

# 基于图论的组织互操作性建模与评估研究

高琳 段国林 姚涛

河北工业大学机械学院 天津 300401

(gltzf@126.com)

**摘要** 为解决组织机构互操作性的建模与评估等问题,文中分析了国外关于图论应用和互操作性评估相关研究内容;简述图论的起源和企业互操作性的3个互操作方面;依据业务流程进行企业互操作性建模,提出了基于图论原理的互操作性模型改进方法;提出了应用于基于图论改进模型的组织互操作性规则;构建了基于图论原理、企业建模和规则3个方面互操作性的评估机制,为组织机构互操作性评估了思路。

**关键词** 图论原理;企业建模;组织互操作性;规则;基于实例推理

**中图分类号** TP399

## Research on Organizational Interoperability Modeling and Evaluation Based on Graph Theory

GAO Lin, DUAN Guo-lin and YAO Tao

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

**Abstract** To solve the problems of organization interoperability modeling and evaluation, the related research contents of graph theory application and interoperability evaluation abroad are analyzed. This paper briefly introduces the origins of graph theory and three interoperable aspects of enterprise interoperability. Based on the business process, the interoperability model is modeled, and an improved method based on graph theory was proposed. An organization interoperability rule based on graph theory is proposed. An evaluation mechanism based on the interoperability of graph theory, enterprise modeling and rules is constructed, which expands the mind for the interoperability evaluation of organizations.

**Keywords** Graph theory, Enterprise modeling, Organization interoperability, Rule, Case-based reasoning

互操作性源于20世纪90年代中期纯软件问题,现在却覆盖了单个或协同企业的许多知识领域、维度和层次。经过近20年的研究,虽然开发企业互操作性花费了很大的精力,特别是在欧洲,在FP5/FP6下已经进行了几个项目的研究,但对互操作性还没有完全满意的解决方案。图论一直以来都与应用数学研究紧密相关<sup>[1-2]</sup>。图论方法可以应用于很多领域<sup>[3]</sup>。一些评估的研究也与图论进行了关联<sup>[4]</sup>。近年来基于图论的方法也被广泛的应用于各种系统中。如基于图论的耦合系统研究<sup>[5]</sup>和应用于网络结构的图论研究<sup>[6]</sup>。企业业务互操作框架研究和互操作分析对基于图论的互操作性建模具有一定启迪作用<sup>[7-8]</sup>。

互操作性的评估与度量一直以来都成为互操作性研究的重要着眼点。Rezaei阐明了不同的互操作性框架、评估方法和度量技术和机制<sup>[9]</sup>,描述了现有的互操作评估模型,并对它们的结果进行了比较分析,但并未提出评估互操作性的新颖方法<sup>[10]</sup>。Partial对于文化影响评价作出了详实分析,虽然有利于地方政府组织机构互操作,但是没能提出有益于组织机构互操作的模型化方案<sup>[11]</sup>。Saturno使用多标准方法评估自动化系统之间的互操作性,但对于组织机构互操作的方法相

对繁杂且不易实现。同时,基于标准的互操作性评估研究通用性较差<sup>[12-13]</sup>。Pirayesh对设计过程的互操作性进行了评估与度量,这对企业互操作流程的互操作性评估有一定参考价值<sup>[14]</sup>。对于运用何种方法来对互操作性进行评估,一直以来都是专家研究的焦点<sup>[15]</sup>。基于上述观点,本文提出运用图论的方法来改进企业互操作性建模,进而实现对企业互操作性的评估。

## 1 图论与企业互操作性简述

### 1.1 图论起源

图论本身是应用数学的一部分。因此,历史上图论曾经被好多位数学家各自独立地建立过。关于图论的文字记载最早出现在欧拉1736年的论著中,他所考虑的原始问题有很强的实际背景。图论起源于一个非常经典的问题——柯尼斯堡(Konigsberg)问题。1738年,瑞典数学家欧拉(Leonhard Euler)解决了柯尼斯堡问题。图论由此诞生,欧拉也成为图论的创始人。

图论一直与应用数学紧密相关,也被其他领域的相关研究所应用。而要应用于企业互操作性,必先找到与企业互操

基金项目:国家自然科学基金(51775166);河北省自然科学基金(F2014202241)

This work was supported by the National Natural Science Foundation, China(51775166) and Natural Science Foundation of Hebei Province(F2014202241).

