

基于可靠性分析的 DSA200 型受电弓检修参数优化研究

毛永文^{1,2} 李勇³

(1. 四川铁道职业学院 机车车辆学院, 成都 611732)

(2. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 合肥 230026)

(3. 兰州交通大学 机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对 DSA200 型受电弓预防维修存在欠维修或过维修问题, 提出一种利用受电弓失效数据来优化检查维修参数的方法。首先, 利用图参数法对受电弓部件失效数据进行分析, 拟合失效时间分布模型, 初步判定失效数据服从指数分布, 进一步采用 Bartlett 值法, 验证失效数据服从指数分布的有效性; 其次, 基于受电弓组成结构和工作特性, 构建受电弓为各部件串联的可靠性框图模型, 根据受电弓部件具有恒定失效率特征, 得出受电弓失效率; 再次, 建立受电弓预防性维修和更换最小费用模型, 得到受电弓最优预防性维修的间隔时间和最优备件数量; 最后, 利用故障树分析法, 分析受电弓部件的结构重要度、概率重要度和关键重要度, 得出受电弓故障概率及检查维修中重点关注的部件。优化后的受电弓检查维修参数能够为检修人员提升维修水平和降低维修成本提供科学参考。

关键词: DSA200 型受电弓; 指数分布; 检修间隔时间; 备件数量; 故障树分析法

中图分类号: U264.34 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.02.013

0 引言

目前, 电力机车受电弓的维修仍然是根据走行里程或运行时间进行预防性维修, 这种基于经验的维修方法, 必然会出现欠维修或过维修的情况。因此需要基于可靠性原理, 深入分析受电弓各部件故障维修数据, 找出部件失效规律, 进而可以实施以可靠度为指标的预防性维修^[1]。受电弓故障或失效, 就意味着电力机车无法获得电能, 从而使电力机车被迫停车。因此, 受电弓的可靠性是保证列车安全运行的重要条件^[2]。可靠性指“产品在规定条件下和规定时间内, 完成规定功能的能力”^[3]。受电弓在使用过程中受力复杂, 曾多次出现受电弓滑板过度磨损^[4]、受电弓框架裂纹^[5]等问题。针对受电弓或其组件失效的问题, 霍肖伟等^{[6]101-106}提出了可靠性评估方法, 李兴运等^[7]提出基于 T-S 模糊故障树的可靠性分析方法, 薛康等^[8]提出最小二乘法分析受电弓故障数据, 宫琦等^[9]提出受电弓故障模式综合评判法, 齐金平等^[10]提出超椭圆贝叶斯网络评估方法。林平等^[11-12]对受电弓止挡、受电弓弓头等部件单独展开可靠性计算。通过文献查阅发现, 目前国内专家对受电弓可靠性研究主要集中在两个方面: 一是研究如何利用受电弓及其组件故障数据进行可靠性分析, 建立可靠度函数; 二是探究受电弓更

为有效的可靠性评估方法。对于受电弓重点部件管理、最优检查维修间隔时间、最优备件数量等具体问题研究较少。

目前, 受电弓检修规程按照运行时间长度来安排检修内容, 其中 C_1 检修周期为 3 个月; C_2 检修周期为 6 个月; C_3 检修周期为 1 年; C_4 检修周期为 3 年; C_5 检修周期为 6 年; C_6 检修周期为 12 年^{[6]101-106}。受电弓各检修周期和检修内容的安排主要基于经验, 因此必然会出现欠维修或过维修的情况。欠维修会使受电弓具有安全隐患, 甚至造成机车事故; 过维修会导致不必要的人力、物力、财力的投入, 使受电弓整体维修费用增加。另外, 目前受电弓备件以“安全、够用”为原则, 没有清晰的数量要求, 通常准备五六套。备件过少会使待修机车经历不必要的停机; 备件过多, 会导致不必要的备件库存费用。为此, 以可靠性为基础、以降低检查维修费用为目标, 优化受电弓检修周期、备件数量等参数, 可以为检查维修人员提升检修保障效率和降低维修成本提供科学依据。

针对以上问题, 利用 DSA200 型受电弓组件故障维修数据, 拟合受电弓组件失效概率分布, 构建受电弓组件可靠性框图模型, 计算受电弓可靠度。建立受电弓预防性维修和更换的最小费用模型, 计算受电弓最优预防性维修的间隔时间、维修间隔中的最优备件数量,

收稿日期: 2023-05-15 修回日期: 2023-07-02

基金项目: 四川铁道职业学院 2022 年度校级科研项目(202212001)

作者简介: 毛永文, 男, 1984 年生, 甘肃武威人, 硕士, 副教授; 主要研究方向为铁道机车车辆可靠性分析; E-mail: myw.qq@126.com。

引用格式: 毛永文, 李勇. 基于可靠性分析的 DSA200 型受电弓检修参数优化研究[J]. 机械强度, 2025, 47(2): 103-110.

MAO Yongwen, LI Yong. Research on maintenance parameter optimization of DSA200 type pantograph based on reliability analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(2): 103-110.

