DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.06.004　　文章编号：1000-128X(2023)06-0031-08

关于铁路机车车辆滚动轴承剩余寿命的研究

张宗峰[1]，陈喜红[2]，张关震[3]，吴　斯[3]
（1. 中车大连机车研究所有限公司，辽宁 大连　116021；
2. 中车株洲电力机车有限公司，湖南 株洲　412001；
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 金属及化学研究所，北京　100081）

摘　要：为提高铁路机车车辆的运行安全性和节约维修成本，文章在铁路机车车辆滚动轴承疲劳剩余寿命研究基础上，继续研究铁路机车车辆滚动轴承运用寿命规律，提出轴承运用寿命的基本类型包括疲劳寿命、精度寿命与抗异常损伤寿命；对铁路机车车辆轴承运用前、运用后的精度及异常损伤概率进行统计与分析，给出了轴承精度、异常损伤存活率与里程的关系，提炼出数学模型，分析精度寿命与抗异常损伤寿命变化规律，给出轴承批量各运用寿命阶段工作总量。指出轴承批量运用剩余寿命的可利用价值，提出合理管理轴承运用寿命的建议。

关键词：机车车辆；滚动轴承；运用寿命；精度寿命；抗异常损伤寿命；剩余寿命
中图分类号：U260.331^{+}.2；U270.331^{+}.2　　**文献标识码：**A

Research on remaining life of rolling bearings for rolling stock

ZHANG Zongfeng[1], CHEN Xihong[2], ZHANG Guanzhen[3], WU Si[3]

(1. CRRC Dalian Locomotive Research Institute Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116021, China;
2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 3. Metals and Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the operational safety and save maintenance costs of rolling stock, this paper focused on the fatigue remaining life of rolling bearings for rolling stock, further investigated their service life rules, and identified the basic types of bearing service lives, namely fatigue life, precision life, and abnormal damage resistance life. Through statistics and analysis on the accuracy and probability of abnormal damage on rolling stock bearings before and after service operations, it established the relationships of bearing accuracy and abnormal damage survival rates associated with mileage, resulting in a mathematical model. Additionally, based on analysis on the variation laws of precision life and abnormal damage resistance life, it summarized total capacities of bearings applied in batches in different service life stages. This paper underscores the available value in the remaining life of bearings when applied in batch, and proposes suggestions for reasonable management of bearing service life.

Keywords: rolling stock; rolling bearings; service life; precision life; abnormal damage resistance life; remaining life

---

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技项目（K2023J051）
通信作者：张宗峰（1973—），男，硕士，正高级工程师，轴承项目部系统设计师，主要从事铁路机车车辆轴承应用与设计方面的研究；E-mail: zhangzongfeng001@163.com
引用格式：张宗峰, 陈喜红, 张关震, 等. 关于铁路机车车辆滚动轴承剩余寿命的研究[J]. 机车电传动, 2023(6): 31-38.
Citation: ZHANG Zongfeng, CHEN Xihong, ZHANG Guanzhen, et al. Research on remaining life of rolling bearings for rolling stock[J]. Electric drive for locomotives,2023(6): 31-38.

0 引言

在铁路机车车辆滚动轴承实际运用中，在用的滚动轴承达到800万套以上，规格达数百种[1]之多，各部位轴承运用条件差异较大，运用寿命离散性较大，铁路行业对轴承寿命管理是一件非常困难的事，研究铁路机车车辆滚动轴承剩余寿命规律并提出运用管理的方法是非常有意义的。

文献[1]研究了滚动轴承的疲劳寿命规律，给出了机车车辆滚动轴承的剩余疲劳寿命评估方法，研究的是批量轴承疲劳寿命的剩余利用价值，未研究精度失效与异常损伤对寿命的影响；文献[2]把滚动轴承寿命预测模型分为统计学寿命模型、基于断裂力学的寿命模型和经验寿命模型3大类，模型通过应力L-P模型与振动监测作为评估基础，评估轴承的疲劳剩余寿命与运用寿命，未提出运用寿命规律；文献[3]主要研究轴承疲劳寿命试验方法，用于评估轴承的疲劳寿命的可靠性，未研究运用寿命；文献[4]基于L-P轴承寿命理论，对当前滚动轴承主要的寿命预测模型进行了定性分析，重点研究失效概率系数、材料系数、润滑系数、负荷系数、温度系数和清洁系数对轴承疲劳寿命的影响，并建立了多重因素作用下轴承疲劳寿命预估模型，未研究运用寿命；文献[5]对Tallian的滚动轴承疲劳理论进行了研究与解读，认为Tallian理论是继L-P理论之后最重要的轴承寿命理论贡献，对轴承寿命的Weibull分布的拟合性及其误差、轴承最小疲劳保证寿命等方面进行了许多开创性的研究，仅研究了疲劳寿命规律，未对轴承运用寿命进行研究；文献[6]研究了铁路货车轴承的寿命与检修，统计出货车轴承的失效中疲劳占比较小的现状，指出用疲劳寿命预测铁路货车轴承运用寿命的误差，提出轴承状态检测的运用管理意见，但未深入研究轴承运用寿命内在规律与里程的关系；文献[7]介绍了SKF-KF-Bayes的滚动轴承剩余使用寿命预测方法，利用振动信号预测单套轴承的性能衰减与剩余使用寿命，可以预测单套轴承的剩余运用寿命，但铁路用户对每一套轴承进行监测预报剩余运用寿命的可行性较小，模型的准确性也有待运用与考察；文献[8]研究了滚动轴承失效影响因素与影响机制，提出调查统计轴承寿命因素，以实现轴承寿命目标，未研究剩余寿命规律；文献[9]对HXD3型机车轴箱轴承电腐蚀故障进行原因分析并提出预防措施。由上可见，大部分文献的轴承寿命理论的基础是滚动轴承L-P寿命理论；部分文献已发现疲劳寿命与轴承实际运用寿命的差异，未研究运用寿命规律；部分文献从失效案例调查入手研究运用寿命，未提出轴承批量运用寿命的内在规律。

