

基于 Revit 和 ANSYS 软件的城市轨道交通连续箱梁桥无缝线路模型转换方法

王 嘉^{1,2} 李 莉^{1,2}

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 目的:为解决城市轨道交通连续箱梁桥上无缝线路(以下简称“桥上无缝线路”)在 ANSYS 软件中建模过程繁琐、效率低下等问题,应引入 Revit 软件,以快速协同建筑设计软件和有限元分析软件的交互功能。方法:引入 BIM(建筑信息模型)作为建筑设计与结构分析 2 个阶段间信息共享和交互应用的桥梁,Revit 模型作为模型转换的信息载体,结合 Revit 软件的 API(应用程序接口)及基于 C#语言的二次开发技术,提出了针对桥上无缝线路的由 Revit 模型转换到 ANSYS 模型的方法。对转换后的模型进行后处理分析,得到温度作用工况和列车作用工况下连续箱梁桥上的钢轨纵向力和纵向位移的计算结果,并与相关文献的计算结果进行对比,以验证该方法的合理性和准确性。结果及结论:该方法通过调用 Revit 模型中各结构构造物的参数信息,能够自动执行 ANSYS 模型的前处理过程(包括几何构建、赋予材质和单元属性、模型切割、网格划分、模型约束等),可实现 Revit 模型向 ANSYS 模型的直接转换。该方法具有合理性和准确性,可打通 Revit 软件与 ANSYS 软件间的信息壁垒,实现复杂 Revit 模型导入有限元中数值计算的目标,大大减少建模及计算的时间。

关键词 城市轨道交通;无缝线路;连续箱梁桥;Revit 软件;ANSYS 软件;模型转换

中图分类号 U441+.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.11.030

Model Conversion Method for CWR on Urban Rail Transit Continuous Box Girder Bridge Based on Revit and ANSYS Software

WANG Jia, LI Li

Abstract Objective: In order to solve the problems of tedious process and low efficiency in CWR (continuous welded rails) modeling on continuous box girder bridges of urban rail transit (referred to as 'CWR on bridge') in ANSYS software, Revit software should be introduced to quickly realize with the interaction between architectural design software and finite element analysis software. Method: BIM (Building Information

Model) is introduced as the bridge of information sharing and interactive application between the two stages of architectural design and structural analysis, and the Revit model is used as the information carrier of model transformation. Combined with the API (application program interface) of Revit software and the secondary development technology based on C# language, this paper a method of transforming the Revit model to the ANSYS model for CWR on bridge is put forward. After post-processing and analysis of the converted model, the calculation results of rail longitudinal force and longitudinal displacement on continuous box girder bridge under temperature and train conditions are obtained, and compared with those of related literature to verify the rationality and accuracy of the method. Result & Conclusion: This method can automatically execute the pre-processing process of ANSYS model (including geometry construction, material and element property assignment, model segmentation, meshing, and model constraint) by calling the parameter information of each structural component in the Revit model, and achieve direct conversion from Revit model to ANSYS model. This method is reasonable and accurate, it can break through the information barrier between Revit software and ANSYS software, and achieve the goal of importing complex Revit models into finite element numerical calculation, greatly reducing the time for modeling and calculation.

Key words urban rail transit; CWR; continuous box girder bridge; Revit software; ANSYS software; model conversion

Author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

0 引言

BIM(建筑信息模型)和有限元分析等技术在工程上的应用越来越普遍,随之对铁路桥梁模型构建和结构分析的要求也越来越高,而单一领域内软件的使

用存在一定的局限性。例如, ANSYS 软件凭借其强大的计算分析能力给工程数值仿真带来了诸多便利, 但其建模环节的功能较为薄弱, UI (用户界面) 交互不够便捷, 精细化建模需要耗费大量时间, 如需更正模型中的错误, 其流程也较为繁琐^[1-2]。