实现降低总维修费用的目标。并利用故障树分析法,分析各组成部件故障概率及重要度,指出受电弓检查维修需要重点关注的部件,达到提高维修效率的目的。

1 DSA200型受电弓构成及组件失效数据分析

1.1 DSA200型受电弓构成及工作原理

DSA200型受电弓是我国交流传动货运机车HXD₂型电力机车使用的一种从接触网获取电能的重要电气部件。当受电弓升起时,其滑板与接触网导线直接接触,从接触网导线上受取电流,并将其通过车顶母线传送至机车内部,供机车使用。由于受电弓极其重要,所以当受电弓故障时,机车会选择降下故障受电弓,升起备用受电弓,继续维持机车运行。通常不会在故障的情况下继续使用受电弓,除非备用受电弓也失效了。受电弓通过绝缘子安装在电力机车的车顶上,是一种铰接式的机械构件,主要由碳滑板、弓头、上臂杆、下臂杆、上导杆、下导杆、升弓装置、气源控制装置、底架等部件组成。DSA200型受电弓如图1所示。



图1 DSA200型受电弓

Fig.1 DSA200 type pantograph

1.2 DSA200型受电弓组成部件失效分布拟合

从某机务段经营的19台HXD₂型电力机车为期10年的维修记录中可以看出,影响电力机车运行的故障记录共8 023条,其中涉及受电弓及其组件的故障数占电力机车部件所有故障数的近8.5%。按照故障在一次工作中出现的同一部件或是设备的间歇性故障或多次报警,只记录1次故障的统计原则,整理后获得气囊式气缸有效的故障数据为25条,如表1所示。

表1 气囊式气缸失效时间统计

Tab.1 Statistics of failure time of the airbag cylinder

序号 Serial number	失效时间 Failure time t/h	序号 Serial number	失效时间 Failure time t/h	序号 Serial number	失效时间 Failure time t/h	序号 Serial number	失效时间 Failure time t/h
1	1 980	8	2 043	15	743	22	1 291
2	1 014	9	210	16	336	23	1 243
3	12 420	10	8 023	17	1 985	24	8 106
4	754	11	6 037	18	6 700	25	8 144
5	2 921	12	889	19	12 815		
6	7 224	13	1 440	20	3 071		
7	510	14	11 460	21	3 520		

通过设备失效数据的整理分析,可以初步确定失效数据的分布规律,为可靠性指标的定量评价提供基础和方向^[13]。在置信度为95%的精度下,采用极大似然估计法对气囊式气缸失效数据进行概率分布拟合。图2~图5是气缸失效数据对应4种分布的概要图,图6是气缸失效数据不同分布的概率图。图6中,Anderson-Darling(AD)值越少,表示分布与数据似合得越好。概要图的纵坐标中, $f(t)$ 为概率密度函数; $u(t)$ 为分布函数; $s(t)$ 为生存函数; $g(t)$ 为故障函数。横坐标中, t 为时间,单位为h。概要图可以反映气囊式气缸失效时间的概率密度函数、生存函数、故障函数等。

根据图6,气囊式气缸失效时间数据拟合的威布尔分布、正态分布、指数分布、最小极值分布的AD值,分别为1.020、2.046、1.010、2.250,其中指数分布的AD值最小,表示指数分布与气囊式气缸失效时间数据拟合度最高。因此,可以初步得出结论:气囊式气缸失效时间规律符合指数分布规律。

