

新能源汽车装配产线模块化研究方法研究

卢贤林, 鲁玉军

(浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对新能源汽车装配产线零部件模块线下替换出错率高的问题, 提出一种零部件模块化研究方法。通过阐述模块化中采用大批量定制设计技术和产品数据管理技术的原理, 结合某新能源车企的实际数据, 实现了零部件模块的线上化管理, 解决了新能源汽车装配产线零部件模块替换容易出错的问题, 为后续车型的设计与开发提供了可便捷使用的部件模块资源库。

关键词: 新能源汽车; 模块化; 装配产线; 大批量定制; 产品数据管理

DOI: 10.11907/rjdk.231187

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TP399

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2024)004-0059-08

Research on Modular Management Method of New Energy Vehicle Assembly Line

LU Xianlin, LU Yujun

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A modular management method for components is proposed to address the high error rate of offline replacement of component modules in the assembly line of new energy vehicles. By explaining the principles of using mass customization design technology and product data management technology in modularization, combined with the actual data of a new energy vehicle enterprise, the online management of component modules has been achieved, solving the problem of error prone component module replacement in the assembly line of new energy vehicles, and providing a convenient component module resource library for the design and development of subsequent vehicle models.

Key Words: new energy vehicles; modularization; assembly line; mass customization; product data management

0 引言

大批量定制是根据每个用户的特殊要求, 以大批量生产的效率提供定制产品的一种生产模式, 将“大批量”与“定制”这两个看似矛盾的生产模式有机地结合在一起, 实现客户的个性化需求和大批量生产的有机结合, 从而满足小批量、多品种的市场需求, 为客户提供多样化定制、个性化产品和服务的主流生产模式^[1-2]。

模块化是大批量定制的关键技术, 产品模块化的思想是将某一产品(实体产品或概念产品)按一定规则分解为有利于产品设计、制造及装配的多个模块, 然后按模块组织生产和生产^[3-5]。大批量定制强调利用企业现有资源, 基于相似性、重用性、全局性原理批量生产满足客户个性

化需求的产品。

新能源车企在实践过程中积累了许多零部件数据, 其中供应商提供的部件模块数据占比较大, 通过供应商与企业间资源间的互相配合, 形成了企业独特的产品族与丰富的模块数据库。在合理利用的前提下, 企业积累的模块数据可为后续产品设计提供便利。企业大批量定制的能力可通过企业产品的模块化程度显现, 通过对零部件进行适当的模块化研究, 能提升企业大批量定制能力, 使企业的新能源汽车装配产线效率、数据管理能力得到大幅度提升。

1 相关研究

如今, 国内整车厂零部件供应商经过多年发展, 部分

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 浙江省科技厅重点研发计划项目(2020C01084, 2022C01242)

作者简介: 卢贤林(1998-), 男, 浙江理工大学机械工程学院硕士研究生, 研究方向为产品数据管理、大批量定制; 鲁玉军(1976-), 男, 博士, 浙江理工大学机械工程学院教授、博士生导师, 研究方向为数字化设计与智能制造、TRIZ创新方法及专利挖掘。本文通讯作者: 鲁玉军。

产品具备模块化特征,不同供应商的部件级(多零部件组合)产品功能近似和外部接口相同,但内部零部件结构和性能存在不同^[6]。

目前,许多学者已在模块化设计方面做了大量研究。钱柯浙等^[7]基于电动汽车行业的市场与客户需求分析,采用产品配置设计与变形设计方法,提出适用于某公司的模块化设计方法,并对模块化设计方法进行了可行性验证。顾新建等^[8]基于定制产品市场趋势,提出产品模块划分等产品模块化中若干智能方法。张孝然等^[9]从底架组装工序需求出发分析了底架组装工装功能,基于模块化设计思路进行底架组装工装设计。Bhosekar等^[10]提出一种基于机器学习、柔性分析模块化设计的需求可变性框架,以获得最优的设计选择。程贤福等^[11]总结分类目前的绿色模块化设计技术和方法,综述了面向产品全生命周期不同阶段的模块化设计方法。孟利国等^[12]为了更好地帮助下肢功能障碍者进行居家下肢康复训练,采用模块化设计思想设计下肢康复训练设备控制系统中各模块的软硬件。

产品生命周期设计是产品数据管理技术的延伸。孔琳等^[13]为实现产品全生命周期绿色设计方案的生成与决策,构建了基于功能—行为—结构—材料—工艺(FBS-MP)的设计方案多层次表达模型。随后,又提出以生命周期综合架构为基础的新生态设计模式,以有效发挥生命周期信息在概念设计阶段的作用^[14]。王耿等^[15]为支持在产品阶段进行生命周期碳足迹评估及设计方案低碳优化,提出一种基于设计特征的产品低碳设计方法。

然而,上述模块化设计及产品生命周期设计均以设计产品为主要目的,并未充分考虑产品实际在生产装配过程中的需要。同时,上述文献方法大多无法适用于结构复杂、零部件多样的新能源汽车领域。为此,本文根据企业实际情况,结合大批量定制开发设计技术中模块化设计技术和产品数据管理技术,提出一种新能源汽车装配产线模

