

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.11.027

# 基于维修大数据的营运客车安全部件 可靠性分析

刘富佳, 杨小娟\*, 许书权, 陈潮洲  
(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:**为适应营运车辆智能化发展趋势,降低道路运输安全运行风险,基于在用营运客车维修大数据,测算了营运客车安全部件累积故障概率和故障率,对安全部件全寿命周期故障类型进行综合评判。采用威布尔分布函数等理论,得出故障分布函数参数并对其进行拟合验证。通过计算并绘制故障累积概率、故障率、故障概率密度、可靠度函数曲线,直观展示了营运客车安全部件故障分布规律和故障风险。结果表明:营运客车行驶系、制动系、安全防护装置的瞬时故障率随营运里程逐步降低,而转向系零部件瞬时故障率随营运里程呈现上升趋势,应根据不同零部件故障规律科学合理制定维修计划;从故障概率密度分布区间来看,转向系、行驶系、制动系、安全防护装置的不同零部件故障高发里程各有不同,应根据不同部件故障特征合理开展安全技术性能检验以降低故障发生风险;此外,与常规安全部件相比,车道偏离预警系统(LDWS)、自动紧急制动系统(AEBS)等高级驾驶辅助系统具有更高的可靠性,故障风险随使用年限趋于平缓增加,应重点对安全部件的早期故障进行预防,对提高营运车辆安全水平具有重要意义。

**关键词:**汽车工程;可靠性;威布尔分布;营运客车;维修大数据

中图分类号: X951

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2023)11-0229-08

## An Analysis on Reliability of Commercial Bus Safety Parts Based on Maintenance Big Data

LIU Fu-jia, YANG Xiao-juan\*, XU Shu-quan, CHEN Chao-zhou  
(Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to adapt to the intelligent development trend of commercial bus and reduce the risk of road transportation operation, based on the big data of in-service commercial bus maintenance, the cumulative fault probability and fault rate of commercial bus safety parts are calculated, and the life cycle fault types of safety parts are comprehensively evaluated. The theory such as Weibull distribution function is used to fit and verify the fault distribution function parameters. The cumulative fault probability, fault rate, fault probability density, reliability function curve are, calculated and drawn and the fault distribution rule and fault risk of commercial bus safety parts are visually displayed. The result shows that (1) the instantaneous fault rate of driving system, braking system and safety protection device of commercial bus decreases gradually with the operating mileage, while the instantaneous fault rate of steering system components increases with the operating mileage, and the maintenance plan should be scientifically and reasonably formulated according to the fault rules of different parts; (2) from the distribution range of failure probability density, it can be seen

收稿日期: 2022-06-23

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2021-9034b)

作者简介: 刘富佳(1981-),男,辽宁大连人,硕士研究生,副研究员。(fj.liu@rioh.cn)

\*通讯作者: 杨小娟(1991-),女,内蒙古通辽人,硕士研究生。(xj.y@rioh.cn)

that different components of the steering system, driving system, braking system, and safety protection device have different high failure rates, therefore, safety technical performance testing should be conducted reasonably based on the fault characteristics of different components to reduce the risk of failure occurrence; (3) in addition, compared with conventional safety parts, advanced driving assistance systems such as lane departure warning system (LDWS) and automatic emergency braking system (AEBS) have higher reliability, and the fault risk tends to increase gently with the service life, therefore, early fault prevention of safety parts should be focused on, which is of great significance to improve the safety level of commercial bus.

**Key words:** automobile engineering; reliability; Weibull distribution; commercial bus; maintenance big data

## 0 引言

推进运输装备技术升级,保障道路运输安全是构建交通运输安全发展体系的重要内容。近年来,随着我国社会客运、物流需求的高速增长,道路运输市场蓬勃发展。道路运输行业的快速发展虽有力推动了我国现代化建设进程,但同时也存在交通安全问题。营运客车随行驶里程和使用年限的增长,整车安全技术性能呈下降趋势。虽然我国营运客车交通事故数和受伤人数比重逐年降低,但引发的死亡人数和经济损失却有逐年上升趋势。其中,由车载安全部件故障引起的交通事故通过良好的车辆技术管理可以避免或减少,关键在于科学制订车辆维修策略和安全风险管理方案。

为保障营运客车运行安全,我国先后发布《道路运输车辆技术管理规定》(交通运输部令 2019 年第 19 号)、《营运客车安全技术条件》(JT/T 1094—2016)<sup>[1]</sup>等政策标准,明确了营运客车技术管理和主要配置及安全防护装置的技术要求。但是,针对各零部件(含元器件)在使用环节的技术变化,尤其是车道偏离预警系统(LDWS)、自动紧急制动系统(AEBS)等新型智能化车载装置使用环节中的安全应用监管和故障情况,行业内还未开展相关研究。

