进修模式的学习与发展课程，而课程内容与企业宗旨、人才吸引和职业发展紧密结合。
4	适应性	利用利益相关者通过反馈渠道提供的见解，积极制定、更新和定制经整合的学习与发展课程。	设有正式的反馈渠道，可供员工、人力资源部门和业务团队合力策划和更新经整合的学习与发展课程。
5	前瞻性	积极确定创新学法和未来所需的技能培训，并融入现有的学习与发展课程。	积极把未来所需的技能和创新的学习与发展教学法，融入现有的学习与发展课程。

企业组织基础模块 人才就绪度支柱 领导能力指标			
领导能力指标评估的是企业核心管理是否踊跃利用最新制造业概念和科技，以确保企业与时俱进、保持竞争力。			
评级		定义	评级说明
0	未有	管理层未熟悉最新趋势和科技。	管理层未熟悉有助提升企业发展的最新概念。
1	基本	管理层通过非正式的渠道初步理解最新趋势和科技。	管理层初步理解有助提升企业发展的最新概念。
2	精通	管理层通过正式的渠道充分理解最新趋势和科技。	管理层精通有助提升企业发展的最新概念。
3	合作	管理层与外部合作伙伴来制定计划，以善用最新的趋势和新科技，来改善企业内部至少一个环节的运作。	借由外来援助，企业通过最新业务概念，以改善至少一个环节。
4	独立	管理层能独立制定计划，以善用最新的趋势和新科技，来改善企业内部两个以上的环节。	企业通过最新业务概念，以改善各个环节。
5	灵活	管理层能自主决定如何根据最新趋势和科技来调整企业转型架构。	随着业务概念的推陈出新，企业能提升其转型计划。

企业组织基础模块 | 企业组织结构与管理支柱 | 企业对内对外的协作指标

企业对内对外的协作指标评估的是企业如何与内部跨部门团队和外部合作伙伴，通力实现共同目标和愿景。

评级		定义	评级说明
0	非正式	企业内部团队之间以非正式方式沟通和共享信息。	团队一般孤立运作，而任何合作或协作是即兴的。
1	沟通	设立正式渠道沟通和共享信息。	为团队提供正式渠道共享和交换信息。
2	合作	设立正式渠道，供团队在特定或一次性的任务和项目里展开合作。	为团队提供正式渠道互动和在特定任务和项目上合作。
3	协调	在特定或一次性的任务和项目里，企业团队授权作出调整。	团队授权修改或调整义务或责任，为任务和项目合作降低门槛。
4	协作	在特定或长期的任务和项目里，企业团队授权共享资源。	团队授权在特定和长期任务和项目投入资源，并部分共同承担其风险、责任和奖励。
5	整合	设立正式渠道，以便按需成立的团队在跨部门项目上合作并共享资源，迈向共同目标和业绩指标。	企业可灵活地、快速地成立团队，以便应对突发问题，并完全共同承担其风险，责任和奖励。

企业组织基础模块 | 企业组织结构与管理支柱 | 策略与治理指标

策略与治理指标评估企业如何为了实现长远的目标而设计并落实其计划，包括：确定业务重点、制定战略蓝图、设定包含规则、实践和流程的系统，以将企业愿景转化为实际业务价值。

评级		定义	评级说明
0	暂无	企业暂时未定未来厂房的转型计划。	在企业目前或未来战略里，企业仍未指定未来厂房的转型计划为重点项目。
1	制定	企业正式指定未来厂房的转型计划为机构战略之一。	在企业目前或未来战略里，企业已指定未来厂房的转型计划为重点项目。
2	发展	企业已有专属团队制定未来厂房的转型计划。	正在制定或已经制定了长期策略和治理模式，以建立未来厂房。
3	实行	未来厂房的转型计划已正式在企业至少一个部门实行。	已实行了未来厂房的长期策略和治理模式。
4	扩展	未来厂房的转型计划已扩大规模，在企业两个以上的部门实行。	已扩展了实行未来厂房长期策略和治理模式的范围。
5	灵活	未来厂房的转型计划能动态地更新。	持续检讨并动态更新未来厂房长期策略和治理模式，以便把最新科技与经商理念和范例考虑在内。