块化管理方法,解决了新能源汽车装配产线部件模块化替换问题。

2 新能源汽车企业装配产线模块化背景

调查发现,部分新能源车企对数据的管理还停留在零部件层级。新能源汽车中许多零部件是外协件,即由企业设计,供应商根据其生产能力及企业要求生产的零部件。由于系统局限性及企业规划不足,导致在下游新能源汽车装配产线进行零部件替换时,系统既无法直接确定替换的零部件是否属于部件级替换范畴,也无法在线上根据部件级信息替换整个配套部件并生成对应的生产计划表,因此导致无法替换全部部件,造成新能源汽车装配产线延迟生产或停线。为此,本文将详细阐述某新能源汽车企业的零部件设计流程及新能源汽车数据管理系统面向装配产线模块替换的不足。

2.1 新能源汽车企业零部件设计流程

新能源汽车结构复杂,其单车物料清单(Bill Of Material, BOM)由数量庞大的零部件组成。从配置细分方面可分为十大工程系统,68个功能系统,256个组件系统。以近2 000个组件零部件为基础,组合出上万个单车级产品^[16],其中约80%的零部件规格均为汽车制造厂所决定或设计^[17]。

零部件在设计之初,首先由设计部门编写零部件设计要求,然后企业设计部工程师构建零部件初步的设计图样,接下来将图样交由供应商,供应商根据自身生产能力与零部件设计要求修改图样并发送到企业,最后由企业设计部工程师确认通过后进行零部件图样发布,不通过则要求供应商对图样重新修改或合理调整零部件设计要求,直至零部件图样顺利发布。具体零部件设计流程如图1所示。

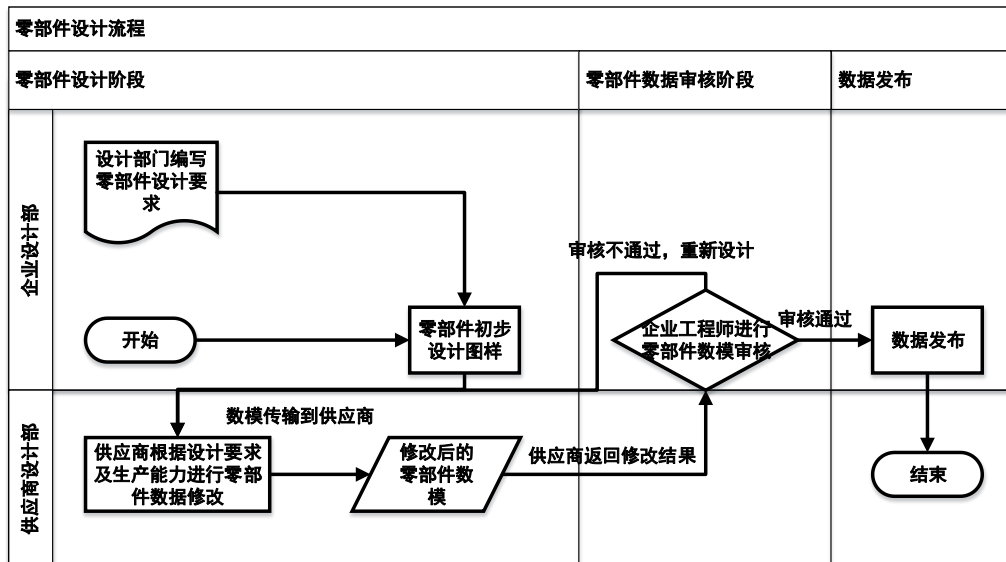


Fig. 1 Component design process

图1 零部件设计流程

2.2 新能源汽车数据管理系统面向装配产线模块替换的不足

本文所研究的新能源汽车企业的产品数据结构根据车身、底盘、内外饰、电池、电驱等七大部门进行划分。对于装配产线而言,部分模块下的零部件被分配到不同部门,在装配产线运行时个别零部件库存不足就需要对零部件进行替换,当该零部件属于部件模块时,产线就需要对整个模块下的零部件进行替换。

如图 2 所示,车身稳定系统的首选部件由电子稳定性控制模块(Electronic Stability Control, ESC)、控制模块、

ESC 模块固定支架及标准件螺栓组成。其中,ESC 控制模块与 ESC 模块固定支架属于底盘部门,但其六角法兰面螺栓一粗牙属于车身;车身稳定系统备选部件由 ESC 控制器、ESC 减震垫、ESC 支架 1、ESC 支架 2、螺栓及螺钉组成,ESC 控制器与 ESC 减震垫属于底盘,其他零件由车身管理。当装配产线设计人员预测到车身稳定系统下的 ESC 控制模块库存不足时,需要将整个相关模块替换为次选模块,但由于产品数据管理(Product Data Management, PDM)系统限制,只能对替换的单个零部件进行标记,因此无法满足装配产线的实际需求。

