



基于MBSE的动车组牵引变流器研究

王保民¹, 杨九河², 周锦祥³, 王海芳⁴, 车 军³

(1. 天津职业技术师范大学 汽车与交通学院, 天津 300222;

2. 中国铁路成都局集团有限公司, 四川 成都 610082;

3. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070;

4. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063035)

摘要: 为解决动车组牵引变流器设计面临的信息庞杂和更改困难的问题, 文章引入基于模型的系统工程(MBSE)方法, 采用建模语言SysML和建模工具Magic Draw重点分析动车组牵引变流器全生命周期的设计阶段, 从需求分析出发对设计阶段进行建模。在建模过程中将牵引变流器需求分为非功能需求和功能需求, 非功能需求主要分析环境因素对动车组牵引变流器使用的影响并结合建模工具Magic Draw创建需求图和参数图进行仿真验证; 功能需求主要创建活动图、时序图来分析牵引变流器电流调节功能。在此基础上, 分析牵引变流器子系统并且创建相应模块定义图和内部模块图来展示牵引变流器架构, 建立追溯矩阵确保功能分析没有遗漏。结果表明, 将MBSE思想应用到动车组牵引变流器设计能够通过模型间的关联性解决基于文档的传统模式中存在的信息查找和更改困难等不足, 有效支持牵引变流器内部的设计信息从“文本”到“模型”的转变。

关键词: 动车组; 系统工程; MBSE; 牵引变流器; SysML; Magic Draw

中图分类号: U292.91⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X (2024) 06-0133-07

0 引言

系统工程是为了更好地实现系统的目的, 对系统的组成要素、组织结构、信息流、控制机构等进行分析研究的科学方法。在系统工程发展初期, 产品设计信息都是以文档的形式表达, 然而当系统设计过于复杂时, 文档的表达方式无法满足需求, 因此基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)应运而生^[1-4]。

本文将MBSE用于动车组牵引变流器开发, 基于建模语言SysML和建模工具Magic Draw重点分析动车组牵引变流器全生命周期的设计过程, 支持牵引变流器的设计表达。

1 基于模型的系统工程分析

MBSE应用建模方法支持系统的需求、设计、分析、检验与确认活动, 这些活动从概念设计阶段开始贯穿整个开发过程及后续的生命周期^[5-7]。

MBSE相比于文字表达更加直观准确, 可提高工作效率; 相比于基于文档的设计, MBSE可在需求分析阶段和方案设计阶段实现早期验证和仿真分析; 可以进行系统全生命周期一体化分析, 把系统的需求、设计、分析、验证和确认重点步骤紧密联系起来以避免出现系统设计问题^[8]。

牵引变流器的全生命周期如图1所示。图1形象化地表达了产品从设计到报废的全过程。生命周期模型

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2020KJ121); 天津职业技术师范大学科研启动项目(KRKC012215)

通信作者: 王保民, 男, 副教授, 研究方向为基于模型的系统工程(MBSE); E-mail: wangbaomin1982@126.com

引用格式: 王保民, 杨九河, 周锦祥, 等. 基于MBSE的动车组牵引变流器研究[J]. 机车电传动, 2024(6): 133-139. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.103.

Citation: WANG Baomin, YANG Jiuhé, ZHOU Jinxiang, et al. Research and analysis of traction converter for EMU based on MBSE[J]. Electric drive for locomotives, 2024(6): 133-139. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.103.

