

# 波动载荷作用下弓网滑动电接触接触失效研究

张继华, 张海洲, 陈忠华, 回立川, 党 伟

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:**弓网滑动电接触接触失效判定对机车安全运行与进一步提速有重要意义。笔者立足于实际的机车运行工况,利用自行设计的弓网滑动电接触实验机做弓网滑动电接触失效研究实验,实验研究不同波动载荷、速度和电流条件下载流稳定系数的变化规律,并进行相应的理论分析。根据载流稳定系数失效判据,获得不同工况下保持可靠接触的临界条件。通过实验数据并运用梯度下降与模拟退火算法训练模糊推理系统,建立波动载荷、速度、电流和载流稳定系数之间的关系模型。通过模型可判断机车运行时弓网滑动电接触是否处于接触失效状态。

**关键词:**弓网滑动电接触; 接触失效; 波动载荷; 载流稳定系数; 模糊推理系统

**DOI:** 10.12067/ATEEE1802025      **文章编号:** 1003-3076(2019)10-0053-08      **中图分类号:** TM501

## 1 引言

随着电气化铁路快速发展,各种机车的运行工况差别越来越大,增加了弓网系统摩擦副运行工况的复杂性。由于机车运行工况不同,机车的受电弓与接触网间必须以不同大小的接触压力、相对滑动速度和电流强度,维持机车运行时稳定的载流性能和滑动接触状况。因此,为了提高弓网电接触的电能量传输的效率和稳定性,降低电力机车在运行过程中的弓网滑动电接触失效概率,使电力机车获得持续、稳定的运行速度,对弓网滑动电接触的接触失效研究是非常必要的。

目前,国外的学者在滑动电接触不同材料失效机理、磨损失效、微动失效等方面做了深入的研究<sup>[1-5]</sup>,其中 Zhou Yilin 通过检测不同材料接触界面的滑动接触电阻和磨损程度,分析了不同镀层材料滑动电触头的失效机理,以摩擦学和氧化腐蚀机理为基础来解释滑动寿命的影响因素;Bucca G 建立了磨损值与速度、电流和接触压力的一种关系模型,将接触压力和电流的瞬时值输入到磨损模型中,可计算沿着架空线的受电弓和接触线的磨损量;Malucci R D 做了关于微动接触的不稳定性和阈值行为研究,在退化的微动触点混沌行为中找到稳定阈值,稳定阈值对定义接触

电阻故障标准起到参考作用。而在国内电接触失效方面的论著中,弓网滑动电接触的可靠接触研究较少,而以继电器为主的触点电接触失效研究在测量技术<sup>[6,7]</sup>、失效机理<sup>[8-10]</sup>与可靠性判别<sup>[11,12]</sup>等研究方面已非常成熟,为近几年才开展起来的弓网滑动电接触失效研究提供了有效的研究方法思路。综上所述,在国外和国内的研究中,很少从载流稳定系数的方面去做滑动电接触失效研究,但载流稳定系数作为确定机车运行时电流传输稳定性的重要参数,决定着机车运行时的稳定性。因此,对弓网滑动电接触载流稳定系数的研究对判断弓网滑动电接触失效有实际意义。

本文参考滑动电接触方面的摩擦磨损、接触特性和最优载荷等方面的研究成果<sup>[13,14]</sup>,确定合理的研究参数范围,通过自制的摩擦磨损实验机模拟弓网接触工况,测量不同实验参数下的载流稳定系数,通过实验数据训练出的模糊推理系统完成对载流稳定系数的预测。结合载流稳定系数失效判据,得出不同工况条件下可靠接触的临界条件。

## 2 实验条件与研究参数

### 2.1 实验设备与实验材料

实验所使用的自制高性能滑动电接触摩擦磨损实验机如图 1 所示。实验机运行过程模拟现实工况

**收稿日期:** 2018-02-08  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51477071)  
**作者简介:** 张继华(1970-),男,辽宁籍,副教授,研究方向为电机与电器、电接触理论及其应用;  
张海洲(1994-),男,山西籍,硕士研究生,研究方向为电接触理论及其应用。

中弓网接触导线与滑板之间的“之”字型运动。本次实验中滑板与接触导线间滑动调速范围在 0~200km/h 之间,音圈电机可调整实验所需的波动载荷压力幅值与频率,本次实验设置的基础载荷压力为 60~90N,波动载荷压力幅值为±10~±40N 之间,频率为 1~4Hz 之间。实验机上位机平台可实时测量并存储电流强度、接触压力、总摩擦力和摩擦系数等参数数据,方便后期处理分析。