目前,可靠性分析理论已在航空航天、机械制造<sup>[2]</sup>领域广泛应用,既有对整车可靠性评价<sup>[3]</sup>,也有对车辆关键零部件的可靠性分析<sup>[4]</sup>,且涵盖可靠性框图<sup>[5]</sup>、故障树分析<sup>[6]</sup>、贝叶斯网络<sup>[7]</sup>、模糊分析<sup>[8]</sup>等多种方法的应用。其中,孙淑霞等<sup>[9]</sup>对客车制动系统进行故障树分析,得到可靠性指标以评价制动系统可靠性;朱荣<sup>[10]</sup>针对混合动力公交客车高压电气系统,开展了基于威布尔分布的故障规律研究;李国文<sup>[11]</sup>建立车辆使用可靠性综合评价模型。可靠性分析数据主要来源于道路试验数据、台架试验数据、软件仿真数据、汽车维修故障数据等。于亚杰等<sup>[12]</sup>基于售后索赔数据开展汽车可靠性分析方

法研究;黄妮等<sup>[13]</sup>针对氢燃料电池客车车架开展多工况疲劳可靠性有限元分析。总体上,虽然可靠性分析理论发展趋向成熟,但在最为关键的原始数据获取方面,却普遍存在仿真数据与实际工况差异较大,台架试验无法获取全生命周期性能变化<sup>[14]</sup>,售后维修故障数据量较小不具有代表性等问题<sup>[15]</sup>,使得可靠性分析结论无法反映营运客车真实技术状况。

因此,基于当代车辆智能化发展现状,依托全国汽车维修电子健康档案系统中的营运客车维修大数据,利用威布尔分析等理论,建立营运客车安全部件故障规律,为科学预测在用营运客车安全风险,及时掌握 LDWS、AEBS 等新型智能化车载装置的产品可靠性,合理制定维修保障策略,提高营运客车安全技术水平,减少道路交通事故的发生提供支撑。

## 1 客车安全部件分类

营运客车涉及安全的零部件众多,科学选取重点、关键安全部件是研究基础。因此,本研究梳理了《机动车运行安全技术条件》(GB 7258—2017)<sup>[16]</sup>、《机动车安全技术检验项目和方法》(GB 38900—2020)<sup>[17]</sup>、《营运客车安全技术条件》(JT/T 1094—2016)等标准的要求,结合营运客车重特大道路交通事故致因研究<sup>[18]</sup>和营运客车常见零部件故障的综合分析<sup>[19]</sup>,明确提出了营运客车安全部件(表 1)。

## 2 客车数据采集处理

从全国汽车维修电子健康档案系统中采集了 11 804 辆营运客车共计 2 万辆(次)维修记录数据,包括车辆号牌、送修日期、送修里程、故障描述、维修项目、维修配件等信息,重点覆盖  $M_2$ 、 $M_3$  类客车的班车客运、旅游客运等各类运行状况。在车辆故障分析时,从维修记录数据中计算各类安全部件对应故障次数以进行累计故障数计算,并将送修里程与故障里程对应,部分维修记录见表 2。

表 1 营运客车安全部件  
Tab. 1 Safety parts of commercial bus

| 序号 | 分类     | 零部件名称           |
|----|--------|-----------------|
| 1  | 转向系    | 液压助力转向系统        |
| 2  |        | 电动助力转向系统 (EPS)  |
| 3  | 行驶系    | 电子稳定性控制系统 (ESC) |
| 4  |        | 胎压监测报警装置        |
| 5  |        | 爆胎应急安全装置        |
| 6  |        | 高级驾驶辅助系统        |
| 7  | 制动系    | 盘式制动器           |
| 8  |        | 防抱制动装置 (ABS)    |
| 9  |        | 辅助制动装置          |
| 10 |        | 电涡流缓速器报警系统      |
| 11 |        | 车速限制/报警装置       |
| 12 |        | 制动间隙自动调整装置      |
| 13 |        | 制动摩擦衬片更换报警装置    |
| 14 |        | 制动气压显示和限压装置     |
| 15 | 安全防护装置 | 安全带             |
| 16 |        | 安全带佩戴提醒装置       |
| 17 |        | 辅助约束系统 (Airbag) |
| 18 |        | 发动机舱自动灭火装置      |
| 19 |        | 动力电池箱自动灭火装置     |
| 20 |        | 手动机械断电总开关       |

表 2 营运客车维修记录数据

Tab. 2 Maintenance record data of commercial bus

| 序号 | 车辆号牌            | 送修日期      | 送修里程/<br>km | 故障描述            | 维修项目          | 维修配件        |
|----|-----------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|-------------|
| 1  | 沪 A * 2 * 0 * D | 2019-4-16 | 35 698      | 转向方向沉、异响        | 转向助力泵更换       | 转向助力泵       |
| 2  | 宁 D * 9 * 6 * D | 2020-8-6  | 14 271      | ESC 故障灯亮        | ESC 执行机构更换    | ESC 执行机构总成  |
| 3  | 京 A * 2 * 0 * D | 2019-8-12 | 8 978       | AEBS 故障灯亮       | 行车记录仪软件升级     | 行车记录仪       |
| 4  | 冀 G * 7 * 6 * F | 2019-4-11 | 53 968      | 汽车制动效果差         | 盘式制动器制动钳更换    | 盘式制动器制动钳    |
| 5  | 京 D * 1 * 9 *   | 2021-2-22 | 1 181       | ABS 故障灯亮        | ABS 液压泵维修     | ABS 液压调节器总成 |
| 6  | 黑 D * 1 * 7 *   | 2020-7-26 | 40 000      | 缓速器不工作          | 电涡流缓速器维修      | 缓速器定子线圈总成   |
| 7  | 鲁 U * 0 * 6 *   | 2022-2-28 | 23 510      | 制动衬片腐蚀脱落        | 制动衬片更换报警传感器更换 | 制动衬片更换报警传感器 |
| 8  | 沪 A * 1 * 1 * D | 2021-5-16 | 58 644      | 安全带锁扣扣不住        | 安全带锁扣更换       | 安全带锁扣       |
| 9  | 津 D * 5 * 1 *   | 2015-8-3  | 18 494      | 安全气囊故障灯亮        | 安全气囊电控单元更换    | 安全气囊电控单元    |
| 10 | 辽 B * 1 * 3 *   | 2019-3-17 | 56 992      | 发动机舱自动灭火装置自爆    | 灭火装置维修        | 翘板开关        |
| 11 | 陕 A * 0 * 9 * D | 2018-8-13 | 15 984      | 动力电池箱自动灭火装置报警失效 | 报警装置维修        | 蜂鸣器、报警灯     |
| 12 | 甘 C * 8 * 2 * D | 2020-2-9  | 352 116     | 内部进水生锈          | 手动机械断电开关更换    | 手动机械断电开关总成  |

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^b}, \quad (2)$$

故障率:

$$\lambda(t) = \frac{b}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{b-1}, \quad (3)$$

可靠度:

### 3 可靠性分析理论

可靠性分析指对产品故障数据进行收集, 统计分析产品故障规律并计算可靠性度量指标以评估故障概率。由许多单元组成的系统寿命大多服从威布尔分布<sup>[20]</sup>, 由于其拟合能力强, 适用性较广可兼容指数分布, 正态分布等理论分布, 因而在可靠性工程中被广泛应用, 因此本研究使用威布尔分布函数开展故障规律研究。

#### 3.1 威布尔分布

威布尔分布包括三参数威布尔分布、两参数威布尔分布等。与三参数威布尔分布相比, 两参数威布尔分布在进行参数估计时相对简便容易, 因此为了便于操作和计算, 在对最终结果造成较小影响的前提下, 将三参数威布尔分布中的位置参数  $m$  取值为 0, 从而得到两参数威布尔分布。两参数威布尔分布统计特征如下。

故障概率密度函数:

$$f(t) = \frac{b}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^b}. \quad (1)$$

故障累积概率:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^b}, \quad (4)$$

式中,  $t \in [0, \infty)$  为故障里程;  $b$  为形状参数;  $\theta$  为尺度参数。对式 (4) 进行归一化处理, 对等号两边连续取两次对数可得:

$$\ln \left[ \ln \frac{1}{R(t)} \right] = b \ln t - b \ln \theta. \quad (5)$$

令  $y=\ln\left[\ln\frac{1}{R(t)}\right]$ ,  $x=\ln t$ ,  $A=-b\ln\theta$ , 可得到线性函数  $y=bx+A$ 。

对于故障数据  $[t_i, F(t_i)]$ , 如果服从威布尔分布, 则变换后的数据  $[x_i, y_i]$  在直角坐标系中近似呈线性关系。

3.2 理论分布的假设检验

假设所记录的车辆故障数据分布规律属于两参数威布尔分布后, 应对所分析数据是否符合假设理论进行分析判断, 即检验分析数据是否符合拟合直线要求。假设检验时,  $t$  检验法是一种比较常见的方法。为了评价数据点符合拟合直线的程度, 定义了拟合优度  $r^2$ , 其表达式:

$$r^2=\frac{b^2\left(\sum_{i=1}^n x_i^2-n\bar{x}^2\right)}{\sum_{i=1}^n y_i^2-n\bar{y}^2}\leqslant 1,$$

(6)

其中,  $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i(i=1,2,\cdots n)$ 。拟合优度  $r^2$  与临界拟合优度  $r_c^2$  相比较应满足  $r^2>r_c^2$ , 在实际应用中, 一般取临界拟合优度  $r_c^2=0.9$ 。

4 安全部件可靠性分析

4.1 故障统计

通过梳理采集的营运客车安全部件故障数据, 提取了各零部件故障数分布, 如图1所示。

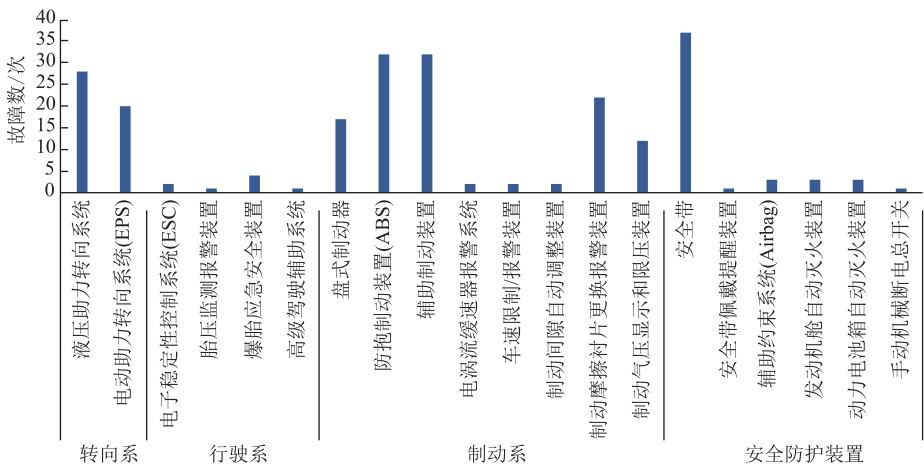


图1 营运客车安全部件故障数分布

Fig.1 Distribution of fault numbers of commercial bus safety parts

从图1可知, 相比行驶系、安全防护装置零部件, 转向系、制动系的故障发生频率明显增多。其中, 既包括盘式制动器、液压助力转向系统、安全带等机械零部件, 还包括防抱制动装置 (ABS)、制动衬片更换报警装置等电子控制零部件。这与零部件的日常使用频率和产品可靠度等多种因素具有相关性, 应摒弃机械零部件使用可靠度整体高于现代电子零部件的传统理念。

4.2 故障分布类型判断

将表2中的故障样本按其故障里程进行分组, 分别计算落在  $i$  组的故障样本数  $n_i$  以及  $j$  组 (包括  $j$  组在内) 之间的累计故障数  $G_j$ 。其中,  $i, j$  分别表示组号。有:

$$G_j=\sum_{i=1}^j n_i。$$

(7)

因此, 各组的累计概率为:

$$H_j=\frac{G_j}{n}\times 100\%。$$

(8)

对营运客车安全部件故障数据处理结果如表3~6所示。

表3 营运客车转向系故障数据

Tab.3 Steering system fault data of commercial bus

| 序号 $j$ | 故障里程<br>$t_j/$<br>( $\times 10^4$ km) | 累计故障<br>次数 $G_j/$ 次 | 累计故障<br>概率 $H_j/$ % | $x_j =$   | $y_j =$              |
|--------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------|----------------------|
|        |                                       |                     |                     | $\ln t_j$ | $\ln[\ln 1/(1-H_j)]$ |
| 1      | 1                                     | 7                   | 0.146               | 0         | -1.848               |
| 2      | 2                                     | 19                  | 0.396               | 0.693     | -0.685               |
| 3      | 4                                     | 30                  | 0.625               | 1.386     | -0.019               |
| 4      | 6                                     | 43                  | 0.896               | 1.792     | 0.816                |
| 5      | 8                                     | 45                  | 0.938               | 2.079     | 1.020                |
| 6      | >8                                    | —                   | —                   | —         | —                    |

表 4 营运客车行驶系故障数据

Tab. 4 Driving system fault data of commercial bus

| 序号 $j$ | 故障里程<br>$t_j/$<br>( $\times 10^4$ km) | 累计故障<br>次数 $G_j/\text{次}$ | 累计故障<br>概率 $H_j/\%$ | $x_j =$<br>$\ln t_j$ | $y_j =$<br>$\ln [\ln 1(1-H_j)]$ |
|--------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1      | 0.5                                   | 2                         | 0.250               | -0.693               | -1.246                          |
| 2      | 1                                     | 4                         | 0.500               | 0                    | -0.367                          |
| 3      | 1.5                                   | 5                         | 0.625               | 0.405                | -0.019                          |
| 4      | 2                                     | 5                         | 0.625               | 0.693                | -0.019                          |
| 5      | 2.5                                   | 6                         | 0.750               | 0.916                | 0.327                           |
| 6      | 3                                     | 7                         | 0.875               | 1.099                | 0.732                           |
| 7      | >3                                    | —                         | —                   | —                    | —                               |

表 5 营运客车制动系故障数据

Tab. 5 Braking system fault data of commercial bus

| 序号 $j$ | 故障里程<br>$t_j/$<br>( $\times 10^4$ km) | 累计故障<br>次数 $G_j/\text{次}$ | 累计故障<br>概率 $H_j/\%$ | $x_j =$<br>$\ln t_j$ | $y_j =$<br>$\ln [\ln 1(1-H_j)]$ |
|--------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1      | 1                                     | 13                        | 0.109               | 0                    | -2.157                          |
| 2      | 2                                     | 22                        | 0.185               | 0.693                | -1.588                          |
| 3      | 4                                     | 60                        | 0.504               | 1.386                | -0.354                          |
| 4      | 6                                     | 79                        | 0.664               | 1.792                | 0.086                           |
| 5      | 8                                     | 87                        | 0.731               | 2.079                | 0.273                           |
| 6      | 10                                    | 90                        | 0.756               | 2.303                | 0.345                           |
| 7      | 12                                    | 93                        | 0.782               | 2.485                | 0.419                           |
| 8      | 14                                    | 97                        | 0.815               | 2.639                | 0.524                           |
| 9      | 16                                    | 101                       | 0.849               | 2.773                | 0.636                           |
| 10     | 18                                    | 102                       | 0.857               | 2.890                | 0.666                           |
| 11     | 20                                    | 104                       | 0.874               | 2.996                | 0.728                           |
| 12     | >20                                   | —                         | —                   | —                    | —                               |