包含的内容丰富，设计人员需要提取信息时无须查询文档，直接可以在如图1所示模型中点击图标就可以得到，降低了信息查找的难度。本文重点针对系统全生命周期的设计阶段进行建模分析。

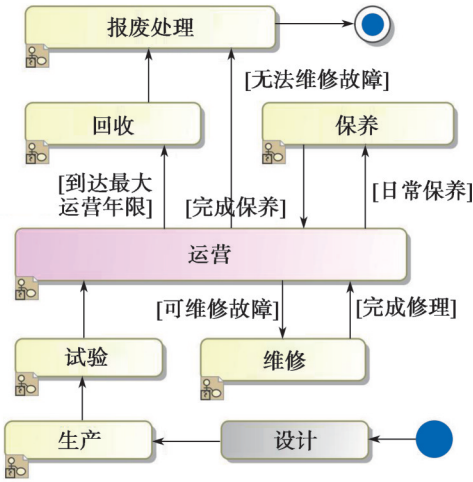


图1 牵引变流器生命周期
Fig. 1 Traction converter life cycle

2 牵引变流器建模分析

2.1 建模语言SysML介绍

系统建模语言有很多种，其中活动模型（ICAM DEFinition Method, IDEF0）^[9]、行为图比较常见，但是这些语言之间相互独立，使用的符号和语义无法相互沟通^[10]。因此，国际系统工程学会提出了系统建模语言(Systems Modeling Language, SysML)，提高了建模效率。

SysML建模语言如图2所示，图形分为3大类：结构图、需求图和行为图。结构图包括块定义图、内部块图、包图和参数图。结构图属于模型的静态视图；需求图是一种新的SysML图形，是在统一建模语言的基础上改进而来的，用于描述需求和需求之间的关系；行为图包括活动图、序列图、状态机图和用例图，用于展示系统动态行为。

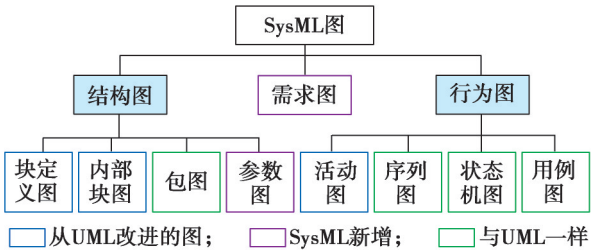


图2 系统建模语言 SysML
Fig. 2 System modeling language SysML

2.2 牵引变流器非功能需求建模

需求分析是系统建模的初始阶段也是最重要阶段，因为需求是根据用户的要求加工整理出来的，是系统设

计的条件约束^[11]。本文创建约束表达式分析牵引变流器的非功能需求，非功能需求分析阶段用到的SysML模型图是参数图、需求图和模块定义图^[12]。牵引变流器的非功能需求主要包括环境需求、性能需求等，部分环境需求如表1所示。由表1可知，具体的需求由需求ID和需求内容来表达，需求ID是需求的唯一标识符，主要由数字和字母组成的字符串表示。如本文牵引变流器环境需求ID为R1000，R1000.1表示了ID为R1000.1的条目是对R1000需求的1项细化。每个需求都有1个唯一的ID，这使得跟踪每个ID的来源成为可能。

表1 牵引变流器环境需求
Table 1 Traction converter environmental requirements

编号ID	简短描述	需求内容
R1000.1	使用环境最高温度	牵引变流器使用环境最高温度不高于40℃
R1000.2	使用环境最低温度	牵引变流器使用环境最低温度不低于-40℃
R1000.3	地震烈度	牵引变流器使用环境地震烈度不超过0.3g
R1000.4	海拔高度	牵引变流器使用环境海拔不超过1 500 m
R1000.5	风速	牵引变流器使用环境风速度不超过15 m/s

采用适用于SysML建模语言的工具 Magic Draw 建模得到的牵引变流器非功能性需求中的环境需求如图3所示。图3中给出了海拔高度、地震烈度、风速，以及使用环境温度。在建模过程中考虑到牵引变流器的使用必须满足相应环境条件，所以基于该模型创建名为《satisfy》的需求关系。一旦创建相应关系， Magic Draw 就会自动捕捉关键词。图3中画横线的文字表示软件已自动捕捉到相应关键词，将自动创建限制模块（约束表达式）表达牵引变流器应该满足的约束条件。牵引变流器环境需求约束模块如图4所示。

