

高斯热源与热量分配系数驱动的弓网滑板温度场建模与预测

李 宸^{1,2}, 刘旭华^{1,2}, 梁 鑫^{1,2}, 林志敏^{1,2*}

¹兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

²兰州交通大学铁道车辆热工教育部重点实验室, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年9月25日; 录用日期: 2025年10月4日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

弓网滑板温度分布受弓网载流滑动摩擦副的表面形貌、机械接触、电接触与表面膜演化的协同影响, 并随运动过程中的接触状态与接触斑尺度动态变化, 采用全耦合模型准确预测其温度分布难题较大。为此, 本文基于COMSOL开展流-固-电-热耦合数值分析, 获得其热量分析系数, 继而采用高斯热源法在解耦模型下系统考察速度对温升与峰值迁移的影响规律。结果表明, 弓网载流滑动摩擦副中滑板所吸收热量与接触压力, 速度, 电流具有一定的关系, 在一定的速度范围内滑板温升会随接触压力增加而减小, 说明存在相互对应的接触压力和接触电流。研究结果对载流弓网中部件的单独分析和弓网电流和压力的选取以及高速列车平稳运行提供了参考价值。

关键词

弓网系统, 热力耦合, 高斯热源, 热分配系数

Modeling and Prediction of Temperature Field of Pantograph Catenary Sliding Plate Driven by Gaussian Heat Source and Heat Distribution Coefficient

Chen Li^{1,2}, Xuhua Liu^{1,2}, Xin Liang^{1,2}, Zhimin Lin^{1,2*}

¹School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²Key Laboratory of Railway Vehicle Thermal Engineering of MOE, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: September 25, 2025; accepted: October 4, 2025; published: November 10, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李宸, 刘旭华, 梁鑫, 林志敏. 高斯热源与热量分配系数驱动的弓网滑板温度场建模与预测[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 121-135. DOI: 10.12677/mos.2025.1411645

Abstract

The temperature distribution of pantograph catenary sliding plate is affected by the surface morphology, mechanical contact, electrical contact and surface film evolution of pantograph catenary current carrying sliding friction pair, and changes dynamically with the contact state and contact spot size in the process of movement. It is difficult to accurately predict the temperature distribution using the fully coupled model. In this paper, the fluid solid electrical thermal coupling numerical analysis is carried out based on COMSOL, and the thermal analysis coefficient is obtained. Then, the influence of velocity on temperature rise and peak migration is systematically investigated by using the Gaussian heat source method under the decoupling model. The results show that the heat absorbed by the sliding plate in the pantograph catenary current carrying sliding friction pair has a certain relationship with the contact pressure, speed and current. Within a certain speed range, the temperature rise of the sliding plate will decrease with the increase of the contact pressure, indicating that there is corresponding contact pressure and contact current. The research results provide reference value for the independent analysis of current carrying pantograph and catenary components, the selection of pantograph and catenary current and pressure, and the smooth operation of high-speed trains.

Keywords

Pantograph Catenary System, Thermal Mechanical Coupling, Gauss Heat Source, Heat Distribution Coefficient

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着列车向高速、重载方向发展,弓网系统的稳定受流愈发关键。在弓网摩擦副的电传导过程中,载流摩擦引发的高温热流会改变材料的热电物性,从而加剧磨损[1][2]。弓网系统在列车运行中处于热-力-电多物理耦合环境之下,理应显式考虑温升对材料物性的温度依赖性。Holm [3]指出,温度对滑动电接触的磨损行为具有显著影响,高温是导致滑板严重磨损的重要因素之一。Mei 等[4]基于高速测试机,在电流 200~500 A、滑动速度 100~250 km/h、法向载荷 60~120 N 的工况下进行系列试验,研究了电流作用下滑块对导线的磨损机理,并分析了碳滑块温度随参数变化的规律。Wu [5]、Song [6]等基于自制受电弓-接触网模拟系统,从接触电阻、温升与微观结构演化等方面揭示了电接触过程,发现接触点温度在最初数分钟内快速升高,随后趋于稳定。戴利民等[7]结合有限元计算与实测温升,评估不同热源对不同滑板材料体温升的贡献,认为载流摩擦过程中的摩擦热占比较小。文献[8]开展了静态电接触的稳态热分析、滑动电接触的暂态热效应以及电弧作用下的瞬态热分析;文献[9]针对摩擦条件下滑板温度进行了分析与计算;文献[10]构建了弓网电接触试验台的温度测量系统。现有载流摩擦试验平台[11]多为销盘式或相似原理装置,受安全与场地等因素限制,往往未充分考虑高速工况下对换热系数的影响。基于暂态热功率平衡原理,文献[10]建立了动车组升降弓取/断流时双点接触及左右滑板小离线条件下的电气暂态热流温升模型,并给出了单/双点滑动情形的特征结论。另有学者[12]对弓网系统热流分配比开展研究,但多采用 1:1 的简化设定,且未考虑温升引起的材料热导率变化,与工程实际仍存在差距。

综上，受电弓滑板上的主要热源包括：电流通过接触电阻产生的焦耳热以及弓网滑动摩擦产生的摩擦热。受接触几何与相对运动影响，两类热源的空间 - 时间分布呈交错迁移。鉴于此，本文在既有耦合模型的基础上，提出一种针对接触区热量传递的表征方法：将接触处产生的总热量在滑板与接触导线之间进行通量分配，并定义“热分配系数”以度量进入各固体中的热通量份额。基于该系数，进一步实现对滑板与接触导线温度场的相对独立、可对比的分析，为揭示高速载流摩擦条件下的温升机理与材料响应提供更具物理一致性的建模框架。

