

工业工程概述

A Brief Introduction to Industrial Engineering

未央-机械01 金佳熠

Jiayi Jin, Weiyang College

2020年12月

目录

1	工业工程的内涵	1
1.1	工业工程的定义	1
1.2	工业工程的子学科	1
1.3	工业工程师	1
1.3.1	工业工程师需要具备的专业知识	1
1.3.2	工业工程师做什么	2
2	工业工程的主要发展历程	5
2.1	工业工程的起源	5
2.1.1	劳动分工	5
2.1.2	可互换零件	5
2.2	工业工程的先驱	6
2.3	一战后工业工程的发展	7
2.4	二战后工业工程的发展	8
2.4.1	运筹学的出现	8
2.4.2	工业工程的定义	8
2.5	现代工业工程的发展	9
3	工业工程领域的发展面临的问题与挑战	10
3.1	工业工程当下面临的问题	10
3.2	工业工程的挑战与机遇	10
3.3	工业工程在我国的发展现状	12
4	总结	13

1 工业工程的内涵

1.1 工业工程的定义

工业工程是一个通过开发、改进和实施由人员、金钱、知识、信息、设备，能源和物料组成的集成系统来优化复杂的流程、系统或组织的工程专业¹。

工业工程师使用数学、物理和社会科学等方面的专业知识和技能，以及工程分析和设计的方法原理，来指明、预测和评估从系统和过程中获得的结果。从这些结果中，他们能够建立新的系统，过程或情况，以有效地协调劳动力，物料和机器，并提高物理或社会系统的质量和效率[1]。根据涉及的二级专业，工业工程也可能与以下领域相交叉：运筹学，系统工程，制造工程，生产工程，供应链管理，管理工程，金融工程，人因工程，安全工程，物流工程等，取决于用户的观点或目的。

1.2 工业工程的子学科

工业工程有许多子学科，下面列出了其中最常见的子学科[3]：

设施工程与能源管理、金融工程、能源工程、人为因素与安全工程、信息系统工程与管理、制造工程、运营工程与管理、运筹学与优化、政策规划、质量与可靠性工程、供应链管理与物流、系统分析、系统工程学、系统仿真。

尽管有一些工业工程师只专注于这些子学科之一，但许多工业工程师将其中一些结合起来，比如供应链和物流以及设施和能源管理等。

1.3 工业工程师

1.3.1 工业工程师需要具备的专业知识

工业工程师需要具备的知识包括：

- **工程技术**—工程技术的应用，包括将技术，原理，程序和设备应用于各种商品和服务的设计与生产。

¹Industrial engineering is an engineering profession that is concerned with the optimization of complex processes, systems, or organizations by developing, improving and implementing integrated systems of people, money, knowledge, information, equipment, energy and materials.[9]

- **生产和加工**—了解原材料，生产过程，质量控制，成本以及其他使货物的有效生产和分配最大化的技术。
- **数学**—几何，代数，微积分，统计。
- **机械**—机器和工具的知识，包括其设计，使用，维修和保养。
- **设计**—涉及生产精确计划，制图、建模的设计，工具和原理的知识。
- **计算机和电子**—电路板，电子器件，芯片以及计算机硬件和软件（包括应用程序和编程）的知识。
- **行政管理**—对业务和管理原则的知识，涉及战略规划，资源分配，人力资源建模，领导技巧，生产方法以及人员和资源的协调。
- **客户和个人服务**—了解提供客户和个人服务的原理和流程，包括客户需求评估，符合服务质量标准以及客户满意度评估。
- **物理**—物理原理，定律，它们之间的相互关系以及对理解流体，材料和大气动力学以及机械，电，原子和亚原子结构和过程的知识。
- **公共安全和保障**—了解相关设备，政策，程序和策略，以促进有效安全地保护人员，数据，财产和机构。

1.3.2 工业工程师做什么

工业工程师参与了生产和加工的所有阶段。他们可能从头开始设计新设施，或者可能负责升级、扩展、重新配置现有设施。他们可能需要设计新设备或为从外部供应商处购买的设备编写规格并确保其满足要求。他们可能还需要重新利用现有的设施和设备，设计新的流程以及设计新的工具和固定装置。