系统锁定约束关系后一般以数学模型的方式表示^[13]，而SysML中只有参数图能够向利益相关者传递这些数学模型。通过给模块值属性指定固定的数学关系，可为设计阶段的工程分析和模拟提供输入信息（并捕获输出信息）。牵引变流器环境约束参数图是为满足上文提出的环境需求在图3需求图的基础上创建的，并通过把表达式中的每个变量与牵引变流器非功能需求中的值绑定来达到控制需求的目的。将参数与需求联系后能通过简单仿真进行需求影响性分析，牵引变流器环境约束参数图和环境需求影响性分析的仿真分别如图5和图6所示。

图6分为2部分，上半部分的仿真结果显示某地环境满足牵引变流器的使用条件，下半部分的仿真结果表示某地的环境不满足牵引变流器的使用条件。

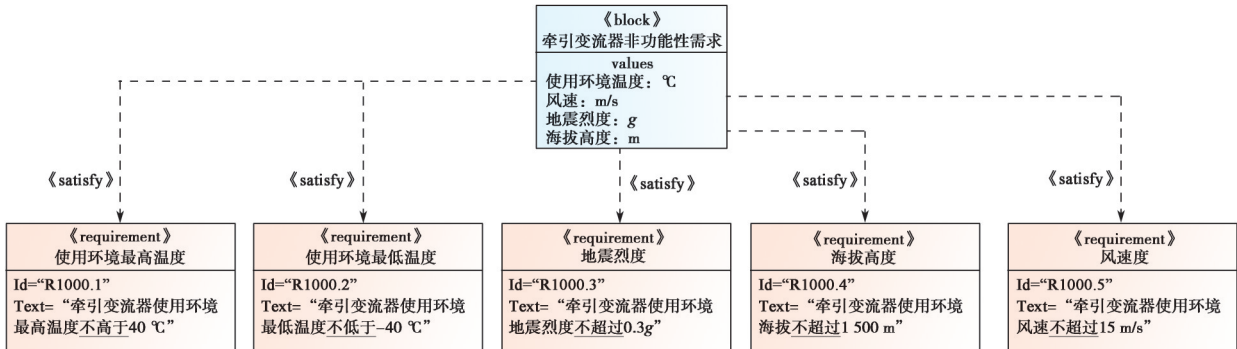


图3 牵引变流器环境需求图

Fig. 3 Environmental demand diagram of traction converter

《constraint》 使用环境最高温度	《constraint》 地震烈度	《constraint》 海拔高度	《constraint》 风速	《constraint》 使用环境最低温度
constraints {x<40.0}	constraints {x<=0.3}	constraints {x<=1 500.0}	constraints {x<=15.0}	constraints {x>-40.0}
parameters x: Real	parameters x: Real	parameters x: Real	parameters x: Real	parameters x: Real

图4 牵引变流器环境需求约束模块图

Fig. 4 Environmental demand constraint module diagram of traction converter

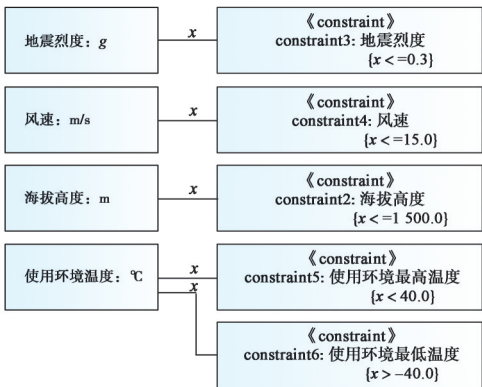


图5 牵引变流器环境约束参数图

Fig. 5 Environmental constraint parameter diagram of traction converter

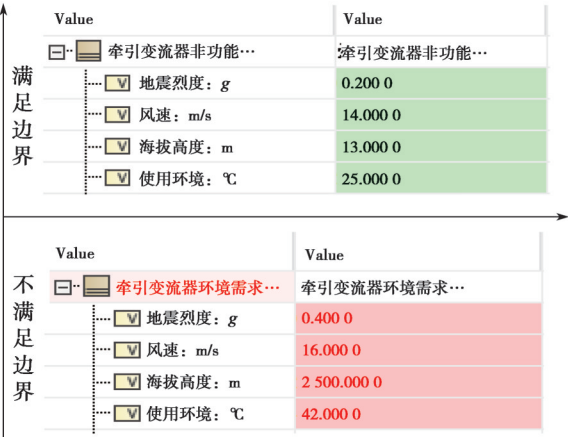


图6 牵引变流器环境需求的影响性分析仿真

Fig. 6 Simulation of the impact analysis of the environmental requirements of the traction converter