通信作者:段国林(glduan@hebut.edu.cn)

作性的哪一方面互操作关联度更强,从而着实有效地应用图论原理。

## 1.2 企业互操作性

企业互操作性指企业系统间相互协作和相互作用的能力。为了保持企业的创造力和竞争优势,各企业必然会采用合作的形式来实现生产价值。协作维度主要包括技术、语义和组织机构方面。

### 1.2.1 技术方面

企业系统互操作性的技术方面,也被称为互操作性的语法方面,主要处理互操作性的“渠道”方面,即在通信协议方面促进交流和交换,也包括应用系统之间的数据交换和信息传递。技术方面是最体现互操作先进性的方面,由于各种技术快速进步,技术互操作性在信息通信的各个领域仍然保持飞速发展。

### 1.2.2 语义方面

企业互操作性的语义方面主要处理数据、信息的整合和一致性问题,以便于支持合作和互操作,特别是在知识和信息共享方面的互操作。研究语义互操作性的目的是为系统提供一种解释数据、信息或知识含义的方法。这是一个难度很大的问题,这类研究目前还没有给出打包的或者开箱即用的解决方案。

### 1.2.3 组织方面

企业互操作性的组织方面涉及定义业务目标、业务流程的协调与合作,并予以交换信息的组织机构互操作能力,并且

这些组织有着不同的内部结构和流程。组织互操作性在企业互操作网络中常见的问题包括:不同的人力和组织行为;不同的组织结构;不同的业务流程和管理方法;不同价值观创建的网络;不同业务目标;不同的法律基础、立法、文化和工作方法以及不同的决策方法。

为实现组织互操作性,需要协调合作业务实体的业务流程,定义同步步骤和信息以及定义组织间流程的协调和互操作机制。组织互操作性需要说明如下问题:

- 1) 在供应链中定义角色和角色的职责;
- 2) 定义信息的完整性和保密策略,以及所在位置和传输的必要机制;
- 3) 建立支持互操作工作的程序和执行过程;
- 4) 定义中间过程和两个企业相互建立连接的可能条件
- 5) 创造不同内部组织和执行结构的企业之间服务的许可。

## 2 企业建模

本文的研究以基于企业建模的互操作性研究为目的。因此,文中对企业的现有状态进行建模,通过以下几个方面对企业运营进行表达:功能、决策、信息系统、业务流程和不同抽象层面的现实表达。本文依据此观点和抽象层面进行建模,此观点与最终的企业模型相关联,企业模型又与建模人员的目标相联系<sup>[16]</sup>。最终,产生一种与每种建模语言相关联的特殊方法,图1描述了(生命周期)构建和使用模型所需的各种步骤。

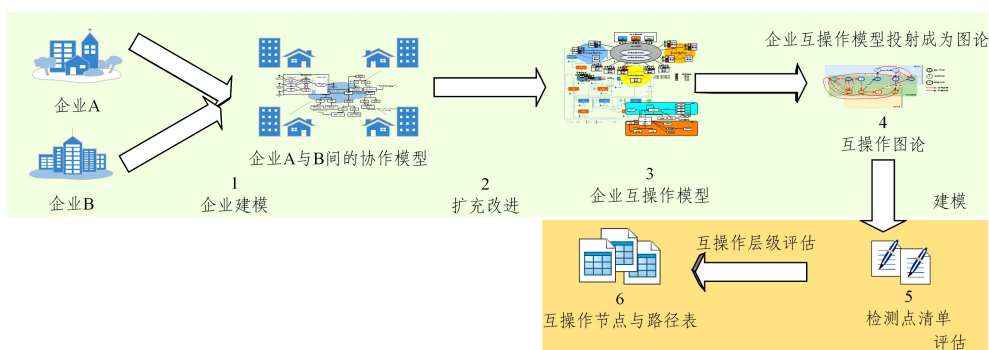


图1 企业互操作评估方法流程

Fig. 1 Flow chart of enterprise interoperability assessment methodology

使用图论的方法对模型进行转换。图论有其作为通用语言的优势,并依据图论进行转换研究。然后系统的应用通用规则,而无需顾及所使用的建模语言。

### 2.1 企业建模阶段

对于建模语言的唯一需求是需要以后方便形成规则用以存储于规则库或知识库当中。所以本文借鉴部分 UEMML 及 UML 来进行企业互操作性建模。同时,模型需要把握流程过程,所以也借鉴了其他相关建模方法。

