

航空发动机装配数据结构化建模及应用

Structured Modeling of Aeroengine Assembly Data and Its Application

西北工业大学机电学院 李 坤 莫 蓉

[摘要] 针对航空发动机装配数据结构化程度低及数据追溯困难等问题,分析了航空发动机装配数据构成及特点,提出了一个装配生产准备数据和装配生产过程数据的定义模型。针对装配生产过程数据特点,建立了以装配数据单元为核心的装配数据模型,给出了电子化履历的实现过程,验证了方法的有效性。

关键词: 航空发动机装配 结构化建模 数据模型 电子履历

[ABSTRACT] Aeroengine assembly data is low degree of structure and data tracing back was difficult. In order to deal with these problems, aeroengine assembly data structure and features is analyzed. Definition model of assembly production preparation data and assembly production process data is proposed. Data model based on assembly structured data units is established. The generation process of electronic curriculum vitae is presented. Application example verified the effectiveness of this method.

Keywords: Aeroengine assembly Structured modeling Data model Electronic curriculum vitae

航空发动机装配质量直接影响整机的飞行性能、可靠性和服役时间。作为典型的复杂产品,航空发动机装配涉及的零部件众多、工艺繁杂、技术密集、数据繁多。然而,大多数航空发动机生产制造企业还是采用人工纸质方式记录装配过程中的各项数据。这些纸质记录的装配数据数量巨大,数据的查询和提取效率较低,数据处理及追溯困难,已严重制约了企业装配生产效率和质量追溯效率的提高。因此,研究发动机装配数据的管理是非常必要的。

近年来,在复杂产品数据模型方面的研究众多,已取得不少成果。从零件的生命周期出发,任良全^[1]等给出了数据起源和产品物料清单的数学模型,提出了实例物料起源标注设计方法。从面向对象的设计思想出发,王成恩^[2]建立了复杂产品装配元模型,并给出了将复杂产品装配元模型转化为航空发动机装配的对象模型的方法。从物料清单信息集成的思想出发,魏志强^[3]提出了基于单一数据源的产品 BOM 数据多视图映射技术。

本文在分析装配数据的构成和特点基础上^[4],从装配数据的结构化和电子履历的实现角度出发,给出了装配数据单元的定义,并在此基础上提出了航空发动机装配数据模型,通过实例验证了模型的有效性。

1 航空发动机装配数据结构化模型

1.1 装配数据分析

从数据来源分析,装配车间的数据可以分为两部分:(1)装配生产准备数据:在车间装配过程执行前的各种信息,包括通过从企业信息系统获得的各种数据,如装配计划、角色、物料等。装配生产准备数据是装配执行工作开展的基础。(2)装配生产过程数据:航空发动机在装配执行过程中产生的数据。主要是指产品装配开始到产品交付前这段时间产生的各类数据,它是对装配生产过程信息的记录。航空发动机装配数据构成如图 1 所示。

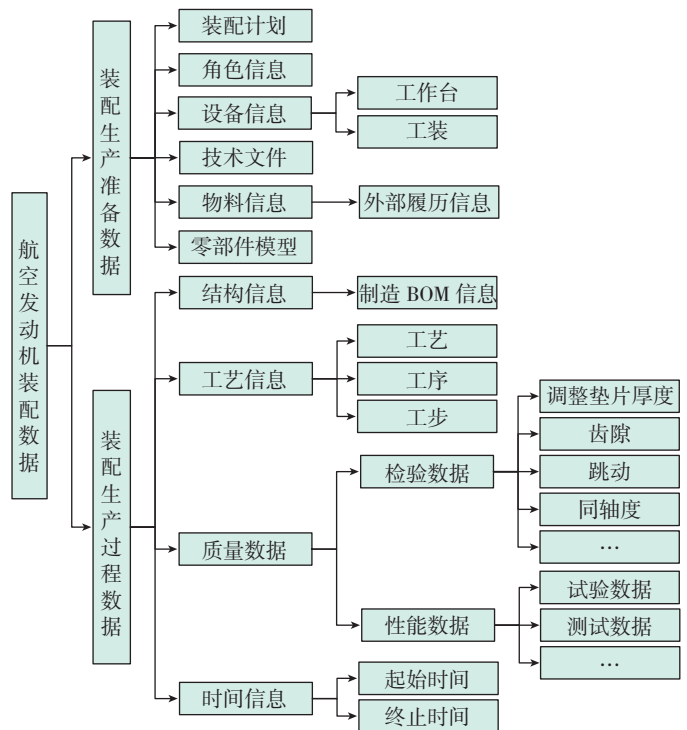


图1 航空发动机装配数据构成

Fig.1 Aeroengine assembly data structure

装配生产准备数据属于装配操作之前的数据,其在产品装配执行过程中不变或者变化很小,在实际产品生产过程中只需进行简单的配置就可以实现数据的共用;装配生产过程数据属于产品数据范畴,其数据项与产品实际零部件(实体)紧密相关,在实际产品装配过程中各不相同。

