

面向数字化工厂的需求结构多目标决策控制研究*

崔 剑,陶俐言

(杭州电子科技大学 管理学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对数字化工厂需求结构多目标的优化控制问题,提出了数字化工厂设计、制造、装配、物流等各个节点需求结构多目标决策控制模型。采用数学函数形式表达,并描述了数字化工厂各节点需求结构决策因素,分析了多目标决策的控制优化过程;以汽轮机产品为例,应用基于Pareto的熵算法对数字化工厂需求结构进行了多目标优化求解,确定了多目标决策指标权重系数,以权衡需求结构多目标的任务实施。研究表明,该模型验证了数字化工厂多目标需求结构决策控制理论,Pareto熵算法优化了需求结构实施的控制过程,在满足客户需求的基础上,合理配置了企业的需求结构资源。

关键词: 数字化工厂; 需求结构; 多目标决策控制; Pareto

中图分类号: TH186 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1150-04

Multi-object decision control of requirement structure for digital factory

CUI Jian, TAO Li-yan

(School of Management, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at realizing the optimal control on multi-object requirement structure in digital factory (DF), the model of multi-object decision control on requirement structure was put forward in every node, such as design, manufacture, assemble, logistics and so on. The form of math function was presented to depict the structure decision factor in every node, and the optimal process of multi-object decision was analyzed. The example of steam turbine was applied concretely to verify the model theory, entropy arithmetic based on Pareto was applied to the index coefficient of multi-object decision, the index weight coefficient of multi-objective was determined, the task implementation was weighed. The results indicate that model research validates the control theory of multi-object demand structure in digital factory, and the research on structure multi-object decision control for digital factory optimizes the structure resource of system implementation on the basis of meeting greatly customer requirement.

Key words: digital factory (DF); demand structure; multi-object decision control; Pareto

0 引 言

数字化工厂(DF)是一种以产品全生命周期的相关数据为基础,在计算机虚拟环境中,对整个生产过程进行仿真、评估和优化,并进一步扩展到整个产品生命周期的新型生产组织方式^[1]。需求结构是数字化工厂的主线,设计、制造、装配、物流等各需求子系统都有其明确的需求目标,且子目标间相互联系、相互制约。通常情况下一个目标性能的改善,往往以其他一个或多个目标性能的降低为代价,导致数字化工厂结构多目标实施处于冲突状态^[2]。因此,企业实施以

需求为总体目标的多目标决策,采用多目标决策控制求解数字化工厂的需求结构问题。近年来,多目标决策控制问题求解已成为数字化工厂多目标决策分析的一个重要研究方向。孙光永等人^[3]提出稳健设计方法中的多目标决策控制,在产品的设计过程中,通过稳健最优目标达到设计结果的最优控制。曾强等人^[4]提出在设备使用过程中采用FISP多目标集成方法实现最优的目标决策。传统的多目标决策控制方法(如模糊控制论、目标层次法等)都是基于目标权重的控制方法,然而这些决策控制方法有其缺点:权重分析后只能得到一个优化的解,且各个优化解之间是相互独

收稿日期: 2012-04-06

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(A3920110001);杭州电子科技大学科研资助项目(KYS035610018)

作者简介: 崔 剑(1979-),女,辽宁锦州人,讲师,博士,主要从事企业信息化方面的研究. E-mail: cui_jian11223@126.com

立的,计算量大,同时不能保证各种解的有效分配^[5]。

鉴于此,本研究提出一种基于相对 Pareto 的嫡算法约束多目标决策控制,使数字化工厂实施企业在正确渠道、正确时间内管理正确的需求结构信息。

1 需求结构多目标决策控制模型

数字化工厂设计、制造、装配、物流等各节点有其自身的需求特征目标和价值目标,且任一节点的需求目标是相互影响、相互制约的,为了保证数字化工厂需求结构运行实施的准确性、一致性、可控性和可追溯性^[6],减少系统需求多目标冲突,本研究建立了面向数字化工厂的需求结构多目标决策控制模型,如图1所示。需求结构多目标决策控制平台包括数字化工厂基础结构/环境实施技术,如网络通信技术、集成需求信息技术以及协同需求信息技术,集成实现需求动态数据、信息、特征以及模型转换所进行的决策控制描述、决策控制模型、决策控制分析和决策控制评价过程。通过分析设计、制造、装配、物流等各阶段节点需求结构目标的状态,以提供系统需求目标决策的控制依据^[7]。

