



Research  
Smart Process Manufacturing: Deep Integration of AI and Process Manufacturing—Article

## 聚乙烯生产过程操作优化知识库设计与实现

钟伟民, 李超远, 彭鑫, 万锋\*, 安许峰, 田洲

Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 17 December 2018

Revised 22 February 2019

Accepted 9 April 2019

Available online 1 October 2019

#### 关键词

本体  
操作优化  
知识库  
聚乙烯

### 摘要

构建聚乙烯生产过程领域知识库, 形成可复用的生产知识, 有助于提升化工行业的智能制造水平。本文结合聚乙烯生产工艺特点, 根据实际生产操作需求, 设计了知识库的总体结构。引入本体作为聚乙烯生产过程领域知识表示和共享的载体, 使用七步法对聚乙烯生产过程进行本体建模, 构建了包含知识本体和推理分析的本体库; 建立操作条件和分子量分布 (MWD) 之间的BP神经网络模型, 进行MWD的预测; 采用差分进化算法对MWD进行优化, 实现对操作参数的优化。以MySQL数据库作为后台支撑数据库, 结合Java语言对知识库系统进行设计和开发, 实现了基于Browser/Server框架的聚乙烯生产过程操作优化知识库系统。在实际工业应用中, 初步验证了该知识库能够满足聚乙烯生产过程操作优化和管理的功能需求, 并具有推广到其他化工生产应用场景的价值。

© 2019 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

传统制造业正受到信息技术飞速发展的影响, 迫切需要应用先进信息技术进行转型升级。国内外提出了“工业4.0”“中国制造2025”等制造业发展战略[1]。作为我国制造业的支柱产业之一, 石油化工行业也面临新的发展机遇[2]。

文献[3]指出我国传统制造业智能制造主要关注在信息系统的基础上应用人工智能技术和网络技术(如先进过程控制和实时优化)。借助知识库系统的智能制造技术深度融合了大数据处理、神经网络建模和专家知识等, 能够针对各种影响因素进行综合分析, 灵活调整生产计划和工况模式。文献[4]提出了基于模糊时间知识

推理的冲突预测方法, 可以为列车运行调整和列车时刻表的改进提供有效的信息处理。文献[5]提出了一种展示和分析设备知识的本体语义表达方法。文献[6]设计了一个知识库推荐系统, 以协助开发人员选择用于嵌入式系统自动化设计的软硬件平台。尽管知识表示和推理已经在许多研究领域, 如离散制造业得到了应用[7,8], 但它们在包括石油化工在内的流程制造业的应用却相对偏少, 文献[9]探讨了知识库系统在苯乙烯过程设备选择中的初步应用。

然而, 在实际聚乙烯生产过程中, 由于过程反应机理复杂、产品和工艺流程多样, 为了提高产能和降低能耗, 需要根据现场实际工况对操作参数进行优化。因此, 不同的生产设备选型和生产工艺都会导致分子量分布

\* Corresponding author.

E-mail address: [vann@ecust.edu.cn](mailto:vann@ecust.edu.cn) (F. Wan).

(MWD) 预测与优化模型参数的不同, 利用基于历史生产数据的优化知识和专家经验知识, 能够推荐与当前工况相匹配的优化与预测模型的计算参数经验值, 降低优化模型的计算复杂度, 同时能够推荐与工况相匹配的操作参数经验值, 以提高优化效率, 但目前这些生产知识并没有得到充分有效的复用。因此, 构建知识库系统解决聚乙烯生产过程中知识复用问题是提高生产过程智能化水平的重要途径。

由于知识库的以上优点, 本文将知识库技术引入聚乙烯生产过程, 提出了适用于聚乙烯生产过程的领域知识库框架, 构建了用于工业聚乙烯生产过程的优化知识库系统 (OOKBS), 集成了聚乙烯生产工艺、设备操作和操作优化的知识共享与复用。

## 2. 知识库系统的架构设计

操作优化知识库系统的架构分为三层: 本体层、模型层和应用层, 系统架构如图1所示。每一个功能层都聚焦于实现独立的功能服务, 使得各层之间的功能具有松耦合性, 并能为上一层应用提供有效的服务支持, 提高了系统的可扩展性。

知识库系统的本体层, 包含了聚乙烯本体、专家规则、本体推理和分析模块。聚乙烯本体描述了与聚乙烯生产工艺相关的知识, 如化工生产设备、操作条件和操作变量等知识。专家规则提供了优化操作和参数选择的专家经验, 以提高在各种工艺条件下MWD优化的计算效率。本体推理和分析模块为基于实时生产状态的MWD优化计算提供了操作参数选择的推理分析功能。