2. 弓网耦合模型

2.1. 物理模型

为研究高速列车弓网接触副的热量分配系数，本文采用 COMSOL Multiphysics 开展热 - 力 - 电多物理场耦合建模与数值分析。受电弓几何与工况参考 GB/T 21561.4-2018 中的 V350 单滑板受电弓模型：导线直径 $D = 23.6\text{ mm}$ ；滑板几何尺寸为 $L \times H \times W = 1100\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。

网格策略方面，基于 COMSOL 的适用性与计算效率权衡，采用自由四面体单元进行离散(见图 1)。导线在几何上简化为圆柱体，以突出接触区域的热 - 电耦合主导效应。考虑到接触区内电流密度、接触电阻及摩擦发热导致的温度梯度剧烈变化，针对接触斑及其邻域实施网格局部加密，以提高温度场与热通量预测的精度与稳定性。该加密策略能够有效降低数值耗散与插值误差，确保热量分配系数在空间上的分辨率与统计可靠性。

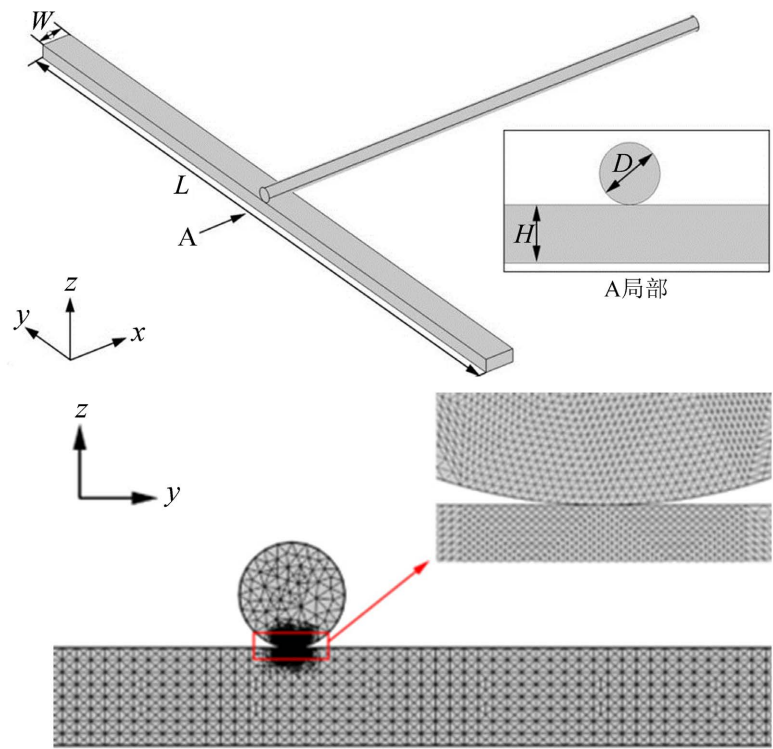


Figure 1. Model and grid division
图 1. 模型及网格划分

表 1 为该计算模型中的滑板与接触导线的物性参数[13]。

Table 1. Physical parameters of wires and skateboard materials
表 1. 导线和滑板材料的物理参数

材料	导热系数(W·(m·K) ⁻¹)	比热容(J·(kg·K))	电阻率(Ω·m)
滑板	15	660.2	1.23×10^{-5}
导线	380	380	1.8×10^{-8}
材料	泊松比	弹性系数(MPa)	摩擦系数
滑板	0.425	12.6	0.2
导线	0.326	119	0.2

2.2. 数学模型

为建立数学模型，作以下简化假设：(1) 由于电力机车在实际运行中是杜绝弓网离线现象的产生，因此在本文所做的数值模拟过程中离线率假设为 0，即整个过程没有电弧热。(2) 在仿真过程中考虑空气与弓网系统的对流散热，不考虑辐射散热。(3) 在仿真计算过程中不考虑由于弓网摩擦产生的摩擦带走的热量，系统产热全部被摩擦副所吸收。(4) 弓网接触区的温度持续上升，不考虑超过熔点，滑板进行软化以及形成熔层对滑动接触面的影响。(5) 材料具有各向同性。

2.3. 控制方程

在列车正常运行期间，弓网之间存在一个接触压力(一般为 50~120 N)，在该压力作用下受电弓滑板与接触导线形成一个微小压痕，进而实现稳定受流。

(1) 传热模型，受电弓与接触线为固体传热，故其瞬态传热控制方程：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

式中， ρ 为材料密度； k 为材料热导率。

C_p 为常压热容； $\mathbf{u}$ 为速度场向量； Q 为系统传输热量。初始温度设定为 $T_0 = 288.15$ K。

(2) 电场模型，弓网系统为列车提供动力源，并且电流从接触导线经过滑板进行传输，电流通过两个接触的部件不考虑电流感应磁场时根据亥姆霍兹方程可知，计算瞬态电流守恒方程：

$$\nabla \cdot \left[-\frac{J}{E}(T) \nabla V \right] = 0 \quad (2)$$

其中， V 为电势， $\frac{J}{E}(T)$ 为与温度相关的电导率。

(3) 固体力学模型，受电弓 - 接触网系统中滑板和接触线工作中的力学分析方程如下：

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_v = \frac{\mathbf{F}_{tot}}{V} \quad (4)$$

采用考虑弹性变形和热膨胀的材料本构模型来评价电接触点中的应力和应变分布。总应变包括弹性应变和热应变，如下：

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_{ext} + \mathbf{S}_q + \mathbf{C}(E, v) : \frac{1}{2} \left[(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u} \right] - \varepsilon_0 + \varepsilon_{ext} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{ls} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{vp} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{C}$ 为与温度相关的四阶弹性张量, 可以用各向同性材料的杨氏模量 E 和泊松比 ν 来描述。

2.4. 边界条件

模型的电边界条件为, 受电弓 - 接触导线的接触区域为接触对上的多点接触, 电流通过两接触表面因接触电阻产生电压降的同时会产生电阻热, 接触表面为电接触表面, 导线和滑板其他边界条件为电绝缘, 并确定接触电阻、以及滑板和接触线的对流换热系数[14]。

