

基于平均秩次法的汽车高压继电器可靠性评估*

刘元治 张长涛 李威 房元 王伯军

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

【欢迎引用】刘元治, 张长涛, 李威, 等. 基于平均秩次法的汽车高压继电器可靠性评估[J]. 汽车文摘, 2025(6): 53-56.

【Cite this paper】LIU Y Z, ZHANG C T, LI W, et al. Reliability Evaluation of Automotive High-Voltage Relays Based on Average Rank Method[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(6): 53-56.

【摘要】针对长寿命高压继电器小样本的可靠性评估问题, 提出了一种基于平均秩次法的可靠性建模方法。在故平均秩次法基本原理的指导下, 研究了随机截尾多样本试验下高压继电器故障秩次确定方法。对应用最小二乘法进行可靠性参数估计, 应用线性相关系数与D检验法进行拟合性检验, 在故障数据同时服从两种分布模型下, 引入总均方根误差法进行分布模型优选, 识别最优可靠性模型并进行可靠性评估。

关键词: 高压继电器; 小样本; 平均秩次法; 最小二乘估计; 可靠性评估

中图分类号: U463.6; TM58 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240098

Reliability Evaluation of Automotive High-Voltage Relays Based on Average Rank Method

Liu Yuanzhi, Zhang Changtao, Li Wei, Fang Yuan, Wang Bojun

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】Aiming at the reliability evaluation problem of small samples of long-life high-voltage relays, an analysis method of mean rank combined with least squares is proposed. Under the guidance of the basic principle of average rank method, the method of determining the fault rank of high voltage relay under random truncated multiple tests is studied. The least square method is used to estimate the reliability parameters, and the linear correlation coefficient and D-test method is used to test the fit. Under the condition that the fault data are subject to 2 distribution models at the same time, the total root-mean-square error method is introduced to optimize the distribution model, identify the optimal reliability model and conduct reliability evaluation.

Key words: High voltage relay, Small sample, Average rank method, Least squares estimation, Reliability evaluation

0 引言

高压继电器是新能源汽车动力电池的关键电气元件, 其可靠性直接影响动力电池及整车功能保持性^[1]。可靠性建模与评价作为产品可靠性量化表征的基础, 不仅是实施可靠性筛选的核心依据, 更是开展可靠性正向设计的理论支撑。因此, 构建高压电气元件可靠性评估体系具有重要工程价值。随着现代制造工艺的进步, 高压继电器可靠性水平持续提升, 其高可靠性特征导致故障样本呈现稀缺化趋势。在此

背景下, 如何基于小样本试验数据实现可靠性建模与评估, 已成为可靠性工程领域亟待突破的技术瓶颈。

文献研究表明, 针对故障数据不足的建模难题, 目前已形成数据增强(如贝叶斯自助法)、样本扩容(如改进Bootstrap理论)和分布修正(如经验分布函数优化)³类技术路径^[2-7]。其中, 基于秩次修正原理的经验分布函数修正方法, 凭借其数理逻辑清晰、工程实施便捷等优势, 在小样本可靠性建模中具备显著技术竞争力^[8]。本研究针对电动汽车随机截尾可靠性试验场景下高压继电器可靠性数据呈现的“双高”特征

*基金项目: 吉林省重大科技专项(20220301015GX)。

(小样本量、高截尾率),提出融合平均秩次法的改进建模框架:首先运用中位秩近似法构建混合截尾数据的经验分布函数,继而采用最小二乘回归进行威布尔分布参数估计。针对同一数据集多分布模型适配性判别难题,在传统线性相关系数检验与D检验基础上,引入均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为模型优度评价指标,通过多准则决策机制实现最优可靠性模型的智能遴选与评估验证。

1 基于平均秩次法的高压继电器故障秩次修正

1.1 高压继电器故障特点

本研究采用随机截尾可靠性道路试验方案,将56台I型高压继电器样本纳入电动汽车实车试验队列,试验周期内完整记录每台继电器累积运行里程。其中,共有22台电动汽车样本产生8个故障数据如表1所示,另34台未发生故障的继电器样本试验里程见表2。