### 2.2 企业互操作性建模阶段

对所有企业模型进行分析,并提供端到端的网络预览。在创建互操作性模型期间,会显现一些特定问题,这些问题通常都提示缺乏互操作性。文中实例研究过程如图2所示。

在产品的生产流程中,企业A的项目管理者首先要对可行性进行分析研究。然后将绘制的模型和申请交付企业B

的涉及部门进行可行性研究的实现。这样会产生两种结果,具备可行性或者非可行性。如果是可行的,需要将报价草案交付企业A的设计部门。设计部门将有两种情况要处理,一种是完成报价,交付之前的项目管理者。另一种是报价,具体流程参见图2右上部分,该流程也需要企业B的设计部门参与其中。

通过修正协议和模具可行性的验证后,由企业B的涉及部门写报价并将模具报价交付企业A的设计部门。随后由供给部门派发模具订单,由企业B的制造部门制造模具。而后再将模具和交货订单交付物流部门和项目管理者。如果模具和工具等合格则交付生产部门进行零部件制造。倘若不合格,交付品质管理部门进行处理。同样,企业A的生产部门所生产的零件有合格和不合格两种情况,处理流程如图2中下部分所示。如果工具和产品一切都没有问题,由企业B的

会计部门开具发票,经过企业 A 的会计管理者所执行的发票

流程,最终交付企业 C。

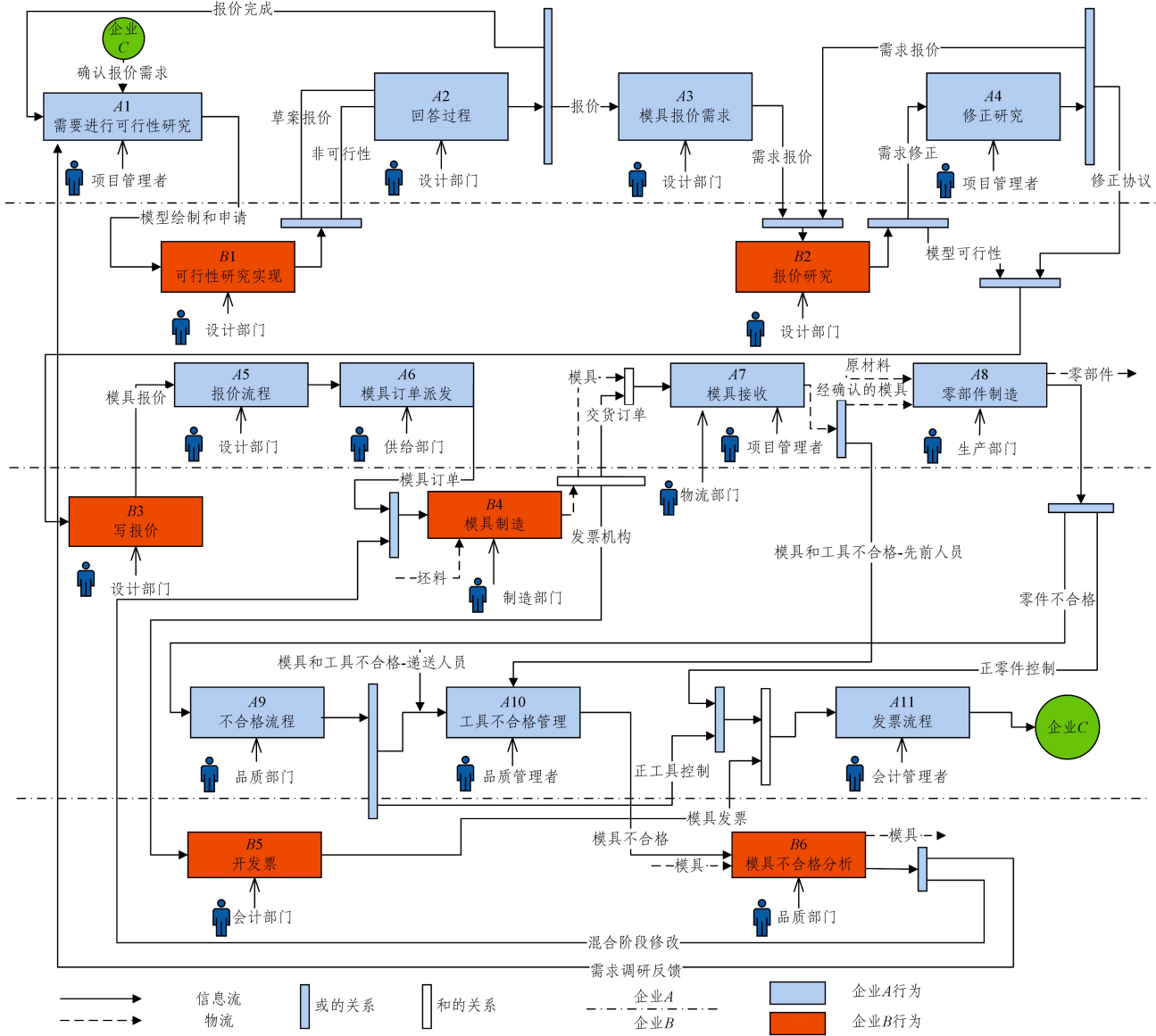


图 2 互操作性模型实例

Fig. 2 Instance of interoperability model

2.3 组织改进阶段

当人员、服务和企业在交互信息时,都会频繁出现互操作性问题。所以,明确谁负责什么问题很重要。这种需求导致每一位参与者和每一项资源都时刻准备参与到模型的活动。然而,许多建模语言都单纯的关注功能,而不能清晰表达参与者和资源。在这种情况下,模型必须充分包含参与者的信息。这便是组织改进这一阶段的目的,如果研究中使用的语言已经足以能够对参与者进行表达,那这个阶段就不是必要的了。最后,组织完善可以实现互操作节点的准确识别与描述。



图 3 行为人员的表达

Fig. 3 Representation of actors

为说明此阶段,本文将用简洁的方式描述这一过程。如

图 3 所示,设想图 3 中的模型没有人力资源作为企业互操作性建模阶段的输出,而完整的模型只是组织改进后的结果。

2.4 基于图论的互操作性建模阶段

图形表达的主要好处在于其通用性、正规化和可检查规则,并且可通过任何建模语言派生,因此也可以从任何企业模型中派生。企业模型可以在分析和设计环境中表达系统,而图形则可以通过这种表达来使用特定的规则检测和评估互操作性。此外,图形表达只允许表达与互操作性问题(交互)相关的信息。这些图提供了流程的简化视图,强调了互操作节点和/或区域。一旦确定了这些节点和/或区域,就可以根据互操作性验证系统的规则。

参与互操作行为的每个组织单元(人员和人员组等)都由图中的节点表示。每一个交互由两个节点间的箭头表示(见图 3)。根据一个参与人员转化成一个节点的原理,表 1 列出了参与人员与节点之间的转化关系。图 4 则为图 2 模型的转化。

表1 参与者与节点等价对照

Table 1 Participants and nodes are equivalent controls

参与者	企业	节点编号
项目管理者	A	1
设计部门	B	2
设计部门	A	3
供给部门	A	4
制造部门	B	5
物流部门	A	6
生产部门	A	7
品质部门	A	8
会计部门	B	9
品质管理者	A	10
品质部门	B	11
会计管理者	A	12

图4中涉及的所有交互:信息和产品。此外,输入节点、输出节点以及中间节点用不同的节点表达方式加以区分。输入输出节点对应与外部参与相关的参与者。这种实际研究中的概念在本文后面部分没有采用。不同的企业用不同框架表示。互操作区域中的节点对应与其他企业交互的参与者。如有必要,图形中的连接线可以量化。例如,可以提到行为的准备时间。然后就可以推断出某一部分或整个网络信息传播的前置时间。图3中没有量化,连接线上的数字只起标识作用。

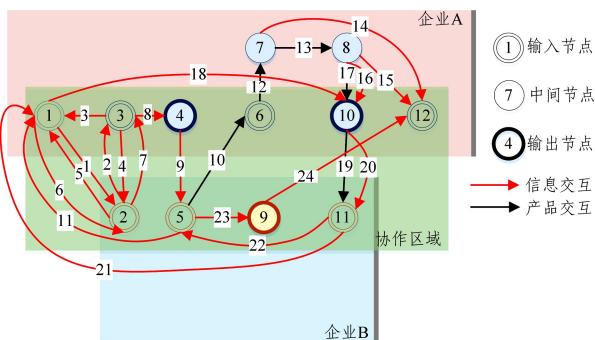


图4 互操作节点的图论表达

Fig. 4 Graph representing the interoperability nodes

虽然本文关注的是企业间的互操作性,但是可以在不同细节上、级别上使用同样的方法,例如在公司内部不同的服务之间。

## 2.5 互操作性问题辨识、检测阶段

本文提出的方法是通过规则来检测互操作性问题。这些通用规则与前文提到的互操作性的建模相关。评估互操作性遵循的原则是,缺乏互操作性会导致操作性能的缺乏。如果有必要,还可定义这些通用规则:

1)需要检测系统的连接性,由于显著的集成原因,为保证在整个结构中资源不被孤立,而是与其操作环境紧密相关,每一个节点都需要与另一个节点相连接;

2)需要检测反馈回路,在图上的节点每次发送信息的相关时间,为了保证质量,这是极其必要,确保收件人收到发件人的信息和相关时间事宜,发件人有必要知道信息是什么时候被发送出去的。

## 3 应用互操作性通用规则

本节详细说明这些规则,并使用与前一部分相同的案例

研究来说明它们,目标不是开发特定的算法,而是使用现有的已知算法来检测互操作性问题。

图论符号的数学表达如下。

一个有向图  $G=[N,U]$  由以下步骤确定:

1)一个以  $N$  个元素命名节点的集合,节点编号  $i=1, 2, \dots, N$ ;

2)一个集合  $U$ , 其元素  $u \in U$  是被称为连接线的节点的有序对, 如果  $u=(i, j)$  是  $G$  的连接线, 则  $i$  是原点,  $j$  是终点。

### 3.1 通用互操作性规则:连通

必须将每个节点连接到另一个节点,以确保资源不在结构中隔离,而是与其操作环境相关。这个原则还能够确保资源与整个结构保持一致。然后,如果一个资源与其他资源断开连接,这可能是严重缺乏互操作性的结果。如果一个节点至少可以从图的另一个节点访问,则会检查此规则。这条规则意味着图必须由强连接的组件组成。这条规则在图分析中是众所周知的。

### 3.2 通用互操作性规则:反馈回路

每个节点都必须向接收信息的节点发送反馈。要检查该属性,需要表达其关联矩阵,其中每一列对应于  $G$  的连接线,每一行对应于一个节点。如果连接线 1 是从节点 1 到节点 2, 那么在矩阵的  $u_1$  列中,从节点 1 的行上有 +1, 从节点 2 的行上有 -1。如图 5 给出了与图对应的关联矩阵。

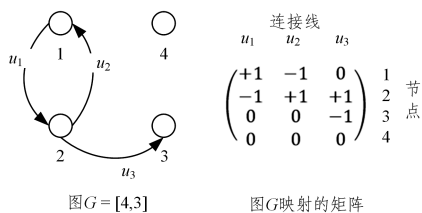
图  $G=[4,3]$ 图  $G$  映射的矩阵

图5 图和关联矩阵举例

Fig. 5 Examples of graphs and incidence matrix

在本文的案例研究中,图4显示了弧的编号,图6为映射的关联矩阵。为了验证反馈环的存在性,需要比较关联矩阵对的每一行。对于每两行,必须观察向量的个数  $[+1, -1]$  和向量的个数  $[-1, +1]$ 。如果这两个数是相同的,那么我们得知有反馈回路;否则,这两个数字之间的差异是考虑交换时缺乏互操作性的特征。

如果一行完全由“0”组成,则节点是孤立的。

如果一行仅由一个非零值或同一符号的值组成,则该节点上不存在反馈循环。

如果一行不包含相同数量的“+1”和“-1”,那么所有目标节点并不总是返回到发送方节点。

具体地说:如果“+1”的数量大于“-1”的数量,则考虑发送的节点的目标节点并不总是指向该节点;如果“+1”的数目小于“-1”的数目,则讨论的节点并不总是向发送方节点返回一个返回值。

在研究的案例中,本文突出了“+1”和“-1”,并将它们加起来分析图6中的矩阵。可以立即观察到反馈方面存在明显的功能障碍,因为许多节点不遵循这一基本规则。因此,创建一个性能指示器来度量两个节点之间关于节点之间交换次数的反馈量,这将是极其有用的。

