

CRH380BL 型动车组受电弓系统可靠性分析

王远霏, 孙海荣, 裴春兴, 蒋 洁, 刘先升

(中车唐山机车车辆有限公司 技术研究中心, 河北 唐山 063035)

摘 要: 基于 CRH380BL 型动车组受电弓的历史故障数据, 利用可靠性数据分析方法, 针对 4 种主要故障零件, 研究其故障分布规律, 进而评估受电弓整个系统的可靠性水平。在受电弓零部件中发生故障的主要是 ADD 及供风管、供风管路、10-X01 继电器和升弓气囊 4 个部分。研究表明, ADD 及供风管与 10-X01 继电器的故障分布规律为两参数威布尔分布, 供风管路与升弓气囊的故障分布规律为指数分布。利用可靠性分析的方法找出受电弓系统可靠性的薄弱环节, 为动车组故障检修与预警提供理论依据。

关键词: 动车组; 受电弓; 可靠性分析; 故障分布; 故障预警; 数据分析

中图分类号: U266.2; U264.3⁺4

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.04.017

System Reliability Analysis of CRH380BL EMUs Pantograph

WANG Yuanfei, SUN Hairong, PEI Chunxing, JIANG Jie, LIU Xiansheng

(Technology Research Center, CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China)

Abstract: Based on the historical fault data of pantograph of CRH380BL EMUs, the fault distribution law of four main fault parts was studied by using the method of reliability data analysis, and then the reliability level of pantograph system was evaluated. ADD and air supply pipe, air supply pipe line, 10-X01 relay and pantograph airbag were the four parts that cause the most faults in pantograph. The results showed that the fault distribution of ADD, air supply pipe and 10-X01 relay is two-parameter Weibull distribution, and the fault distribution law of air supply pipe line and bow airbag is exponential distribution. Using the method of reliability analysis, the weak link of pantograph system reliability could be find out, which provided theoretical basis for EMUs fault overhaul and early warning.

Keywords: EMUs; pantograph; reliability analysis; fault distribution; fault alarm; data analysis

0 引言

随着我国高速铁路、客运专线的相继建成开通, 动车组数量不断增加, 动车组运行速度不断提高, 在动车组运行途中受电弓部件的故障发生频率有明显的上升趋势, 已经成为影响高速铁路动车组安全正点运营的重要隐患。动车组发生受电弓故障后, 需要快速对故障进行判断处理, 一旦应急故障处理不当, 会严重干扰正常的运行秩序, 甚至会造成高速铁路动车组的大面积晚点。

对动车组受电弓开展可靠性数据分析的主要目的是研究动车组受电弓部件的故障分布规律, 以及评估系统部件的可靠性水平^[1], 是分析系统故障发展和制定最佳预防维修周期的重要手段。根据收集到的关键部件的故障数据, 使用数学统计方法, 得到系统部件的故障分布^[2]。

本文基于 CRH380BL 型动车组的受电弓故障历史数据, 对动车组受电弓的可靠性进行分析和评估, 对故障分布的趋势和发生故障的间隔里程进行分布检验和参数估计, 预测动车组下一次发生受电弓故障的走行里程; 根据列车运行安排, 提前预测出每个车组下

收稿日期: 2018-06-13

一次发生受电弓故障的时间,指导维修。

1 受电弓故障分析

CRH380BL型动车组受电弓组成包括支撑绝缘子、上臂组装、上导杆装配、下导杆、弹簧组装、弓头、自动降弓装置、升弓装置、控制阀板、供风管、软连接、阻尼器等零部件。经过对某铁路局2011—2017年CRH380BL型动车组重点故障库整理分析发现,动车组受电弓故障共发生311起。其中,故障占比较多的为ADD及供风管故障、10-X01继电器故障、升弓气囊故障和供风管路故障,这4种故障在总故障中的占比超过70%。

在主要故障所涉及的零件中,10-X01继电器属于电气元件,ADD及供风管、供风管路、升弓气囊属于机械零部件,均无法获取大量的实际检测数据。因此,针对受电弓的故障预警预测模型,只能抓住4个重点故障点分别进行深度分析建模,通过可靠性技术分析挖掘出故障发生和走行里程的分布规律,综合考虑4个重要故障点构建受电弓部件健康模型,预测受电弓故障发生的概率。

2 算法选择

基于故障的可靠性分析,是根据故障模式、故障原理、故障的影响及其后果的严重程度,分析产品的故障规律,估计系统及零部件的可靠性指标,如可靠度或故障间隔时间,以便采取措施预防故障的发生,提高产品的可靠性^[3-4]。

具体的分析流程如图1所示。

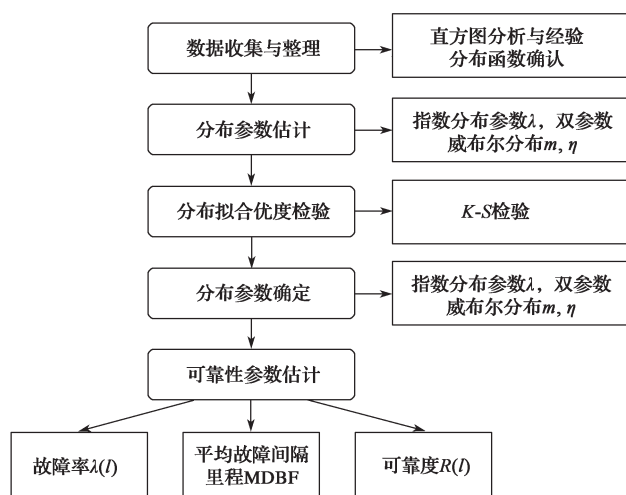


图1 受电弓可靠性建模分析流程

2.1 可靠性数据分析

可靠性数据分析主要包括直方图分析和经验分布函数的确定^[5]。根据对动车组故障数据的收集,获得动车组受电弓故障间隔里程,绘制直方图来判断故障数据的分布类型,从而进行可靠性分析。直方图的绘制包括以下几个步骤^[6]:

①在收集到的一批数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 中,找出其最大值 $l_{\max}$ 和最小值 $l_{\min}$ 。

②将数据分组。根据 n 个数据,由经验公式确定分组数 k ,即

$$k=1+3.3 \lg n \quad (1)$$

③计算组距 Δl ,即组与组之间的间隔

$$\Delta l=(l_{\max}-l_{\min})/k \quad (2)$$

④确定各组的分界点,明确各组的上、下限值。

⑤计算各组的中心值:

$$M_i=\frac{\text{某组下限值}+\text{某组上限值}}{2} \quad (3)$$

⑥统计落入各组的频数 r_i 和频率 ω_i 。

⑦以故障间隔里程为横坐标,各组的频数为纵坐标,绘制故障频数直方图。

⑧累计故障频率分布图:第 i 组的累计频率为

$$F_i=\sum_{j=1}^i \omega_j \quad (4)$$

⑨以累计频率为纵坐标,故障间隔里程为横坐标,绘制故障累计频率图。

最终绘制受电弓故障频数与故障累计频率曲线如图2所示

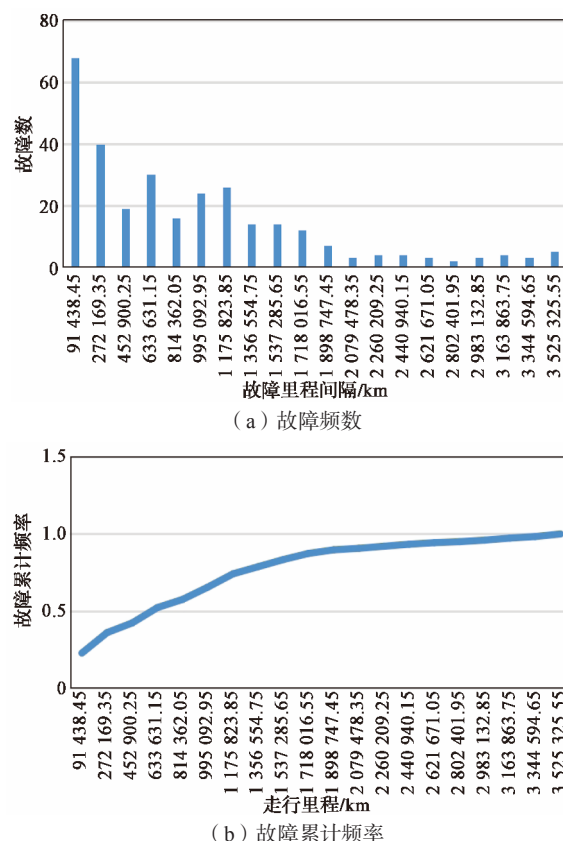


图2 受电弓故障频数与故障累计频率曲线

通过图2可以看出,故障累计频率拟合曲线外凸并且无拐点,动车组受电弓的故障间隔里程不服从正态分布,可能服从威布尔分布或指数分布。

2.2 故障分布函数

故障分布函数 $F(t)$ 或 $F(l)$ 是反映总体的故障规律。

当已知产品的故障分布函数时, 可求出可靠度函数、故障率函数以及其他表征可靠性的相关指标^[7]。如果产品故障分布函数并不清楚, 但知道其故障的分布类型, 则可通过对分布的参数估计求得可靠性特征量的估计值。故障分布类型是研究可靠性的一个主要问题, 常用的故障分布类型有指数分布、威布尔分布等^[8]。

2.2.1 指数分布

许多产品, 特别是电子元器件、无余度的复杂系统, 在工作时间内的任意时间点, 都可能由于“偶然”原因发生故障, 并且在偶然故障期内故障率趋于某一稳定值。描述这种故障率为常数的分布函数是指数分布 $\exp(\lambda)$, 即

$$F(l) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda l} & l > 0, \lambda > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其故障间隔里程的概率密度函数满足

$$f(l) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda l} & l > 0, \lambda > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

可靠度函数为

$$R(l) = \int_l^{\infty} f(u) du = e^{-\lambda l} \quad (7)$$

平均故障里程 (Mean Distance Between Failure, MDBF) 为

$$MDBF = \int_0^{\infty} R(l) dl = \int_0^{\infty} e^{-\lambda l} dl = \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

其方差为

$$\text{Var}(l) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (9)$$

产品失效率函数为

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{R(l)} = \frac{\lambda e^{-\lambda l}}{e^{-\lambda l}} = \lambda \quad (10)$$

产品运行 l 里程后, 再运行 x 公里的可靠度可表示为

$$R\left(\frac{x}{l}\right) = \Pr(L > x + l | L > l) = \frac{\Pr(L > x + l)}{\Pr(L > l)} = \frac{e^{-\lambda(l+x)}}{e^{-\lambda l}} = e^{-\lambda x} = R(l) \quad (11)$$

2.2.2 威布尔分布

威布尔分布一般适用于大型复杂系统的可靠性分布, 它是由瑞典教授 Waloddi Weibull 在进行材料强度统计时获得并以发现者姓名命名。威布尔分布具有较高的适应性, 可以模拟多种故障率变化形式。

如果系统服从两参数的威布尔分布, 则该系统的故障间隔里程 l 被称为参数为 m, η 的威布尔分布, 记为 Weibull(m, η), 若其分布函数满足

$$F(l) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} & l > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

并且得到其概率密度函数为

$$f(l) = \begin{cases} \frac{m}{\eta} \left(\frac{l}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} & l > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

该系统的可靠度为

$$R(l) = e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} \quad (14)$$

故障概率函数为

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{R(l)} = \frac{m}{\eta} \left(\frac{l}{\eta}\right)^{m-1} \quad (15)$$

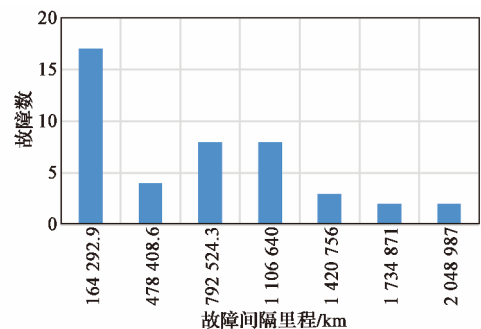
此模型说明某部件参数 l 大于 0 时就可能发生故障, 即为两参数的威布尔分布。若受电弓在运行 γ 里程前肯定不会出现故障, 则其分布为三参数威布尔分布, 其中的 3 个参数分别为形状参数 m 、位置参数 γ 和尺度参数 η 。因此在拟合时, 需要进一步通过分布模型的参数估计与假设检验, 验证受电弓部件的故障规律。

3 模型建立

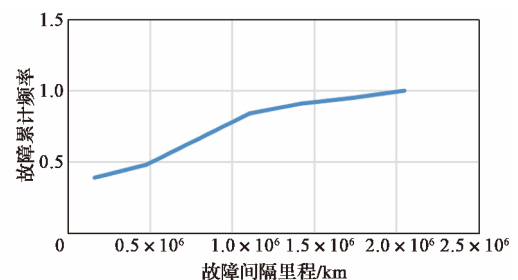
3.1 ADD 及供风管故障模型

3.1.1 ADD 及供风管故障间隔里程分布模型初判

ADD 及供风管故障频数分布和故障累计频率如图 3 所示。



(a) 故障频数分布



(b) 故障累计频率

图3 ADD 及供风管故障频数分布及故障累计频率曲线

从图 3 可以看出, ADD 及供风管故障累计频率随着里程的增长而增加, 属于耗损性故障; ADD 及供风管故障的故障频数随着里程的增加而减少, 说明受电弓的 ADD 及供风管故障间隔里程所服从的分布为指数分析或威布尔分布, 不服从正态分布。

3.1.2 ADD 及供风管故障间隔里程分布模型的参数估计

1) 指数分布参数估计

采用极大似然估计方法对指数分布模型的参数进

行估计。

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n l_i} = 1.3986 \times 10^{-6} \quad (16)$$

即受电弓 ADD 及供风管的故障规律的指数分布为

$$F(l) = 1 - e^{-1.3986 \times 10^{-6} l} \quad (17)$$

2) 两参数威布尔分布参数估计

假设动车组受电弓 ADD 及供风管的故障间隔里程服从威布尔分布, 通过最小二乘法对分布模型的形状参数 m 和尺度参数 η 进行参数估计, 代入数据, 计算得到

$$A = -10.2437, B = 0.7592$$

$$\text{则 } m = B = 0.7592, \eta = e^{-\frac{A}{B}} = 724412.9988$$

因此, 受电弓 ADD 及供风管的故障规律的分布函数为

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{724412.9988}\right)^{0.7592}} \quad (18)$$

3.1.3 ADD 及供风管故障间隔里程分布模型的假设检验

采用 $K-S$ 检验对受电弓 ADD 及供风管的故障分布类型进行假设检验, 确定该部件故障间隔里程是否服从指数分布或威布尔分布。根据计算, 指数分布检验统计量 $D_{n-i} = \max_i \{\delta_{i-i}\} = 0.1430$, 威布尔分布的检验统计量 $D_{n-w} = \max_i \{\delta_{i-w}\} = 0.1208$ 。由显著性水平 $\alpha = 0.01$, 查表得到 $d_{44, 0.01} = 0.2406$, 可以看出 $D_{n-w} < D_{n-i} < d_{44, 0.01}$, 说明受电弓 ADD 及供风管的故障间隔里程服从威布尔分布的显著性水平更高, 即 ADD 及供风管的故障规律分布函数为式 (18)。

3.1.4 ADD 及供风管故障间隔里程分布模型结果

基于两参数威布尔分布模型的平均故障里程可以由下式求得:

$$MDBF = \eta \cdot \tau \left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (19)$$

式中: m 为形状参数, η 为尺度参数; τ 为 gamma 函数, 查表可得函数值。

由此受电弓 ADD 及供风管的平均故障间隔里程为

$$MDBF = 724412.9988 \tau \left(1 + \frac{1}{0.7592}\right) = 852736.65 \quad (20)$$

故障分布函数为

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} = 1 - e^{-\left(\frac{l}{1.3804 \times 10^{-6}}\right)^{0.7592}} \quad (21)$$

故障概率密度为

$$f(l) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{l}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} = 2.7013 \times 10^{-5} l^{-0.2408} e^{-\left(\frac{l}{1.3804 \times 10^{-6}}\right)^{0.7592}} \quad (22)$$

可靠度函数为

$$R(l) = e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} = e^{-\left(\frac{l}{1.3804 \times 10^{-6}}\right)^{0.7592}} \quad (23)$$

故障率函数为

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{R(l)} = 2.7013 \times 10^{-5} l^{-0.2408} \quad (24)$$

ADD 及供风管可靠性与故障率曲线如图 4 所示。

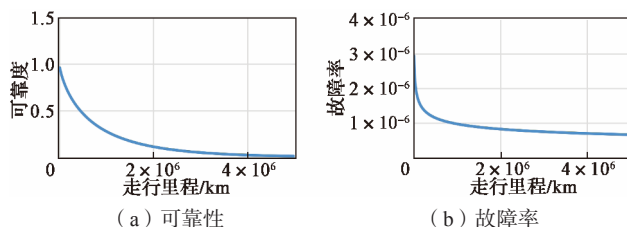


图 4 ADD 及供风管可靠性与故障率曲线

3.2 供风管路故障模型

3.2.1 供风管路故障间隔里程分布模型初判

供风管路故障频数分布及故障累计频率曲线如图 5 所示。

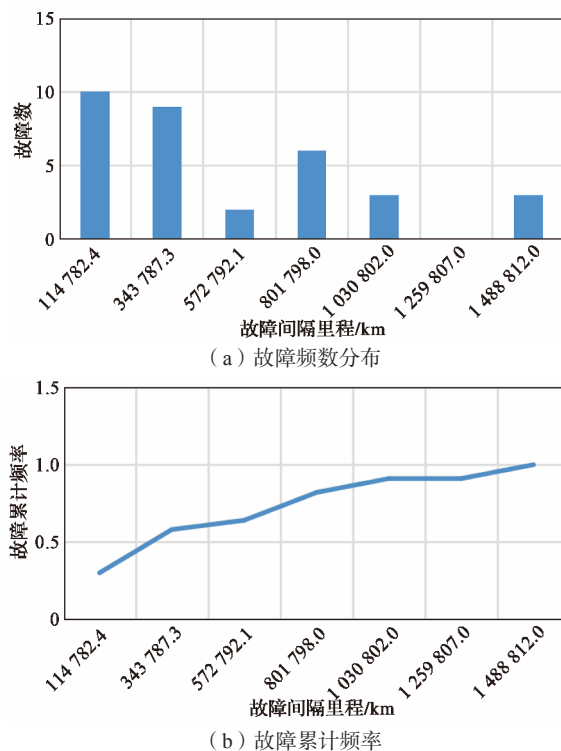


图 5 供风管路故障频数分布及故障累计频率曲线

从图 5 可以看出, 供风管路故障累计频率随着里程的增长而增加, 属于耗损性故障; 供风管路故障的故障频数随着里程的增加而减少, 说明受电弓的供风管路故障间隔里程所服从的分布为指数分布或威布尔分布, 不服从正态分布。

3.2.2 供风管路故障间隔里程分布模型参数估计

1) 指数分布参数估计

采用极大似然估计方法对指数分布模型的参数进行估计。

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n l_i} = 1.9174 \times 10^{-6} \quad (25)$$

即受电弓供风管路的故障规律的指数分布为

$$F(l) = 1 - e^{-1.9174 \times 10^{-6} l} \quad (26)$$

2) 两参数威布尔分布参数估计

假设动车组受电弓供风管路的故障间隔里程服从威布尔分布, 通过最小二乘法对分布模型的形状参数 m 和尺度参数 η 进行参数估计, 代入数据, 计算得到

$$A = -6.9263, B = 0.5212$$

$$\text{则 } m = B = 0.5212, \eta = e^{-\frac{A}{B}} = 590\,712.8569。$$

因此, 受电弓供风管路的故障规律的分布函数为

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{590712.8569}\right)^{0.5212}} \quad (27)$$

3.2.3 供风管路故障间隔里程分布模型假设检验

采用 $K-S$ 检验对受电弓供风管路的故障分布类型进行假设检验, 确定该部件故障间隔里程是否服从指数分布或威布尔分布。经过计算, 指数分布检验统计量 $D_{n-l} = \max_i \{\delta_{i-l}\} = 0.1332$, 威布尔分布的检验统计量 $D_{n-w} = \max_i \{\delta_{i-w}\} = 0.2010$ 。由显著性水平 $\alpha = 0.01$, 查表得到 $d_{33, 0.1} = 0.2077$, 可以看出 $D_{n-l} < D_{n-w} < d_{33, 0.1}$, 说明受电弓供风管路的故障间隔里程服从指数分布的显著性水平更高, 即供风管路的故障规律的指数分布为式 (26)。

3.2.4 供风管路故障间隔里程分布模型结果

受电弓供风管路的平均故障间隔里程为

$$MDBF = \eta \cdot \tau \left(1 + \frac{1}{m}\right) = 875\,832.1651 \quad (28)$$

故障分布函数为式 (26)。

故障概率密度为

$$f(l) = 1.9174 \times 10^{-6} e^{-1.9174 \times 10^{-6} l} \quad (29)$$

可靠度函数为

$$R(l) = e^{-1.9174 \times 10^{-6} l} \quad (30)$$

故障率函数为

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{R(l)} = 1.9174 \times 10^{-6} \quad (31)$$

供风管路可靠性与故障率曲线如图 6 所示。

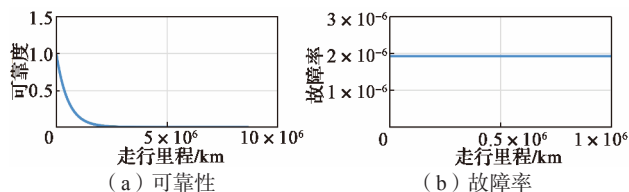


图6 供风管路可靠性与故障率曲线

受电弓供风管路的故障率曲线说明供风管路在运行里程内可能由于偶然原因发生故障, 也就说明供风管路可能处于偶然故障期。

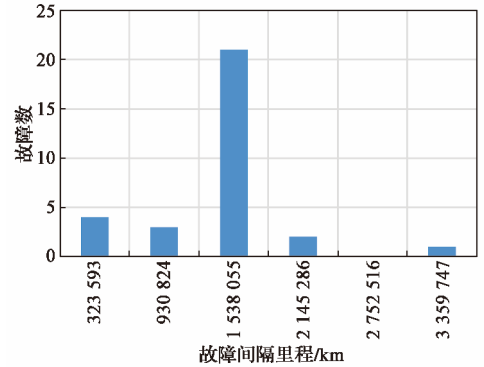
3.3 升弓气囊故障模型

3.3.1 升弓气囊故障间隔里程分布模型初判

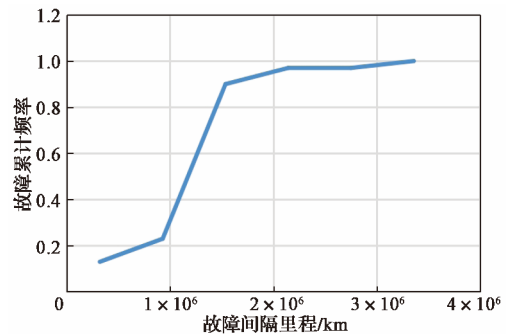
升弓气囊故障频数分布及故障累计频率曲线如图 7

所示。

从图 7 可以看出, 升弓气囊故障累计频率随着里程的增长而增加, 属于耗损性故障; 升弓气囊故障的故障频数随着里程的增加故障个数先增加再减少, 说明受电弓的升弓气囊故障间隔里程所服从的分布为指数分布或威布尔分布, 不服从正态分布。



(a) 故障频数分布



(b) 故障累计频率

图7 升弓气囊故障频数分布及故障累计频率曲线

3.3.2 升弓气囊故障间隔里程分布模型参数估计

1) 指数分布参数估计

采用极大似然估计方法对指数分布模型的参数进行估计。

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} = 7.37624 \times 10^{-7} \quad (32)$$

即升弓气囊的故障规律的指数分布为

$$F(l) = 1 - e^{-7.37624 \times 10^{-7} l} \quad (33)$$

2) 两参数威布尔分布参数估计

假设动车组升弓气囊的故障间隔里程服从威布尔分布, 通过最小二乘法对分布模型的形状参数 m 和尺度参数 η 进行参数估计, 代入数据, 计算得到

$$A = -16.5846, B = 1.1520$$

$$\text{则 } m = B = 1.1520, \eta = e^{-\frac{A}{B}} = 1\,787\,631.2210。$$

因此, 升弓气囊的故障规律的分布函数为

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{1787631.221}\right)^{1.152}} \quad (34)$$

3.3.3 升弓气囊故障间隔里程分布模型假设检验

采用 $K-S$ 检验对升弓气囊的故障分布类型进行假设检验, 确定该部件故障间隔里程是否服从指数分布或威布尔分布。由计算可知, 指数分布检验统计量

$D_{n-l} = \max_i \{\delta_{i-l}\} = 0.373\ 0$, 威布尔分布的检验统计量 $D_{n-w} = \max_i \{\delta_{i-w}\} = 0.280\ 0$ 。由显著性水平 $\alpha=0.01$, 查表得到 $d_{31, 0.01} = 0.285\ 3$, 可以看出 $D_{n-w} < d_{31, 0.01} < D_{n-l}$, 说明升弓气囊的故障间隔里程服从威布尔分布的显著性水平更高, 即升弓气囊的故障规律为

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{1787631.221}\right)^{1.152}} \quad (35)$$

3.3.4 升弓气囊故障间隔里程分布模型结果

基于两参数威布尔分布模型的平均故障里程可以由如下公式求得

$$MDBF = \eta \cdot \tau \left(1 + \frac{1}{m}\right) = 1\ 696\ 414.342\ 0 \quad (36)$$

故障分布函数为

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} = 1 - e^{-(5.594 \times 10^{-7} l)^{1.152}} \quad (37)$$

故障概率密度为

$$f(l) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{l}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} = 7.2251 \times 10^{-8} l^{0.152} e^{-(5.594 \times 10^{-7} l)^{1.152}} \quad (38)$$

可靠度函数为

$$R(l) = e^{-\left(\frac{l}{\eta}\right)^m} = e^{-(5.594 \times 10^{-7} l)^{1.152}} \quad (39)$$

故障率函数为

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{R(l)} = 7.2251 \times 10^{-8} l^{0.152} \quad (40)$$

升弓气囊可靠性与故障率曲线如图 8 所示。

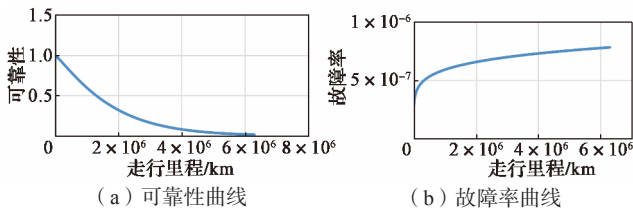


图 8 升弓气囊可靠性与故障率曲线

3.4 10-X01 继电器故障模型

3.4.1 10-X01 继电器故障间隔里程分布初判

10-X01 继电器故障频数分布及故障累计频率曲线如图 9 所示。

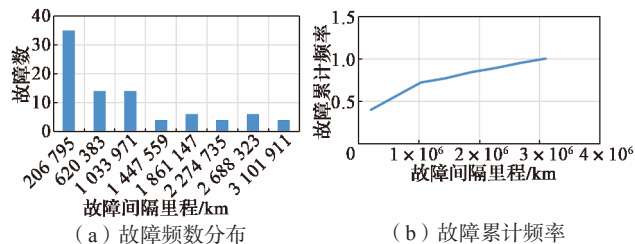


图 9 10-X01 继电器故障频数分布及故障累计频率曲线

从图 9 可以看出, 10-X01 继电器故障累计频率随着里程的增长而增加, 属于耗损性故障, 10-X01 继电器的故障频数随着里程的增加故障个数减少, 说明受电弓的 10-X01 继电器故障间隔里程所服从的分布为指数分布或威布尔分布, 不服从正态分布。

3.4.2 10-X01 继电器故障间隔里程分布模型参数估计

1) 指数分布参数估计

采用极大似然估计方法对指数分布模型的参数进行估计。

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n l_i} = 1.07 \times 10^{-6} \quad (41)$$

即 10-X01 继电器的故障规律的指数分布为

$$F(l) = 1 - e^{-1.07 \times 10^{-6} l} \quad (42)$$

2) 两参数威布尔分布参数估计

假设动车组 10-X01 继电器的故障间隔里程服从威布尔分布, 通过最小二乘法对分布模型的形状参数 m 和尺度参数 η 进行参数估计, 代入数据, 计算得到

$$A = -7.441\ 8, B = 0.538\ 2$$

$$\text{则 } m = B = 0.538\ 2, \eta = e^{-\frac{A}{B}} = 1\ 012\ 235.272。$$

因此, 10-X01 继电器的故障规律的分布函数为

$$F(l) = 1 - e^{-\left(\frac{l}{1012235.272}\right)^{0.5382}} \quad (43)$$

3.4.3 10-X01 继电器故障间隔里程分布假设检验

采用 $K-S$ 检验对 10-X01 继电器的故障分布类型进行假设检验, 确定该部件故障间隔里程是否服从指数分布或威布尔分布。由计算可知, 指数分布检验统计量 $D_{n-l} = \max_i \{\delta_{i-l}\} = 0.137\ 4$, 威布尔分布的检验统计量 $D_{n-w} = \max_i \{\delta_{i-w}\} = 0.150\ 8$ 。由显著性水平 $\alpha=0.01$, 查表得到 $d_{85, 0.02} = 0.162\ 4$, 可以看出 $D_{n-l} < D_{n-w} < d_{85, 0.02}$, 说明 10-X01 继电器的故障间隔里程服从指数分布的显著性水平更高, 即 10-X01 继电器的故障规律的指数分布为式 (42)。

3.4.4 10-X01 继电器故障间隔里程分布模型结果

10-X01 继电器的平均故障间隔里程为

$$MDBF = \eta \cdot \tau \left(1 + \frac{1}{m}\right) = 1\ 469\ 681.04$$

故障分布函数的指数分布为式 (42)。

故障概率密度为

$$f(l) = 1.07 \times 10^{-6} e^{-1.07 \times 10^{-6} l} \quad (44)$$

可靠度函数为

$$R(l) = e^{-1.07 \times 10^{-6} l} \quad (45)$$

故障率函数为

$$\lambda(l) = \frac{f(l)}{R(l)} = 1.07 \times 10^{-6} \quad (46)$$

10-X01 继电器可靠性曲线与故障率曲线如图 10 所示。

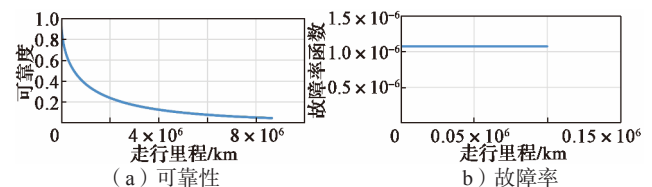


图 10 10-X01 继电器可靠性曲线与故障率曲线

根据 10-X01 继电器的故障率曲线, 可知 10-X01 继电器在运行里程内可能由于偶然原因发生故障, 也就说明 10-X01 继电器可能处于偶然故障期。

3.5 受电弓总成故障综合模型

根据受电弓的 ADD 及供风管、供风管路、升弓气囊和 10-X01 继电器等各主要零件故障的危害程度, 评估受电弓部件的故障发生的风险程度。

通过上述的分析, 可知不同故障的故障率函数如表 1 所示。受电弓综合故障曲线如图 11。

表 1 受电弓各零件故障分析汇总

受电弓功能件	故障分布类型	故障率
ADD 及供风管故障	威布尔分布	$\lambda_1(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = 2.7013 \times 10^{-5} t^{-0.2408}$
供风管路故障	指数分布	$\lambda_2(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = 1.9174 \times 10^{-6}$
升弓气囊故障	威布尔分布	$\lambda_3(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = 7.2251 \times 10^{-8} t^{0.152}$
10-X01 继电器故障	指数分布	$\lambda_4(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = 1.07 \times 10^{-6}$

从表 1 可以看出, 动车组受电弓各功能件的故障规律并不单一地符合浴盆曲线。故障曲线示意图表明各系统均未到达耗损期, 随着运行里程的不断增加, 升弓气囊故障率略有增加, ADD 及供风管故障逐渐减少, 供风管路与 10-X01 继电器的故障率并没有增长趋势, 经过早期故障后, 其故障率较为平稳。假设动车组受电弓各功能件发生故障是相互独立的, 那么, 受电弓总成的故障率如下式所示:

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t) + \lambda_4(t) = 2.7013 \times 10^{-5} t^{-0.2408} + 1.9174 \times 10^{-6} + 7.2251 \times 10^{-8} t^{0.152} + 1.07 \times 10^{-6} \quad (47)$$

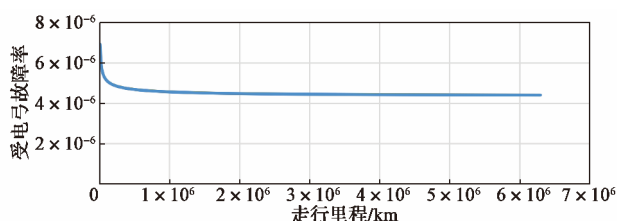


图 11 受电弓综合故障率曲线

由图 11 可以看出, 受电弓部件未出现耗损期, 经过早期故障后, 其故障率随时间的增加保持在较为恒定的数值, 达到偶发故障期, 但该系统并未出现耗损期。这说明随着走行公里的不断增加, 各功能件会产生疲劳、磨损或缺陷。如果不对部件缺陷进行必要的维修, 则各系统的可靠性会越来越低, 即动车组在运用过程中, 若没有检测维修的干预, 各功能件的寿命是消退的。受电弓总成的可靠度函数为

$$R(t) = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^4 \lambda_i(x) dx} = e^{-3.5582 \times 10^{-5} t^{0.7592} - 6.2718 \times 10^{-8} t^{1.152} - 2.9874 \times 10^{-6} t} \quad (48)$$

受电弓综合可靠度曲线如图 12 所示。

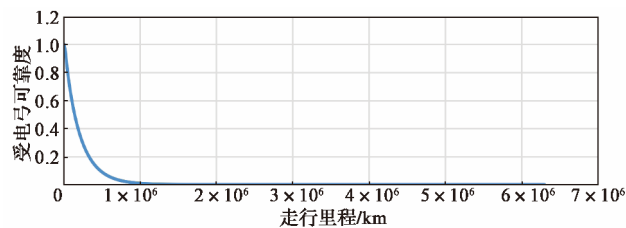


图 12 受电弓综合可靠度曲线

根据所得可靠度函数, 对受电弓故障进行预判, 以验证模型效果。因此, 随机选取 7 个车组, 对其真实发生的受电弓故障进行验证分析, 如表 2 所示。其中车组 2、车组 3、车组 4、车组 5、车组 6 在发生故障时可靠度均下降到了 0.26 以下, 车组 1 和车组 7 发生故障时可靠度分别是 0.28 和 0.33。该结果表明, 当受电弓总体可靠度下降至 0.30 以下时极易发生故障。

表 2 受电弓故障预测验证结果

车组	车型	可靠度	故障发生时走行公里数 /km
1	CRH380BL	0.28	244 491
2	CRH380BL	0.24	278 140
3	CRH380BL	0.24	279 269
4	CRH380BL	0.25	271 724
5	CRH380B	0.23	286 363
6	CRH380B	0.23	286 709
7	CRH380B	0.33	211 617

4 结语

本文对 CRH380BL 型动车组受电弓系统进行了全面的可靠性分析, 主要包括 4 种主要故障零部件的可靠性建模和对受电弓总成的可靠性建模; 通过对受电弓系统各故障零部件进行分析, 找出各零部件设计或维修方面的薄弱环节, 从而推导出受电弓系统的可靠性规律。经过研究发现, 受电弓系统随着动车组走行里程的增加, 各部件可靠性逐渐降低, 计算得到的受电弓 ADD 及供风管、供风管路、升弓气囊、10-X01 继电器的平均故障间隔里程分别为 852 736.65 km, 875 832.165 1 km, 1 696 414.342 km, 1 469 681.04 km; 由此推断出各零部件的故障分布函数、可靠度函数等相关性指标, 对动车组各系统的安全运用和制订合理的预防检修周期提供数据支撑。未来通过对数据的进一步收集, 可以更加深入地分析可能导致与动车组受电弓故障发生相关的其他状态参数, 如弓网压力、动车负载、行驶速度、硬点分布等。通过增加状态变量对可靠性模型进行修正, 能够提高故障分布规律拟合曲线的准确率。

参考文献:

- [1] 朱星光, 陈善乐, 秦建伟. 广州地铁 2 号线弓网关系优化设计研究 [J]. 铁道工程学报, 2015(7): 62-67.
- [2] 涂建国, 胡海丽, 黄凤, 等. 受电弓拉杆断裂失效分析 [J]. 热处理技术与装备, 2014, 35(5): 30-33.

(下转第 119 页)

DC-AC 的电力传动方式, 利用 VVVF 实现牵引电机的调速, 实际不会在启动瞬间对牵引网形成电流冲击。列车启动加速过程中的输入电流特性如图 9 所示。

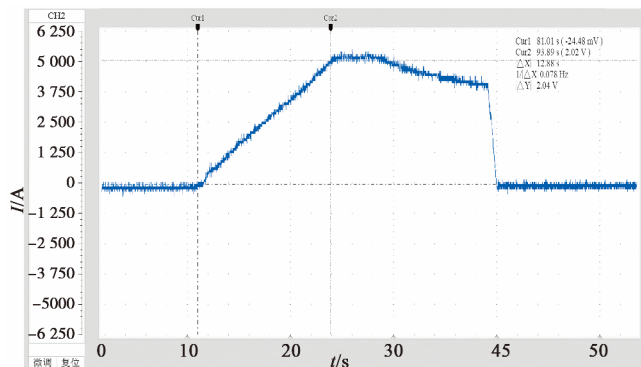


图9 列车启动后加速过程取流特性

列车恒转矩启动至恒功点的过程中, 牵引电流由 0 A 上升至最大牵引电流 5 200 A 历时 12~18 s, 其电流变化率仅为 0.4 A/ms, 与供电臂末端短路时最小电流变化率 60~100 A/ms (750 V 系统) 相比, 其值很小。因此在运用现代交流牵引技术的地铁中进行直流接触器 di/dt 初始启动值整定时, 可不考虑列车启动的冲击。

3.2 牵引级位变化冲击

牵引级位发生改变时, 列车输入电流也随之变化。但列车牵引控制系统为了保证乘客的舒适性, 牵引系统对牵引力变化速度进行了限制, 通常整列车加速度变化率 (也称为冲击率) 被控制在 0.75~1.2 m/s³。考虑最不利的情况, 列车在恒功速度范围运行, 当牵引级位由 0 突跳至 100%, 列车加速度将遵循冲击率的限制由 0 上升至当前速度下的最大加速度值, 牵引输入电流随加速度的变化增加至最大电流值。由于存在冲击率的限制 (按 1.0 m/s³ 计), 根据计算与现场模拟实测, 列车牵引级位突变导致的牵引电流变化率不会大于 6.5 A/ms, 因此牵引级位的变化不会对电流上升率保护造成影响。

3.3 受电弓离线导致冲击

在接触网供电系统中, 由于受电弓数量相对于接触轨受流器数量少, 在接触网硬点位置容易产生离线问题。受电弓离线导致牵引系统外电源短时中断, 当

弓网接触恢复后, 电容充电可能会导致牵引电流出现较高的上升率。

但在接触轨供电系统中, 通常情况下数个牵引逆变器由多个受流器并联供电 (分布在车体两侧)。由于列车高压母线的扩展供电作用, 多只受流器同时由接触轨取流, 并联向各牵引逆变器供电, 除特定断口的影响, 在实际运行过程中未检测到离线导致的电流突变。

4 结语

直流牵引网的 DDL 保护是系统重要的保护手段, 但正确、恰当地整定直流 DDL 保护是相对困难的。接触轨在岔区的断口分布、列车高压母线形式和受流器布置等因素可影响受流质量, 或导致 DDL 保护误报警。特别是通过列车内部高压母线形成不同供电分区的桥接, 在相邻供电臂阻抗差异较大时可能造成列车 BHB 电流过大跳闸, 从而引起 DDL 误动作。运用现代交流传动技术的地铁列车启动时不形成显著的电流冲击; 运行过程中由于冲击率的限制, 其牵引电流的变化率不会造成 DDL 误动作或误报警。

参考文献:

- [1] 高云霞. 直流牵引供电系统继电保护整定计算方法 [J]. 电气化铁道, 2011, 22(4): 40-42.
- [2] 崔天翔. DC 1.5 kV 地铁牵引供电系统馈线保护研究 [J]. 电气化铁道, 2017(2): 55-58.
- [3] 程永谊, 钮海彦. 无锡地铁 1 号线列车母线高压电路设计与探讨 [J]. 现代城市轨道交通, 2013(1): 14-17.
- [4] 林浩, 陈文光, 曹俊. 昆明地铁首期工程项目车辆电传动系统 [J]. 机车电传动, 2013(5): 69-74.
- [5] 林浩, 程永谊, 曹俊. 第三轨供电列车高压母线电路拓扑结构设计探讨 [J]. 机车电传动, 2013(2): 91-94.

作者简介: 程晋然 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为城市轨道交通设备系统运行优化与维修策略。

(上接第 83 页)

- [3] 江亚男, 张卫华, 邹栋, 等. 考虑风载的高速列车受电弓静强度分析 [J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(1): 120-125.
- [4] 贾潞. 基于风险管理的动车组受电弓故障树分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [5] 王伟俊, 洪跃. 受电弓故障模式分析与维护策略 [J]. 沿海企业与科技, 2015(5): 27-30.
- [6] 邵延峰, 薛红军. 故障树分析法在系统故障诊断中的应用 [J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(1): 72-74.
- [7] DAI C Q, ZHAO Z H. Fuzzy comprehensive evaluation model for construction risk analysis in urban subway [J]. International

Journal of Modeling Simulation and Scientific Computing, 2015, 6(3): 1550024. DOI: 10.1142/S1793962315500245.

- [8] DONGIOVANNI D N, IESMANTAS T. Failure rate modeling using fault tree analysis and Bayesian network: DEMO pulsed operation turbine study case [J]. Fusion Engineering and Design: Part A, 2016(109/110/111): 613-617.

作者简介: 王远霏 (1979—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为轨道车辆健康管理技术、关键部件智能诊断及故障预测研究。