DOI：10.19416/j.cnki.1674－9804.2022.02.019

滚动轴承平均故障前时间计算方法研究

火建卫[1]*　朱星宏[2,3]　耿小亮[2]

（1. 航空工业第一飞机设计研究院,西安 710089；2. 西北工业大学,西安 710021；3. 西安交通大学,西安 710048）

摘　要：滚动轴承的平均故障前时间（MTTF）和平均失效率是旋转类机械设备可靠性预计和分析的重要基础数据,传统源于统计样本信息的滚动轴承 MTTF 和失效率数据可信度不高,难以约束滚动轴承的可靠性定量设计。为得到可信度更高的滚动轴承 MTTF,利用滚动轴承疲劳寿命计算方法,基于滚动轴承寿命与可靠度的关系研究,推导了威布尔分布的 MTTF 和平均失效率计算公式,提出一种滚动轴承 MTTF 和平均失效率的计算方法和流程,给出了滚动轴承 MTTF 和平均失效率的计算示例。解决了利用设计参数（工作寿命、可靠度、动载荷等）计算滚动轴承 MTTF 和平均失效率的问题,可为滚动轴承及其配套产品的可靠性预计和分析提供数据和方法支持。

关键词：滚动轴承;可靠性;平均故障前时间;平均失效率;疲劳寿命;威布尔分布

中图分类号：O213.2　　**文献标识码**：A　　**OSID**：

0　引言

滚动轴承（滚珠轴承和滚子轴承）作为核心部件用于各种旋转类机械当中。目前,滚动轴承已经标准化、系列化和专业化。滚动轴承的常规设计就是可靠性设计,按照标准规定的方法进行特定可靠度的额定寿命或更高可靠度的修正寿命计算或校核,是滚动轴承设计中的必经步骤[1]。滚动轴承可靠寿命的计算分析方法成熟,在机械或轴承设计手册等资料中有详细的方法及计算参数,能够支持旋转类机械设备的寿命设计。滚动轴承在工程中一般作为不可修产品,滚动轴承的平均故障前时间（Mean Time to Failure,简称 MTTF）和失效率是其所配套机械设备可靠性预计的基础数据。目前,滚动轴承的失效率数据主要来源于可获得的统计数据信息（如:NPRD-95《非电子零件可靠性数据》[2]）,或利用滚动轴承的失效率模型[3-4]计算得到,考虑载荷、润滑、使用环境、装配误差等因素修正得到工作失效率,滚动轴承失效率模型属于相似产品法,其准确性依赖于所统计基准产品可靠性数据信息的准确度,以及数据修正的合理性。当目标产品和基准产品的相似程度低,基于可靠性影响因素对比分析的数据修正不合理时,利用滚动轴承的统计失效率数据或失效率模型所得失效率的误差大。目前工程中使用的滚动轴承失效率数据和失效率模型,没有充分利用滚动轴承的可靠寿命信息和威布尔（Weibull）分布的特征信息。本文利用滚动轴承寿命与可靠度的关系,以及 Weibull 分布的特征信息,研究给出了一种滚动轴承平均故障前时间和平均失效率的计算方法,可为机械设备可靠性预计提供数据支持。

1　滚动轴承的寿命与可靠度

1.1 滚动轴承寿命与可靠度的关系

已有数据表明,滚动轴承的疲劳寿命 t 服从 Weibull 分布,分布函数如式(1)所示：

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\theta)^{\beta}} \tag{1}$$

式中,t 为滚动轴承的寿命;θ 为尺度参数;β 为形状参数。

基金项目：航空科学基金(20170153001)

＊ **通信作者**. E-mail：huojianwei@yeah.net

引用格式：火建卫,朱星宏,耿小亮. 滚动轴承平均故障前时间计算方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(2):121-125.
HUO J W, ZHU X H, GENG X L. Calculation method for mean time to failure of rolling bearings[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(2):121-125(in Chinese).

