

# 汽车轮毂轴承威布尔分布的寿命预估软件开发及应用

王国辉<sup>1</sup>,雷良育<sup>1,2</sup>,胡峰<sup>1</sup>,孙崇昆<sup>1</sup>,荆家宝<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学 工程学院,浙江 杭州 311300;  
2. 浙江兆丰机电股份有限公司,浙江 杭州 311232)

**摘要:**针对威布尔分布参数计算的繁琐问题,同时为了方便地对汽车轮毂轴承寿命进行准确预估,利用 JAVA 等相关软件开发了威布尔分布应用程序;利用某公司研制的轮毂轴承模拟试验机,对合格的轮毂轴承成品进行数据采集,运用开发的应用程序圆满地解决了威布尔分布理论在计算中遇到很大困难的问题;为了验证应用程序的准确性,对同样的轮毂轴承进行了 ADAMS 动力学仿真对比,结果表明开发的威布尔应用程序预估数值非常可靠。

**关键词:**轮毂轴承;威布尔分布;软件开发;对比分析

**中图分类号:**TH133.33;TP319 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5322(2020)01-0013-08

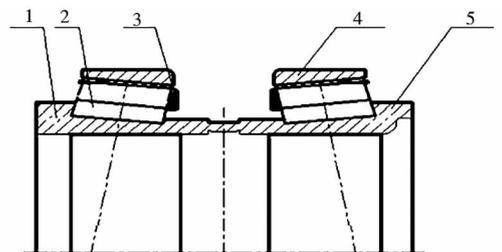
威布尔分布经常被应用于航空航天、高铁、水利等领域的产品寿命评估中,大多数研究者都在用威布尔分布研究航空和铁路领域的产品,比如江海波等<sup>[1]</sup>将两参数威布尔分布理论应用在铁路钢筋混凝土梁的寿命可靠度分析中,得出疲劳抗剪寿命的可靠性概率;何晓聪<sup>[2]</sup>将威布尔分布理论应用在齿轮减速器中,推出了二级直齿圆柱齿轮减速器寿命的可靠性模型;袁成荣等<sup>[3]</sup>用威布尔分布理论描述齿轮接触面的强度,研究出相应的计算公式,改进了齿轮的可靠性设计。而在汽车领域威布尔分布的研究经常被大多数研究者所忽视。由于我国是个汽车使用大国,汽车轮毂轴承在工作中承受较大的载荷,急需威布尔分布理论研究汽车轮毂轴承的寿命和可靠性。

由于威布尔分布理论在实际计算中遇到相当大的困难,从而限制了它的推广与应用。本文在前人研究成果的基础上,将威布尔分布的相关计算融入软件,并依据某公司研制的轮毂轴承模拟试验机采集的数据进行验证,为汽车轮毂轴承的威布尔分布可靠性研究提供实际参考价值。

## 1 汽车轮毂轴承结构

汽车轮毂轴承单元一般是由双列圆锥滚子轴

承构成,其主要优点有:预调整精确度高,可以降低初始装配和保养时易受污染的风险;密封装置可以集成,从而使车轮零部件数目减少,为降低成本创造更多的可能。汽车轮毂轴承结构如图 1 所示,真实三维图如图 2 所示。



1—内圈 B;2—滚子;3—保持架;4—外圈;5—内圈 A

图 1 重卡轮毂轴承结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of heavy truck hub bearing structure