为了维持这些标准，工业工程师必须具备许多工程领域的基本工作知识，并且必须熟悉工作流程，设备，工具和物料，以便设计出符合成本，质量，安全和环保要求的设施、系统和设备。

此外，工业工程师依靠计算机辅助设计（CAD）系统来设计设施和设备。他们还使用计算机建模来模拟流程和供应链，以最大化效率并最小化成本[6]。

- 价值工程

价值工程通过专心于产品开发，可以用较低的成本为市场中的大部分顾客生产更优质的产品。当顾客需要更多功能时，会将它们作为可选附加项发售给他们。这种方法在以工程为主要产品成本的复杂的机电产品（例如计算机打印机）中很有价值。

为了减少项目的工程和设计成本，通常会将项目分解为子组件，这些子组件可以一次设计和开发，并可以在许多略有不同的产品中重复使用。例如，典型的磁带播放机具有由小型工厂生产，组装和测试的精密注塑成型的磁带座，并作为子组件出售给众多大公司。磁带座的工具和设计费用由许多看上去可能完全不同的产品分担。所有其他产品所需的只是必要的安装孔和电气接口。

- 质量控制和质量保证

质量控制通过采取一系列措施，以确保有缺陷的产品不被生产出来并使产品符合性能上的要求。质量保证涵盖了从设计，开发，生产，安装，服务和文档编制到生产的所有活动。该领域引入了“适合目的”和“第一次正确执行”的规则。

质量免费”是不言而喻的。通常，每次生产下线时，生产始终有效的产品就不再花费更多。尽管这需要在工程设计过程中额外付出努力，但可以大大减少浪费和返工的成本。

制造过程中的统计过程控制通常是通过随机抽样和测试一部分成品来进行的。由于时间或成本的限制，或者由于它可能破坏被测试的物体（例如照明火柴），通常避免测试每个成品，而是持续跟踪关键误差的变化，并在生产不良零件之前修正制造过程。

- 可生产性

通常，制成品具有不必要的精度，生产操作或零件。简单的重新设计可以消除这些问题，从而降低成本并提高可制造性，可靠性和利润。例如，俄罗斯的液体燃料火箭发动机经过精心设计后，允许有简陋的（尽管无泄漏）焊接，从而消除了不利于发动机更好运转的打磨和精加工操作。

- 从运动经济到人为因素

工业工程师研究工人如何工作，例如工人或操作员如何拾取要放置在电路

板上的电子组件或将这些组件按顺序放置在板上。他们的目标是减少完成某项工作以及重新分配工作所花费的时间，以便使用更少的工人完成给定的任务[5]。

2 工业工程的主要发展历程

工业工程诞生于19世纪晚期。制造、政府和公共服务组织在整个20世纪所面临的挑战和需求使得工业工程迅猛发展，成为一个充满活力的专业。工业工程的未来不仅取决于工业工程师应对并利用运营和组织的变革的能力，更取决于他们预测从而引领变革本身的能力。

20世纪上半叶，工业工程诞生的这一段历史为主导其实践和发展的许多原理提供了重要见解。尽管这些原理继续影响着这个专业，许多目前已经形成并将继续完善的概念性和技术性的发展源自20世纪下半叶[7]。

2.1 工业工程的起源

历史学家之间普遍认为，工业工程专业的起源可以追溯到工业革命。飞梭、珍妮纺纱机、蒸汽机等有助于推进纺织工业中的传统手动操作机械化的技术带来了规模经济，使得大规模集中生产首次具有吸引力。生产系统的概念正起源于这些创新的工厂。

2.1.1 劳动分工

亚当·斯密（Adam Smith）在《国富论》中引入的劳动分工（Division of Labour）概念和资本主义的“看不见的手”（the “Invisible Hand” of capitalism）概念激发了许多工业革命的技术创新者建立和实施工厂体系。经过詹姆斯·瓦特（James Watt）和马修·布尔顿（Matthew Boulton）的努力，建立了世界上第一个集成的机器制造工厂，实施了诸如减少能耗、提高生产率的成本控制系统以及为工匠提供技能培训的概念[7]。

