文章编号:1005-9679(2017)05-0104-04

基于网络层次分析法的工业 4.0 指数评价体系

刘蓓蓓，　董　明

(上海交通大学 安泰经济与管理学院,上海 200030)

摘　要： 随着工业 4.0 概念在世界范围的普及,建立一套完整而合理的工业 4.0 指数评价体系显得尤为重要。基于国内外对于工业 4.0 评价体系的初步研究文献以及其他相关行业文献,根据指标体系设计的原则,形成一套工业 4.0 指数评价体系,在此基础上运用网络层次分析法对指标权值进行确定,建立工业 4.0 评价模型,从而为企业工业 4.0 程度的评价提供理论依据。

关键词： 工业 4.0;评价指标;网络层次分析法

中图分类号： F 423.1　　**文献标志码：** A

Evaluation on Industry 4.0 Level Based on Analytic Network Process

LIU Beibei,　*DONG Ming*

(Antai College of Economics& Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The industry 4.0 level evaluation index system in this paper is formed on the basis of former studies of industry 4.0 and according to the principle of industry 4.0 evaluation index system. Then the Analytic Network Process is used to fix the weight of index and establish the system model of industry 4.0 level assessment, which offers decision support for the appraisal and administration of enterprises industry 4.0 level.

Key words: industry 4.0; assessment index; analytic network process

1　工业 4.0 评价指标体系构建

自德国工业 4.0 提出以来,一些组织已经根据各种分析方法和项目实践经验建立了一些评估方法,其中包括德国机械设备制造业联合会(VDMA)这一类权威的行业协会,也包括麦肯锡这一类咨询公司。德国机械设备制造业联合会(VDMA)的下属基金会 IMPULS 建立了一个工业 4.0 成熟度评测模型,模型分为 6 个维度(即一级指标):战略和组织——实施工业 4.0 的基础,评测在企业战略方面工业 4.0 的建立和完成程度;智能工厂——使分散的、高度自动化的生产成为现实,评测企业在信息物理系统的基础上实现数字集成和自动化生产的程度;卓越运营——引导生产过程,评测企业流程和产品自动化程度,以及信息和通信技术(ICT)和虚拟算法对流程和产品的控制程度;智能产品——所有产品都与信息和通信技术(ICT)相结合,评测在价值链中产品与更高级的系统联系的程度;数据驱动服务——被利用在商业模型中,评测产品、生产过程和顾客集成下的数据驱动服务提供能力;员工——工业 4.0 的成功实施离不开合格的员工,评测企业员工是否拥有实施工业 4.0 的技能。麦肯锡提出了两种专有评价工具,包括偏向技术效率的 Digital Compass 和偏向管理效率的 Digital Quotient,并将两种工具结合起来建立了一套评价体系。其中,Digital Compass 包括服务/售后、资源/流程、资产运用效率、人员、库存、质量、供给/需求匹配、市场投放 8 个一级指标,以及 26 个二级指标;Digital Quotient 包括战略、文化、组织、

收稿日期:2017-02-14

基金项目:自然科学基金重点项目:基于价值链重构的互联网环境下制造业企业转型升级研究(71632008)。

作者简介:刘蓓蓓(1991—),女,河南信阳人,硕士,研究方向为生产管理;E-mail: 529185682@qq.com。

能力 4 个一级指标，以及 18 个二级指标。

对企业的工业 4.0 程度进行评价，首先找出与工业 4.0 成熟度密切相关的因素。要建立一套完整、简洁的工业 4.0 评价体系，必须遵从评价体系构建的基本原则，包括系统性、可测性、层次性、简明性、可比性、定性与定量相结合、绝对指标与相对指标相结合等，以保证评价体系的科学化和规范化。本文在这些基本原则的基础上，参考 VDMA 和麦肯锡的研究经验，并结合以前研究中对于物流指数、信息化指数、物联网发展指数等相关行业指标的研究和工业 4.0 的特点，将工业 4.0 评价体系划分为 5 个领域，即生产、质量、物流、信息安全和人员。

