

## 基于多色集合理论的分层印刷工艺规划

罗如柏, 刘伟, 李怀林, 周世生  
(西安理工大学, 西安 710048)

**摘要:** **目的** 在多印刷工艺的复杂印刷系统中, 研究无冗余计算的计算机辅助印刷工艺规划算法。**方法** 首先, 在研究多色集合理论的基础上, 按照给出的分层模型构建策略构建出“印刷需求双层模型”和“印刷工艺双层模型”。然后, 计算出可用“工序组”, 并据此构造最小规模的产品围道和围道矩阵。最后, 利用分层工艺算子搜索算法计算出可用工序, 从多色图中获得待印品的工艺路径。**结果** 建立了一种基于多色集合理论的分层印刷工艺规划理论。**结论** 基于多色集合理论的分层印刷工艺规划可有效地降低工艺算子搜索过程中的冗余计算。

**关键词:** 分层工艺规划; 印刷工艺; 多色集合

**中图分类号:** TS805 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)15-0189-05

## Hierarchical Printing Process Planning Based on Polychromatic Sets Theory

LUO Ru-bai, LIU Wei, LI Huai-lin, ZHOU Shi-sheng  
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to study the computer-aided printing process planning without redundant computing in complex manufacturing system with multi print processes. First, based on the study of Polychromatic Sets Theory, the “Printing Requirements 2-layer Model” and “Printing Process 2-layer Model” were constructed according to the proposed hierarchical constructing method; Then, the minimal product comprising and contour comprising matrix were constructed according to the calculated available “Process Groups”; Finally, the available processes were calculated using the proposed hierarchical process search algorithm, and the printing process path could be searched in the polychromatic graph. As a result, the hierarchical printing process planning method based on polychromatic sets theory was proposed. In conclusion, the hierarchical printing process planning method based on polychromatic sets theory can effectively remove redundant computing in the process search algorithm.

**KEY WORDS:** hierarchical process planning; printing process; polychromatic sets theory

在我国进入经济新常态的大背景下, 利用信息化技术促进工业智能化已经成为我国产业升级的重要技术指导思想<sup>[1-3]</sup>。近年来, 印刷工业也开始逐步转向智能化的计算机集成印刷系统<sup>[4]</sup>。其中, 计算机辅助印刷工艺规划是印刷工艺规划智能化的重要途径<sup>[5]</sup>。笔者在文献[6]中, 将计算机辅助工

艺设计引入印刷制造系统, 重点探讨了在单一制造工艺(如胶印)下基于多色集合理论的印刷工艺规划算法模型, 从而方便获得印刷加工工艺方案。

印刷制造是典型的加工服务型制造, 为适应客户的产品生产需求, 其系统通常存在多印刷制造工艺, 例如, 同时存在胶印、柔印、数字印刷等

收稿日期: 2015-12-29

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划(15JS075); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JM5068)

作者简介: 罗如柏(1981—), 男, 江西临川人, 博士, 西安理工大学讲师, 主要研究方向为数字化印刷系统、印刷复制技术。

工艺<sup>[7]</sup>。在印品生产过程中,根据客户对印品的加工需求,有些印品只使用某单一印刷制造工艺,也有些印品交织使用多个印刷制造工艺。若按照文献[6]的算法模型,为适应多变的印品工艺结构,必须尽可能完整地把印品所有的加工需求和印刷加工工序,即工艺算子都包含在模型内;然后在每次工艺规划过程中都会利用模型中所有的加工需求和加工工序,来参与获得所需的印刷加工工艺方案的运算。这就导致了許多不必要的加工需求和加工工序参与运算,工作量大且存有冗余计算量。为了更加灵活地适应多变的印品工艺结构,解决现有的印刷工艺规划算法模型中工艺算子求解过程中工作量大且存有冗余计算量的问题,这里通过构造印刷需求模型和印刷加工模型的分层构建策略和基于此分层模型的印刷工艺算子求解算法,建立了一种基于多色集合理论的分层印刷工艺规划。