由于装配数据的数据量巨大和装配数据结构化的要求,必须考虑数据组织和存储合理性,控制数据的冗余度,优化存储质量^[5-6]。在这里,把产品数据分为两部分分别存储管理:(1)对装配生产支持数据,按照版本控制管理;(2)对装配生产过程数据,建立装配数据单元模型,根据装配数据单元提出装配数据管理维护方法。

1.2 装配数据单元构建

为了便于装配数据的结构化,表达和记录装配执行过程产生的各类信息,需要构建信息表示模型,为叙述方便,对模型的相关内容进行如下定义。

定义1: 零部件——产品装配过程中参与装配的实体,称之为零部件,记作 e 。在实际装配过程中,零部件可以是零件、组件或者部件。

定义2: 装配操作——将两个或多个零部件进行装配形成新实体的操作过程,称之为装配操作,记作 op 。

定义3: 装配体——零部件之间通过装配操作形成的新实体,称之为装配体,记作 cp 。 $cp = \langle E, OP, T \rangle$,其中, E 为参与装配操作的零部件集合, OP 为装配操作集合, T 为装配时间信息集合。在产品装配结构树中,装配体可以是零部件也可以是产品。

定义4: 装配数据单元——装配体包含的信息的集合称之为装配数据单元,记作字母 I 。装配数据单元主要由零部件结构信息、测量数据、性能数据、工艺信息、装配时间信息等5部分组成。装配数据单元 $I = \langle St, Ms, Pm, Pc, T \rangle$,其中 St : 结构信息集合; Ms : 测量数据集合; Pm : 性能数据集合; Pc : 工艺信息集合; T : 时间信息集合。

装配数据单元中的结构信息 St 主要是指装配结构树子节点集合;测量数据 Ms 主要指装配体中被用户关注的测量数据的集合;性能数据 Pm 指装配体测试、试验数据的集合;工艺信息 Pc 主要指装配过程所用到的工序或工步;时间信息 T 指装配的起始时间、终止时间等时间信息集合。

1.3 装配数据模型

定义5: 初装零部件——零部件 e 经过装配操作第一次出现在装配体中,则称零部件 e 为初次参与装配的零部件,简称初装零部件。初装零部件是装配生产中的基本单元,主要包括自制件、外协件和外购件。初装零

部件可以看作特殊的装配体,其装配数据单元中结构信息为空,工艺信息为空,时间为零部件领用时间。

产品是一系列初装零部件经过有限次数的装配操作所得到的实体,其装配数据主要包括两部分:初装零部件的信息和装配操作引入的信息。因此,装配数据模型可表示为:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{j=1}^m I_j^{op}, \quad (1)$$

式(1)中, n 为初装零部件的总数; I_i 为初装零部件 e_i 的装配数据单元; m 为装配操作次数; I_j^{op} 为第 j 次装配操作产生的装配数据单元。

(1) T_1 时刻发动机已装配完成的数据:

$$I_{T_1} = \sum_{i=1}^{n_1} I_i + \sum_{j=1}^{m_1} I_j^{op}, \quad (2)$$

式(2)中, n_1 为 T_1 时刻之前初装零部件总数; m_1 为 T_1 时刻之前完成的装配操作次数; I_i 表示初装零部件 e_i 的装配数据单元; I_j^{op} 表示第 j 次装配操作产生的装配数据单元。

(2) 时间段 $[T_1, T_2]$ 内发动机增加的装配数据:

$$\begin{aligned} I_{T_2-T_1} &= I_{T_2} - I_{T_1} \\ &= \left(\sum_{i=1}^{n_2} I_i + \sum_{j=1}^{m_2} I_j^{op} \right) - \left(\sum_{i=1}^{n_1} I_i + \sum_{j=1}^{m_1} I_j^{op} \right) \\ &= \left(\sum_{i=1}^{n_2} I_i - \sum_{i=1}^{n_1} I_i \right) + \left(\sum_{j=1}^{m_2} I_j^{op} - \sum_{j=1}^{m_1} I_j^{op} \right), \quad (3) \\ &= \sum_{i=n_1+1}^{n_2} I_i + \sum_{j=m_1+1}^{m_2} I_j^{op} \end{aligned}$$

