

# 轨道交通铝合金导电轨载流量计算与试验对比分析

张鹏飞

(中铁高铁电气装备股份有限公司, 721013, 宝鸡)

**摘要** [目的] 铝合金导电轨普遍应用于轨道交通供电系统,但铝合金导电轨的允许载流量计算值往往同测试值间存在较大的偏差,给工程设计带来不便。因此,有必要研究铝合金导电轨允许载流量与计算载流量之间的关系。[方法] 基于 Chapoulie-Rols 公式和热平衡方程,分别计算了 6 种不同形状及截面的常见铝合金导电轨允许载流量,并对 6 种铝合金导电轨进行了允许载流量试验测试;对比分析了导电轨载流量理论计算值与试验测试值间的偏差。[结果及结论] 在 Chapoulie-Rols 公式中引入修正系数,可以让载流量计算值更接近铝合金导电轨实际允许载流量;铝合金导电轨的轨温在加载电流试验 3 h 后基本达到平稳状态。

**关键词** 轨道交通; 铝合金导电轨; 载流量计算

**中图分类号** U284.2

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.07.041

## Comparative Analysis of Calculated and Experimental Current Carrying Capacities of Rail Transit Aluminum Alloy Conductive Rails

ZHANG Pengfei

(China Railway High-speed Electrification Equipment Co., Ltd., 721013, Baoji, China)

**Abstract** [Objective] AAC (aluminum alloy conductive) rails are widely used in rail transit power supply systems. However, a significant deviation often exists between the calculated and tested values of the permissible current carrying capacity of AAC rails, which poses inconvenience to engineering design. Therefore, it is necessary to study the relationship between the permissible current carrying capacity and the calculated current carrying capacity of AAC rails. [Method] Based on the Chapoulie-Rols formula and the thermal balance equation, and the permissible current carrying capacities are calculated for six common AAC rails with different shapes and cross-sections respectively. Subsequently, experiments are conducted to test the permissible current carrying capacities of these six AAC rails. A comparative analysis of the difference is performed between theoretical calculated and experimental test values of the conductive rail current carrying capacity. [Result & Conclusion] Correction coefficients are introduced into the Chapoulie-Rols formula, which allows for the calculated cur-

rent carrying capacity closer to the actual permissible current carrying capacity of AAC rails. The rail temperature of AAC rails basically stabilizes after 3 hours of current loading test.

**Key words** rail transit; aluminum alloy conductive rail; current carrying calculation

铝合金导电轨以传输电流大、质量轻、安装方便等优点,被广泛应用于地铁、市域轨道交通、跨座式单轨、磁悬浮交通、有轨电车等多种制式的轨道交通。不同制式的轨道交通对导电轨的安装空间、截面尺寸、载流量需求等各不相同。为满足不同制式的轨道交通需求,现有导电轨的结构尺寸及规格参数众多,而当铝合金导电轨截面结构尺寸相差较大时,其载流量会有明显的差别。因此,在设计铝合金导电轨截面结构尺寸时必须兼顾其最大载流量,但铝合金导电轨最大载流量的计算值往往与测试值存在偏差。

本文选取了 6 种不同形状及截面的常见铝合金导电轨,利用不同计算公式分别计算了 6 种铝合金导电轨允许载流量,并对 6 种铝合金导电轨进行了允许载流量试验测试,对比分析了导电轨载流量理论计算值与试验测试值的关系。本文研究可为铝合金导电轨工程应用提供理论基础。

## 1 铝合金导电轨应用概况

由于轨道交通供电制式、列车受电弓或集电器形状、列车行驶限界等有所差异,导致轨道交通供电方式有所不同,如接触网和导电轨,这两者也是目前轨道交通的主要供电方式。接触网中的刚性悬挂汇流排是成熟的异形铝导电轨,主要用于承载电流,通过夹持接触导线与受电弓接触供电。常规的导电轨是由不锈钢带和铝轨复合成型的,铝轨主要用于承载电流,不锈钢带与集电器接触供电。

轨道交通中的异形铝导电轨根据用途可以分为铝排和铝轨。铝排主要指夹持接触导线的汇流

排;铝轨主要指导电轨的铝本体。由于载流需求不同,异形铝导电轨的形状、截面、大小尺寸差别较大。刚性汇流排存在  $\pi$  型和 T 型两种结构,其截面示意图如图 1 a) 和图 1 c) 所示。导电轨从结构上分为工型和 C 型两种,其导电轨截面示意图如图 1 b) 和图 1 d) 所示。由于轨道交通制式及列车所需载流的不同,各种导电轨的尺寸相差较大,目前应用较多的导电轨载流量一般为 1 000 ~ 6 000 A。