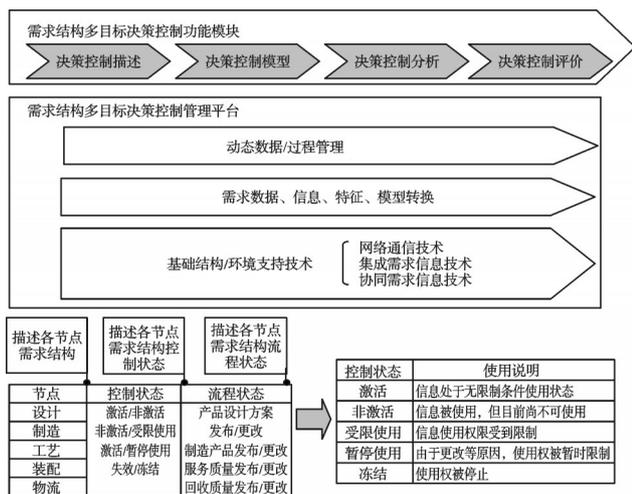


图1 数字化工厂结构多目标决策控制模型

2 需求结构多目标决策控制描述

数字化工厂需求结构多目标决策由5个参数组成:单元需求结构属性集、单元需求结构目标、整体决策状态、整体决策规则和整体决策约束^[8]。

2.1 单元需求结构属性集

本研究采用数学函数形式描述单元需求结构属性集:

$$attribute(n, m) = \{a_1(x), a_2(x), \dots, a_n(x)\} \quad (1)$$

数字化工厂每一需求目标执行决策由各阶段结构属性的重要性和比例所决定。每一阶段节点需求结构包含多个属性,如需求粗结构属性、需求结构详细设计属性、需求工艺属性、需求加工属性、需求制造

属性、需求装配属性等。不同的需求属性在实际生产实施中由于需求和资源约束的不同,其重要性权重和比例也不同^[9]。

2.2 单元需求结构目标

本研究采用数学函数形式描述单元需求结构目标^[10]:

$$Multi_DFC = \{n_1(x), n_2(x), n_3(x), n_4(x), n_5(x)\} \quad (2)$$

式中: $n_i(x)$ —数字化工厂任一阶段节点的需求结构目标; $i=1, 2, 3, \dots$ —设计、制造、装配、物流等各节点单元。

设计节点需求结构目标包括需求产品概念设计、详细设计、评价设计、功能性能工程评估以及需求文档等的管理。制造节点需求结构目标包括外购件的优质采购、生产的质检/质控以及加工时间满足等。

2.3 整体决策控制状态

本研究采用数学函数形式描述整体决策控制状态:

$$Decision_sta = \sum_{i=1}^6 PCd_i = \{PCd_1, PCd_2, PCd_3, PCd_4, PCd_5, PCd_6\} \quad (3)$$

式中: $Cd_1, Cd_2, Cd_3, Cd_4, Cd_5, Cd_6$ —需求结构多目标决策控制的自适应性、自组织性、相关性、制约性、矛盾性和相异性效果; P —各决策参数指标的权重系数^[11]。

数字化工厂作为一个统一的需求动态集合体,集成各阶段节点的运行状态,并对其整体决策进行控制^[12]。

2.4 整体决策规则

本研究采用四元组形式描述整体决策规则:

$$Decision_rule = [C, W, K, S] \quad (4)$$

式中: C —决策规则判别条件, W —决策规则条件中相应权重, K —决策规则的应用域值, S —决策规则约束。

数字化工厂实施过程中的决策规则包括:设计需求结构满足公理化规则;制造阶段满足需求质量优化规则;工艺路线满足最短路径规则;加工工具和设备满足高效运行规则;装配满足时间最少规则等。