式(3)中, n_1 为 T_1 时刻之前初装零部件总数; m_1 : T_1 时刻之前完成的装配操作次数; n_2 : T_2 时刻之前初装零部件总数; m_2 : T_2 时刻之前完成的装配操作次数; I_i 为初装零部件 e_i 的装配数据单元; I_j^{op} 为第 j 次装配操作产生的装配数据单元。

2 模型算法

2.1 装配数据单元的最小化处理

在实际装配模型中,往往存在由3个或3个以上的零部件构成的装配结构,这类结构一次装配操作中涉及的零部件多,不利于装配信息的记录,影响装配数据的查询速度^[7]。为了方便准确的记录每个零部件参与装配所引起装配数据的改变,方便数据的后期处理,需要对装配数据单元进行最小化处理。装配数据单元的最小化处理过程如图2所示。经最小化处理后,在装配过程中模型会对每个零部件的装配信息进行记录,可以有

效减少零部件的错装、漏装事件的发生。

定义6: 最小装配数据单元——仅有两个零部件参与的装配操作称之为最小装配操作, 最小装配操作过程中新增的装配信息的集合称之为最小装配数据单元, 记作 \hat{I} 。

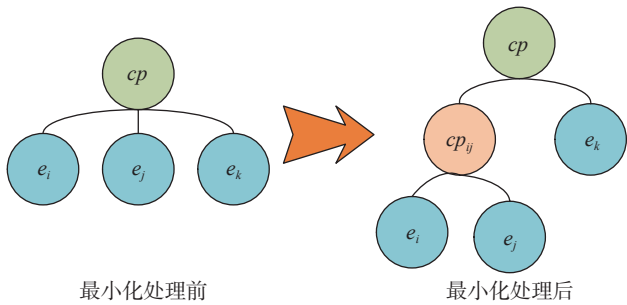


图2 装配数据单元的最小化处理

Fig.2 Minimization process of assembly data unit

最小化处理前, 装配体 cp 的装配数据单元可以表示为:

$$I = I_i + I_j + I_k + I_{i,j,k}^{op}, \quad (4)$$

式(4)中, I 为装配体 cp 对应的装配数据单元; I_i 、 I_j 、 I_k 分别为参与装配的零部件 e_i 、零部件 e_j 、零部件 e_k 对应的装配数据单元; $I_{i,j,k}^{op}$ 为零部件 e_i 、零部件 e_j 和零部件 e_k 经装配操作产生的装配数据单元。

经过最小化处理, 装配体 cp 的装配数据单元可以表示为:

$$\begin{aligned} I &= I_{ij} + I_k + \hat{I}_{i,j,k}^{op} \\ &= (I_i + I_j + \hat{I}_{i,j}^{op}) + I_k + \hat{I}_{i,j,k}^{op} \quad (5) \\ &= I_i + I_j + I_k + \hat{I}_{i,j}^{op} + \hat{I}_{i,j,k}^{op} \end{aligned}$$

式(5)中, I 、 I_i 、 I_j 、 I_k 与其在式(1)中的含义相同, 为参与装配的零部件 e_i 的装配数据单元; I_{ij} 为装配体 cp_{ij} 的装配数据单元; $\hat{I}_{i,j,k}^{op}$: 装配体 cp_{ij} 与零部件 e_k 经装配操作产生的装配数据单元; $\hat{I}_{i,j}^{op}$: 零部件 e_i 与零部件 e_j 经装配操作产生的装配数据单元。

最小化处理的依据是装配工艺路线、工艺规程以及零部件装配顺序, 它将装配结构模型按照装配工艺中规定的装配顺序进行合理的最小化处理。经过最小化装配单元的处理, 产品的装配结构变成简单的类似数据结构中的二叉树结构, 称之为最小装配结构。在这种结构中每个分叉对应一次装配操作, 而装配操作产生的信息被记录到对应的最小装配数据单元 I^{op} 中。

根据装配单元的最小化处理, 可以得出航空发动机最小装配数据单元数据模型:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{j=1}^m \hat{I}_j^{op}, \quad (6)$$

式(6)中, n 为初装零部件的总数; I_i 为初装零部件 e_i 的装配数据单元; m 为最小装配数据单元模型下, 装配操作次数; \hat{I}_j^{op} 为第 j 次装配操作产生的装配数据单元。