弓网系统仿真模拟时认为模型中与空气接触表面为电绝缘边界, 不与空气发生导电, 因此没有与空气接触的产热, 电绝缘方程如下:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (6)$$

接触区形成的热接触对与电子接触对是发热和散热的主要部分。温度关系满足:

$$-\mathbf{n}_d \cdot (-k_d \nabla T_d) = -h(T_u - T_d) + rQ \quad (7)$$

$$-\mathbf{n}_u \cdot (-k_u \nabla T_u) = -h(T_d - T_u) + (1-r)Q \quad (8)$$

式中: $\mathbf{n}_d$ 和 $\mathbf{n}_u$ 分别为接触对中目标边界与源边界的热通量的法向量; T_d 和 T_u 分别为接触对中目标边界与源边界的温度(K); r 为热量分配系数。

电子接触对约束关系分别为:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_1 = h_c(V_1 - V_2) \quad (9)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_2 = h_c(V_2 - V_1) \quad (10)$$

式中, $\mathbf{n}$ 表示热通量的法向量; $\mathbf{J}_1$ 和 $\mathbf{J}_2$ 分别为目标边界与源边界电流密度; V_1 和 V_2 分别为接触对目标边界与源边界的电势。

对流热通量的约束为:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = h_L(T_0 - T) = q_0 \quad (11)$$

式中, h_L 为对流系数, 与流体速度有关, 采用平板强制对流的经验公式计算; q_0 为温度变化前后吸收或散失的热量(J)。

3. 组合热源分析

3.1. 弓网之间热源确定

列车运行时, 弓网摩擦副表面热源是多种热源耦合产生的[15], 并且是以热流密度的形式进入弓网系统的。主要有摩擦热、焦耳热和电弧热。

(1) 摩擦热

弓网之间会具有摩擦存在, 弓网运行时产生的摩擦热流 q_f 可用下式计算:

$$q_f = \mu F \cdot v \quad (12)$$

式中 μ 为摩擦系数; F 为接触压力(N); v 为摩擦副相对滑动速度(m/s)。

(2) 焦耳热

根据焦耳定律可以计算其运行阶段产生焦耳热热流 q_R :

$$q_R = I^2 R_z \quad (13)$$

式中 $R_z(\Omega)$ 为系统的总电阻, 由滑板和接触导线的体电阻与接触电阻组成; $I(A)$ 为弓网之间的电流大小。

(3) 电弧热

运行过程中离线会产生电弧，电弧热流密度 Q_A 可用下式计算：

$$q_A = \frac{\xi U_{ma} I}{n A_f} \quad (14)$$

式中 I 为平均电流； ξ 为平均离线率； U_{ma} 为最小起弧电压，由于列车运行追求平稳性，因此 $\xi = 0$ 。

因此列车在升弓运行后，弓网接触副所产生的总热流密度 q_T ：

$$q_T = q_f + q_R + q_A \quad (15)$$

3.2. 电接触参数

弓网电接触时存在热电力场的耦合，并且弓网的材料性能也会随着温度的变化而变化，进而影响弓网之间热分配系数。弓网之间存在着接触压力，由于导线和滑板具有不同的硬度，并且滑板的硬度小于接触线的硬度，故会产生一定的压痕，该压痕的面积即为接触线与滑板的接触面积。为了计算该压痕的面积，需要计算压痕的深度。为了准确的计算出压痕面积，需要采用罗氏应力和应变法则进行计算。计算模型如下图 2 所示：

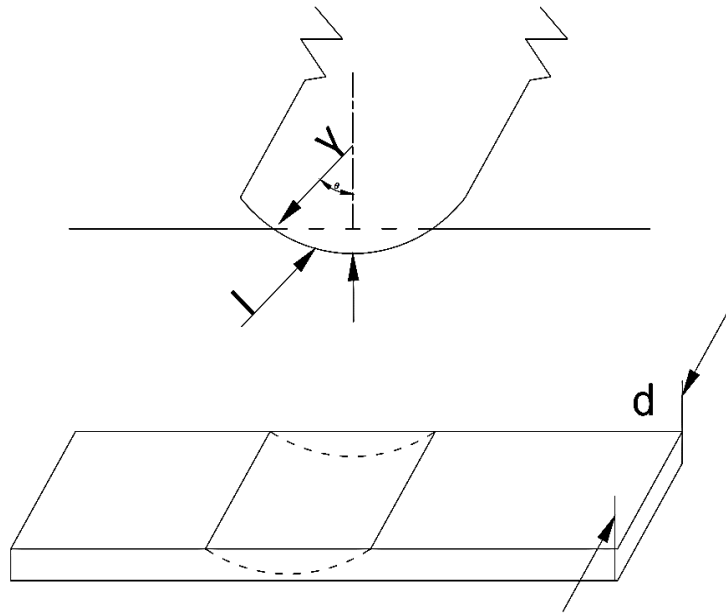


Figure 2. Diagram of pressure and indentation

图 2. 压力与压痕示意图

其中 r 为导线半径， l 为压入滑板中的弧长， d 为滑板宽度， δ 为压入深度。

$$\cos \theta = \frac{r - \delta}{r} \quad (16)$$

$$l = 2\theta r \quad (17)$$

(1) 接触面积 P_c

$$P_c = ld \quad (18)$$

在仿真软件中，利用固体力学模块为其施加 F 的接触压力，计算得到接触压力与接触深度之间的关

系，滑板处于弹性形变范围内滑板压痕的深度 δ 与其接触压力 F 呈现线性关系。关系式如下：

$$\delta = 2.15245 \times 10^{-9} F_N \quad (19)$$

(2) 接触电阻 R_C

由于弓网属于固体接触，从微观上来讲，两个固体平面不可能做到绝对平滑，实际情况下只有一些小凸峰进行接触，如图 3 所示。在弓网受流过程中做到小面积大电流的受流过程，接触斑点会有较高的温升，这主要是弓网接触之间的接触电阻主要来源于接触斑点。

