

地铁车辆转向架柔性产品平台设计方法研究

任坤华¹ 韩鑫² 张海柱² 王晨曦² 郭恒²

(1. 中车工业研究院有限公司, 100067, 北京;

2. 西南交通大学机械工程学院先进设计与制造研究所, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 为有效解决地铁车辆转向架研发面临的需求适应性差、零部件重用率低等问题, 基于多属性决策、关联设计等技术, 提出一种地铁转向架柔性产品平台设计方法。该方法定义了地铁转向架柔性产品平台的内涵, 分析了基于多属性决策方法的通用模块构建方法, 以及基于关联设计技术的柔性模块构建方法。以 A 型地铁转向架产品为例, 验证了该方法的有效性、可行性与实用性。

关键词 地铁车辆; 转向架; 柔性产品平台; 设计方法

中图分类号 U260.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.033

Research on Design Methods of Metro Vehicle Bogie Flexible Product Platform

REN Kunhua, HAN Xin, ZHANG Haizhu, WANG Chenxi, GUO Heng

Abstract In order to effectively solve the poor adaptability of metro vehicle bogie development to the on-going requirements and the low reuse rate of parts, a design method of flexible product platform of metro bogie is proposed based on multi-attribute decision and association design technologies. Then, the connotation of flexible product platform of metro bogie is defined, the construction method of common modules based on multi-attribute decision, and the construction of flexible modules based on association design technology are analyzed. On this basis, taking type-A metro bogie products as the example, the effectiveness, feasibility and practicability of this method are verified.

Key words metro vehicle; bogie; flexible product platform; design method

First-author's address CRRC Academy Co., Ltd., 100067, Beijing, China

转向架是地铁车辆的核心部件, 直接影响到列车的牵引、制动、承载等性能。目前, 地铁转向架研发面临以下挑战: 其一是如何快速响应客户多样化、个性化的需求; 其二是如何提高零部件的重用

率。针对上述两个问题, 目前学界与业界普遍采用产品平台与产品族策略予以应对^[1]。产品平台是组成公共架构的子系统及其接口的集合, 在架构基础上可以源源不断地派生出功能相似、性能不同的产品集合, 即产品族^[2]。产品平台与产品族策略可以在不牺牲企业规模经济的情况下, 尽可能地满足客户多样化、个性化的需求, 从而使企业获取范围经济效益^[1]。国外的阿尔斯通公司、庞巴迪公司和西门子公司等知名企业, 经过多年来的发展和技术积累, 建立了内燃与电力机车产品平台^[3]。近年来, 中国中车股份有限公司的各大主机厂, 如中车青岛四方机车车辆股份有限公司、中车长春轨道客车股份有限公司、中车唐山机车车辆有限公司、中车南京浦镇车辆有限公司等都已开始关注轨道交通车辆产品平台的建设^[4]。

然而, 目前我国轨道交通车辆产品平台多采用稳健设计思想进行构建, 产品平台的组成元素主要是响应预定义需求的通用模块集合。此外, 产品平台的研究多集中于模块划分与平台元素识别^[5], 而针对平台模块如何设计的研究还较为匮乏。因此, 针对上述问题, 本文定义了地铁转向架柔性产品平台的内涵, 并且提出了一套地铁转向架通用模块与柔性模块的设计方法, 以提高企业响应多样性、个性化客户需求的能力。

1 地铁车辆转向架柔性产品平台定义

世界市场已从传统稳定型演变为动态多变型, 企业的研发模式也相应地从大批量生产方式转变为 MC(大规模定制)方式。“模块化”在 21 世纪初再次被提出并取得了较快的发展, 其特点是将复杂系统化整为零进行处理, 把高度困难的任务变得相对容易^[6]。为平衡产品多样性与成本之间的矛盾, 产品平台与产品族策略进一步被提出。该策略核心是构建产品主结构, 并基于主结构不断衍生新产