Revit 软件凭借其优越的建模性能和广泛的适用性在 BIM 领域内脱颖而出, 成为我国 BIM 应用的一款主流软件。基于 Revit 软件生成的模型 (以下简称“Revit 模型”) 包含了大量的数据信息, 这些数据的有效调用是实现模型二次开发的基础, 也为 Revit 模型与基于 ANSYS 软件生成的模型 (以下简称“ANSYS 模型”) 间的快速转换提供了可能。因此, 快速协同建筑设计软件和有限元分析软件的交互功能, 能有效提高工作效率^[3-5]。

众多学者就 Revit 模型向 ANSYS 模型转换进行了研究。文献[6]基于上海轨道交通 17 号线青浦站工程, 对地铁车站中的墙柱等构造由 Revit 模型向 ANSYS 模型转化进行了研究。文献[1]对某建筑结构的梁、板、柱、墙等结构进行了模型的转换和切分, 并输出了结构在重力条件下的变形云图。文献[7]将模型转换方法应用于某船闸闸室主体工程中, 并验证了其可行性。文献[8]将岩土工程中的基坑 Revit 模型转化到 ANSYS 软件中进行网格划分, 再导入到 FLAC3D 软件中进行计算, 促进了 BIM 软件与数值计算软件的对接。文献[9]结合 Python 语言和 XML 语言, 利用 SCDM 软件 (ANSYS 的一款多功能前处理建模软件) 界面完成了地下室模型的转换。文献[10]重点研究了几何模型转换的坐标转换法和材料参数的获取方法, 并在一片简支梁上进行了应用。

但是, 现有研究在桥梁工程中的应用仍存在不足, 通常仅针对桥梁结构进行模型转换, 而对于桥梁结构与轨道结构组合的城市轨道交通连续箱梁桥无缝线路 (以下简称“桥上无缝线路”) 模型转换的研究较少。为此, 本文结合 Revit 软件强大的参数化建模、二次开发能力及 ANSYS 软件优秀的计算分析能力, 基于 Revit 软件的 API (应用程序接口) (以下简称 Revit API), 在 Visual Studio 2019 软件上应用 C# 语言开发出 2 个模型转换的接口, 以快速实现桥上无缝线路 Revit 模型转换为 ANSYS 模型并进行仿真计算的功能, 减少手动输入 APDL (ANSYS 参数化编程语言) 的时间, 弥补 ANSYS 软件的不足。

1 模型转换接口的开发

1.1 开发工具

Revit API 作为 Revit 软件和 .NET 平台间的桥梁, 可为不同平台提供数据共享。Revit API 凭借强大且丰富的功能, 给设计人员提供了良好的二次开发环境, 当中包含了大量的命名空间、方法属性和类库, 供程序开发人员调用。

本研究使用 Revit 2018 软件构建桥上无缝线路结构的 BIM。在此基础上, 基于 C# 语言选择 Visual Studio 2019 软件中 .NET Framework 4.5.2 框架下的类库, 利用 Revit API, 以 IExternalApplication (外部应用) 及 IExternalCommand (外部命令) 的方式进行模型的二次开发。随后利用 StreamWriter 类生成 APDL, 并将命令流导入 ANSYS 软件中, 最终成功实现了 Revit 模型向 ANSYS 模型的转换。其技术路线如图 1 所示, 具体流程如图 2 所示。

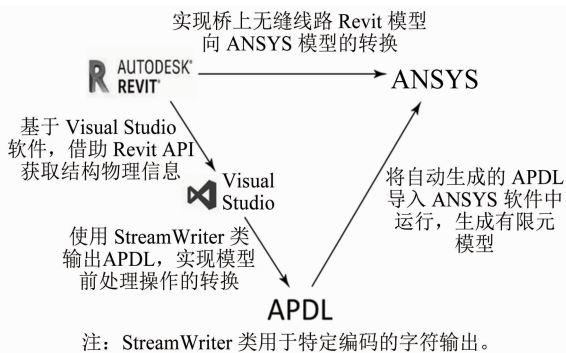
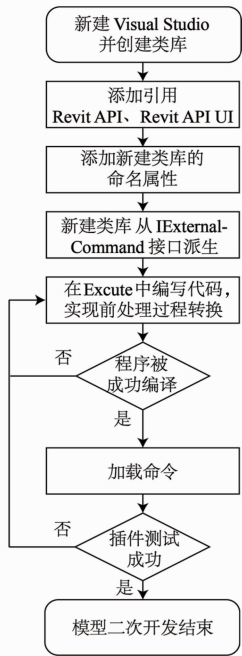