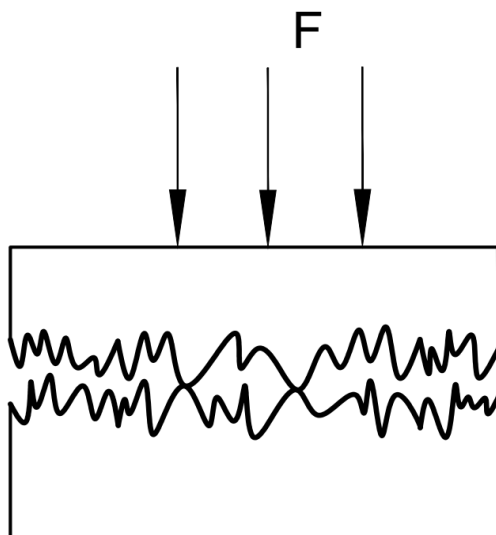


Figure 3. Contact schematic

图 3. 面接触示意图

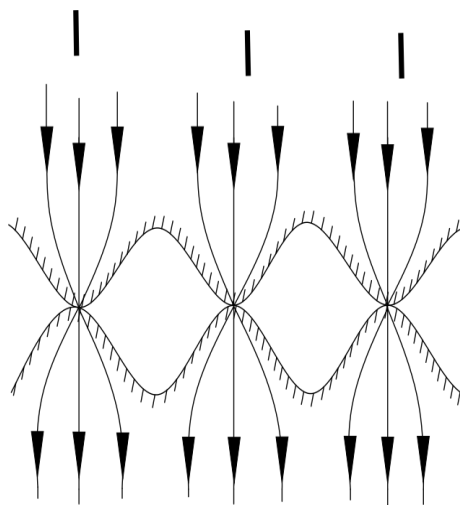


Figure 4. Schematic diagram of shrinkage resistance

图 4. 收缩电阻示意图

根据电接触理论[16]，当两个导体表面相接触时，粗糙表面将刺破其表面的氧化层，进而建立起局部的导电路径，如图 4 所示。由上图可以看出导电面积是远小于名义接触面积，通常认为是小于名义接触面积的 1%。两表面刚开始接触时。最高的粗糙峰最先开始接触，会有局部应力的产生，顶峰被压缩，接

下来会有新的顶峰参与接触, 承载大部分载荷, 以此类推, 直至足够承载所施加载荷时, 接触完成。

接触电阻是由收缩电阻和膜电阻组成, 收缩电阻是指两个接触面的电流通过 α 斑点时电流线收缩产生的电阻, 而膜电阻是由接触表面的污染膜所产生的附加电阻。只考虑收缩电阻, 参考铜-铜的圆形 α 斑点, 假设弓网之间的接触斑点为圆形, 则弓网之间的接触电阻可以采用以下公式进行计算:

$$R_C = R_{C_1} + R_{C_2} + R_f = \frac{\rho_1}{4n\alpha} + \frac{\rho_2}{4n\alpha} + R_f \quad (20)$$

式中, $(R_{C_1}、R_{C_2})$ 为两接触面的收缩电阻; $\rho_1、\rho_2$ 为滑板和导线的电阻率; R_f 为表面膜电阻; n 为接触斑点个数; α 为单个接触斑点的半径。

由 R.Holm 的实验结果可知在滑动电接触情况下接触斑点的个数为 5~18 之间, 由于弓网运行系统中由于弓网之间具有滑动摩擦, 可以撕裂其表面污染膜, 电导率和温度存在耦合关系, 因此, 膜电阻可以忽略因此, 其接触电阻为:

$$R_C = R_{C_1} + R_{C_2} + R_f = \frac{\rho_1(T) + \rho_2(T)}{4n\alpha} \quad (21)$$

接触斑大小可以通过接触计算[17]。

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi H}} \quad (22)$$

当温度发生变化时, 接触线和碳滑板的电阻率会随之改变, 其变化关系为:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (23)$$

式中 $\rho(T)$ 为温度为 T 时刻的电阻率; ρ_0 为初始时刻的电阻率; α 为电阻温度系数; ΔT 为温升。

因此单个接触点的接触总电阻可表示为[18]:

$$R_C = \frac{\rho_w(1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + \rho_s(1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)}{4a} \quad (24)$$

式中 $\alpha_1、\alpha_2$ 为接触线和滑板的电阻温度系数。

假设弓网接触副的接触斑有 n 个, 并且各个接触斑的电阻相等, 其总接触电阻为:

$$R_C = \frac{\rho_w(1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + \rho_s(1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)}{4na} \quad (25)$$

③ 接触副的热传导:

接触副之间由于非完全接触面存在接触热阻, 接触热阻和接触热导系数呈倒数关系, 两个物体之间热传导系数 h_c 可表示为[16]:

$$h_c = 1.25k \frac{m}{\sigma} \left(\frac{p}{H} \right)^{0.95} \quad (26)$$

式中 p 为压力; k 为等效接触热导率; m 为等效平均粗糙面斜率; σ 为等效方均根表面粗糙度。

其中:

$$k = \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2} \quad (27)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (28)$$

