

# 轨道交通车辆模块化产品平台的技术框架与关键技术\*

张海柱<sup>1</sup> 何旭<sup>1</sup> 黎荣<sup>1</sup> 任坤华<sup>2</sup> 丁国富<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都;

2. 中车工业研究院有限公司, 100067, 北京//第一作者, 助理研究员)

**摘要** 针对我国轨道交通车辆种类繁多、模块通用性和技术通用性较差等问题,结合轨道交通装备制造业向大规模定制方式转变的趋势,提出了轨道交通车辆模块化产品平台的技术架构,并对基于BOM(物料清单)的产品模块化元结构树生成技术、产品平台模块类型动态识别技术、基于实例信息的模块统型设计技术及产品族主结构树构建技术等关键技术进行论述。开发了轨道交通车辆模块化产品平台的信息管理系统及定制设计系统,通过A型地铁车辆转向架的定制设计案例验证了该产品平台的技术可行性和系统可用性。

**关键词** 轨道交通车辆;模块化;产品平台;定制设计

**中图分类号** U270.2

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.03.037

## Technical Framework and Key Technologies of Modular Product Platform for Rail Transit Vehicle

ZHANG Haizhu, HE Xu, LI Rong, REN Kunhua, DING Guofu

**Abstract** In view of a wide variety of rail transit vehicles, the relatively low compatibility of modules and technologies in China, considering the trend of rail transit equipment manufacturing industry switching to mass customization, the technical architecture of a modular product platform for rail transit vehicle is proposed. Key technologies are discussed, such as the generation technology of BOM-based (bill of material) product modular unit structure tree, product platform module type dynamic identification technology, case information-based module format design technology, and product family main structure tree construction technology. The information management system and customized design system of modular product platform for rail transit vehicle are developed. The technical feasibility and system availability of the product platform are veri-

fied by the customized design of a type A metro vehicle bogie.

**Key words** rail transit vehicle; modular; product platform; customized design

**First-author's address** School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

随着轨道交通车辆国际市场竞争的加剧和需求的日趋多元化,业界对轨道交通车辆产品设计的周期、质量和成本提出了更高要求。未来,轨道交通装备制造业的生产方式将从大批量生产向大规模定制转变,产品平台是实现大规模定制的重要途径<sup>[1]</sup>。因此,如何构建轨道交通车辆模块化产品平台,已成为我国轨道交通装备制造企业面临的共性问题。

产品平台是组成公共架构的模块及其关系集合,基于产品平台可快速衍生出一组功能相似、性能不同的产品(即产品族)<sup>[2]</sup>。近年来,国内外学者对产品平台设计的理论与方法进行了大量研究,包括参数化产品平台、模块化产品平台、柔性产品平台及数据驱动产品平台等<sup>[3-5]</sup>。在轨道交通车辆领域,研究人员探索了电力机车、动车组及转向架等产品平台的构建方法<sup>[6-8]</sup>。然而,目前的研究方法多是面向单一产品的一次性设计模式,难以适用于具有种类繁多、模块通用性和技术通用性差等特点的轨道交通车辆。因此,急需一套支持轨道交通车辆产品通用平台构建与开发的技术框架。