查尔斯·巴贝奇（Charles Babbage）在19世纪早期访问英格兰和美国的工厂后，在他的《论机械和制造商的经济》一书中引入了于工业工程密切相关的概念。这本书包括诸如完成某个任务所需的时间，将任务细分为较小和较不详细的子任务的效果以及从重复性任务中获得的好处等主题[2]。

2.1.2 可互换零件

Eli Whitney和Simeon North为美国政府证明了可互换零件（Interchangeable Parts）的概念在制造步枪和手枪中的可行性。在这个系统下，单个零件被批量

生产，这样就可以在任何成品中使用。这大大减少了对专业工人技能的需求，最终引发了之后对工业环境的研究[7]。

2.2 工业工程的先驱

弗雷德里克·泰勒（Frederick Taylor, 1856–1915）通常被认为是工业工程之父。他拥有史蒂文斯大学的机械工程学位，并获得了多项发明专利。他的著作《商店管理》和《科学管理之原则》于20世纪初出版，标志着工业工程的开始。他的方法是基于改进工作方法，制定工作标准以及减少执行工作所需的时间来提高工作效率。

普渡大学工业工程学院的夫妻团队Frank Gilbreth（1868–1924）和Lillian Gilbreth（1878–1972）是工业工程运动的另一块基石。他们将人体运动的要素分为18种基本要素，称为基本动作要素（therbligs）。这可以使分析人员可以在不知道完成工作所需时间的情况下设计工作。这些被认为是一个更广阔的领域——人因工程学的开始。

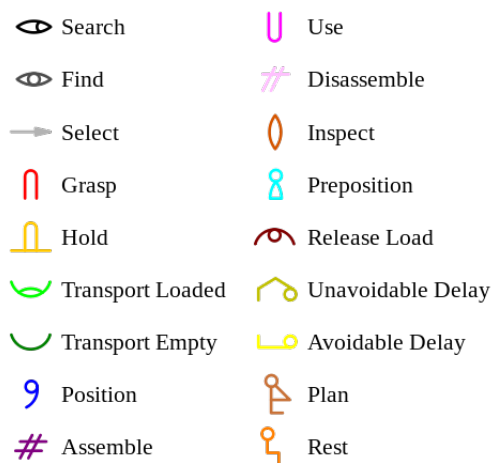


Fig. 1: The standard symbols used in representing the 18 therbligs

1908年，宾夕法尼亚州立大学的雨果·迪默（Hugo Diemer）开设了第一门工业工程课程作为选修课。康奈尔大学于1933年开始授予工业工程博士学位。

1912年，亨利·劳伦斯·甘特（Henry Laurence Gantt）制定了甘特图来展现项目进度。该图表之后由Wallace Clark加以改进，成为我们今天熟悉的样式。

现代的甘特图也展示项目活动和当前进度之间的依赖关系。

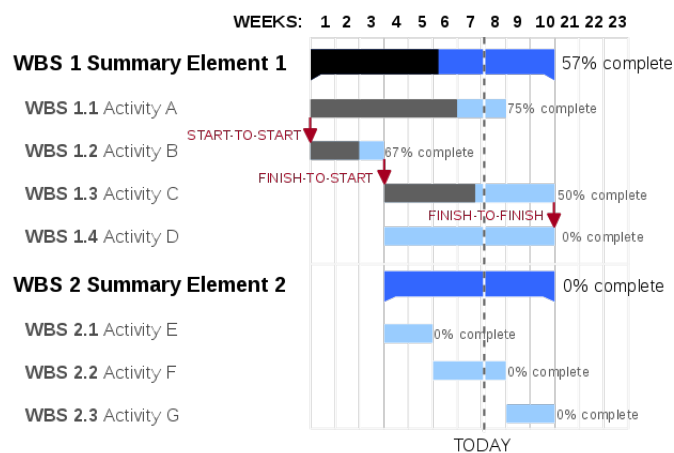


Fig. 2: A Gantt chart showing three kinds of schedule dependencies (in red) and percent complete indications

随着装配线的发展，亨利·福特（Henry Ford）的工厂在该领域取得了重大突破。福特将一辆汽车的组装时间从700多小时减少到1.5小时。此外，他还是资本主义福利经济（welfare capitalism）的先驱，率先为员工提供财务激励措施以提高生产率。