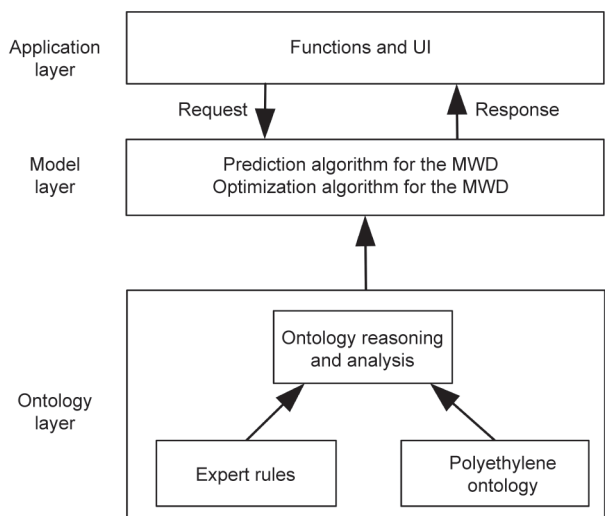


图1. 操作优化知识库系统架构。

知识库系统的模型层主要包含聚乙烯生产工艺模型、聚乙烯MWD预测计算模型和聚乙烯MWD优化计算模型, 为知识库系统提供了模型计算服务。知识库系统的应用层为用户提供聚乙烯生产领域的知识应用服务功能和交互界面, 包括信息总览服务、操作优化服务和用户管理服务。

## 3. 聚乙烯生产过程知识本体构建

由上一节可知, 由于聚乙烯本体描述的是聚乙烯生产工艺相关的知识, 是操作优化知识库的关键组成部分。因此, 本节给出了聚乙烯生产过程知识本体的定义和属性描述, 并根据聚乙烯生产领域知识的特点提出了一种聚乙烯工艺知识本体的构建方法。

### 3.1. 知识本体介绍

本体作为表示知识和概念的重要工具, 主要用于描述领域知识对象以及对象之间的相互关系和推理规则[10]。随着信息技术的发展, 本体论的概念被引入到信息领域, 科研人员为本体提供了新的应用领域, 提高了知识共享的应用效率。然而, 由于本体是对特定领域知识的简单描述, 目前还没有可以用于构建各领域通用的知识本体方法, 一般根据具体应用领域的特定需求人工构建该领域的知识本体。

在实际应用中, 目前常用的知识本体人工构建方法主要包括: 七步法[11]、Enterprise Ontology方法[12]、TOVE (Toronto Virtual Enterprise) 方法[13]、METHONTOLOGY方法[14]和KACTUS方法[15]。其中, Enterprise Ontology方法和TOVE方法主要应用于企业和商业活动领域的知识本体构建, 而METHONTOLOGY方法和KACTUS方法的实现过程较为复杂, 并且缺乏有效的知识本体构建工具支持。

基于对以上本体建模方法进行综合比较, 七步法相对于其他本体建模方法更简单有效, 并且更适合于使用Jena编程接口(API) 通过编写程序来构建领域知识本体[16]。七步法最初是由Natalya F. Noy和Deborah L. McGuinness提出, 用于解决领域知识本体构造的问题, 并已应用于与化工设备选型研究有关的描述和推理等方面[9,17]。因此, 本文将基于七步法进行聚乙烯领域知识本体的构建。

### 3.2. 聚乙烯知识本体构建方法

聚乙烯生产过程操作优化知识库的本体库涵盖了

聚乙烯生产过程的相关知识，涉及生产工艺、原料信息、生产设备、牌号、乙烯种类、产品质量指标、操作变量和工况范围等。为提高知识本体的复用性，本文将聚乙烯生产过程的知识本体分为5个子类：Chemical equipment、Product crafts、Polyethylene types、Variables和Optimal conditions。下文将详细讨论上述5个子类的定义方法。

(1) Chemical equipment。本类定义了乙烯聚合反应所涉及的设备，如反应器、传输设备、换热设备、回收设备、产品罐等，如表1所示。

(2) Product crafts。本类定义了聚乙烯的生产工艺类别，具体可以分为四种：气相法 (Vapor process)、淤浆法 (Slurry process)、溶液法 (Solution process)、高压法 (High-pressure process)。每种工艺方法又可以细分为许多工艺方法，聚乙烯生产工艺类别的结构如表2所示。

(3) Polyethylene types。本类定义了聚乙烯产品的类型。聚乙烯生产过程中，聚合方法的差异导致生产的聚乙烯产品种类也不相同。聚乙烯产品从密度分布的范围可以把生产的产品分为高密度聚乙烯 (HDPE)、中密度聚乙烯 (MDPE)、低密度聚乙烯 (LDPE)、线性低

密度聚乙烯 (LLDPE) 等，不同密度的聚乙烯产品用途各不相同。聚乙烯产品类型的构成如表3所示。

(4) Variables。本类定义了聚乙烯生产过程中控制变量和产品质量指标。本系统选取的控制变量有氢气进料量 ( $f_{H_2}$ )、乙烯进料量 ( $f_{C_2H_4}$ )、丁烯进料量 ( $f_{C_4H_8}$ )、温度、压力、氢烯比 ( $m_{H_2}/m_{C_2}$ )、丁烯比 ( $m_{C_4}/m_{C_2}$ ) 等。产品的质量指标有熔融指数 (MI)、密度 ( $\rho$ )、MWD等。变量类结构如表4所示。

(5) Optimal conditions。本类定义了操作优化的优化工况点。优化工况类结构如表5所示。

### 3.3. 本体属性构建

网络本体语言 (OWL) 是W3C推荐的描述语言标准，具有两种主要的属性类型：对象属性 (Object property) 及数据属性 (Data property)，其中，对象属性通常用于描述实例之间的关系，数据属性通常用于描述对象具有的数据属性。根据化工领域设备核心概念术语集可知在化工领域设备本体中，对于设备的描述主要聚焦于描述属性、静态属性和动态属性等几个方面，本文针对聚乙烯生产过程的特点，设计了两种本体属性表 (表6、表7)。

