

DOI : 10.3901/JME.2014.16.047

基于应力-强度干涉的车用发动机机械 零部件 B10 寿命计算方法*

王 正 王增全

(中国北方发动机研究所柴油机增压技术重点实验室 天津 300400)

摘要：针对车用发动机机械零部件在设计阶段的 B10 可靠寿命计算问题，分析车用发动机机械零部件的特点及其寿命建模方法，研究基于应力-强度干涉的车用发动机机械零部件失效行为表达方法；以车辆行驶里程为寿命度量指标，建立车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命计算模型，推导机械零部件的可靠度函数、失效率函数、寿命累积分布函数和寿命概率密度函数以及平均失效里程(Mean kilometer to failure, MKTF)计算模型。研究表明，运用建立的方法及模型，能够结合车用发动机的工作剖面，利用零部件的应力、强度等参数，计算出车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命、可靠度与失效率随寿命变化规律、寿命概率分布特征以及平均失效里程，可以更好地指导发动机机械零部件的设计、试验、使用等。

关键词：车用发动机；机械零部件；B10 可靠寿命；平均失效里程；可靠性；失效率

中图分类号：TB114；TH122

Method for Calculating the B10 Reliable Life of Mechanical Components of Vehicle Engine Based on the Stress-strength Interference

WANG Zheng WANG Zengquan

(National Key Laboratory of Diesel Engine Turbocharging Technology,
China North Engine Research Institute, Tianjin 300400)

Abstract : For the problem of B10 reliable life calculation of mechanical components of vehicle engine in the development stage, the characteristics of mechanical components of vehicle engine and the existing life modeling methods are analyzed. Based on the stress-strength interference theory, the failure behavior description method for mechanical components of vehicle engine is studied. With the road haul as the life parameter, the model of B10 reliable life of mechanical components of vehicle engine is derived, and the models of reliability, failure rate and mean kilometer to failure(MKTF) and the cumulative distribution function and probability density function of life, are also developed, respectively. According to the operating profile of vehicle engine and based on the parameters of mechanical components including stress, strength, and so on, the B10 reliable life of mechanical components of vehicle engine can be calculated with the models proposed, and the rules that the reliability and failure rate changes, the life probabilistic characteristics and the MKTF of mechanical components of vehicle engine can be determined, too. The method developed is helpful for directing the design, test, operation and maintenance of mechanical components of vehicle engine.

Key words : vehicle engine ; mechanical components ; B10 reliable life ; mean kilometer to failure(MKTF) ; reliability ; failure rate

0 前言

B10 可靠寿命是指可靠度大于 0.9(即失效概率小于 0.1)时所对应的寿命，是车用发动机及其机械

零部件最常用的可靠性和耐久性度量指标之一。我国在内燃机工业“十二五”发展规划中提出发动机及其零部件要配合整车可靠性要求，满足 B10 可靠寿命指标^[1-2]。美国福特汽车公司在新推出的“全新 6.7LV-8 涡轮增压柴油机”技术目标中，明确将“B10 寿命 10 年或 402 250 km”作为发动机研制的首要技术目标，如表 1 所示^[3]。

* 国家自然科学基金资助项目(51375465, 50905007)。20131205 收到初稿，20140530 收到修改稿

表 1 福特 6.7 L 高水平发动机项目的技术目标

技术指标	技术目标
可靠性/耐久性	B10 寿命 10 年或 402 250 km
性能	领先
燃油经济性	领先
噪声、振动和不平顺性	在领先之列
冷起动力	在领先之列
认证	车辆总质量 3 856 ~ 6 350 kg 底盘认证 车辆总质量大于 6 350 kg 测功机认证
燃油类型	超低硫柴油和生物柴油
性能特征	后喷能力

由于受工作剖面随机性、制造工艺过程不稳定性、材料性能分散性等不确定性因素的影响, 车用发动机及其零部件的实际使用寿命具有明显的不确定性特征。为准确描述发动机及其零部件的寿命特征, 国外已普遍采用“可靠寿命”这一能够体现不确定性特征的寿命指标来描述发动机及其机械零部件等机械产品的耐久性和可靠性^[3-5]。多年来, 国内外学者从不同角度对发动机及其零部件的寿命预测问题进行了研究^[6-16]。敖长林等^[6]利用发动机现场使用的故障数据, 基于随机过程理论建立了发动机故障过程数学模型, 得到了发动机使用初期的故障强度曲线, 并给出了发动机平均故障间隔时间的估计值。MARKO 等^[7]研究了增压器涡轮箱在热-机械载荷循环作用下的疲劳寿命计算方法。胡定云等^[8]应用有限元法研究了柴油机气缸盖的疲劳强度, 并进行了疲劳试验验证。KELLER 等^[9]分析了车用发动机零部件的失效数据, 研究了适用于不同类型失效数据的威布尔概率分布模型。张国庆等^[10]在对车用发动机曲轴系进行动态仿真分析的基础上, 利用 S-N 曲线和局部应变法对曲轴的疲劳寿命进行了计算。YI 等^[11]运用摄动随机有限元法和一次二阶矩法研究了某柴油机连杆的可靠性, 并与工厂统计数据进行了对比, 指出发动机爆压和转速对连杆的可靠性影响最大。JUNG 等^[12]通过疲劳试验研究了曲轴疲劳寿命分布模型, 给出了 50% 置信水平下的曲轴 B10 寿命和平均寿命。