2.3 一战后工业工程的发展

一战结束时，科学管理方式已经逐渐成熟。利用大规模生产的大规模垂直整合的组织形式成为标准。这些原则的应用使得制造业迅猛发展。但是人们把过多的关注点聚焦在了标准和奖励计划的事实上，而忽略了一个好的生产方法的重要性。

霍桑（Hawthorne）实验

1924年至1932年间，美国西部电气所属的霍桑工厂进行了霍桑实验，意在探究工作环境的照明条件对生产效率的影响。在美国国家科学院的资助下，一支来自麻省理工学院的团队通过观察不同灯光条件下的工人，发现无论照明越亮或越暗，生产率都会越来越高。由于无法解释这种现象，团队开始转而研究其

他因素之间的问题[7]。在这些实验中研究人员发现了实验者效应，称为霍桑效应，即那些意识到自己正在被别人观察的个人更倾向于改变自己的行为，比如受到额外的关注生产率会提高。从此，工业心理学的发展重点从Taylor关注的技术效率转移到更加丰富，更加复杂的人际关系角度。

2.4 二战后工业工程的发展

20世纪40年代开发综合质量管理体系（TQM）在第二次世界大战之后发展迅速，是战后日本复兴的一部分内容。

1948年，美国工业工程学会成立。随着人们的兴趣点从仅仅提高机器性能延伸到提高整个制造过程的性能，F. W. Taylor和Gilbreths把他们的早期工作记录在了提交给美国机械工程师学会的一篇论文中。论文从介绍Henry R. Towne（1844-1924）的论文《作为经济学家的工程师》（1186）开始[8]。

2.4.1 运筹学的出现

第二次世界大战后期，工业工程领域有了重大发展。工业工程师开始使用统计分析，项目管理，图像分析等技能来分析非常复杂的系统。这在军队里指定行动计划非常有用。战争结束后，来自各个领域的科学家开发的新技能新仪器促进了建模、分析和对运筹问题的总体理解。这种分析复杂问题的方法被称为运筹学。

20世纪50年代标志着工业工程从战前的理性主义转入量化分析的新时代。虽然Taylor和Gilbreth基本上都预测到了这一发展，但直到RCA研究团队提出工作因子，Maynard发明时间测量方法（methods time measurement, MTM），这两位先驱者的愿景才转变为可用于工业生产的工具.这些工具至今仍然是工业工程最基本的功能。

2.4.2 工业工程的定义

美国工业工程师学会（American Institute of industrial Engineers, AIIE）在20世纪60年代初提出的工业工程定义[7]反映了对这一新领域的认识 and 这一领域的广泛性：

工业工程是研究由人、物料、信息、设备和能源构成的集成系统的设计、改进和实施，它应用数学、物理学和社会科学的知识和技能，结合工程分析和设计的原理与方法，来说明、预测和评价这一集成系统将得到的结果。

2.5 现代工业工程的发展

1960年至1975年间，随着诸如材料需求规划（MRP）等供应决策支持系统（decision support systems）的发展，人们可以强调工厂的时间安排问题（包括库存，生产，组装，运输等）。1976年，以色列科学家Jacob Rubinovitz博士在南非和全球范围内安装了由IAI和Control-Data（以色列）开发的CMMS程序。

70年代，受Kaizen和Kanban等日本管理理论的影响，日本实现了高质量高效率的生产水平。这些理论改善了质量，配送时间和灵活性等问题。西方公司受到Kaizen的巨大影响，也开始实施自己的持续改进计划。

到90年代，随着产业全球化的进程推进，供应链管理和面向客户的商务流程设计成为了发展的重点。以色列科学家Eliyahu M. Goldratt在1985年提出的约束理论²是该领域的一个重要里程碑。

²约束理论（Theory of constraints, TOC）是一种管理范式，它认为任何可管理的系统都受到极少数约束的限制而无法实现其更多目标。

3 工业工程领域的发展面临的问题与挑战

3.1 工业工程当下面临的问题

在美国，尽管种种迹象都表明工业工程师服务的行业在向好发展，但许多行业被美国本土外的竞争对手所打败。这在汽车制造业、机器制造、电子电气等重要工业领域尤其明显。部分原因是因为许多工业工程师还没能去影响管理高层的决策。除此之外，一个更重要的问题是，在过去的几十年中，工业工程孕育而生的高度专业化是否过度重视工具和技术而忽视了原本要解决的问题。相比之下，其他国家超越美国本土公司的竞争对手没有过度聚焦在工具和技术上，而是关注一些和质量、效率、及时性、灵活度、对顾客的响应速度和成本最小化等有关的基础性问题。