表 6 营运客车安全防护装置故障数据

Tab. 6 Safety protection device fault data of commercial bus

| 序号 $j$ | 故障里程<br>$t_j/$<br>( $\times 10^4$ km) | 累计故障<br>次数 $G_j/\text{次}$ | 累计故障<br>概率 $H_j/\%$ | $x_j =$<br>$\ln t_j$ | $y_j =$<br>$\ln [\ln 1(1-H_j)]$ |
|--------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1      | 1                                     | 11                        | 0.229               | 0                    | -1.346                          |
| 2      | 2                                     | 18                        | 0.375               | 0.693                | -0.755                          |
| 3      | 4                                     | 24                        | 0.500               | 1.386                | -0.367                          |
| 4      | 6                                     | 36                        | 0.750               | 1.792                | 0.327                           |
| 5      | 8                                     | 41                        | 0.854               | 2.079                | 0.655                           |
| 6      | 10                                    | 42                        | 0.875               | 2.303                | 0.732                           |
| 7      | 12                                    | 43                        | 0.896               | 2.485                | 0.816                           |
| 8      | 14                                    | 44                        | 0.917               | 2.639                | 0.910                           |
| 9      | 16                                    | 45                        | 0.938               | 2.773                | 1.020                           |
| 10     | 18                                    | 45                        | 0.938               | 2.890                | 1.020                           |
| 11     | 20                                    | 45                        | 0.938               | 2.996                | 1.020                           |
| 12     | >20                                   | —                         | —                   | —                    | —                               |

由累计故障数  $G_j$  和累计故障概率  $H_j$  计算的拟合检验系数  $r^2$  如表 7 所示, 因  $r^2 \geq 0.9$  可以判定  $y$  与  $x$  之间存在线性关系, 即可以判定数据整体服从威布尔分布。

表 7 营运客车安全部件拟合检验系数

Tab. 7 Fitting inspection coefficients of commercial bus

| safety parts |         |         |         |         |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 零部件          | 转向系     | 行驶系     | 制动系     | 安全防护装置  |
| $r^2$ 值      | 0.987 9 | 0.957 2 | 0.954 0 | 0.974 3 |

4.3 故障分布参数拟合计算

根据威布尔分布函数计算的客车各零部件威布尔分布参数如表 8 所示, 得到的参数拟合图如图 2~5 所示, 其中横坐标  $x = \ln t$ , 纵坐标  $y = \ln [\ln 1(1-H)]$ 。可以看出, 各故障数据点基本落在拟合线条附近区间内, 表明威布尔分布参数计算结果合理。

表 8 威布尔分布参数

Tab. 8 Weibull distribution parameters

| 分类            | 转向系     | 行驶系     | 制动系     | 安全防护装置  |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| 形状参数 $b$      | 1.378 2 | 0.995 5 | 0.979 7 | 0.841 6 |
| 尺度参数 $\theta$ | 3.647 0 | 1.652 8 | 7.709 3 | 4.795 7 |

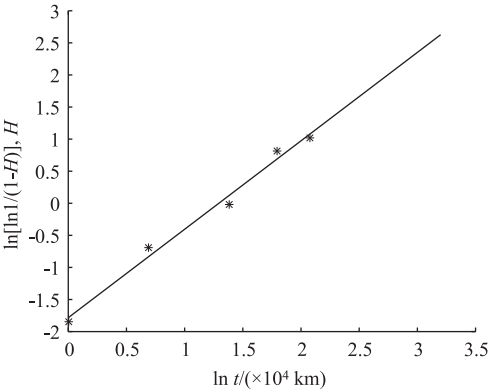


图 2 转向系拟合图

Fig. 2 Diagram of steering system fitting

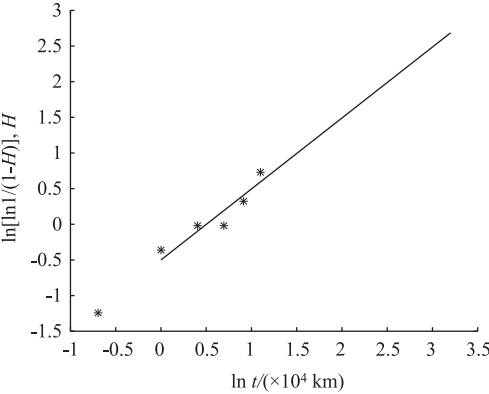


图 3 行驶系拟合图

Fig. 3 Diagram of driving system fitting



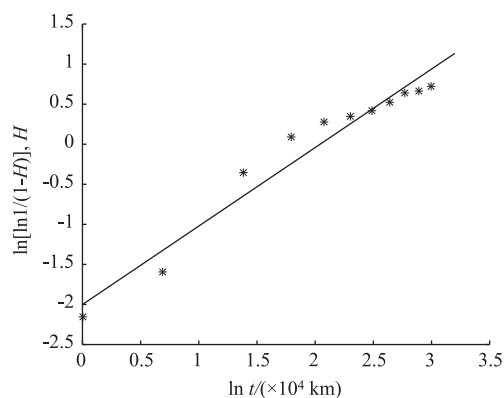


图4 制动系拟合图

Fig. 4 Diagram of braking system fitting

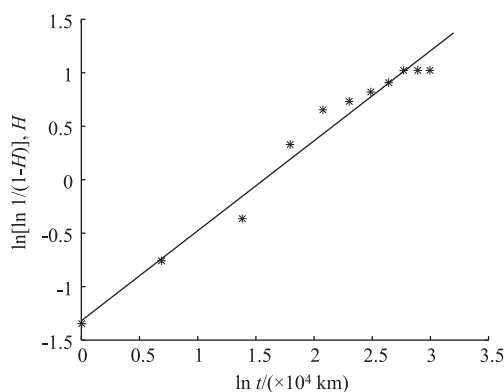


图5 安全防护装置拟合图

Fig. 5 Diagram of safety protection device fitting

#### 4.4 可靠特征量计算

根据式(1)~式(4)求出的 $b$ 、 $\theta$ 等威布尔参数经MATLAB处理,分别得到故障累积概率、故障率函数、故障概率密度函数、可靠度函数等可靠性特征量曲线,如图6~9所示。其中横坐标为故障里程 $t$ ,纵坐标为 $F(t)$ 、 $\lambda(t)$ 、 $f(t)$ 、 $R(t)$ 等函数计算值。

可以看出,在全寿命周期内随着营运客车行驶里程的增加,各零部件故障累积概率从0逐步趋向于1,相应的可靠度由1逐步趋于0,两者之间是负相关关系。此外,不同零部件的可靠性特征变化率具有明显差异,且各零部件的故障率以及故障概率密度在使用初期变化较大,之后逐渐趋向平稳,因此应对不同故障函数曲线进行具体分析并提出有针对性的产品优化改进方案。

从故障概率密度最大即故障发生频率最高的里程区间来看,转向系零部件在 $0\sim 4\times 10^4$  km区间,行驶系零部件在 $0\sim 2\times 10^4$  km区间,制动系零部件在 $0\sim 5\times 10^4$  km区间,安全防护装置在 $0\sim 3\times 10^4$  km区

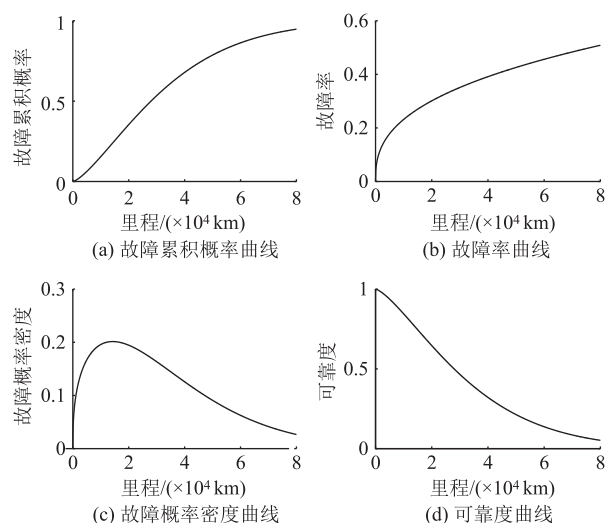


图6 转向系可靠性特征量曲线

Fig. 6 Curves of characteristic quality of steering system reliability

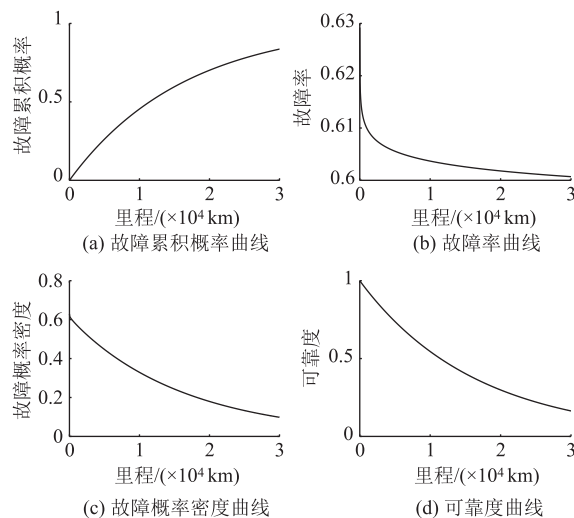


图7 行驶系可靠性特征量曲线

Fig. 7 Curves of characteristic quality of driving system reliability

间内。因此,应在不同零部件故障高发区间段结束前及时开展安全技术性能检验以降低故障发生风险。

## 5 结论

(1) 与道路试验、室内台架试验、软件仿真试验和少量维修数据分析方法相比,营运客车可靠性分析大数据呈现数据量多、里程跨度大、覆盖故障类型多样等特点,更能真实、客观、全面反映营运客车在全寿命周期内的性能变化和故障规律。

(2) 在用营运客车故障率较高的安全部件主要为安全带、防抱制动装置、辅助制动装置、液压助力转向系统、制动衬片更换报警装置、电动助力转

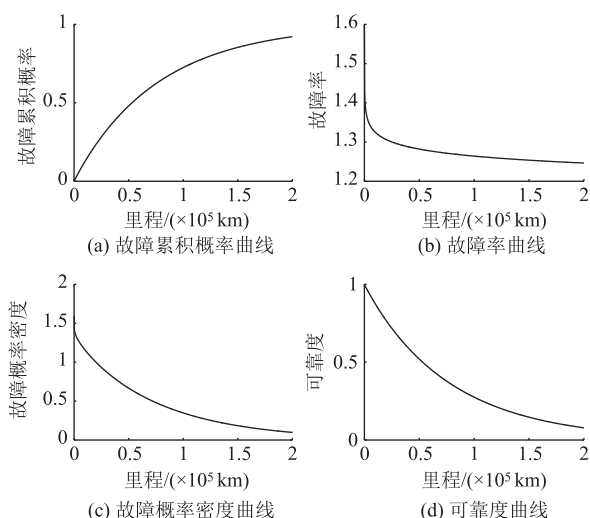


图 8 制动系可靠性特征量曲线

Fig. 8 Curves of characteristic quality of braking system reliability

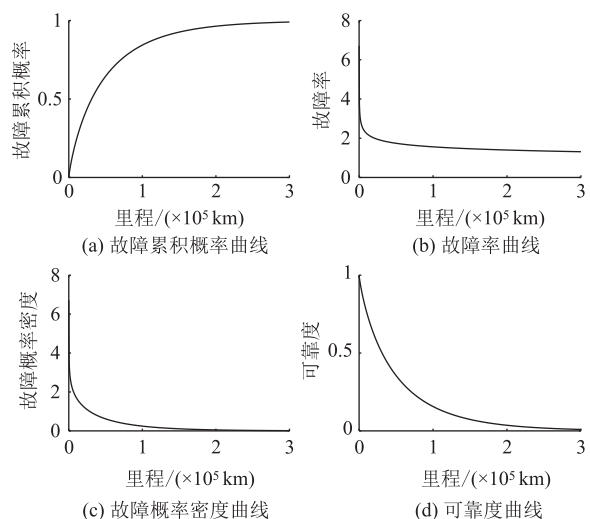


图 9 安全防护装置可靠性特征量曲线

Fig. 9 Curves of characteristic quality of safety protection device reliability

向系统等, 应结合故障发生营运里程及区间分布重点对以上装置进行定期维护及运行保障。

(3) 根据故障率函数曲线分析, 行驶系、制动系、安全防护装置的瞬时故障率随营运里程逐步趋缓。相反, 转向系零部件瞬时故障率随里程呈现上升趋势, 且故障增长速度随里程逐渐减小。因此, 应根据不同零部件故障变化特征科学合理制定维护计划。

(4) 与常规安全部件相比, 车道偏离预警系统 (LDWS)、自动紧急制动系统 (AEBS) 等高级驾驶辅助系统在营运车辆装配应用中, 具有更低故障率、更高可靠性的同时, 其故障风险随车辆使用年限增

加趋于平缓, 因此应重点对早期故障进行预防性检查, 这对车载智能装置的产品质量、使用要求和日常维护具有参考意义。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] JTT 1094—2016, 营运客车安全技术条件 [S]. JTT 1094—2016, Safety Specifications for Commercial Bus [S].
- [2] 马润, 仇维斌, 秦云, 等. 模糊区间 TOPSIS 动车组塞拉门故障风险评估 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 4 (31): 177-183. MA Run, QIU Wei-bin, QIN Yun, et al. Fault Risk Assessment of Sliding Plug Door of EMU Based on Fuzzy Interval TOPSIS [J]. China Safety Science Journal, 2021, 4 (31): 177-183.
- [3] 杨忠炯, 王卉, 董栋. 基于蒙特卡洛的汽车可靠性预测方法研究 [J]. 公路与汽运, 2016 (2): 15-18. YANG Zhong-jiong, WANG Hui, DONG Dong. Research on Automobile Reliability Prediction Method Based on Monte Carlo [J]. Highways & Automobile Applications, 2016 (2): 15-18.
- [4] 钱文学, 谢里阳, 尹晓伟. 载荷相关多薄弱部位零部件可靠度建模与分析 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (6): 182-187. QIAN Wen-xue, XIE Li-yang, YIN Xiao-wei. Reliability Modeling and Assessment of Load Dependent Multiple Weak Site Parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (6): 182-187.
- [5] 张邦成, 隋元昆, 步倩影, 等. 基于可靠性框图的轨道客车司机操作台可靠性分析 [J]. 长春工业大学学报, 2018, 39 (6): 521-527. ZHANG Bang-cheng, SUI Yuan-kun, BU Qian-ying, et al. Reliability Analysis for Driver Console of Railway Vehicles Based on Reliability Block Diagram [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2018, 39 (6): 521-527.
- [6] 杨崇道. 基于动态故障树的汽车制动系统可靠性分析 [J]. 时代汽车, 2019 (20): 22-23. YANG Chong-dao. Reliability Analysis of Automobile Braking System Based on Dynamic Fault Tree [J]. Auto Time, 2019 (20): 22-23.
- [7] 张春, 郭明亮. 大数据环境下朴素贝叶斯分类算法的改进与实现 [J]. 北京交通大学学报, 2015, 39 (2): 35-41. ZHANG Chun, GUO Ming-liang. Research and Realization of Improved Native Bayes Classification Algorithm under Big Data Environment [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39 (2): 35-41.
- [8] 樊少华. 基于模糊理论的数控车床可靠性分配 [D]. 长春: 吉林大学, 2011. FANG Shao-hua. Reliability Allocation of NC Lathe Based