品。产品主结构由通用模块、定制模块,以及配置机制 3 部分组成^[7]。其中,通用模块旨在帮助企业实现规模经济效益,而定制模块旨在满足客户定制化的需求,帮助企业实现范围经济效益。定制模块虽满足了客户多样化的需求,但其定制成本往往较

高、定制时间较长。为此,第 3 类模块即柔性模块被提出,它旨在通过参数化变型设计以较低的投资成本达到定制模块的效果^[8]。

柔性产品平台由通用模块与柔性模块组成^[8]。地铁转向架柔性产品平台的内涵见表 1。

表 1 地铁车辆转向架柔性产品平台模块内涵		
Tab.1 Connotation of flexible product platform module for metro vehicle bogie		
类型	定义	示例
通用模块	被产品族中的所有产品采用,只有 1 个预定义的模块实例,其形状和特性在这些产品中完全相同,以响应客户的基本不变需求	侧梁梁体、垂向减振器、轴箱弹簧、转臂定位节点、空气弹簧等
柔性模块	被产品族中的所有产品采用,具有 1 个可适应性变型的参数化结构模型,通过参数化变型来满足客户的定制需求	车轮、车轴等

目前,学界已有大量关于产品平台元素识别的研究,包括定性识别与定量识别 2 个方面^[5]。定性识别是一种主观分析方法,主要基于启发式规则识别模块类型;定量识别是指将平台元素识别视为一个分类问题,模块被划分到的区域即为该区域所定义的模块类型。目前,产品平台元素识别的研究已经日趋成熟,但是平台元素设计的研究还较为匮乏。因此,本文主要针对已识别的通用模块与柔性模块,分析其模块实例或变型结构的设计方法。

2 基于多属性决策的通用模块设计

本文采用多属性决策方法从已有实例中确定通用模块实例。由于转向架由自制件与外购件组成,因此,其决策模型亦包括自制件与外购件两部分,如图 1 所示。

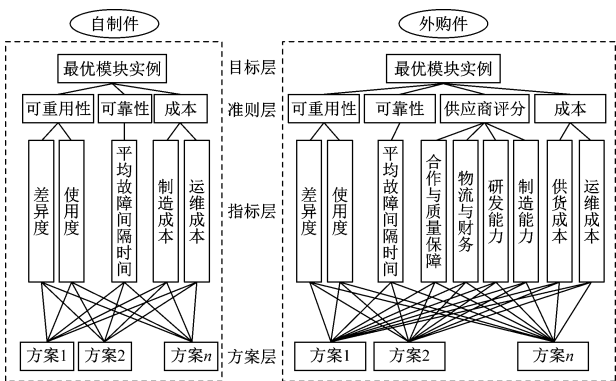


图 1 地铁转向架通用模块实例多属性决策模型

Fig.1 Multi-attribute decision-making model of general module for metro bogie

自制件与外购件决策模型的结构相同,属性值不同。模型分为 4 层^[9]:最高层是目标层,在已有

的多个模块实例中选择符合要求的最优模块实例;第 2 层是准则层,针对研究对象从可重用性、可靠性、供应商评分、成本等 4 方面对模块实例评估;第 3 层是指标层,对准则层进一步细化;最底层是方案层,即已有的多个模块实例。

多属性决策模型的构建及求解步骤如下:

1) 构建初始决策矩阵 Y 。基于 k 个方案与 i 个指标,构建 $k \times i$ 的初始化指标决策矩阵:

$$Y = \{y_{k,i}\} (1 \leq k \leq m, 1 \leq i \leq n) \quad (1)$$

式中:

- $y_{k,i}$ ——第 k 个方案关于第 i 个指标的属性值;
- m ——方案总数;
- n ——指标总数。

2) 构建规范化指标决策矩阵 Y_0 。采用文献 [10] 中的规范化方法对决策矩阵 Y 进行规范化处理,得到规范化的指标决策矩阵 Y_0 :

$$Y_0 = \{y_{k,i,0}\} (1 \leq k \leq m, 1 \leq i \leq n) \quad (2)$$

式中:

$y_{k,i,0}$ ——第 k 个方案关于第 i 个指标的规范化属性值。

3) 构建规范化准则决策矩阵 R_0 。对同一准则层及其下属指标层的指标,采用层次分析法^[10]确定指标层权重后,将指标层属性值加权平均得到的值作为准则层指标的属性值。显然,得到的准则层决策矩阵为规划化矩阵。

4) 采用 TOPSIS(理想解法)^[10]求解最优方案。在获得规范化准则决策矩阵后,采用 TOPSIS 求解上述 m 个决策方案的权重并对方案进行排序,从而得到最优方案。

通过以上步骤决策出通用模块实例后,需要进

一步进行计算校核、仿真、试验,以判断已有实例是否满足性能需求。若不满足,则需要重新设计 1 个模块实例并进行校核,直至满足需求。

3 基于关联设计的地铁车辆转向架柔性模块设计

地铁转向架柔性模块设计的关键是分析技术指标与模块设计参数之间的关系,构建支持参数化变型设计的 3D 结构模型。关联设计是实现变型设计的一种关键技术,该技术利用参数化设计原理建立零部件间的驱动关系,表现为零部件间几何元素的重用,并使用上游零部件设计信息对下游设计过程进行约束和控制^[11]。目前,大部分 CAD(计算机

辅助设计)软件都支持产品的关联设计。CATIA(交互式 CAD/CAE(计算机辅助工程)/CAM(计算机辅助制造)系统)软件通过发布、带链接粘贴等功能支持关联设计,并且这些功能可以有效梳理零部件之间的链接关系^[11]。本文以 CATIA 软件为平台,结合 CATIA 中 GSD(创成式外型设计)、KWE(知识工程)、ASD(装配体设计)和 PDG(零件体设计)4 个模块,采用关联设计技术构建柔性模块的变型结构模型,包括骨架模型与零件体三维模型。其中,骨架模型包括设计基准,设计参数,以及设计规则 3 类信息,零件三维模型除包含上述元素外,还有拉伸等实体特征。柔性模块的变型结构模型的构建流程及结果如图 2 所示,具体步骤如下:

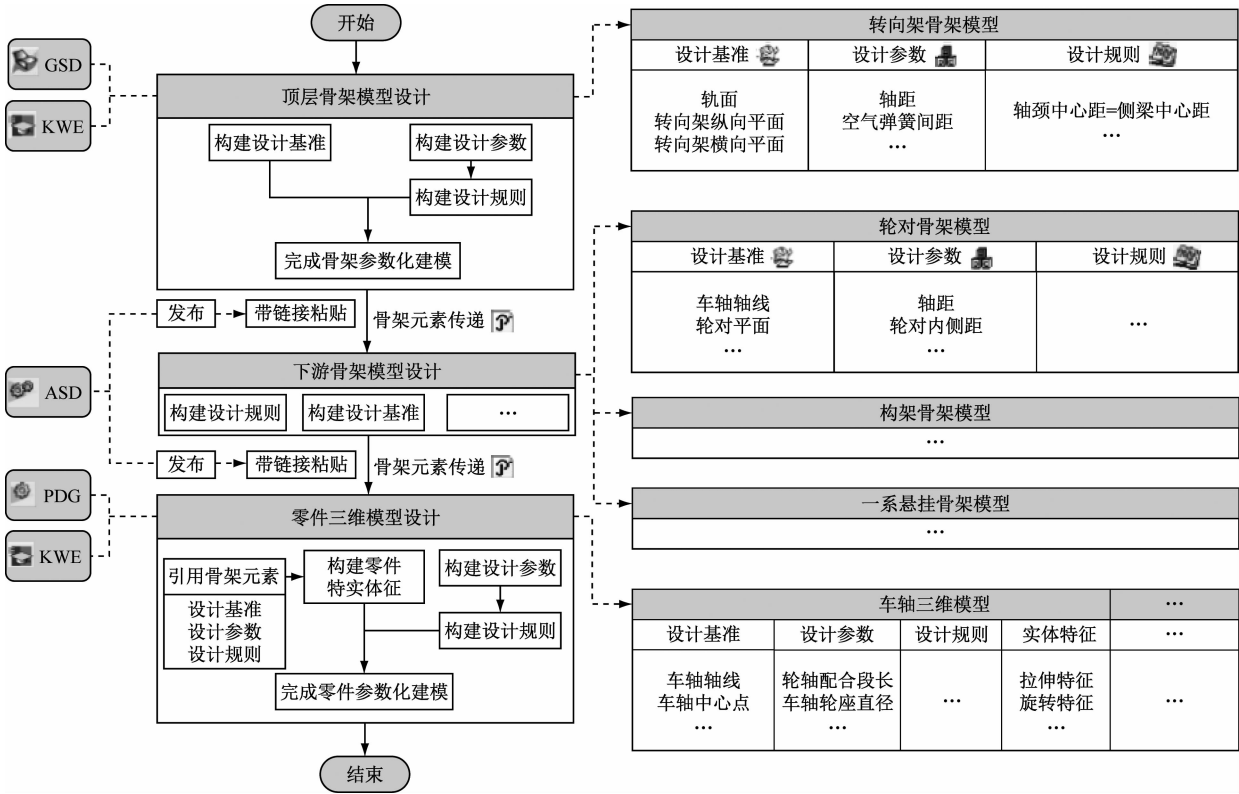


图 2 地铁车辆转向架柔性模块设计流程
Fig. 2 Design process of metro vehicle bogie flexible module

3.1 顶层骨架模型构建

- 1) 分析转向架的结构、接口等信息。在 GSD 模块中,新建转向架的设计基准,如轨面、转向架纵(横)向平面等。
- 2) 在 KWE 模块中,新建定位尺寸参数,如轴距、空气弹簧间距等。
- 3) 分析设计基准之间的关系,添加参数间的约

束关系。转向架骨架模型构建完成后,通过“发布”命令发布骨架元素。

3.2 下游骨架模型构建

下游骨架模型的构建方法与顶层骨架模型的构建方法类似。在 ASD 模块中,下游骨架模型需要基于顶层骨架模型构建,通过带链接粘贴的方式引用顶层骨架模型的元素,最后完成下游骨架的参数

化建模并发布骨架元素。

3.3 零件体三维模型构建

- 1) 在 PDG 模块中,引用上层骨架元素构建零件的三模实体模型;
- 2) 创建零件的设计参数或引用上层骨架的设计参数;
- 3) 添加参数间的约束关系,完成零件体的参数化建模。

采用关联设计技术构建的柔性模块将能有效支持转向架零部件的快速有序变型及装配。

4 实例分析

本文以 A 型地铁转向架为例,对提出的地铁转向架柔性产品平台设计方法进行验证,包括转向架通用模块与柔性模块的设计。

4.1 转向架通用模块设计

本文以侧梁梁体为例,阐述通用模块的设计过程及其方法。具体设计过程如下:

- 1) 整理某主机关于 A 型地铁已有侧梁梁体实例,分析每个模块实例的差异度、使用度、MTBF(平均无故障时间)、成本等信息,构建 3×5 的初始化决策矩阵。
- 2) 采用第 2 节所述方法形成归一化的准则决策矩阵,见表 2。
- 3) 采用 TOPSIS 方法得到各方案的相对贴近度: $\{C_1, C_2, C_3\} = \{0.746\ 5, 0.218\ 2, 0.2535\}$ 。

表 2 准则层多属性决策规范化矩阵

Tab.2 Criterion-level multi-attribute decision-making normalization matrix

实例	准则层各指标取值		
	可重用性	可靠性	成本
Sidebeam1-80	1.000 0	1.000 0	0.201 40
Sidebeam2-100	0.244 4	0.710 0	0.095 84
Sidebeam3-120	0.179 7	0.670 0	1.000 00