致谢

新加坡经济发展局（“经发局”）在此感谢所有参与构建新加坡智能工业指数的机构与个人，其中包括工业企业、科技供应商、商会、高等教育学府、研究机构，以及政府机构。在此，经发局要特别向与国际测试、检查、认证与培训机构（TÜV SÜD）致谢，感谢他们担负起项目经理和技术顾问的重任。最后，经发局也要借此机会，向所有给予意见、见解和建议的个人，表达最真诚的谢意。

EDB Core Development Team

Lim Kok Kiang, Assistant Managing Director
Fong Pin Fen, Director
Ang Chin Tah, Director
Xu Yinghui, Head
Ben Ong, Senior Lead
Crystalbel Foo, Senior Lead

Technical Advisors & Project Managers

Dr Andreas Hauser, Director, Digital Service, TÜV SÜD
Jackie Tan, Senior Consultant, Digital Service, TÜV SÜD

咨询顾问团

1. Paul Bonner, Vice President, Honeywell Connected Plant, Honeywell Process Solutions
2. Mark Buswell, Head of Advanced Manufacturing Technologies, GlaxoSmithKline
3. Roxane Desmicht, Senior Director, Corporate Supply Chain, Infineon Technologies Asia Pacific
4. Dr Neil Hastilow, Head of Manufacturing Systems, Rolls-Royce
5. Christian Hocken, Managing Partner, Industrie 4.0 Maturity Center, RWTH Aachen
6. Patrick Hyett, Head of Immersive Intelligent Manufacturing, GlaxoSmithKline
7. Dr -Ing Gunther Kegel, CEO Pepperl+Fuchs GmbH & President of VDE
8. Raimund Klein, Executive Vice President, Digital Factory & Process Industries & Drives, Siemens
9. Lim Yew Heng, Partner & Managing Director, BCG
10. Ling Keok Tong, Director, A*STAR, Science and Engineering Research Council
11. David Low, CEO, Advanced Remanufacturing Technology Centre, A*STAR
12. Scott Maguire, Global Engineering Director, Dyson
13. Dr Christian Mosch, Project Director, Industrie 4.0 Standardization, VDMA
14. Steven Phua, Deputy Director, Standards, SPRING
15. Senthil Ramani, Managing Director, IoT Centre of Excellence, Accenture
16. Vidya Ramnath, Vice President, Global Plantweb Solution & Services, Emerson Automation Solutions
17. Prof Dr -Ing Siegfried Russwurm, Professor, University of Erlangen-Nürnberg
18. Dr Lutz Seidenfaden, Head of Competence Centre IT Asia Pacific, Festo AG & Co. KG
19. Dr Sun Sumei, Head, Communications & Networks Cluster; Lead Principal Investigator, Industrial IoT Programme, A*STAR, Institute of Infocomm Research (I²R)
20. Dr Tan Puay Siew, Deputy Director, Manufacturing Systems Division A*STAR, Singapore Institute of Manufacturing Technologies (SIMTech)
21. Yeoh Pit Wee, Director of Operations, Asia Pacific & EMEA, Rockwell Automation

参与机构

1. Alcon Asian Manufacturing and Logistics Pte Ltd
2. Becton Dickinson Medical (S) Pte Ltd
3. Chevron Oronite Pte Ltd
4. Eagle Services Asia Pte Ltd
5. Feinmetall Singapore Pte Ltd
6. Glaxo Wellcome Manufacturing Pte Ltd
7. GLOBALFOUNDRIES Singapore Pte Ltd
8. Infineon Technologies Asia Pacific Pte Ltd
9. JEP Precision Engineering Pte Ltd
10. Onn Wah Tech Pte Ltd
11. PBA Systems Pte Ltd
12. People Bee Hoon Factory Pte Ltd
13. Rockwell Automation Asia Pacific Business Center Pte Ltd
14. Rolls-Royce Singapore Pte Ltd
15. Shell Jurong Island (Shell Chemicals Seraya Pte Ltd)
16. Univac Precision Engineering Pte Ltd