表1 继电器可靠性试验故障数据

继电器编号	1~4	5~8	9~14	15~18	19~22
故障发生里程/km	50	100	500	2 000	500
试验里程 T /km	7 920	11 700	4 000	26 000	16 000
故障个数/个	1	2	1	3	1

表2 无故障继电器可靠性试验里程 km

继电器编号	23~26	27~30	31~34	35~40	41~44	45~48	49~52	53~56
试验里程 T	5 000	6 000	7 000	2 000	3 000	30 000	1 000	500

1.2 随机截尾高压继电器故障数据秩次修正

对于包含截尾数据的不完整试验数据序列,受截尾数据影响,其大于截尾数据的故障数据的秩次不再是整数,考虑该影响,引入平均秩次法进行故障秩次修正。

故设数组含有 n 个数据,其中 m 个是右截尾数据, $(n-m)$ 个是故障数据,并以增序排列,对于所有 n 个数据,按从小到大的顺序编号为1到 n ,记这列编号为 j 。然后,只对故障数据编号,按从小到大的顺序编号为1到 $(n-m)$,记这列编号为 i 。则第 i 个故障数据的故障顺序号计算公式如下:

$$r_i = r_{i-1} + (n + 1 - r_{i-1}) / (n + 2 - j) \quad (1)$$

式中: $i = 1$ 时, $r_0 = 0$; $1 \leq i \leq m$ 。

依据表1、表2数据及式(1),经计算,8个故障数据、56个截尾时间下的故障数据平均秩次及应用近似中位值法计算得到的经验分布函数见表3。

表3 继电器试验故障数据故障秩次 km

数据 t_j	次序号 j	故障秩次 i	$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$
50	1	1	0.010 870
100	3	3	0.041 925
500	5	5	0.072 981
500+	9		
1 000+	13		
2 000	16	8.4154	0.126 016
$\geq 2 000+$	64		

注:“+”为截尾数据。

2 高压继电器可靠性建模

工程实际中常用的可靠性模型有指数分布和威布尔分布。本文假设高压继电器故障服从指数分布和威布尔分布,采用最小二乘法进行参数估计,采用线性相关系数检验参数估计的有效性,当试验数据经线性相关性假设服从2种以上分布模型时,采用D检验法检验各种分布的拟合效果,确定最优分布模型。

2.1 模型参数估计与假设检验

(1)模型参数估计。最小二乘法参数估计的原理是通过残差平方和最小求得参数估计值,即求 $\min \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2$,得到线性模型 $y = ax + b$ 的最小二乘参数估计。此时回归系数 \hat{a}_1 和 \hat{b}_1 的估计值为:

$$\begin{cases} \hat{a}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{b}_1 = \bar{y} - \hat{a}_1 \bar{x} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ 。

以常见的指数分布 $F_1(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ 、威布尔分布 $F_2(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$ 为试验数据假设服从分布,采用最小二乘法进行参数估计,经计算,服从的假设分布的参数估计值见表4。

表4 高压继电器可靠性模型参数估计 km

假设分布	最小二乘估计
指数分布	$\hat{\lambda} = 1/18 291.5$
威布尔分布	$\hat{\beta} = 0.602 8, \hat{\eta} = 42 794.2$

(2)模型假设检验。本文采用线性相关系数检验

法进行检验,相关系数为:

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2\right)}} \quad (3)$$

当 $|\hat{\rho}| > \rho_\alpha$ 时,则认为 x 与 y 之间是线性相关的。

其中, ρ_α 是相关系数起码值,当显著性水平 $\alpha = 0.1$ 时,

相关系数起码值为 $\rho_\alpha \approx \frac{1.22}{\sqrt{n-1}}$ 。相关系数取值在0

与1之间,越接近于1,线性关系越显著。

依据表3数据,应用公式(3)计算出指数分布、二参数威布尔分布的线性相关系数分别为 $\hat{\rho}_1 = 0.9453$ 、 $\hat{\rho}_2 = 0.9273$,而 $\hat{\rho}_{4,0.1} = 0.9000$,因此说明高压继电器故障数据对指数分布、二参数威布尔分布都不拒绝。

2.2 拟合优度检验

当试验数据经线性相关性假设服从2种以上分布模型,采用D检验法检验各种分布的拟合效果。D检验法是将 n 个试验数据按由小到大的次序排列,根据假设的分布,计算每个数据对应的 $\hat{F}(t_i)$,将其与经验分布函数 $F(t_i)$ 进行比较,其中差值最大的绝对值即为检验统计量 D_n 的观察值。将 D_n 与临界值 $D_{n,\alpha}$ 进行比较,满足下列条件,则接受原假设,否则拒绝原假设^[8]。

$$D_n = \sup_{-\infty < x < +\infty} |\hat{F}(t_i) - F(t_i)| = \max\{d_i\} \leq D_{n,\alpha} \quad (4)$$

式中: $\hat{F}(t_i)$ 为原假设分布函数; $F(t_i)$ 为样本大小为 n 的经验分布函数, $F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$; $D_{n,\alpha}$ 为临界值。

当一定水平 α 下 $D_n < D_{n,\alpha}$,则接收原假设,即认为试验数据服从假设分布,反之拒绝假设。当多种分布模型都通过D检验时,以检验统计量小的为最优分布。

分别以 $F_1(t) = 1 - \exp(-\frac{1}{18291.5}t)$ 、 $F_2(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{42794.2}\right)^{0.026}\right]$ 为假设分布,以表3中的故障数

据计算出的近似中位值值为经验分布函数,经计算2种分布的D检验值分别为 $D_1 = 0.04602$ 、 $D_2 = 0.01993$;当显著性水平 $\alpha = 0.1$ 时,D检验临界值为 $D_{4,0.1} = 0.565$ 。因此说明高压继电器故障数据服从指数分布和二参数威布尔分布。

2.3 模型优选

由线性相关检验与D检验可知,该批数据对于指数分布、威布尔分布都不拒绝,且指数分布的线性相

关系数大于威布尔分布,但指数分布的D检验值大于威布尔分布,故无法识别最优分布模型。

故引入总均方根误差识别最优分布,总均方根误差小的分布为最优分布,计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{F}(t_i) - F(t_i))^2} \quad (5)$$

式中: $RMSE$ 为总均方根误差, $\hat{F}(t_i)$ 为参数估计求得的分布模型的故障分布函数值, $F(t_i)$ 为采用平均秩次法应用公式计算出的经验分布函数值。

经计算,指数分布、威布尔分布的总均方根误差分别为0.0317、0.0137。因此,最优分布为威布尔分布。即:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{42794.2}\right)^{0.6028}\right] \quad (6)$$

3 高压继电器可靠性评估

经过上述分布类型的参数估计、假设检验及优选,已经确定了高压继电器故障分布类型及参数,在此基础上进行可靠性特征量的评定,即计算平均故障间隔里程:

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t dF(t) \quad (7)$$

式中: $MTBF$ 为平均故障间隔里程, $f(t)$ 为故障间隔里程的概率密度函数。

对于威布尔分布 $F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$,则

$MTBF = \frac{1}{\eta} \Gamma(1 + 1/\beta)$ 。因本高压继电器故障服从威

布尔分布 $F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{42794.2}\right)^{0.6028}\right]$,故该继电器可靠性指标 $MTBF = 63997.82$ km。

4 结论

(1)针对高压继电器随机截尾试验中多数样本无故障的情况,提出了应用平均秩次法修正截尾里程对故障里程故障顺序号的影响,据此应用近似中位秩法计算经验分布函数,采用最小二乘法进行参数估计,应用线性相关检验及D检验法检验模型的合理性。

(2)针对同一批数据同时服从两种分布模型,线性相关检验及d检验无法识别最优分布的问题,引入均方根误差方法,以总均方根误差最小为原则确定最优分布模型为威布尔分布。

(3)由威布尔模型形状参数 <1 可知,产品处于早期故障期;通过平均故障间隔里程点估计,可计算出平均故障间隔里程为63 997.82 km,该量化结果为高压继电器可靠性设计、筛选策略制定及延寿技术开发提供核心数据支撑,同时为车规级电气元件寿命预测方法学建立标准化范式。

参考文献

- [1] 张长涛,李威,曲振宁,等.纯电动乘用车高压继电器应用与实践[J].汽车文摘,2023(7):50-55.
- [2] 王晓燕,王鸿凯,陈彦海,等.基于Bootstrap法的小样本数控刀架可靠性评估[J].制造技术与机床,2020(11):121-124+129.
- [3] 刘帼巾,王泽,李想,等.基于改进Bootstrap-Bayes的电子式剩余电流动作断路器可靠性评估[J].电工技术学报,2022,37(16):4250-4258.
- [4] 贾占强,蔡金燕,梁玉英.基于改进Bootstrap和Bayesian Bootstrap的小样本产品实时性能可靠性评估[J].计算机应用研究,2009,26(8):2851-2854.
- [5] 孙慧玲,胡伟文,杨美妮.Bayes Bootstrap方法在小样本参数估计中的应用[J].计算机与数字工程,2016,44(5):788-790+808.
- [6] 汤少敏,刘桂雄,李小兵.基于RBF神经网络的Bootstrap数据扩充方法及其在IRSS可靠性估计中的应用[J].中国测试,2022,48(11):22-26+53.
- [7] 张震,刘俭辉,赵成,等.基于Bootstrap的小样本可靠性评估方法[J].兰州理工大学学报,2022,48(1):39-44.
- [8] 陈勇,李胜男,张丽,等.基于改进平均秩次法的保护装置可靠性评估[J].电力系统保护与控制,2020,48(2):165-171.

(责任编辑 明慧)

《汽车文摘》2025年专项征稿启事

尊敬的汽车及相关技术领域专家学者、研发工程师、高校师生:

在全球汽车产业迎来深刻变革的今天,2025年将成为汽车技术发展的关键节点,新技术、新材料、新理念将不断涌现,推动汽车行业向更智能、更环保、更安全的方向发展。《汽车文摘》期刊作为中国汽车工程学会会刊,秉承“览全球汽车技术文献,指中国汽车技术之道”的使命,致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。在此,我们特别发布2025年专项征稿启事,聚焦以下十大技术方向,旨在征集具有前瞻性、综述性的高质量文章,以为汽车技术的创新与进步提供创新的方向和理论的支持。

- 人工智能在汽车创新发展中的应用综述:**征集探讨人工智能技术在车辆自动驾驶、智能座舱、智能控制以及仿真和优化中的应用综述文章。
- 智能网联汽车信息安全技术综述:**征集分析智能网联汽车面临的信息安全挑战及解决方案的综述文章。
- 环境感知与智能决策技术综述:**征集研究环境感知技术的未来发展,包括新型传感器技术、多模态感知融合算法的最新进展等前瞻综述。
- 氢能技术在汽车产业中的应用综述:**征集探讨氢能技术在汽车产业中的应用,包括氢燃料电池、氢内燃机以及氢能在汽车能源系统中的整合等综述文章。
- 固态电池技术发展综述:**征集研究固态电池技术的最新进展,包括材料科学、电化学性能和系统集成等方面的综述。
- 汽车动力总成电动化技术综述:**征集探讨电动化动力总成设计、控制和集成技术的综述文章。
- 智能底盘技术发展综述:**征集探讨智能底盘技术的最新进展,包括底盘控制系统、悬挂系统和驱动系统的智能化技术综述。
- 自动驾驶法规与伦理问题综述:**征集分析自动驾驶技术发展中的法规和伦理问题的综述文章。
- 汽车共享经济与商业模式创新综述:**征集探讨汽车共享经济的发展及其对传统汽车产业影响的综述。
- 智能交通系统(ITS)技术发展综述:**征集研究智能交通系统技术如车路协同、交通流量管理等综述。

征稿要求:

- 投稿请注明“*****”技术方向专项征稿字样,本刊对符合征稿技术方向的稿件将优先审核,一经录用优先发表;
- 综述篇幅在8 000~15 000字,图文并茂,图、表和公式非原创要求标注引用文献;
- 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数在200字左右;
- 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献,一般要求参考文献在20篇以上,一半左右为外文参考文献,且在文中标注所引用文献;
- 来稿保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
- 切勿一稿多投,《汽车文摘》投稿网址: <http://www.qcwz.cbpt.cnki.net>, 邮箱: autodigest@faw.com.cn。

《汽车文摘》期刊期待您的精彩综述文章,共同探索汽车技术的未来发展。感谢您对《汽车文摘》期刊的支持与贡献,让我们携手推动汽车技术的创新与进步。

《汽车文摘》编辑部