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (29)$$

式中 k_1 、 k_2 、 σ_1 、 σ_2 、 m_1 、 m_2 分别为接触线和滑板的热导率、表面平均粗糙度、粗糙峰斜率。以下是基于实验得出的粗糙度和粗糙峰斜率的关联式：

$$m_i = 0.076(\sigma_i \times 10^6)^{0.52} \quad (30)$$

选取接触线和滑板的热导率 k_1 、 k_2 分别为 380 W/(m·K) 和 15 W/(m·K)，表面平均粗糙度 σ_1 、 σ_2 分别为 3.2 μm 和 1.6 μm ，得到弓网接触的热导系数表达式为：

$$h_c = 0.001822 \times p^{0.95} \quad (31)$$

3.3. 模型可靠性验证

为了验证该模型对仿真结果的准确性，采用 COMSOL Multiphysics 进行仿真分析，得到结果与现有文献实验数据作对比。郭凤仪等人[19]中采用高性能滑动电接触试验机进行实验，并利用红外热像仪对接触表面进行温度测量。接触电流 70 A、速度为 70 km/h、接触压力为 70 N 时仿真与实验结果对比图；图 5 为速度为 70 km/h、压力为 70 N 条件下实验结果对比图，两者最大误差分别为 4.6℃ 和 2.93℃，实验采样数据与仿真温升曲线基本拟合，可以认为仿真的有效性。

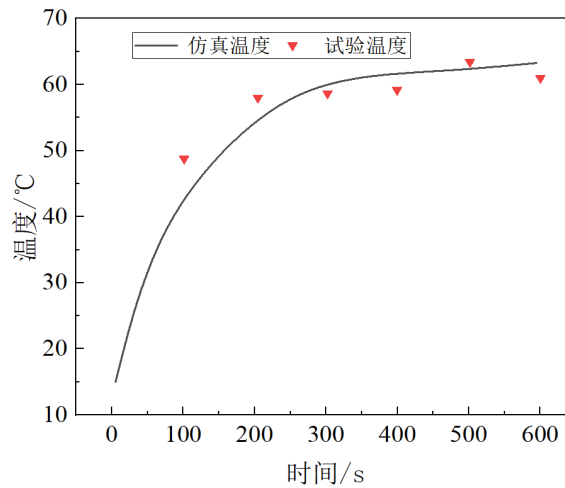


Figure 5. Comparison chart of experimental data and simulation data
图 5. 实验数据与仿真数据对比图

4. 弓网热分配系数分析与讨论

由于弓网之间的载流摩擦的温升是多个物理场共同作用下产生的。由于弓网之间具有很复杂的多物理场耦合问题，计算较为复杂。因此，提出一个热分配系数的概念来对弓网摩擦副进行剥离分析温度分布情况。

4.1. 多物理场耦合分析

在 COMSOL 仿真软件中设置弓网之间电流为 100 A，接触压力为 60 N，列车运行速度为 50 km/h，接触时间为 600 s，图 6 显示了在计算时间滑板和导线随时间变化的瞬态温度变化，得到滑板域在计算时间为 400 s 时达到准稳态状态，弓网刚接触时，温升较快，此时滑板内部具有较明显的温度梯度，滑板温度明显高于导线温度，这主要是导线的热导系数大于滑板热导系数，因此热量向滑板方向传递，进而使

滑板域温度升高。

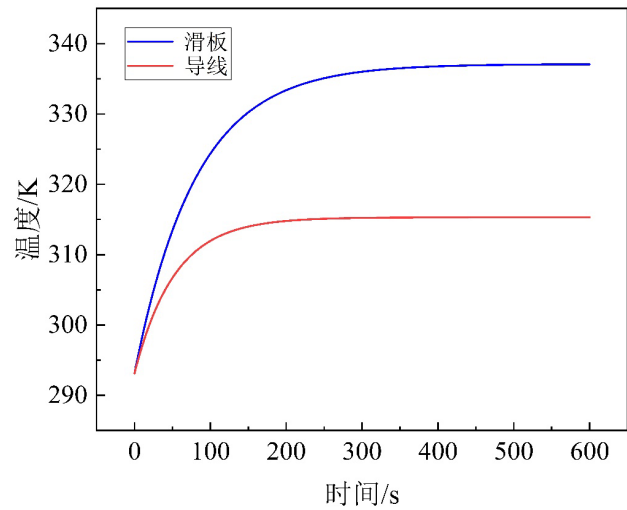


Figure 6. Temperature transient variation curve
图 6. 温度瞬态变化曲线

为了得到弓网接触副在刚开始接触达到准稳态状态时滑板所吸收的热量，需要得到滑板的温度梯度分布，根据傅里叶定律，下式计算出滑板在该过程中所吸收的热量。

图 7~9 为 COMSOL 仿真软件中对滑板域中各个表面各时间的温度梯度分布数值大小，可以看出除了下表面外的其他表面温度梯度在弓网接触的瞬间会有一个骤升，这主要是因为弓网刚开始接触时，弓网之间产生的焦耳热要到达下表面必须要经过滑板厚度方向的内部才能到下表面，其他表面与接触面直接相连，因此会出现与接触面相同的骤升趋势。同时可以得出迎风侧和背风侧以及左侧面与右侧面的温度梯度基本相同，但迎风侧的温度梯度大小略小于背风侧，这主要是由于列车运行产生的“列车风”在滑板的迎风侧形成射流现象导致了迎风侧的热导系数变大，使迎风侧温度偏离环境温度的能力比背风侧要小，因此迎风侧的温度梯度大小略小于背风侧。

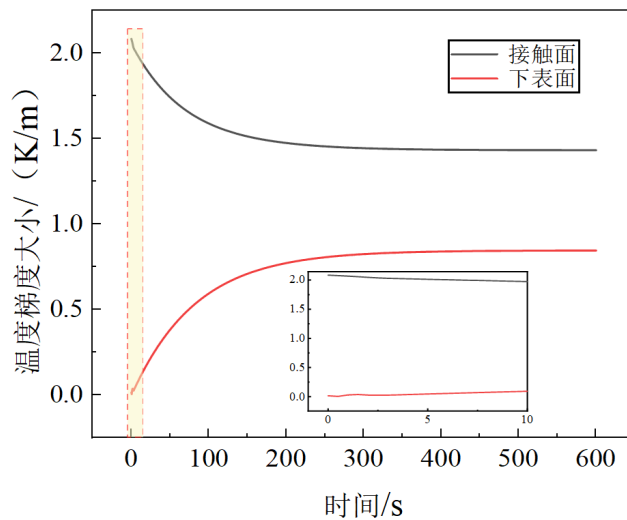


Figure 7. Contact surface and lower surface temperature gradient
图 7. 接触面及下表面温度梯度大小