表1 化工设备类别

Parent class	Child class
Chemical equipment	Reactor
	Transmission equipment
	Heat-exchange equipment
	Recycling equipment
	Product tank
	Mass transfer

表2 生产工艺类别

Parent class	Child class
Product craft	Vapor process
	Slurry process
	Solution process
	High-pressure process

表3 聚乙烯产品类型

Parent class	Child class
Polyethylene type	HDPE
	MDPE
	LDPE
	LLDPE

表4 变量类结构

Parent class	Child class
Control variable	Reactor temperature
	Reactor pressure
	$f_{H_2}$
	$f_{C_2H_4}$
	$f_{C_4H_8}$
	$m_{H_2}/m_{C_2}$
Quality index	$m_{C_4}/m_{C_2}$
	Melt index
	Density
	MWD

表5 优化工况类结构

Parent class	Child class
Optimal condition	OP of reactor temperature
	OP of reactor pressure
	OP of $f_{H_2}$
	OP of $f_{C_2H_4}$
	OP of $f_{C_4H_8}$
	OP of $m_{H_2}/m_{C_2}$
	OP of $m_{C_4}/m_{C_2}$

OP: operating point.

### 3.4. 知识本体存储

在聚乙烯生产过程本体的构建、推理和分析完成后，需要对解析后的本体知识进行存储，以提供复用支持。目前对本体的存储方法有三种：专业的管理工具、纯文本、数据库。根据实际应用的特点，同时考虑到应用可用性及可延展性，在本文的聚乙烯过程操作优化知识库系统的集成中，采用了MySQL数据库来存储解析后的本体信息，并使用Jena API接口来进行本体的推理与分析。

## 4. 聚乙烯分子量分布预测与优化

由第2节的讨论可知，在知识库系统的模型层中，聚乙烯MWD预测计算模型是其中一个关键组成部分，因此聚乙烯MWD预测与优化的质量显著影响到知识库的质量。通常聚乙烯MWD的计算主要依赖聚合物中的不同分子量聚合物的相对量，文献[18,19]介绍了聚乙烯MWD的预测和优化的一般性方法。

表6 数据属性

Domain	Data property	Range
Chemical equipment	Has pressure	Float
Chemical equipment	Has temperature	Float
Variable	Has flow	Float
...	...	...
Optimum condition	Has value	Float
Variable	Increase value	Float
Variable	Decrease value	Float

表7 对象属性.

Domain	Object property	Range
Control variable	Affect	Product craft
Product craft	Produce	Polyethylene type
Polyethylene type	Apply process	Product craft
Variable	Happen in	Chemical equipment

### 4.1. 聚乙烯分子量分布函数

MWD是组成聚合物中的不同分子量聚合物的相对量，并按照一定的概率函数分布，通常可以由分布函数拟合。因为Schulz-Flory最可几分布适用于线型缩聚物的MWD [20]，所以常被用来计算某个活性位上生成的链长分布，即：

$$w_r(j) = r\tau(j)^2 \exp(-r\tau(j)) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中， $N$ 为催化剂的活性位个数； $w_r(j)$ 为聚乙烯分子链长度分布； $r$ 为聚乙烯分子链长度； $\tau(j)$ 是链转移速率与链增长速率之比，也称分布函数参数。代入后可得：

$$w_{\log MW}(j) = 2.3026 \left( \frac{MW}{\bar{M}_n(j)} \right)^2 \exp\left(-\frac{MW}{\bar{M}_n(j)}\right) \quad (2)$$

式中， $w_{\log MW}(j)$ 是 $w_r(j)$ 的对数表达式； $\bar{M}_n(j)$ 为数均分子量； $MW$ 为聚乙烯的分子量。

本聚合体系催化剂采用Ziegler-Natta催化剂，有多个活性位，每个活性位的聚合物MWD都服从Schulz-Flory最可几分布。各活性位MWD的叠加得到聚乙烯的MWD，经过对数变化后，可得：

$$w_{\log MW} = \sum_j^N m(j) w_{\log MW}(j) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中， $m(j)$ 为第 $j$ 个活性位在分布函数的权重。

### 4.2. 聚乙烯分子量分布预测

由于聚乙烯产品的结构复杂，目前仍缺乏有效的MWD的快速检测方法，虽然采用凝胶色谱仪可以对聚乙烯产品进行离线检测，但是这种方法不能实时反映产品性能，不利于产品质量的在线优化控制。通过MWD机理建