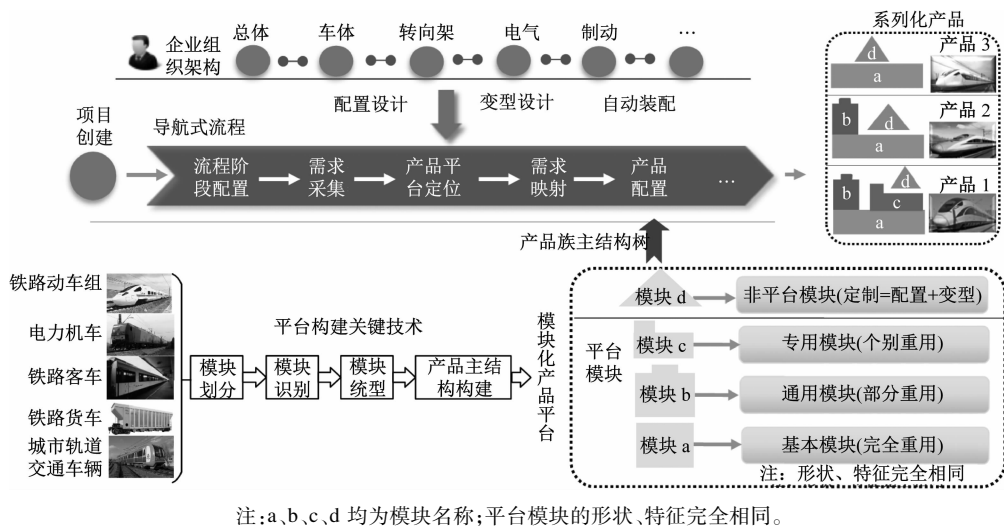
本文提出构建轨道交通车辆模块化产品平台的技术框架,对其关键技术进行研究,开发以产品数据管理和定制设计为核心的动态、可持续生产的产品平台,并以A型地铁车辆转向架设计为例进行应用验证。

\* 国家重点研发计划项目(2020YFB1708001);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682020CX31)

1 轨道交通车辆模块化产品平台技术框架

轨道交通车辆主要产品包括铁路动车组、电力机车、铁路客车、铁路货车及城市轨道交通车辆等。车辆系统涵盖了转向架、车体、牵引等 10 余个子系统,其整机装备设计需组合配置多个功能部件,且每个组成部件均可选择多种运行原理与结构类型,因此,车辆系统适合采用模块化产品平台进行设计。模块化产品平台是指经过模块化设计后形成的平台模块和非平台模块,以及这些模块间关系的

集合。其中:平台模块包括基本模块、通用模块和专用模块,模块的形状和特性在产品族中完全相同<sup>[9]</sup>;非平台模块具有多个模块实例,模块的形状和特性在产品族中不完全相同。基本模块、通用模块、专用模块及非平台模块这 4 类模块基于模块化产品平台进行配置设计与变型设计,可实现零部件的有效设计重用,快速生成满足客户需求的平台定制产品。轨道交通车辆模块化产品平台的技术框架如图 1 所示。



注:a、b、c、d 均为模块名称;平台模块的形状、特征完全相同。

图 1 轨道交通车辆模块化产品平台的技术框架

Fig. 1 Technical framework of modular product platform for rail transit vehicle

如图 1 所示,轨道交通车辆模块化产品平台主要包括模块划分、模块识别、模块统型(其全称为“统一结构型式”)及产品主结构构建等关键技术。该技术框架的设计流程为:① 基于现有产品进行模块划分,构建各车辆类型(以下简称“车种”)统一的、规范化的模块化元结构树;② 识别产品的平台模块与非平台模块,进而依据模块识别结果进行统型设计;③ 形成产品族主结构树,实现需求驱动的模块化产品定制设计。

2 轨道交通车辆模块化产品平台关键技术

2.1 基于 BOM(物料清单)的产品模块化元结构树生成技术

模块化元结构树是产品平台信息管理的核心。针对轨道交通车辆产品种类繁多、结构复杂等特点,本文采用元建模技术<sup>[10]</sup>,提出一种基于 BOM 的产品模块化元结构树生成方法。

2.1.1 系统级模块划分

模块划分是实现轨道交通车辆模块化产品平台构建的首要问题。系统级模块划分主要分为 3 个步骤:① 基于已有产品的 BOM 实例,按照标准件、外购件、通用件、虚件/实件、安装座等 5 种类型对 BOM 的结构节点进行分类,并去除如螺栓、垫片等标准件,以提高模块划分的效率,其中,虚件是指企业为了管理方便而虚构的 1 组零部件集合,如车顶设备等;② 按照系统模块功能的独立性和是否为虚件来判断结构树系统级节点是否需要重新划分;③ 基于功能-结构分解树对具有多个功能的系统级节点进行功能-结构分析,划分出相应的功能明确的系统级模块。

2.1.2 零部件级模块划分

完成系统级模块划分后再进行零部件级模块划分:① 判断部件级节点是否需要重新划分,按照零部件的功能、结构信息,以及是否是外购件/通用件、安装座等信息,评估每个节点的分数;② 采用聚