图 2 汽车轮毂轴承

Fig 2 Automotive wheel bearing

收稿日期:2019-07-17

基金项目:浙江省科技计划项目(2014Y1043)。

作者简介:王国辉(1993—),男,安徽天长人,硕士生,主要研究方向为智能检测与控制技术。

## 2 威布尔分布软件开发

由于威布尔分布参数估计需要求解超越方程组,计算过程比较繁琐,而且还容易出错,为解决此问题,本文基于威布尔分布的概率纸,将威布尔

分布参数估计方法编制成通用的应用程序,用程序设计的方法解决威布尔分布参数估计计算的繁琐问题。威布尔分布参数概率纸示意图如图 3 所示。

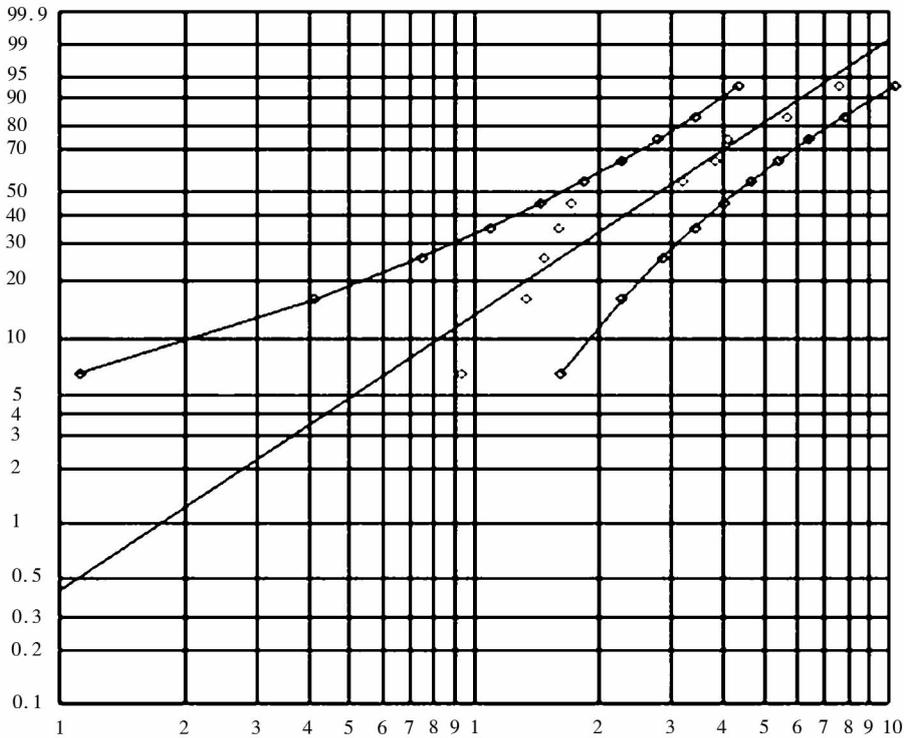


图 3 威布尔分布概率纸

Fig 3 Probability paper of Weibull distribution

### 2.1 三参数威布尔分布的可靠性寿命模型

由于汽车轮毂轴承实际运行工况比较复杂,如果在开发轴承可靠度威布尔应用程序时,运用二参数威布尔分析肯定会存在相应的偏差,而三参数威布尔分布则具有更好的拟合性,因此采用三参数威布尔分布来分析汽车轮毂轴承寿命失效模型。

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-r}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: $t$ 为失效时间; $s$ ; $\beta$ 为形状参数; $\eta$ 为尺度参数; $r$ 为位置参数。

三参数威布尔分布中形状参数是 $\beta$ 最重要的一个参数,其取值大小直接决定威布尔分布曲线的形状,从而影响最后分析的准确性<sup>[4]</sup>。根据威布尔分布理论模型,建立汽车轮毂轴承威布尔应用程序开发的系统框图,如图 4 所示。

三参数威布尔分布模型为<sup>[4]</sup>:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

三参数威布尔分布的概率密度函数为:

$$f(t) = F'(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-r}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

三参数威布尔分布的可靠度函数为:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

三参数威布尔分布的失效率函数为:

### 2.2 威布尔分布应用程序开发

由于 JavaScript 语言用于应用程序的开发,不需要相关的深层次的理论基础,因此本文威布尔分布应用程序的开发选用 JavaScript 语言进行相关开发,开发界面包括威布尔分布的相关功能和其他统计数据表的相关功能。现将该应用软件的主界面代码描述如下:

```
$(function() {
```