1 轴承寿命模型

铁路机车车辆滚动轴承在实际运用过程中，轴承异常损伤、精度丧失等导致的轴承热轴、暖轴、高温报警、烧损等故障并不是由疲劳失效引起的，说明轴承未疲劳而早期损坏，故疲劳寿命与实际运用寿命存在较大差异；机车车辆驱动系统滚动轴承变工况工作条件，每一时刻载荷与转速均不相同，实际运用寿命预测变得异常复杂，而轴承运用寿命正是铁路用户需要掌握和运用管理的，依据轴承疲劳寿命规律对轴承进行寿命管理必然导致失误与偏差。进一步研究轴承的运用寿命规律，将为铁路主机企业或用户提供技术管理思路。

对轴承运用状态进行调查与统计分析发现，轴承运用寿命包含多要素的综合寿命，各要素下寿命衰退规律差异较大，经过总结，铁路机车车辆滚动轴承运用寿命要素包含疲劳、精度、抗异常损伤等方面；这3个方面寿命各自有特定的运行规律，3个方面寿命关系既具有独立特征又具有关联关系，依据独立统计数据形成的关系如图1所示。

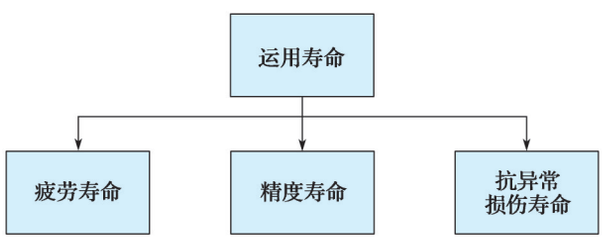


图1 轴承寿命模型

Fig. 1 Model of bearing life

2 特性统计调查

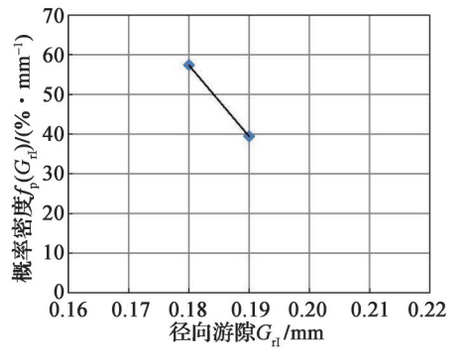
随着滚动轴承在铁路的广泛应用，为了研究机车车辆滚动轴承的运用寿命下各项特性的寿命规律，需从特性统计调查入手，研究机车车辆滚动轴承的运用状态，特别是需要对损伤与精度退化进行调查统计。

2.1 轴承形位公差统计

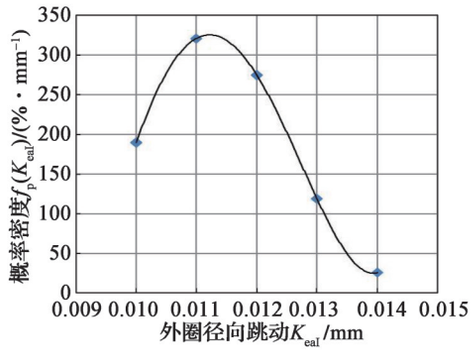
对自主化轴承I及在用轴承II、III的C5修程后产品进行检测，轴承各参数概率密度统计分析见图2~图4。

从图2可以看出，自主化轴承I的径向游隙及形位公差的概率密度呈现正态分布。

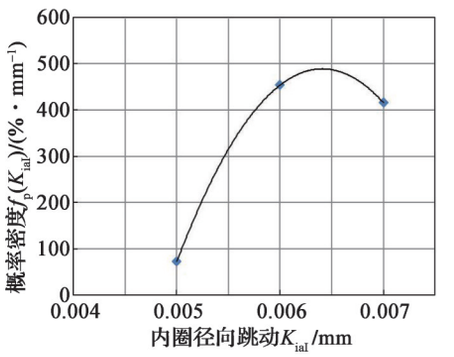
在图3的检测统计中可以看出，C5修程后的轴承II径向游隙及形位公差的概率密度呈现正态分布。径向游隙G_{rII}完全在红色线右侧，全部超差，外圈径向跳动K_{eaII}完全超出设计范围；滚子表面粗糙度还能保持在最



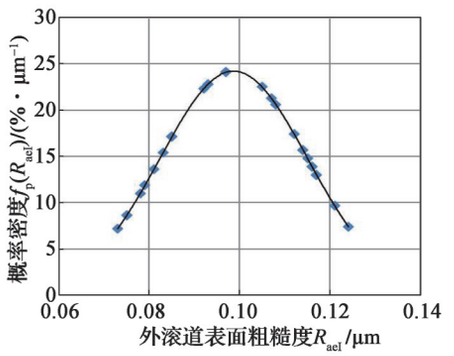
(a) 径向游隙 G_{rl} 的概率密度(原始设计 0.165~0.215 mm)