政府机构

Agency for Science, Technology & Research (A*STAR)
SPRING Singapore

参考文献

- Accenture Consulting (2017). *Manning the Mission for Advanced Manufacturing: New Demands on Talent in Singapore's Energy, Chemicals and Utilities Industries* [White paper]. Retrieved from https://www.accenture.com/se-en/_acnmedia/PDF-50/Accenture-Manning-Mission-Advanced-Manufacturing.pdf
- Alicke, K., Rexhausen, D., & Seyfert, A. (2017, April). Supply Chain 4.0 in consumer goods. McKinsey & Company. Retrieved from <http://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/supply-chain-4-0-in-consumer-goods>
- Antares (n.d.). *Regio-Industry 4.0 Index: How EU regions prepare to Industry 4.0*. Retrieved September 27 from <http://antares.criad.unibo.it/documenti/Regio-index.pdf>
- Ashenbrenner, B. (2016, November 29). Industry 4.0: The Making of the Mobile Information Worker. XploreTech. Retrieved from <https://www.xploretech.com/us/blog/post/industry-4.0-the-making-of-the-mobile-information-worker>
- Baur, C., & Wee, D. (2015, June). Manufacturing's next act. McKinsey & Company. Retrieved from <http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act>
- Bersin, J. (2016). *Predictions for 2017: Everything is Becoming Digital* [Research report]. Bersin by Deloitte. Retrieved from <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/at/Documents/about-deloitte/predictions-for-2017-final.pdf>
- Cisco Public (2017). *The Cisco Digital Network Architecture Vision – An Overview* [White paper]. Retrieved from <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/cisco-digital-network-architecture/white-paper-c11-736842.pdf>
- Collaboration: A Definition (n.d.). Retrieved September 27 2017 from <http://c.ymcdn.com/sites/www.summerlearning.org/resource/group/7fba0800-c5ee-4859-9c1e-1205ed9f6116/plc3/collaborationcontinuumafy.pdf>
- DFKI/SmartFactoryKL (n.d.). *Fortschritt im Netzwerk: Die Industrie 4.0-Produktionsanlage von SmartFactoryKL*. Retrieved September 27 2017 from http://smartfactory.de/wp-content/uploads/2017/08/SF_BR_2017_FortschrittImNetzwerk_A4_DE_XS.pdf
- DIN/DKE (2016, January). *German Standardization Roadmap Industry 4.0, Version 2*. Retrieved from <https://www.din.de/blob/65354/f5252239daa596d8c4d1f24b40e4486d/roadmap-i4-0-e-data.pdf>
- Feeney, A. B., Frechette, S. P., & Srinivasan, V. (2016). Cyber-Physical Systems Engineering for Manufacturing. In Jeschke, S., Brecher, C., Song, H., Rawat, D.B. (Eds.), *Industrial Internet of Things: Cybermanufacturing Systems* (81 – 110). Heidelberg: Springer GmbH.
- Fernandez, I. (2013, April). *Cybersecurity for Industrial Automation & Control Environments: Protection and Prevention Strategies in the Face of Growing Threats* [White paper]. Frost & Sullivan. Retrieved from <http://www2.schneider-electric.com/documents/support/white-papers/white-paper-cybersecurity-for-industrial-automation-control.pdf>
- Gates, D., & Bremicker, M. (2017, May). *Industry 4.0: It's all about the people*. KPMG. Retrieved from <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2017/05/industry-4.0-all-about-people.pdf>
- Geissbauer, R., Schrauf, S., Koch, V., & Kuge, S. (2014, December). *Industry 4.0 – Opportunities and Challenges of the Industrial Internet*. PwC. Retrieved from <https://www.pwc.nl/en/assets/documents/pwc-industrie-4-0.pdf>
- Gessel, B., Hodgson, T., Gilmore, M., Eckert, E., Semle, A., Lund, J., ... Bucheit, M. (2017). *The Industrial Internet of Things, Volume G5: Connectivity Framework*. Industrial Internet Consortium. Retrieved from http://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_PUB_G5_V1.0_PB_20170228.pdf
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. New York: Springer.
- Haag, C. & Niechoj, T. (2016). *Digital Manufacturing: Prospects and Challenges*. Weimar: Metropolis Verlag.
- Hedberg, T. D., Lubell, J., Fischer, L., Maggiano, L., Feeney, A. B. (2016, March). Testing the Digital Threat in Support of