由 $R(t)=1-F(t)$,可得与 t 对应的可靠度为:

$$R(t)=e^{-(t/\theta)^{\beta}} \tag{2}$$

式(2)可改写为:

$$t=\theta[-\ln R(t)]^{\frac{1}{\beta}} \tag{3}$$

当 $R(t)=0.90$,即失效率为 10% 时,将轴承的寿命记为 L_{10},由公式(3)可得:

$$L_{10}=\theta[-\ln 0.9]^{\frac{1}{\beta}} \tag{4}$$

由式(3)除以式(4),整理可得:

$$t_R=L_{10}\left[\frac{\ln R(t)}{\ln 0.9}\right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{5}$$

式中,t_R 表示可靠度 $R(t)$时的寿命。不同轴承的形状参数有所不同:球轴承 $\beta=10/9$;滚子轴承 $\beta=3/2$;圆锥滚子轴承 $\beta=4/3$[5]。形状参数 β 也可取利用滚动轴承寿命试验或使用数据得到的估计值,或轴承手册等资料给出的经验数值。

为了考虑不同可靠度对轴承寿命的影响和便于计算,将式(5)简化为:

$$t_R=\alpha L_{10} \tag{6}$$

式中,α 为滚动轴承寿命可靠性系数。

$$\alpha=\left[\frac{\ln R(t)}{\ln 0.9}\right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{7}$$

工程实际上遇到的问题,通常是根据所需寿命确定其所对应的额定寿命 L_{10},然后再选用合适的轴承。再从轴承手册或目录中选择其额定寿命值大于由公式(6)式确定的 L_{10}值即可。由式(6)可得:

$$L_{10}=\frac{t_R}{\alpha} \tag{8}$$

1.2 滚动轴承疲劳寿命

在一般条件下,正常工作的轴承的主要失效模式为疲劳点蚀。因此,疲劳寿命是滚动轴承的重要参数[6]。同时,滚动轴承的疲劳寿命和其动载荷相互关联,其之间的关系为[7]:

$$L_{10}=\left(\frac{C}{P}\right)^{\varepsilon} \tag{9}$$

式中,L_{10}表示可靠度为 90% 的基本额定寿命(10^6r);C 为滚动轴承的基本额定动载荷(N);

P 为滚动轴承承受的当量动载荷(N);ε 为疲劳寿命指数,对球轴承:$\varepsilon=3$,对滚子轴承:$\varepsilon=10/3$。

对于转速恒定的滚动轴承,可用工作小时数来表示:

$$L_{10h}=\frac{10^6}{60n}\left(\frac{C}{P}\right)^{\varepsilon} \tag{10}$$

式中,L_{10h} 表示可靠度为 90% 的基本额定寿命(h);n 为轴承内、外圈的相对转速(r/min);考虑各种因素影响,对公式(9)进行修正可得:

$$L_S=\alpha_1\cdot\alpha_2\cdot\alpha_3\left(\frac{C}{P}\right)^{\varepsilon} \tag{11}$$

式中,L_S 表示可靠度为(100-S)% 的修正基本额定寿命(10^6r);α_1 为寿命可靠性系数,可用公式(7)计算得到;α_2 为材料系数;$\alpha_2=1$ 表示普通冶炼的轴承钢;$\alpha_2=3$ 表示真空脱气轴承钢;$\alpha_2=5$ 表示真空熔炼轴承钢;α_3 为使用条件系数,或称润滑状态系数,一般工作条件取 $\alpha_3=1$,也可按照滚动轴承手册的数据取值。

2 Weibull 分布

2.1 Weibull 分布的概率函数

Weibull 分布是根据薄弱环节思想提出的一种分布形式,并通过改变形状参数描述不同的失效类型[8]。Weibull 分布可分为三参数和两参数两种形式。三参数 Weibull 分布的概率密度函数为:

$$f(t)=\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1}e^{-(\frac{t-\gamma}{\theta})^{\beta}} \tag{12}$$

可记为,$t\sim W(\beta,\theta,\gamma)$,$t\geqslant\gamma$,$\beta>0$,$\theta>0$。其中,$\beta$、$\theta$、$\gamma$ 分别为形状参数、尺度参数、位置参数,取值范围为$(0,\infty)$。参数 θ 也称为特征寿命,单位为时间。三参数 Weibull 分布的分布函数为:

$$F(t)=1-\exp\left[\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta}\right] \tag{13}$$

而两参数 Weibull 分布则是位置参数 $\gamma=0$ 时的特殊情况,记为 $t\sim W(\beta,\theta)$。其概率密度函数为:

$$f(t)=\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}e^{-(t/\theta)^{\beta}}$$