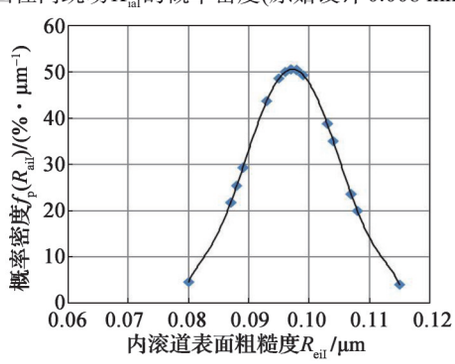
(b) 外圈径向跳动 K_{eal} 的概率密度(原始设计 0.018 mm)



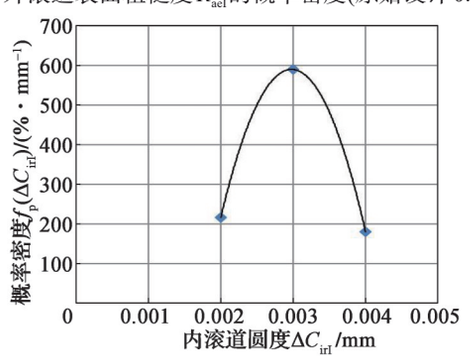
(c) 内圈径向跳动 K_{ial} 的概率密度(原始设计 0.008 mm)



(d) 外滚道表面粗糙度 R_{ael} 的概率密度(原始设计 0.16 μm)



(e) 内滚道表面粗糙度 R_{ail} 的概率密度(原始设计 0.125 μm)



(f) 内滚道圆度 ΔC_{irl} 的概率密度(原始设计 0.004 mm)

图2　自主化轴承I参数分布规律

Fig. 2　Distribution pattern of parameters for independently developed bearing I

高精度范围内，外滚道与内滚道表面粗糙度 R_{aII} 已完全或部分超出设计范围，外滚道相对外径的厚度变动量 K_{eII} 仍有 70% 轴承能保持设计范围。可见 C5 修程后的轴承II的形位公差超差较多，继续使用风险较高。

从图 4 的检测统计可以看出，C5 修程后的轴承III参数与设计指标对比：径向游隙 G_{rIII} 完全合格；部分轴承外圈径向跳动 K_{eaIII} 约 90% 保持在设计 P6 级范围内；轴承内圈径向跳动 K_{iaIII} 约 80% 保持在设计 P6 级范围内；滚子批直径变动量 V_{DwLIII} 全部在设计的 G2A 级范围内；滚道径向圆跳动 V_{DepIII} 全部在设计的范围内；滚子批长度变动量完全合格；轴承III多数精度指标在设计范围内，约 10% 的轴承个别精度指标超差，轴承运用精度有局部损失。可见，轴承III精度在 C5 修程后仍有使用的空间。

从图 2~图 4 可以看出，轴承精度在新造及运用后变化趋势均符合正态分布规律。

2.2　失效统计与分析

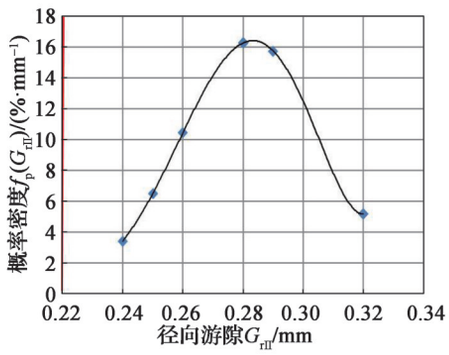
通过对 3 000 套某型铁路轴承III运用 1 个 C5 修程后的失效统计，其主要失效形式有疲劳剥离、压痕、磨损、锈蚀等；疲劳剥离是指轴承表层或浅表层强度降低后承受应力导致的表层断裂损伤，见图 5；压痕是指轴承零件运动过程中造成的表层塑性变形，见图 6；磨损是指轴承零件运动造成的表层移失现象，见图 7；锈蚀是指轴承零件表面氧化而导致的表层生锈，见图 8[9]。

失效数量的统计见表 1。

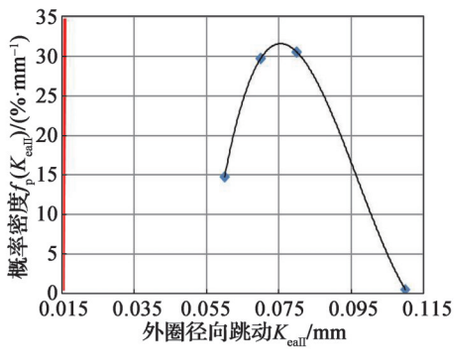
表 1　铁路轴承III失效统计

Table 1　Failure statistics of rolling stock bearing III

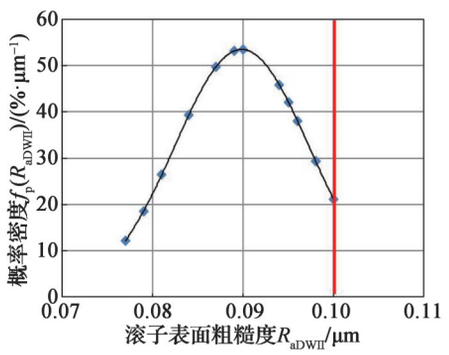
损伤类型	磨损	锈蚀	压痕	疲劳
数量	121	89	48	75



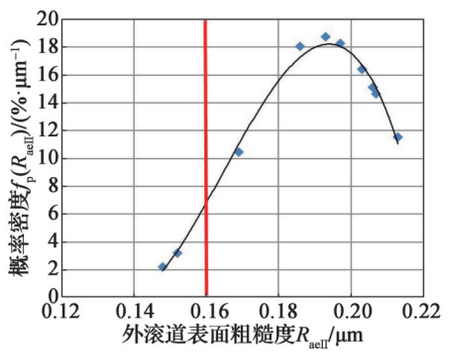
(a) 径向游隙G_{rII}的概率密度(原始设计0.20~0.22 mm)



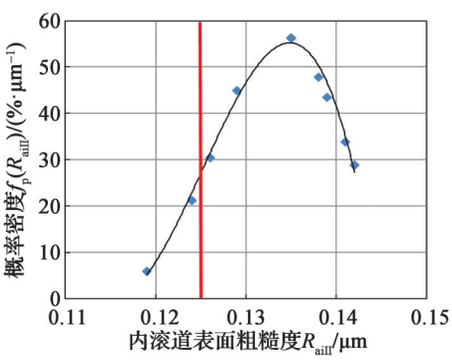
(b) 外圈径向跳动K_{eaII}的概率密度(原始设计0.015 mm)



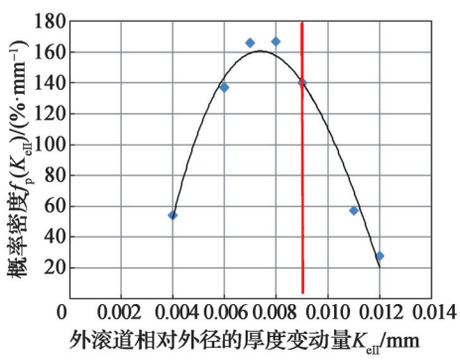
(c) 滚子表面粗糙度R_{aDWII}的概率密度 (原始设计0.1 μm)



(d) 外滚道表面粗糙度R_{aeII}的概率密度 (原始设计0.16 μm)



(e) 内滚道表面粗糙度R_{aiII}的概率密度(原始设计0.125 μm)

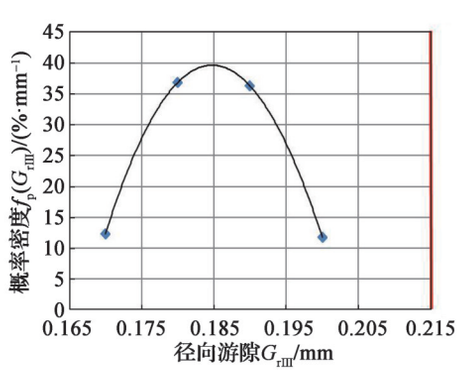


(f) 外滚道相对外径厚度变动量K_{eII}的概率密度(原始设计0.009 mm)

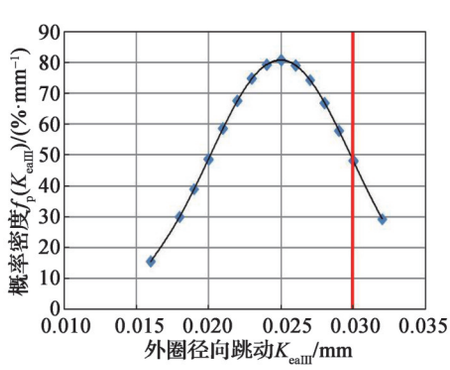
图3 C5修程后的轴承II参数分布规律

Fig. 3 Distribution pattern of parameters for bearing II after C5 repair

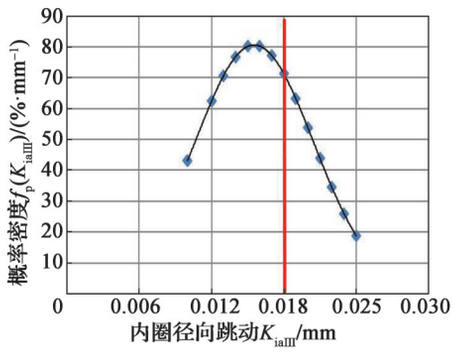
数据统计显示，总失效占全部轴承比例约为11.1%；疲劳失效只有75起，疲劳失效占比约为2.5%；而其他类失效如磨损、锈蚀、压痕达到258起，表面损伤失效占比约为8.6%。可以看出，在实际运行中疲劳失效不是铁路轴承的主要失效形式，仅以疲劳寿命对该型轴承的运用寿命进行预测与评估是不全面的。



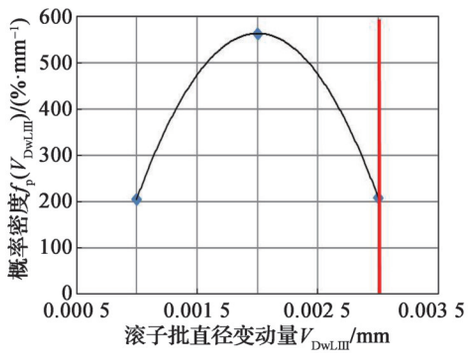
(a) 径向游隙G_{rIII}的概率密度(原始设计0.165~0.215 mm)



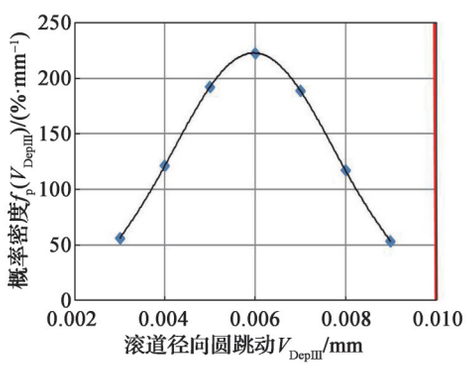
(b) 外圈径向跳动K_{eaIII}的概率密度(原始设计0.030 mm)