## 1 分层印刷工艺规划及其模型的多色集合数学描述

多色集合理论是俄罗斯 Pavlov 教授于 2002 年提出的一种以布尔逻辑运算为基础的信息处理数学工具。作为一种系统理论工具,多色集合理论和方法在航空航天企业中得到了广泛应用。多色集合理论能应用形式上相同的数学模型描绘不同的对象(产品、设计过程、工艺过程和制造系统),因此,在产品概念设计信息建模和推理技术、加工与装配工艺规划建模和方案推理技术、公差信息建模、工作流建模和业务重组等方面获得了应用。多色集合理论的特点:算法简单,编程方便;易于向复杂系统拓展;模型中不仅包括特征,而且包括性质、属性、参数和指标等;不仅可以表示数据量,而且可以表示自然语言量和模糊量。

基于多色集合理论的印刷工艺分层决策过程中,首先,需根据印刷工艺相关知识聚类构造印刷需求双层模型和印刷工艺双层模型。印刷需求双层模型描述了印品的加工需求,可用于构建描述印品加工需求的产品围道。在印刷需求双层模型中第 1 层为若干个加工需求组,第 2 层为各加工需求组包含的工艺需求。印刷工艺双层模型描述了生产印品所需用到的各种工序,可用于描述系统的加工能力。在印刷工艺双层模型中第 1 层为若干个工序组,第 2 层为各工序组包含的工序。然后,根据待印品

的描述,在印刷需求双层模型的第 1 层中筛选出待印品所需的加工需求组,再在印刷工艺双层模型的第 1 层对应选出所需的工序组。最后,在所需工序组包含的众多工序内计算出印品加工所需的工序,按照选出的工序构成印刷工艺路径印刷,即完成待印品的印刷。

多色集合理论使用标准的数学模型来仿真产品、设计过程、工艺过程、生产系统等对象,并应用数理逻辑、矩阵论、模糊数学等工具对传统集合论进行改进,使其能够描述集合本身及其组成元素的性质以及集合本身性质与其组成元素(性质)之间的关系<sup>[8-12]</sup>。针对印刷制造系统的特点,利用多色集合理论,将印刷工艺双层模型中第 1 层的各工序组和第 2 层的工序分别作为多色集合中的元素;将印刷需求双层模型中第 1 层的加工需求组和第 2 层的工艺需求分别作为多色集合中的统一颜色;将单个印刷工序组和印刷工序在工艺规划时分别称为工艺组算子和工艺算子<sup>[6,13]</sup>。基于多色集合理论的分层印刷工艺规划算法中将用到多色集合、统一颜色、个人着色、围道矩阵和多色图等多色集合数学模型,其数学定义如下。

1) 多色集合  $P^g$ 。以印刷工艺双层模型第 1 层中各工序组  $p_i^g$  作为元素的集合,数学表达式为:

$$P^g = (p_1^g, \dots, p_j^g, \dots, p_n^g)。$$

2) 多色集合  $P$ 。以印刷工艺双层模型中第 2 层的各工序  $p_i$  为元素的集合,数学表达式为:

$$P = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)。$$

3) 统一颜色  $F(P^g)$ 。以印刷需求双层模型中第 1 层印品的各加工需求组  $F_i^g$  为元素的集合,数学表达式为:  $F(P^g) = (F_1^g, \dots, F_j^g, \dots, F_n^g)。$

其中,为印刷加工的各“加工需求组”。

4) 统一颜色  $F(P)$ 。以印刷需求双层模型中第 2 层印品的各加工需求  $F_i$  为元素的集合,数学表达式为:  $F(P) = (F_1, \dots, F_j, \dots, F_n)。$

5) 个人着色  $F(p_i^g)$ 。它是布尔矢量,是多色集合  $P^g$  中元素“工序组” $p_i^g$  的着色,即表示工序组  $p_i^g$  分别能实现统一颜色  $F(P^g)$  元素中哪些加工需求组。