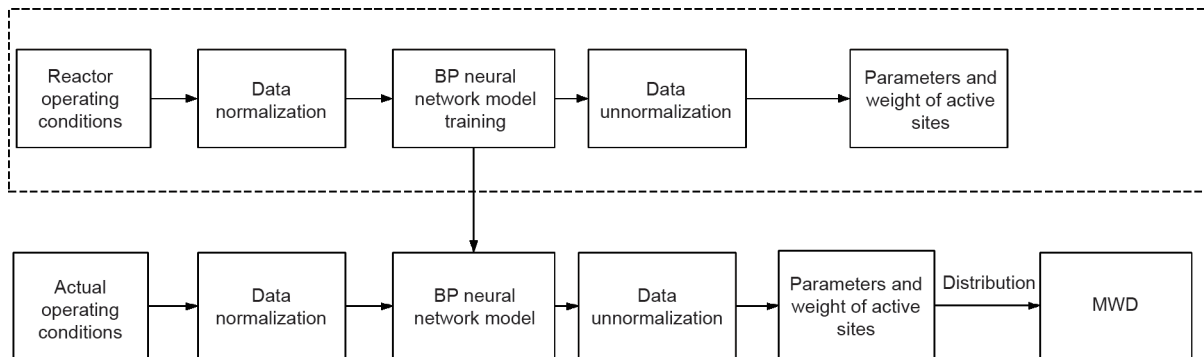


图2. MWD建模流程。

模可以建立较为精确的模型，能够较好地解决MWD的在线预测问题。

从聚合物的分布函数分析其影响要素，建立操作条件和分布函数参数、权重之间的模型。建模流程如图2所示，先使用BP神经网络来训练聚乙烯生产过程的数据，以生成神经网络模型，再根据实际工况利用模型计算聚乙烯MWD。

建立聚乙烯MWD神经网络模型是为了获得聚乙烯生产过程中工况条件与MWD参数之间的关系，通过对模型数据和生产数据的交叉分析可以提升MWD预测效果，因此从Aspen机理模型和工业现场历史数据库中选择了乙烯进料量 ( $f_{C_2}$ )、丁烯进料量 ( $f_{C_4}$ )、氢气进料量 ( $f_{H_2}$ )、氢气乙烯摩尔比 ( $m_{H_2}/m_{C_2}$ )、丁烯乙烯摩尔比 ( $m_{C_4}/m_{C_2}$ )、反应温度 ( $T$ )、反应压力 ( $P$ ) 作为模型的输入变量 (表8)，并选择了500组数据作为样本集。

由于该聚合体系下的催化剂有4个活性位，通过对Aspen机理模型和样本的MWD解析获得分布函数参数，将4个活性位作为神经网络模型的输出，输出变量 $Y$ 的数据模型为 $Y = [p^1, p^2, p^3, p^4]$ 。

为了保证模型验证的有效性，从样本集的500组数据中选取85%的数据 (425组数据) 作为训练样本，选取15%的样本数据 (75组数据) 作为测试样本对模型进行验证。

通过四个分布函数参数的样本测试值和模型预测值之间的比较 (图3)，可以发现在聚乙烯生产过程中，MWD仅与分布函数参数有关。图3中的四个子图的参数对应于模型的输出变量的 $p^1$ ,  $p^2$ ,  $p^3$ 和 $p^4$ 。根据计算结果比较，发现通过基于生产变量和分布函数参数关系建立的模型，

计算出的预测值曲线与测试样本值曲线有很好的吻合度，表明该模型能够有效地进行MWD预测。

### 4.3. 聚乙烯分子量分布优化

MWD的优化问题可描述为：给定一个期望MWD，在聚乙烯生产工况范围内寻找一个合适的工况条件，使得在此工况条件下生产的聚乙烯产品MWD与期望的分布最为接近。

由于聚乙烯的MWD是一条曲线，运用采点法将聚乙烯的MWD曲线等分为100份，即在MWD曲线上均匀地采集100个样本点。MWD优化问题的目标函数为：

$$\min \sum_{i=1}^{100} (\text{MWD}_i - \overline{\text{MWD}}_i)^2 \quad (4)$$

式中， $\text{MWD}_i$ 表示优化后的聚乙烯MWD曲线在 $i$ 点的值； $\overline{\text{MWD}}_i$ 是期望的聚乙烯MWD曲线在 $i$ 点的值。

差分进化算法可以应用于MWD优化问题，优化变量可根据表4选择。为了获得更好的结果，系统基于知识库系统本体层的专家规则与本体推理，推荐与生产工

表8 模型输入变量

Variable	Description	Unit
$f_{C_2H_4}$	Ethylene feed	kg·h <sup>-1</sup>
$f_{C_4H_8}$	Butene feed	kg·h <sup>-1</sup>
$f_{H_2}$	Hydrogen feed	kg·h <sup>-1</sup>
$m_{H_2}/m_{C_2}$	Mole ratio of hydrogen to ethylene	mol·mol <sup>-1</sup>
$m_{C_4}/m_{C_2}$	Mole ratio of butene to ethylene	mol·mol <sup>-1</sup>
$T$	Reaction temperature	°C
$P$	Reaction pressure	MPa

