

交互式参数化轨道交通车辆制动盘热仿真系统<sup>\*</sup>左建勇<sup>\*\*</sup> 王新伟 宋仕强 夏铭辰

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 教授)

**摘要** 目的: 制动盘是车辆制动过程中摩擦热的主要载体, 其热仿真结果是盘体设计中的重要参考部分。针对目前轨道交通车辆制动盘的热仿真效率低与仿真分析操作难度高的问题, 采用 VB 语言与 APDL 语言构建了一种交互式参数化轨道交通车辆制动盘热仿真系统。方法: 介绍了交互式参数化制动盘热仿真原理, 并基于该原理确定了热仿真系统中交互式界面的参数需求; 介绍了制动盘热仿真系统的构成; 以某型车辆为例, 基于制动盘热仿真系统对其制动盘进行仿真计算。结果及结论: 制动盘热仿真系统分为界面操作层、算例实现层和数据操作层三部分; 热仿真系统的仿真结果与文献测试结果的温度误差小于 5%; 制动盘热仿真系统的仿真时间为 6 min, 手动操作 ANSYS 软件仿真时间为 62 min, 制动盘热仿真系统能够大幅提高仿真计算效率。

**关键词** 轨道交通; 车辆; 交互式参数化; 制动盘

**中图分类号** U270.35

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.09.046

## Interactive Parameterized Thermal Simulation System for Rail Transit Vehicle Brake Discs

ZUO Jianyong, WANG Xinwei, SONG Shiqiang, XIA Mingchen

**Abstract** **Objective:** The brake disc serves as the primary carrier of frictional heat throughout vehicle braking process, and its thermal simulation results are crucial reference for brake disc design. To address the issues of low thermal simulation efficiency and high complexity in simulation analysis operation of rail transit brake disc, an interactive parameterized thermal simulation system for rail transit vehicle brake disc is developed using VB language and APDL language. **Method:** The principles of interactive parameterized BDTS (brake disc thermal simulation) is introduced, based on which the parameter requirements for the interactive interface in the thermal simulation system are determined. Based on a specific vehicle model, the composition of the BDTS system is presented. The brake disc

is simulated and calculated using the thermal simulation system. **Result & Conclusion:** The BDTS system consists of three parts: the interface operation layer, the case implementation layer, and the data operation layer. The temperature deviation between the simulation results of the thermal simulation system and the temperature test results in literature is less than 5%. The simulation time for the BDTS system is 6 minutes, while manual operation with ANSYS software takes 62 minutes. Thus, the BDTS system can greatly improve the simulation calculation efficiency.

**Key words** rail transit; vehicle; interactive parameterization; brake disc

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

列车在制动过程中会产生大量能量, 导致制动盘急剧升温, 同时对制动盘的热负荷能力要求也相应有所提高。在制动盘的设计方法中, 需要根据列车的实际运行工况进行仿真分析, 这对缩短设计周期、节约研发成本起到了极其重要的作用。轨道交通车辆的参数和工况类型较多, 仿真过程较为复杂。对于城市轨道交通及高铁车辆而言, 其运行过程存在反复启动和制动操作, 对这类线路的运行工况进行仿真时, 前期载荷计算及输入工作量极大, 仿真研究效率较低。

APDL 语言是 ANSYS 软件内置的参数化设计语言, 利用 APDL 语言可以便捷地组织 ANSYS 软件的操作命令, 实现对 ANSYS 软件的二次开发功能。本文结合 VB 语言与 APDL 语言, 实现对 ANSYS 软件的后台调用与自动化仿真, 并构建交互式界面降低仿真操作难度。在 ANSYS 软件的后台仿真过程中, 利用 VB 语言生成相应的 APDL 命令流, 从而实现仿真中的前处理、计算与后处理的全部过

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51775386)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

程,提高了仿真效率。

本文针对制动盘仿真复杂且耗时的问题,利用 VB 语言建立了一种交互式参数化轨道交通车辆制动盘热仿真系统(以下简称“制动盘热仿真系统”),通过调用 APDL 语言实现制动盘自动化参数仿真,提高了制动盘仿真效率,降低了 ANSYS 仿真软件的操作门槛,为实际工程的应用带来了便捷。

## 1 交互式参数化热仿真原理

### 1.1 制动盘热仿真原理

车辆制动时,夹钳带动闸片夹紧制动盘,制动盘与闸片摩擦生热。在进行制动盘的热耦合仿真时,为了减少仿真时间,根据制动盘循环对称的特点,选取制动盘的 1/8 模型(以轴盘为例)进行仿真。制动盘仿真模型如图 1 所示。

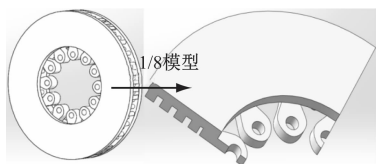


图 1 制动盘仿真模型

Fig. 1 Simulation model of brake disc

制动时,列车从初始速度经制动达到静止状态,摩擦热能主要集中在制动盘中,假设摩擦产生的热量在摩擦面上均匀分布,采用能量折算法计算热流密度  $q(t)^{[1]}$ :

$$q(t) = \eta m a (v_0 - at) / (2nA)$$

式中:

$\eta$ ——制动盘的热吸收率;

$m$ ——轴重;

$n$ ——每轴制动盘数量;

$A$ ——制动盘摩擦面面积;

$v_0$ ——制动初速度;

$a$ ——制动减速度;

$t$ ——制动时间。

在列车制动过程中,制动盘与空气受到强制对流换热作用,热对流载荷主要与列车运行速度和空气参数有关。制动盘在仿真分析时,制动盘仿真载荷施加示意图如图 2 所示。

### 1.2 车辆参数化

由制动盘热仿真原理可知,进行仿真计算时需要确定列车编组、制动盘热效率、制动盘装配形式、列车速度工况及制动盘本构参数,根据仿真所需参

数设计的车辆参数化界面软件截图如图 3 所示。

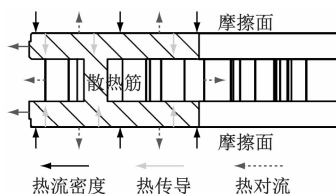


图 2 制动盘仿真载荷施加示意图

Fig. 2 Diagram of brake disc simulation load application



图 3 车辆参数化界面软件截图

Fig. 3 Software screenshot of vehicle parameterization interface

### 1.3 运行工况参数化

轨道交通车辆运行工况类型较多,在进行仿真计算时,将运行工况分为车辆一次制动、两次连续制动、三次连续制动及线路运行等不同类型的运行工况。以三次连续制动为例,由制动盘热仿真原理可知,需要已知车辆的运行速度及减速度等参数。根据仿真所需参数设计的运行工况参数化界面软件截图如图 4 所示。在工况参数界面中,需输入运行过程中的车辆惰行时间、停站时间、制动坡度、制动减速度及制动初速度等参数。

## 2 制动盘热仿真系统

软件系统分为界面操作层、算例实现层和数据操作层三部分。仿真系统整体架构示意图如图 5 所示。界面操作层借助 VB 语言窗体,应用工程中提供的多种控件构建界面。算例实现层包括界面参数处理、ANSYS 软件运算、运算结果参数处理,通过获取界面参数进行计算前预处理,生成完整的 APDL 代码,再利用 VB 语言实现 ANSYS 软件的调用,最后对计算结果进行处理并展示。数据操作层负责调用 ANSYS 软件并存取生成的数据,通过 VB 语言对 ANSYS 软件生成的数据文件进行读写,最

终获得包含仿真温度结果和仿真应力结果的分析 报告。

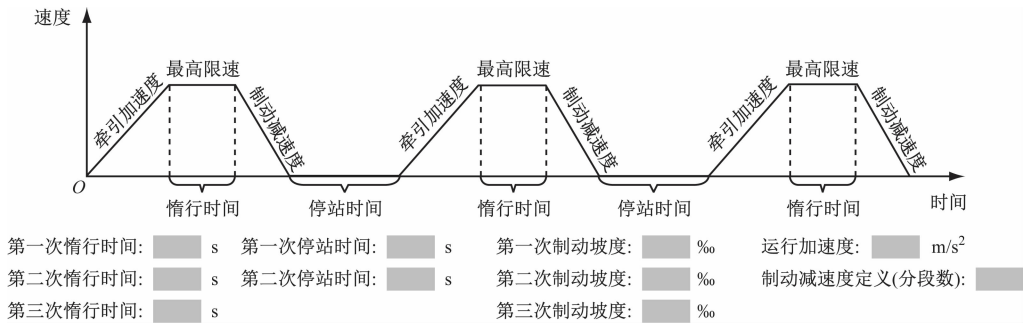


图 4 工况参数界面软件截图

Fig. 4 Software screenshot of working condition parameter interface

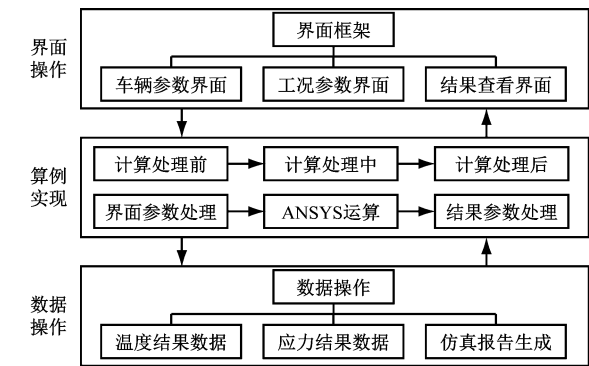


图 5 仿真系统整体架构示意图

Fig. 5 Diagram of simulation system overall architecture

2.1 界面操作层

制动盘热仿真系统基于 VB 语言建立外部人机交互界面,主要包括软件开始界面、参数输入界面及结果展示界面。操作人员在参数输入界面输入仿真计算所需参数,在仿真完成后,可在结果展示界面获取仿真结果。

2.2 算例实现层

2.2.1 界面参数处理

操作人员在交互界面填写仿真所需参数,如车辆参数、制动盘选择、工况参数等。仿真系统根据操作者的参数设置,计算施加在制动盘上的热载荷,并输出 APDL 命令流。命令流主要包括前处理模块、仿真计算模块和后处理模块。APDL 命令流模块组成示意图如图 6 所示。

2.2.2 ANSYS 软件运算

仿真系统将 VB 语言与 ANSYS 软件结合起来,在生成完整的 APDL 命令流之后,使用 VB 语言后台调用 ANSYS 软件进行计算<sup>[2]</sup>。调用程序的关键代码如下:

```
Dim x As Double
```

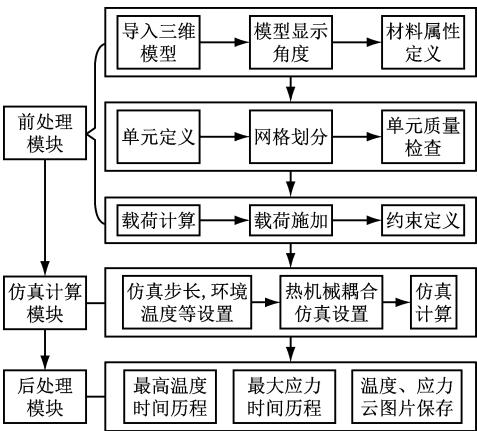


图 6 APDL 命令流模块组成示意图

Fig. 6 Composition diagram of APDL command stream modules

```
x = Shell (" D: \ANSYS \Ansys190 \ANSYSInc \v190 \ansys \bin \intel \ANSYS190. exe-b-pane3fl-iD: \ansys. txt-oD: \result. txt" , vbNormalFocus)
```

2.2.3 运算结果参数处理

ANSYS 软件运算完成后,根据 APDL 命令流生成 jpg 格式的温度云图和应力云图,以及包含结果时间历程数据的 txt 文件。

2.3 数据操作层

结束计算后,制动盘热仿真系统调用 ANSYS 软件生成的数据文件进行读写。利用 VB 语言的图片处理和字符串处理功能,在结果展示界面显示仿真结果。将仿真结果插入 Word 报告对应位置,生成一份完整的仿真报告。

3 仿真案例

以某型车辆为例,基于制动盘热仿真系统对其制动盘进行仿真计算,获得制动盘的温度和应力计

算结果,并将仿真结果与文献[3]的试验结果进行对比。同时,由于手动操作 ANSYS 软件需要进行参数定义、施加载荷计算、网格划分等繁琐操作,记录制动盘热仿真系统完成仿真所需时间及手动操作 ANSYS 软件完成相同案例仿真所需时间,并对二者进行对比分析。

3.1 仿真参数

计算车辆在最大载荷状态、平直道条件下的制动盘一次纯空气紧急制动结果。车辆及工况主要参数如表 1 所示。

表 1 车辆及工况主要参数<sup>[3]</sup>

参数	取值
车辆轴重/t	≤17
车辆运行速度/(km/h)	250
制动减速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.24
每轴制动盘数量/个	3
环境温度/℃	25
车轮直径/mm	920

3.2 仿真结果

通过制动盘热仿真系统对上述模型进行仿真,仿真结束后,在仿真结果界面查看制动盘的温度仿真结果和应力仿真结果,如图 7 所示。

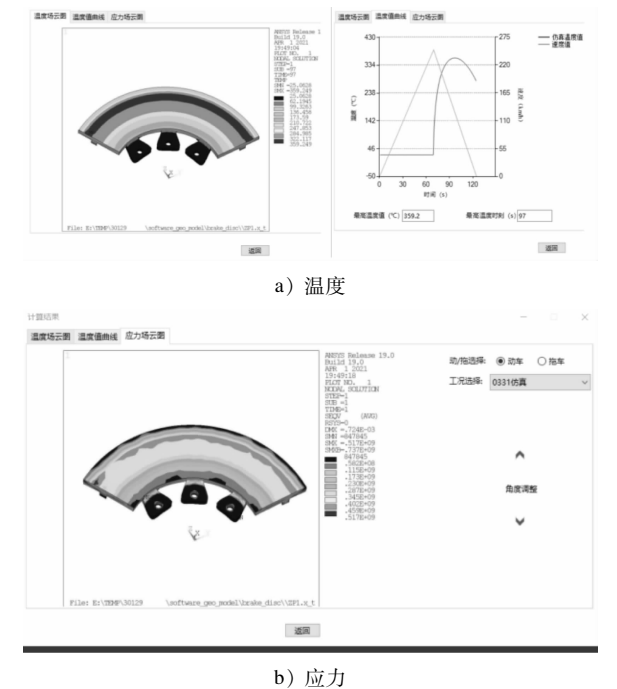


图 7 制动盘热仿真系统仿真结果软件截图  
Fig.7 Software screenshot of the simulation results of brake disc thermal simulation system

3.3 仿真结果对比

对比制动盘温度仿真结果与文献[3]的测试结果,如图 8 所示。由图 8 可知,整个制动过程中仿真结果与试验结果的温度误差在 5% 范围内,证明制动盘热仿真系统的计算结果具有较高的准确性。

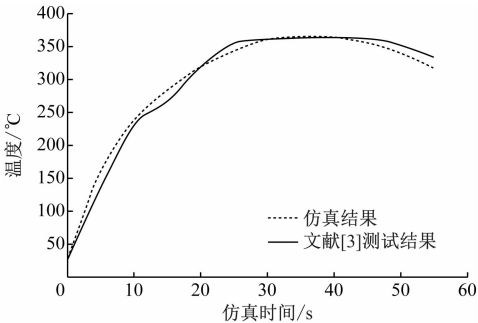


图 8 制动盘温度仿真结果与测试结果对比  
Fig. 8 Comparison of brake disc temperature simulation results and test results

制动盘热仿真系统的仿真时间为 6 min,手动操作 ANSYS 软件仿真时间为 62 min。这是由于热仿真系统无需进行繁琐的参数定义、网格划分、载荷施加、结果提取等复杂的 ANSYS 界面处理操作。由此可知,制动盘热仿真系统能够大幅提高仿真计算效率。

4 结论

- 1) 介绍了交互式参数化轨道交通车辆制动盘热仿真系统,阐明了热仿真系统的实现过程。
- 2) 以某型车辆为例,通过制动盘热仿真系统进行仿真分析,并将仿真结果与文献试验结果进行对比,验证制动盘热仿真系统的准确性及可靠性。
- 3) 制动盘热仿真系统将仿真计算时间从手动操作的 62 min 减少至 6 min,可以有效提高仿真计算效率。

参考文献

[1] 周素霞,孙晨龙,赵兴晗,等. 城际快速列车铸钢制动盘三维瞬态温度场和应力场仿真分析[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 33.  
ZHOU Suxia, SUN Chenlong, ZHAO Xinghan, et al. Simulation and analysis of 3D transient temperature field and stress field of cast steel brake disc of intercity trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 33.  
[2] 黄启斌,杨晓翔,邓道林. 基于 VB 的 ANSYS 二次开发及其在关节轴承结构分析中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(1): 149.