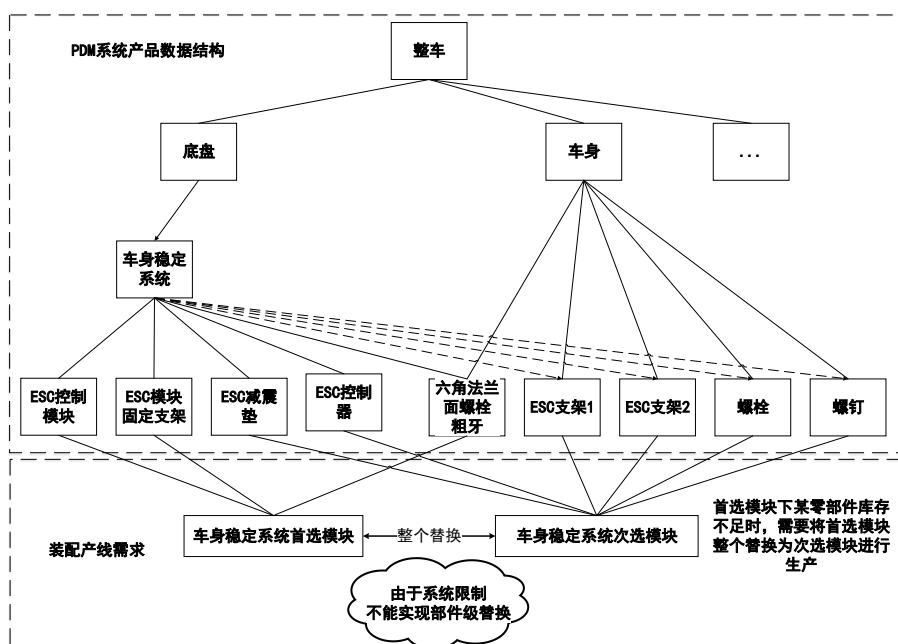


Fig. 2 New energy vehicle data management system for assembly line modules

图 2 新能源汽车数据管理系统面向装配产线模块

对于下游生产人员而言,如果准确替换线下部件级模块,需要十分熟悉车型下的部件内容模块,非常不利于新能源汽车装配产线的生产。为此,本文提出一种支持整车厂新能源汽车装配产线模块化的零部件元数据方法,结合大批量定制的开发设计技术,实现面向新能源汽车装配产线的部件模块化管理。

3 支持大批量定制的新能源汽车装配产线模块化关键技术

由于本文调查的企业除装配产线替换问题外,产品数据库未精简,零部件名称也未标准化,并且在零部件创建过程中没有零部件的名称规范检查,对产品数据模块化十分不利,因此需要对产品族模块重新进行面向装配产线的模块化设计。

模块化是大批量定制的关键技术,也是实现产品以大批量生产成本提供客制化产品的有效方法^[18]。本文以 PDM 系统为平台实现面向新能源汽车装配产线的零部件模块化,需结合零部件 ABC 分析、名称分析等大批量定制开发设计技术和零部件层次结构划分技术等分类方法,还

需将开发设计技术与 PDM 系统相结合,例如元数据管理技术,具体步骤如图 3 所示。由此可见,零部件模块化要以良好的零部件分类为基础,零部件分类分为零部件 ABC 分析、名称分析及零部件层次结构 3 个步骤。

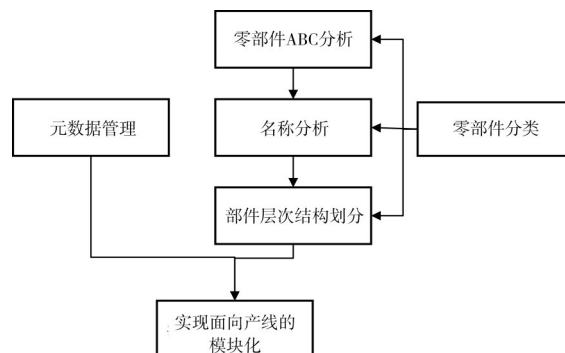


Fig. 3 Implement modularization for new energy vehicle assembly lines

图 3 实现面向新能源汽车装配产线的模块化

3.1 零部件 ABC 分析

根据 Pareto 法则,生产某产品总成本的 80% 由不到

20%的零部件产生^[19],因此这些部件对产品内部多样化及外部多样化影响非常明显。如果增加产品的外部多样化,降低产品内部多样化,需要运用零部件ABC分析对产品中的零部件进行分类处理^[20],通过减少专门开发设计的零部件数量,增加产品中的标准件、通用件及变型件比例,去除使用频率较少的零部件,以简化产品族数据库,降低名称分析的工作难度。

零部件ABC分析分为零部件分类与数据库简化两个步骤。首先,工程师根据产品族中的零部件使用频次进行分类处理,频次极低的零部件将剔除出数据库,出现频次最高的C类零部件划分为标准件与通用件。然后,按零部件照是否可通过变型设计得到B类零件,其余与订单直接相关的零部件分为A类,A类零部件由企业根据实际需要专门设计与生产,这类零件的重用几率小、成本高。研究表明,大批量定制生产模式下C类零部件占比约50%,B类零部件占比40%,剩余大概10%为A类零件^[21]。为了简化产品族数据库,将产品族数据归类后分析A类零部件的事物特性,并与B类零部件事物特性表进行比较,若事物特性表可匹配,则将对应的A类零部件归为B类零部件;然后对B类零部件进行分析,若可与C类零部件中的通用件及标准件等效替代,则将对应的B类零部件归为C类;最后,剔除C类零部件中使用频率较少的通用件与标准件。

3.2 名称分析

名称分析包括前期形成零部件名称字典库与中期完善名称字典两个阶段。如图4中第一阶段所示,名称分析首先需要将产品或产品族中的零部件,按名称或含义分类汇总在一起;然后根据国家与行业标准对零部件模块的名称、功能等特质进行专门的规范化分析;最后将完成分析的零部件模块名称汇总形成企业独特的、无重复的名称字典。