根据工业 4.0 的性质和特点，生产和物流应作为最重要且最广泛的两个指标，因此本文将生产和物流指标进行两层细分。其中，生产指标细分为生产计划、智能生产、智能产品和资源利用 4 个二级指标，生产计划指标评价企业利用数据进行分析预测从而计划生产的能力，智能生产指标评价生产过程中的智能化程度，智能产品指标评价产品信息网络化的程度，资源利用指标评价企业利用数据和智能化优化生产效率的能力；物流指标细分为智能仓储、精准物流和敏捷供应链管理 3 个二级指标，智能仓储评价仓储过程中的智能化程度与追踪能力，精准物流评价物流配送过程中标准化程度和实时监控能力，敏捷供应链管理评价企业供应链在智能化背景下快速响应的能力。在此基础上，再对生产和物流指标的二级指标进行进一步细分，分别得到 13 个和 11 个三级指标。其次，质量指标虽然重要性高，但范围较小，因此将质量控制指标直接细分为 3 个三级指标。最后，信息安全指标和人员指标作为不可缺少的部分，重要性较低，也直接细分为三级指标。在此基础上，本文建立生产(*A*)、质量(*B*)、物流(*C*)、信息安全(*D*)和人员(*E*)5 个一级指标，并进一步将其划分为 10 个二级指标、32 个三级指标，如表 1 所示。

表 1　工业 4.0 评价体系细分指标

一级指标	二级指标	三级指标	涵义
生产(*A*)	生产计划(*A*1)	数据加工处理(*A*11)	业务分解与数据建模的能力
		数据驱动的需求预测(*A*12)	基于数据进行需求-供给匹配的能力
	智能生产(*A*2)	*M*2*M* 机器通讯(*A*21)	现场设备与系统之间、与网络之间的数据接口数量
		集成的内部生产网络(*A*22)	各部门数据格式与联通机制的集成程度
		横向集成(*A*23)	跨企业价值链(供应商、客户)的横向集成程度
		柔性制造(*A*24)	多品种小批量的柔性制造的能力
	智能产品(*A*3)	传感器与集成控制器(*A*31)	依赖其进行数据的收集与采集、实时计算的程度
		产品与互联网的连通性(*A*32)	产品直接连接互联网的程度(以太网)
		数据存储与信息交换(*A*33)	标注产品信息，进行信息交换的能力(RFID)
		远程监控(*A*34)	基于数据分析进行预测性服务的能力
	资源利用率(*A*4)	设备综合效率监控(*A*41)	对设备综合效率的实时监控能力
		流程与机器弹性(*A*42)	对空闲时间的 *WIP* 优化能力
		设备预检性维护(*A*43)	基于设备监控数据进行预检性维护的能力
质量(*B*)	质量控制(*B*1)	不符合项报告(NCR)预估改进(*B*11)	对 NCR 数据的收集、分析和预估改进能力
		单部件全生命周期追踪(*B*12)	对单个部件在全生命周期的追踪的能力
		全生命周期质量分析(*B*13)	从 QM 系统取得质量数据并进行分析的能力
物流(*C*)	智能仓储(*C*1)	动态盘点(*C*11)	盘点的同时可出入库记账的能力
		RFID 终端设备管理(*C*12)	是否使用 RFID 终端设备进行单据确认、盘点、查询统计
		物资全生命周期管理(*C*13)	物资从入库到出库直至报废全过程管理
	精准物流(WMS 系统)(*C*2)	库位精准定位(*C*21)	对库位精准定位管理、状态全面监控能力
		智能分配库位(*C*22)	智能按先进先出自动分配上下架库位能力
		库存情况实时监控(*C*23)	实时监控库存情况的能力
		物料信息自动采集(*C*24)	通过对批次信息的自动采集，实现对产品生产或销售过程的可追溯性
	敏捷供应链管理(SRM 系统)(*C*3)	供应商数据管理(*C*31)	对供应商能力数据(设计、生产能力等)进行管理的能力
		询价和报价的快速响应(*C*32)	自动完成询价和报价流程，以加快供应商确认和响应的能力
		供应商物流精准配送(*C*33)	对供应商物流状态实时监控的能力
		信息交互和应急处理(*C*34)	对供应商信息快速交互与应急问题快速处理的能力
信息安全(*D*)	信息安全(*D*1)	云安全(*D*11)	云计算应用、云系统安全管理的能力
		信息物理系统(CPS)安全(*D*12)	控制网络化智能交互技术安全等问题的能力
		数据隐私管理(*D*13)	对数据和个人信息保护和管理问题重视程度
人员(*E*)	员工(*E*1)	员工工作技能(*E*11)	研发者、维护人员、设备操作者是否具有全面、跨学科工作技能
		人机交互(*E*12)	对于员工与机器之间的信息交互和身体交互的协调能力