类分析法<sup>[11]</sup>对待划分的零部件节点进行划分。

### 2.1.3 轨道交通车辆产品模块化元结构树生成

根据系统级模块和零部件级模块的划分结果,对比分析各车种模块化元结构树中各模块名称,并基于国家标准和行业标准对铁道车辆、内燃机车及动车组等词汇的表述规定,构建统一、规范的模块名称字典。在此基础上,采用字典、元结构树、模板及实例的4层架构,构建规范化的各车种最大、最全的产品模块化元结构树。

## 2.2 产品平台模块类型动态识别技术

针对现有模块类型识别方法中主观性较强、动态识别难等问题,本文提出一种产品平台模块类型动态识别方法。该方法通过持续分析产品的实例数据,在导入不同时刻产品结构树实例集与基于特征表达的模块实例集后,可动态量化计算出模块相似度和模块使用度这2个产品模块类型识别指标,并基于这2个指标制定模块类型的识别规则,进而获取模块类型的识别结果。

### 2.2.1 模块相似度计算

模块相似度指模块实例在性能、尺寸及接口等方面的相似程度。相似度越高,模块间功能结构设计越接近,可满足互换性要求。其计算式为:

$$S_i(t) = \frac{\sum_{r=1, s=1, r \neq s}^{n(t)} S_{i,rs}(t)}{n(t)[n(t)-1]} \quad (1)$$

式中:

$S_i(t)$ —— $t$ 时刻模块 $i$ 的相似度;

$n(t)$ —— $t$ 时刻模块 $i$ 的实例数;

$S_{i,rs}(t)$ —— $t$ 时刻模块 $i$ 第 $r$ 个实例与第 $s$ 个实例之间的相似度。

$S_{i,rs}(t)$ 的计算公式为:

$$S_{i,rs}(t) = \sum_{j=1}^k \frac{S_{i,rs,j}(t)}{k} \quad (2)$$

式中:

$j$ ——模块 $i$ 的第 $j$ 个技术参数属性;

$k$ ——模块 $i$ 的技术属性总数;

$S_{i,rs,j}(t)$ —— $t$ 时刻模块 $i$ 第 $r$ 个实例与第 $s$ 个实例关于第 $j$ 个属性的相似值。

在计算过程中, $S_{i,rs,j}(t)$ 需要按数值型数据和文本型数据2种情况分别进行计算。

#### 2.2.1.1 数值型数据的相似度计算

若第 $j$ 个属性的数据类型为数值型,则其相似度的计算式为:

$$S_{i,rs,j,sz}(t) = \frac{\min(V_{i,r,j}(t), V_{i,s,j}(t))}{\max(V_{i,r,j}(t), V_{i,s,j}(t))} \quad (3)$$

式中:

$V_{i,r,j}(t)$ —— $t$ 时刻模块 $i$ 第 $r$ 个实例关于第 $j$ 个技术参数 $V$ ;

$V_{i,s,j}(t)$ —— $t$ 时刻模块 $i$ 第 $s$ 个实例关于第 $j$ 个技术参数 $V$ 。

#### 2.2.1.2 文本型数据的相似度计算

若第 $j$ 个属性的数据类型为文本型,则其相似度的计算式为:

$$S_{i,rs,j,wb}(t) = \begin{cases} 1, & r = s \\ 0, & r \neq s \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2.2 模块使用度

模块使用度表示模块被产品采用的频次。使用度越高,表明模块越基础,该模块在以后的产品实例中的变化程度越小。其计算式为:

$$U_i(t) = \frac{\sum_{p=1}^{m(t)} q_{i,p}}{m(t)} \quad (5)$$

式中:

$U_i(t)$ —— $t$ 时刻第 $i$ 个模块使用度;

$q_{i,p}$ ——第 $p$ 个产品实例是否使用了当前模块 $i$ ,若使用则 $q_{i,p}=1$ ,反之则 $q_{i,p}=0$ ;

