轨道交通车辆转向架模块化配置设计方法

王艳秋[1]　郑宇飞[2]　王　雷[1]　文永亮[1]

（1. 中车长春轨道客车股份有限公司总体研发部，130062，长春；
2. 西南交通大学机械工程学院，610031，成都//第一作者，高级工程师）

摘　要　转向架如何实现多样化和个性化需求下的快速定制设计是轨道车辆研发过程中的难点。针对目前转向架快速定制设计尚缺乏系统化的方法和工具问题，提出了一套基于模块化配置的转向架快速定制设计方法，并开发了对应的设计原型系统。在基于通用物料清单（GBOM）的转向架产品族信息模型的基础上，结合多层级三维骨架模型和模块配置设计过程模型，构建了扩展的转向架配置模型。以扩展的配置模型为基础，基于实例推理技术与参数化设计技术，提出了一套系统化的转向架配置设计流程，实现了个性化需求驱动下转向架的快速定制设计。此外，开发了轨道车辆转向架模块化配置设计的原型系统，并进行了企业试用，试用结果验证了所提方法的可行性与有效性。

关键词　轨道交通车辆；转向架；模块化配置设计；多层级骨架模型；设计过程模型

中图分类号　U270.2

DOI：10.16037/j.1007-869x.2020.04.003

Modular Configuration Design for Rail Transit Vehicle Bogie

WANG Yanqiu，ZHENG Yufei，WANG Lei，WEN Yongliang

Abstract　Rail vehicle bogie is a thorny problem to achieve rapid custom design of the bogie driven by diverse and individualized demands in the development process of rail vehicle. Aiming at the lack of systematic methods and tools in rapid custom design of bogies, a set of design methods for vehicle bogie based on modular configuration is presented and the corresponding design prototype system is developed. Based on the product family information model of bogie on the basis of GBOM (Generic BOM), the extended bogie configuration model is constructed by combining the multi-level 3D skeleton model and the module configuration design process model. Based on the extended configuration model, a systematic bogie modular configuration design process that adopts case-based reasoning technology and parametric design technology is proposed to realize the rapid custom design of bogie driven by individualized demands. In addition, a prototype system for the modular configuration design of rail vehicle bogie has been developed and tested by the application in enterprises, which verified the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words　rail transit vehicle; bogie; modular configuration design; multi-level skeleton model; design process model

First-author's address　CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

轨道车辆转向架是保证动车组运行能力的关键部件，转向架设计方案的合理性直接影响动车组的性能、可靠性等质量特性。实际设计时，设计人员多依赖于个人经验完成，缺乏系统化的方法以及对以往设计知识的利用，因此，往往导致设计效率低，设计成本高，且难以满足多样化和个性化的客户需求。因此，有必要研究一套系统化的快速定制设计方法，并开发对应的设计工具。

模块化配置设计是实现大规模定制设计的关键支撑技术之一[1]，该方法可在个性化需求的驱动下，通过选择与组合预定义模块来构成定制化的产品，是一种可实现“高效率、低成本”定制设计的方法。目前，已有许多学者对配置设计方法进行了研究，提出了基于实例[2]、基于约束[3]、基于规则[4]、基于结构[5]和基于本体[6]等多种配置设计方法。文献[2]通过基于加权欧氏距离的聚类算法计算历史实例和目标产品间的相似度，实现了基于相似实例的板构件产品配置方法。文献[3]将约束满足问题（constraint satisfaction problems，CSP）与绿色产品配置设计结合，提出了一种基于约束满足问题的绿色产品配置算法。

现有关于动车组转向架定制设计的研究并不多。文献[7]提出了基于多层次实例推理、决策表及映射规则的配置设计方法，并开发了动车组转向架快速配置设计系统，但并未建立产品骨架模型，导致变型设计中需要对受变型影响的模块及参数