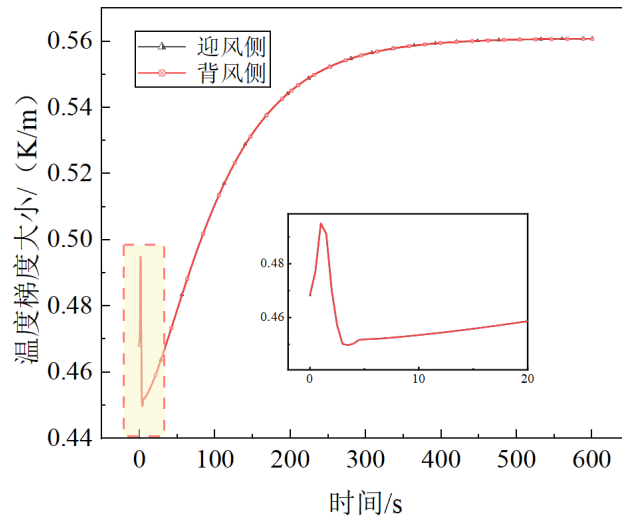


Figure 8. Temperature gradient on the windward and leeward sides
图 8. 迎风侧及背风侧温度梯度大小

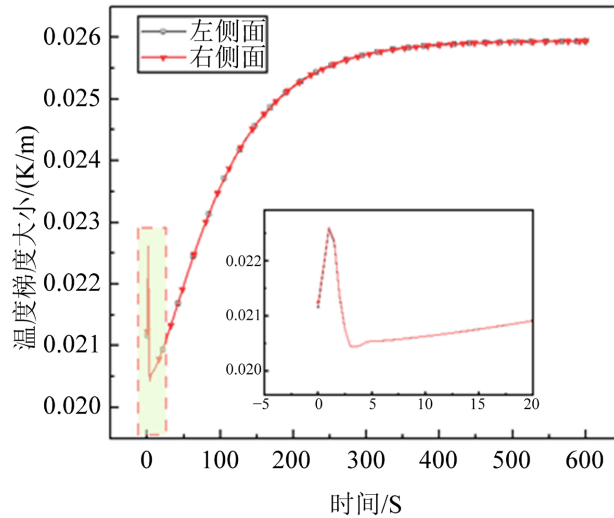


Figure 9. Temperature gradient on the left and right sides
图 9. 左侧面及右侧面温度梯度大小

由模型结构可知滑板接触面和下表面面积为 $S_1 = 0.055 \text{ m}^2$ ，迎风侧与背风侧的面积为 $S_2 = 0.0242 \text{ m}^2$ ，左右侧面面积 $S_3 = 0.0011 \text{ m}^2$ ，根据图 7~9 中的温度梯度大小积分计算得到在导线与滑板从接触到 400 s 达到准稳态状态滑板总共吸收热量为 138752.84 J，此过程中等效热源所产热 207591.2 J，故等效热源对滑板的热分配系数 ξ 为 0.668 导线的热分配系数为 0.332。

由于弓网摩擦副所形成移动热源可以等效为一个高斯热源，由于材料的电阻率会随着温升变化，因此该高斯热源的大小会随时间而变化。高斯热源可表示[20]：

$$HeatFlux = \left(\frac{2 \times P_0}{\pi \times R_c^2} \right) \times e^{\left(-\frac{2 \times R^2}{R_c^2} \right)} \quad (32)$$

式中 $HeatFlux$ 为高斯热源热流密度； P_0 为总热流密度； R_c 为接触热阻； R 为移动热源的热源中心与刚接触时热源中心的距离。

$$R = \sqrt{(x - x_{focus})^2} + \sqrt{(y - y_{focus})^2} \quad (33)$$

式中 x 为移动热源的热源中心 x 方向坐标； x_{focus} 为初始移动热源的热源中心 x 方向坐标； y 为移动热源的热源中心 y 方向坐标； y_{focus} 为初始移动热源的热源中心 y 方向坐标。

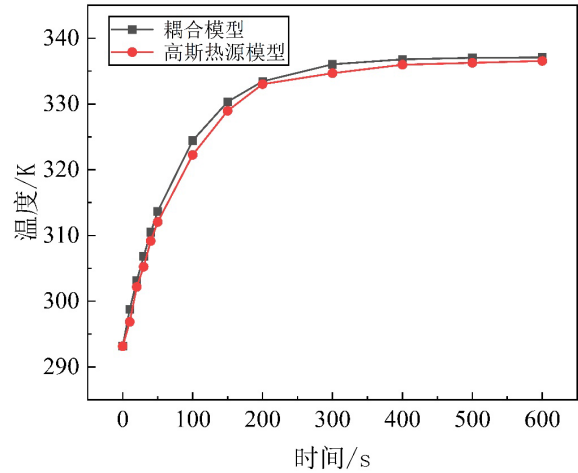


Figure 10. Comparison of decoupled models and coupled models
图 10. 解耦模型与耦合模型对比

利用高斯热源移动模型对弓网耦合系统进行等效模拟,利用 COMSOL 仿真软件对滑动速度为 50 km/h, 接触压力为 60 N 工况模拟。图 10 展示了利用高斯热源模型与热量分配系数解耦条件下与多场耦合条件下的滑板接触表面的温度对比,可以看出温度趋势一致,最大误差在 0.4% 以下,因此该解耦模型是成立的。