Model-Based Manufacturing and Inspection. In *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering* 16(2). doi:10.1115/1.4032697

- Hedberg, T. D., Feeney, A. B., & Helu, M. M. (2016, July). Towards a Lifecycle Information Framework and Technology in Manufacturing. In *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering* 16(3). doi:10.1115/1.4034132
- Helu, M. M., & Hedberg, T. D. (2015, October). Enabling Smart Manufacturing Research and Development using a Product Lifecycle Test Bed. *Procedia Manufacturing* 1 86-97. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.066
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016, January). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. Paper presented at the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). doi:10.1109/HICSS.2016.488.
- Himmelman, A. (1995). *Collaboration for a change: Definitions, Decision making models, Roles, and Collaboration Process Guide*. Himmelman Consulting. Retrieved from https://depts.washington.edu/ccph/pdf_files/4achange.pdf
- Holweg, M., Disney, S., Holmström, J., & Småros, J. (2005). Supply chain collaboration: Making sense of the strategy continuum. In *European Management Journal* 23(2) 170-181. doi:10.1016/j.emj.2005.02.008
- Intel (2015). *Collaboration Accelerates the Internet of Things and Industry 4.0: Driving Innovation in the Factory by Consolidating Systems with PC-Based Technology* [Case study]. Retrieved from <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/case-studies/beckhoff-accelerates-iot-case-studies.pdf>
- International Electrotechnical Commission (2015). *Factory of the Future*. Retrieved from <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-futurefactory-LR-en.pdf>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013, April). *Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0* [Final report of the Industrie 4.0 Working Group]. acatech Forschungsunion. Retrieved from http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf
- Kagermann, H., Anderl, R., Gausemeier, J., Schuh, G., Wahlster, W. (Eds.) (2016). *Industrie 4.0 in a Global Context: Strategies for Cooperating with International Partners (acatech STUDY)*. Munich: Herbert Utz Verlag.
- Karmarkar, A., Hirsch, F., Simmon, E., Bournival, E., Buchheit, M., Joshi, R., ... Meltzer, D. (2017). *The Industrial Internet of Things, Volume G8: Vocabulary*. Industrial Internet Consortium. Retrieved from http://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Vocab_Technical_Report_2.0.pdf
- KPMG (2016). *The Factory of the Future: Industry 4.0, The challenges of tomorrow* [White paper]. Retrieved from <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/es/pdf/2017/06/the-factory-of-the-future.pdf>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. In *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242. doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- Lin, S.W., Miller, B., Durand, J., Bleakley, G., Chigani, A., Martin, R., ... Crawford, M. (2017). *The Industrial Internet of Things, Volume G1: Reference Architecture*. Industrial Internet Consortium. Retrieved from http://www.iiconsortium.org/IIC_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf
- Lorenz, M., Russmann, M., Strack, R., Lueth, K., & Bolle, M. (2015, September 28). Man and Machine in Industry 4.0. Boston Consulting Group. Retrieved from <https://www.bcgperspectives.com/content/articles/technology-business-transformation-engineered-products-infrastructure-man-machine-industry-4/#chapter1>
- Lu, Y., Morris, K.C., Frechette, S. (2016, February). *Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems*. National Institute of Standards and Technology (NIST). doi:10.6028/NIST.IR.8107
- Lydon, B. (2015, February). Automation & Control Trends in 2015. Automation.com. Retrieved from <http://www.automation.com/automation-news/article/automation-control-trends-in-2015>
- MacDougall, W. (2014, July). *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future* [White paper]. Germany Trade & Invest. Retrieved from http://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Indus-