两参数 Weibull 分布的分布函数为:

$$F(t)=1-e^{-(t/\theta)^{\beta}} \tag{14}$$

两参数 Weibull 分布的可靠度函数为:

$$R(t)=e^{-(t/\theta)^{\beta}} \tag{15}$$

三参数 Weibull 分布的瞬时失效率函数为:

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} \tag{16}$$

两参数 Weibull 分布的瞬时失效率函数为:

$$\lambda(t)=\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \tag{17}$$

对于服从三参数 Weibull 分布,工作到时间 T 的产品,在区间$[0,T]$的平均故障率计算公式的推导如下:

$$\bar{\lambda}(T)=\frac{1}{T}\int_0^T\lambda(t)dt$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^{\gamma} 0dt + \frac{1}{T}\int_{\gamma}^{T} \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} dt$$

$$= \frac{1}{T}\frac{\beta}{\theta^{\beta}}\frac{1}{\beta}(t-\gamma)^{\beta}\Big|_{\gamma}^{T}$$

可得三参数 Weibull 分布在区间[0,T]的平均故障率：

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{1}{T\theta^{\beta}}(T-\gamma)^{\beta} \tag{18}$$

取 $\gamma=0$，可得两参数 Weibull 分布在区间[0,T]的平均故障率：

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{1}{\theta^{\beta}}T^{\beta-1} \tag{19}$$

式(19)与文献[9]《航空发动机主轴轴承可靠性评估方法》中的 Weibull 分布的平均故障率计算公式一致。

MTTF 测量方法为：在规定的条件和期间内，产品寿命单位总数与故障产品总数之比[10]。对于连续型概率分布，MTTF 的计算公式如下：

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt$$

将式(12)带入上式，可得：

$$MTTF = \int_0^{\infty} t\frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta}}dt \tag{20}$$

令：

$$y = \left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta}$$

于是：

$$dy = \frac{\beta}{\theta}\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^{\beta-1}dt$$

带入式(20)得到：

$$MTTF = \int_0^{\infty} te^{-y}dy$$

由 $t=\gamma+\theta y^{1/\beta}$，可以得到：

$$MTTF = \int_0^{\infty}(\gamma+\theta y^{1/\beta})e^{-y}dy$$

$$= \int_0^{\infty}\gamma e^{-y}dy + \int_0^{\infty}\theta y^{1/\beta}e^{-y}dy$$

$$MTTF = \gamma + \theta\,\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{21}$$

式(21)中，$\Gamma(x)$为伽玛方程：

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1}e^{-y}dy$$

可在伽马函数表中查询 $\Gamma(x)$的值，对于超出伽马函数表范围的数据，可通过式(22)计算得到：

$$\Gamma(x) = (x-1)\Gamma(x-1) \tag{22}$$

如果为整数，则 $\Gamma(x)=(x-1)$。当公式(21)中的 $\gamma=0$ 时，可得两参数 Weibull 分布 MTTF 的计算公式如下[11]：

$$MTTF = \theta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{23}$$

需要强调的是：本节给出的平均故障率 $\bar{\lambda}(T)$计算公式所对应的时间区间是[0,T]，MTTF 计算公式对应的时间区间是[0,∞]。

3　滚动轴承 MTTF 和 $\bar{\lambda}(T)$计算方法

滚动轴承的 MTTF 和 $\bar{\lambda}(t)$是旋转类机械设备可靠性预计中重要基础数据。利用传统的滚动轴承疲劳寿命计算方法，基于滚动轴承寿命与可靠度的关系，结合 Weibull 分布的 MTTF 和 $\bar{\lambda}(t)$的计算公式推导，研究提出一种滚动轴承 MTTF 和 $\bar{\lambda}(t)$的计