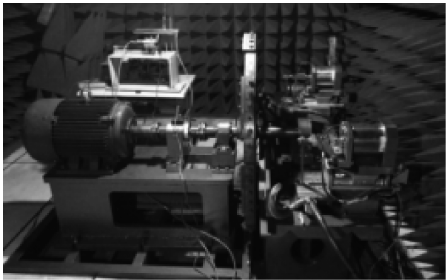


图1 实验机  
Fig.1 Experimental machine

实验使用纯铜接触导线标称截面积为 120mm<sup>2</sup>。滑板使用浸金属碳滑板,滑板的化学成分见表 1,性能参数见表 2。

表 1 滑板化学成分

Tab.1 Chemical composition of skateboard			
成分	质量百分比 (%)	成分	质量百分比 (%)
C	92.9544	Sn	0.5282
Cu	3.9064	Si	0.4510
Pb	0.9780	S	0.2810
Sb	0.5531	其他	0.3479

表 2 滑板性能参数

Tab.2 Skateboard performance parameters		
实验材料	铜接触导线	浸金属碳滑板
硬度 $H/(N\cdot mm^{-2})$	96.2	88~96
密度/ $(g\cdot cm^{-2})$	8.9	2.48~2.61
电阻率 $\rho/(\mu\Omega\cdot m)$	0.0185	9.6~11.5

2.2 载流稳定系数

在实验过程中,测得的接触电流不是给定的初始值,而是围绕一个中值并且随着时间一直波动变化的数值,实验接触电流波形如图 2 所示。图 2 是在波动载荷压力幅值为 (70±20) N、波动频率为 2Hz、速度为 120km/h、电流为 150A 的情况下电流随时间变化的曲线,曲线围绕中值 70A 一直波动变化。电流偏离电流平均值的大小反映出电流稳定性的好坏,决定着机车能否安全、稳定地运行,因此电流稳定性可作为弓网滑动电接触接触失效的评判标

准。电流的稳定性可通过载流稳定系数反映,其值越小,代表电流稳定性能越好。载流稳定系数为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{A}} \times 100\%$$

(1)

式中,σ、 $\bar{A}$  分别为接触电流的标准差和平均值。

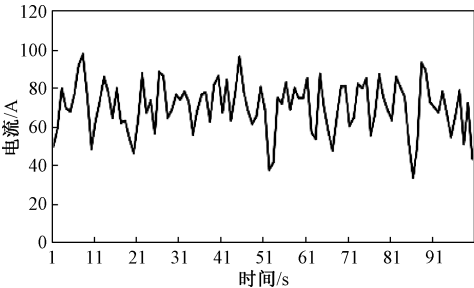


图2 实验接触电流波形  
Fig.2 Contact current waveform of experiment

我国高速铁路弓网受流质量评价采用欧洲铁路联盟制定的标准体系,标准规定接触压力最大标准偏差为平均接触压力的 30%<sup>[15]</sup>。弓网系统中弓网接触压力的稳定性和可靠性直接决定着弓网系统中电流的稳定性和可靠性,可得出当 ε>30%时弓网滑动电接触不稳定<sup>[16]</sup>。

3 载流稳定系数实验结果与理论分析

3.1 实验结果

波动载荷压力幅值为 (70±20) N,电流为 150A 作用下,载流稳定系数随不同速度和波动频率变化的规律如图 3 所示;波动载荷压力幅值为 (70±20) N,速度为 120km/h 作用下,载流稳定系数随不同电流和波动频率变化的规律如图 4 所示。在波动频率变化过程中,只有在图 4 中频率从 2Hz 上升到 3Hz,载流稳定系数有略微上升的趋势,而在图 3 与图 4 的其他频率上升过程中,载流稳定系数均随频率的增大而下降;在图 3 与图 4 中,载流稳定系数整体随频率的增大而呈现下降趋势,电流稳定性增加。这表明频率的增减对载流稳定系数的影响不是单调变化的。从图 3 可知,速度为 40km/h 和 80km/h 时的载流稳定系数非常接近,速度大于 80km/h 时,载流稳定系数随速度的增加而增大,载流稳定性变差。这表明频率一定时,随着速度的减小,载流稳定系数逐渐减小且减小趋势逐渐变缓。从图 4 可知,随着电流增加,载流稳定系数减小,稳定性增加;相同频率下不同电流强度对应的载流稳定系数相差不大,这表明在此实验条件下,电流对载流稳定系数的影响较小。