- MAPI Foundation (2015, Jul 23). The Internet of Things: Industrie 4.0 vs. the Industrial Internet. Retrieved from <https://mapifoundation.org/economic/2015/7/23/the-internet-of-things-industrie-40-vs-the-industrial-internet>
- Mashek, D. (2015, June). Capacities and Institutional Support Needed along the Collaboration Continuum. A presentation to the Academic Deans Committee of The Claremont Colleges, Claremont. Retrieved from <http://teagle-foundation.org/Teagle/media/GlobalMediaLibrary/documents/resources/CollaborationContinuum.pdf?ext=.pdf>
- McKinsey & Company (2016, March). *Industry 4.0 at McKinsey's model factories: Get ready for the disruptive wave* [Brochure]. Retrieved from https://capability-center.mckinsey.com/files/mccn/2017-03/digital_4.0_model_factories_brochure_2.pdf
- Moller, D. (2016). *Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems: Concepts, Design Methods, and Applications*. Switzerland: Springer.
- Morrish, J., Figueredo, K., Haldeman, S., & Brandt, V. (2016, November). *The Industrial Internet of Things, Volume B01: Business Strategy and Innovation Framework*. Industrial Internet Consortium. Retrieved from http://www.iiconsortium.org/pdf/Business_Strategy_and_Innovation_Framework_Nov_2016.pdf
- National Institute of Standards and Technology (2014, February 12). *Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity, Version 1.0* [Report]. Retrieved from <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/cyber-framework/cybersecurity-framework-021214.pdf>
- Pai, M. (2016). *Interoperability between IIC Architecture & Industry 4.0 Reference Architecture for Industrial Assets* [White paper]. Infosys Limited. Retrieved from <https://www.infosys.com/engineering-services/white-papers/Documents/industrial-internet-consortium-architecture.pdf>
- Plattform Industrie 4.0 (2016, January). *Implementation Strategy Industrie 4.0: Report on the results of the Industrie 4.0 platform*. Bitkom, VDMA, and ZVEI. Retrieved from https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/januar/Implementation_Strategy_Industrie_4.0_-_Report_on_the_results_of_Industrie_4.0_Plattform/Implementation-Strategy-Industrie-40-ENG.pdf
- Plattform Industrie 4.0 (2016, April). *Progress Report: Digitization of Industrie – Plattform Industrie 4.0*. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). Retrieved from https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/digitization-of-industrie-plattform-i40.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Plattform Industrie 4.0 (2016, November). *Network-based Communication for Industrie 4.0: Proposal for an Administration Shell* [Discussion paper]. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). Retrieved from https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/network-based-communication-for-i40.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- President's Council of Advisors on Science and Technology (2014, October 27). *Accelerating U.S. Advanced Manufacturing* [Report to the President]. Retrieved from https://www.manufacturingusa.com/sites/prod/files/amp20_report_final.pdf
- Prifti, L., Knigge, M., Kienegger, H., & Krcmar, H. (2017). A Competency Model for "Industrie 4.0" Employees. Paper presented at Wirtschaftsinformatik (WI) 2017, St. Gallen, Switzerland. Retrieved from <https://wi2017.blob.core.windows.net/website/download/papers/WI2017-0262.pdf>
- PwC (2016, April). *Industry 4.0: Building the digital enterprise* [White paper]. Retrieved from <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
- Ras, E., Wild, F., Stahl, C., & Baudet, A. (2017, June 21). Bridging the skills gap of workers in Industry 4.0 by Human Performance Augmentation Tools: Challenges and Roadmap. Paper presented at the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, Rhodes, Greece. doi:10.1145/3056540.3076192
- Russmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015 April). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries* [White paper]. Boston Consulting Group. Retrieved from <https://www.zvw.de/media.media.72e472fb-1698-4a15-8858-344351c8902f.original.pdf>

- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier J., ten Hompel, M., Wahlster, W. (Eds.) (2017). *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies* [acatech study]. Munich: Herbert Utz Verlag. Retrieved from https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/IoT/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.ashx?la=en&hash=C58F5B5372F90785F5C152FFD2F1B7409F584840
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.
- Schwartz, J., Collins, L., Stockton, H., Wagner, D., Walsh, B. (2017). *Rewriting the rules for the digital age: 2017 Deloitte Global Human Capital Trends* [Report and survey]. Deloitte University Press. Retrieved from <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/human-capital/hc-2017-global-human-capital-trends-us.pdf>
- SICK (n.d.). *Flexible Automation: The Solution to Meeting Manufacturing's Modern Challenges* [White paper]. Retrieved 27 September from <https://www.iica.org.au/upload/education/SICK%20Flexible%20Automation%20-%20whitepaper.pdf>
- Smit, J., Kreutzer, S., Moeller, C., & Carlberg, M. (2016). *Industry 4.0 Study for the ITRE Committee*. Policy Department A, Directorate-General for Internal Policies, European Parliament. Retrieved from [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU\(2016\)570007_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU(2016)570007_EN.pdf)
- Stouffer, K., Pillitteri, V., Lightman, S., Abrams, M., & Hahn, A. (2015, May). *Guide to Industrial Control Systems (ICT) Security*. NIST Special Publication 800-82, Revision 2. doi:10.6028/NIST.SP.800-82r2
- Tan, M. & Chua, J. (2016, February 10). Industry 4.0 and Singapore manufacturing. *The Straits Times*. Retrieved from <http://www.straitstimes.com/opinion/industry-40-and-singapore-manufacturing>
- Thames, L., Schaefer, D. (Eds.) (2017). *Cybersecurity for Industry 4.0: Analysis for Design and Manufacturing*. Switzerland: Springer.
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Switzerland: Springer.
- VDI-VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (2013, April). *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation* [White paper]. Retrieved from https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf
- VDI-VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (2015, July). Status Report: Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). Retrieved from https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/januar/GMA_Status_Report_Reference_Architecture_Model_Industrie_4.0_RAMI_4.0/GMA-Status-Report-RAMI-40-July-2015.pdf
- Wang, L. H. & Nee, A. (Eds.) (2009). *Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing*. London: Springer-Verlag.
- Waslo, R., Lewis, T., Hajj, R., & Carton, R. (2017, March 21). Industry 4.0 and cybersecurity: Managing risk in an age of connected production. Deloitte University Press. Retrieved from <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/cybersecurity-managing-risk-in-age-of-connected-production.html>
- Witherell, P., Kulvatunyou, B., & Rachuri, S. (2013, November). Toward the Synthesis of Product Knowledge Across the Lifecycle. Paper presented at ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 12: Systems and Design, San Diego, California, USA. doi:10.1115/IMECE2013-65220
- Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – an introduction in the phenomenon. IFAC-PapersOn-Line. doi:10.1016/j.ifacol.2016.12.002
- ZVEI: Die Elektroindustrie (n.d.). *Industrie 4.0: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)* [White paper]. Retrieved 27 September 2017 from https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/april/Das_Referenzarchitekturmodell_Industrie_4.0_RAMI_4.0/Faktenblatt-Industrie4_0-RAMI-4_0.pdf

术语表

操作技术 (Operational Technology, OT)

借由特定的硬件或软件控制某实体设备或器材,从而导致物理过程与状态的变化。

大数据 (Big data)

具有海量的规模、快速的流转、多样化的类型和价值密度低等特征的数据。

动态 (Dynamic)