考虑到航空发动机装配是一个复杂的过程, 装配过程中参与的零部件众多, 将每个零部件的装配都进行分解会使得模型过于复杂, 同时信息查询速度会降低, 为了避免引入这些问题, 采用如下策略:

(1) 零部件归类。将初装零部件按照零部件类型归类, 在装配数据单元中记录零部件的数量和测量信息、时间信息。此策略主要用来处理标准件数量过多的问题。

(2) 建立数据字典。对装配数据事先建立数据映射字典, 即建立数据与数据模型中数据项的关联关系, 便于数据的快速定位和提取。数据字典随着装配模型结构的更改而更新版本。

2.2 消除部件虚拟装配数据单元

定义7: 虚拟装配数据单元——在装配数据单元最小化处理过程中生成的中间装配数据单元, 称之为虚拟装配数据单元, 例如装配体 cp_{ij} (如图2所示) 对应装配数据单元。

虚拟装配数据单元是在装配数据单元最小化处理过程中产生的, 并不与装配结构树节点一一对应。履历信息一般以装配结构树为依据组织, 为了方便履历的查看, 需要消除虚拟装配数据单元来保证履历本数据安排与装配结构树相对应。以部件节点为算法起始点, 消除部件虚拟装配数据单元算法如图3所示。

2.3 装配数据时间断面图

在分析装配质量问题的来源时, 常需要翻查某段时间某个部件的装配履历。为了方便产品质量定点追溯, 提出装配数据时间断面图的生成方法。装配数据时间断面图生成方法的思想是利用时间信息筛选出符合时间约束的装配数据单元。当用户输入某个时间值, 系统按照既定的程序生成设定时间点上的装配履历信息。

3 基于最小装配数据单元的履历本

履历本是对装配过程进行描述和记录的文件, 是对装配过程的真实记录, 是航空发动机的最主要的技术文件。为实现履历本的自动生成, 方便装配数据归档, 提出基于最小装配数据单元的履历本生成的方法。方法的实现过程如图4所示。

履历本自动生成的基础是结构化表单模板文件、表单文件对应的XML文本以及发动机装配数据单元。表单模板文件是信息承载的主体, XML文本给出了表单模板与装配数据的映射关系, 装配数据单元是装配数据的信息来源。履历本生成工具解析XML文件, 抽取装