- on Fuzzy Theory [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [9] 孙淑霞, 朱育新. 汽车制动系的故障树分析 [J]. 沈阳工业大学学报, 2000, 22 (5): 433-434.  
SUN Shu-xia, ZHU Yu-xin. Fault Tree Analysis of Automobile Braking System [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2000, 22 (5): 433-434.
- [10] 朱荣. 基于可靠性的混合动力公交客车高压电气系统故障分布规律研究 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2021, 50 (5): 23-27.  
ZHU Rong. Research on the Failure Distribution Law in the High Voltage Electrical System of Hybrid Public Transportation Bus Based on Reliability [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2021, 50 (5): 23-27.
- [11] 李国文. 营运车辆使用可靠性评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.  
LI Guo-wen. Study on Evaluation of Commercial Motor-vehicle's Use Reliability [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [12] 于亚杰, 胡建成, 湛先好. 基于售后索赔数据的汽车可靠性分析方法研究 [J]. 汽车实用技术, 2018 (14): 171-173.  
YU Ya-jie, HU Jian-cheng, ZHAN Xian-hao. Research on Vehicle Reliability Analysis Method Based on after Sale Claim Data [J]. Automobile Applied Technology, 2018 (14): 171-173.
- [13] 黄妮, 冯燕, 戴作强, 等. 氢燃料电池客车车架多工况疲劳可靠性分析 [J]. 机械制造与自动化, 2019 (5): 17-21.  
HUANG Ni, FENG Yan, DAI Zuo-qiang, et al. Analysis of Fatigue Reliability of Hydrogen Fuel Cell Bus Frame under Multiple Working Conditions [J]. Machine Building & Automation, 2019 (5): 17-21.
- [14] 鹿应荣, 李显生, 王云鹏, 等. 国产汽车的整车可靠性评价 [J]. 汽车工程, 2010 (2): 106-109.  
LU Ying-rong, LI Xian-sheng, WANG Yun-peng, et al. Reliability Evaluation of Domestic Trucks [J]. Automotive Engineering, 2010 (2): 106-109.
- [15] 滕云. 国产汽车使用可靠性评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.  
TENG Yun. Study on Evaluation of Domestic Vehicle's Use Reliability [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [16] GB 7258—2017, 机动车运行安全技术条件 [S].  
GB 7258—2017, Technical Specifications for Safety of Power-driven Vehicles Operating on Roads [S].
- [17] GB 38900—2020, 机动车安全技术检验项目和方法 [S].  
GB 38900—2020, Items and Methods for Safety Technology Inspection of Motor Vehicles [S].
- [18] 白芳华, 王若璜, 颜长征. 营运客车交通事故特征研究与分析 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46 (21): 206-210.  
BAI Fang-hua, WANG Ruo-huang, YAN Chang-zheng. Research and Analysis of the Characteristics for Operating Passenger Car Traffic Accident [J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46 (21): 206-210.
- [19] 齐洪磊, 刘兆鑫. 论新能源客车常见故障与维修措施优化 [J]. 时代汽车, 2020 (11): 153-154.  
QI Hong-lei, LIU Zhao-xin. On Common Faults of New Energy Passenger Cars and Optimization of Maintenance Measures [J]. Auto Time, 2020 (11): 153-154.
- [20] 王丹丹. 电动汽车车桥可靠性分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.  
WANG Dan-dan. Reliability Analysis of Electric Vehicle Axle [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.

(上接第 221 页)

- [15] FIELD A I. Simulation, Modelling, and Control of a Near-surface Underwater Vehicle [D]. Vancouver: University of British Columbia, 2000.
- [16] SHLADOVER S E, SU D Y, LU X Y. Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow [J]. Transportation Research Record, 2012, 2324 (1): 63-70.
- [17] SHLADOVER S E, NOWAKOWSKI C, LU X Y, et al. Cooperative Adaptive Cruise Control: Definitions and Operating Concepts [J]. Transportation Research Record, 2015, 2489 (1): 145-152.
- [18] AO Z, JIANG B, SHI P. Fault-tolerant Control for a Class of Nonlinear Sampled-data Systems via a Euler Approximate Observer [J]. Automatica, 2010, 46 (11): 1852-1859.
- [19] CHOWDHURY D, WOLF D E, SCHRECKENBERG M. Particle Hopping Models for Two-lane Traffic with Two Kinds of Vehicles: Effects of Lane-changing Rules [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1997, 235 (3/4): 417-439.
- [20] 李娟, 曲大义, 刘聪, 等. 基于元胞自动机的车辆换道行为研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (11): 140-145.  
LI Juan, QU Da-yi, LIU Cong, et al. Study on Vehicle Lane-changing Behavior Based on Cellular Automaton [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (11): 140-145.
- [21] IVANOV D. Structure Dynamics Control-based Integration of Aggregate Distribution and Dynamic Transportation Planning [J]. Manufacturing Modeling, Management and Control, 2013, 46 (9): 1920-1925.