2.3 牵引变流器功能需求建模

具体的功能需求同样由需求 ID 和需求内容来表达，每个需求都有 1 个唯一的 ID。本文在具体分析动车组

牵引变流器功能的基础上提出的部分功能需求如表 2 所示。

表2 牵引变流器功能需求

Table 2 Traction converter functional requirements

编号ID	简短描述	需求内容
F1000.1	整流功能	牵引变流器将交流电整流为直流电
F1000.2	逆变功能	牵引变流器将直流电逆变为交流电输送给牵引电机
F1000.3	辅助设备供电功能	辅助变流器模块从中间直流回路取电
F1000.4	充电控制功能	当牵引控制单元（TCU）检测满足所有条件后控制充电接触器
F1000.5	短接控制功能	当TCU检测满足所有条件后控制短接接触器
F1000.6	四象限控制功能	当TCU检测满足所有条件后启动四象限变流器
F1000.7	辅助逆变器控制	正常工况下，当TCU检测满足所有条件后控制辅助逆变器

采用适用于SysML建模语言的工具 Magic Draw 建模得到的牵引变流器功能需求如图 7 所示。牵引变流器的功能需求主要包括整流、逆变以及 TCU 控制。考虑

到牵引变流器子需求是对需求的细化，因此建模时在子需求和上一级需求之间建立了包含关系。

复杂系统在概念设计阶段的一个重要任务是分析

需要设计哪些功能才能满足目标系统的功能需求,因此合理可行的功能分析过程至关重要。本文结合已有经典功能分解过程方法并查阅相关文献资料得到的部分牵引变流器功能如图8所示,建立功能与需求之间的追溯关系如图9所示,追溯矩阵中功能与需求之间一一对应,保证功能需求能够全覆盖。