节点 2,4,6,9 和 11 的得分为 0。因此,在这些节点上有大量的反馈循环。

节点 3,5,7 和 8 的得分大于零。因此,目标节点并不总是引用这些节点。

节点 1,10 和 12 的得分小于零。因此,它们并不总是发送信息或产品回来。

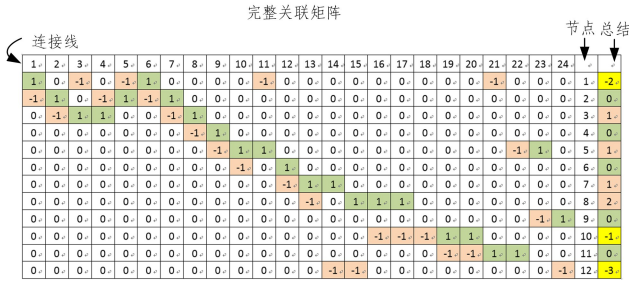


图 6 完整关联矩阵  
Fig. 6 Complete incidence matrix

**结束语** 本文提出了组织互操作性建模和评价方法。该方法中的模型构建部分以企业建模为基础。运用图论方法得到一个独立的模型,然后将通用规则应用于基于图论的改进模型,以确定组织互操作性的问题。

基于实例分析,说明了该方法的实用性。这种基于实例的推理可以确保方法中的元素是可靠的。然而,该项研究工作仍需要改进。首先,只有业务流程被引用到案例分析中,因此为保证通用规则的可靠性,需要定义转换机制,如建立在活动、资源等概念基础上的。其次,该方法虽然基于图论分析,但是借助了过程分析的方法,因此,应在互操作性其他方面添加新方法。

参考文献

[1] MIRAFZAL S M. More odd graph theory from another point of view[J]. Discrete Mathematics,2018,341(1):217-220.

[2] WEI W H,XIAO W J,HUANG S Q,et al. Research on the application of algebraic graph theory in parallel processing[J]. Computer Science,2008,35(11):67-69.

[3] YAN H,LU T W. Study on the application of graph theory in pavement crack segmentation[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2012,34(1):53-57.

[4] SHI Z,WATANABE S,OGAWA K,et al. 3-Resilience assessment methodology and fundamentals of graph theory[J]. Structural Resilience in Sewer Reconstruction,2018:79-111.

[5] LIU Y,YU P,CHU D,et al. Stationary distribution of stochastic Markov jump coupled systems based on graph theory[J]. Chaos,Solitons & Fractals,2019,119(2):188-195.

[6] VECCHIO F,MIRAGLIA F,ROSSINI P M. Connectome: Graph theory application in functional brain network architec-

ture[J]. Clinical Neurophysiology Practice,2017,2:206-213.

[7] ESPADINHA-CRUZ P,GRILO A. The Business Interoperability Decomposition Framework to analyse buyer-supplier dyads[J]. Computers in Industry,2019,109:165-181.

[8] TABER A,KUMAR G,FREYTAG M. A moment-vector approach to interoperable analysis[J]. Computer-Aided Design,2018,102:139-147.

[9] REZAEI R,CHIEW T K,LEE S P,et al. Interoperability assessment: A systematic literature review[J]. Computers in Industry,2019,106:111-132.

[10] REZAEI R,CHIEW T K,LEE S P,et al. Interoperability evaluation models: A systematic review[J]. Computers in Industry,2014,65(1):1-23.

[11] PARTAL A,DUNPHY K. Cultural impact assessment: a systematic literature review of current methods and practice around the world[J]. Impact Assessment & Project Appraisal,2016,34(1):1-13.

[12] SATURNO M,RAMOS L F P,POLATO F,et al. Evaluation of Interoperability between Automation Systems using Multi-criteria Methods[J]. Procedia Manufacturing,2017,11:1837-1845.

[13] MYKKANEN J A,TUOMAINEN M P. An evaluation and selection framework for interoperability standards[J]. Information and Software Technology,2008,50(3):176-197.

[14] PIRAYESH N A,ETIENNE A,KLEINER M,et al. Performance evaluation of collaboration in the design process: Using interoperability measurement[J]. Computers in Industry,2015,72:14-26.

[15] DUCQ Y,CHEN D,DOUMEINGTS G. A contribution of system theory to sustainable enterprise interoperability science base[J]. Computers in Industry,2012,63(8):844-857.

[16] CHEN D,KNOTHE T,DOUMEINGS G. POP Meta-Model for Enterprise Model Interoperability[J]. IFAC Proceedings Volumes,2009,42(4):175-180.



**GAO Lin**, Ph.D candidate. His main research interests include informatization of manufacturing industry and enterprise interoperability.



**DAUN Guo-lin**, Ph. D, professor, Ph. D supervisor. His main research interests include informatization of manufacturing industry and CAD/CAM.