形容不断根据运作情况而调整系统参数,以便改善性能表现。

工业4.0 (Industry 4.0)

形容一种工业概念。基本特征包括:

- 互操作性 (Interoperability): 设备、器材、员工等相互连接沟通的能力。
- 虚拟化 (Virtualization): 利用传感器的数据与虚拟的厂房来创建虚拟版智能工厂。
- 分权 (Decentralization): 系统自主作出决定并执行任务的能力,而出现特殊情况或相互冲突的目标时,则将转由更高层决定。
- 实时 (Real-Time): 采集和分析数据后,立即提供从数据所获取的见解。
- 以服务为导向 (Service Orientation)
- 模块化 (Modularity): 根据要求改变并灵活调整智能工厂的各别流程。

工业物联网 (Industrial Internet of Things, IIoT)

借由设备、器材、员工等连接的网络,加以分析才能处理来自实体和虚拟世界的信息,并作出相应的反应。

互操作性 (Interoperability)

能使不同的系统或设备,即便是使用不同的平台或编程语言,仍能相互交换数据信息。

价值链 (Value chain)

不同机构参与价值创造流程的秩序,而每一个环节顺序进行时,为产品或服务增加价值。

离散型制造 (Discrete manufacturing)

形容一种制造模式。将一个个不同的部件或系统装配成成品的生产模式。例如消费电器产品、汽车制造工业等等。

流程型制造 (Process manufacturing)

形容一种制造模式。将不可数的成分 (例如化学物、汽油、药剂等) 配成成品的生产模式。由于成分无各别单位,所以这类生产模式是不可逆转的过程。

实时 (Real-time)

用以形容某系统可在毫秒以内处理所输入数据如客户反馈,并立即调整流程。

数据分析 (Data analytics)

检索、转换和建立数据模型,目的是为了发掘有用的信息,提供结论以及相对的支持。用途包括数据挖掘、机器学习、搜集商业情报等等。

数码化 (Digitalization)

利用数码科技来改变业务模式,把传统企业转化为数码企业的过程,从而提供更多可为业务增值的机会。

数字孪生 (Digital twin)

一个与物理实体空间的实体资产、过程和系统完全对应和一致的虚拟模型。通过传感器提供的信息以及其他运行数据,使得数字孪生能够在物理实体的整个生命周期,实时模拟以及预测其性能和表现。

数字化 (Digitization)

把信息 (例如:文字、声音、图像等等) 转换为以位元为基本单位的数字格式。

系统整合 (System integration)

利用技术手段,将各个设备、软件、信息数据等等集成到相互连通相、互协调。

信息技术 (Information Technology, IT)

管理和处理电子信息所采用的各类技术的总称,例如信息的采集、传输、储存等等。

信息物理系统 (Cyber-physical system, CPS)

利用网络化实体资产和设备的智能系统,以致设备有计算、沟通、控制、协调和自治的能力。

云计算 (Cloud computing)

一种可让人使用者无论身在何处都可按需要便捷地连接上的网络,以快速地享用可配置并共享的计算资源 (例如:网络、服务器、存储、应用软件、服务)。

自动化金字塔 (Automation pyramid)

工业自动化金字塔将系统分为5个层级,分别为:

- 0 层 (现场层): 传感器和驱动器于生产过程连接并采取数据。
- 1 层 (控制层): 操控和管理机器和系统,包括使用可编程逻辑控制器 (PLC) 以及分布式数字控制系统 (DCS) 等控制系统。
- 2 层 (生产层): 采用监控控制和数据采集 (SCADA) 以及产品信息管理 (PIM) 等得监控系统,来监控、监督和控制生产线。
- 3 层 (运营层): 由制造执行系统 (MES) 等工具来规划生产和进行质量管理工作。
- 4 层 (企业规划层): 采用企业规划工具 (例如,企业资源规划系统 ERP) 来管理订单和其他企业层面的流程。

自治网络 (Autonomous network)

无需员工干涉便可自行运作的网络。