进行反复修改，由此增加了设计流程的复杂度。文献[8]将GBOM（通用物料清单）结构、多层级骨架模型、三维模型等相结合构建了转向架主模型，研究了基于实例和规则推理的转向架配置设计技术和基于关联设计的转向架变型设计技术，但未分析转向架的模块配置设计流程，故其模块配置设计缺乏有效的过程指导。文献[9]建立了转向架参数网络和层次配置模型，利用参数网络指导转向架的配置及变型设计过程，但也未针对高速列车转向架分析其配置设计流程。

综上所述，目前转向架的定制设计方法与实际使用需求尚有差距。本文提出了一套基于模块化配置的转向架快速定制设计方法，将基于GBOM的转向架产品族信息模型与多层级三维骨架模型、模块配置设计过程模型进行集成并建立扩展的转向架配置模型。以该配置模型为基础，采用基于实例推理（case-based reasoning，CBR）技术与参数化设计技术提出了一套系统化的转向架配置设计流程，实现了个性化需求驱动下的转向架快速定制设计。同时，开发了轨道车辆转向架模块化配置设计原型系统，对所提方法的可行性与有效性进行了验证。

1 转向架配置模型

现有产品配置模型多基于GBOM建立，该类模型可描述产品的功能与结构组成，但不能描述产品的几何信息和设计过程。对转向架这种复杂的机电产品，在缺少几何信息描述的情况下，很难直观地展现某一模块变动对产品整体的影响，故难以及时地对设计方案进行修改。本文提出将基于GBOM的转向架产品族信息模型与多层级三维骨架模型、模块配置设计过程模型进行集成，构建扩展的转向架配置模型，如图1所示。

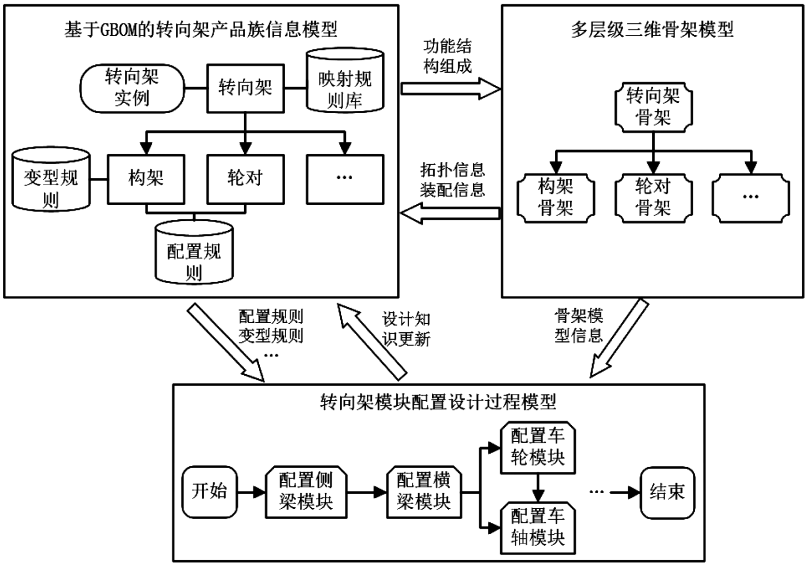


图1 扩展的转向架配置模型

1.1 基于GBOM的转向架产品族信息模型

基于GBOM的转向架产品族信息模型描述了转向架产品族的功能模块组成及配置设计知识（如图2所示），可表示为BM={G，MI，DK}，其中G为转向架GBOM，MI为转向架模块实例知识，DK为转向架设计知识。

转向架GBOM以树形结构表示转向架产品族中的所有功能模块组成。功能模块是转向架GBOM的基本组成单元，可表示为FM={ID，Name，FA，P，C，Type，Pro}。其中：ID为功能模块的唯一标识号；Name为功能模块的名称；FA为功能模块的功能属性描述；$P=\{p_1,p_2,\cdots,p_m\}$（m为特征参数的数量，$m\geq0$）为功能模块的特征参数，主要包含关键性能参数与结构参数；$C=\{c_1(p_1,p_2,\cdots,p_m),c_2(p_1,p_2,\cdots,p_m),\cdots,c_n(p_1,p_2,\cdots,p_m)\}$（$n$为特征参数约束集的数量，$n\geq0$）为特征参数的约束集；Type为功能模块的类型，转向架产品族中包含通用模块、可配置模块及柔性模块等3种模块类型（通用模块与模块实例为一对一关系，在配置设计时可直接选择对应的模块实例；可配置模块与模块实例为一对多关系，在配置设计时需在这些模块实例中进行选择，该类模块一般是外购件，如轴箱轴承；柔性模块与