2　工业 4.0 综合评价过程

本文采用网络层次分析法(Analytic Network Process,ANP)为各指标的权重赋值。网络层次分析法由 Saaty 教授于 1996 年提出,是在层次分析法(AHP)的基础上发展形成的一种新的决策方法。相较于 AHP 方法而言,ANP 将系统内各个元素的关系用网络结构来表示,而不是简单的递阶层次关系。典型的 ANP 模型分为两大部分,第一部分为控制层,包括一个目标和多个准则;第二部分为网络层,由受控制层支配的各个元素组成,其内部是互相影响的网络结构。ANP 可以用网络形式表现各元素之间的关系,能够弥补 AHP 方法的不足。工业 4.0 的各个评价指标本身并不是完全独立的,很多元素都能够互相影响,利用 ANP 方法构造模型就能综合分析各个元素之间的相互作用。ANP 模型的结构可由图 1 来表示。

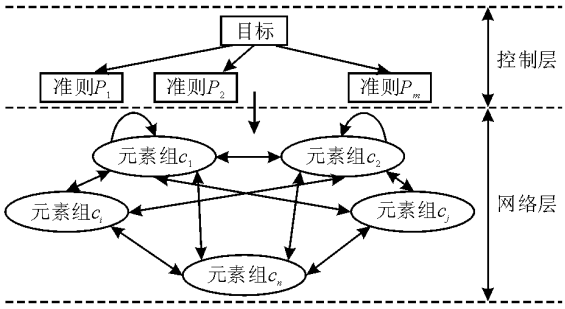

图 1　典型的 ANP 模型

由于 ANP 模型的计算较为复杂,不借助计算软件的情况下很难将 ANP 模型用于解决实际问题。本文借助超级决策软件(Super Decision, SD)来完成综合评价过程。将表 1 指标体系中的 10 个二级指标作为元素集(Cluster)、32 个三级指标作为元素输入软件来创建元素集,创建完成后再通过在软件中连接元素来建立元素之间的相关关系。例如,若生产计划($A1$)对智能生产($A2$)有单向影响,则创建 $A1$ 至 $A2$ 的单向箭头;若生产计划($A1$)与智能生产($A2$)相互影响,则创建 $A1$ 至 $A2$ 的双向箭头;若同一个元素集中的两个元素互相影响(例如 $A11$ 和 $A12$),则创建封闭环状的双向箭头。以此类推,构建的模型元素集及各元素之间的联系如图 2 所示。

接下来根据图 2 构造 ANP 超矩阵来进行权重赋值,即计算各个指标的权重,这一步骤的关键问题在于比较各个关键指标的重要程度。

SD 软件支持四种输入形式来输入优势度数据,采用任意一种形式输入都可以得到其他三种形式相应的数据。本文采用"判断矩阵提问式"来将数据输入 SD 软件。ANP 法主要涉及的调查问卷有两部分:第一部分是指标间的关联程度,即指标间的反馈和依赖关系,输入 SD 软件即得到图 2 的元素关联;第二部分就是存在反馈和依赖关系间的重要程度,重要程度按照 1—9 方法赋值,具体取值参考如表 2 所示。将数据输入 SD 软件,可得到超矩阵、加权超矩阵和极限超矩阵,由此最终得到工业 4.0 指标评价体系中各指标权重,如表 3 所示。计算过程中对判断矩阵进行一致性检验,所得判定系数均小于 0.1,表明权重可以接受。