图 1 基于 Revit 和 ANSYS 软件的桥上无缝线路模型二次开发技术路线

Fig. 1 Technical route of secondary development of CWR model on bridge based on Revit and ANSYS software

1.2 模型转换接口的开发流程

Revit 模型含有大量的参数信息 (包括族的编号、空间位置、几何尺寸和材质属性等), 利用二次开发技术对其进行调用和转存, 是实现 Revit 软件与 ANSYS 软件交互的必要方式。模型转换接口的开发流程为: ①先生成用于存放 APDL 的 StreamWriter 类, 创建 FilteredElementCollector (元素收集过滤器), 再根据族的 Category (类别)、Class (族名) 和 Name (名称) 等参数, 将钢轨、轨道结构、梁体等不同类型的族分别存储到各自的 FilteredElementCollector 中; ②遍历族文件数组, 以获取结构的几何和材质信息, 通过 StreamWriter.write 方法将 APDL 输出到记事本中, 并编写其他前处理操作语句 (如



注: Excute 是 IExternalCommand 接口的一个函数, 可作为外部命令的主函数被调用。

图 2 基于 Revit 和 ANSYS 软件的桥上无缝线路模型二次开发的具体流程

Fig. 2 Specific flowchart of secondary development of CWR model on bridge based on Revit and ANSYS software

模型切割、网格划分等);③将自动生成的.txt 文件载入 ANSYS 软件中,供 ANSYS 软件读取。

1.3 模型转换的算法要点

1.3.1 Revit 模型信息的过滤

桥上无缝线路 Revit 模型构造复杂、信息众多。为实现各结构信息分门别类的有序转换,首先需要借助 FilteredElementCollector 进行分类,并按类别存储到各自的泛型列表中;然后遍历列表中族实例的全部物理信息,收集在后续模型转换时所需的空

1.3.2 模型几何信息的转换

以箱梁转换为例,由于箱梁截面的几何形状不

规则且参数众多,需要调用 LookupParameter 方法,以获取 Revit 参数化建模时所需添加的物理属性(包括结构材质、底板的厚度与高度、顶板的厚度与高度、腹板厚度、梁体高度、梁体长度及加腋尺寸等),再结合 BoundingBoxXYZ(角点坐标)进行坐标计算。在保持不同构件自身节点编号规律性的前提下,还应充分预留出足够的编号空间。需要注意的是,Revit 软件中的长度单位为英尺,在调用参数时需要先进行单位换算。其他构件的转换方法与箱梁类似,钢轨转换时须结合 Locationpoint(坐标定位点)与长度参数予以实现;CRTS III 型板转换时须结合角点坐标,以及轨道板、自密实混凝土层和底座的长宽高等参数予以实现。

1.3.3 模型材质信息的转换

仿真分析时需要输入结构的密度、泊松比、热膨胀系数和弹性模量等参数,而元素收集过滤器仅能获取元素信息,若要获取材质信息,需要先将结构转换成材料,再调用 PropertySetElement 类中 StructuralAsset 属性,以实现 Revit 中模型材质属性的获取及生成 ANSYS 自动赋予材质信息的 APDL。

1.3.4 约束及边界条件转换

采用 Revit 软件建模时,须将扣件模型的中心对齐锁定到参照平面的中心上,即通过坐标定位点来确定扣件在参照平面上的位置。再根据扣件的间距进行网格划分,使用弹簧单元连接 2 排节点,弹簧单元的长度调用 Revit 模型中扣件的高度参数。

采用 Revit 软件对模型进行分析时,软件提供了“固定”、“铰支”、“滑动”、“用户”4 种边界状态选项,BoundaryConditions 类可对结构的边界条件进行创建,并获取相关信息。本文构建的连续箱梁桥模型三跨的纵向长度分别为 40 m、60 m 及 40 m,轨道结构采用 CRTS III 型板式无砟轨道,其桥跨布置如图 3 所示。