4.2. 速度对滑板温度的影响

采用高斯移动热源以及热分配系数对弓网系统中的滑板进行单独分析,在接触传导电流为 100 A, 接触压力为 60 N, 环境温度为 293.15 K 时在速度为 50 km/h, 80 km/h, 120 km/h, 150 km/h, 180 km/h, 250 km/h, 300 km/h, 350 km/h, 400 km/h 时的滑板的平均温度以及接触表面温度如下图。

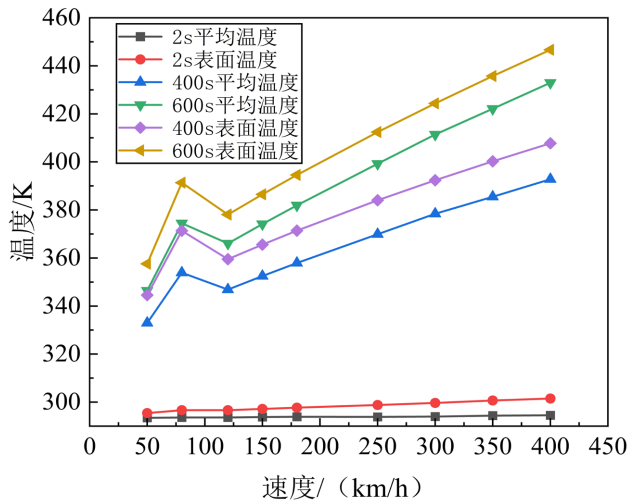


Figure 11. Contact pressure 60 N
图 11. 接触压力 60 N

图 10~13 提取了高斯移动热源计算模型中的 2 s、400 s、600 s 时的滑板域平均温度与接触面温度，从图中可以看出在 400 s 到 600 s 之间滑板接触面的温度与滑板平均温度温差保持不变，即说明该时间段达到准稳态状态。图中可以看出当速度在 80 km/h 时温度会有一个明显的骤升，随着速度增大到 120 km/h 的过程中温度会有一个下降的过程，这主要是由于滑板材料随着温度升高导致了碳滑板的自润性导致总热流中的摩擦热减少，随着接触压力的增加，弓网之间的接触面积增大导致弓网之间换热面积增加进而使该峰值的波动会减小。

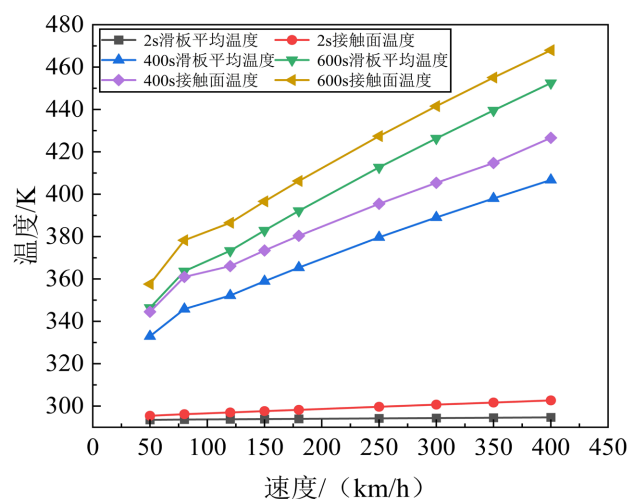


Figure 12. Contact pressure 70 N

图 12. 接触压力 70 N

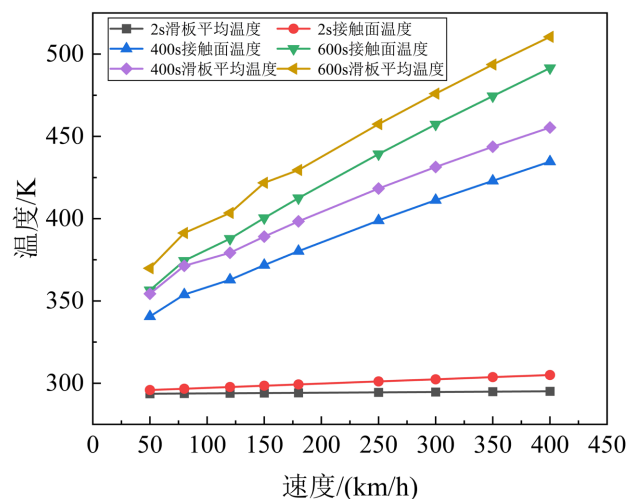


Figure 13. Contact pressure 90 N

图 13. 接触压力 90 N

图 14 展示了在弓网接触压力 $P = 60 \text{ N}$ 、 $t = 600 \text{ s}$ 时，滑板接触面温度随速度 v 的变化。在 $I = 80 \text{ A}$ 时，温度随 v 缓慢上升；在 $I = 100 \text{ A}$ 与 120 A 时，于 $v \approx 80 \text{ km/h}$ 附近出现明显波动。其根源不仅在于电流引发的焦耳热随材料导电率与接触电阻的变化而调整，还与速度诱发的接触状态跃迁、摩擦热、微弧放电与对流散热耦合有关。进一步地，图 15 在更宽速度区间(50~250 km/h)呈现出温度-速度曲线的波峰与阶段性起伏，且不同压力下的曲线形态与峰值位置并不一致，这表明该系统存在多场耦合的非单调响

应。可见，温度 - 速度曲线的复杂形态源自焦耳热 - 摩擦热 - 微弧热与热接触/对流散热之间的竞争与阈值效应[21]，其幅值与峰位受压力调控的真实接触面积与热接触导热率主导。相应地，存在一组最优的“压力 - 速度 - 电流”匹配，使总发热与总散热达到平衡，从而最小化滑板温度及其波动。