6) 个人着色  $F(p_i)$ 。它是布尔矢量,是多色集合  $P$  中元素工序  $p_i$  的着色,即表示工序  $p_i$  分别能实现  $F(P)$  元素中的哪些印刷加工需求。

7) 围道矩阵  $[P^g \cdot F(P^g)]$ 。多色集合  $P^g$  中所有元素的个人着色用布尔矩阵形成的矩阵,数学表达式

为： $\|c_{i(j)}\|_{P^g \cdot F(P^g)} = [P^g \times F(P^g)]$ 。

8) 围道矩阵 $[P \cdot F(P)]$ 。多色集合 $P$ 中所有元素的个人着色用布尔矩阵形成的矩阵, 数学表达式为:

$$\|c_{i(j)}\|_{P \cdot F(P)} = [P \times F(P)]。$$

9) 多色图  $G=(P,C)$ 。它是节点和边都为无色的普通有向图, 表征了各印刷加工工序的先后关系; 其中 $P$ 为各印刷加工工序,  $C$ 连接 $P$ 的着色边。

## 2 印刷需求双层模型和印刷工艺双层模型

围道矩阵 $[P^g \cdot F(P^g)]$ 和 $[P \cdot F(P)]$ 是基于印刷工程知识通过“加工需求(组)-工序(组)”的实现矩阵分别以“粗-细”这 2 种粒度来描述印刷制造系统具有的加工工序(组)和其实现的加工能力。这 2 种围道矩阵中的加工需求(组)和工序(组)则来源于构建出的印刷需求双层模型和印刷工艺双层模型。

文中构建的印刷需求双层模型见图 1。在模型构建时应遵循 4 点原则: 需求模型建立时先构建出第 2 层的加工需求, 然后再对第 2 层的加工需求进行聚类成组, 形成第 1 层的若干个加工需求组; 需求模型中第 2 层的加工需求是基于原子加工工序或加工中心所实现的加工视角的加工需求, 而非客户视角的加工需求; 依据加工中心及工位的加工职能和加工需求的工艺高相关性对加工需求进行聚类构造出加工需求组; 加工需求组的聚类粒度应适宜, 粒度过小或过大都会影响分层工艺规划的运算效率。

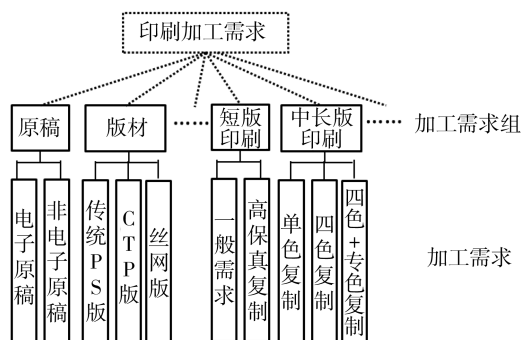


图 1 印刷需求双层模型

Fig.1 Printing Requirements 2-layer Model

印刷工艺双层模型的工序(组)是用于实现印刷需求双层模型中的加工需求(组), 文中构建的印刷工艺双层模型见图 2。在模型构建时应遵循 4 点原则: 先构建出工艺模型第 2 层的加工工序, 然

后再对第 2 层的加工工序进行聚类成组, 形成第 1 层的若干个工序组; 工艺模型中第 2 层的加工工序是印刷制造系统中的原子加工工序或加工中心; 依据工序的工艺相似度和相关度对加工工序进行聚类构造出工序组; 工艺模型中的工序(组)与加工需求(组)的实现加工需求的映射关系应是“1 对 1”或“ $n$  对 1”。当  $n$  个工序组实现 1 个加工需求组时, 须保证  $n$  个工序组实现了加工需求组中的全部加工需求, 但各加工需求相互不重叠; 当  $n$  个工序实现 1 个加工需求时, 则说明特定约束条件下, 这  $n$  个工序可互换, 执行其中任何一个均可实现此加工需求, 文中称这  $n$  个工序互为有条件的互换工序。如四色胶印和高机组数胶印机都能实现四色复制, 但高机组数胶印机成本高于四色胶印, 当约束条件为交货期优先, 则四色胶印和高机组数胶印机等效, 互为有条件的互换工序。