(下转第 258 页)

阶段为了网络可靠性而采用的地铁供电系统站内双倍交换机组建双星型冗余网络方案,所提保护方案省去了交换机的使用,使得变电站内装置数量减少,故障概率降低,运维工作量减少。此外,所提保护方案中所有继电保护装置不必将光纤汇总至交换机处接线,减少了现场布线的复杂度,使得工程前期成本和后期运维费用大大降低,其经济效益可观。

## 6 结语

本文提出一种基于 HSR 的地铁供电系统跨站网络化保护方案,并给出了具体的组网方案。HSR 网络能够实现在地铁供电系统继电保护网络发生单节点故障情况下的无缝切换,满足地铁供电系统对信息传输实时性和可靠性的要求,同时其前期工程成本和后期运维成本都能够大大降低,具有一定的推广应用价值,可为地铁供电系统继电保护跨站网络化保护提供参考。

## 参考文献

- [1] 王凯建,隋佳斌,陈海辉. 基于 GOOSE 通信的智能保护装置在青岛地铁中压供电网络的应用[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(2): 109.  
WANG Kaijian, SUI Jiabin, CHEN Haihui. Application of intelligent relay protection device based on GOOSE communications in Qingdao Metro Line 11[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(2): 109.
- [2] 何治新,冯志翔,高宇膺,等. 基于 GOOSE 通信技术的地铁隔离开关数字联锁方案[J]. 电气化铁道, 2021, 32(2): 81.

### (上接第 247 页)

- HUANG Qibin, YANG Xiaoxiang, DENG Daolin. Spherical plain bearing structural analysis based on VB and ANSYS secondary development[J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(1): 149.
- [3] 郭奇宗. 基于现车模型和制动控制的基础制动装置热负荷研

### (上接第 251 页)

- [2] 钟国. 地铁车站的一种新型暗挖施工工法: 拱盖法[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(8): 145.  
ZHONG Guo. Arch-cover method: a new subsurface excavation construction for metro stations[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(8): 145.
- [3] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.  
SHI Zhongheng. Design and construction of underground railway [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2006.
- [4] 张羽. 地铁车站建筑管线综合设计思路研究[J]. 工程技术研

究, 2018(15): 177.

HE Zhixin, FENG Zhixiang, GAO Yuying, et al. GOOSE communication technology-based digital interlocking scheme for subway disconnectors[J]. Electric Railway, 2021, 32(2): 81.

- [3] 陶文伟,高红亮,杨贵,等. 智能变电站过程层冗余组网模式及网络延时累加技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 124.  
TAO Wenwei, GAO Hongliang, YANG Gui, et al. Research on redundant networking mode and network delay accumulation technology of smart substation process layer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 124.
- [4] 戴丽君,杨立新,张喜海,等. 城市轨道交通中压供电网络分区划分的工程应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 158.  
DAI Lijun, YANG Lixin, ZHANG Xihai, et al. Engineering application of partition of medium voltage power supply network in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 158.
- [5] 周华良,郑玉平,杨志宏,等. 面向智能变电站三网合一网络的 PRP/HSR 实现方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 216.  
ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, YANG Zhihong, et al. Implementation scheme of three-in-one network based on PRP/HSR in smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 216.
- [6] 谢黎. 并行冗余和高可靠无缝环网冗余技术在智能变电站中的应用[J]. 电气技术, 2021, 22(9): 103.  
XIE Li. Application of parallel redundancy and high-availability seamless redundancy technology in smart substation[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(9): 103.
- [7] 余龙,吴剑泉,赖沛鑫,等. 地铁智能化变电所过程层网络结构分析[J]. 电气化铁道, 2019, 30(1): 90.  
YU Long, WU Jianquan, LAI Peixin, et al. Analysis on network architecture of process layer of subway intelligent substation[J]. Electric Railway, 2019, 30(1): 90.

(收稿日期:2021-11-09)

真分析[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(4): 21.  
GUO Qizong. Thermal load simulation analysis of basic brake device based on EMU's brake control[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(4): 21.

(收稿日期:2021-04-06)

- ZHANG Yu. Study on comprehensive design of pipelines in subway station building [J]. Metallurgical Collections, 2018(15): 177.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Building & Architecture Press, 2014.

(收稿日期:2022-07-28)