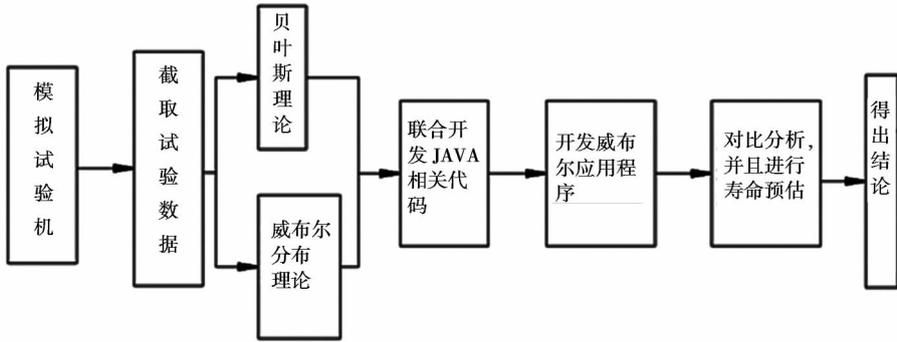


图 4 汽车轮毂轴承威布尔应用程序开发的系统框图

Fig 4 System block diagram of Weibull application program development for automobile hub bearing

```

    $( ':box1 . btn' ). click( function() {
    if( $( this ). index() < 3 ) {
    $( ':box1' ). css( 'display', 'none' );
    $( ':box' + ( $( this ). index() + 2 ) ). css( '
display', 'block' );
    } else if( $( this ). index() == 3 ) {
    $( ':box' + ( $( this ). index() + 2 ) ). css( '
display', 'block' );
    } else {
    close();
    }
    });
    // console. log( $( ':last' )
    $( '#lbtn' ). click( function() {
    $( ':box2' ). css( 'display', 'none' );
    $( ':box1' ). css( 'display', 'block' );
    });
    $( '#lbtn2' ). click( function() {
    $( ':box3' ). css( 'display', 'none' );
    $( ':box1' ). css( 'display', 'block' );
    });
    $( '#lbtn3' ). click( function() {
    $( ':box4' ). css( 'display', 'none' );
    $( ':box1' ). css( 'display', 'block' );
    });
    $( '#lbtn4' ). click( function() {
    $( ':box5' ). css( 'display', 'none' );
    });
    })
    .....
    * {
    margin: 0;
    padding: 0;
    }
    }
    . container {
    width: 600px;
    height: 500px;
    margin: 20px auto;
    position: relative;
    }
    div {
    width: 600px;
    height: 500px;
    }
    . box1 {
    width: 486px;
    height: 435px;
    background: url(../img/1. png);
    position: relative;
    }
    . box1 p {
    position: absolute;
    top: 143px;
    left: 88px;
    }
    input {
    width: 273px;
    height: 41px;
    background: url(../img/b2. png);
    margin - bottom: 15px;
    border: 0;
    box - sizing: border - box;
    }
    . box1 p > input: nth - child(2) {
    background: url(../img/b1. png);
    }
  
```

```
. box1 p > input : nth - child ( 3 ) {
background : url ( . . / img / b3 . png ) ;
}
. box1 p > input : nth - child ( 4 ) {
background : url ( . . / img / b4 . png ) ;
}
. box1 p > input : nth - child ( 5 ) {
background : url ( . . / img / b5 . png ) ;
}
. . . . .
. box4 {
width : 503px ;
height : 386px ;
background : url ( . . / img / 4 . png ) ;
position : relative ;
display : none ;
```

```
}
. box4 p > input : nth - child ( 1 ) {
background : url ( . . / img / 3b1 . png ) ;
}
. box4 p > input : nth - child ( 2 ) {
background : url ( . . / img / 3b2 . png ) ;
}
. box4 p > input : nth - child ( 3 ) {
background : url ( . . / img / 3b3 . png ) ;
}
. box4 p > input : nth - child ( 4 ) {
background : url ( . . /
. . . . .
```