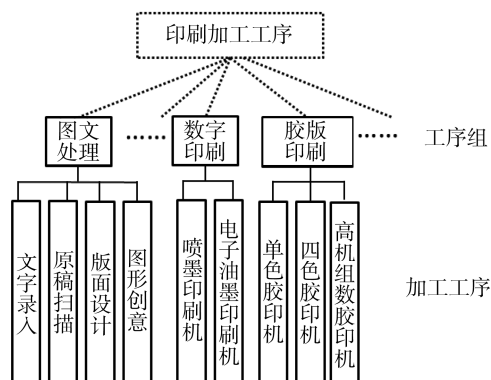


图 2 印刷工艺双层模型

Fig.2 Printing Process 2-layer Model

## 3 围道矩阵的建立

分析上述建立的印刷需求双层模型和印刷工艺双层模型, 分别建立围道矩阵 $[P^g \cdot F(P^g)]$ 和 $[P \cdot F(P)]$ 。围道矩阵 $[P^g \cdot F(P^g)]$ 是根据各工序组与加工需求组的实现情况建立的布尔矩阵, 其列为统一颜色(加工需求组), 行为工艺组算子(工序组)。当某工序组能实现某加工需求组的加工需求, 则其对应的行列所在元素为“1”, 否则为“0”; 某工序组的个人着色是其所在行的布尔矢量。显然,  $[P^g \cdot F(P^g)]$ 从整体上表征了在本印刷制造系统内加工需求组与工序组间的实现关系。

在分层印刷工艺规划方法中首先在 $[P^g \cdot F(P^g)]$ 通过筛选算法选择出待印品的所需要的加工需求和工序组, 然后此加工需求和工序组包含的加工工

序分别作为多色集合中的统一颜色和工艺算子,构建出围道矩阵 $[P \cdot F(P)]$ 。同理,当元素为"1"时,则表示其所在行列对应的加工工序能实现该加工需求;某加工工序的个人着色即是其所在行的布尔矢量。可见, $[P \cdot F(P)]$ 是与待印品高相关的、动态的布尔矩阵。

#### 4 分层印刷工艺规划算法

在印刷工艺算子分层搜索前,首先依据印刷需求双层模型第2层的加工需求获得待印品的产品围道 $F(A)$ ,描绘所要求的加工需求; $F(A)$ 为布尔矢量,当 $F_j(A)=1$ ,则第 $j$ 个加工需求是待印品所需要的。然后再依据第1层的加工需求组,由 $F(A)$ 计算出待印品的加工需求组围道 $F(A^g)$ 。 $F_j(A^g)$ 的值为 $F(A)$ 中第 $j$ 个加工需求组包含的全部加工需求所对应值进行“或”运算的结果,即当需要至少一个第 $j$ 个加工需求组所包含的加工需求,则 $F_j(A^g)=1$ ;当不需要任何一个第 $j$ 个加工需求组所包含的加工需求,则 $F_j(A^g)=0$ 。

获得 $F(A^g)$ 后,利用围道矩阵 $[P^g \cdot F(P^g)]$ 和下面提出的印刷工艺算子分层搜索算法,搜索出待印品需要的工艺算子,其算法如下。

1) 从首行开始,按式(1)依次讨论 $[P^g \cdot F(P^g)]$ 第 $k$ 顺序行:

$$F(P^g)_k = F(A^g) \wedge F(p_k^g) \quad (1)$$

式中: $F(P^g)_k$ 为工序组; $p_k^g$ 实现待印品 $A$ 的产品需求组围道。当 $F(P^g)_k$ 不为布尔零矢量时,记 $p_k^g$ 为第 $i$ 个可用工序组 $p_{i,k}^g$ ,其中 $i=(1, 2, \dots)$ 。