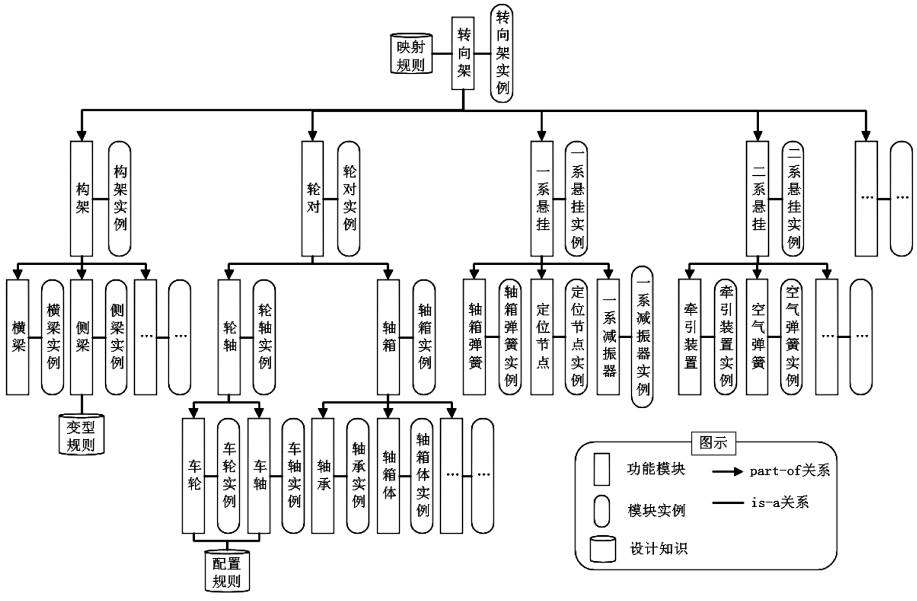


图2　基于GBOM的转向架产品族信息模型

模块实例也为一对多关系，但与可配置模块的不同之处在于，当现有模块实例不满足设计要求时，柔性模块可以进行变型设计以满足设计需求，该类模块一般是自制件，如侧梁）；Pro是柔性模块的参数化设计模板，是进行变型设计时的原型，对于通用模块和可配置模块，该项为空。

模块实例是功能模块的具体实例化对象。转向架模块实例模型可表示为MI={ID，SID，Name，Q，Model}。其中：ID为模块实例的唯一标识号；SID为该模块实例隶属的功能模块的ID；Name为模块实例的名称；$Q=\{q_1,q_2,\cdots,q_m\}$（m为特征参数的数量，$m\geqslant 0$）为模块实例的特征参数；Model为模块实例的三维模型。

设计知识是在转向架配置设计过程中所需知识的集合，包括映射规则、配置规则和变型规则。其中：映射规则表示需求与转向架模块特征参数间的映射关系，如轴重与侧梁断面尺寸之间的映射关系；配置规则用来描述不同功能模块间的关联关系，可以通过规则或约束方式进行表达，如车轴直径与车轮孔径的关系；变型规则用来描述柔性模块变型设计时，模块内部参数间的关联关系，如车轴颈中心距与轴颈中心线距轴肩距离的关系。设计知识可以表示为DK={ID，Name，I，O，Type，Text}。其中：ID为设计知识的唯一标识号；Name为设计知识的名称；I为设计知识的输入条件；O为设计知识的输出结果；Type为设计知识的类型，包括映射规则、配置规则和变型规则；Text为设计知识的内容，包括产生式规则、函数关系及图表等多种表示形式。

1.2　多层级三维骨架模型

多层级三维骨架模型是一个具有多级抽象层次的参数化设计模型，能够描述产品及模块的主要空间位置和几何形状，反映模块之间的拓扑关系和装配约束关系[10]。本文引入多层级三维骨架模型，用以描述转向架产品族内模块间的装配位置关系。由于该模型面向的是产品族，因此是一个可变的参数化模型。多层级三维骨架模型由对应于转向架功能模块的骨架模型组成，骨架模型可以表示为Skel={ID，Name，CID，FID，Model}。其中：ID为骨架模型的唯一标识号；Name为骨架模型的名称；CID为骨架模型关联的功能模块ID；FID为该骨架模型的上级骨架ID，若不存在则为空；Model为骨架模型的三维模型，由若干曲线、曲面和包络体等基准特征组成，可反映模块间的拓扑关系和装配关系。

与转向架GBOM的树形结构类似，转向架的多层级骨架模型也呈树形结构，几何信息沿该树形结构层层传递并逐层丰富。如图3所示，转向架骨架用来表征和控制转向架整体的空间布局和几何形状，并将相关信息传递给轮对骨架等下一级骨架。

1.3　模块配置设计过程模型

转向架中包含3类模块设计任务，即通用模块选择、可配置模块的配置、柔性模块的配置与变型设计。转向架的模块配置设计过程可以从任务层

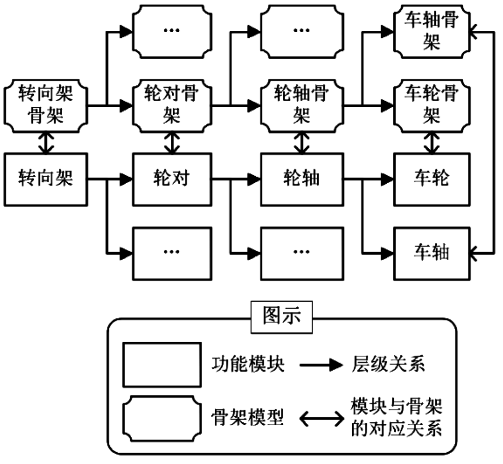


图3　转向架的多层级三维骨架模型

和活动层两个层面描述。

任务层将转向架每个模块对应的配置设计或变型设计作为一个设计任务，可以表示为 Task={ID，PID，D，PIC，Activity，I，O，RID}。其中：ID 为设计任务的唯一标识号；PID 为该任务的紧前任务的 ID；D 为任务描述；PIC 为任负责人代号；Activity 为完成任务所需要的一组活动集合；I 为任务的输入条件；O 为任务的输出条件；RID 为该任务涉及到的资源的 ID，如模块实例、设计知识。

活动层即对每一个设计任务进行分解细化描述，可表示为 Activity={ID，PID，D，PIC，I，O，RID}。其中：ID 为设计活动的唯一标识号；PID 为该活动的紧前活动的 ID；D 为活动描述；PIC 为活动的负责人；I 为活动的输入条件；O 为活动的输出条件；RID 为该活动涉及到的资源的 ID，如模块实例、设计知识。转向架的模块配置部分设计过程如图 4 所示。