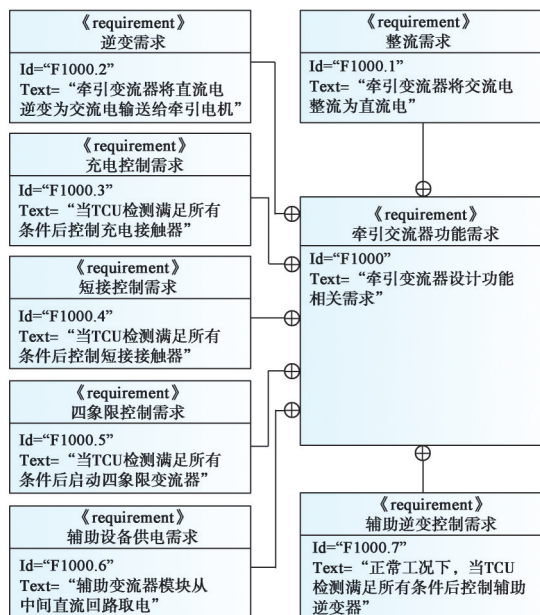


图7 牵引变流器功能需求图

Fig. 7 Traction converter functional requirements diagram

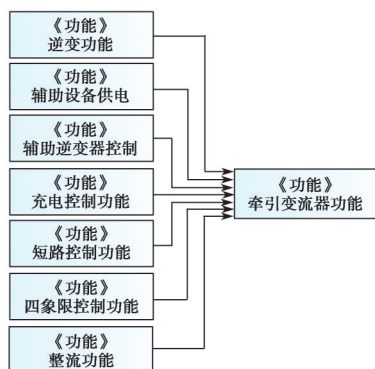


图8 牵引变流器功能建模

Fig. 8 Traction converter functional modeling

Legend		牵引变流器功能分析									
□	Satisfy	充电控制功能	辅助逆变器控制功能	辅助设备供电	短接功能	逆变功能	牵引变流器功能	四象限控制功能	整流功能	滤波功能	滤波功能
□	牵引变流器需求分析	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
□	F1000 牵引变流器功能需求										
□	F1000.1 整流需求	1									✓
□	F1000.2 逆变需求	2				✓					✓
□	F1000.3 充电控制需求	1	✓								
□	F1000.4 短接控制需求	1		✓							
□	F1000.5 四象限控制需求	1									
□	F1000.6 辅助设备供电需求	1									
□	F1000.7 辅助逆变控制需求	1		✓							

图9 需求与功能追溯矩阵

Fig. 9 Requirements and function traceability matrix

静态的功能模块只是形式化的表达,具体功能的分解还需要借助SysML中其他的视图具体分析。本文主要对图8所示的整流功能模块进行分析,采用的视图主要有活动图和时序图,活动图通过行为表示具体对象事件。牵引变流器整流调节活动图如图10所示。

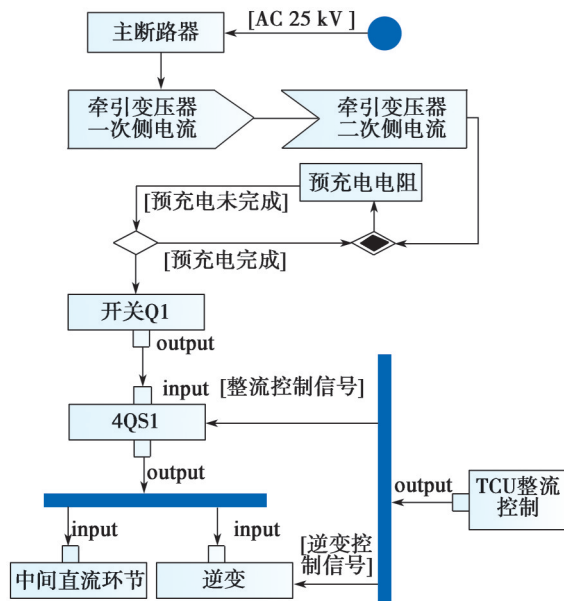


图10 整流调节活动图

Fig. 10 Activity diagram of rectification adjustment

牵引变压器将交流 25 kV 电压变压后传输给牵引变流器,变流器从牵引变压器二次侧绕组得电后首先通过预充电电阻为直流环节支撑电容充电,预充电完成后开关闭合,TCU 控制四象限整流器来自变压器的交流电整流为直流 3 600 V 中间直流电,滤波电容和滤波电阻滤除二次谐波,然后经由主逆变器输出电压及频率可调的变频调速 (Variable Voltage and Variable Frequency, VVVF) 电压驱动牵引电机工作。图10基本明确了整流的大致工作过程,但也只是粗粒度的描述,更为具体的描述过程要依靠序列图来完成。序列图通过生命线为系统行为参与者建模从而表达系统动态行为。序列图可以指定交互的时间约束,还可以使用各种交互操作符来指引交互的执行。使用交互可以对一系列交互之间的行为分别建模,TCU 整流检测序列图如图11所示,图11为图10中TCU 整流控制模块故障反馈的描述。中央控制单元(Central Control Unit, CCU)通过多功能车辆总线 (Multifunction Vehicle Bus, MVB) 将整流信息传给TCU,TCU 将整流信息传给整流器,整流出现故障之后,TCU 通过MVB 将故障信息传给CCU,CCU 通过绞线式列车总线 (Wire Train Bus, WTB) 形成列车级诊断信息,主机通信界面 (Host Message Interface, HMI) 接收该信息并实现报警提示。