注:可重用性权重为 0.40;可靠性权重为 0.32;成本权重为 0.28。

由此可知,实例 Sidebeam1-80 的相对贴近度最大。在此基础上,进一步进行强度计算与仿真,以验证该实例是否满足 A 型地铁转向架平台所定义的性能需求。经校核,Sidebeam1-80 满足要求。因此,将 Sidebeam1-80 视为 A 型地铁转向架平台侧梁梁体的通用实例。在后续 A 型地铁转向架订单中,可以直接重用该实例以降低模块的研发成本。

4.2 转向架柔性模块设计

A 型地铁转向架平台的柔性模块包括车轮、车轴等。本文以车轴模块为例,阐述柔性模块的设计过程及方法:首先,构建转向架骨架模型;然后,引用转向架骨架模型信息构建轮对骨架模型;最后,基于轮对骨架模型,构建车轴三维模型。转向架柔性模块构建结果如图 3 所示。在后续 A 型地铁转向架订单中,可以直接重用该模型进行变型设计,从而提高模块的设计效率。

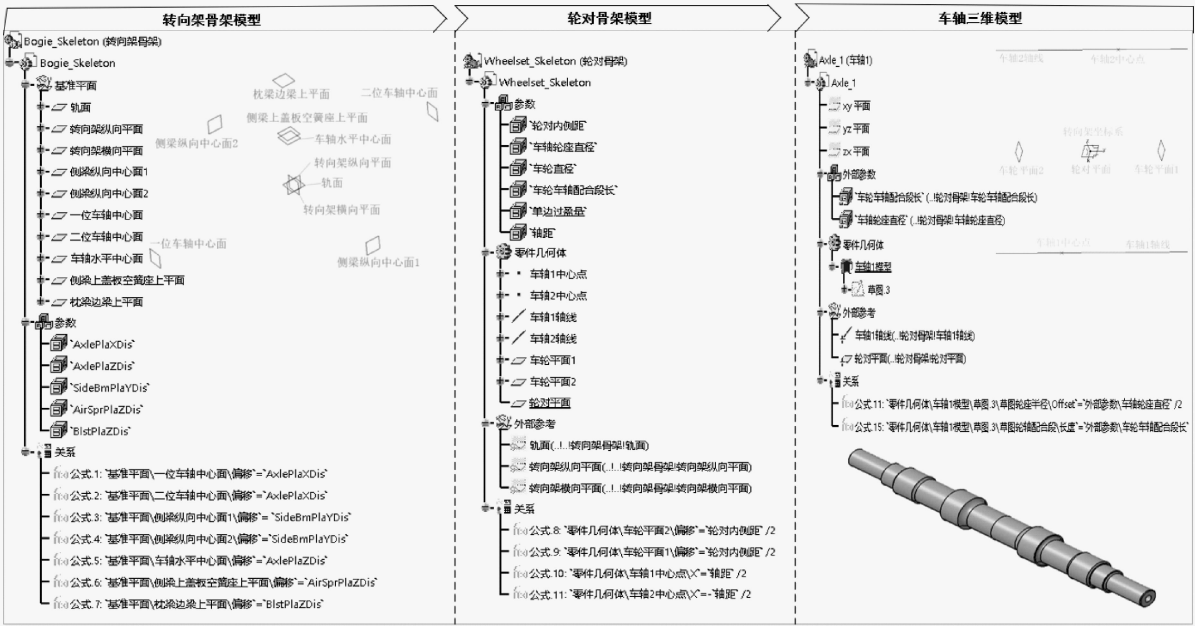


图 3 地铁车辆转向架柔性模块(车轴)构建结果

Fig.3 Construction result of metro vehicle bogie flexible module (axle)

5 结语

为了快速响应客户个性化的需求、提高零部件的重用率,本文定义了地铁车辆转向架柔性产品平台的内涵,提出一套地铁通用模块与柔性模块设计方法。前者所构建的通用模块实例可以提高模块的重用率,后者所构建的柔性模块模型可以提高模块的变型设计效率。以侧梁梁体和车轴为例,验证了所提方法的可行性与有效性。