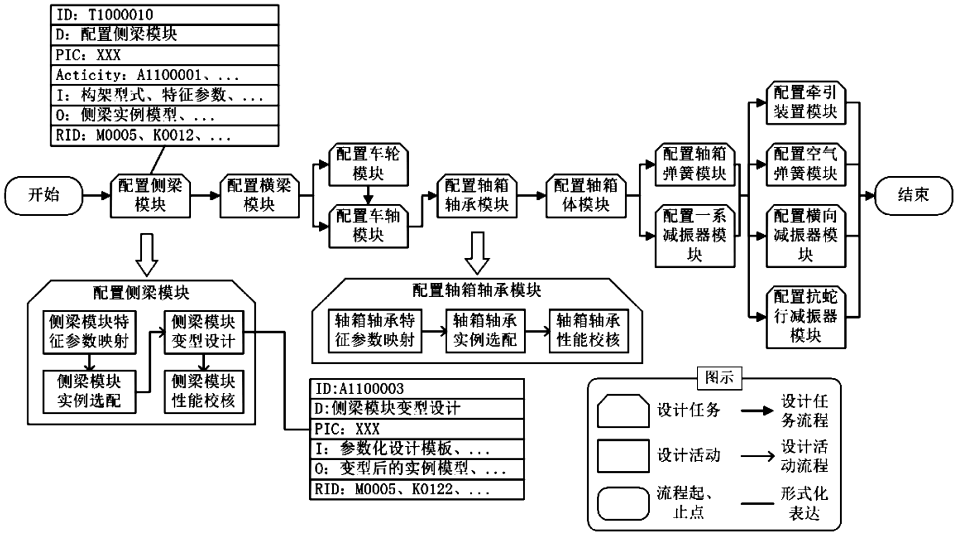


图4　转向架模块配置设计过程模型

2　转向架配置设计过程

基于转向架配置模型以及企业现有的转向架研发流程，构建转向架模块化配置设计的总体流程，如图 5 所示。

2.1　产品级配置

采用基于实例推理技术对转向架进行产品级配置。新的需求输入时，映射规则将需求转化为转向架的性能、结构等的特征参数集 $P=\{p_1, p_2, \cdots, p_m\}$。对转向架产品级实例库中的实例进行归一化处理，得到全部实例的特征参数集 $Q=\{Q_1, Q_2, \cdots, Q_m\}$，$Q_i=\{q_1, q_2, \cdots, q_m\}$ 为第 i 个实例的参数集。采用最近邻法计算 C_i 与 P 相似度，计算公式为：

$$\mathrm{NN}(P, C_i) = \frac{\sum_{j=1}^{m} w_j \times \mathrm{sim}(p_j, c_j)}{\sum_{j=1}^{m} w_j} \tag{1}$$

式中：

$\mathrm{NN}(P, C_i)$——目标特征参数与第 i 个实例模块特征参数之间的相似度值（取值范围为 0~1，数值越大表示二者越相似）；

w_j——第 j 个特征参数的权重；

$\mathrm{sim}(p_j, c_j)$——第 j 个特征参数相似度的计算函数。

在所有实例中选择相似度值最大的实例并根据预先设定的阈值判断该实例是否满足要求。若

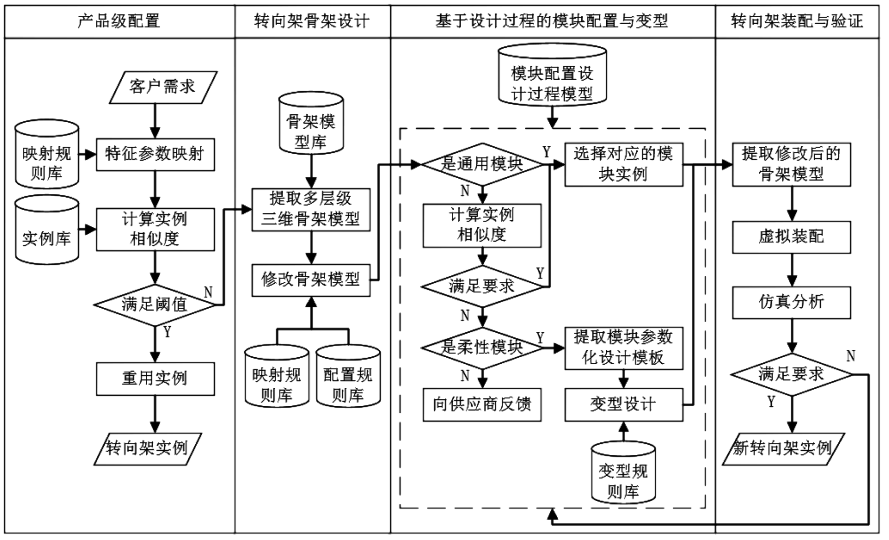


图5　转向架配置设计过程总流程图

相似度值大于等于阈值，则视为该实例满足设计要求，输出该实例作为本次设计的方案，记录并结束本次设计；若相似度值小于阈值，则视为该实例不满足设计要求，需要进行转向架的模块配置设计。

2.2　转向架骨架设计

提取转向架配置模型中定义的多层级三维骨架模型，根据2.1节得到的转向架特征参数对其进行调整，确定新的转向架布局方案，并确定关键的布局参数和结构参数。

2.3　基于设计过程的模块配置与变型

根据建立的模块配置设计过程模型，依次对转向架各模块进行配置设计。对于通用模块，直接选择其对应的模块实例；对可配置模块，基于实例推理技术检索其对应的一组模块实例，若存在满足要求的模块实例，则选择该实例，若现有实例均无法满足设计要求，则需向供应商请求供应新实例；对于柔性模块，同样采用基于实例推理技术对其进行配置设计，若配置结果无法满足要求，则利用该模块对应的参数化设计模板进行变型设计，直至满足设计要求。

2.4　转向架装配及配置方案验证

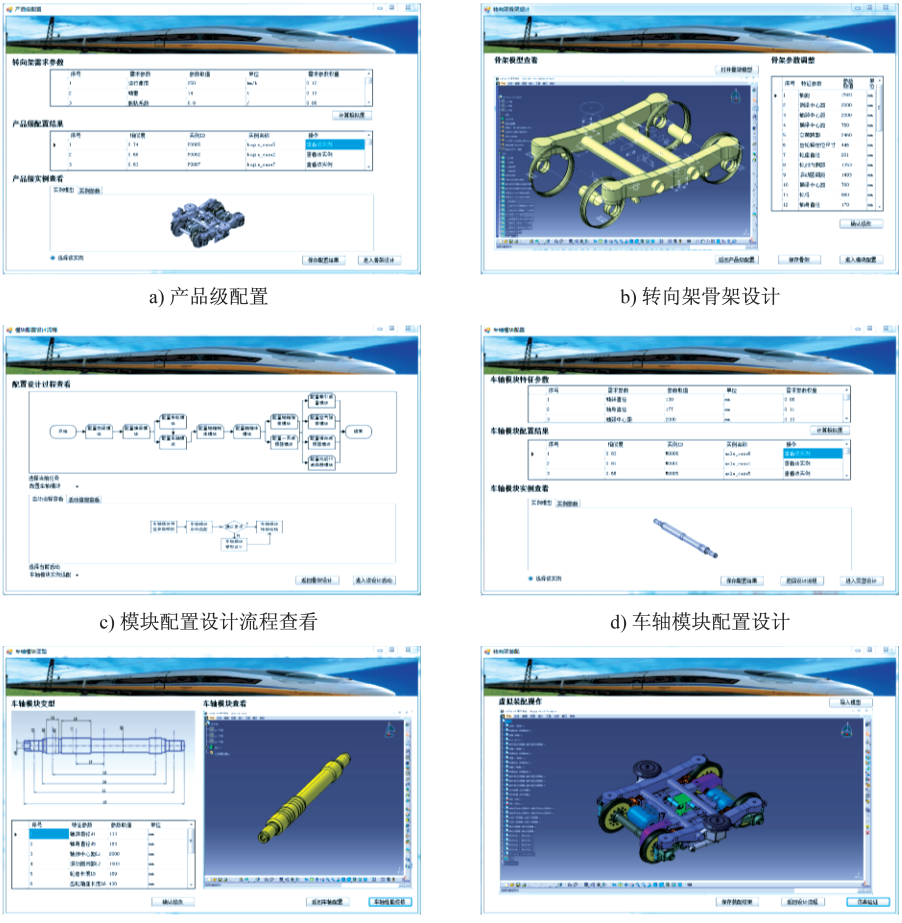
将所有模块实例的三维模型通过骨架模型进行虚拟装配，即完成一个模块的设计就将其装配到骨架模型中。装配过程中若出现装配位置错误或模块三维模型干涉，则需对骨架模型或模块的三维模型进行调整，以保证转向架装配模型的正确性。

为保证转向架设计方案的可靠性和安全性，还需要对转向架装配模型进行仿真验证，包括静强度分析、动强度分析及动力学分析等。验证不通过则返回2.3节重新设计，验证通过则输出设计方案。