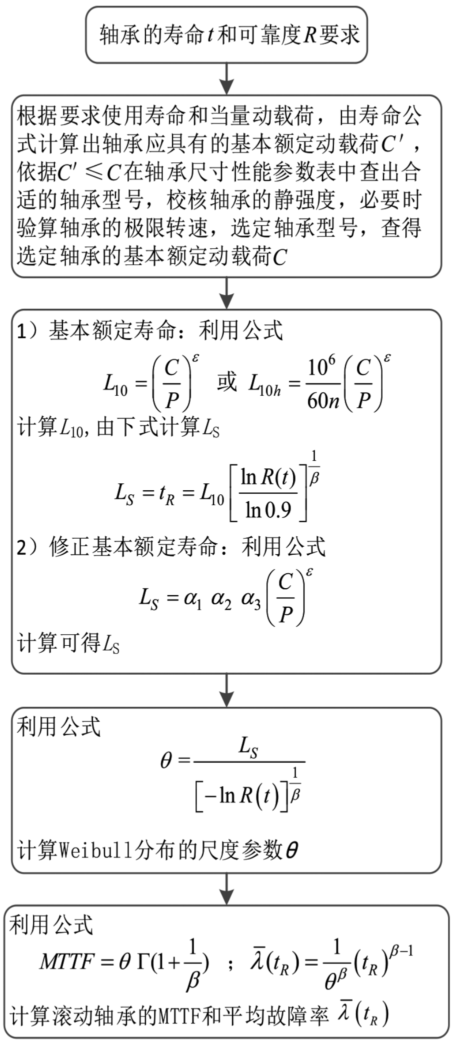

图 1　滚动轴承 MTTF 和 $\bar{\lambda}(t)$计算流程

算方法,具体计算方法的流程如图 1 所示。

4 计算示例

本文以文献[12]所做实验作为依照进行验证,选择一个 6204 系列的单列深沟球轴承,要求在工作转速 n = 10 000 r/min,径向载荷 2 499 N 的工作条件下,计算所选轴承的 MTTF、在工作寿命 20 000 h 内的平均失效率以及工作 1 000 h 时的可靠度。

利用公式(10),计算可得 6204 球轴承可靠度为 90% 时的使用工作寿命为:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \times 10\,000}\left(\frac{9\,800}{2\,499}\right)^3 = 100.5\ \text{h}$$

使用公式(11)进行修正得修正工作寿命为:

$$L_S = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot L_{10h} = 100.5\ \text{h}$$

其中 α_1、α_2、α_3 取基本值 1。

此结果与文献[12]所测得的 650 h 相距甚远,而 α_1 是理论值,所以在 90% 的可靠度下取值一定是 1,α_3 的取值在润滑良好无冲击的情况下取值也为 1,这两个参数都不宜改动,只有 α_2 的取值由于文献[12]中未提及具体材料,浮动范围较大。遵循以实验为准的原则,以不同动载荷下的工作寿命作为原始数据,如表 1 所示,使用非线性最小二乘法对 α_2 进行拟合,求得 α_2 拟合值为 6.58,使得 L_S 为 661.38 h,更接近于实验值。

表 1　不同载荷下的轴承寿命[12]

当量动载荷 P/N	额定寿命均值 L_S/h
2 499	650
2 783	607
3 724	170

由于文献[12]中也给出了 6204 轴承在额定动载荷下的形状参数,所以选 β 的取值为 1.236 8,利用公式:

$$\theta = L_S / [-\ln R(t)]^{\frac{1}{\beta}}$$

带入 $L_S = 661.38$ h,计算可得:$\theta = 4\,079.96$ h。利用公式(19)和(23)计算可得:

$$\bar{\lambda}(20\,000) = \frac{1}{4\,079.96^{1.236\,8}} \times 20\,000^{(1.236\,8-1)} = 3.57 \times 10^{-4}/\text{h}$$

$$MTTF = \theta\,\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 4\,079.96 \times \Gamma(1.808\,5) = 4\,079.96 \times 0.933\,7 = 3\,809.4\ \text{h}$$

利用公式(15)计算可得:

$$R(1\,000) = 0.838\,9$$

文献[12]实验所测实际 *MTTF* 为 3 743 h,和本文计算相差 66.4 h,差异较小,本文的计算方法有一定指导意义。但若 β 取手册值 10/9,则会使得 *MTTF* 为 4 820.7 h,与实际值相差 28.8%;而完全采用手册上的基本参数,α_2 取 1,β 取 10/9,则会导致最终求得的 *MTTF* 为 732.63 h。造成此巨大差异的原因可能是 L_S 的计算和形状参数 β 的选用采取的是早期的经典方法,而随着加工方法和材料的进步,经典方法也有着许多可改进的空间[13],但在参数正确的情况下,寿命的大体趋势判断上依然是合理的。