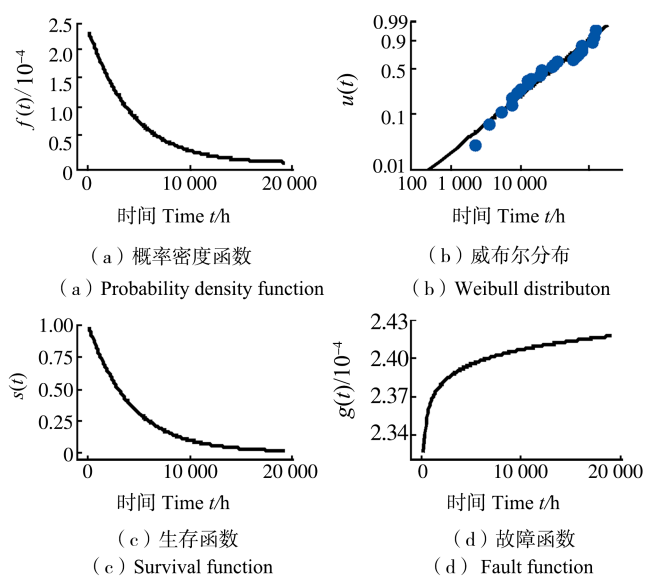


图2 气囊式气缸失效时间威布尔分布概要图

Fig.2 Weibull distribution diagram of failure time of the airbag cylinder

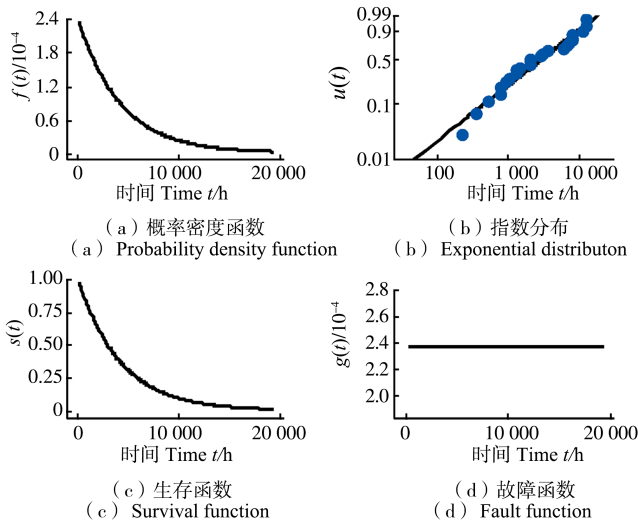


图 3 气囊式气缸失效时间指数分布概要图

Fig. 3 Exponential distribution diagram of failure time of the airbag cylinder

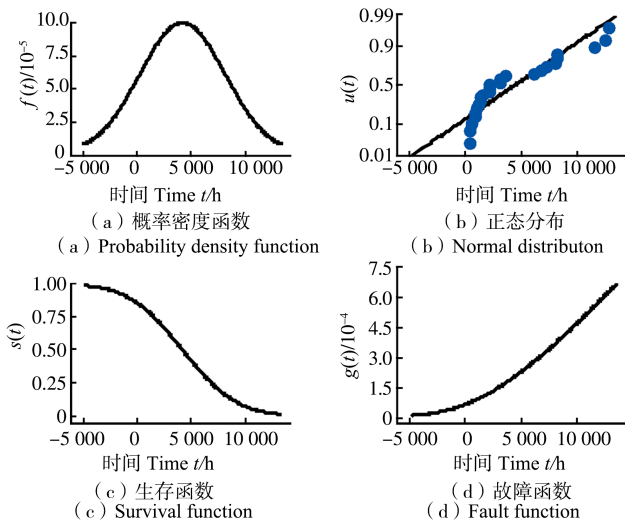


图 4 气囊式气缸失效时间正态分布概要图

Fig. 4 Normal distribution diagram of failure time of the airbag cylinder

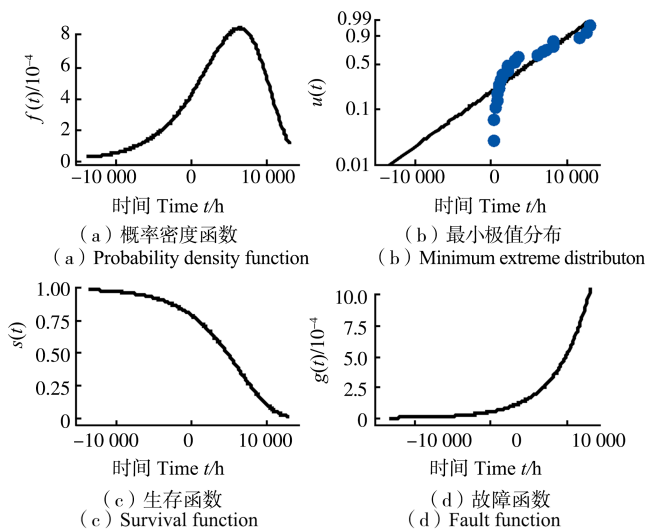


图 5 气囊式气缸失效时间最小极值分布概要图

Fig. 5 Minimum extreme distribution diagram of failure time of the airbag cylinder

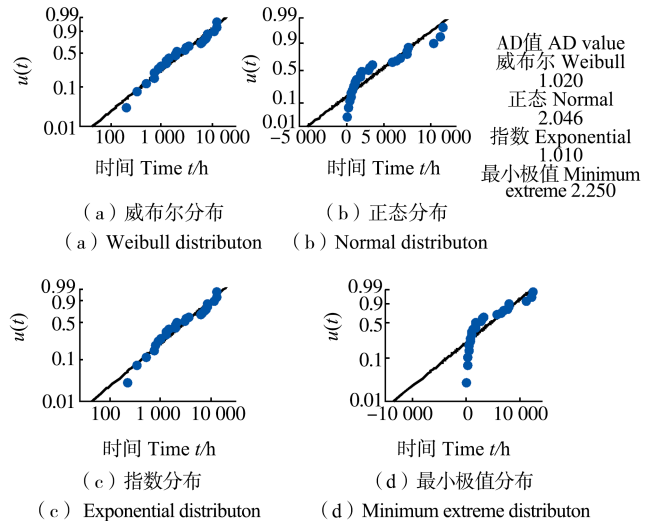


图 6 气囊式气缸失效时间的概率图

Fig. 6 Probability diagram of failure time of the airbag cylinder

1.3 DSA200 型受电弓组成部件失效分布检验

采用 Bartlett 值可以检验失效数据是否服从指数分布,其统计量可以表示为

$$B_r = \frac{2r(\ln \frac{T}{r} - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i)}{1 + (r + 1)/6r} \quad (1)$$

式中, r 为统计过程中气缸的失效数; T 为所有失效气缸的失效时间之和, $T = \sum_{i=1}^r t_i$; B_r 为 $r-1$ 个自由度的 χ^2 分布统计量。如果 B_r 的值落入置信度为 $100(1-\alpha)\%$ 的双侧 χ^2 检验的两个极值之间,就不能拒绝失效模型为指数分布的假设。下界极值为 $\chi_{(1-\alpha)/2, r-1}^2$, 上界极值为 $\chi_{\alpha/2, r-1}^2$ 。

通过式(1)检验气囊式气缸失效数据分布模型的有效性:

$$\sum_{i=1}^{25} \ln t_i = 194.52, T = \sum_{i=1}^{25} t_i = 104\ 879$$

$$B_r = \frac{2 \times 25(\ln(104879/25) - 1/25 \times 194.52)}{1 + 26/(6 \times 25)} = 23.93$$

在置信度为 95% 的情况下,通过查阅 χ^2 临界值表, $\alpha=0.10$ 时双侧检验的临界值为

$$\chi_{0.95, 24}^2 = 13.848\ 4 \quad \chi_{0.05, 24}^2 = 36.415\ 1$$

由于 $13.848\ 4 < 23.93 < 36.415\ 1$, 所以进一步证明 B_{25} 不能拒绝气囊式气缸失效样本服从指数分布的假设。

按照此失效数据分析方法,逐一分析受电弓其他组成部件的失效时间分布规律,如表 2 所示。表 2 给出了受电弓失效类型、失效部件、失效数、失效时间分布及根据失效数据估计的失效时间。

2 DSA200 型受电弓组件可靠性分析

根据为期 10 年统计的 DSA200 型受电弓检查维修

表 2 DSA200 型受电弓组件的失效时间分布
Tab. 2 Failure time distribution of DSA200 type pantograph components

失效类型 Failure type	失效部件 Failed component	失效数 Number of failures	失效时间分布 Failure time distribution	失效时间 Failure time t/h
A:气源控制装置失效 A:Failure of air source control device	(1)空气过滤器 Air filter	7 ¹	—	—
	(2)节流阀 Throttle valve	50	指数分布 Exponential distribution	7.14×10 ⁻⁴
	(3)压力开关 Pressure switch	10 ¹	—	—
	(4)安全阀 Safety valve	3 ¹	—	—
B:升弓装置失效 B:Failure of pantograph lifting device	(1)导盘 Guide disc	71	指数分布 Exponential distribution	10.3×10 ⁻⁴
	(2)气囊式气缸 Airbag cylinder	25	指数分布 ² Exponential distribution ²	3.571×10 ⁻⁴
	(3)钢索 Steel cable	59	指数分布 Exponential distribution	8.333×10 ⁻⁴
C:弓头部分失效 C:Failure of pantograph head	(1)滑板 Slide plate	46	指数分布 ² Exponential distribution ²	6.66×10 ⁻⁴
	(2)滑板框架 Slide plate frame	33	指数分布 ² Exponential distribution ²	4.640×10 ⁻⁴
	(3)弹簧盒 Spring box	37	指数分布 ² Exponential distribution ²	5.319×10 ⁻⁴
	(4)羊角 Horn	5 ¹	—	—
D:空气管路失效 D:Air pipeline failure	(1)绝缘软管 Insulating hose	12 ¹	—	—
	(2)接头 Joint	83	指数分布 Exponential distribution	11.746×10 ⁻⁴
E:铰链机构失效 E:Hinge mechanism failure	(1)推杆 Push rod	86	指数分布 Exponential distribution	12.5×10 ⁻⁴
	(2)上部导框 Upper guide frame	57	指数分布 Exponential distribution	8.33×10 ⁻⁴
	(3)下臂杆 Lower arm	69	指数分布 Exponential distribution	9.756×10 ⁻⁴
	(4)平衡杆 Stabilizer bar	6 ¹	—	—
	(5)中间铰链座 Middle hinge seat	11 ¹	—	—
F:控制电路失效 F:Control circuit failure	(1)继电器 Relay	9 ¹	—	—
	(2)分流导线 Shunt wire	3 ¹	—	—
	(3)传感器 Sensor	7 ¹	—	—

注:①数据不足以确定失效分布类型(在为期 10 年的研究中很少发生失效);②威布尔分布和指数分布同时近似拟合失效数据。通过比较误差平方和得知,指数分布比威布尔分布的拟合误差稍微小一点。

Note:①The failure datas are insufficient to determine the type of failure distribution (failure rarely occurs in a 10-year study);②Weibull distribution and exponential distribution simultaneously approximate the failure datas. By comparing the sum of squares of errors, that the fitting error of exponential distribution is slightly smaller than that of Weibull distribution.

数据,受电弓故障更换零部件的平均费用为 1 500 元/h,而预防性更换的费用为 800 元/h。受电弓备件短缺或多余造成费用的惩罚函数为 3.5。据此确定 DSA200 型受电弓最优预防性维修时间间隔和维修间隔时间中的最优备件数量。

2.1 计算 DSA200 型受电弓可靠度

依据 DSA200 型受电弓具体组成部件失效数据(表 2),舍弃不常出现失效的部件,建立受电弓串联性质的可靠性框图,如图 7 所示。图 7 中 A₂ 表示气源控制装置的节流阀(表 2),其他部件编号以此类推。

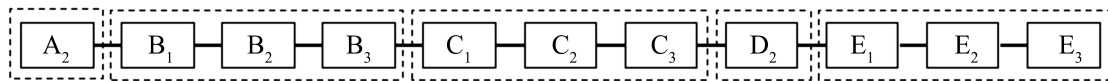


图 7 DSA200 型受电弓关键部件可靠性框图

Fig. 7 Reliability block diagram of key components of DSA200 type pantograph

由于受电弓由若干具有恒定失效率的部件组成,在时间 t 的可靠度表示为

$$R(t) = \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right] \quad (2)$$