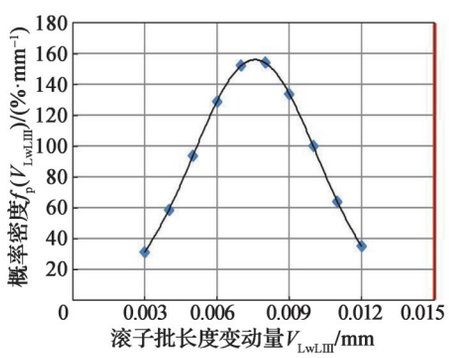
(c) 内圈径向跳动K_{iaIII}的概率密度(原始设计0.018 mm)



(d) 滚子批直径变动量V_{DwLIII}的概率密度(原始设计0.003 mm)



(e) 滚道径向圆跳动V_{DepIII}的概率密度(原始设计0.010 mm)



(f) 滚子批长度变动量V_{LwLIII}的概率密度(原始设计0.015 mm)

图4　C5 修程后的在用轴承III参数分布规律

Fig. 4　Distribution pattern of parameters for in-service bearing III after C5 repair



图5　滚道疲劳剥离

Fig. 5　Serious fatigue stripping of raceway

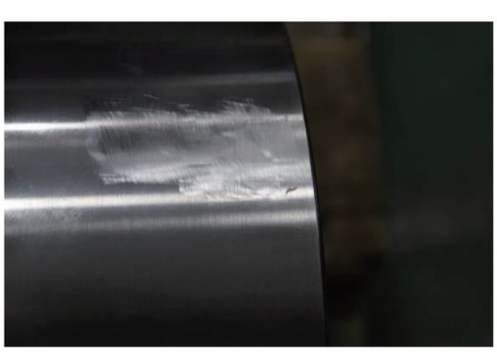


图7　滚道磨损

Fig. 7　Racyway track wear

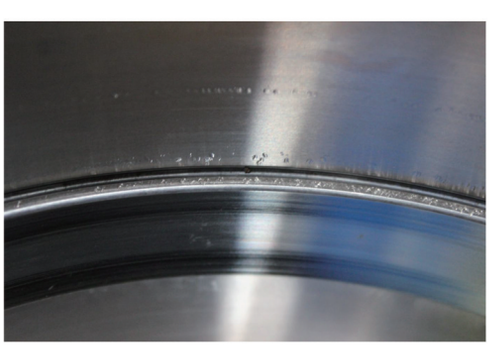


图6　挡边压痕

Fig. 6　Rib indentation

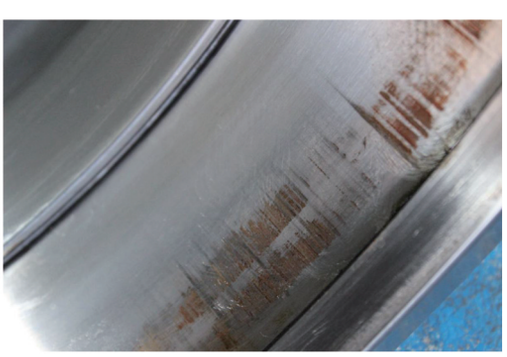


图8　滚道锈蚀损伤

Fig. 8　Rust damage to raceway

2.3　小结

从轴承运用前后精度的变化趋势可以推断轴承的精度寿命的变化规律，而轴承的运用寿命严重依赖轴承保持的工作表面精度。可以说铁路典型轴承运用寿命的规律与轴承的精度、异常损伤及表面疲劳的变化规律高度相关。

3 运用寿命预测

在评估轴承批量运用的剩余寿命的研究中，形成了如下特定方法：

①首先调查损伤的典型故障，形成失效的基本数据与故障模型；

②研究典型故障模型与运用里程的变化规律；

③提炼典型故障模型失效规律的数学模型，并确定特定轴承的失效概率$F(L_w)$的特征参数σ_{Lw}、ζ等；

④计算典型故障模型在一定里程下的失效概率$F(L_w)$及存活率S；

⑤计算各运用区间的轴承批量工作量A，推导轴承各修程后的剩余寿命。

3.1 精度寿命

从2.1节中的统计调查可以看出，轴承精度的退化呈现正态分布，每一套轴承的精度寿命的运用里程可以用数组$L_w\{L_{w1}, L_{w2}, L_{w3}, L_{w4}, L_{w5}, \cdots, L_{wN}\}$表示。用正态分布工具对数组进行数据处理。

其平均值$\overline{L}_w$按式(1)计算。

$$\overline{L}_w=\frac{\sum_{i=1}^{N}L_{wi}}{N} \tag{1}$$

式中：$\overline{L}_w$—轴承的平均精度寿命，10^4 km；L_{wi}—其中一轴承的精度寿命，10^4 km；N—轴承批量中含有的轴承数量；i—轴承批量中第i套轴承。

其均方差σ_{Lw}按式(2)计算。

$$\sigma_{Lw}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(L_{wi}-\overline{L}_w\right)^2}{N}} \tag{2}$$

式中：σ_{Lw}—精度寿命的均方差，10^4 km。

轴承精度寿命的概率密度$f_p(L_{wi})$可用式(3)表示。

$$f_p(L_{wi})=\frac{\exp\left(-\frac{\left(L_{wi}-\overline{L}_w\right)^2}{2\sigma_{Lw}^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{Lw}} \tag{3}$$