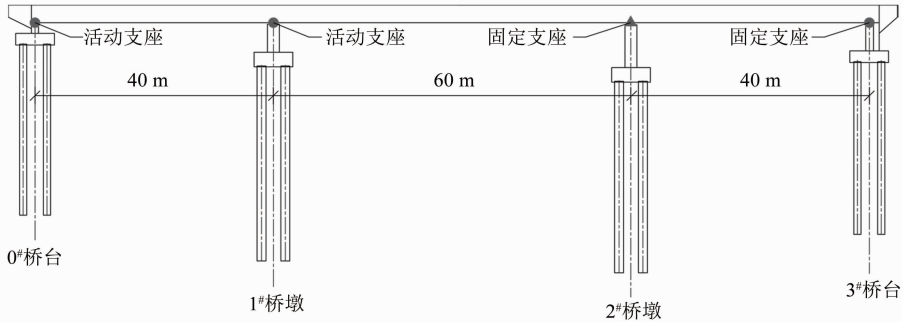


图 3 连续箱梁桥的桥跨布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of span layout of continuous box girder bridge

图 3 中:0#桥台和 3#桥台采用活动支座约束(活动支座约束即约束横向 1 排节点的垂向和横向自由度);1#桥墩布置活动支座;2#桥墩布置固定支座(固定约束支座即约束横向 1 排节点的垂向和横向自由度,并在该排两侧节点的下部均通过弹簧连接 1 个约束全部平动自由度的节点)。

2 模型转换的应用验证

将桥上无缝线路 Revit 模型转换为 ANSYS 模型的代码进行编译调试,将自动生成的 APDL 导入 ANSYS 软件中运行,并对模型进行后处理计算。桥上无缝线路 Revit 模型自动转换为 ANSYS 模型得到的模型效果如图 4 所示。

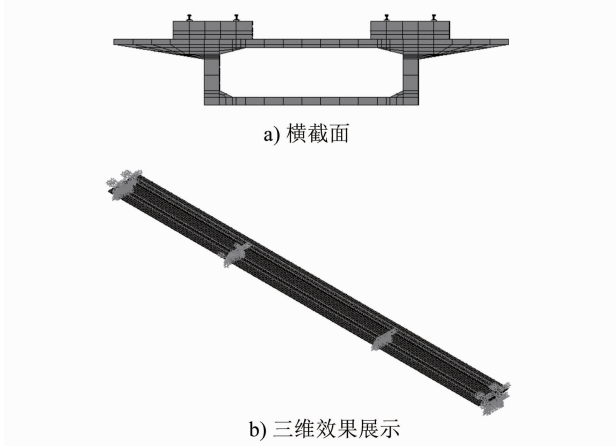


图 4 桥上无缝线路 Revit 模型自动转换为 ANSYS 模型后的模型效果截图

Fig. 4 Model effect screenshot after automatic conversion from Revit model to ANSYS model of CWR on bridge

本文拟定了 2 种研究工况:

1) 温度荷载作用工况,即在 ANSYS 后处理时,在梁体升温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,将钢轨伸缩力和钢轨纵向位移数据提取出来,其计算结果分别如图 5 所示。图 5 中:伸缩力正值代表拉力,负值代表压力;钢轨纵向位移正值代表拉伸变形,负值代表压缩变形。

2) 列车荷载作用工况,即选择出 1 对钢轨,施加我国高速铁路列车荷载换算得到的均布活载(又称为“ZK 荷载”),将钢轨挠曲力和钢轨纵向位移数据提取出来,其计算结果如图 6 所示。图 6 中:挠曲力正值代表拉(应)力,负值代表压(应)力。

文献[11]中采取连续箱梁桥模型三跨的纵向长度为 70 m 、 130 m 及 70 m ,其得到研究得到的钢轨纵向力计算结果如图 7 所示。与文献[11]相比,本研究采用的连续箱梁桥模型跨径较小。因选