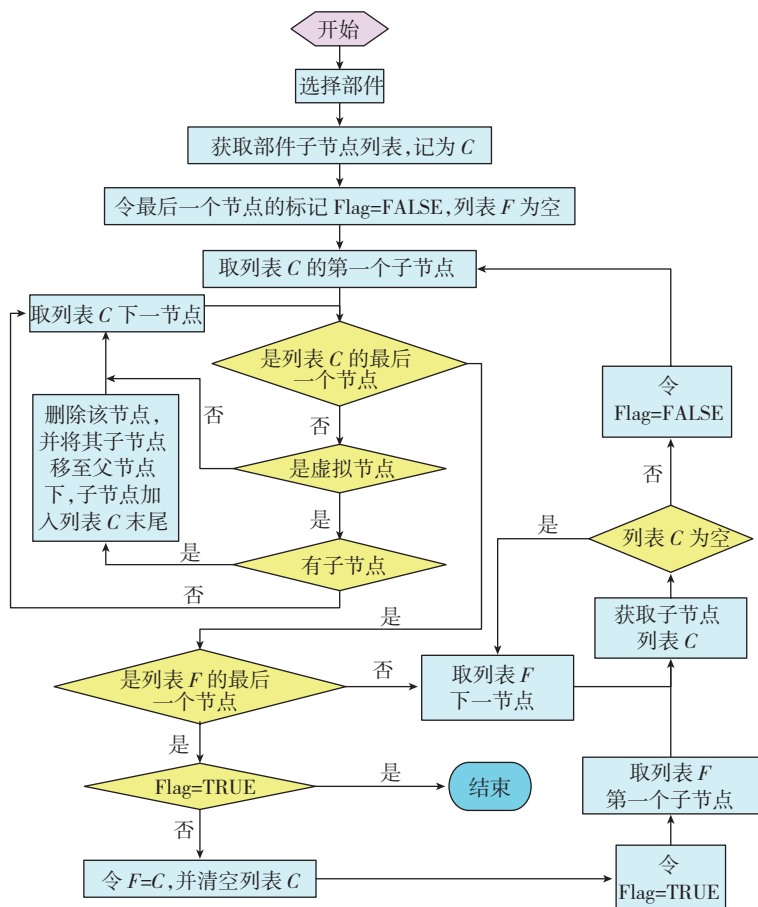


图3 消除部件虚拟装配数据单元算法

Fig.3 Virtual assembly data unit of part eliminate algorithm

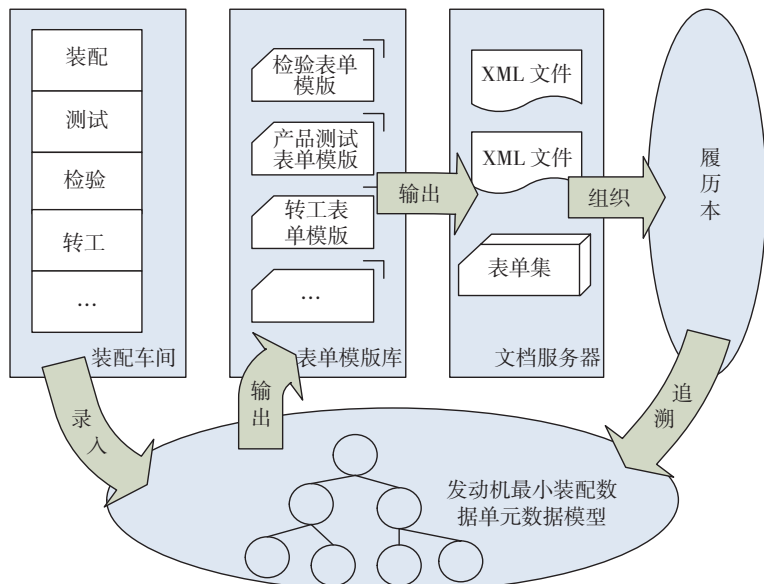


图4 基于最小装配数据单元的履历本生成过程

Fig.4 Generation process of curriculum vitae based on minimum assembly data units

配数据单元中数据,然后将数据绑定在结构化表单中,最后调用文件转换工具将文件转换为只读文件进行存

档。装配履历本的生成过程实质上是存储于装配数据单元中的信息提取后重新组织,填入预定义的动态表单模版中,最后得到结构化表单集的过程。

4 应用实例

针对航空发动机装配生产线对装配数据的管理和使用上的实际需求,借助信息化技术开发出了面向航空发动机装配数据管理系统。航空发动机装配数据管理系统是在航空发动机装配数据模型研究的基础上结合结构化表单技术,实现对装配生产全过程数据进行管理和电子履历的生成。系统主体界面如图5所示,履历展示模块如图6所示。



图5 系统主体界面

Fig.5 Main interface of system

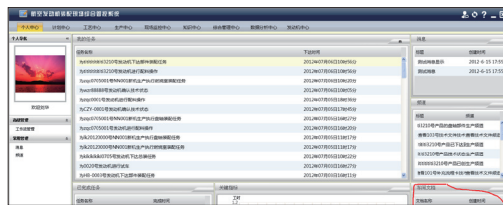


图6 履历展示模块

Fig.6 Curriculum vitae display module

5 结论

装配是制造企业生产过程中至关重要的一个阶段,一个产品的装配质量好坏直接影响着产品的使用寿命。航空发动机装配是典型的复杂产品装配,其装配过程和质量的控制是生产企业关注的重点。现阶段装配数据主要通过纸质履历本记录,数据的使用非常受限,装配数据指导生产困难。本文在调研航空发动机装配车间的基础上,针对装配数

据的使用困难这一问题,提出了装配数据单元模型,并

(下转第 89 页)

表3 优化参数与实际采用参数的切削效率对比

对比项	线速度 $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	每次进给 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	切削宽度 /mm	切削深度 /mm	粗糙度值 / μm	加工效率 $\eta / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	效率比
工厂实际	20	0.1	1	20	2.76	4×10^5	1
优化参数	63	0.115	1.473	12.40	0.94	1.15×10^6	2.9
试验验证	63	0.115	1.473	12.40	0.94	1.15×10^6	2.9

$$\min \varphi(x, r^{(k)}) = \frac{1}{F(X)} = f(x) + r^{(k)} \sum_1^m \{\max[p(x), 0]\}^2, \quad (16)$$