$m(t)$ —— $t$ 时刻产品实例总量。

### 2.2.3 模块类型识别规则

设 $\varepsilon$ 、 $\lambda$ 分别为模块相似度阈值、模块使用度阈值。通过 $S_i(t)$ 与 $U_i(t)$ 制定模块识别规则,以自动、动态识别模块的类型。模块类型的识别规则如下:①如果 $\varepsilon \leq S_i(t) \leq 1$ 且 $U_i(t)=1$ ,则 $i$ 是基本模块;②如果 $\varepsilon \leq S_i(t) \leq 1$ 且 $\lambda \leq U_i(t) < 1$ ,则 $i$ 是通用模块;③如果 $\varepsilon \leq S_i(t) \leq 1$ 且 $0 \leq U_i(t) < \lambda$ ,则 $i$ 是专用模块;④如果 $0 \leq S_i(t) < \varepsilon$ ,则 $i$ 是非平台模块。

## 2.3 基于实例信息的模块统型设计技术

产品平台模块多个实例需进行统型设计,以减少无价值的差异性,有效提高设计效率、降低研制成本。模块统型包括两个方面:平台模块统型是基于已有模块实例进行全局性统型,即设计一个在产品族中完全相同的模块实例;非平台模块统型是一种分类统型,即设计多个系列化的模块实例(如牵引电机、齿轮箱等),以满足客户多样化的需求。

### 2.3.1 定义模块需求空间

基于招标技术条件定义目标市场内的客户需

求范围,即模块的需求空间。非平台模块的分类统型实例需要规划多个模块系列及各系列的需求空间,每个模块系列最好只有一个统型实例,以提高模块的通用性。

2.3.2 模块实例信息分析与决策

基于已有轨道交通车辆产品模块实例信息,对模块的差异度、使用度及可靠性等进行评价并赋予分值,综合评分最高者为最优模块实例。

2.3.3 模块实例校核

进一步对最优模块实例进行计算校核、仿真及试验,以判断该模块实例是否满足需求空间的要求。若该模块实例满足需求空间的要求,则该实例被定为统型实例;若不满足需求空间的要求,则需要重新设计一个模块实例并进行校核,直至模块实例校核成功后方可被定为统型实例。

2.3.4 非平台模块基型模板设计

具有参数化设计特征的非平台结构模块需要建立模块基型模板,通过修改基型模板参数能快速生成响应客户需求的新模块实例。其设计步骤为:① 构建模块技术指标-设计参数关系网络;② 定义关系网络中的驱动与从动设计参数项,并确定设计参数的取值范围及设计参数间的函数关系;③ 运用CAD软件(多采用CATIA软件、CREO软件)构建支持参数化变型设计的模块基型模板。

2.4 产品族主结构树构建技术

产品族主结构树综合了产品模块化元结构树、模块类型识别结果、模块统型设计结果及配置规则,形成产品主结构,以此主结构作为模块对象的可配置空间。图2为轨道交通车辆产品族主结构树构架示意图,该产品族主结构树以轨道交通车辆各车种的产品模块化元结构树为基础,根据产品平台

模块类型识别的结果,从产品配置选型维度标识每个模块的对象类别,将各模块标识为基本模块、必选模块或可选模块。

1) 基本模块指产品配置设计中模块节点一定存在且模块实例唯一、无需配置的模块。

2) 可选模块包括可选平台模块和可选非平台模块。其中:可选平台模块指模块节点可能存在也可能不存在、且具有唯一模块实例的模块,该模块只存在有/无的配置,不存在模块类别和模块实例参数的配置;可选非平台模块指模块节点可能存在也可能不存在、且具有多个模块实例的模块,该模块可以进行配置设计或变型设计。

3) 必选模块均为非平台模块,指模块节点一定存在但模块实例并不唯一的模块。该模块为可进行配置设计或变型设计的模块,其实例化需要从模块类型和模块实例参数2个层面进行配置。