2) 删去 $F(A)$ 中所有布尔值为0的值,得到布尔值全为1的规模最小的产品围道 $F(A)^{\parallel}$ ;将所有可用工序组对应的加工工序作为工艺算子,将所有 $F(A)^{\parallel}$ 中对应的加工需求作为统一颜色,构建出围道矩阵 $[P \cdot F(P)]$ 。

3) 从首行开始,按式(2)依次讨论 $[P \cdot F(P)]$ 的第 $k$ 顺序行:

$$F(P)_k = F(A)^{\parallel} \wedge F(p_k) \quad (2)$$

式中: $F(P)_k$ 为工艺算子 $p_k$ 实现待印品 $A$ 的产品围道,当 $F(P)_k$ 不为布尔零矢量,记工艺算子 $p_k$ 为第 $i$ 个可用工艺算子 $p_{i,k}$ ,记 $F(P)_k$ 为 $F(P)_{i,k}$ ,其中 $i=(1, 2, \dots)$ 。

4) 按式(3)计算得到执行第 $i$ 个可用工艺算子 $p_{i,k}$ 后共能实现产品 $A$ 的产品围道 $F(A)^{\parallel}_i$ :

$$F(A)^{\parallel}_i = F(A)^{\parallel}_{i-1} \vee F(P)_{i,k}^{\parallel} \quad (3)$$

其中, $F(A)^{\parallel}_{i-1}$ 为前 $i-1$ 个可用工艺算子共能实现产品 $A$ 的产品围道,令 $F(A)^{\parallel}_0$ 为布尔零矢量。

5) 分析 $F(A)^{\parallel}_i$ 和 $F(A)^{\parallel}_{i-1}$ ,当 $F(A)^{\parallel}_i = F(A)^{\parallel}_{i-1}$ 时,则前 $i-1$ 个可用工艺算子中的某个与 $p_{i,k}$ 互为“有条件的互换工序”;当 $F(P)_{i,k}^{\parallel} = F(P)_{j,k}^{\parallel}$ , ( $j=i-1, i-2, \dots, 1$ )则标记 $p_{i,k}$ 与 $p_{j,k}$ 互为“有条件的互换工序”。

6) 讨论完 $[P \cdot F(P)]$ 的全部顺序行后,若 $F(A)^{\parallel}_i$ 中布尔值全为"1",则印品 $A$ 的所有围道均可被实现;否则, $F(A)^{\parallel}_i$ 中"0"对应的产品围道是不能被该印刷系统实现的围道。

最后,从多色图 $G=(P, C)$ 中分离出包含所有已计算出的可用工艺算子的子图,进而获得印品 $A$ 的工艺路径<sup>[6,14-15]</sup>。

该算法中,首先利用 $[P^g \cdot F(P^g)]$ 搜索出工序组,进而构建出与待印品高相关的 $[P \cdot F(P)]$ ,在进一步待印品所需工艺算子求解过程中无需用到制造系统中所有的加工需求和加工工序组成的围道矩阵,从而消除文献[6]中的冗余计算。

#### 5 结语

文中提出的基于多色集合理论的分层印刷工艺规划方法是通过提取出需要的印品加工需求来构造出最小规模的产品围道和围道矩阵,进而在多印刷工艺的复杂印刷制造系统内可有效地降低工艺算子搜索过程中的冗余计算。下一步改进该算法时,可以在构建围道矩阵前,在筛选工艺算子时就将工艺路径的决策因素考虑进去,避免有条件的互换工序的出现,将能进一步降低工艺算子搜索过程中的冗余计算。

目前该算法已用于印刷MIS系统研发,其印刷需求双层模型和印刷工艺双层模型更加有利于用户根据印刷制造系统的工艺变化(如增加数字印刷工艺、升级某加工中心等),自主地通过友好的交互式操作界面修改对应的加工需求组和过程组,从而达到修改系统围道矩阵的目的,提高系统的适应性。

#### 参考文献:

- [1] 中国政府网. “工业 4.0”开启中德合作新时代

- [EB/OL].(2014-10-13)[2015-12-15]. [http://www.gov.cn/zhengce/2014-10/13/content\\_2763807.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2014-10/13/content_2763807.htm).  
Chinese Government Web Portal. "Industrie 4.0" Open a New Era of Cooperation between China and Germany[EB/OL]. (2014-10-13)[2015-12-15]. [http://www.gov.cn/zhengce/2014-10/13/content\\_2763807.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2014-10/13/content_2763807.htm).
- [2] KAGERMANN H, WAHLSTER W, HELBIG J. Securing the Future of German Manufacturing Industry-Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0-Final Report of the Industrie 4.0 Working Group[R/OL]. (2013-04-11) [2015-12-15]. <http://www.docin.com/p-852422851.html>.
- [3] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 1—5.  
ZHANG Shu. Industrie 4.0 and Intelligent Manufacturing[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(8): 1—5.
- [4] 罗如柏, 周世生. 基于 AOV 网的 JDF 印刷工作流程建模[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(1): 7—12.  
LUO Ru-bai, ZHOU Shi-sheng. Activity on Vertices based JDF Workflow Modeling[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(1): 7—12.
- [5] 罗如柏, 周世生, 李怀林, 等. 计算机集成印刷系统[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 23—26.  
LUO Ru-bai, ZHOU Shi-sheng, LI Huai-lin, et al. Computer Integrated Printing Production System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 23—26.
- [6] 罗如柏, 周世生. 基于多色集合理论的印刷工艺规划建模研究[J]. 计算机应用, 2009, 29(7): 1970—1973.  
LUO Ru-bai, ZHOU Shi-sheng. Model for Print Process Planning Based on Polychromatic Sets Theory[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(7): 1970—1973.
- [7] 肖菲菲, 刘真. 网络印刷服务平台功能模型的分析及建立[J]. 包装工程, 2012, 33(21): 120—124.  
XIAO Fei-fei, LIU Zhen. Analysis and Establishment of Functional Model for Web-to-Print Services Platform[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 120—124.
- [8] 李宗斌. 先进制造中多色集合理论的研究及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.  
LI Zong-bin. Research and application of Polychromatic Sets Theory in Advanced Manufacturing[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2005.
- [9] 杜轩, 吴龙, 张屹. 多色集合与模糊遗传算法的机械产品概念设计研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(4): 15—18.  
DU Xuan, WU Long, ZHANG Yi. Modular. Research Study on the Conceptual Design of Mechanical Products Based on the Combination of Polychromatic Sets and Fuzzy Genetic[J]. Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(4): 15—18.
- [10] 蒋科, 刘检华, 宁汝新, 等. 基于多色集合理论的几何公差信息推理及其规范性验证[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(3): 593—605.  
JIANG Ke, LIU Jian-hua, NING Ru-xin, et al. Geometric Tolerances Reasoning and Its Specification Verification Based on Polychromatic Sets Theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21 (3): 593—605.
- [11] 姜洪权, 王金宇, 高智勇, 等. 基于多色集合理论的大型装备 IETM 数据模块创作技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1536—1545.  
JIANG Hong-quan, WANG Jin-yu, GAO Zhi-yong, et al. Data Module Creation of IETM Based on Polychromatic Sets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(6): 1536—1545.
- [12] 邵焕, 李爱平, 于海斌, 等. 基于多色集合理论的箱体类零件可重构生产线多目标优化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2393—2402.  
SHAO Huan, LI Ai-ping, YU Hai-bin, et al. Objective Optimization Algorithm for Reconfigurable Machining Lines Based on Polychromatic Sets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(9): 2393—2402.
- [13] 姜莉莉, 赵苏晋, 李宗斌. 基于多色集合理论的冲压工艺规划建模研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(7): 990—995.  
JIANG Li-li, ZHAO Su-jin, LI Zong-bin. Punching Process Planning Modeling Based on Polychromatic Sets Theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(7): 990—995.
- [14] CHARTRAND G, ZHANG P. Introduction to Graph Theory[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2007.
- [15] BUCKLEY F, LEWINTER M. Concise Tutorial of Graph Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.