2.5 整体决策约束

本研究采用五元组形式描述整体决策约束:

$$Decision_const = [I, E, K, C, S] \quad (5)$$

式中: I —约束执行情景, E —约束条件在数字化工厂中执行的重要额度, K —约束应用域值, C —不同应用域约束属性间的关系阈值, S —数字化工厂约束的执行值。

数字化工厂实施过程中的决策约束包括:制造需求结构特征间的关系约束;机床和刀具本身性能的限制约束;被加工工件质量要求下的转速和进给率范围限制约束、最大切削力约束、最大切削功率约束以及工件表面粗糙度约束;工艺需求结构拓扑约束;需求

零部件工艺路线主干匹配约束和修正约束以及固定采购成本下的最低采购量约束等。

3 需求结构多目标决策控制优化

本研究采用基于 Pareto 的熵算法对数字化工厂需求结构进行多目标优化求解,合理配置企业需求实施资源,权衡需求结构多目标的任务实施。笔者利用决策矩阵和各需求目标的输出熵确定多目标决策指标权重系数,通过计算熵的大小表示数字化工厂需求结构目标决策的优属度,且熵越小,需求结构的优属度越大,其权重比例在多目标中越大^[13]。主要步骤如下:

(1) 确定数字化工厂各节点需求结构子目标项的指标权重系数。

数字化工厂需求结构多目标决策矩阵集成了5阶段节点的多个需求结构子目标,即:

$$x(ij) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{51} & x_{52} & \cdots & x_{5j} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,矩阵每一列需求项参数 $x_{ij} = [x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{5j}]^T$ 表示第 j 个需求结构子目标在每个阶段的需求结构参数,且这些需求结构参数是相互制约、相互关联的。

本研究对任意子目标进行需求结构的权重计算,其权向量数学模型公式表示为:

$$w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_j) \quad (7)$$

$$w_j = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (8)$$

(2) 确定多目标决策的重要度矢量矩阵 $R = (r_{ij})_n$, 进而获取需求结构多目标决策相对量值 P_{ij} , 其数学函数表示为^[12]:

$$R_{ij} = \frac{w_j x_{ij}}{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}} \quad (9)$$

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (10)$$

(3) 确定需求结构多目标输出熵

$$E_{ij} = -K \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (11)$$

最后,本研究采用目标函数的归一化处理 and 分级罚函数将熵算法下的最优解进行收敛和分级评价。分析 Pareto 曲线可知,如所确定的最优解曲线分布均

匀,说明该需求结构参数迭代收敛性能好,则验证了该解为多目标决策控制最优解。

4 实例研究

杭州某汽轮机股份有限公司是我国最大的工业汽轮机生产企业,其主导产品—工业汽轮机是典型的技术密集型定制产品,其产品结构复杂,可靠性要求高,其主要零部件要求耐高温、耐冲击和高精度,被广泛应用于石油、化工、冶金、轻工、能源、建材、轻纺等工业部门,工业汽轮机产品结构图如图2所示。该公司在产品全生命周期内采用数字化工厂组织形式。设计、制造、装配、物流等阶段节点都有其不同的需求目标,且各节点需求目标根据其运行实施特点,相互联系、相互制约,因此,本研究建立数字化工厂结构实施多目标决策控制管理功能模块,对其节点多目标问题进行决策控制分析。本研究采用多目标权重决策控制方法和基于 Pareto 的熵算法,以 Matlab 软件为运算工具,定量分析数字化工厂需求结构特征多目标决策协同控制问题。