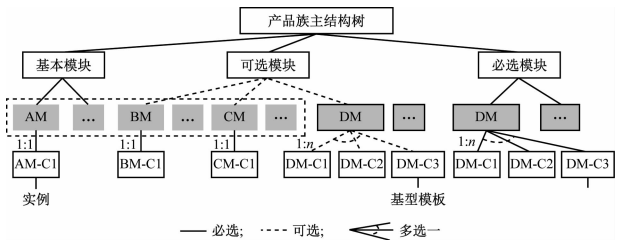
3 产品平台信息管理系统、定制设计系统的开发与应用

基于上述关键技术,研制轨道交通车辆通用的具有可持续性的产品平台,首先需要开发产品平台信息管理系统,对产品的需求、产品结构树、模块及配置规则等信息进行统一管理。在此基础上,规划与构建产品平台,并为产品族配置主结构,通过需求映射、配置设计及变型设计等技术,实现需求驱动的导航式轨道交通车辆快速定制设计。产品平台信息管理系统及定制设计系统采用C/S(客户端/服务器)架构嵌套B/S(浏览器/服务器)的方式,应用Java开发系统的前台应用层,以MySQL数据库管理系统开发后台数据库,以三维建模软件Creo 4.0作为产品三维模型的可视化展现平台。

3.1 产品平台信息管理系统

应用产品平台信息管理系统后,轨道交通车辆各车种的结构、需求、特征及属性等信息将依托产品行业分类信息、产品结构树、产品设计需求、整机信息、模块库、产品平台及产品族等进行规范化管理,并采用信息字典、元模型、模板或实例的元模型层级架构等方式进行表达。各类信息均可动态扩展其内容。

配置规则管理是对产品平台/产品族的定位、模块赋值及模块配置等规则进行规范化管理,主要包括产品族定位规则、需求-模块映射规则、模块层级映射规则及模块配置规则等。规则管理可为产



注:AM——基本配置模块;BM——通用模块;CM——专用模块;DM——非平台模块;C1、C2、C3——均为模块实例名称;AM-C1为基本配置模块实例1,其余表述含义类同。

图2 轨道交通车辆产品族主结构树构架示意图  
Fig. 2 Architecture diagram of product family main structure tree for rail transit vehicle

品的配置设计奠定规则基础。

项目实例管理基于产品的模块化元结构树、需求信息的元模型及整机信息的元模型,管理轨道交通车辆各车种和各项目的完整实例信息,这些实例信息主要包括需求信息、产品结构组成信息,以及列车、车辆及模块等实例信息。

产品设计流程管理是对轨道交通车辆的研发流程进行规范化管理,制定设计流程及其各个流程阶段元模型,定制设计流程模板。基于流程模板,可快速创建订单项目的设计流程实例。

### 3.2 产品平台模块化定制设计实例应用

本文以 A 型地铁车辆转向架方案设计阶段的实例应用为案例予以说明。基于新的项目订单需求,通过需求采集、产品平台选择、需求映射、配置设计、变型设计及装配设计等定制设计过程,可快速生成满足需求的 A 型地铁车辆转向架产品方案。其具体设计流程为:

- 1) 基于后台构建地铁产品需求元模型,对地铁车辆转向架的需求参数项赋值,获取需求实例数据。
- 2) 基于产品平台定位规则,对 A 型地铁车辆转向架订单项目进行产品族定位,基于需求-模块映

射规则获取该类型转向架模块属性参数的取值。

3) 基于映射规则实现客户需求到模块设计参数的快速赋值。

4) 基于实例推理方法和模块层级映射规则,遍历产品族主结构树,开展模块推荐配置设计,生成该类型转向架新产品的推荐配置清单<sup>[10]</sup>。

5) 将推荐的配置结果作为输入,各车辆子系统的设计师对各自设计结果进行配置变更(即重新配置模块实例)。

6) 修改新配置的模块实例的属性参数取值,基于关联设计技术开展模块变型设计或创建新的模块,生成新的模块实例;对各子系统进行配置变更时,可通过产品平台模块化定制设计系统的消息通信机制相互提单,实现协同设计,以保证设计结果的一致性和合理性。

7) 以修改后的配置设计与变型设计结果作为输入,基于 A 型地铁车辆转向架的骨架完成装配,在仿真校核成功后形成满足订单需求的设计方案结果。

基于产品平台模块化定制设计得到的 A 型地铁车辆转向架快速定制设计方案如图 3 所示。



图 3 A 型地铁车辆转向架快速定制设计方案效果图截图

Fig. 3 Screenshot of a rapid customized design scheme for type A metro vehicle bogie