式中：$f_p(L_{wi})$—轴承运用到L_{wi}寿命时的概率密度，1/（10^4 km）。

正态分布规律数组的概率密度$f_p(L_{wi})$见图9。

轴承运用到某一里程的精度寿命失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$就是概率密度$f_p(L_{wi})$与横坐标轴$(0\sim L_{wi})$区间所围成的面积，用式(4)计算。

$$F_{pi}(0\sim L_{wi})=\int_0^{L_{wi}}f_p(L_w)\mathrm{d}L_w \tag{4}$$

式中：$F_{pi}(0\sim L_{wi})$—轴承装车开始运用到L_{wi}里程时精度寿命损失的概率，%。

由于精度寿命服从正态分布，如果100%完全失效，那么运用里程为$\overline{L}_w-4\sigma_{Lw}\sim\overline{L}_w+4\sigma_{Lw}$，由于运用里程不为负数，故$\overline{L}_w-4\sigma_{Lw}$最小值至多为0；因此平均精度寿命$\overline{L}_w$等于4个$\sigma_{Lw}$，于是轴承运行的精度寿命概率

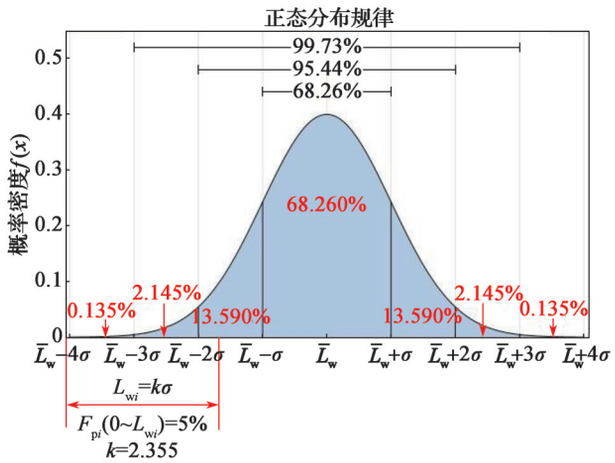


图9 精度寿命的概率密度曲线

Fig. 9 Probability density curve of precision life

密度$f_p(L_{wi})$的式(3)可变化为采用式(5)计算。

$$f_p(L_{wi})=\frac{\exp\left(-\frac{\left(L_{wi}-4\sigma_{Lw}\right)^2}{2\sigma_{Lw}^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{Lw}} \tag{5}$$

轴承运用到某一里程L_{wi}的精度寿命失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$的式(4)，可变为采用式(6)计算。

$$F_{pi}(0\sim L_{wi})=\int_0^{L_{wi}}\frac{\exp\left(-\frac{\left(L_{wi}-4\sigma_{Lw}\right)^2}{2\sigma_{Lw}^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{Lw}}\mathrm{d}L_w \tag{6}$$

轴承运行到某一里程L_{wi}精度寿命的存活率$S_{pi}(0\sim L_{wi})$就是1减去精度寿命失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$，用式(7)计算。

$$S_{pi}(0\sim L_{wi})=100(1-F_{pi}(0\sim L_{wi})) \tag{7}$$

式中：$S_{pi}(0\sim L_{wi})$—轴承运行到某一里程L_{wi}精度寿命的存活率，%；

由于正态分布函数是非初等函数积分，概率密度$f_p(L_{wi})$、失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$、存活率$S_{pi}(0\sim L_{wi})$的积分计算要借助计算机程序进行，经计算，轴承精度的存活率$S_{pi}(0\sim L_{wi})$随走行里程的均方差σ_{Lw}呈现先平缓、后陡直的“山脊悬崖”变化曲线，如图10。

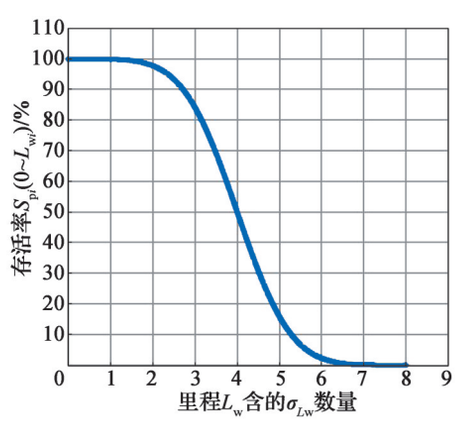


图10 轴承精度寿命存活率$S_{pi}(0\sim L_{wi})$随里程的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of survival rate associated to bearing precision life $S_{pi}(0\sim L_{wi})$ with mileage

一批轴承工作到里程L_{wi}时的工作量A就是图10存活率的变化曲线与横坐标所围面积，可以用式(8)计算。

$$A=n\int_0^{L_{wi}}S_{pi}\mathrm{d}L_{\mathrm{w}} \tag{8}$$

式中：A— 一批轴承工作到里程L_{wi}时的工作量，10^4 km；n— 一批轴承的数量。

批量轴承工作量A也是非初等函数积分，经计算机计算，一批n套轴承，各阶段的工作量A见表2。

表2　批量轴承精度寿命工作量A

Table 2　Workload A of bearing applied in batch in precision life

工作区间(0~L_{wi})	失效率F_{pi}	总工作量A
0~1σ_{Lw}	0.135%	0.9997$n\sigma_{Lw}$
0~2σ_{Lw}	2.280%	1.9916$n\sigma_{Lw}$
0~4σ_{Lw}	50.000%	3.6012$n\sigma_{Lw}$
0~8σ_{Lw}	100.000%	4.0003$n\sigma_{Lw}$