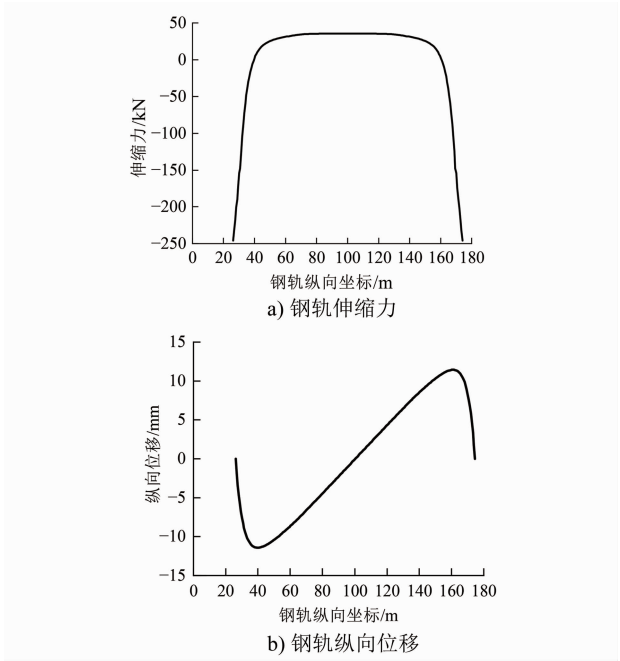


图 5 温度荷载作用工况下的钢轨伸缩力及钢轨纵向位移计算结果

Fig. 5 Calculation results of rail expansion-constriction force and rail longitudinal displacement under temperature load

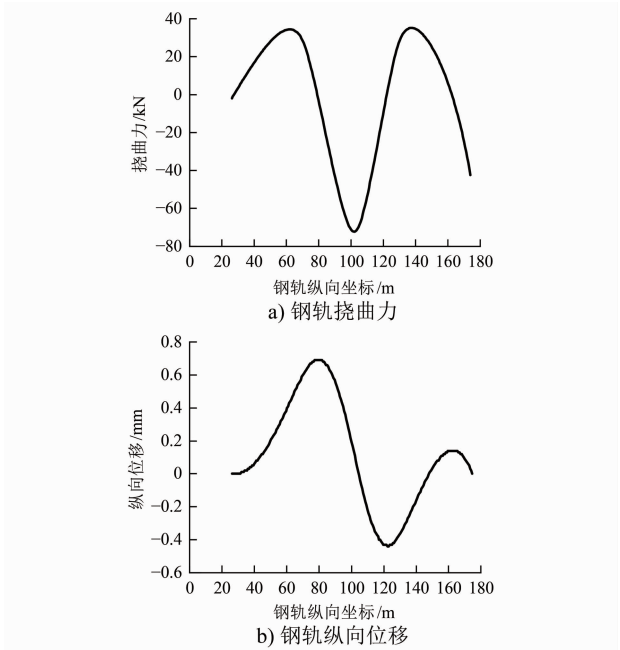


图 6 列车荷载作用工况下的钢轨挠曲力和钢轨纵向位移计算结果

Fig. 6 Calculation results of rail deflection force and longitudinal displacement under train load

取的模型参数及桥梁跨径的不同,图 7 的计算结果与图 5 a)、图 6 a)的纵向力幅值波动范围存在一定

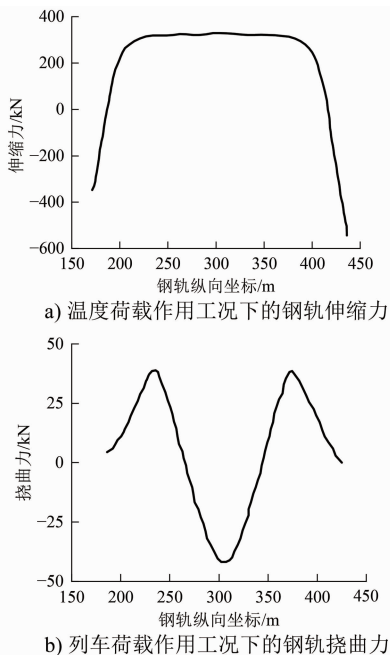


图7 文献[11]中2种工况下钢轨纵向力和钢轨纵向位移的计算结果

Fig. 7 Calculation results of rail longitudinal force and longitudinal displacement under two working conditions in reference [11]