因此，尽管工业工程自二战后一直朝着正确的方向迅速发展，工业工程目前正面临一个困境——工业工程师越来越关注如何应用许多新的工具和聚能却忽略了解决行业当下所面临的问题和新的需求。这也是工业工程专业通过利用更“科学”的方法解决问题从而努力提高其受人尊敬程度的一个自然结果。这种发展的结果就是工业工程出现了分叉。工业工程正在进入到它发展的第三阶段，一个自我评估，自我学习，继续发展的阶段。

工业工程进入自我评估阶段的一个主要原因是一些日本企业包括丰田、索尼研究和质量与及时性相关的基础制造系统和管理实践取得了惊人的效果。他们生产的产品质量好，因而比起美国同行生产的同类产品更受消费者青睐。同时，二十多年来培训员工简化工作流训获得的重要资源使得即时生产等制造管理理念迅速发展。

在这一发展过程中，日本企业很好地阐明了持续发展更复杂的质量管理体系或库存模型并不一定带来更高的生产效率。事实上，关注于决定质量极限、生产周期、订单数量等最基本的问题对于提高企业的效率才是最重要的，至少对于制造业来说是如此。这对于工业工程师来说是一个很好的启示，他们需要改变他们关注的重点。

3.2 工业工程的挑战与机遇

随着新兴经济的出现，政治、社会的更迭和新的商业模式正改变着我们所

处的世界。这种去式告诉我们未来工业工程所面对的竞争环境和现在是截然不同的。尽管工业工程在过去20年里所扮演的角色已经发生了巨大变化，但越发激烈的竞争催生了很多新技术，这些新技术又带来全新的产品以及制造流程和服务环境。新的管理方式、劳动方式、组织架构和决策机制也随着新产品新流程的出现孕育而生。为了在如此激烈的竞争环境中成功，工业工程师要不断提升自己的能力。掌握这些新的能力是工业工程师面临的主要挑战之一。

《2020年制造业挑战》[4]一书中提到了一些在竞争环境和未来技术方案中起到重要作用的话题。最初，制造被定义为为顾客创造可供他们使用的产品的过程，但在研究过程中发现，未来随着新的制造企业的出现，制造业的定义肯定会越来越广泛，制造业和服务业之间的界限越来越模糊。书中最后还提到了未来工业工程师会在那些场景中工作以及他们需要获得什么新技能，这些对于工业工程师未来的发展是非常重要的。

如今的制造服务业正在向市场迅速地注入新的想法和创新点。基于网络的学习方式，互联的企业级通讯，人机交互，互联网交易，物联网等新的技术使得人们可以更快地学习新技能。分布式制造系统能够迅速抓住市场机遇并据此做出调整，从而更快地配置必需的自愿。这使得合作伙伴关系更快地建立。

尽管目前的制造业仍然是人力企业，但未来，我们如今所知道的一些制造企业的功能（包括研发、设计、制造、市场营销、客户服务等）会高度集成为一个整体直接连结客户和新产品的发明者。新的企业架构也会出现。尽管生产资料是分布在全球的，和当地市场相关联的原材料企业会越来越少，相反，生产面向区域或基于社区的产品的企业会越来越多。纳米加工过程从实验室走向流水线，生物科技引领着制造创新，不断开拓新的应用场景。

所以，当下技术的关键就在于为了应该更大挑战所需要提升或新学习的一套技能。尽管许多工业工程师早已在不少领域（包括自适应系统，企业建模仿真，信息科技，设计方法优化，人机交互，教育培训等）有所建树，诸如低排过程，纳米制造，生物科技和开源软件等领域是未来工业工程师可以不断开拓的新兴领域。尽管现在工业工程师涉及的技术领域都是产生重大影响的关键领域，但这些科技的艺术性迅速发展，这对于行业中的每一个人来说都意味着长期的挑战。