3 牵引变流器架构建模与功能追溯

SysML 建模语言能够表示类的多层继承关系^[14],

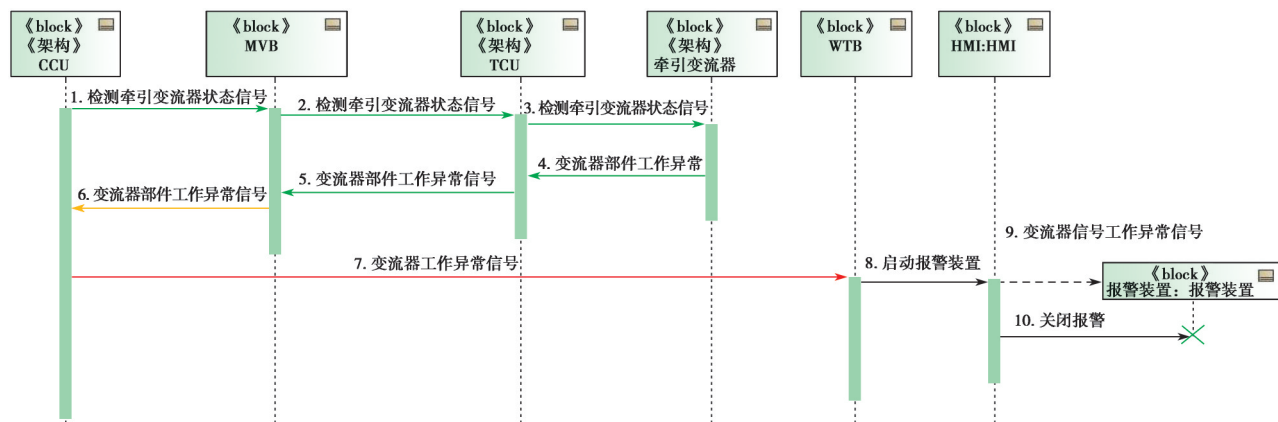


图11 TCU整流检测序列图

Fig. 11 TCU rectification detection sequence diagram

模块定义图可以说明系统内部结构类型。动车组牵引变流器架构如图12所示, 架构模型包括从不同抽象层次和不同视角分析得到的复杂结构, 除了包含各种元素之外, 还要考虑不同元素之间的交互关系。图12列出了牵引变流器的子模块, 其中包括四象限脉冲整流器、电压互感器、三相PWM逆变模块、辅助逆变器、过电压限制器、电流互感器和充放电电阻。

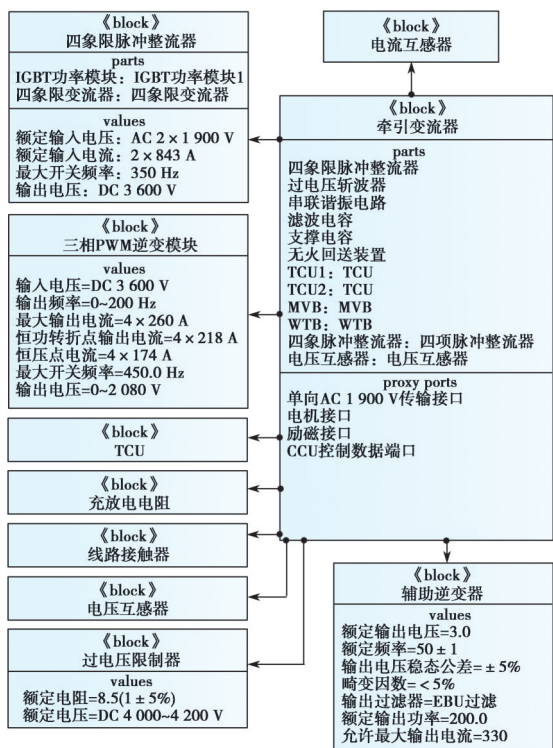


图12 牵引变流器架构图

Fig. 12 Traction converter module definition diagram

采用追踪矩阵实现功能和架构之间的双向迭代验证, 确保牵引变流器架构对功能的覆盖。架构对功能的追溯矩阵如图13所示。

建立架构和功能的追溯之后, SysML还能够依据内部模块图 (Internal Block Diagram, IBD) 和模块定义图的配合, 在内部模块图中显示各种接口关系来补充模块定义图中牵引变流器架构的内容^[15]。牵引变流器