式中, $R(t)$ 为受电弓可靠度; n 为受电弓组成部件失效数; λ_i 为受电弓组成部件失效率。

利用式(2)建立受电弓的可靠度表达式,为

$$R(t) = \exp\left[-(\lambda_{A_2} + \sum_{i=1}^3 \lambda_{B_i} + \sum_{i=1}^3 \lambda_{C_i} + \lambda_{D_2} + \sum_{i=1}^3 \lambda_{E_i})t\right]$$

即

$$R(t) = \exp[-8.831 \times 10^{-3} t]$$

DSA200 型受电弓可靠度函数如图 8 所示。

2.2 DSA200 型受电弓检修参数优化

由于受电弓具有恒定失效率,故受电弓的失效率可根据式(2)直接得到

$$\lambda = 8.831 \times 10^{-3}$$

受电弓正常运行直至失效,根据不同失效情况,失效部件被更换或维修恢复到最初的运行水平,这个过

程是更新过程。对于一个失效率 λ 为常数的部件,在时间段 $[0, t_p]$ 内该部件的更新函数的渐进解可以表示为

$$M(t_p) = \lambda t_p \quad (3)$$

式中, $M(t_p)$ 为在受电弓预防维修周期内的更新函数; t_p 为受电弓预防维修周期。

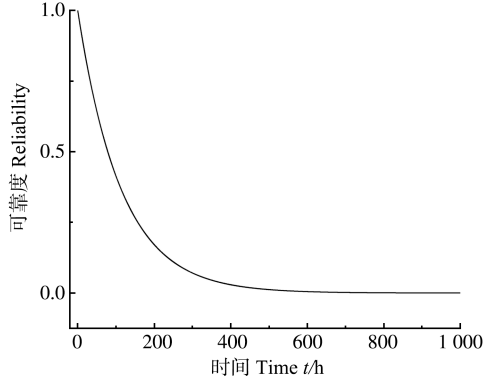


图 8 DSA200 型受电弓可靠度函数

Fig. 8 Reliability function of DSA200 type pantograph

由式(3)可得到其预防性维修周期内的更新函数:

$$M(t_p) = 8.831 \times 10^{-3} t_p$$

对于指数分布,分布函数的期望和标准差可以表示为

$$\mu = 1/\lambda \quad (4)$$

式中, μ 为指数分布函数的期望。

$$\sigma = 1/\lambda^2 \quad (5)$$

式中, σ 为指数分布函数的标准差。

根据式(4)、式(5)可以计算出指数分布的期望和方差分别为 $\mu = 1/8.831 \times 10^{-3}$, $\sigma = 1/7.799 \times 10^{-5}$ 。

对应的预防性维修周期内的预计故障数方差的渐进解,可以通过故障时间分布期望与标准差的函数表示为

$$\text{Var}[N(t_p)] = \frac{\sigma^2}{\mu^3} t_p \quad (6)$$

式中, $N(t_p)$ 为预防维修周期内的预计故障数。

受电弓预防性维修周期内预计故障数的方差,根据式(6)得

$$\text{Var}[N(t_p)] = 113.237 t_p$$

机械系统零部件定时维修、更换是最简单的预防性维修与更换策略。使用该策略在预防性维修周期内总预计费用,可以表示为

$$c(t_p) = \frac{c_p + c_i M(t_p)}{t_p} \quad (7)$$

式中, c_p 为受电弓预防性维修或更换的费用; c_i 为受电弓故障更换的费用。

预防性维修周期内总预计费用,利用式(7)得

$$c(t_p) = \frac{800}{t_p} + 13.247$$

当维修周期内备件短缺和多余时,将会引起不必要的费用,该费用称为惩罚费用,最优预防性维修周期与备件短缺或多余导致的惩罚费用是函数关系,用 ρ 来表示。

对于给定的 ρ ,最优预防性维修周期长度可表示为

$$\frac{\partial c(t_p^*)}{\partial t_p^*} + \rho \frac{\partial \text{Var}(t_p^*)}{\partial t_p^*} = 0 \quad (8)$$

式中, t_p^* 为受电弓最优预防性维修周期。

利用式(8),可得到受电弓最优预防性维修周期时间间隔为

$$-\frac{800}{t_p^{*2}} + 3.5 \times 113.237 = 0$$

$$\text{即 } t_p^* = 1414$$

预防性维修周期开始时的最优备件数量可通过 $\partial C_T / \partial t_p = 0$ 获得,即

$$\frac{\partial C_T}{\partial t_p} = 2\rho \{L - [M(t_p) + 1]\} = 0 \quad (9)$$

式中, C_T 为受电弓检查维修总费用; L 为受电弓备件数量,即

$$L^* = 1 + M(t_p^*) \quad (10)$$

式中, L^* 指受电弓最优备件数量。式(10)表明在预防性维修周期中最优备件数量必须等于预计的维修(故障)数。

利用式(10),可得到受电弓最优备件数量为

$$L^* = 1 + 0.125 \approx 2$$

3 DSA200 型受电弓组件故障树分析

3.1 建立 DSA200 型受电弓故障树

故障树分析法是将系统故障的原因,由总体至部分,按照树形结构自上而下按层细化的分析方法^[14]。从受电弓结构入手,分析其故障原因。将受电弓系统故障分为机械故障、气路故障和电路故障。机械故障主要表现在机械结构上,即组成部件的损坏和部件之间的作用关系破坏。气路故障主要表现在受电弓升降弓时出现无法充排气或压缩空气泄露的情况。电路故障主要表现在电路器件、导线损坏致使控制电路失效的情况。具体顶事件、中间事件,如表 3 所示。根据 DSA200 型受电弓组成结构及工作原理,以及受电弓故障就须换弓运行,不得带“病”使用的原则,采用演绎法构建 DSA200 型受电弓故障树,如图 9 所示。