3　系统验证

基于本文提出的模块化配置设计方法，采用C#、SQL Server并结合CATIA等软件开发了轨道车辆转向架模块化配置设计原型系统。系统主要包括配置模型管理、转向架配置设计等功能模块。配置模型管理模块主要管理转向架产品族信息模型、多层级三维骨架模型和模块配置设计过程模型；转向架配置设计模块根据预定义的设计步骤和模块配置设计过程模型中的设计流程，协助完成设计工作。系统的部分界面如图6所示。

由图6可看出：系统接收到运行速度、轴重、启动加速度等需求参数后，为需求赋权重，并由高到低显示实例库中现有转向架实例的相似度值，设计人员据此判断已有实例是否满足要求，若满足，则选择对应的实例并结束本次设计，若不满足，则进入骨架设计，如图6 a)所示；进入骨架设计阶段后，由设计人员对骨架模型的特征参数进行调整，如图6 b)所示；完成骨架设计后，设计人员首先需要查看模块配置设计流程，并选择当前的设计任务与活动，如图6 c)所示；然后以配置车轴模块为例，为其特征参数赋权重，系统自动计算出当前所有车轴模块实例的相似度值，并由设计人员判断是否存在满足相似度要求的实例，如图6 d)所示；若当前实例均不满足，因车轴模块属于柔性模块，则可调用其参数化设计模板并进行变型设计，如图6 e)所示；完成所有模块的设计后，由骨架设计人员进行虚拟



a) 产品级配置　　b) 转向架骨架设计

c) 模块配置设计流程查看　　d) 车轴模块配置设计

e) 车轴模块变型设计　　f) 转向架装配

图 6　轨道车辆转向架配置设计系统

装配，并对骨架模型中不合适的部分进行修改，如图 6 f)所示；最后，对转向架模型进行仿真验证，若满足要求则完成本次设计并将设计结果添加到实例库中，否则返回修改设计。

4　结语

本文提出了一套基于模块化配置的转向架快速定制设计方法并开发了对应的设计原型系统，将基于 GBOM 的转向架产品族信息模型、多层级三维骨架模型和模块配置设计过程模型进行集成，构建了扩展的转向架配置模型，并基于实例推理技术与参数化设计技术提出了一套系统化的转向架配置设计流程，实现了个性化需求驱动下转向架的快速定制设计。所开发的轨道车辆转向架模块化配置设计原型系统在某轨道车辆主机厂进行了试用，验证了本文所提方法的可行性与有效性。

参考文献

[1] 王建，黎荣，武浩远，等. 按单设计型复杂产品的配置设计技术研究综述[J/OL]. 计算机集成制造系统，[2019-03-06]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/11. 5946. TP. 20180817. 1027. 023. html.

[2] 肖刚，包志炎，高飞，等. 基于相似实例的板构件产品配置方法[J]. 计算机集成制造系统，2010，16(2)：233.

[3] 张雷，刘光复，胡迪，等. 基于约束满足问题的绿色产品配置设计[J]. 机械工程学报，2010，46(9)：117.

[4] 赵韩，刘生强. 基于多维关联规则驱动的新产品配置研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2016，39(12)：1585.

[5] 李妮娅，张健，刘大有. 基于广义产品结构的产品配置[J]. 计算机集成制造系统，2010，16(1)：17.

[6] 但斌，姚玲，经有国，等. 基于本体映射面向模糊客户需求的产品配置研究[J]. 计算机集成制造系统，2010，16(2)：225.

[7] 黎鑫. 动车组转向架快速配置设计系统研制[J]. 现代城市轨道交通，2017(9)：14.

[8] 李恒奎，曾庆臻，冯永华，等. 动车组转向架快速设计方法[J]. 机械设计与研究，2017，33(3)：165.

[9] 邱红铭. 高速列车转向架快速设计关键技术研究[D]. 成都：西南交通大学，2016.

[10] 张萌，李国喜，龚京忠，等. 基于三维模型的产品模块化配置方法[J]. 计算机集成制造系统，2012，18(11)：2370.

(收稿日期：2019-05-27)