由表2可见，一批轴承n套，所有精度全部磨耗失效，其批量工作量A约为$4n\sigma_{Lw}$；工作到精度的平均寿命$4\sigma_{Lw}$时，失效率为50%，轴承工作量约为$3.6012n\sigma_{Lw}$，工作量利用率达到90%；工作到$2\sigma_{Lw}$时，失效率为2.28%，轴承工作量约为$1.9916n\sigma_{Lw}$，工作量利用率达到50%；可见，轴承精度的工作能力在轴承的前期，精度失效达到50%以上时，余下的工作能力可用性不高。精度寿命的均方差σ_{Lw}可以运用里程L_{wi}内统计的失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$查正态分布积分表，此失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$下的横坐标区间包含多少个σ，σ_{Lw}即为里程L_{wi}除以σ的数量k，即用式(9)计算。

$$\sigma_{Lw}=L_{wi}/k \tag{9}$$

式中：k—运用里程L_{wi}内统计的失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$包含的均方差σ的数量，图解见图9。

一批轴承工作到L_{wi}时，精度寿命失效概率$F_{pi}(0\sim L_{wi})$=5%，可查表在失效概率为5%时，横坐标宽度等于2.355个σ，即L_{wi}相当于$2.355\sigma_{Lw}$，那么运用里程L_{wi}内统计的σ_{Lw}可用式(9)进行计算。

3.2　形貌异常损伤

从2.2节的调查统计中可以得知轴承III在1个C5修时的异常损伤失效达到总体数量的8.6%；其主要失效类型为压痕、磨损、锈蚀。其中压痕多数为轴承挡边冲击磕碰痕迹，与机车车辆蛇行和过道岔有关，蛇行和过道岔的次数与机车车辆运行里程线性相关；锈蚀为轴承表面暴露在空气中腐蚀所引起，与运用里程或暴露时间线性相关。磨损主要为异常的擦伤、黏着磨损，既与运动中零件的歪斜、倾斜有关，也与运用里程线性相关；轴承III存在C4修程下车检测修复的过渡管理时期，运行里程约40×10^4~60×10^4 km，异常损伤失效约占总体数量的4%；采用最小二乘法分析，异常损伤失效概率与运用里程呈线性关系，且轴承III的异常损伤失效梯度ζ为9.2×10^{-8}/km。那么异常损伤失效概率$F_{in}(0\sim[L_w])$可用式(10)计算。

$$F_{in}(0\sim[L_w])=100\zeta[L_w] \tag{10}$$

式中：$[L_w]$— 一批轴承运用的里程，km；$F_{in}(0\sim[L_w])$— 一批轴承运用到里程$[L_w]$时的异常损伤失效概率，%；ζ—异常损伤与运用里程的线性系数，km^{-1}。

ζ是轴承抗异常损伤寿命的特征参数，不同车型、不同运用部位、不同规格、不同制造厂的产品的ζ系数均会不同，需通过调查统计获得。

转向架用轴承一般在C5修程时开箱检查，机车的C5修程一般机车平均运行100×10^4 km，其m个C5修程后失效概率可以用式(11)计算。

$$F_{in}(0\sim m\mathrm{C5})=\zeta m\times10^8 \tag{11}$$

式中：m—第m个C5修程；$F_{in}(0\sim m\mathrm{C5})$— 一批轴承运用到第$m$个C5修程后的失效概率，%。

轴承形貌在运用m个C5修程后的存活率S_{in}用式(12)计算。

$$S_{in}(0\sim m\mathrm{C5})=100-F_{in}(0\sim m\mathrm{C5})=100-\zeta m\times10^8 \tag{12}$$

式中：$S_{in}(0\sim m\mathrm{C5})$—一批轴承运用到第$m$个C5修程后的存活率，%。

轴承III运用m个C5修程后，异常损伤后的存活率呈现“楼梯状”下降趋势，见图11。

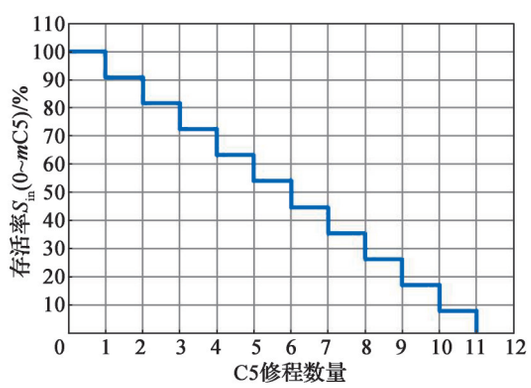


图11　轴承形貌异常损伤存活率在各修程后的变化曲线

Fig. 11　Variation curve of survival rate associated to bearing abnormal damage in morphology after repair at different classes

一批n套轴承运用到第m个C5修程时的工作量A_{in}可以用式(13)计算。

$$A_{in-m}=n\sum_{i=1}^{m}\left[1-\xi(i-1)\times10^6\right] \tag{13}$$

式中：A_{in-m}— 一批n套轴承运用到第m个C5修程时的工作量，单位为C5修程。

式(13)也可化简为式(14)计算。

$$A_{in-m}=nm[1+(\xi/2-\xi m/2)\times10^6] \tag{14}$$

修程数m是1以上的正整数，最大值m_{max}是$1/(10^6\zeta)$的整数部分，轴承III的m_{max}为11，那么一批n套轴承III，各修程后的总工作量A_{in}见表3。

从表3可以看出，轴承III在工作到全部异常损伤

表3 轴承III批量抗异常损伤寿命工作量A_{in}

Table 3 Workload A_{in} of bearing III applied in batch in abnormal damage resistance life

工作区间(0~L_{wi})	失效率F_{in}	总工作量A_{in}
0~1C5修程	9.2%	1nC5
0~2C5修程	18.4%	1.908nC5
0~3C5修程	27.6%	2.724nC5
0~4C5修程	36.8%	3.448nC5
⋮	⋮	⋮
0~11C5修程	100%	5.94nC5

时，其批量全部工作量A_{in-11}约为5.94个nC5修程；运用到2个C5修程后轴承批量工作量A_{in-2}约为1.908nC5修程；运用到3个C5修程后轴承批量工作量A_{in-3}约为2.724nC5修程；运用到4个C5修程后批量工作量A_{in-4}约为3.448nC5修程。批量轴承III在工作到m个C5修程后，抗异常损伤寿命的剩余寿命工作量等于(5.94−A_{in-m}) nC5，剩余工作量是非常明显的。

4 结论与建议

从前面的分析可以看出，机车车辆用轴承精度的存活率呈现“山脊悬崖”的衰变退化规律；表面抗异常损伤存活率呈现“楼梯状”线性衰变退化的规律；在文献[1]中机车车辆用轴承的疲劳存活率呈现“滑梯状”线性衰变退化的规律。

机车车辆不同部位用轴承的精度损失及异常损伤寿命规律相似，但其特征参数有较大差异。

4.1 结论

通过对滚动轴承III精度寿命、抗异常损伤的失效概率的计算，可以对轴承从运用到各阶段运用的寿命、工作量A及失效概率进行评估：轴承精度在有50%失效时，其精度寿命利用率已达90%；抗异常损伤下轴承呈“楼梯状”不断失效，轴承III工作2个C5修程后仅运用18.4%的轴承批量抗异常损伤寿命，其剩余寿命仍有81.6%的可利用率。

上述精度寿命、抗异常损伤寿命及文献[1]中的疲劳寿命的失效概率是分别统计的，任一轴承的总失效概率是各要素失效概率之和。

4.2 建议

铁路机车车辆轴承在运用安全与成本上应进行认真的评估，不应以巨大的成本浪费来提高铁路车辆的运行安全性，实际并未达到理想的效果。把握好轴承的运用寿命规律(疲劳、精度、抗异常损伤等)、制定科学的铁路机车车辆轴承报废准则，铁路用户可以既节约成本又不增加运用风险，是完全可行的。

参考文献：

[1] 张宗峰, 章建良, 周晴, 等. 铁路机车车辆滚动轴承剩余寿命的研究[J]. 机车电传动, 2019(1): 134-136.
ZHANG Zongfeng, ZHANG Jianliang, ZHOU Qing, et al. Residual life of rolling bearings for railway locomotives and rolling stock[J]. Electric drive for locomotives, 2019(1): 134-136.

[2] 苗学问, 王大伟, 洪杰. 滚动轴承寿命理论的发展[J]. 轴承, 2008(3): 47-52.
MIAO Xuewen, WANG Dawei, HONG Jie. Progress of life theory of rolling bearings[J]. Bearing, 2008(3): 47-52.

[3] 李兴林, 刘泽九, 张燕辽, 等. 国外滚动轴承疲劳寿命试验的现状及其发展趋势[J]. 轴承, 1995(12): 30-39.
LI Xinglin, LIU Zejiu, ZHANG Yanliao, et al. Current status and development trends of fatigue life testing for rolling bearings abroad[J]. Bearing, 1995(12): 30-39.

[4] 朱亮亮, 高瞩, 吉晓民. 基于多重因素的滚动轴承寿命计算新方法[J]. 机械与电子, 2015(11): 12-16.
ZHU Liangliang, GAO Zhu, JI Xiaomin. A new method of calculating the rolling bearing life based on the effect of multiple factors[J]. Machinery & electronics, 2015(11): 12-16.

[5] 杨晓蔚, 赵韩, 金银木. Tallian轴承寿命理论解读[J]. 轴承, 2002(8): 1-3.
YANG Xiaowei, ZHAO Han, JIN Yinmu. Understanding of Tallian's bearing life theory[J]. Bearing, 2002(8): 1-3.

[6] 孟祥雨. 铁路货车轴承的寿命与检修[J]. 铁道车辆, 1990(5): 56-61.
MENG Xiangyu. Service life and maintenance of railway freight car bearings[J]. Rolling stock, 1990(5): 56-61.

[7] 许艳雷, 邱明, 李军星, 等. 基于SKF-KF-Bayes的滚动轴承剩余使用寿命预测方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(19): 26-31.
XU Yanlei, QIU Ming, LI Junxing, et al. Remaining useful life prediction method of rolling bearing based on SKF-KF-Bayes[J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(19): 26-31.

[8] 王晓青, 夏水华. 滚动轴承失效影响因素与影响机制[J]. 轴承, 2010(11): 18-22.
WANG Xiaoqing, XIA Shuihua. Influencing factors and mechanism on early failure of rolling bearings[J]. Bearing, 2010(11): 18-22.

[9] 温世湖. HXD3型机车轴箱轴承电腐蚀故障原因分析与预防措施[J]. 铁道机车与动车, 2015(6): 39-42.
WEN Shihu. Failure cause analysis and preventive measures of electric corrosion in HXD3 locomotive axle box bearing [J]. Railway locomotive and motor car, 2015(6): 39-42.

收稿日期：2023-04-04
修回日期：2023-10-22