由表 2 可知,受电弓组件故障次数,结合维修基地 10 年中统计的 8 023 件故障记录,可推算出受电弓组件发生故障的概率,具体底事件及其故障发生概率,如表 4 所示。

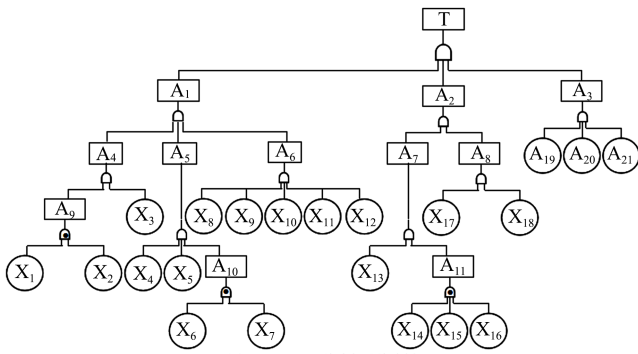


图9 DSA200型受电弓故障树

Fig. 9 Fault tree of DSA200 type pantograph

表3 DSA200型受电弓中间事件及顶事件

Tab. 3 Intermediate and top events of DSA200 type pantograph

事件代码 Event code	事件名称 Event name	事件代码 Event code	事件名称 Event name
T	受电弓状态异常 Abnormal pantograph status	A ₆	铰链机构故障 Hinge mechanism failure
A ₁	机械故障 Mechanical failure	A ₇	气源控制装置故障 Air source control device malfunction
A ₂	气路故障 Air circuit failure	A ₈	空气管路故障 Air pipeline failure
A ₃	电路故障 Circuit failure	A ₉	升弓装置框架开裂 Pantograph frame cracking
A ₄	升弓装置故障 Pantograph lifting device malfunction	A ₁₀	弓头部分机械故障 Mechanical failure of pantograph head
A ₅	弓头部分故障 Failure of pantograph head	A ₁₁	气路控制开关失效 Air circuit control switch failure

表4 DSA200型受电弓底事件及其故障概率

Tab. 4 Bottom event and its failure probability of DSA200 type pantograph

事件代码 Event code	事件名称 Event name	故障概率 Probability of failure
X ₁	导盘故障 Guide disc failure	0.008 8
X ₂	钢索断股 Broken strand of steel cable	0.003 1
X ₃	气囊式气缸漏气 Airbag cylinder leakage	0.007 4
X ₄	滑板损坏 Sliding plate failure	0.005 7
X ₅	弹簧失效 Spring failure	0.004 1
X ₆	滑板框架裂纹 Cracks on the sliding plate frame	0.004 6
X ₇	羊角断裂 Rupture of horn	0.000 6

续表

事件代码 Event code	事件名称 Event name	故障概率 Probability of failure
X ₈	推杆故障 Push rod malfunction	0.010 7
X ₉	上部导框断裂 Upper guide frame broken	0.007 1
X ₁₀	下臂杆故障 Lower arm malfunction	0.008 6
X ₁₁	平衡杆故障 Balance bar malfunction	0.000 7
X ₁₂	中间铰链故障 Middle hinge failure	0.001 4
X ₁₃	节流阀故障 Throttle valve malfunction	0.000 9
X ₁₄	空气过滤器失效 Air filter failure	0.006 2
X ₁₅	压力开关失效 Pressure switch failure	0.001 2
X ₁₆	安全阀失效 Safety valve failure	0.000 4
X ₁₇	绝缘软管开裂漏气 Air leakage from insulation hose	0.001 5
X ₁₈	管路接头松动漏气 Pipeline joint leakage	0.010 3
X ₁₉	继电器故障 Relay failure	0.001 1
X ₂₀	分流导线断股 Broken strand of shunt wire	0.000 4
X ₂₁	传感器失效 Sensor failure	0.000 9

3.2 DSA200型受电弓故障树分析

3.2.1 计算顶事件概率

根据图9,利用下行法求故障树的最小割集为

$$\begin{aligned}
 G_1 &= \{X_1, X_2\}, G_2 = \{X_3\}, G_3 = \{X_4\}, G_4 = \{X_5\}, \\
 G_5 &= \{X_6, X_7\}, G_6 = \{X_8\}, G_7 = \{X_9\}, G_8 = \{X_{10}\}, \\
 G_9 &= \{X_{11}\}, G_{10} = \{X_{12}\}, G_{11} = \{X_{13}\}, G_{12} = \{X_{14}, X_{15}, X_{16}\}, \\
 G_{13} &= \{X_{17}\}, G_{14} = \{X_{18}\}, G_{15} = \{X_{19}\}, G_{16} = \{X_{20}\}, \\
 G_{17} &= \{X_{21}\}.
 \end{aligned}$$