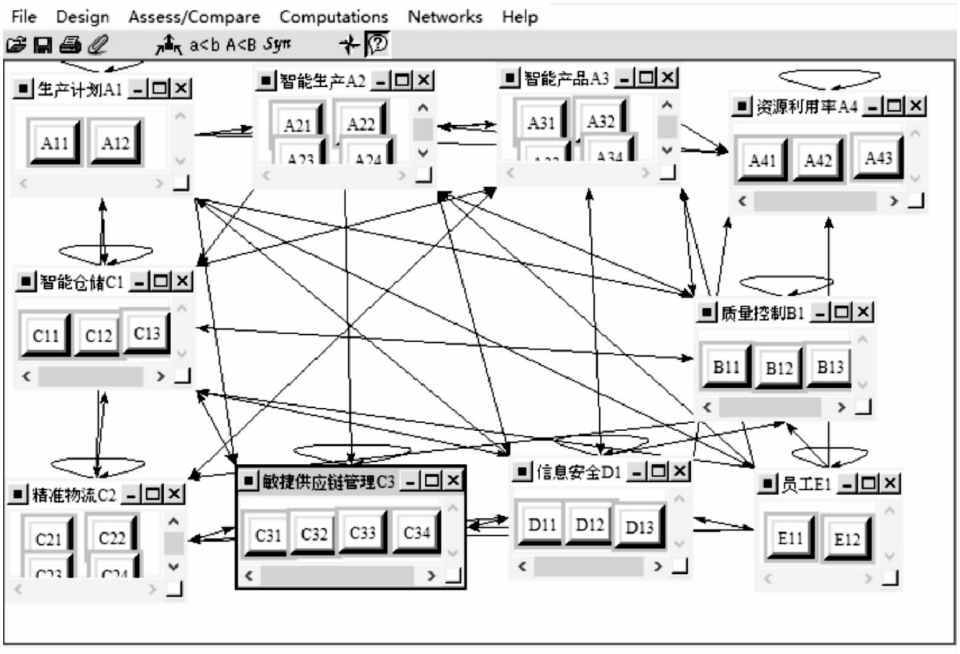

图 2　工业 4.0 评价 ANP 模型指标对应元素和元素集示意图

表 2　赋值标度取值参考表

标度	1	3	5	7	9
值	i 与 j 同等重要	i 比 j 稍微重要	i 比 j 明显重要	i 比 j 非常重要	i 比 j 绝对重要
标度	2,4,6,8				
值	对应中间状态				

表 3　工业 4.0 评价指标权重表

指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
$A11$	0.000 283	$A33$	0.262 116	$C11$	0.000 193	$C32$	0.001 474
$A12$	0.000 076	$A34$	0.000 149	$C12$	0.212 262	$C33$	0.000 037
$A21$	0.000 489	$A41$	0.000 498	$C13$	0.106 838	$C34$	0.000 015
$A22$	0.000 166	$A42$	0.000 246	$C21$	0.006 042	$D11$	0.001 214
$A23$	0.000 031	$A43$	0.000 155	$C22$	0.013 505	$D12$	0.001 198
$A24$	0.000 1	$B11$	0.000 205	$C23$	0.020 679	$D13$	0.000 183
$A31$	0.000 389	$B12$	0.221 664	$C24$	0.149 326	$E11$	0.000 085
$A32$	0.000 215	$B13$	0.000 045	$C31$	0.000 2	$E12$	0.000 025

由表 3 可以得出，物流指标(C)所占权重最大，为 0.51；其次是生产指标(A)和质量指标(B)，分别占权重 0.26 和 0.22；信息安全指标(D)和人员指标(E)所占权重最小，均不到 0.1。

3　结语

工业 4.0 指数评价体系是企业进行工业 4.0 程度评价的基础，因此，设计指标体系对于工业 4.0 的普及和应用有着重要地位。本文考虑各指标之间的交互作用和影响，利用 ANP 方法对各指标进行评估和得分测算。本文提出的指标评价体系能够帮助企业对自身是否达到工业 4.0 进行自我诊断，找出存在的差距、薄弱环节及其成因，从而提升自己的工业 4.0 实力。

参考文献：

[1]　丁纯，李君扬. 德国“工业 4.0”：内容、动因与前景及其启示[J]. 德国研究，2014(4)：49-66.

[2]　贺纯纯，王应明. 网络层次分析法研究述评[J]. 科技管理研究，2014，34(3)：204-208.

[3]　贺正楚，潘红玉. 德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”[J]. 长沙理工大学学报(社会科学版)，2015(3)：103-110.

[4]　托马斯·保尔汉森，米夏埃尔·腾. 实施工业 4.0[M]. 北京：电子工业出版社，2015.

[5]　王小建，王建伟. 物流信息化评价指标体系与评价方法研究[J]. 铁道运输与经济，2009，31(10)：70-74.

[6]　乌尔里希·森德勒，森德勒，邓敏，等. 工业 4.0：即将来袭的第四次工业革命[M]. 北京：机械工业出版社，2014.

[7]　HENG S. Industry 4.0：upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon[J]. Social Science Electronic Publishing，2014.

[8]　https://www.industrie40-readiness.de/? lang=en