式中, $F(X)$ 为适应度函数; $p(x)$ 为惩罚项, $r^{(k)}$ 为惩罚因子。随着进化不断进行,惩罚项越来越小。为了保证惩罚项的作用,必须逐步增大惩罚因子 $r^{(k)}$; 初始惩罚因子 $r^{(0)}=1$, 取 $C=2$, $r^{(k)}=C \cdot r^{(k-1)}$; 给定搜索精度 ε , 若 $\|X^*(r^{(k-1)}) - X^*(r^{(k)})\| \leq \varepsilon$, 则输出最优解, 否则令 $r^{(k)}=C \cdot r^{(k-1)}$, 转下一步。

2.3 优化结果

采用遗传算法与惩罚函数相结合优化方法取: 每齿进给量(0.05~0.15mm/z, 编码精度 0.001mm/z), 铣削速度(0~100m/min, 编码精度 1m/min); 切削宽度(0~10mm, 编码精度 0.001mm); 切削深度(0~20mm, 编码精度 0.01mm), 优化参数考虑这 4 个参数, 群体规模 100, 100, 1000, 2000, 采用二进制编码, 编码长度为 35 位, 种群规模 50, 最大遗传代数 100, 交叉概率 0.7, 变异概率 0.5, 用 matlab 编程计算结果。并分别用所得结果和工厂实际使用的参数, 在同一机床使用同一刀具加工钛合金块, 结果如表 3。

从表中可以看出铣削参数优化后材料去除率比实际工厂生产最大材料去除率提高 74%, 粗糙度明显降低。为得出具有说服力的结论, 用本文优化的参数值进行切削实验, 切削过程平稳、排屑流畅、机床噪声较小, 已加工表面粗糙度 R_a 理论计算吻合较好, 并且表面粗糙度以及材料去除率都比较好。可以得到的结论是: 文中所提到的优化方法是合理有效的, 所得优化参数的切削效率有较大的提高, 约为工厂实际效率的 2.7 倍, 对生产实践具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Rahman M, Wang Z G, Wong Y S. A review on high-speed machining of titanium alloys. *JSME International Journal, Series C*, 2006, 49(1):11-20.
- [2] Vivancos J, Luis C J, Costa L. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds.

Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1505-1502.

- [3] Lee K, Dornfeld D A. A study of surface roughness in the micro-end-milling process. *Laboratory for Manufacturing Atom Action*. 2004.
- [4] Sahin Y, Riza M A. Surface roughness prediction model in machining of carbon steel by PVD coated cutting tools. *American Journal of Applied Sciences*, 2004, (1):12-17.
- [5] 刘晓志, 陶华, 李茂伟. 钛合金 TC18 铣削表面粗糙度预测模型的研究. *组合机床与自动化加工技术*, 2010, 7:8-11.
- [6] 高玉根, 王国彪, 丁予展. 遗传算法在机械优化设计中的应用现状及展望. *机械*, 2002, 29(3): 8-12.
- [7] 刘琼荪, 周声华. 基于自适应惩罚函数法的混合遗传算法. *重庆大学学报*, 2006, 29(6): 78-81.

(责编 日午)

(上接第 61 页)

在数据模型的基础上给出了电子化履历实现过程。该模型可以有效地实现数据的结构化, 简化装配数据的提取, 支持履历电子化的生成。本文主要从模型的构建和应用方面进行相关研究, 对数据挖掘研究不足。装配数据的后期处理和挖掘是航空发动机装配研究的后续课题。

参考文献

- [1] 任良全, 张力, 王建民. 产品维修阶段 BOM 数据起源研究. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(10):2187-2195.
- [2] 王成恩, 于宏, 张闻雷, 等. 面向对象的航空发动机装配模型. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(5):942-948.
- [3] 魏志强, 王先逵, 吴丹, 等. 基于单一数据源的产品 BOM 多视图映射技术. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(6):802-805.
- [4] 孙惠斌, 常智勇. 航空发动机装配技术状态数据模型研究. *航空制造技术*. 2009, (16):74-78.
- [5] Niu X X, Ding H, Xiong Y L, et al. A hierarchical approach to generating precedence graphs for assembly planning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43 (14): 1473-1486.
- [6] Henrioud J M, Bourjault A. Lega: a computer-aided generator of assembly plants//computer-aided mechanical assembly planning. Dordrecht. the Netherlands: Kluwer Academic Publishers Group, 1991: 191-215.
- [7] 钟诗胜, 张永健, 林琳. 基于上下文的适应性产品数据管理模型及应用. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(1):45-52.

(责编 小城)