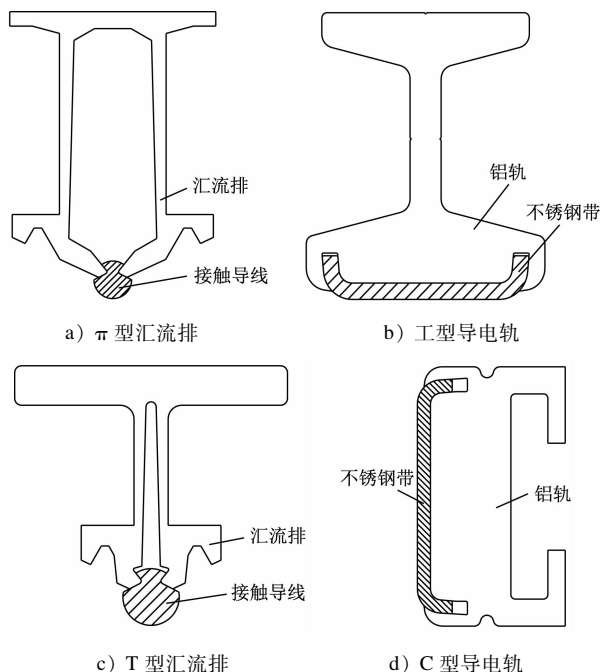


图 1 铝合金导电轨截面示意图

Fig. 1 Diagram of aluminum alloy conductor rail cross-section

## 2 铝合金导电轨载流量计算式

### 2.1 文献中的设计值

在《电力工程电气设计手册(电气一次部分)》中详细说明了矩形、槽形、圆管形铝导体的长期载流量。由于本文讨论的是异形截面的铝合金导电轨,因此《电力工程电气设计手册(电气一次部分)》中的相关内容仅作为简单参考。

### 2.2 行业经验公式

目前,根据 Chapoulié-Rols 公式,铝导体的载流量  $I_d$  (单位 A) 可以表示为<sup>[1-2]</sup>:

$$I_d = 5k \sqrt{AU}^{0.39} \quad (1)$$

式中:

$A$ ——铝导体截面积,单位  $\text{mm}^2$ ;

$U$ ——铝导体截面周长,单位  $\text{mm}$ ;

$k$ ——影响系数。

影响系数  $k$  可以表示为:

$$k = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \quad (2)$$

式中:

$k_1$ ——空气中的材质性能常数,取为 1.01;

$k_2$ ——与环境温度有关的因数,当环境温度为 40  $^{\circ}\text{C}$  时取为 1.01;

$k_3$ ——与导体允许温升有关的因数,当温度增加 45  $^{\circ}\text{C}$  时取为 1.07;

$k_4$ ——与环境有关的因数,当在露天、无强迫对流时取为 1.02;

$k_5$ ——与导体表面污染程度有关的因数,当导体表面洁净时取为 1.02。

由式(1)和式(2)可知,铝导体的载流量与其截面、周长及环境相关因数等因素有关。需要注意的是,当铝导体内腔不封闭时,截面周长为外周长与内周长之和;当内腔完全封闭时,截面周长只计算外周长。

### 2.3 热平衡方程推导公式

由热平衡方程可获得不计日照时的导体载流量  $I$  (单位 A),可以表示为:

$$I = \sqrt{\frac{Q_l + Q_r}{R}} \quad (3)$$

式中:

$Q_l$ ——导体对流散热量,单位  $\text{W}/\text{m}$ ;

$Q_r$ ——导体辐射散热量,单位  $\text{W}/\text{m}$ ;

$R$ ——导体电阻,单位  $\Omega$ 。

$Q_l$  和  $Q_r$  可以表示为:

$$Q_l = \alpha_l (T_w - T_0) A_l \quad (4)$$

$$Q_r = 5.7\varepsilon \left[ \left( \frac{273 + T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + T_0}{100} \right)^4 \right] A_r \quad (5)$$

式中:

$\alpha_l$ ——对流散热系数,单位  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$T_w$ ——导体温度,单位  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_0$ ——周围空气温度,单位  $^{\circ}\text{C}$ ;

$A_l$ ——单位长度导体散热面积,单位  $\text{m}^2/\text{m}$ ;

$\varepsilon$ ——导体材料的辐射系数,表面磨光的铝材料取为 0.039 ~ 0.057,表面不光滑的铝材料取为 0.055;

$A_r$ ——单位长度辐射散热表面积,单位  $\text{m}^2/\text{m}$ 。

将式(4)和式(5)代入式(3),可以得到  $I$ , 则有:

$$I = \left\{ \alpha_1 (T_w - T_0) A_1 + 5.7 \varepsilon \left[ \left( \frac{273 + T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + T_0}{100} \right)^4 \right] A_f / R \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