参考文献

- [1] SIMPSON T W. Product platform design and customization: Status and promise[J]. Ai Edam, 2004, 18(1): 3.
- [2] MEYER M H, LEHNERD A P. The power of product platforms: building value and cost leadership [J]. Research Technology Management, 1997, 10020: 39.
- [3] 王元珠,韩才元. 国外机车车辆产品技术平台的发展[J]. 内燃机车, 2007(2): 1.
WANG Yuanzhu, HAN Caiyuan. The development of the technology platform of foreign locomotive and rolling stock products[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2007(2): 1.
- [4] 贺世忠,李涛,汪林峰,等. 新型高模块化 A 型地铁转向架设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019(3): 35.
HE Shizhong, LI Tao, WANG Linfeng, et al. Design of a new high-modularization bogie for A-type metro[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2019(3): 35.
- [5] 李易峰,韩鑫,黎荣,等. 复杂机电产品柔性模块识别方法研究[J]. 机械设计与制造, 2019(3): 178.
LI Yifeng, HAN Xin, LI Rong, et al. Research on flexible modules identification method for complex electromechanical products [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(3): 178.
- [6] 童时中. 模块化研究及实践的现状和发展[J]. 电子机械工程, 2011(2): 1.

TONG Shizhong. Current situation and progress of the study and practice of modularization [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011(2): 1.

- [7] DU X H, JIAO J X, TSENG M M. Architecture of product family: fundamentals and methodology [J]. Concurrent Engineering, 2001, 9(4): 309.
- [8] SUH E S, WECK O L, CHANG D. Flexible product platforms: framework and case study [J]. Research in Engineering Design, 2007, 18(2): 67.
- [9] 张孝远,周建中,曹广品,等. 基于模糊多属性决策的高混凝土坝浇筑方案优选 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011(4): 32.
ZHANG Xiaoyuan, ZHOU Jianzhong, CAO Guangjing, et al. Fuzzy multiple attribute decision making optimal selection for construction scheme of high concrete dam [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, (4): 32.
- [10] 崔宁博,张振平,楼豫红,等. 基于 TOPSIS 的区域农业节水发展水平综合评价模型 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016(5): 978.
CUI Ningbo, ZHANG Zhenping, LOU Yuhong, et al. Evaluation method of comprehensive agricultural water-saving development level based on TOPSIS in a regional area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016(5): 978.
- [11] 钟元木,黎伟洋,韩鑫. 地铁车辆车体快速设计方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2019(3): 101.
ZHONG Yuanmu, LI Weiyang, HAN Xin. Study on rapid design method of metro vehicle body [J]. Urban Mass Transit, 2019(3): 101.
- [12] 曹庆锋,常文军. 日本轨道交通发展历程及经验启示 [J]. 交通运输研究, 2019(3): 10.
CAO Qingfeng, CHANG Wenjun. Development history and experience enlightenment of Japanese rail transit [J]. Transport Research, 2019(3): 10.

(收稿日期:2019-11-08)

(上接第 160 页)

- DAI Yi, DU Fanghao, LIAO Gaoyi. Method based on multi-user and on-line risk control of urban rail construction safety monitoring information [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2018(12): 43.
- [4] 李双平. 轨道交通建设安全风险管理系统的设计与实现 [D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2017.
LI Shuangping. Design and implementation of safety risk management system for rail transit construction [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [5] 都芳浩. 网络环境下城市地铁施工安全监测信息管理系统设

计与实现 [D]. 成都:西南交通大学, 2017.

- DU Fanghao. The design and implementation of network management system of metro construction monitoring information [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [6] 刘宏根. 天津城市轨道交通安全风险监控管理系统的设计与实现 [D]. 天津:天津大学, 2016.
LIU Honggen. The design and implementation of rail traffic safety risk monitoring and management system for Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.

(收稿日期:2019-11-01)