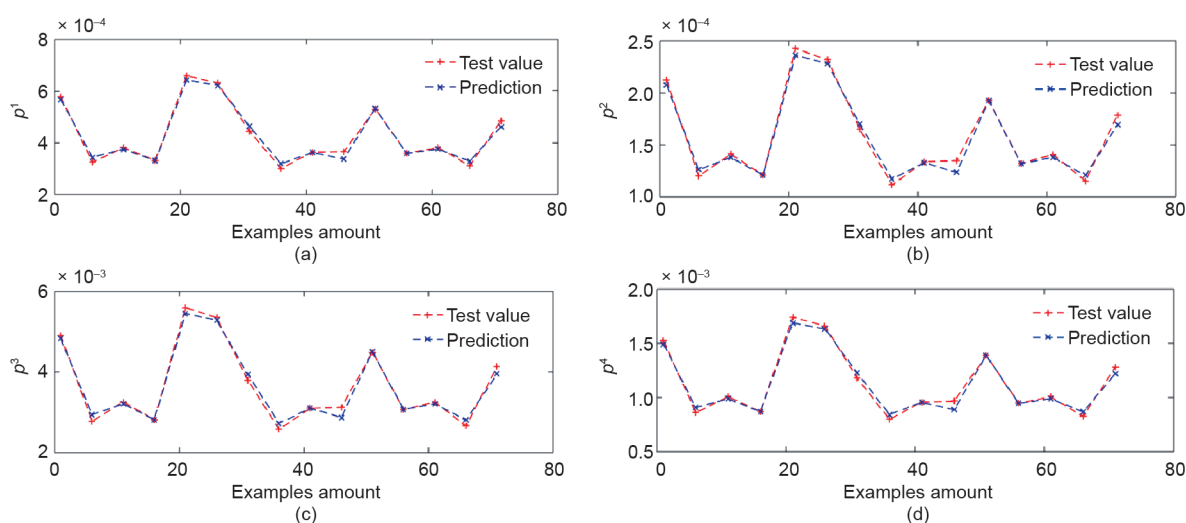


图3. 模型参数预测结果对比。

艺条件相匹配的计算模型参数经验值，因此将差分进化算法的主要参数设置如下：种群大小 $NP$ 设置为50，变异算子 $F$ 设置为0.5，交叉概率 $CR$ 设置为0.8。

在聚乙烯MWD预测模型基础上，采用差分进化算法使期望MWD和优化MWD差值达到最小，图4是优化操作完成时， $\overline{MWD}$ 曲线和MWD曲线的对比。由图4可知， $\overline{MWD}$ 曲线和MWD曲线基本吻合，说明采用知识库本体层推荐参数的差分进化算法对MWD优化具有较好效果。

## 5. 知识库系统设计与实现

通过对知识库系统本体层的构建，以及模型层中关于聚乙烯MWD的预测和优化模型层的构建方法的讨论，为操作优化知识库提供了知识推理和预测优化算法支持。结合知识库体系架构的设计，对系统应用层功能模块进行开发，并在此基础上实现知识库系统的集成。聚乙烯生产过程操作优化知识库系统的主要应用功能包括：

(1) 实现对聚乙烯生产过程的生产知识管理，包括设备信息、原料信息、工艺信息等，通过本体进行规范性定义。

(2) 能够从聚乙烯生产领域专家知识、技术规范等抽取出底层知识库所需的规则，实现逻辑推理与分析。

(3) 能够根据用户输入的工况数据，预测出与工况

对应的产品MWD，并能根据用户上传的期望的MWD数据，通过优化算法给出优化后的工况条件。

(4) 具备系统维护、数据库管理和账户管理等功能，具有系统日志记录与管理功能，通过日志分析确保系统的安全性。

### 5.1. 知识库系统功能设计

知识库系统应用层在设计时主要考虑提升用户体验，实现界面布局合理、便于操作和信息完整等方面的要求，系统采用浏览器和服务器架构模式开发实现。应用层功能主要分为三个方面：信息总览、操作优化和用户信息管理。信息总览主要提供用户查看设备评估信息、原材料和生产过程信息。操作优化主要包括工艺流程、模型信息、专家信息管理和MWD优化等功能。用