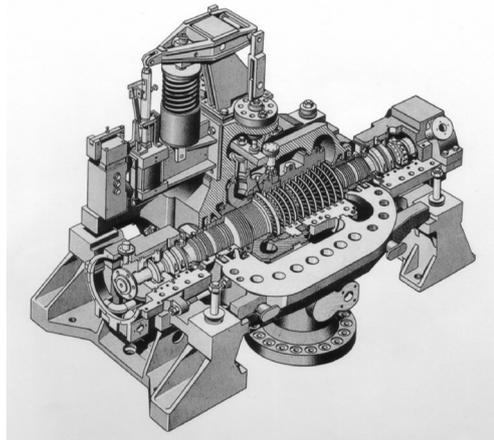


图2 汽轮机结构图

第一步:确定数字化工厂需求多目标的相对权重。针对 NG25/20 型号汽轮机 5 个需求参数,如:结构设计优化、制造质量高、工艺路线简化、零部件装配强和服务效率高,由相关性比较得到需求结构信息间比率标度,即 $(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5) = (1, 3, 7, 5, 3)$, 该归一化处理获得需求结构判断矩阵 A , 即:

$$A = \begin{pmatrix} 1.00 & 3.00 & 7.00 & 5.00 & 3.00 \\ 0.33 & 1.00 & 7.00 & 3.00 & 3.00 \\ 0.14 & 0.14 & 1.00 & 3.00 & 0.20 \\ 0.20 & 0.33 & 0.33 & 1.00 & 0.14 \\ 0.33 & 0.33 & 5.00 & 7.00 & 1.00 \end{pmatrix} \quad (12)$$

通过正规化计算,即:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (13)$$

通过权重计算,即:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (14)$$

计算矩阵最大特征根,得出 $\lambda_{\max} = 5.43$, $W = (0.43, 0.27, 0.06, 0.05, 0.19)^T$ 。

第二步:确定数字化工厂节点需求目标的结构特征相对重要度。本研究设定各需求目标相对紧密度关系为0,1,5,9,表示子目标间的弱、中、强及无关系级别,得到需求多目标关系度相对矩阵 M ,即:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 9 & 5 & 5 & 1 \\ 1 & 9 & 1 & 5 & 0 \\ 9 & 5 & 1 & 1 & 5 \\ 5 & 1 & 0 & 9 & 1 \\ 9 & 5 & 5 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

通过正规化计算,权重计算结果得到 $N = (0.28, 0.16, 0.32, 0.14, 0.1)^T$,相乘矩阵 W 和 N ,得到需求目标结构特征重要度关系矩阵 R ,即:

$$R = \begin{pmatrix} 0.12 & 0.07 & 0.14 & 0.06 & 0.04 \\ 0.08 & 0.04 & 0.09 & 0.04 & 0.03 \\ 0.02 & 0.01 & 0.02 & 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 & 0.02 & 0.01 & 0.01 \\ 0.05 & 0.03 & 0.06 & 0.03 & 0.02 \end{pmatrix} \quad (16)$$

定量化标度矩阵,得到需求多目标结构特征相对重要度为 $V = (0.20, 0.22, 0.18, 0.19, 0.22)^T$ 。

第三步:数字化工厂节点需求结构多目标决策控制检验。计算需求结构目标指标 I_c ,即:

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (17)$$

若 $I_c = 0$ 时,表示判断矩阵具有完全协同一致性,若 $I_c \neq 0$ 时,计算协同一致性比率 R_c ,多目标协同一致性指标对应值如表1所示,通过公式 $R_c = I_c / I_R$,得到具体的 R_c 值。在该实例中,本研究计算判定 I_c 的值,即:

$$I_c = \frac{5.43 - 5}{5 - 1} = 0.1075 \quad (n = 5) \quad (18)$$

表1 多目标协同一致性指标对应值

阶数	2	3	4	5	6	7	8	9
I_R	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

查表1得 $I_R = 1.12$, 则 $R_c = 0.096 < 0.1$, 因此证明 NG25/20 型号汽轮机需求结构多目标决策符合资源协同的一致性。

第四步:确定需求结构多目标决策值。本研究根据所获取的汽轮机需求结构特征5个参数的重要度数值,通过定量化分析得出:制造质量高是产品需求结构目标最重要的决策参数;工艺路线优化和零部件装配强是需求功能结构特征最重要的参数;结构设计优化是最重要

的需求物理结构特征参数;服务效率高是产品实施资源分配中的价值目标参数,且最大值达到100%。

本研究采用基于 Pareto 的相对熵算法对数字化工厂结构多目标进行决策分析。通过分析最优目标解的频数(f_2)和各目标比例数(f_1)之间的反比关系,得到多目标项 Pareto 曲线分布图,如图3所示。图3中,曲线分布均匀,迭代性能好,表明该型号工业汽轮机各需求结构目标间的需求资源配置和运行达到了比例适合的状态,笔者通过对上述公式的验证,得出需求结构多目标决策最优解为制造质量因素。

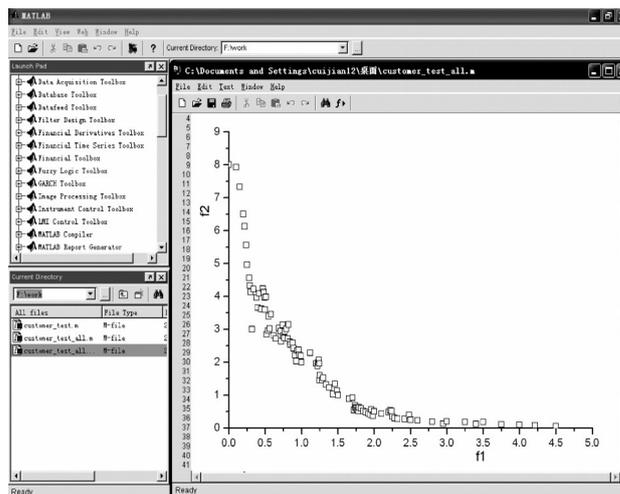


图3 数字化工厂结构多目标 Pareto 分布图

5 结束语

为了有效地保证需求结构信息的一致性和正确性,减小需求信息演化传递误差和信息更改的不确定性,研究分析数字化工厂结构一致性决策控制技术,笔者研究了数字化工厂结构多目标决策控制内容,并对其结构多目标决策进行了语义表达,以图表形式研究了数字化工厂结构多目标决策控制的实施过程。

需要进一步指出的是,数字化工厂结构多目标决策控制是一个系统的工程,在今后的研究中,研究者应对其进行优化分析,同时对其决策控制过程进行检测评价,提高数字化工厂结构实施准确性和高效性。

参考文献 (References):

- [1] 张世琪,李 迎,孙 宇,等. 数字化工厂[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] 崔 剑,祁国宁. 面向产品全生命周期的客户需求信息管理模型研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(12): 2406-2414.
- [3] 孙光永. 多目标稳健优化设计方法在车身设计制造中的应用研究[J]. 固体力学学报,2011,8(2):156-163.

2.4 不同材料催化剂颗粒撞击的影响

不同材料的催化剂颗粒以 90° 和 $v=100\text{ m/s}$ 的速度撞击材料为铝的壁面,碰撞后的情况如图8所示。壁面被撞击后没有发生破坏,且发生的最大变形材料为铜的催化剂颗粒是材料为铝的0.3倍,撞击后壁面节点发生的最大位移如图8所示。

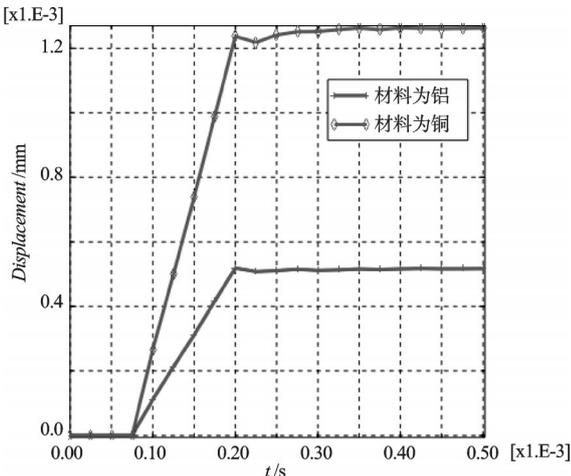


图8 壁面发生最大变形节点的位移与时间的关系

3 结束语

本研究应用有限元对催化剂颗粒撞击壁面进行了数值模拟,通过剪切和拉伸失效模型来计算磨损量(当有限元单元网格失效后将会被移除,损坏的信息和材料的移除将会被仿真),并且分析了催化剂颗粒变形对壁面损失的影响,根据有限元的计算结果,对于选择催化剂颗粒撞击的速度、角度和催化剂颗粒的材料有合理的依据,从而使壁面的磨损量达到最小。

最后,本研究根据模拟及优化的结果提出了减少催化剂颗粒磨损的控制措施,从而使催化裂化装置能够长期安全、稳定地运行。

参考文献(References):

- [1] 杨勇刚,罗 勇. 催化剂磨损和再生器催化剂跑损的控制[J]. 炼油设计,2001,31(9):15-18.
- [2] 刘仁桓,魏耀东. 催化裂化装置跑损催化剂的颗粒粒度分析[J]. 石油化工设备,2006,35(2):9-11.
- [3] 陈学东,王 冰,关卫和,等. 我国石化企业在用压力容器与管道使用现状和缺陷状况分析及失效预防对策[J]. 压力容器,2001,18(5):43-53.
- [4] 万古军,魏耀东,时铭显. 催化裂化再生器树枝状主风分布管磨损的气相流场分析[J]. 炼油技术与工程,2006,36(3):21-24.
- [5] GRIFFIN D, DAADBIN A, DATTA S. The development of a three-dimensional finite element model for solid particle erosion on alumina scale/MA956 substrate[J]. *Wear*, 2004, 256(9-10):900-906.
- [6] JUNKAR M, JURISEVIC B, FAJDIGA M, et al. Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006(32):1095-1112.
- [7] HONG T, OOI J Y, SHAW B A. A numerical study of the residual stress pattern from single shot impacting on a metallic component[J]. *Advances in Engineering Software*, 2008,39(9):743-756.
- [8] 凌 祥,彭薇薇,倪红芳. 喷丸三维残余应力场的有限元模拟[J]. 机械工程学报,2006,42(8):182-189.
- [9] 胡凯征,吴建军,王 涛,等. 基于温度场的喷丸成形数值模拟及参数优化[J]. 中国机械工程,2007,18(3):292-295.
- [10] ANDREWS E W, KIM K S. Threshold conditions for dynamic fragmentation of glass particles[J]. *Mechanics of Materials*, 1999(31):689-703.
- [11] OKA Y I, OHNOGI H, HOSOKAWA T, et al. The angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact [C]//11th International Conference on Wear of Materials, San Diego, CA, USA, 1997:573-579.

[编辑:张 翔]

(上接第1153页)

- [4] 曾 强. 基于多股则设备分配及工序排序的FISP多目标集成优化方法[J]. 计算机集成制造系统,2011,24(5):86-94.
- [5] 陈树中,韩正之,胡启迪. 线性系统控制理论[M]. 上海:华东师范大学出版社,2000.
- [6] 吴云峰. 面向设计与制造的数字化工厂平台[J]. 中国制造业信息化,2011,12(1):132-138.
- [7] 崔 剑. 服装企业的PLM客户需求信息模型[J]. 纺织学报,2010,31(4):132-138.
- [8] 刘江来. 数字化技术在工厂规划中的实际应用[J]. 建设机械技术与管理,2010(2):246-232.
- [9] 崔 剑. 面向大批量定值的NC加工智能化设计[J]. 机电

- 工程,2010,27(5):111-114.
- [10] 李 伟. 基于改进小生境遗传算法的Pareto多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2011,13(5):423-432.
- [11] CUI Jian. Research on Integration Technology for Product Lifecycle Management System [C]// The 6th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. IEEE ISDA'06. Jinan: [s.n.], 2006:1109-1113.
- [12] DEB K. Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [13] 崔 剑. PLM需求流动链结构模型及其决策控制研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学系, 2008.

[编辑:张 翔]