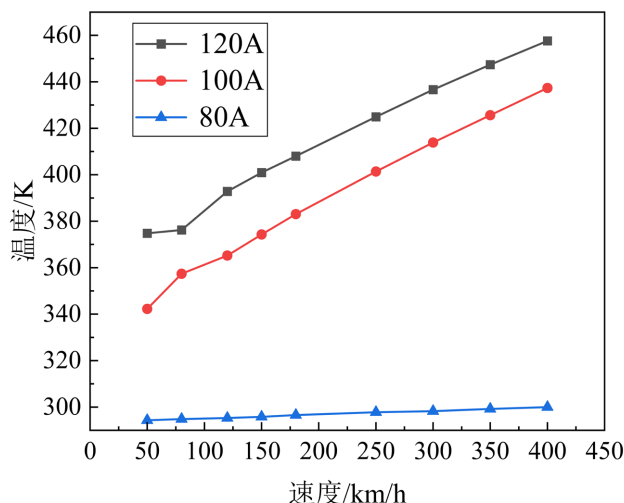


Figure 14. Contact pressure 60 N

图 14. 接触压力为 60 N

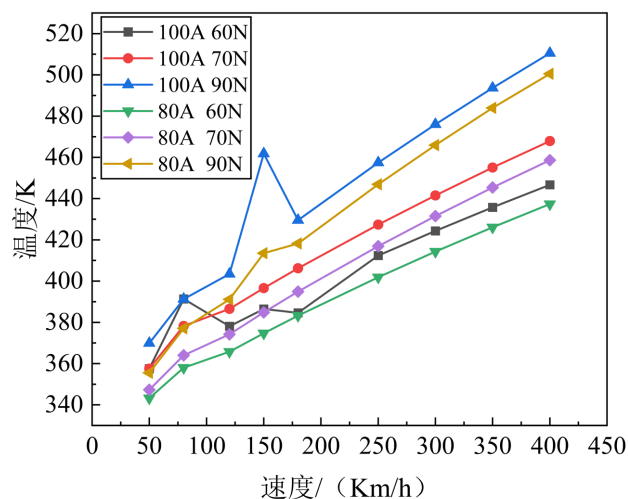


Figure 15. The relationship between temperature and speed under different pressures

图 15. 在不同压力下温度与速度关系

5. 结语

本文分析了弓网正常运行之间热流的产生以及电导率随着温度的变化关系以及接触面积随接触压力的变化关系，建立了基于高速列车弓网载流滑动热力耦合的有限元模型分析了弓网之间的热量分配关系及温度特性分布，主要结论如下：① 列车运行工况电流为 100 A，压力为 60 N，速度为 50 km/h，其滑板的热量分配系数为 0.668。② 弓网之间的最高温度出现在弓网接触面上，在一定速度范围内由于压力的增加会使弓网之间的接触面积增加，从而增强导热温度，因此为了减小滑板的磨损，在合适的速度范围内可增加接触压力，使温升减小。③ 弓网接触面温升会随着温度的增加而增加，并且弓网之间存在一

个相匹配的压力与接触电流，为了减小温升对弓网之间磨损的影响，需寻求弓网之间相匹配的接触压力与接触电流。

参考文献

- [1] 吴积钦. 受电弓与接触网系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [2] 吴广宁. 轨道交通电气与安全专题引言[M]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3529-3530.
- [3] Holm, R. (1967) *Electrical Contacts*. Springer.
- [4] Mei, G.M., Fu, W., Chen, G. and Zhang, W. (2020) Effect of High-Density Current on the Wear of Carbon Sliders against Cu-Ag Wires. *Wear*, **452-453**, Article ID: 203275. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203275>
- [5] 朱宁俊, 李春茂, 吴广宁, 高国强, 吴杰. 弓网系统接触电阻特性的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1185-1190.
- [6] Song, Y., Wang, Z., Liu, Z. and Wang, R. (2021) A Spatial Coupling Model to Study Dynamic Performance of Pantograph-Catenary with Vehicle-Track Excitation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **151**, Article ID: 107336. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107336>
- [7] 戴利民, 林吉忠, 刘越, 等. 受电弓滑板受流摩擦中体温升的模拟计算分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(5): 56-61.
- [8] Plesca, A. (2014) Thermal Analysis of Sliding Electrical Contacts with Mechanical Friction in Steady State Conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, **84**, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.009>
- [9] 陈忠华, 康立乾, 李本君, 等. 弓网系统受流摩擦下滑板温度分析与计算[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 1-5.
- [10] 杨洋. 弓网电接触试验台温度测量系统研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [11] 王英. 升降弓电接触的接触线暂态热流建模与验证[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2663-2671.
- [12] 王英. 弓网电接触热流和电流传导及影响规律研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [13] 郭凤仪, 洪鑫, 刘帅, 等. 载流滑动摩擦副温度场瞬态特性仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1715-1723.
- [14] 王万岗, 吴广宁, 高国强, 等. 弓网系统接触电阻特性[J]. 中南大学学报, 2012, 43(10): 3857-3864.
- [15] 王厚华. 传热学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 177-185.
- [16] 郭凤仪, 陈忠华. 电接触理论及其应用技术[Z]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
- [17] 吴积钦. 受电弓——接触网系统电接触特性研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [18] 吴积钦, 钱清泉. 受电弓与接触网系统电接触特性[J]. 中国铁道科学 2008(3): 106-109.
- [19] 王珂昕, 王智勇, 郭凤仪, 等. 波动接触压力下滑动摩擦副温度及热流特性研究[J]. 电气工程学报, 2024, 19(4): 416-426.
- [20] Delcey, N., Baucour, P., Chamagne, D., Wimmer, G., Bucca, G., Bruyere, N., et al. (2019) Analysis of the Thermal Variations in a Moving Pantograph Strip Using an Electro-Thermal Simulation Tool and Validating by Experimental Tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **234**, 859-868. <https://doi.org/10.1177/0954409719877341>
- [21] 张晓程, 付迎, 俄馨, 等. 焊接移动热源数字化仿真和残余应力分析[J]. 热处理技术与装备, 2023, 44(2): 54-58.