### 3 铝合金导电轨载流量试验测试

#### 3.1 试验设备

选用大电流直流温升试验机,其型号为 HNDL-10 kA,最大输出电流为 DC 10 kA,电流稳定度为 0.2%,温度测量准确度为  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。HNDL-10 kA 温升交直流大电流发生器配有高精度进口罗氏电流传感器,能方便读取试验电流值。该设备由控制部分、调压部分、升流部分、温度测量装置及试验平台等组成<sup>[2]</sup>。

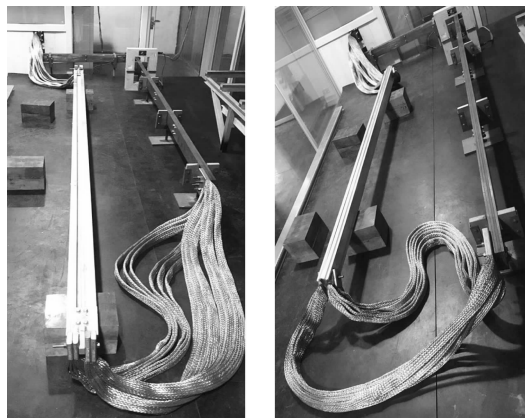
#### 3.2 试验方法

将导电轨平放于绝缘平台上,两端用电缆连接板与母线连接,导电轨上、下面及轨腰部位分别贴有热电偶测量轨温。使用空调加热装置将室温加热至  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并加载电流,通电 4 h 后停止试验,系统每隔 30 min 自动测量一次轨温,并留存记录。

#### 3.3 试验测试结果

选取  $\pi$  型汇流排、额定电流为 4 000 A 的工型导电轨(以下简称“4 000 A-工型导电轨”)、额定电流为 4 000 A 的 C 型导电轨(以下简称“4 000 A-C 型导电轨”)、额定电流为 3 000 A 的工型导电轨(以下简称“3 000 A-工型导电轨”)、额定电流为 3 000 A 的工型空心导电轨(以下简称“3 000 A-工型空心导电轨”)、额定电流为 2 500 A 的工型空心导电轨(以下简称“2 500 A-工型空心导电轨”)6 种常见的导电轨进行载流试验测试。根据各导电轨额定载流及经验判断,加载固定电流进行试验,其中, $\pi$  型汇流排试验时未夹持接触导线。铝合金导电轨载流-温升试验设备照片如图 2 所示。

6 种常用导电轨标准要求及试验载流结果如表 1 所示,6 种常用导电轨载流-温升曲线图如图 3 所示。由表 1 可知: $\pi$  型汇流排、3 000 A-工型导电轨试验后的轨温远没有达到标准规定的轨温,其载流量还有上升空间;4 000 A-工型导电轨、3 000 A-



a) 4 000 A-C 型导电轨

b)  $\pi$  型汇流排

图 2 铝合金导电轨载流-温升试验设备照片

Fig. 2 Photos of aluminum alloy conductive rail current carrying - temperature rise test equipment

表 1 6 种常用导电轨标准要求及试验载流结果

Tab. 1 Standard requirements and current carrying test results of six common conductive rails

名称	额定电流/A	试验电流/A	试验 4 h 后的轨温/ $^{\circ}\text{C}$	行业标准规定载流 4 h 后的轨温/ $^{\circ}\text{C}$
$\pi$ 型汇流排	3 500	3 800	87.9	$\leq 120$
4 000 A-工型导电轨	4 000	4 800	81.2	$\leq 85$
4 000 A-C 型导电轨	4 000	5 150	88.9	$\leq 85$
3 000 A-工型导电轨	3 000	4 350	75.0	$\leq 85$
3 000 A-工型空心导电轨	3 000	4 140	80.4	$\leq 85$
2 500 A-工型空心导电轨	2 500	3 300	84.8	$\leq 85$

注:根据 TB/T 3252—2022《电气化铁路刚性悬挂接触网汇流排及零部件》规定,在持续载流下, $\pi$  型汇流排的允许温度为  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;根据 CJ/T 414—2012《城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求》规定,在持续载流下,其余 5 种导电轨的允许轨温为  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

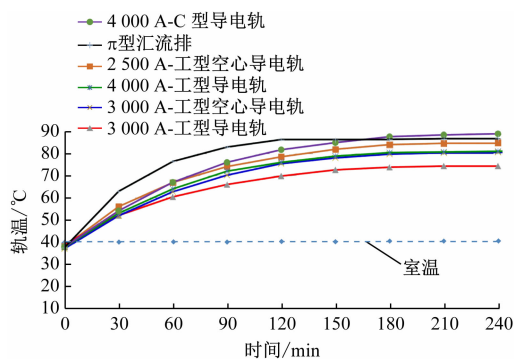


图 3 6 种常用导电轨载流-温升曲线图

Fig. 3 Diagram of current carrying - temperature rise curves of six common conductive rails