的差异,但二者的数据变化趋势大致相符,由此验证了本文所建模型自动转换的合理性和准确性。

3 结语

1) 本文创建的桥上无缝线路 Revit 模型转换至 ANSYS 模型的二次开发程序,实现了模型几何形状、空间位置和物理材质的准确、高效转换,并能够自动完成前处理过程中模型切割、网格划分及模型约束等操作。

2) 将自动转化得到的模型进行后处理分析,分别对模型施加列车荷载和温度荷载,得到了与之相对应的钢轨纵向力和钢轨纵向位移。通过与文献计算结果的对比,验证了本文所提方法的合理性和准确性。

本文完成了 Revit 模型与 ANSYS 模型之间数据信息的交互,在保证设计模型与计算模型一致的前提下,大大提高了设计人员的工作效率,促进了 BIM 技术城市轨道交通工程数值计算中的交互应用。

参考文献

[1] 宋杰,张亚栋,王孟进,等. Revit 与 Ansys 结构模型转换接口研究[J]. 土木工程与管理学报,2016,33(1):79.

SONG Jie, ZHANG Yadong, WANG Mengjin, et al. Research of model exchange interface between Revit and Ansys[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(1):79.

[2] 吴文豪. 基于 BIM 环境下 T 构桥水平转体施工虚拟仿真技术研究[D]. 南昌:华东交通大学,2020.

WU Wenhao. Research on virtual simulation technology of horizontal rotation construction of T-shaped bridge based on BIM environment [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.

[3] 董卯,郭乃胜,王楠,等. 基于 Revit 与 MIDAS/CIVIL 的桥梁结构模型转换方法[J]. 大连海事大学学报,2020,46(3):101.

DONG Mao, GUO Naisheng, WANG Nan, et al. Bridge structure model conversion method based on Revit and MIDAS/CIVIL[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020, 46(3):101.

[4] 王文芳,杨刚,姜亚丽. 基于 BIM 的桥梁有限元模型转换与结构分析方法[J]. 大连海事大学学报,2021,47(3):111.

WANG Wenfang, YANG Gang, JIANG Yali. BIM based bridge finite element model transformation and structural analysis method[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(3):111.

[5] 王玄玄,黄玉林,赵金城,等. Revit-Abaqus 模型转换接口的开发与应用[J]. 上海交通大学学报,2020,54(2):135.

WANG Xuanxuan, HUANG Yulin, ZHAO Jincheng, et al. Development and application of Revit-Abaqus model exchange interface[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(2):135.

[6] 杨光. 温度荷载作用下地铁车站诱导缝优化配置研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2020.

YANG Guang. Study on optimal configuration of induced joints in subway station under temperature load [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.

[7] 陈述,程永舟,孙鹰,等. 基于 Revit 与 Ansys 的船闸主体结构计算应用[J]. 水运工程,2019(6):140.

CHEN Shu, CHENG Yongzhou, SUN Ying, et al. Application of Revit and Ansys for structural calculation of ship lock[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(6):140.

[8] 姚翔川,郑俊杰,章荣军,等. 岩土工程 BIM 建模与仿真计算一体化的程序实现[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(5):134.

YAO Xiangchuan, ZHENG Junjie, ZHANG Rongjun, et al. Program implementation of BIM modeling and simulation integration in geotechnical engineering[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(5):134.

[9] 赵晓宇,陈子哈,余思令,等. 基于 Revit 与 Ansys 的模型转换自动化研究[J]. 长江信息通信,2021,34(1):119.

ZHAO Xiaoyu, CHEN Zihan, YU Siling, et al. Study on model automatic transformation based on Revit and Ansys [J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(1):119.