故障树各个最小割集中彼此没有重复的底事件,所以顶事件发生的概率表达式为

$$P = \prod_{m=1}^{N_G} \prod_{X_j \in G_m} q_j \quad (11)$$

式中, P 为故障树顶事件发生的概率; N_G 为故障树最小割集数; m 为最小割集序数; j 为顶事件序数; $X_j \in G_m$ 表示第 j 个底事件属于第 m 个最小割集; $q_j (j=1, 2, 3, \dots, 21)$ 为底事件的发生概率。

通过式(11)可得顶事件发生的概率为 $P=0.0608$ 。

3.2.2 计算底事件重要度

结构重要度是指不考虑底事件自身发生的概率,

仅从结构上分析各个底事件对顶事件发生所产生的影响程度^{[15]139-142}。由于故障树底事件较多,采用最小割集进行结构重要度分析,底事件结构重要度表达式为

$$I_1(j) = \sum_{x_j \in G_m} \frac{1}{2^{n_j} - 1} \quad (12)$$

式中, $I_1(j)$ 为底事件结构重要度的近似判别值; n_j 为底事件 x_j 所在最小割集中所包含的底事件数目。

概率重要度是指底事件发生概率引起顶事件发生概率的变化程度^{[15]142-143}。底事件的概率重要度表达式为

$$I_2(j) = \frac{\partial p}{\partial q_j} \quad (13)$$

式中, $I_2(j)$ 为底事件 x_j 的概率重要度。

关键重要度是指从敏感度和自身发生概率大小两个角度衡量底事件的重要程度^{[15]143-144}。底事件关键重要度表达式为

$$I_3(j) = \frac{q_j}{p} I_2(j) \quad (14)$$

式中, $I_3(j)$ 为底事件 x_j 的关键重要度。

利用式(12)~式(14)所计算出的底事件结构重要度、概率重要度、关键重要度,如表 5 所示。

表 5 底事件重要度

Tab. 5 Bottom event importance

底事件 Bottom event	结构重要度 Structural importance	概率重要度 Probability importance	关键重要度 Criticality importance
X_1	0.500 0	3.1×10^{-3}	4.5×10^{-4}
X_2	0.500 0	8.8×10^{-3}	4.5×10^{-4}
X_3	1.000 0	1.000 0	0.121 7
X_4	1.000 0	1.000 0	0.093 8
X_5	1.000 0	1.000 0	0.067 4
X_6	0.500 0	0.6×10^{-3}	4.5×10^{-5}
X_7	0.500 0	4.6×10^{-3}	4.5×10^{-5}
X_8	1.000 0	1.000 0	0.175 9
X_9	1.000 0	1.000 0	0.116 8
X_{10}	1.000 0	1.000 0	0.141 4
X_{11}	1.000 0	1.000 0	0.011 5
X_{12}	1.000 0	1.000 0	0.023 0
X_{13}	1.000 0	1.000 0	0.014 8
X_{14}	0.250 0	4.8×10^{-7}	5×10^{-8}
X_{15}	0.250 0	2.48×10^{-6}	5×10^{-8}
X_{16}	0.250 0	7.44×10^{-6}	5×10^{-8}
X_{17}	1.000 0	1.000 0	0.024 7
X_{18}	1.000 0	1.000 0	0.169 4
X_{19}	1.000 0	1.000 0	0.018 1
X_{20}	1.000 0	1.000 0	0.006 6
X_{21}	1.000 0	1.000 0	0.014 8

由表 5 可知,检修人员针对受电弓设备的检查维修工作,从底事件位置结构重要度和底事件故障概率对受电弓的影响程度看,检修人员应重点关注气囊式气缸、滑板、弹簧、推杆、上部导框、下臂杆、平衡杆、中间铰链、节流阀、绝缘软管、管路接头、继电器、电路导线、传感器等部件。从受电弓故障的敏感性来看,气囊式气缸和管路接头的检查是重中之重。检修人员以此为参考,严守检修流程和标准,确保检修工作“不漏项、不缺项,有顺序、有重点”。

4 结论

结合 DSA200 型受电弓为期 10 年的维修统计数据,基于预防维修和更换最小费用模型,优化了受电弓检修参数,利用故障树分析法对受电弓组件重要度进行了分析,得出如下结论:

1) DSA200 型受电弓各部件失效时间服从指数分布函数,整个受电弓的失效率为 8.831×10^{-3} 。

2) DSA200 型受电弓最优检查维修的时间间隔为 1 414 h,最优备件数量为 2 套。

3) DSA200 型受电弓故障概率为 0.068 0,检修人员应在检查维修中重点关注气囊式气缸、滑板、弹簧、推杆、上部导框、下臂杆、平衡杆、中间铰链、节流阀、绝缘软管、管路接头、继电器、电路导线、传感器等部件。

参考文献 (References)