模块的内部模块图如图14所示。图14显示了牵引变流器内部组成部分属性之间的特殊连接和流通的数据, 同时也表示它们与外部引用属性牵引变压器和CCU之间的连接和流通的数据情况。

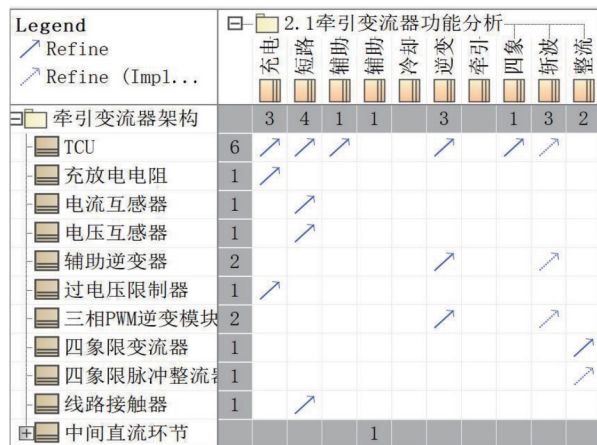


图13 牵引变流器架构与功能追溯

Fig. 13 Traction converter architecture and function traceability

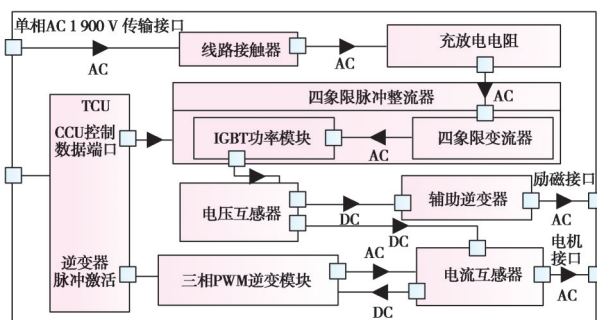


图14 牵引变流器内部模块图

Fig. 14 Internal module diagram of traction converter

4 结束语

本文将基于模型的系统工程的思想引入牵引变流器的分析, 针对某型动车组, 基于SysML建模语言建立了牵引变流器的需求模型、功能模型和架构模型,

并实现了模型之间的相互追溯；后续将继续研究 MBSE 与动车组牵引变流器的结合过程，完成变流器全生命周期其他阶段的建模与验证，构建完整的牵引变流器全生命周期模型。