### 2.3 威布尔应用程序开发主界面

由威布尔分布参数估计程序的主界面代码得到该应用程序的主界面,如图 5 所示。

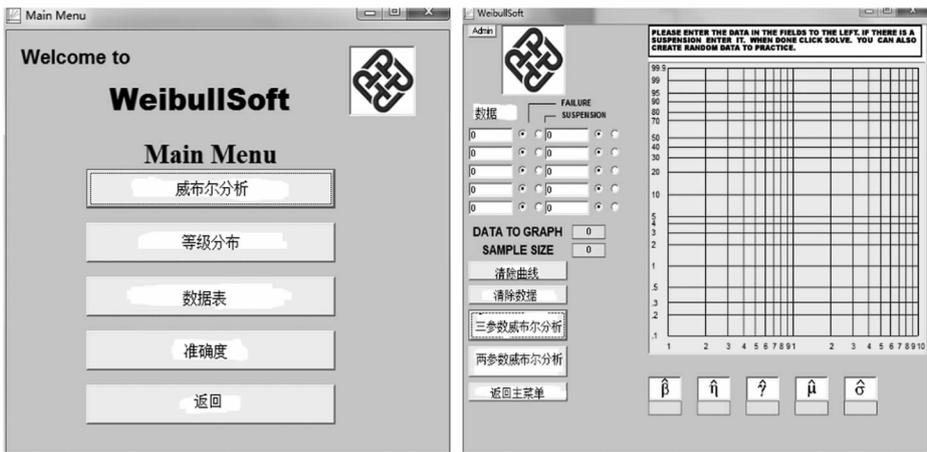


图 5 威布尔分布参数估计应用程序主界面

Fig 5 Main interface of Weibull distribution parameter estimation application

为了分析根据威布尔分布应用程序得到汽车轮毂轴承预估寿命的可靠度,本文设计了 Excel 编辑器,如表 1 所示。将威布尔分布应用程序得到的轮毂轴承特征寿命、威布尔斜率等一系列参数输入 Excel 编辑器,即可得到威布尔分布应用程序预估汽车轮毂轴承使用寿命的可靠度。

## 3 软件的实际应用分析

### 3.1 评定规则

根据滚动轴承寿命与可靠性试验及评定规定 (GB/T 24607—2009)<sup>[5]</sup>,滚动轴承可靠性试验的轴承总套数不低于 6 套,其数据处理一般采用图估计和参数估计的方法,试验合格的评定标准为:

表 1 疲劳寿命试验可靠度自动计算结果表  
Table 1 Table of automatic calculation results of fatigue life test reliability

变量或步骤	表达式	数值
特征寿命 $v/h$		252
Weibull 斜率 $b$		0.738
基本额定寿命值 $L_{10h}/h$		133
基本额定寿命试验值 $L_{10t}/h$		12.9
自然常数 $e$		2.71828
中值额定寿命试验值 $L_{50t}/h$		198.9
过度计算 1	$L_{10h}/v$	0.527777778
过度计算 2	$-\left(\frac{L_{10h}}{v}\right)^b$	-0.623977474
可靠度 $Re/\%$	$e^{-\left(\frac{L_{10h}}{v}\right)^b}$	53.58092518

注:斜率及特征寿命参考威布尔软件计算

汽车轮毂轴承可靠性试验验证结果达到 R95/C90 (可靠性 95%/置信度 90%),即达到质保 50 万 km 的要求; $L_{10r}/L_{10h} \geq Z'$ ,其中球轴承  $Z' = 1.4$ ,滚子轴承及调心球轴承  $Z' = 1.2$ (计算时基本额定寿命试验值  $L_{10r}$ 、可靠度  $Re$  一般精确到小数点后两位)。

### 3.2 汽车轮毂轴承疲劳寿命试验的可靠性验证

#### 3.2.1 汽车轮毂轴承试验机

汽车轮毂轴承疲劳寿命试验采用某公司先进的汽车轮毂轴承试验机进行,试验机如图 6 所示。该试验机采用德国先进的技术,并将最新研究的载荷谱应用其中,使得汽车模拟试验贴近真实的运行环境<sup>[6]</sup>。试验时各主要参数设定如表 2 所示,采集出来的数据使用定时截尾的方法进行威布尔分布的评估。



图 6 试验机  
Fig 6 Test machine

表 2 疲劳寿命试验参数

Table 2 Fatigue life test parameters

产品类型	步数	载荷/N		运行时间/s	试验周期/h	转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$
		径向载荷 $Fr$	轴向载荷 $Fa$				
锥类	预运转	2 880	2 880	7 200	--	1 200	18 ~ 30
	1	7 615	0	20	80 ~ 100	1200	18 ~ 30
	2	7 615	4 570	30			
	3	7 615	0	20			
	4	7 615	-1 730	30			

#### 3.2.2 试验数据的采集和处理

在检验合格的汽车轮毂轴承中随机抽取样品 8 ~ 20 套(另备 5 ~ 10 套为作备用样品)进行疲劳寿命测试。测试时设置轮毂轴承工作转速为 800 r/min,滚动半径为 536 mm,样品在径向力  $Fr =$

36.67 kN、轴向力  $Fa = 9.17$  kN 的固定交变载荷作用下,连续运行 100 h(1 个寿命周期)无失效,继续运行 5 个寿命周期止,截取的试验数据如表 3 所示。

表 3 试验数据

Table 3 Test results

编号	截尾试验时间/h	失效形式	试验轴承重量/kg		游隙/mm		最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
			前	后	前	后		
140-1	85	无	4.779 1	4.777 8	0.175	0.175	89.3	71.5
140-2	88	无	4.734 1	4.732 9	0.160	0.162	96.9	75.3
140-3	89	无	4.755 1	4.753 3	0.162	0.162	90.6	74.1
140-4	90	无	4.768 1	4.766 6	0.173	0.173	95.4	72.4
140-5	95	无	4.744 1	4.742 7	0.166	0.166	92.3	73.6
140-6	98	无	4.734 1	4.732 9	0.160	0.162	94.9	75.3

#### 3.2.3 试验结果分析

将表 3 中最高温度栏的数据输入威布尔应用程序 DATA 栏中,得到图 7 所示的运行结果;将运行结果中中值额定寿命试验值 93.5 和  $b = \hat{\beta} = 32.531$  键入设计好的 Excel 计算工具中,得到可

靠度计算结果如表 4 所示。由表 4 可知,汽车轮毂轴承疲劳寿命试验的的可靠度为 99.99861736%,根据可靠性验证标准,该批试验的轴承完全达到质保 50 万 km 的要求;同时, $L_{10r}/L_{10h} \geq 1.2$ ,完全符合滚子轴承的可靠性评估要求。

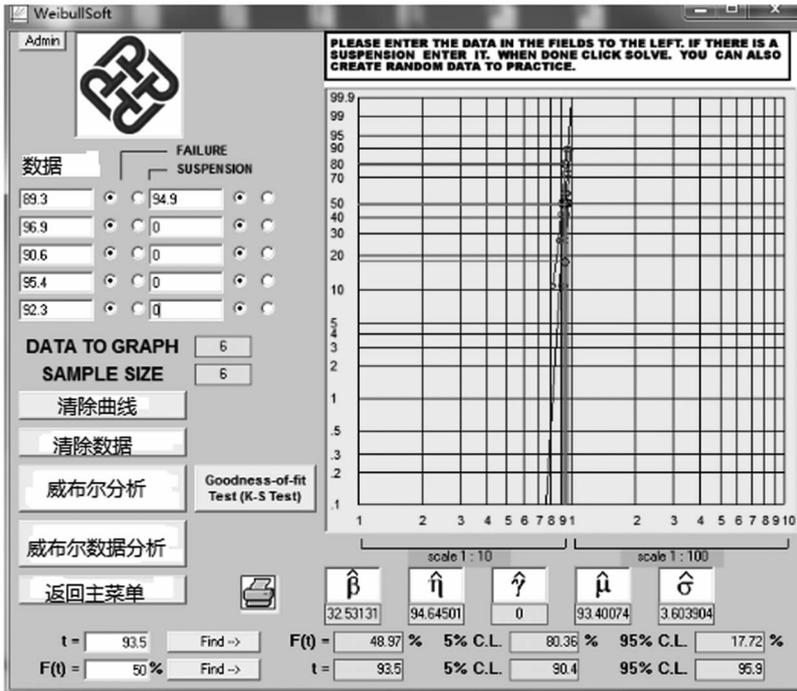


图 7 疲劳寿命可靠性试验验证

Fig 7 Fatigue life reliability test verification

表 4 疲劳寿命试验可靠度自动计算结果表

Table 4 Table of automatic calculation results of fatigue life test reliability

变量或步骤	表达式	数值
特征寿命 $v/h$		94.64501
Weibull 斜率 $b$		32.53131
基本额定寿命值 $L_{10h}/h$		66.56
基本额定寿命试验值 $L_{10t}/h$		80.589
自然常数 $e$		2.71828
中值额定寿命试验值 $L_{50t}/h$		93.5
过度计算 1	$L_{10h}/v$	0.708966941
过度计算 2	$-\left(\frac{L_{10h}}{v}\right)^b$	-1.38266E-05
可靠度 $Re/\%$	$e^{-\left(\frac{L_{10h}}{v}\right)^b}$	99.99861736

注:斜率及特征寿命参考威布尔软件计算

### 4 动力学对比分析

为了验证上述应用程序分析结果的准确性,对该轮毂轴承进行 ADAMS 动力学对比分析,利用 ADAMS 二次开发软件对该轮毂轴承单元进行动力学模拟试验仿真,具体仿真参数的设置与上述疲劳寿命的参数一致,以保证对比结论的可靠性。具体仿真过程如图 8 所示,轴承、外滚道受力仿真如图 9~图 12 所示,振动仿真如图 13 所示,

寿命仿真如图 14 所示。

由上述 ADAMS 的仿真结果看,轴承、外滚道的受力都符合 GB/T 24607—2009 的要求,仿真寿命为 54 万 km,达到相应的 50 万 km 的标准,仿真结果真实地说明了威布尔应用程序预估数值的可靠性。



图中数字单位:N

图 8 动力学仿真分析过程

Fig 8 Dynamic simulation analysis process

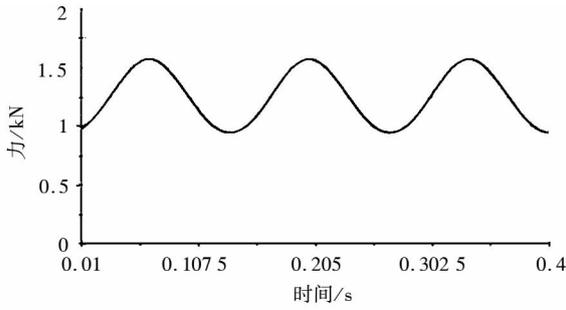


图 9 轴承左侧相互作用力

Fig 9 Interaction on the left side of the bearing

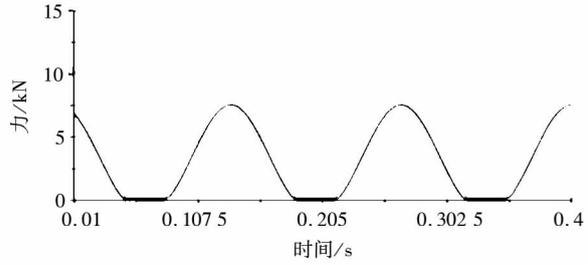


图 10 轴承右侧相互作用力

Fig 10 Interaction on the right side of the bearing

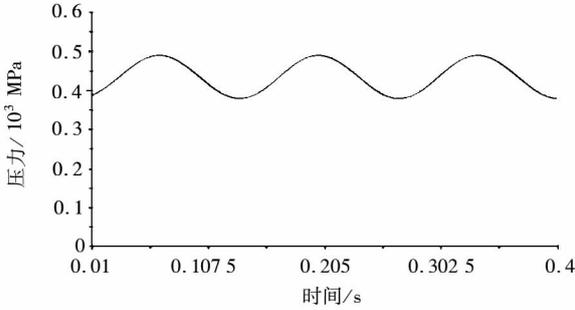


图 11 外滚道左侧接触压力

Fig 11 Left contact pressure of outer raceway

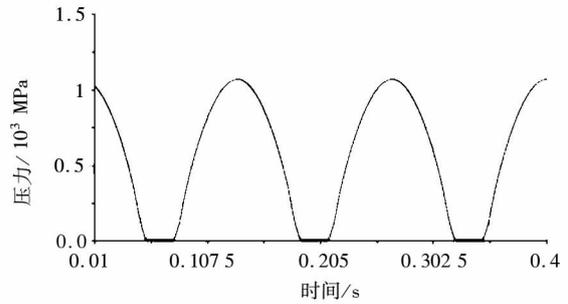


图 12 外滚道右侧接触压力

Fig 12 Right contact pressure of outer raceway

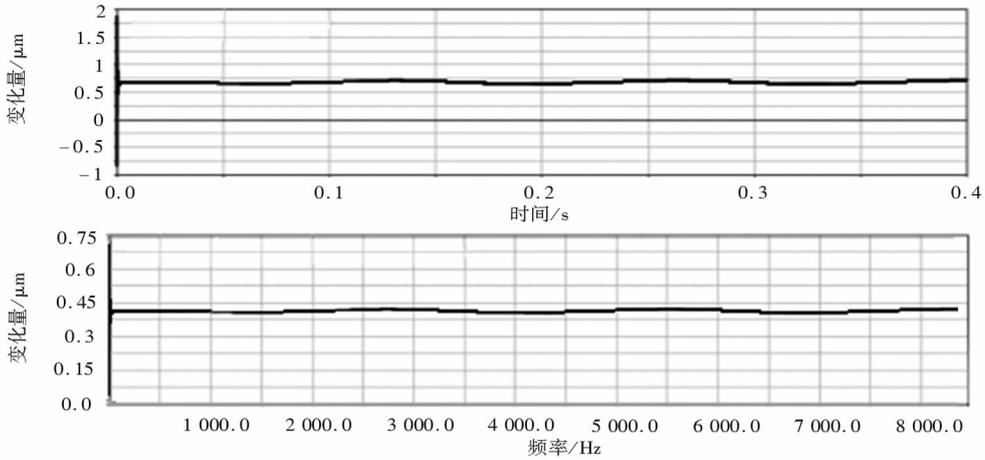


图 13 振动曲线

Fig 13 Vibration curve

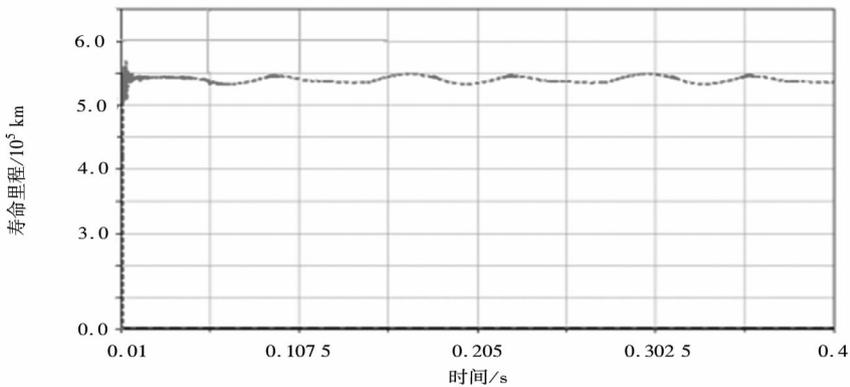


图 14 轴承寿命仿真图

Fig 14 General bearing life map

## 5 结束语

依据某公司研制的轮毂轴承模拟试验机,对合格的轮毂轴承成品进行数据采集,运用本文描述的威布尔应用软件,圆满地解决了威布尔分布

理论在计算中遇到很大困难的问题。为了验证应用程序的准确性,对同样的轮毂轴承进行了 ADAMS 动力学仿真对比,结果表明本文的威布尔应用程序预估数值非常可靠,从而为汽车轮毂轴承的威布尔分布可靠性试验提供重大参考价值。

## 参考文献:

- [1] 姜海波,满洪高. 基于两参数威布尔分布的铁路钢筋混凝土梁疲劳抗剪寿命可靠度[J]. 石家庄铁道学院学报,1997,10(3):68-72.
- [2] 何晓聪. 威布尔分布在齿轮减速器可靠性建模中的应用[J]. 昆明工学院学报,1995,20(5):38-43.
- [3] 袁成荣,王立杰,缙斌丽. 齿轮强度可靠性设计的一种新方法[J]. 机械设计与制造,1999,4(2):1-3.
- [4] 刘腾腾. 轴承寿命预测及其可靠性分析研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2009.
- [5] 全国滚动轴承标准化技术委员会. 滚动轴承寿命与可靠性试验及评定规定:GB/T 24607—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [6] 王国辉,雷良育,荆家宝,等. 重型卡车轮毂轴承模拟测控系统的设计[J]. 装备机械,2019(1):14-19.

# Development and Application of Life Prediction Software for Weibull Distribution of Automotive Wheel Bearings

WANG Guohui<sup>1</sup>, LEI Liangyu<sup>1,2</sup>, HU Feng<sup>1</sup>, SUN Chongkun<sup>1</sup>, JING Jiabao<sup>1</sup>

(1. School of Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou Zhejiang 311300, China;  
2. Zhejiang Zhaofeng Mechanical and Electronic Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311232, China)

**Abstract:** Aiming at the tedious calculation of Weibull distribution parameters, and in order to estimate the life of automobile hub bearing conveniently, the application program of Weibull distribution is developed by using Java and other related software. By using the wheel bearing simulation test machine developed by a company, the data of qualified wheel bearing finished products are collected, and the application program successfully solves the difficult problem in the calculation of Weibull distribution theory. In order to verify the accuracy of the application, ADAMS dynamics simulation comparisons were performed on the same hub bearing. The results show that the estimation of Weibull application is very reliable.

**Keywords:** hub bearing; Weibull distribution; software development; omparative analysis

(责任编辑:李华云)