本文提供了一种便捷且在缺少滚动轴承工作寿命实验数据时其平均故障前时间的计算方法,可为滚动轴承的设计选型提供参考依据和支持数据。工程实际中,滚动轴承型号的选定应优先依据实验数据,当缺少实验数据时应按照滚动轴承的工作条件和计算分析数据等信息选择其型号。

5 结论

1)本文研究提出了滚动轴承 *MTTF* 和平均失效率 $\bar{\lambda}(t)$ 的计算方法,解决了利用关键设计参数(工作寿命、可靠度、动载荷等)计算滚动轴承 *MTTF* 和 $\bar{\lambda}(t)$ 的问题,可为滚动轴承及其配套产品的可靠性预计、分析提供数据和方法;

2)本文所提方法计算的是滚动轴承主要失效模式-疲劳的 *MTTF* 和 $\bar{\lambda}(t)$,可利用同类产品或相似工作条件下滚中轴承失效模式比例的统计数据、以及工程经验信息,合理修正以期得到更准确的滚动轴承 *MTTF* 和 $\bar{\lambda}(t)$ 数据;

3)本文所提滚动轴承 *MTTF* 和 $\bar{\lambda}(t)$ 计算方法,后续还需收集、分析滚动轴承寿命试验和使用数据等信息,研究滚动轴承 Weibull 分布形状参数 β 的参考依据和确定方法。

参考文献:

[1] 杨晓蔚. 滚动轴承的可靠性设计[J]. 轴承,2013(12):1-5.

[2] DENSON W, CHANDLER G, CROWELL W. Nonelectronic parts reliability data 1995 [M]. NewYork: Reliability Analysis Center, 1995.

[3] BETHESDA W. Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment[M]. Maryland: Naval Surface Warfare Center Carderock Division, 2006.
[4] 牟致忠. 机械可靠性—理论·方法·应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
[5] 朱文予. 机械概率设计与模糊设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
[6] 卜炎. 实用轴承技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
[7] 刘泽九. 滚动轴承应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
[8] 康锐. 可靠性 维修性 保障性基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
[9] 焦育洁.航空发动机主轴轴承可靠性评估方法[J]. 轴承,1998(11):34-37.
[10] 中国人民解放军总装备部.可靠性维修性保障性术语》:GJB 451A-2005[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005: 11.
[11] 曾声奎, 任弈. 可靠性设计分析基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
[12] 王坚永, 庄中华, 吴秀鸾, 等. 滚动轴承可靠性加速寿命试验研究[J]. 轴承, 1996(9): 23-28.
[13] 王勇. 滚动轴承寿命计算[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(7): 14-18,33.

作者简介

火建卫　男,硕士,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计、分析,寿命试验。E-mail: huojianwei@yeah.net

朱星宏　男,在读博士。主要研究方向:机构可靠性;激光损伤。E-mail: zhuxinghong@mail.nwpu.edu.cn

耿小亮　男,博士,高级工程师。主要研究方向:微细观尺度的力学行为;工程中的力学仿真分析;先进材料、飞行器结构的力学试验。E-mail: gengxiaoliang@nwpu.edu.cn

Calculation method for mean time to failure of rolling bearings

HUO Jianwei[1] *　ZHU Xinghong [2,3]　GENG Xiaoliang[2]

(1. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710021, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Mean time to failure (MTTF) and mean failure rate of rolling bearings are significant basic data for revolving mechanical equipment reliability prediction and analysis. The confidence degree of conventional MTTF and data of rolling bearing rooted in statistical sample information is not high, so it is difficult to restrict reliability quantitative design of rolling bearing. Utilizing calculation method for fatigue life of rolling bearing, based on the relationship study of rolling bearing life and its reliability, deduced calculation formula for MTTF and mean failure rate of Weibull distribution, this paper provides a kind of calculation method and procedure for MTTF and of rolling bearing, also provides a calculation example. The problem of utilizing design parameters (life/reliability/dynamic load, etc.) to calculate the MTTF and mean failure rate of rolling bearing is solved, which can provide data and method support for rolling bearing and assembled product reliability prediction and analysis.

Keywords: rolling bearing; reliability; mean time to failure; mean failure rate; fatigue life; Weibull distribution

* Corresponding author. E-mail: huojianwei@yeah.net