参考文献：

- [1] 王保民, 陈波, 张世聪. 基于 MBSE 的动车组整车逻辑研究方法及应用[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(6): 143-151.
WANG Baomin, CHEN Bo, ZHANG Shicong. Research method and application of vehicle logic for EMU based on MBSE[J]. China railway science, 2021, 42(6): 143-151.
- [2] CHEN Wen. Model-based integration and verification of airborne system[J]. Journal of physics: conference series, 2021, 1939(1): 012043.
- [3] JING Ben, HAO Wang, YANG Xu. Demand analysis of wind turbine system based on MBSE[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 702(1): 012029.
- [4] 王保民, 陈波, 张世聪. 国外基于 MBSE 的列车领域研究现状探析[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(1): 15-21.
WANG Baomin, CHEN Bo, ZHANG Shicong. Analysis of foreign research status in train field based on MBSE[J]. Railway locomotive & car, 2021, 41(1): 15-21.
- [5] YU Chao, LI Qing, LIU Kui, et al. Industrial design and development software system architecture based on model-based systems engineering and cloud computing[J]. Annual reviews in control, 2021, 51: 401-423.
- [6] WANG Dandan, LIANG Hao, CUI Jianwen. Modeling and simulation of top-level design based on MBSE[J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1486(7): 072061.
- [7] 刘玉生. MBSE: 实现中国制造创新设计的使能技术探析[J]. 科技导报, 2017, 35(22): 58-64.
LIU Yusheng. MBSE: the enabling technology for the innovative design of intelligent manufacturing in China[J]. Science & technology review, 2017, 35(22): 58-64.
- [8] 蒋彩云, 王维平, 李群. SysML: 一种新的系统建模语言[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1483-1487.
JIANG Caiyun, WANG Weiping, LI Qun. SysML: a new systems modeling language[J]. Journal of system simulation, 2006, 18(6): 1483-1487.
- [9] XU Yiqun, WU Linbo. An automatic test case generation method based on SysML activity diagram[J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2019, 563(5): 052075.
- [10] 高雅娟, 徐小芳, 刘钊. 基于模型的系统工程在通用质量特性评估验证中的应用研究[J]. 测控技术, 2020, 39(3): 9-12.
GAO Yajuan, XU Xiaofang, LIU Zhao. Application research of model-based systems engineering in assessment & verification of general quality characteristics[J]. Measurement & control technology, 2020, 39(3): 9-12.
- [11] 殷羽飞. 基于 SysML 模型的需求分析与验证[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
YIN Yufei. Requirement analysis and verification based on SysML model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [12] 谢友柏. 关于 MBSE 和 MBD 的思考[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 6-11.
XIE Youbai. Thinking about MBSE and MBD[J]. Science & technology review, 2019, 37(7): 6-11.
- [13] 李宛倩. 面向 SysML 的模型转换与安全性分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
LI Wanqian. Research on SysML-oriented model conversion and security analysis method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [14] 胡峻豪, 冯雷, 朱睿, 等. 支持 MBSE 的系统全过程设计应用框架研究与实现[J]. 航空制造技术, 2016(13): 105-109.
HU Junhao, FENG Lei, ZHU Rui, et al. Research and implementation of system design application framework for MBSE[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2016(13): 105-109.
- [15] 范秋岑, 毕文豪, 张安, 等. 民用飞机高度控制系统 MBSE 建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(1): 164-171.
FAN Qiucen, BI Wenhao, ZHANG An, et al. MBSE modeling method of civil aircraft altitude control system[J]. Systems engineering and electronics, 2022, 44(1): 164-171.

Research and analysis of traction converter for EMU based on MBSE

WANG Baomin¹, YANG Jiuhe², ZHOU Jinxiang³, WANG Haifang⁴, CHE Jun³

(1. School of Automobile and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610082, China; 3. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China)

Abstract: This paper focuses on applying model-based systems engineering (MBSE) methodology to the design of EMU traction converters, to address challenges stemming from an abundance of information and complexities in modification. The study initially uncovered the whole life cycle process of EMU traction converters, leveraging the modeling language SysML and the modeling tool Magic Draw, and concentrated on modeling the design stage based on an analysis digging into requirements. The requirements of traction converters were categorized into non-functional requirements and functional ones during the modeling process. The non-functional requirements were analyzed to assess the impact of environmental factors on the operation of EMU traction converters, and were verified through simulations incorporating diagrams of requirements and parameters created using the modeling tool Magic Draw. The analysis of functional requirements focused on the current regulation function of traction converters, through creating activity diagrams and timing diagrams. The subsequent analysis delved into the traction converter subsystems and presented the traction converter architecture by creating corresponding module definition diagrams and internal module diagrams. Additionally, a traceability matrix was established to ensure no omission in the functional analysis. The study findings endorse the application of the MBSE methodology, particularly through model correlations, as an effective solution to challenges in the design of EMU traction converters, such as complexities in information search and modifications in the traditional document-based mode. Hence, the proposed approach effectively facilitates the transformation of internal design information of traction converters from a textual representation to a model-based format.

Keywords: EMU; systems engineering; model-based systems engineering (MBSE); traction converter; SysML; Magic Draw