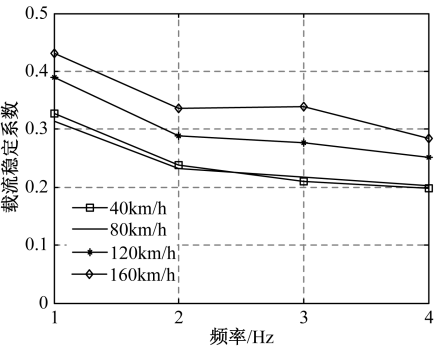


图 3 波动幅值(70±20) N、电流 150A 的载流稳定系数曲线  
Fig.3 Current carrying stability coefficient curves of fluctuation amplitude (70±20) N and current 150A

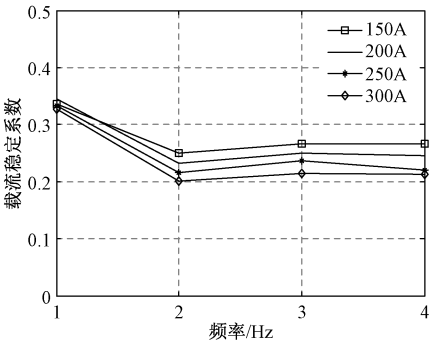


图 4 波动幅值(70±20) N、速度 120km/h 的载流稳定系数曲线  
Fig.4 Current carrying stability coefficient curves of fluctuation amplitude (70±20) N and speed 120km/h

在波动载荷频率为 2Hz、电流为 150A 的情况下,不同速度和波动载荷幅值对载流稳定系数变化的影响如图 5 所示;在波动载荷频率为 2Hz、速度为 120km/h 的情况下,不同电流和波动载荷对载流稳定系数变化的影响如图 6 所示。从图 5 与图 6 可知,随着速度与电流的增加,速度和电流对载流稳定系数的影响规律与图 3、图 4 中的载流稳定系数变化一致,这表明两次全因子实验的实验过程和结果一致且具有准确性;随着波动载荷压力幅值增大,载流稳定系数单调递增,电流稳定性和可靠性下降,单调递增的变化规律也表明波动载荷压力幅值的增加对载流稳定系数的影响是单调的。

波动载荷频率为 2Hz、速度为 80km/h、电流为 100A,载流稳定系数随波动幅值和基础载荷压力变化的规律如图 7 所示。在图 7 中基础载荷压力小于 70N 时,载流稳定系数始终在 0.6 以上,弓网滑动电接触呈现接触失效的状态,且随波动幅值的变化不能改变失效状态;而当基础载荷压力达到 80N 以上

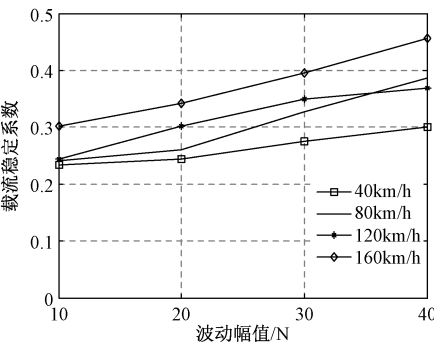


图 5 波动频率 2Hz、电流 150A 的载流稳定系数曲线  
Fig.5 Current carrying stability coefficient curves of fluctuation frequency 2Hz and current 150A

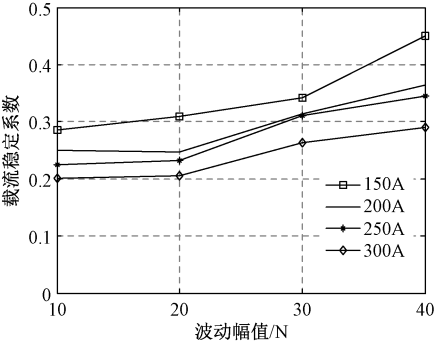


图 6 波动频率 2Hz、速度 120km/h 的载流稳定系数曲线  
Fig.6 Current carrying stability coefficient curves of fluctuation frequency 2Hz and speed 120km/h

时,载流稳定系数逐渐减小至有效接触的判据以内。从图 7 可知,随着基础压力载荷增大,载流稳定系数减小,电流稳定性升高;且当基础载荷压力值由 60N 变化到 90N,载流稳定系数从 1 变化至 0.2,变化的程度和趋势均很强,表明基础载荷压力对载流稳定系数的影响远大于速度、电流和波动频率等。

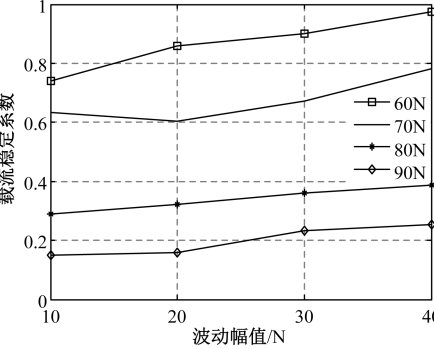


图 7 速度 80km/h、电流 100A 的载流稳定系数曲线  
Fig.7 Current carrying stability coefficient curves of speed 80km/h and current 100A



3.2 理论分析

3.2.1 波动载荷对载流稳定性的影响

在机车运行过程中,波动载荷频率对载流稳定系数的影响有两方面作用:①较高的频率会使磨损加剧,氧化物增多,载流稳定性变差;②高频率使接触区域充分暴露时间减少,氧化减慢,使氧化物减少,电流受流稳定性上升<sup>[17]</sup>。两种作用相反,故波动频率对载流稳定性的影响并不是单调变化。图 3 实验中频率由 1Hz 升高到 2Hz,氧化减缓首先作为影响载流稳定性的主要因素,载流稳定系数减小;随着频率由 2Hz 继续增加,两方面因素对载流稳定性的影响接近,整体的载流稳定系数随频率增加而出现变化程度减缓现象。图 4 实验中频率由 2Hz 上升到 3Hz 过程中,擦伤磨损、磨损增加对载流稳定性的影响略大,载流稳定系数增加。图 3、图 4 曲线的整体变化规律表明,波动频率增加的过程中,氧化减缓影响载流稳定性的比重较大,载流稳定系数整体呈下降趋势。频率变化对应滑板表面形貌图如图 8、图 9 所示,图 8、图 9 是波动载荷压力为 $(70\pm20)$  N、速度为 120km/h、电流为 250A,频率分别为 2Hz、4Hz 的滑板形貌图。从图 8、图 9 中可知,频率增大,滑板表面擦伤与形成的氧化物减少,与理论分析相符。

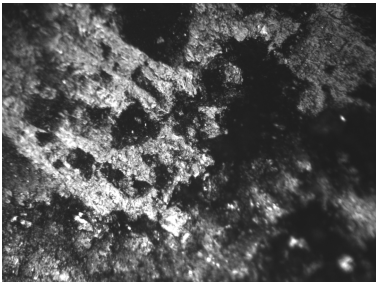


图 8 频率 2Hz 的滑板表面形貌图

Fig.8 Surface topography of slide plate with frequency 2Hz

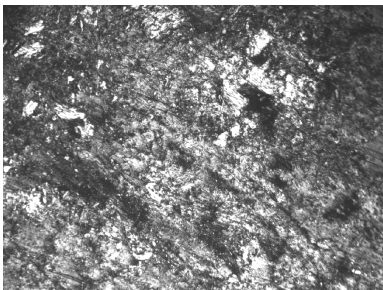


图 9 频率 4Hz 的滑板表面形貌图

Fig.9 Surface topography of slide plate with frequency 4Hz

基础载荷压力对载流稳定系数的影响可用滑板与接触导线间实际接触面积来解释,保持一定的实际接触面积是滑板与接触导线间良好接触的重要条件。滑板与铜导线的实际接触面积只占视在接触面积的一小部分,且导电斑点分布在实际接触面积上,实验过程中,电流从接触导线通过导电斑点传导至滑板。基础载荷压力增加,滑板与导线间的凸峰相互挤压,接触斑点面积增大且数量增多,实际接触面积增大,电流受流稳定性提升,载流稳定系数减小。

波动载荷幅值可以使载流摩擦产生机械振动;当波动载荷幅值为正时,接触区域内导电斑点因压力增大使滑板与导线间的凸峰相互挤压,导电斑点增加,同理当波动载荷幅值为负时,接触区域导电斑点减少。机械振动与波动幅值的正负变化造成了接触区域内导电斑点在形成和断隔中转变的结果。增加波动载荷幅值使导线与滑板间的表面微凸体在横向相对滑动过程中相撞更加剧烈,相撞引起的振动导致滑板与导线的接触状态变得更加不稳定。在波动频率 2Hz、电流 150A、速度 80km/h,不同波动幅度对应的离线率见表 3,从表 3 可见波动幅值增加,离线率升高,运行过程的受流稳定性下降。波动幅值越大,滑动周期中会暴露更多的接触面尖峰,起氧化作用的接触点越来越多,因此传导电流的接触点的数量减少,载流稳定性下降。综合两方面,波动幅值增大,载流稳定系数单调增加,受流稳定性下降。

表 3 不同波动幅值下的离线率

Tab.3 Off-line rate at different fluctuant amplitude				
波动幅值/N	70±10	70±20	70±30	70±40
离线率(%)	1.27	2.26	3.99	6.17

3.2.2 波动载速度和电流对载流稳定性的影响

电流强度大小直接决定载流稳定性能的好坏,电流对接触网载流性能的影响与温度的状况是密切相关的。在波动载荷压力幅值为 $(70\pm20)$  N、波动频率为 2Hz、速度为 120km/h 条件下,不同电流对应的滑板与导线接触表面温度见表 4。电流的增加会加大摩擦过程中产生的焦耳热,促使接触面温度升高。温度升高将使滑板与导线间的凸峰弹性强度降低,使导电斑点面积增大,加大实际接触面积,弓网滑动电接触载流稳定性升高。

表 4 不同电流下的表面温度

Tab.4 Surface temperature at different currents				
电流/A	100	150	200	250
表面温度/℃	55.4	61.5	75.8	87.4

随着速度的提高,导线与滑板间的相对运动更加不平顺,振动、冲击等现象更加明显与剧烈,这些因素使滑动电接触过程中滑板与接触导线间的接触斑点减少,产生较高离线率,波动载荷压力幅值为 $(70\pm20)$  N,波动频率为2 Hz,电流为150 A,不同速度对应的离线率见表5。随着速度增加,离线率增加还会导致火花放电,使运行过程更加不稳定。故载流稳定性随着速度的上升而降低。

表 5 不同速度下的离线率

Tab.5 Off-line rates at different speeds				
速度/(km/h)	40	80	120	160
离线率(%)	1. 23	2. 01	3. 67	5. 06

3.3 可靠接触临界条件

以 $\varepsilon=30\%$ 为接触失效临界条件,由图3可知,当波动载荷压力幅值为 $(70\pm20)$  N、接触电流为150 A,不同速度下对应的最小波动频率值见表6。表6中速度越大,保持滑动可靠接触所需的最小波动频率值变大。由图4可知,当波动载荷压力幅值为 $(70\pm20)$  N、滑动速度为120 km/h,不同电流对应的最小波动频率值见表7。随着电流大于200 A且继续增大,相同频率不同电流的载流稳定系数相差很小。电流越大,可靠接触的临界最小波动频率越小。

表 6 不同速度下最小波动频率值

Tab.6 Minimum fluctuant frequency value at different speeds				
速度/(km/h)	40	80	120	160
最小波动频率/Hz	1. 18	1. 32	1. 94	3. 74

表 7 不同电流下最小波动频率值

Tab.7 Minimum wave frequency value under different current				
电流/A	150	200	250	300
最小波动频率/Hz	1. 92	1. 46	1. 36	1. 21

从图5可知,当波动频率为2 Hz、接触电流为150 A,不同速度下对应的最大波动幅值见表8。为保持机车运行临界稳定,表8中随着速度增加,保持可靠接触允许的最大波动幅值逐渐减小。从图6可知,当波动频率为2 Hz、滑动速度为120 km/h,不同电流下对应的最大波动幅值见表9,电流越大,保持可靠接触允许的最大波动幅值越大。

表 8 不同速度下最大波动幅值

Tab.8 Maximum amplitude of fluctuation at different speeds				
速度/(km/h)	40	80	120	160
最大幅值/N	70±40	70±26	70±24	70±10

表 9 不同电流下最大波动幅值

Tab.9 Maximum amplitude of fluctuation under different current				
电流/A	150	200	250	300
最大幅值/N	70±14	70±27	70±28	70±41

4 载流稳定系数建模

表6~表9归纳出本次实验中保持可靠接触的临界条件。为了更好地判断弓网滑动电接触失效与否,下面建立输出载流稳定系数与输入波动载荷幅值、波动频率、速度和电流间的关系模型。

4.1 模糊推理系统

从实验结果图3~图6可看出曲线具有高度非线性的特征,此特征使建立载流稳定系数模型非常困难。而模糊推理系统可很好地使用于非线性关系的建模之中<sup>[18,19]</sup>,用多个简单的线性关系模型描述复杂关系的不确定性,直到全局逼近复杂动态系统。

模糊推理系统的条件部分依据研究系统输入、输出之间的线性关系编写,结论部分由各条件部分的线性规则线性组合。对多输入单输出的模糊推理规则,第 $k$ 条规则定义为: $R_k$ : if  $x_1$  is  $A_{k1}$ ,  $x_2$  is  $A_{k2}$ , ...,  $x_m$  is  $A_{km}$  then  $y_k = p_{0k} + p_{1k}x_1 + p_{2k}x_2 + \cdots + p_{mk}x_m$ 。在本文中该模型有4个输入,即波动载荷压力、波动频率、运行速度和电流强度,输出为载流稳定系数。根据上述2组全因子实验,将图4与图5的实验数据作为样本数据进行模糊推理训练,取图3与图6中的实验数据检测模糊推理系统的准确性。

4.2 模糊推理系统初始化

根据实验测量载流稳定系数的结果,对if模糊语言规则进行模糊集划分。波动载荷压力:小(用 $A_1$ 表示)、适当(用 $A_2$ 表示)、较大(用 $A_3$ 表示)、大(用 $A_4$ 表示),各语言规则的模糊集中心依次对应于 $(70\pm10)$  N、 $(70\pm20)$  N、 $(70\pm30)$  N、 $(70\pm40)$  N;频率:小(用 $B_1$ 表示)、适当(用 $B_2$ 表示)、较大(用 $B_3$ 表示)、大(用 $B_4$ 表示),模糊中心依次对应于1 Hz、2 Hz、3 Hz、4 Hz;速度:小(用 $C_1$ 表示)、适当(用 $C_2$ 表示)、较大(用 $C_3$ 表示)、大(用 $C_4$ 表示),模糊中心依次对应于40 km/h、80 km/h、120 km/h、160 km/h;电流:小(用 $D_1$ 表示)、适当(用 $D_2$ 表示)、较大(用 $D_3$ 表示)、大(用 $D_4$ 表示),模糊中心依次对应于100 A、150 A、200 A、250 A。

模糊规则 then 部分对应于载流稳定系数,从小到大依次用 $E_1, E_2, E_3, \cdots$ 表示,各模糊语言规则的中心为实验测得的载流稳定系数。

4.3 模糊推理系统训练

模糊系统的形式为：

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left\{ \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \right\}}{\sum_{l=1}^M \left\{ \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right] \right\}} \quad (2)$$

式中， $M$  为模糊规则数量； $n$  为 if 语言条件部分数量； $x_i$  为第  $i$  个输入数据； $\bar{x}_i^l$ 、 $\sigma_i^l$  为 if 语言部分隶属度函数中心和宽度； $\bar{y}^l$  为 then 部分模糊集中心。

模糊推理系统训练误差为：

$$e = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} [f(x_0^i) - y_0^i]^2 \quad (3)$$

式中， $N$  为训练数据数目； $y_0^i$ 、 $x_0^i$  为输出与输入。

为减小模糊推理系统训练误差,使用梯度下降算法训练 then 部分的模糊中心  $\bar{y}^l$ 。

$$\bar{y}^l(q+1) = \bar{y}^l(q) - \alpha \frac{\partial e}{\partial \bar{y}^l} \quad (4)$$

式中， $l=1,2,\cdots$ ； $q=0,1,2,\cdots$ ； $\alpha$  为步长。

将式(3)对  $\bar{y}^l$  求偏导：

$$\frac{\partial e}{\partial \bar{y}^l} = \sum_{i=1}^N (f - y) \frac{1}{b} \bar{z}^l \quad (5)$$

式中

$$f = \frac{a}{b}, \quad a = \sum_{l=1}^M \bar{y}^l \bar{z}^l, \quad b = \sum_{l=1}^M \bar{z}^l$$
$$\bar{z}^l = \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \left( \frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l} \right)^2 \right]$$

将式(5)代入式(4)得到训练算法如下：

$$\bar{y}^l(q+1) = \bar{y}^l(q) - \alpha \sum_{i=1}^N (f - y) \frac{1}{b} \bar{z}^l \quad (6)$$

使用梯度训练算法优化过程中,由于待训练的初值有可能在最小值点附近,这可能会因移动距离过大而使梯度下降跳过了最小值的点;且求偏导数为 0 的方法得到的值是局部最小值,所以梯度训练算法并不能保证一定能得到全局最小值。将梯度下降算法与模拟退火算法结合求取全局最小值可避免此问题。模拟退火算法从设定的初始温度出发,以一定的概率突跳特性寻找梯度下降算法的全局最优解,随着温度的不断下降,这个概率逐渐降低且趋向稳定,即概率性地跳出并最终趋于全局最优解。

训练模糊推理系统的收敛过程如图 10 所示。由图 10 可知,训练误差随着训练次数的增加越来越小,且最后训练误差趋于稳定。

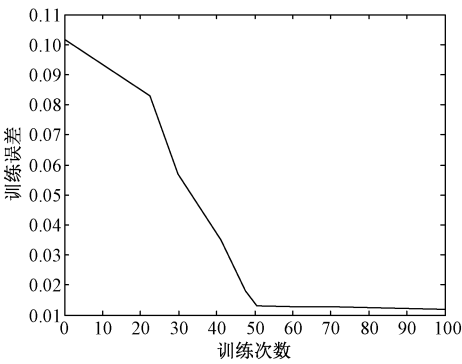


图 10 模型训练  
Fig.10 Model training

4.4 结果验证

检测数据中选取的几组不同实验条件下的预测值见表 10。

表 10 模糊推理系统预测结果

Tab.10 Prediction results of fuzzy inference system

波动载荷 压力幅值 /N	频率 /Hz	电流 /A	速度 /(km/h)	载流 稳定 系数	预测值	误差
70±10	2	150	80	0.2413	0.2487	0.0074
70±20	3	100	120	0.25	0.2581	0.0081
70±30	2	150	80	0.3276	0.3369	0.0093
70±40	2	150	120	0.3693	0.3785	0.0092

由表 10 可知载流稳定系数实验值与预测值间误差很小,模糊推理系统有效。因此,由模糊推理系统建立的载流稳定系数与波动载荷、速度、电流的关系模型可以模拟实际弓网滑动电接触的接触状态。在已知机车波动载荷、速度、电流的情况下,可以得出此时弓网滑动电接触的接触状态是否失效。

5 结论

- (1) 通过研究波动载荷作用下,载流稳定系数  $\varepsilon$  随速度和电流改变而变化的趋势,确定出载流稳定系数  $\varepsilon$  随着波动载荷压力和滑动速度的增加而增加,随着波动频率和接触电流的增加而减小的特性规律。
- (2) 通过弓网滑动电接触载流稳定系数失效判据  $\varepsilon > 30\%$ ,在不同波动载荷条件下,得到不同速度和电流时保持可靠接触的临界数值。
- (3) 通过实验数据训练出的模糊推理系统,建立载流稳定系数与波动载荷压力、频率、速度的关系模型,利用该模型可以判断机车运行时弓网滑动电接触是否处于接触失效状态。



## 参考文献 (References):

- [1] Zhou Y, Yao B, Ge S, et al. Failure mechanism of sliding electrical contacts with various plated materials [A]. ICEC 2014; The 27th International Conference on Electrical Contacts [C]. Dresden, Germany, 2014. 1-6.
- [2] Xie X L, Zhang L, Xiao J K, et al. Sliding electrical contact behavior of AuAgCu brush on Au plating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (9): 3029-3036.
- [3] Bucca G, Collina A. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system [J]. Wear, 2009, 266 (1-2): 46-59.
- [4] Malucci R D. Fretting corrosion degradation, threshold behavior and contact instability electrical contacts [A]. Proceedings of the Forty-Ninth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts [C]. Washington, DC, USA, 2003. 2-15.
- [5] Ren W, Du Y, Cui L, et al. Research on fretting regimes of gold-plated copper alloy electrical contact material under different vibration amplitude and frequency combinations [J]. Wear, 2014, 321: 70-78.
- [6] 任万滨, 武剑, 陈宇, 等 (Ren Wanbin, Wu Jian, Chen Yu, et al.). 电触点材料接触电阻高精密度测量技术 (Precision measuring technique for contact resistance of contact materials) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (1): 31-36.
- [7] 李玲玲, 马东娟, 李志刚 (Li Lingling, Ma Dongjuan, Li Zhigang). 触点动态接触电阻时间序列混沌预测 (Chaotic predication of dynamic contact resistance times series on contacts) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (9): 187-193.
- [8] 王淑娟, 余琼, 翟国富 (Wang Shujuan, Yu Qiong, Zhai Guofu). 电磁继电器接触失效机理判别方法 (Discrimination method of contact failure mechanisms for electromagnetic apparatus) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2010, 25 (8): 38-44.
- [9] 刘帼巾, 陆俭国, 王海涛, 等 (Liu Jinguo, Lu Jianguo, Wang Haitao, et al.). 接触器式继电器的失效分析 (Failure analysis of contactor relay) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2011, 26 (1): 81-85.
- [10] 李文华, 关欣, 周露露, 等 (Li Wenhua, Guan Xin, Zhou Lulu, et al.). 环境应力下铁路电器触点失效机理分析及寿命建模 (Failure mechanism analysis and life modeling of railway electrical contact under the environmental stress) [J]. 机车电传动 (Electric Drive for Locomotives), 2017, (2): 14-17, 23.
- [11] 任万滨, 王鹏, 马晓明, 等 (Ren Wanbin, Wang Peng, Ma Xiaoming, et al.). 微动诱发的触点电接触间歇失效现象研究 (Intermittency phenomenon of electrical contacts induced by fretting behavior) [J]. 摩擦学学报 (Tribology), 2013, 33 (4): 382-387.
- [12] 刘伯颖, 孙训俊, 李玲玲, 等 (Liu Boying, Sun Xunjun, Li Lingling, et al.). 灰色模型在触点电器电接触失效预测中的应用 (Grey model in the application of relay contact failure prediction) [J]. 电工技术学报, (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (s2): 418-423.
- [13] 郭凤仪, 刘帅, 王智勇 (Guo Fengyi, Liu Shuai, Wang Zhiyong). 弓网系统滑动电接触瞬态温度场仿真研究 (Research on transient temperature field of electrical sliding contact in pantograph and catenary system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 29-34.
- [14] 陈忠华, 唐博, 时光, 等 (Chen Zhonghua, Tang Bo, Shi Guang, et al.). 弓网多目标滑动电接触下最优压力载荷 (Optimal pressure load under multi-objective sliding electric contact in the pantograph-catenary system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (17): 154-160.
- [15] 黄维 (Huang Wei). 高速接触网的受流评价浅析 (Analysis of flow evaluation of high speed catenary) [J]. 科技创业月刊 (Pioneering with Science & Technology Monthly), 2010, 23 (5): 98-99, 104.
- [16] 陈忠华, 康立乾, 石英龙, 等 (Chen Zhonghua, Kang Liqian, Shi Yinglong, et al.). 弓网滑动电接触电流稳定性研究 (Study of current stability in pantograph-catenary sliding electric contact) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (10): 127-133.
- [17] 张永振, 宋克兴, 杜三明, 等 (Zhang Yongzhen, Song Kexing, Du Sanming, et al.). 载流摩擦学 (Current carrying tribology) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2016.
- [18] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等 (Wang Taoyun, Ma Hongzhong, Cui Yangliu, et al.). 基于模糊 Petri 网的 GIS 故障诊断与可靠性分析 (Fault diagnosis and reliability analysis of GIS based on fuzzy Petri net) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (5): 67-73.
- [19] 李鹏, 韩鹏飞 (Li Peng, Han Pengfei). 含高密度可

再生能源的交直流混合微网模糊优化运行 (Fuzzy optimal operation of hybrid AC/DC microgrid with high-density renewable energy sources) [J]. 电工电能新技术

(Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 63-70.

Study on contact failure of pantograph’s sliding electrical contact under fluctuant loading

ZHANG Ji-hua, ZHANG Hai-zhou, CHEN Zhong-hua, HUI Li-chuan, DANG Wei  
(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** The determination of the contact failure of the pantograph’s sliding electrical contact is of great significance to the safe operation and further increase of the speed of the locomotive. Based on the actual operating conditions of the locomotive, this paper makes use of a self designed pantograph sliding contact experimental machine to do the study of the failure of the pantograph’s sliding contact, The change law of carrying current stability coefficient with different fluctuant loading, velocity and current conditions is studied and the corresponding theoretical analysis is carried out. The critical conditions for maintaining reliable contact under different working conditions are obtained on the basis of the failure criterion of the carrying current stability coefficient. Based on the experimental data and training the fuzzy inference system by gradient descent and simulated annealing algorithm, the relationship model of fluctuant loading, velocity, current and carrying current stability coefficient is established. The model can be used to determine whether the pantograph’s sliding contact is in the contact failure state when the locomotive runs.

**Key words:** pantograph sliding electrical contact; contact failure; fluctuating loading; carrying current stability coefficient; fuzzy inference system