根据现有产品族中零部件数据形成初期的名称字典库后,开始名称分析第二阶段,即设计名称字典的完善流程:当新产品需要增加新的部件模块时,工程师先在名称字典中进行搜索,若有匹配的名称可直接沿用;否则需要发起名称规范化分析流程,交由数据管理等部进行审批,审批通过后新的部件模块名称将会纳入部件模块名称字典,此时部件模块便可使用新的名称。

名称分析包括统一产品族中相同部件的名称及规范具有相同事物特性的部件名称。对于产品族中名称不同的部件,需要判断是否为工程师手工输入错误,并通过图样判断是否为同一部件以规范化名称。若事物特性相同,但尺寸不同的部件名称不同,可能是工程师根据不同命名规则对部件进行命名,因此需要数据管理部门判断图样,进行名称规范化分析。

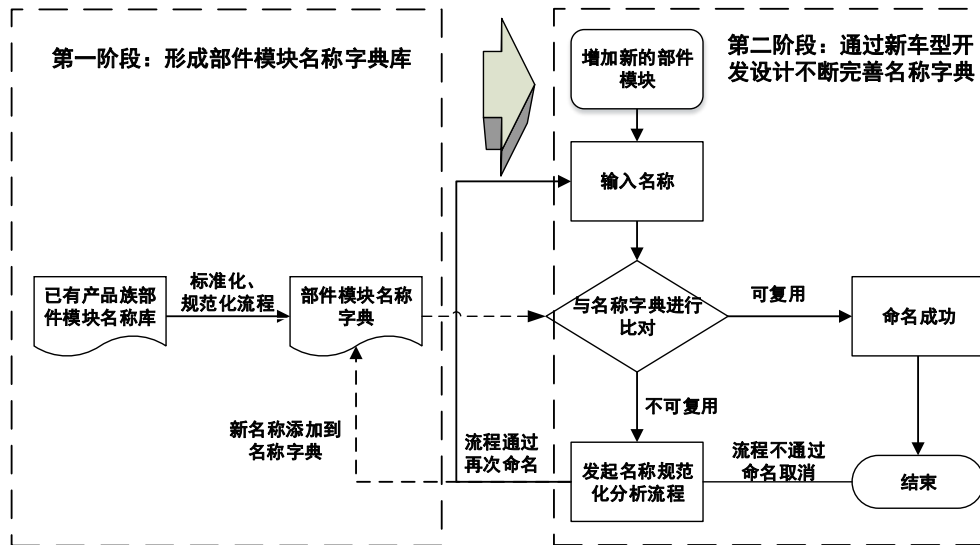


Fig. 4 Two stages of component module name analysis

图4 零部件模块名称分析的两个阶段

3.3 零部件层次结构划分

“类”是具有相同或相似特性的一组对象的集合。合理划分零部件模块可便于设计人员进行检索,若想形成完整的分类结构需要定义零部件的类。通常,定义的零部件的类可在多种“类”下储存相应类的实例对象,类存储实例对象的共同属性,一个组可分为多个类,一个类下可存储多个实例,通过属性就可建立零部件之间的关联关系。如图5所示,实现面向部件模块的层次结构分类,首先要分析产品族的部件模块,通过功能或几何语义划分模块化

类,以形成面向模块化层次结构的第二层;随后将产品族中的模块实例与模块类进行关联,形成第三层结构;最后,根据装配关系将部件实例所属零部件与模块实例进行关联,形成层次结构第四层。

3.4 元数据管理

元数据是PDM中用来管理数据的数据,例如描述图纸特性的图号、图名、比例、图纸存放路径等。主记录是描述对象的属性,例如文档主记录、图纸主记录、模型主记录和零部件主记录。如图6所示,主记录与产品信息文档之间

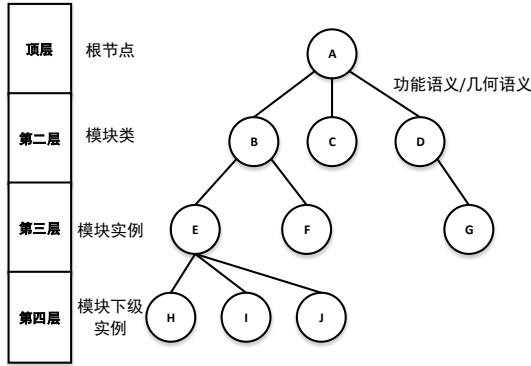


Fig. 5 Modular oriented hierarchical structure partitioning

图5 面向模块化的层次结构划分

的联系通过元数据进行关联。元数据与主记录存在必要的冗余,元数据位置地址存放指向物理数据的引用指针,主记录与元数据通过零件号这个唯一识别码建立联系。元数据管理可为企业产品族中各个模块分类、编码、查询提供途径,当新能源汽车装配产线中需要某零件及其相关信息时,系统可根据对应的属性信息搜索对应的零部件、模块或文档数据。

根据基础零部件通用元数据国标 GB/T 40016-2021,零部件生命周期(采购、设计、制造、供货等)活动规范零部件通用元数据。基础零部件通用元数据包包括基本信息、采购信息、制造信息。其中,采购信息又包括供应商信息和采购价格;制造信息包括制造商信息等。每一项元数据对应 PDM 中的一个属性项,元数据(属性项)的集合就构成了属性集。同时,采用统一建模语言(UML)描述元数据子

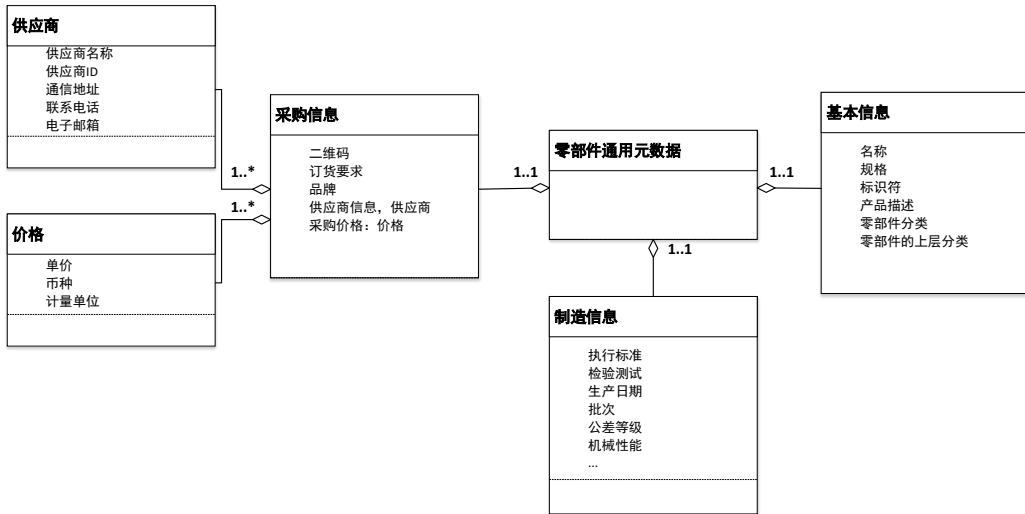


Fig. 7 UML diagram of general meta-packet of basic components

图7 基础零部件通用元数据包 UML 图

4 新能源汽车行业应用

Teamcenter 软件是一种现代化的、适应性强的 PDM 系统,它通过数字线程将人员和流程跨职能孤岛连接,是一种帮助工程师和其它人员管理产品数据和产品研发过程

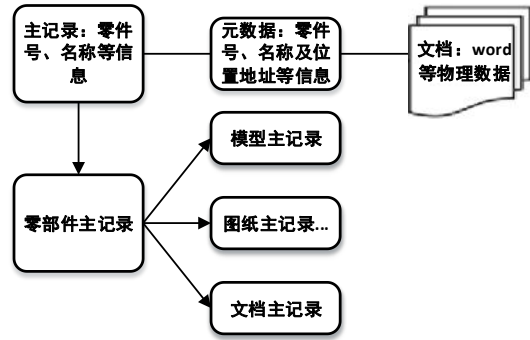


Fig. 6 Relationship between metadata and document, master record

图6 元数据与文档、主记录的关系

集、元数据实体和元数据元素之间的关系,以表达零部件的元数据模型。

图7为基础零部件通用元数据包,方框表示元数据实体,方头箭头指向被包含对象,图中基本信息、制造信息及采购信息均在零部件通用元数据包中。每个箭头都具有特殊符号,分为“数字”“..”“数字”。其中,“..”无实际含义,“..”左边的数字若为1表示该元数据实体必选,若为0表示该元数据实体可选;“..”右侧的数字若为1表示元数据实体只可出现一次,若为*表示元数据实体至少出现一次。例如,图7中一个零部件只能填写一份基本信息,但可拥有多家供应商的名称、ID 等信息。此外,通用元数据可根据国标 GB/T 40016-2021 进行扩展,通过增加零部件的元数据元素、实体及子集来提升企业对零部件的管理能力。

的工具。本文以某新能源汽车整车厂使用的 Teamcenter 系统为例,阐述整个面向新能源汽车装配产线的模块化实施过程。零部件模块化主要需求包括零部件个性化和多样化、部件可重构、降低部件制造成本、支持开展模块化供货,以实现精益生产及支持零部件的快速拆卸回收^[22]。

目前,该企业零部件模块化管理存在以下问题:PDM

系统中未能良好的分类零部件模块,不利于设计及部件级重用;下游新能源汽车装配产线面临个别零件库存不足的问题,需要替换时无法直接从线上获得与之配套的部件信息,无法自动生成准确的生产计划表,并实现线上化的部件替换。

4.1 精简产品数据库

为了精简数据库,需要对零部件进行ABC分析,以提升数据库重用质量及设计效率。首先,安排资深技术人员分析产品族中零部件并进行频谱分析;然后,淘汰使用频率较低的零部件,对使用频率较高的零部件进行标准化,尽可能精简数据库中零部件数量与种类;接下来,数据管理部门及相关部门人员将产品族中零部件按名称和语义进行归类,并将其保存到整理表中。具体为,将标准件与通用件归类为C类零部件;将可通过变型设计/配置设计得到的零部件归类为B类零部件,通过深入分析与客户需求相关的零部件,对可分解为B类件的零部件进行零部件规范化后归入B类件;对于无法由B、C类经过组合或变型得到的、与客户需求相关的零部件归类为A类零件。

表1为零部件分类与数据库简化实例。首先将产品族零件按使用频次分为A、B、C类;然后分析A、B类零部件,并剔除频次极少的前盖外板、前盖内板等A类零部件;最后分析零部件特性表,对A、B类零部件进行再分类,例如A类零部件中后螺旋弹簧,通过事物特性表进行变型后可满足其他车型产品的零部件需要,故将其归为B类零部件。

Table 1 Component classification and database simplification

表1 零部件分类与数据库简化

零部件名称	自制或外购	是否为标准件	使用频次/次	初始车型	初步分类状态	数据库简化后状态
锁销	外购	是	56	**01	C	C
销轴	外购	是	56	**01	C	C
后减震器上部套管	外购	否	10	**02	B	B
后减震器安装压板	外购	否	10	**02	B	B
后螺旋弹簧	外购	否	6	**03	A	B
后制动盘	外购	否	2	**03	A	A
前盖外板	自制	否	1	**01	A	废弃
前盖内板	自制	否	1	**01	A	废弃

4.2 生成部件模块名称字典库

零部件经过A、B、C分析后的数据名称需要进行名称分析,与相关国家标准和行业标准进行综合比较,以建立无冗余的名称字典。为此,面向新能源汽车装配产线的零部件名称分析的3种情况及处理方式如下:

(1)零件部分。需要收集名称相似的零部件,检查其图样或事物特征表是否一致,若一致则需统一名称。

(2)对于线上未组成模块的零部件。首先收集线下装配产线模块替换数据,将可互相替换的模块组织起来,统一到对应的部件模块中。

(3)分析产品族中组合后完成一定功能的部件。首先将功能相同的部件进行组合,观察其外部接口是否一致,若一致即组成模块;然后通过名称分析得到模块名称后收纳到名称字典中,并将对应模块加入部件模块资源库。

在Teamcenter中,名称字典完成后可利用系统分类模块进行管理,也可单独开发表单与前端界面,以此完成名称字典的显示与维护。当赋予新建零部件名称时,系统将自动弹出名称字典,供工程师选择。零部件名称字典生成的具体实例如图8所示。

4.3 构建部件模块族

首先定义部件类,根据部件级名称字典进行第二层部件分类,例如密封系统、车身稳定系统;模块下存放密封系统下包括密封系统-1、密封系统-2等多个部件实例,不同模块下的部件实例形成第三层;部件实例下存放所有该部件的零件及分部件形成第四层结构。

图9为面向新能源汽车装配产线的部件模块族层次结构,图中部件实例后用尾缀标识区分优先级,-1为新能源汽车装配产线优先使用的部件,数字越大优先级越低。通过构建面向产品的部件模块族层次结构,便于查询、检索、替换及重用面向新能源汽车装配产线的部件模块。

4.4 实现部件级模块替换

通过基础元数据包扩展主要件、模块号及配套号信息,增加零部件面向产线的部件模块化信息。其中,主要件表示对应模块中较为核心的零件,例如车身稳定系统的ESC控制模块;模块号对不同模块进行分类,不同模块具有不同的模块号,例如车身稳定系统及其零部件都拥有同一模块号标识“0102”;配套号标记模块的部件实例及对应的子件,配套号通过字母“A、B…”+模块号构成,A表示优先级最高的部件实例,如图10中序号<1>零部件配套号为A0102,表示该零部件组成的部件实例在0102模块中使用的优先级最高。

通过元数据扩展结合PDM技术,可实现新能源汽车装配产线的线上部件级替换。图10展示了生产技术人员在系统中使用的部件级替换检索功能。首先根据实际情况检索库存不足的零部件,然后系统根据产品族中的部件模块化信息检索到对应模块下的可替换部件,并查询对应部件下各个子件的库存信息,工程师根据对应的线上化信息进行部件级替换,然后生成准确的生产计划表。

4.5 模块化资源库

图11描述了某新能源车企基于Teamcenter分类模块建立的部件模块知识库,运用面向对象类的方法划分部件模块资源库层次结构。通过建立部件模块化资源库可储存产品族中的部件模块资源,设计工程师设计新产品可通过部件模块化资源库检索可用的部件模块。其中,部件模块化属性包括主要件、模块号及配套号,可通过Teamcenter的搜索功能搜索模块号,查询其对应模块或通过资源库的层次结构进行快速定位。

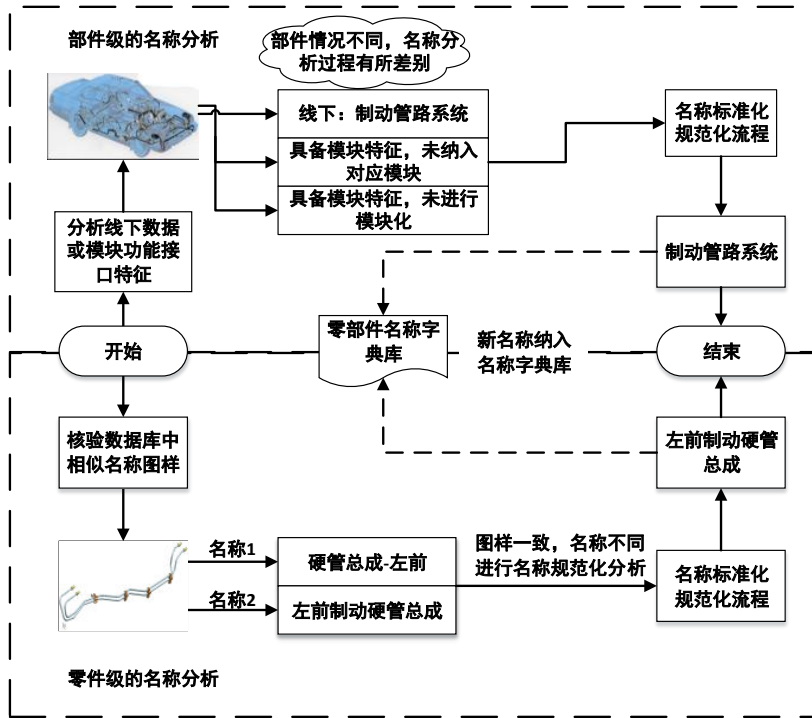


Fig. 8 Generate a component name dictionary library

图 8 生成零部件名称字典库

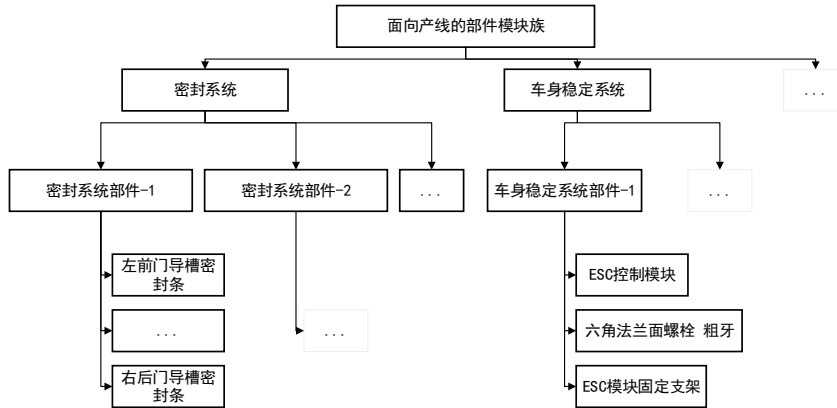


Fig. 9 Component module family for new energy vehicle assembly lines

图 9 面向新能源汽车装配产线的部件模块族

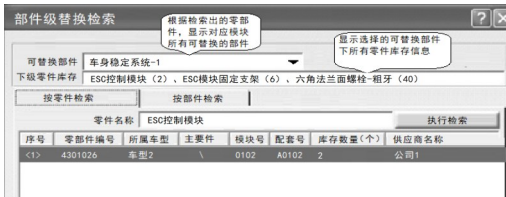


Fig. 10 Component level replacement retrieval

图 10 部件级替换检索

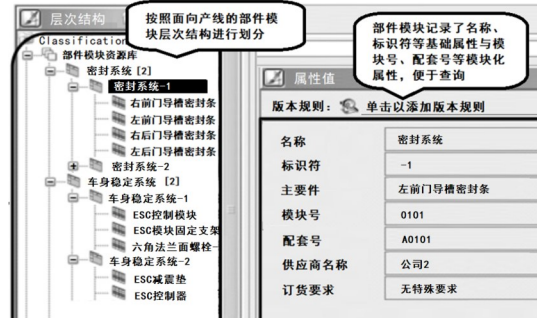


Fig. 11 Modular resource library

图 11 模块化资源库

5 结语

针对目前新能源汽车装配产线模块化存在的问题,本文提出一种面向新能源汽车装配产线的部件模块化方法,即以 PDM 系统存储的产品族的 EBOM 为基础,对产品族中的部件模块进行分类与标记,使 PDM 储存的部件

模块信息通过 EBOM 传输到 ERP 系统,下游新能源汽车装配产线根据部件模块化信息生成含有准确部件替换信息的生产计划表。同时,通过 PDM 系统构建部件模块资源库,便于后续车型设计、重用原有部件模块。

本文所提方法不仅适用于PDM系统,若未来普及BOM管理系统,仍然可利用元数据指针方式将面向产线的部件模块资源库信息存储到BOM结构树上,且不影响其原有BOM数据结构。

然而,本文研究的部件模块化管理方法在实施过程中,需要工程师消耗大量的时间进行梳理。为了进一步提升工作效率,未来将研究零部件基于事物特性表的自动分类及名称库的自动筛选更新方法。

参考文献:

- [1] LU Y J, DENG X W, WANG C Q. Research on methods of knowledge management for mass customization [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(13): 1561-1566.
鲁玉军, 邓心伟, 王春青. 支持大批量定制的知识管理方法研究[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(13): 1561-1566.
- [2] SALVADOR F, FORZA C. Configuring products to address the customization-responsiveness squeeze: a survey of management issues and opportunities [J]. *International Journal of Production Economics*, 2004, 91(3): 273-291.
- [3] QI G N, GU X J, HAN Y S. Graphical product data management [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
祁国宁, 顾新建, 韩永生. 图解产品数据管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] GU X J, YANG Q H. Modular design methods and examples of electromechanical products [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
顾新建, 杨青海. 机电产品模块化设计方法和案例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [5] WANG S, LI J, SONG J, et al. Institutional pressures and product modularity: do supply chain coordination and functional coordination matter? [J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(6): 1-14.
- [6] REN Y T. Research on modular cooperative mechanism and realization conditions of new energy vehicle manufacturing [D]. Xi'an: XiDian University, 2020.
任亚婷. 新能源汽车制造模块化协同机制及实现条件研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [7] QIAN K Z, GU F, GU X J. Modularization design of electric vehicle battery thermal management integration components [J]. *Group Technology & Production Modernization*, 2021, 38(1): 18-27.
钱柯浙, 顾复, 顾新建. 电动汽车电池热管理集成产品的模块化设计[J]. *成组技术与生产现代化*, 2021, 38(1): 18-27.
- [8] GU X J, MA B Q, GU F, et al. Some intelligent methods in product modularization [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(17): 1-9.
顾新建, 马步青, 顾复, 等. 产品模块化中的若干智能方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(17): 1-9.
- [9] ZHANG X R, XIAO B Y. Modular design and application of underframe assembly tooling [J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(9): 91-95.
张孝然, 肖博玉. 底架组装机装模块化设计与应用[J]. *制造业自动化*, 2022, 44(9): 91-95.
- [10] BHOSEKAR A, IERAPETRITOU M. Modular design optimization using machine learning-based flexibility analysis [J]. *Journal of Process Control*, 2020, 90: 18-34.
- [11] CHENG X F, ZHOU J, XIAO R B, et al. Review of product modular design from perspective of green manufacturing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(21): 2612-2625.
程贤福, 周健, 肖人彬, 等. 面向绿色制造的产品模块化设计研究综述[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(21): 2612-2625.
- [12] MENG L G, YU H L, MENG Q L, et al. Research on control system of intelligent multi-gesture lower limb rehabilitation training equipment [J]. *Software Guide*, 2021, 20(1): 142-147.
孟利国, 喻洪流, 孟巧玲, 等. 智能多姿态下肢康复训练设备控制系统研究[J]. *软件导刊*, 2021, 20(1): 142-147.
- [13] KONG L, WANG L M, LYU X T, et al. Decision-making for product life cycle design solution based on multi-layer constraints satisfaction problem [J/OL]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023-02-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.th.20230223.1126.050.html>.
孔琳, 王黎明, 吕晓腾, 等. 基于多层级约束满足问题的产品全生命周期设计方案决策研究[J/OL]. *机械工程学报*, 2023-02-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.th.20230223.1126.050.html>.
- [14] KONG L, WANG L, LI F, et al. A life-cycle integrated model for product eco-design in the conceptual design phase [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132516.
- [15] WANG G, LI F Y, WANG L M, et al. Product low-carbon design method based on design features [J/OL]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023-01-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230223.0702.030.html>.
王耿, 李方义, 王黎明, 等. 基于设计特征的机电产品低碳设计方法[J/OL]. *机械工程学报*, 2023-01-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230223.0702.030.html>.
- [16] YU L H, YUAN L L, CHEN M, et al. Research on BOM management method based on new energy vehicle [J]. *Auto Manufacturing Engineer*, 2022(5): 10-13.
余利华, 袁雷雷, 陈敏, 等. 基于新能源汽车BOM管理方法的研究[J]. *汽车工艺师*, 2022(5): 10-13.
- [17] LI G Y. The relationship between automobile manufacturers and parts enterprises in the information age [J]. *Heavy Truck*, 2006(2): 38-39.
李光耀. 信息时代汽车整车厂家与零部件企业间的关系[J]. *重型汽车*, 2006(2): 38-39.
- [18] WANG H J, ZHENG S, CHEN J. The evolution path and empirical review of the modularization theory in management studies [J]. *Science of Science and Management of S. & T*, 2020, 41(6): 16-35.
王海军, 郑邦, 陈劲. 管理领域的模块化理论演进与实证研究综述[J]. *科学与科学技术管理*, 2020, 41(6): 16-35.
- [19] HUANG L M, YU J H, YANG J J, et al. Generality evaluation and analysis of product platform module [J]. *Machinery*, 2009, 47(12): 1-4.
黄利民, 余军合, 杨剑军, 等. 产品平台模块通用性评价与分析[J]. *机械制造*, 2009, 47(12): 1-4.
- [20] SHI H, GU F, GU X J. Modular design method & its application in household soybean milk machine [J]. *Group Technology & Production Modernization*, 2019, 36(1): 1-8.
石浩, 顾复, 顾新建. 模块化设计方法及其在家用豆浆机中的应用[J]. *成组技术与生产现代化*, 2019, 36(1): 1-8.
- [21] XU J, JI Y J, QI G N, et al. Classification and coding method of mechanical parts for the design process of mass customization [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010(11): 149-155.
许静, 纪杨建, 祁国宁, 等. 支持大批量定制设计的机械零件分类编码方法[J]. *机械工程学报*, 2010(11): 149-155.
- [22] GU X J, YANG Q H. Product modularization is the only way for China to become a manufacturing power —— an interpretation of "modular design methods and cases of mechanical and electrical products" [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(9): 1127-1133.
顾新建, 杨青海. 产品模块化是中国成为制造强国的必由之路——解读《机电产品模块化设计方法和案例》[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(9): 1127-1133.