工型空心导电轨、2 500 A-工型空心导电轨试验后的轨温已接近标准规定的轨温;4 000 A-C 型导电轨试验后的轨温超出了标准规定的轨温,其载流量达不到试验测试值。由图 3 可知:各导电轨的轨温在试验后 3 h 就能基本达到平稳状态。

#### 4 载流量计算值与试验测试结果对比分析

6 种常用导电轨载流量计算结果及试验测试结果

表 2 6 种常用导电轨载流量计算结果及试验测试结果

Tab. 2 Calculation and experimental test results of current carrying capacities of six common conductive rails

名称	导电轨截面积/mm <sup>2</sup>	由式(1)计算所得的导电轨载流量/A	由式(6)计算所得的导电轨载流量/A	试验测试所得的导电轨载流量/A	修正系数
π 型汇流排	2 213	3 423	6 054	>3 800	>1.110
4 000 A-工型导电轨	4 739	4 543	5 569	4 800	1.057
4 000 A-C 型导电轨	4 862	4 838	5 939	<5 150	<1.064
3 000 A-工型导电轨	3 863	4 040	5 064	>4 350	>1.077
3 000 A-工型空心导电轨	3 859	3 814	5 250	4 140	1.085
2 500 A-工型空心导电轨	2 518	3 010	4 277	3 300	1.096

注:热平衡方程推导式中,空气温度按 25 ℃ 计,铝导体表面均较光滑,材料辐射系数按 0.04 计;试验测试后,4 000 A-工型导电轨、3 000 A-工型空心导电轨及 2 500 A-工型空心导电轨的允许最大载流量约等于试验加载电流值;π 型汇流排及 3 000 A-工型导电轨在试验后的允许最大载流量均大于试验加载电流值;4 000 A-C 型导电轨在试验后的允许最大载流量小于试验加载电流值;修正系数为测试结果与式(1)计算结果的比值。

比较表 2 中 6 种导电轨的修正系数,修正系数最小的是 4 000 A-工型导电轨(1.057),修正系数最大的是 π 型汇流排(1.110),但 π 型汇流排的行业标准低于其余导电轨,因此其修正系数不计入讨论范围。4 000 A-C 型导电轨的修正系数出现了一个极大值 1.064,而此极大值仅位于其他导电轨修正值的中间位置,因此除 π 型汇流排外,其余 5 种导电轨的载流量修正系数取为 1.057~1.064。考虑到载流安全冗余,除 π 型汇流排外,其余 5 种导电轨的载流量修正系数取为 1.057。因此,修正后的式(1)可以表示为:

$$I_{dq} = 5.285k \sqrt{AU}^{0.39} \quad (7)$$

分析式中 5 个影响系数  $k_1$ — $k_5$ ,其值为 1.01~1.07 不等,若增大某个影响系数值,就可能得到与修正系数乘积相同的结果。但由于这 5 个影响系数的关联关系极其复杂,计算较为困难。因此,在式(1)中引入本文所提修正系数会使计算相对简单,计算结果也更为准确。

#### 5 结语

轨道交通领域中,铝合金导电轨载流量的计算

果如表 2 所示。由表 2 可知:由式(6)计算所得的铝合金导电轨载流量远大于试验测试值,说明式(6)的计算结果偏差较大;与试验测试值相比,由式(1)计算所得的铝合金导电轨载流量偏低,说明式(1)的计算结果较为保守,但较接近试验测试值。将修正系数与式(1)计算结果相乘,可以得到更接近真实值的载流量。

关系到导电轨的结构和截面尺寸,是整个导电轨设计的关键。引入修正系数后的 Chapoulie-Rols 公式能较为准确地计算铝合金导电轨的载流量。通过试验发现,铝导电轨的轨温在试验 3 h 后基本保持平稳。

#### 参考文献

- [1] 李增勤. 钢铝复合导电轨电性能探讨[J]. 电气化铁道, 2015, 26(5): 35.  
LI Zengqin. Discussion on steel aluminum composite conductor rail electricity performance[J]. Electric Railway, 2015, 26(5): 35.
- [2] 张鹏飞. 接触轨膨胀接头结构分析及性能试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
ZHANG Pengfei. Structural analysis and performance experimental study on expansion joint for contact rail[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

· 收稿日期:2022-02-17 修回日期:2022-03-23 出版日期:2024-07-10  
Received:2022-02-17 Revised:2022-03-23 Published:2024-07-10  
· 通信作者:张鹏飞,高级工程师,feidazhang@163.com  
· ©《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