3.3 工业工程在我国的发展现状

工业工程技术在国外起步较早，发展至今已有一百多年历史，有着厚重的历史积淀，但在国内起步较晚。早期由于受到我国经济体制的制约，工业工程无法充分发挥其强大的功效。同时企业没有意识到工业工程对于企业运转的重要性而没有对它足够重视，使工业工程在我国早期的推广面临巨大阻力。

改革开放后，一部分企业开始引进这种技术，但很多企业仍没有看清未来的发展趋势，不认为中国企业能适用工业工程技术。随着经济水平的不断提升，企业之间的竞争愈发激烈，促使企业开始寻找转型之路，开始考虑用最少的投入最大的经济收益，这给了工业工程在我国巨大的发展机遇。企业为了提升自身综合竞争力，加大对工程工程技术的应用和研究。

尽管如此，由于工业工程在我国开展时间较短，普及程度较低，缺乏系统性应用，工业工程技术在我国的发展过程中表现出管理不精细，信息不及时，层次繁杂冗余，不够标准等问题。此外，我国对现有工业工程技术的应用过度依赖国外企业所使用的技术，表现出无意识的盲目性，缺乏细致的规划和持续的改善，所以总体上应用效果不佳。

我国经济社会发展进入新时代后，随着习近平总书记“绿水青山就是金山银山”的重要理念的提出和被广泛接受，工业工程的理论与实践在我国已经融入了可持续发展理念，如何正确处理经济发展与生态环境保护之间的辩证关系开始成为工业工程的研究对象，推动形成企业绿色发展方式。

随着我国经济社会的发展和产业结构的调整，工业工程也面临着新的挑战 and 机遇。因此我国企业需要不断寻求新技术，多创新，多实践，努力探索新方法，解决新问题。工业工程学科在经济增长中蕴藏着巨大的潜能，无疑将为我国下一阶段的经济社会转型、提高经济社会发展质量、提高人民生活水平、建设富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国做出非凡的贡献。

4 总结

文章先介绍了工业工程的内涵，包括它是如何被定义的，工业工程具体是做什么的以及成为一名工业工程师需要具备什么技能。然后文章介绍了工业工程发展变迁的历史并展望未来，探讨未来这一行业的机遇和挑战。工业工程自19世纪末诞生以来，一系列的历史事件建立了完整的专业理论，这些原理至今仍支配着这个行业。与此同时，如今刚刚成形的新的概念和理论为工业工程注入新的活力。

工业工程最吸引人之处在于它为工业工程师提供了广阔的职业选择。从最初工业工程狭小的研究范围，到现在不断打破与其它学科的界限，展现出无限的潜力。工业工程乐于吸纳新的理论，新的科技，新的应用场景。立足于百年未有之大变局，回顾工业工程的发展历程，这一充满活力的领域注定会不断发展壮大，为身处其中的所有人提供无线的可能，并成为全球社会发展的引领者。

参考文献

- [1] L. and R. N, “The nature of industrial engineering,” *The Journal of Industrial Engineering*, vol. 5, 1954.
- [2] C. Babbage, *On the Economy of Machinery and Manufactures*. C. Knight, 1832.
- [3] W. Contributors, *Industrial engineering*, Wikipedia, Jun. 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_engineering.
- [4] N. R. Council et al., *Visionary manufacturing challenges for 2020*. National Academies Press, 1998.
- [5] N. W. Encyclopedia, *Industrial engineering*, New World Encyclopedia. [Online]. Available: https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Industrial_engineering.
- [6] J. Lucas, *What is industrial engineering?*, livescience.com, Oct. 2014. [Online]. Available: <https://www.livescience.com/48250-industrial-engineering.html>.
- [7] H. B. Maynard and K. B. Zandin, *Maynard’s industrial engineering handbook*. McGraw-Hill, 2001.
- [8] A. S. of Mechanical Engineers and G. U. of Toronto, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. New York City : The Society, 1880. [Online]. Available: <https://archive.org/stream/transactionsof07amer#page/428/mode/2up>.
- [9] G. Salvendy, *Handbook of industrial engineering : technology and operations management*. John Wiley & Sons, 2001.