(下转第 171 页)

发条件的原因为:目前 1 号线列车空调触发高压开关最频繁的地点为终南街站的存车线及折返线,正线停站时相对触发高压开关情况较少;修改后在钟南街站触发的高压开关次数不会长时间积累,可避免车站偶然高压开关动作触发故障。

2) 修改空调中等故障的判断条件。单个空调制冷系统首次触发高压故障时,压缩机不锁死,停机 10 min 后将自动复位;同一个空调制冷系统的故障触发次数达到 2 次后,再将压缩机锁死,并发出列车空调中等故障提示。修改该判断条件的原因为:较短时段内隧道通风环境不良造成列车空调进风温度过高的情况,在列车速度提高、运行气流增大后即可缓解,此时直接锁死压缩机是不合理的。增加一次压缩机自复位的操作可以避免此类情况导致的误锁死。若存在设备原因造成的高压故障,短时复位后仍会再次触发故障,此时须锁死压缩机,防止故障进一步恶化。

3.3 控制列车在存车线停留时空调的开启时长

经测试,在 1 号线列车 AW0(空载)工况下,列车空调机组可在 10 min 内将车厢温度调整至制冷目标温度范围内的任意值。考虑列车在存车线处进行收发车作业时车厢内并无乘客,可要求司机发车载客前 10 min 再全面开启列车空调制冷,并在退出正线运营时及时关闭列车空调。

3.4 改用变频空调

从图 3 还可发现,发生空调高压故障的列车均为搭载定频空调的列车,而变频空调列车并无此类故障。经查阅资料,定频空调机组外部温度在 48 ℃ 时达到制冷极限,当机组外部温度高于 45 ℃ 时可能会触发高压开关动作,而变频空调可在机组外部温度不高于 55 ℃ 的工况下运行,其温度阈值更高。

经分析,定频空调采用固定开度的毛细管实现制冷剂膨胀,在制冷剂回路高压侧压力过高的情况下,必须立即令压缩机停止工作,以实现空调机组的保护功能。而变频空调采用了可调节的电子

膨胀阀,在检测到高压侧压力偏高的情况下,变频空调可及时调大电子膨胀阀的开度,以降低变频压缩机的运转频率,进而降低回路高压侧的压力。这样虽然会导致空调机组制冷能力略微下降,但扩大了空调可制冷的进风温度范围,使变频空调机组具备应对短时恶劣外温环境的能力。

2020 年,苏州地铁运营方优化了列车空调控制逻辑,并对列车在存车线收发车时空调制冷开启时间进行了有效控制,实施后再没有发生过此类列车空调高压故障。实践证明,通过修改空调软件解决此类故障非常有效,且经济性较好。

4 结语

随着城市轨道交通线路运营方案的持续优化,为满足列车快速投运及节省停车库改扩建成本等要求,在正线隧道内进行停车检修及收发车作业等措施备受关注。这些措施须考虑列车停车位置的隧道环境,避免列车空调系统出现高压故障导致停机,并在夏季开启空调系统前做好控制措施。此外,运营方还可积极掌握各类应用设备软件的编制及修改方法,结合设备使用实际优化设备软件,在设备全寿命周期内不断提升列车的服务可靠度。

参考文献

- [1] 王硕禾,薛平星,张亮. 地铁车辆空调系统地下段故障分析及对策[J]. 国防交通工程与技术, 2015, 13(4): 53.
WANG Shuohu, XUE Pingxing, ZHANG Liang. Analysis of and countermeasures to the malfunctions of the air conditioning system for metro vehicles[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2015, 13(4): 53.
- [2] 范彪,马撰,朱嘉琪. 广州地铁二号线空调系统高压故障原因探讨[J]. 机电工程技术, 2019, 48(3): 171.
FAN Biao, MA Zhuan, ZHU Jiaqi. Discussion on the high pressure fault of air conditioning system of Guangzhou metro line 2[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(3): 171.

(收稿日期:2021-04-25)

(上接第 166 页)

- [10] 黄赢海. 基于建筑信息模型(BIM)的可视化编程与二次开发在桥梁工程上的应用[D]. 广州:华南理工大学,2020.
HUANG Yinghai. Application of visual programming and secondary development based on building information model (BIM) in bridge engineering[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [11] 张鹏飞,桂昊,雷晓燕. 桥上Ⅲ型板式无砟轨道纵向力计算

模型简化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 24.

ZHANG Pengfei, GUI Hao, LEI Xiaoyan. Simplification for calculation model of longitudinal force of type III slab track on bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2019, 47(7): 24.

(收稿日期:2021-11-11)