- [1] 李勤,周立新. 轨道车辆部件运用可靠性分析方法研究[J]. 城市轨道交通研究,2010,13(1):63-65.
LI Qin, ZHOU Lixin. Analytic method for operation reliability on rail vehicle components[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(1): 63-65. (In Chinese)
- [2] 郝静,高国强. 受电弓降弓过程弓网电弧等离子体动态特性研究[J]. 铁道学报,2018,40(9):65-70.
HAO Jing, GAO Guoqiang. Dynamic analysis of pantograph-catenary arc plasma during pantograph lowering[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 65-70. (In Chinese)
- [3] IEC. Railway applications specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS): IEC 62278:2002[S]. Geneva:IEC, 2002:7-11.
- [4] 张立群. 广州地铁刚性接触网槽钢底座爆裂原因及应对措施[J]. 城市轨道交通研究,2015,18(6):147-149.
ZHANG Liqun. Blowout of rigid catenary channel steel base in guangzhou metro and countermeasures [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(6): 147-149. (In Chinese)
- [5] 龙木勇. 广州地铁三号线受电弓上框架裂纹原因分析及处理措施[J]. 机电工程技术,2012,41(7):197-200.
LONG Muyong. Analysis and measure of guangzhou metro line three pantograph frame crack rectification[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 41(7): 197-200. (In Chinese)
- [6] 霍肖伟,陈玉芬,蒯冠明. 一种电力机车用受电弓全寿命周期可靠性分析[J]. 大连交通大学学报,2021,42(1):101-106.
HUO Xiaowei, CHEN Yufen, KUAI Guanming. Service life reliability analysis of pantograph for electric locomotive[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(1): 101-106.

- ability analysis of a pantograph for electric locomotives[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42(1):101-106. (In Chinese)
- [7] 李兴运, 齐金平. 基于T-S模糊故障树的受电弓系统可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1):33-38.
LI Xingyun, QI Jinping. Reliability analysis of the pantograph system based on the T-S fuzzy FTA[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1):33-38. (In Chinese)
- [8] 薛康, 齐金平, 徐安策, 等. 动车组受电弓可靠性数据分析[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(12):14-19.
XUE Kang, QI Jinping, XU Ance, et al. Reliability data analysis of EMU pantograph [J]. Railway Computer Application, 2021, 30(12):14-19. (In Chinese)
- [9] 宫琦, 陈秉智, 李永华, 等. 地铁受电弓故障模式分析及危害度评估[J]. 机械与电子, 2021, 39(3):3-9.
GONG Qi, CHEN Bingzhi, LI Yonghua, et al. Failure mode analysis and criticality evaluation of metro pantograph [J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(3):3-9. (In Chinese)
- [10] 齐金平, 周亚辉, 王康, 等. 受电弓系统可靠性评估的超椭圆贝叶斯网络方法[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(4):105-110.
QI Jinping, ZHOU Yahui, WANG Kang, et al. Study on hyper-ellipsoidal Bayesian network method for evaluating reliability of pantograph system [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2022, 48(4):105-110. (In Chinese)
- [11] 林平, 张彦林. 受电弓止挡杆限位可靠性计算分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(3):91-93.
LIN Ping, ZHANG Yanlin. Calculation and analysis of limit reliability of pantograph stop rod [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2019, 42(3):91-93. (In Chinese)
- [12] 袁文辉. 受电弓弓头转角优化与可靠性分析[J]. 机车电传动, 2019(2):148-151.
YUAN Wenhui. Optimal and reliability analysis of rotary angle for pantograph collector head [J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(2):148-151. (In Chinese)
- [13] 赛义德. 杨舟, 译. 可靠性工程[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2013:339-357.
ELSAYED A. YANG Zhou, Jr. Reliability engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013:339-357. (In Chinese)
- [14] 毛永文, 杨伦军, 肖理. 故障树分析法在地铁班组管理中的应用[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2020, 32(1):41-45.
MAO Yongwen, YANG Lunjun, XIAO Li. Application of fault tree analysis method in metro team management [J]. Journal of Henan University of Engineering(Natural Science Edition), 2020, 32(1):41-45. (In Chinese)
- [15] 邵辉. 系统安全工程[M]. 2版. 北京:石油工业出版社, 2016:112-146.
SHAO Hui. System safety engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016:112-146. (In Chinese)

Research on maintenance parameter optimization of DSA200 type pantograph based on reliability analysis

MAO Yongwen^{1,2} LI Yong³

(1. School of Locomotive and Vehicle, Sichuan Railway College, Chengdu 611732, China)

(2. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the issues of under-maintenance or over-maintenance in preventive maintenance of DSA200 type pantograph, a method was proposed to optimize inspection and maintenance parameters by using pantograph failure data. Firstly, the failure datas of the pantograph components were analyzed by using graph parameter method, which failure time distribution models were fitted. The failure datas were preliminarily determined to obey the exponential distribution, and the Bartlett value method was further used to verify the validity of the failure data obey exponential distribution. Secondly, based on the structure and working characteristics of pantographs, a reliability block diagram model with pantograph components in series was constructed. According to the characteristics of constant failure rate of pantograph components, the failure rate of pantographs was obtained. Thirdly, the minimum cost model of preventive maintenance and replacement of pantographs was established, and the optimal preventive maintenance interval and the optimal number of spare parts were obtained. Finally, the structure importance, probability importance and critical importance of pantograph components were analyzed by using fault tree analysis method, and the failure probability of pantograph and the key components in inspection and maintenance were obtained. The optimized pantograph inspection and maintenance parameters can provide scientific reference for maintenance personnel to improve their maintenance level and reduce maintenance costs.

Key words: DSA200 type pantograph; Exponential distribution; Maintenance interval; Number of spare parts; Fault tree analysis method

Corresponding author: MAO Yongwen, E-mail: myw_qq@126.com

Fund: 2022 School-Level Scientific Research Project of Sichuan Railway College (202212001)

Received: 2023-05-15 Revised: 2023-07-02