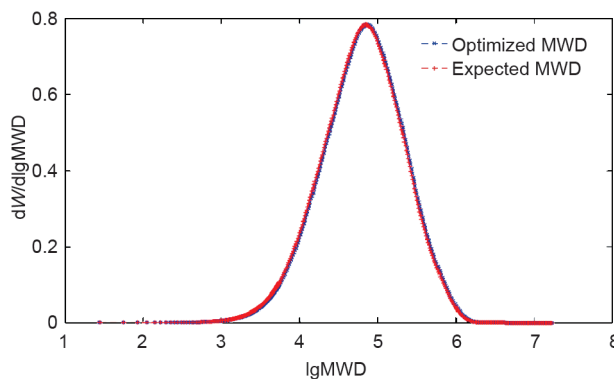


图4. 模型参数预测结果对比。

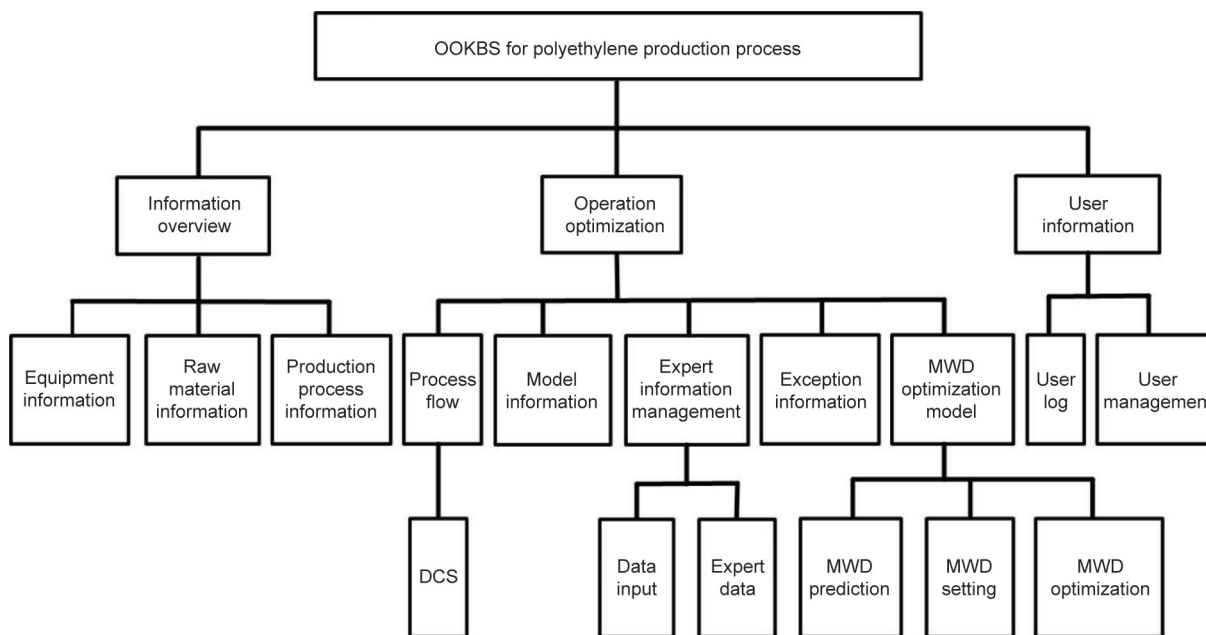


图5. 应用层功能结构。

户信息管理主要提供用户管理和操作日志管理功能。知识库系统应用层的功能结构如图5所示。

## 5.2. 知识库数据库结构

为了提高系统的可用性和可扩展性，知识库系统设计并实现了数据库用以存储产品信息、规则、MWD专家经验数据和其他信息。

(1) 产品信息。为了将聚乙烯生产过程中的生产设备状态、产品信息和历史数据进行综合分析，系统设计产品信息数据表以存储有关聚乙烯产品的设备信息、工艺信息、操作变量和最优值的经验数据，产品信息表的结构如表9所示。

(2) 推理规则。为了使得数据分析能力更高效，基于设计数据与聚乙烯生产过程中的实际生产数据之间的相关性分析，系统构建了数据预测推理规则表，以增强计算处理的效率。推理规则表主要存储本体推理规则，包括规则名称、规则内容和规则前提条件等，以便于利用Jena API编程抽取规则和分析，规则表结构如表10所示。

(3) 专家经验数据。在聚乙烯生产过程中，不仅生产设备的状态数据比较关键，而且基于专家经验的优化经验数据也在操作优化过程中发挥重要作用。在进行操作优化预测时，通过对专家的操作优化经验数据与模型的预测值之间的综合关联分析来提高MWD预测的准确性，因此，我们设计了专家经验数据表来存储操作优化的专家经验数据，结构如表11所示。

表9 产品信息

Field name	Type of field	Description
Equipment	Integer	ID of equipment
Craft	Integer	ID of craft
Variable name	Varchar (50)	Variables of polyethylene produce
Optimal value	Varchar (50)	Optimal value of polyethylene products
Hptime	Datetime	The datetime of the event

表10 推理规则

Field name	Type of field	Description
Rule number	Varchar (20)	Series number
Rule name	Varchar (40)	Name
Rule body	Varchar (40)	Rule content
Rule head	Varchar (40)	Precondition
Rule mark	Varchar (40)	Mark of rule

## 5.3. 操作优化知识库系统实现

聚乙烯生产过程操作优化知识库系统采用Java语言开发，在实际工业应用过程中为了确保系统的稳定，将系统部署在Tomcat服务器上。通过聚乙烯生产知识本体信息的抽取，在用户访问界面展示聚乙烯生产工艺流程和工艺数据，用户也可以修改操作参数、运行模型和查看聚乙烯产品信息。系统的聚乙烯生产工艺流程信息展示如图6所示。

聚乙烯MWD优化模块包括MWD预测、MWD设定和MWD优化三个部分。用户输入当前工况或者是已知的工况，系统调用后台的BP神经网络程序预测出输入的工况对应的MWD曲线及详细数据，用户可以直观地观察到已知工况可以生产出的产品的MWD曲线，并进一步调整工况，生产出满足要求的聚乙烯产品。

在操作优化过程中，用户输入期望的MWD曲线的数据值，通过后台优化模型的计算，可以得到期望曲线和优化后的曲线对比，优化后的工况条件、MWD期望值和优化值的信息展示如图7所示。

在实际生产应用中，根据知识库系统提供的计算参数和专家经验进行了操作优化计算，得到MWD期望和优化目标的关键操作参数的比较（表12），可以发现优化的操作参数值与期望目标值非常接近，这表明系统可有效地应用在实际生产过程中。通过知识库系统能够提高MWD预测与优化的计算效率，并能得到与实际聚乙烯生产工艺更好匹配的优化操作参数。

## 6. 结论

本文提出了应用于聚乙烯生产过程操作优化的知识库系统的构建方法，把本体作为聚乙烯生产过程领域知识表示和共享的载体，使用七步法对聚乙烯生产过程进行本体建模。在本体库层中，实现了本体知识的描述和存储，并利用Jena API接口编程实现了本体的推理和分析，从而提高了知识库系统的利用能力。在模型层中，利用差分进化算法构建了MWD操作参数预测与优化计算模

表11 专家经验数据

Field name	Type of field	Description
ID	Varchar (20)	Series number
Yuce	Varchar (20)	Predicted MWD
Youhua	Varchar (20)	Optimal MWD
Qiwang	Varchar (20)	Expected MWD

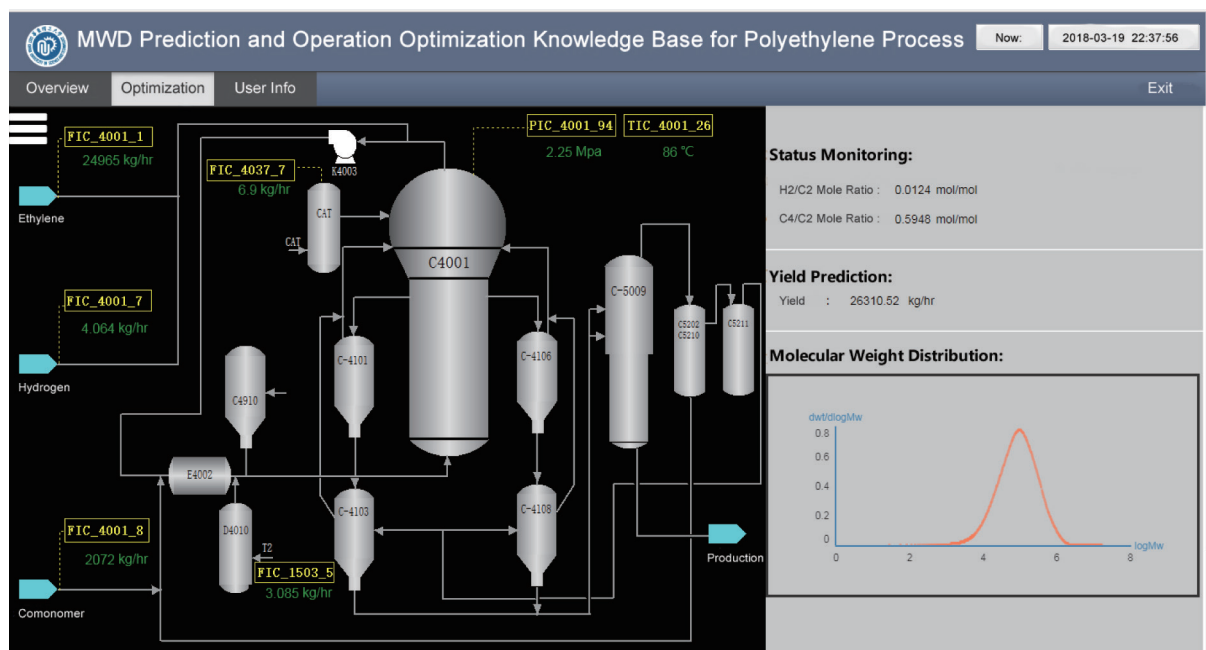


图6. 聚乙烯生产工艺流程。

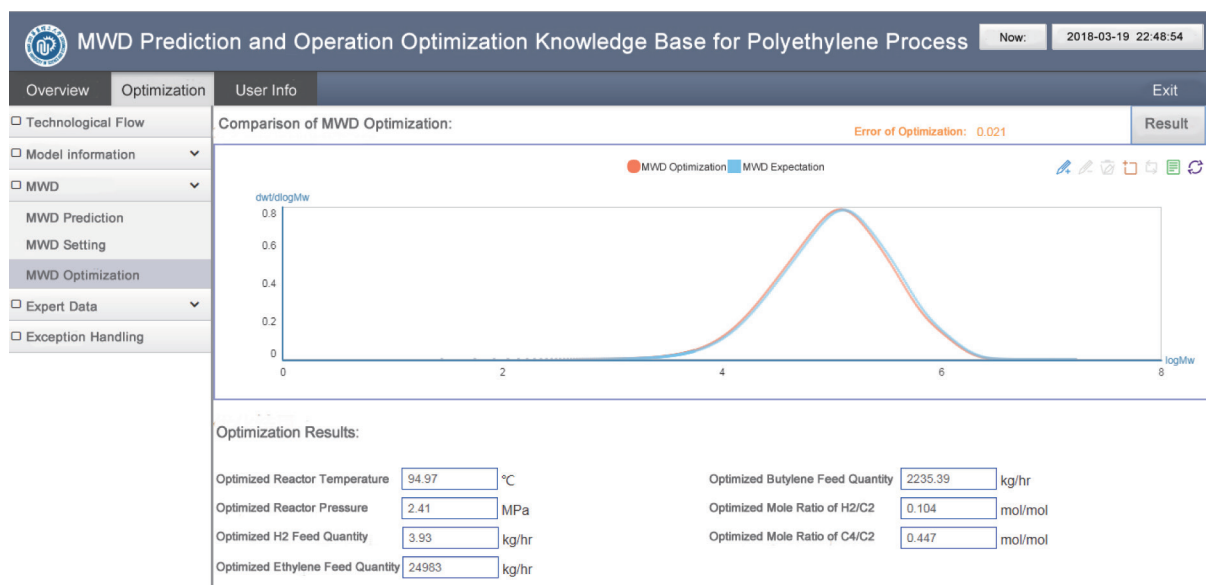


图7. MWD期望值和优化值的对比。

表12 工况条件优化结果对比

Situation	Operation parameter						
	$T$ (°C)	$P$ (MPa)	$f_{C_2H_4}$	$f_{C_4H_8}$	$f_{H_2}$	$m_{H_2}/m_{C_2}$	$m_{C_4}/m_{C_2}$
Optimized result	94.97	2.41	24 983	2235.39	3.93	0.104	0.447
Expected value	93.58	2.44	25 208	2321.59	4.11	0.128	0.565

型，提高了操作优化计算的效率。在系统应用层中，初步设计并实现了满足聚乙烯生产过程操作优化和管理的功能需求。此外，本文提出的知识库应用结构也能够应用于具有类似特点的其他生产过程中。

## 致谢

本文的工作得到了国家自然科学基金（61890933, 61803157）、上海市青年科技英才扬帆计划项目



(18YF1405200)、中央高校基本科研业务费专项资金(222201814041)和国际博士后交流奖学金项目(20170096)的支持。

## Compliance with ethics guidelines

Weimin Zhong, Chaoyuan Li, Xin Peng, Feng Wan, Xufeng An, and Zhou Tian declare that they have no conflicts of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Zhou J. Intelligent manufacturing—main direction of “Made in China 2025”. *China Mech Eng* 2015;26(17):2273–84. Chinese.
- [2] Pan AH. “Made in China 2025” points out the direction of the development of China’s petrochemical industry. *Process* 2015;25(19):14–8. Chinese.
- [3] Popescu M, Ungureanu-Anghel D, Filip I. Designing complex Petri nets using submodels with application in flexible manufacturing systems. In: *Proceedings of 2013 IEEE 8th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*; 2013 May 23–25; Timisoara, Romania. New York: IEEE; 2013. p. 257–62.
- [4] Zhuang H, Feng L, Wen C, Peng Q, Tang Q. High-speed railway train timetable conflict prediction based on fuzzy temporal knowledge reasoning. *Engineering* 2016;2(3):366–73.
- [5] Yu S, Wu L, Zhang X. Research on equipment knowledge representation based on visual analytics. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Semantics, Knowledge and Grids*; 2017 Aug 14–15; Beijing, China. New York: IEEE; 2017. p. 208–12.
- [6] Subbotin S, Gladkova O, Parkhomenko A. Knowledge-based recommendation system for embedded systems platform-oriented design. In: *Proceedings of 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*; 2018 Sep 11–14; Lviv, Ukraine. New York: IEEE; 2018. p. 368–73.
- [7] Zhang D, Hu D, Xu Y. A framework for ontology-based product design knowledge management. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*; 2010 Aug 10–12; Yantai, China. New York: IEEE; 2010. p. 1751–5.
- [8] Gao X. Research of knowledge base system based on ontology for drilling accident emergency decision. In: *Proceedings of 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*; 2012 Mar 23–25; Hangzhou, China. New York: IEEE; 2012. p. 230–4.
- [9] Zhong W, Liu S, Wan F, Li Z. Equipment selection knowledge base system for industrial styrene process. *Chin J Chem Eng* 2018;26(8):1707–12.
- [10] Zhang R, Guo L. Knowledge management based on ontology modeling in collaborative learning environment. In: *Proceedings of 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*; 2008 Dec 12–14; Wuhan, China. New York: IEEE; 2008. p. 337–40.
- [11] Noy NF, McGuinness DL. *Ontology development 101: a guide to creating your first ontology*. Palo Alto: Knowledge Systems Laboratory, Stanford University; 2001. Report No.: KSL-01-05.
- [12] Fernández-López M. Overview of methodologies for building ontologies. In: *Proceedings of the IJCAI99 Workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods*; 1999 Aug 2; Stokolm, Sweden; 1999.
- [13] Grüniger M, Fox MS. Methodology for the design and evaluation of ontologies. In: *Proceedings of the IJCAI95 Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*; 1995 Aug 19–20; Montreal, Canada; 1995.
- [14] Fernández M, Gómez-Péres A, Juristo N. *METHONTOLOGY: from ontological art towards ontological engineering*. In: *Proceedings of the Spring Symposium Series on Ontological Engineering*; 1991 Mar 24–26; Palo Alto CA., USA; 1997. p. 33–40.
- [15] Bernaras A, Laresgoiti I, Corera J. Building and reusing ontologies for electrical network applications. In: *Proceedings of the 12th European Conference on Artificial Intelligence*; 1996 Aug 11–16; Budapest, Hungary. Chichester: John Wiley and Sons; 1996. p. 298–302.
- [16] Uschold M, Gruninger M. *Ontologies: principles, methods and applications*. *Knowl Eng Rev* 1996;11(2):93–136.
- [17] Yu Y. *Research on knowledge base of typical chemical equipment based on ontology [dissertation]*. Shanghai: East China University of Science and Technology; 2016. Chinese.
- [18] Soares JBP, Kim JD, Rempel GL. Analysis and control of the molecular weight and chemical composition distributions of polyolefins made with metallocene and Ziegler–Natta catalysts. *Ind Eng Chem Res* 1997;36(4):1144–50.
- [19] Soares JBP. The use of instantaneous distributions in polymerization reaction engineering. *Macromol React Eng* 2014;8(4):235–59.
- [20] Zhao W, Zhang H. Discuss of polymerization degree distribution function formula of different polymerization mechanism. *Polym Mater Sci Eng* 2013;29(8):186–90.