## 4 结语

本文提出并建立了轨道交通车辆模块化产品平台的通用技术框架,并提出了基于 BOM 的产品模块化元结构树生成技术、产品平台模块类型动态

识别技术、基于实例信息的模块统型设计技术及产品族主结构树构建技术。在此基础上,开发了基于“字典-元模型-模板-实例”4 个层级架构的产品平台信息管理系统,以及基于导航式设计流程的产品平台模块化定制设计系统。最后以 A 型地铁车辆转

向架快速定制设计应用为例,验证了本文所提技术的可行性与可用性。在后续的研发工作中,应进一步开展不同车种及系统级产品平台技术应用与验证的相关工作,以保证产品平台具有普遍适用性与可持续性。

## 参考文献

- [1] HAN X, LI R, WANG J, et al. A systematic literature review of product platform design under uncertainty[J]. Journal of Engineering Design, 2020, 31(5): 266.
- [2] MEYER M H, LEHNERD A P. The power of product platforms: building value and cost leadership[M]. New York: The Free Press, 1997.
- [3] SIMPSON T W, MAIER J R, MISTREE F. Product platform design: method and application[J]. Research in Engineering Design, 2001, 13(1): 2.
- [4] LI Z K, CHENG Z H, FENG Y X, et al. An integrated method for flexible platform modular architecture design[J]. Journal of Engineering Design, 2013, 24(1).
- [5] SONG B, LUO J, WOOD K. Data-driven platform design: patent data and function network analysis[J]. Journal of Mechanical Design, 2019, 141(2): 021101.
- [6] 何安清. 基于电力机车产品平台的设计方法研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2013, 36(5): 11.  
HE Anqing. Research of product platform design method based on electric locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Ve-

hicles, 2013, 36(5): 11.

- [7] 黄杨成. 基于产品平台的动车组设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
HUANG Yangcheng. Research on multiple units design method based on product platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [8] 陈刚桦, 丁国富, 韩鑫, 等. 动车组转向架模块化产品平台设计[J]. 机械设计与制造, 2020(2): 183.  
CHEN Ganghua, DING Guofu, HAN Xin, et al. The bogie of EMU modular product platform design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(2): 183.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化化管理委员会. 机械产品模块化设计规范: GB/T 31982—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Modular design specification of mechanical products: GB/T 31982—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [10] LI R, ZHANG H, QIN S, et al. Customization design method for complex product systems based on a meta-model[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(10): 1.
- [11] WEI W, LIU A, LU S C Y, et al. A multi-principle module identification method for product platform design[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2015, 16(1): 1.

(收稿日期:2022-01-10)

## (上接第193页)

通过本方案的实施,并对车辆采集的数据进行分析,可对现有列车的修程/修制进行优化,尽可能避免发生维修过度或维修不足的情况,优化备品备件库存,为延长车辆车门系统设备服役期及使用寿命提供可能。因此,轨道交通车辆车门系统智能运维技术方案具有较大的经济效益和良好的社会效益。

## 参考文献

- [1] 张鹤, 伊宏伟, 曹琦. 城市轨道交通车辆智能化运维检测[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(4): 89.  
ZHANG He, YI Hongwei, CAO Qi. Intelligent operation and maintenance inspection of urban rail transit vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(4): 89.

- [2] 侯文军, 吴彩秀. 地铁车辆智慧运维平台研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(6): 1.  
HOU Wenjun, WU Caixiu. Research on metro vehicle intelligent operation and maintenance platform[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2019, 42(6): 1.
- [3] 朱新荣. 城市轨道交通车辆智能化维保解决方案探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 16.  
ZHU Xinrong. Discussion on intelligent maintenance solution for urban rail transit vehicles[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(7): 16.
- [4] 陈树亮, 豆瑞峰, 祖雨泽, 等. 轨道交通站台门系统智能化研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊1): 228.  
CHEN Shuliang, DOU Ruifeng, ZU Yuze, et al. Research on intelligent gate system of rail transit platform[J]. Electric Railway, 2020, 31(S1): 228.

(收稿日期:2020-11-06)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn