

# 基于热阻模型的城市轨道交通铝合金车辆围护结构传热系数计算方法

王云霄<sup>1</sup> 王 婧<sup>2</sup> 谭文才<sup>1</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春; 2. 吉林省林业重点工程资金管理中心, 130022, 长春)

**摘 要** [目的]根据城市轨道交通铝合金车辆围护结构的特点,研究一种基于热阻模型的  $K$  值计算方法,以此提高计算准确度和效率。[方法]将围护结构分为三个层级,根据热阻串并联关系建立了围护结构的热阻模型。位于第三层级的串联热阻,除包括对流热阻、车体热阻和隔热材料热阻外,还包括将传热路径上所有其他热阻等效替代的“简化热阻”。通过理论计算和试验标定的方法确定上述四个热阻后,即可通过热阻串并联关系计算出围护结构的总热阻,进而计算出  $K$  值。[结果及结论]与试验结果对比后发现,该方法的计算结果相对偏差在 7% 以内。由于目前  $K$  值试验数据较少,因此需要持续积累数据并标定该热阻模型,以此达到不断提高  $K$  值计算准确度的目标。基于该方法还开发出了应用程序,提高了计算效率。

**关键词** 城市轨道交通; 铝合金车辆; 围护结构; 热阻模型; 传热系数

**中图分类号** U270.2

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.08.043

## Calculation Method for Heat Transfer Coefficient of Urban Rail Transit Aluminum-alloy Vehicle Enclosure Structure Based on Thermal Resistance Model

WANG Yunxiao<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>, TAN Wencai<sup>1</sup>

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. Fund Management Centre of Major Forestry Project, Jinlin Province, 130022, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] According to the characteristics of urban rail transit aluminum-alloy vehicle enclosure structure, a  $K$ -value calculation method based on thermal resistance model is studied, thereby improving calculation accuracy and efficiency. [Method] The above enclosure structure is divided into three tiers, with an enclosure structure thermal resistance model established according to the series and parallel relationships of thermal resistances. The series thermal resistance in the third tier includes convective resistance, carbody resistance, and insulation material resistance, as well as a 'simplified resistance' that can equivalently replace all other thermal resistances along the heat transfer path. By determining the four aforementioned

thermal resistances through theoretical calculations and experimental calibration, the total thermal resistance of the enclosure structure can be calculated using the series and parallel relationships of thermal resistances, and subsequently deriving the  $K$ -value. [Result & Conclusion] When compared with experimental results, the calculation accuracy of this method is found to be within 7%. Due to the currently limited availability of  $K$ -value experimental data, it is necessary to continually accumulate data and calibrate this thermal resistance model to continuously enhance the accuracy of  $K$ -value calculations. An application based on this method is also developed to improve calculation efficiency.

**Key words** urban rail transit; aluminum-alloy vehicle; enclosure structure; thermal resistance model; heat transfer coefficient

城市轨道交通车辆的传热系数  $K$  值反映了其隔热性能的优劣,其数值上等于单位时间内通过单位面积隔热壁的传热量,是轨道交通车辆空气调节领域中的一项重要参数。车辆制造完成后,通常依据 EN 14750-2:2006《铁路应用—城市和郊区铁路车辆用空调—第 2 部分:型式试验》等标准执行试验以获取  $K$  值。在车辆设计阶段,通常采用仿真分析等方法计算  $K$  值。轨道交通车辆的传热过程本质上是三维的,且围护结构中除车体、隔热材料及墙板外,还有许多冷桥和空腔,这给三维计算  $K$  值带来了困难。因此,简化的二维仿真或典型部件的三维仿真是当前仿真分析的主要思路<sup>[1-4]</sup>。

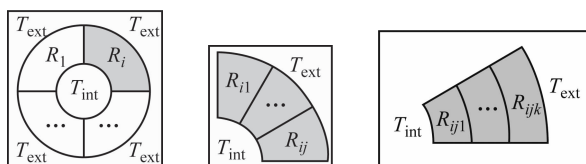
基于上述思路开展的仿真分析工作需花费一定的时间,因此研究出一种准确而快速的  $K$  值计算方法及其应用程序,在车辆设计阶段具有明显的实用价值。

## 1 热阻模型

### 1.1 热阻模型的建立

将车辆围护结构分为三个层级。车辆顶部、侧

部、底部及端部为第一层级结构,其热阻  $R_i$  ( $i$  为本层级结构序号) 之间为并联关系。每个第一层级结构又可划分为多个第二层级结构,其热阻  $R_{ij}$  ( $j$  为第二层级结构序号) 之间亦为并联关系。每个第二层级结构在热量传递方向存在多个第三层级结构,其热阻  $R_{ijk}$  ( $k$  为第三层级结构序号) 之间为串联关系。基于上述一维传热假设,建立热阻模型,如图 1 所示。



a) 第一层级结构 b) 第二层级结构 c) 第三层级结构

注:  $T_{\text{ext}}$  为车外空气温度;  $T_{\text{int}}$  为车内空气温度。

图 1 热阻模型

Fig. 1 Thermal resistance model

## 1.2 串联热阻的分解

对某第二层级结构进行串联热阻的分解:

$$R_{ij} = R_{ij1} + R_{ij2} + R_{ij3} + R_{ij4} + R_{ij5} \quad (1)$$

式中:

- $R_{ij1}$ ——车内空气与车辆内壁的对流传热热阻;
- $R_{ij5}$ ——车外空气与车辆外壁的对流传热热阻;
- $R_{ij4}$ ——铝合金车体的热阻;
- $R_{ij3}$ ——传热方向上隔热材料的热阻;
- $R_{ij2}$ ——传热方向上除了上述热阻之外的等效热阻,即简化热阻。

### 1.2.1 对流换热热阻

根据资料<sup>[5]</sup>,取强制对流传热系数为  $100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,取自然对流传热系数为  $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,即单位面积上的热阻分别  $0.01 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  和  $0.1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ 。

### 1.2.2 铝合金车体热阻

铝合金车体为型材空腔结构,铝合金导热系数较大,热阻较小。考虑到其他热阻数值普遍高出车体热阻数值若干数量级,因此在粗略计算中可忽略该项。

### 1.2.3 隔热材料热阻

设  $\delta$  和  $\lambda$  分别为隔热材料的厚度和导热系数,则单层隔热材料单位面积上的热阻为  $\delta/\lambda$ 。

### 1.2.4 简化热阻

引入简化热阻的概念,用来整体替代传热路径上除了对流热阻、车体热阻、隔热材料热阻外的全部其他热阻。通过简化,有如下两种方法计算  $K$  值。

方法一:以某既有车型为研究对象,对简化热阻取一个固定值,进而计算出  $K$  值预估值;根据  $K$  值试验结果确定  $K$  值预估值对于该车型的偏差;通过对其他现有车型进行重复工作可得到多个偏差,进而计算出全体偏差的平均值以及  $K$  值计算结果的修正系数;在新车型的设计中,可使用该方法计算出  $K$  值并预估出偏差。

方法二:以某既有车型为研究对象,对简化热阻取 1 组扫描值,进而得出系列  $K$  值预估值;根据  $K$  值预估值与试验结果的偏差反推出准确的简化热阻的数值。在新车型的设计中,参考产品平台既有车型单位面积上的简化热阻数值,估算出新车型的  $K$  值。

本文首先采用方法一进行研究。对于单位面积上的简化热阻,暂定其与单位面积上车门的热阻数值相当。车门的  $K$  值通常在  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  左右,故暂估取单位面积上的简化热阻为  $0.20 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ 。然后采用方法二进行研究,并对比两种方法在准确度上的差异。

### 1.2.5 贯通道

进行  $K$  值试验时需对车辆端部贯通道区域进行封堵,封堵结构的传热系数不大于  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ <sup>[1]</sup>。因此,为了保证仿真和试验的条件一致性,在仿真中需考虑端部贯通道区域,且该区域的  $K$  值取  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 。

## 2 $K$ 值计算应用程序的开发

根据上述热阻模型开发了一款  $K$  值计算应用程序,使用者只需输入相关参数即可实现一键建模和输出结果。

### 2.1 物理场参数及结构层级划分

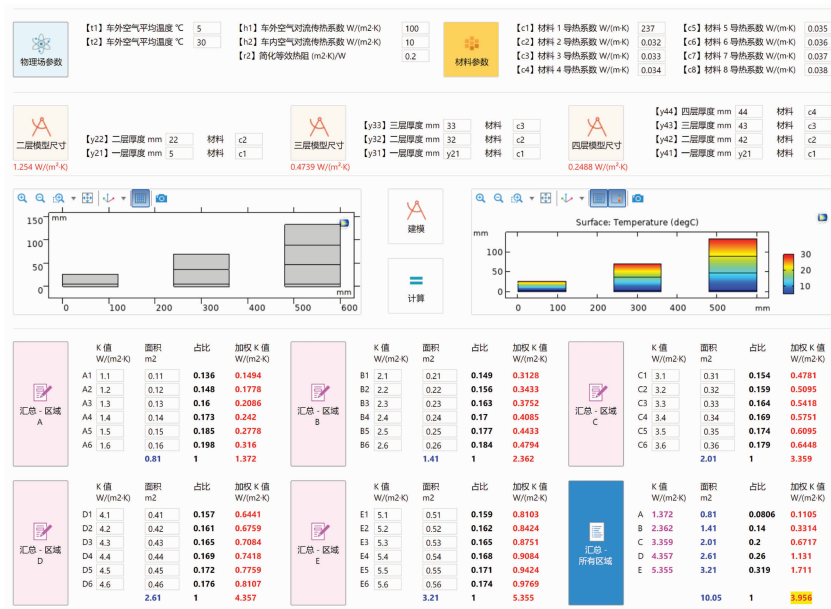
按照程序输入车内外空气平均温度、对流换热系数、简化热阻,以及材料的导热系数等参数。同时,根据车辆结构特点进行结构层级划分。将全部参数输入完毕后按下建模键,即可在图形窗口展示模型,模型宽度固定为  $120 \text{ mm}$ 。按下计算键即可在图形窗口中展示列车的温度分布,同时输出模型的热流密度,并计算出  $K$  值。

### 2.2 程序界面

基于一维热阻模型的铝合金轨道交通车辆  $K$  值计算程序界面如图 2 所示。

### 2.3 $K$ 值的计算结果(方法一)

对 6 辆城市轨道交通铝合金车辆进行  $K$  值试

图2 基于一维热阻模型的铝合金轨道交通车辆  $K$  值计算程序界面截图Fig. 2 Interface screenshot of aluminum-alloy rail transit vehicle  $K$ -value calculation program based on 1D thermal resistance model

验,并按方法一进行仿真分析。表1 为方法一下  $K$  值仿真与试验结果对比表。

表1 方法一下  $K$  值仿真与试验结果对比表  
Tab.1 Comparison of  $K$ -value simulation and experimental results by method I

车辆	$K$ 值/( $W/(m^2K)$ )		$K$ 值相对偏差/%
	仿真结果	试验结果	
车辆1	1.99	2.30	-13
车辆2	2.09	2.36	-11
车辆3	2.19	2.37	-8
车辆4	2.27	2.45	-7
车辆5	2.08	2.16	-4
车辆6	2.00	2.36	-15

从表1 可以看出:采用方法一,单位面积上的简化热阻取固定值  $0.20 m^2K/W$ ,基于上述6 个样本得出的  $K$  值仿真结果与试验结果的平均偏差为  $-10\%$ ,即修正系数为  $1/(1-10\%)$ 。采用该修正系数对表1 中  $K$  值的仿真结果进行修正。表2 为采用方法一修正后  $K$  值的仿真与试验结果对比表。由表2 可见: $K$  值仿真结果与试验结果的相对偏差在  $7\%$  以内。

#### 2.4 $K$ 值的计算结果(方法二)

在表1 所列的6 辆城市轨道交通铝合金车辆中,车辆1 与车辆2 以及车辆3 与车辆4 各自属于不同的产品平台。通过对车辆1 和车辆3 进行简化

表2 采用方法一修正后  $K$  值的仿真与试验结果对比表  
Tab.2 Comparison of  $K$ -value simulation and experimental results after correction by method I

车辆	$K$ 值/( $W/(m^2K)$ )		$K$ 值相对偏差/%
	仿真结果	试验结果	
车辆1	2.21	2.30	-4
车辆2	2.32	2.36	-2
车辆3	2.43	2.37	+3
车辆4	2.52	2.45	+3
车辆5	2.31	2.16	+7
车辆6	2.22	2.36	-6

热阻的估值扫描,得到方法二下车辆1 和车辆3  $K$  值仿真与试验对比结果,见表3 和表4。

表3 方法二下的车辆1  $K$  值仿真与试验结果对比表  
Tab.3 Comparison of vehicle 1  $K$ -value simulation and experimental results by method II

简化热阻估值/ ( $m^2K/W$ )	$K$ 值/( $W/(m^2K)$ )		$K$ 值相对偏差/%
	仿真结果	试验结果	
0.20	1.99	2.30	-13
0.15	2.20	2.30	-4
0.14	2.25	2.30	-2
0.13	2.30	2.30	0

从表3 和表4 的试验结果可反推出适用于对应产品平台车辆准确的简化热阻分别为  $0.13 m^2K/W$  和  $0.15 m^2K/W$ 。将该数值应用于车辆2 和车辆4

表4 方法二下的车辆3  $K$  值仿真与试验结果对比表  
Tab.4 Comparison of vehicle 3  $K$ -value simulation and experimental results by method II

简化热阻估值/ ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )	$K$ 值/( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )		$K$ 值相对 偏差/%
	仿真结果	试验结果	
0.20	2.19	2.37	-8
0.16	2.34	2.37	-1
0.15	2.39	2.37	+1

的  $K$  值仿真中。方法二下  $K$  值仿真与试验结果对比如表5所示。由表5可见: $K$  值仿真结果与试验结果的相对偏差在1%以内。

表5 方法二下的车辆2和4  $K$  值仿真与试验结果对比表  
Tab.5 Comparison of vehicles 2 and 4  $K$ -value simulation and experimental results by method II

车辆	$K$ 值/( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )		$K$ 值相对 偏差/%
	仿真结果	试验结果	
车辆2	2.39	2.36	1
车辆4	2.46	2.45	0

### 3 结语

1) 通过建立一维热阻模型,并给出两种简化热阻的取值方法,使计算整车  $K$  值的工作得到简化。

2) 方法一基于全体样本提出先估算后修正思路,其修正系数和计算结果反映出全体样本的平均准确度。而方法二基于本产品平台车型的样本,提出定向估值的思路。

3) 采用方法一时,全体样本的  $K$  值相对偏差在7%以内,显示出较好的普适度,然而其结果的准确度受到被计算车型的简化热阻与现有全体样本平均水平的接近程度的影响。简化热阻的计算值越接近平均水平,则修正系数和计算结果越准确,因而具有一定的不确定性。采用方法二时, $K$  值的相对偏差在1%以内,准确度高且稳定性较好,但受制于本产品平台车型相关数据的存在或样本数量的充足程度。上述结论是基于有限样本得到的,因此有必要大量积累仿真与试验对比数据,以此达到不断提高计算准确度的目标。

4) 采用  $K$  值计算应用程序,能够方便和直观地进行建模和结果输出;其耗时上比  $K$  值的常规仿真大幅缩减,提高了工作效率。该应用程序在城市轨道交通铝合金车辆的隔热方案设计以及快速校核工作中具有明显的实用价值。

### 参考文献

- [1] 宋纯,程刚,臧建彬. 高速列车车体传热系数数值计算分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(3): 77.  
SONG Chun, CHENG Gang, ZANG Jianbin. Analysis of numerical calculation for heat transfer coefficient of high-speed train car-body[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(3): 77.
- [2] 曹先伟,王常宇,夏春晶. 基于数值模拟计算的A型动车组围护结构传热系数优化计算[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(12): 29.  
CAO Xianwei, WANG Changyu, XIA Chunjing.  $K$ -value optimization calculation of type A high-speed train based on numerical simulation[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(12): 29.
- [3] 伍钊,丁叁叁,梁习锋,等. 列车车体传热系数数值计算方法对比分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3086.  
WU Fan, DING Sansan, LIANG Xifeng, et al. Comparative study on numerical evaluation of the heat transfer coefficient of train body[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3086.
- [4] 于会龙,王建,王云霄,等. 轨道车辆传热系数仿真分析与试验研究[J]. 科学技术创新, 2021(23): 39.  
YU Huilong, WANG Jian, WANG Yunxiao, et al. Simulation analysis and experimental study on heat transfer coefficient of rail vehicles[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(23): 39.
- [5] 傅秦生,赵小明,唐桂华. 热工基础与应用[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2016.  
FU Qinsheng, ZHAO Xiaoming, TANG Guihua. Fundamentals and applications of thermotechnics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2016.

· 收稿日期:2022-04-06 修回日期:2022-05-23 出版日期:2024-08-10  
Received:2022-04-06 Revised:2022-05-23 Published:2024-08-10  
· 通信作者:王云霄,高级工程师, wangyunxiao.ck@crrecg.cc  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com