现有的发动机机械零部件寿命分析方法, 大多针对某个机械零部件的疲劳或磨损失效模式给出相应的寿命预测模型, 或是基于对实际使用数据或试验数据的统计分析建立起零部件的寿命分布模型。这些方法和模型虽然有时也能够给出零部件的寿命概率分布特征与可靠寿命, 但是仅适用某个零部件或某种失效模式, 难以从一般意义上建立起零部件 B10 可靠寿命与其“应力、强度”等参数之间的数学关系。

本文针对车用发动机机械零部件在设计阶段的可靠性评价与寿命预测问题, 结合车用发动机机械零部件的特点, 在以车辆行驶里程为寿命度量指标框架下, 建立起适用于车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命计算方法与数学模型。

1 车用发动机机械零部件的特点

车用发动机属于耐用型机械产品, 主要由机械零部件组成, 例如, 发动机的关键部件即机体、缸盖、曲轴、连杆、凸轮轴、涡轮增压器等都是典型的机械零部件; 同时, 这些机械零部件又具有“使用寿命长、可靠性要求高”的特点。

在进行车用发动机机械零部件 B10 可靠寿命计算时, 首先要获得零部件的寿命概率分布特征或可靠度随寿命的变化规律。通常, 获得零部件寿命概率分布特征的方法主要有两种: 一是寿命数据统计法, 即通过对产品实际使用寿命数据或寿命试验数据的统计分析, 建立起相应的产品寿命概率分布模型; 二是失效行为法, 即根据产品的失效模式及其演化过程推导出产品的寿命概率分布模型。

采用寿命数据统计法建立零部件的寿命概率分布模型时, 要得到一个比较准确的寿命概率分布模型, 就需要有足够的寿命数据^[17-18]。如果通过寿命试验获得寿命数据, 这无疑会增加试验成本和试验时间, 尤其是对于有“高可靠性、长寿命”要求的车用发动机机械零部件。如果借助实际使用寿命数据, 则需要较长使用时间获得足够的样本量。显然, 无论是依赖于实际使用寿命数据还是寿命试验数据, 都建立在零部件已经完成制造的基础上。由于车用发动机机械零部件, 难以像电子元器件那样在研制阶段通过大量寿命试验获得足够的失效数据(图 1), 寿命数据统计法虽然在理论上适用于车用发动机机械零部件的寿命评价, 但是无法在设计阶段及时有效对零部件的寿命评价, 难以有效地指导零部件的设计^[2]。



电子元器件

车用发动机机械零部件

(容易通过试验获得足够失效数据) (很难通过试验获得足够失效数据)

图 1 车用发动机机械零部件与电子元器件对比

采用失效行为法建立车用发动机机械零部件的寿命概率分布模型时,首先需要结合车用发动机的工作剖面 and 机械零部件的结构与功能特点,确定零部件的失效模式;然后,根据失效模式的演化过程,并考虑失效行为影响参数的不确定性特征,推导出机械零部件的寿命概率分布模型。显然,失效行为法不需要依赖于大量的寿命数据,而是基于零部件的失效行为^[19-20]。由于机械零部件的失效行为与其载荷历程、应力、强度及其退化规律等参数有关,而且这些参数能够在零部件设计阶段获得,因此,失效行为法适用于车用发动机机械零部件在设计阶段的可靠性评价与寿命预测。

通过对寿命数据统计法和失效行为法这两种寿命建模方法的对比可以看出,失效行为法可以应用于具有“高可靠性、长寿命”特点的车用发动机机械零部件。原则上讲,在车用发动机机械零部件的设计阶段,结合发动机的工作剖面,根据机械零部件的“结构尺寸、失效模式、应力、强度”等参数,在确定机械零部件失效行为的基础上,便可以推导出零部件的寿命概率分布模型,并进一步确定零部件的B10可靠寿命。

2 应力-强度干涉理论与失效行为表达

应力-强度干涉理论被广泛用于机械零部件和系统的可靠性建模与分析^[2],这里所指的应力和强度均为广义量,应力可以是导致零部件或系统发生失效的所有外部因素,例如,机械载荷、温度、湿度、腐蚀等;强度则为零部件或系统对应各种应力的抗力,例如,静强度或疲劳强度、耐热性、耐湿性、耐蚀性等。根据应力-强度干涉理论,当应力大于强度时表示零部件或系统发生失效。

失效行为是指零部件或系统在规定使用条件下和规定使用时间内所具有的失效模式及其演化过程。由失效行为的定义可知,零部件或系统的工作剖面、使用时间、应力、强度及其退化规律等参数是影响其失效行为的关键因素,同时,零部件或系统的可靠性与寿命与其失效行为有着密切联系。当同一零部件或系统在不同的工作剖面下运行时,所表现出的失效行为也可能有所不同,相应地,其可靠性与寿命也会不同。

由应力-强度干涉理论可知,零部件或系统的失效行为也可以视为强度与应力之间相对大小关系随寿命的变化规律。例如,当以车辆行驶里程为寿命度量指标时,车用发动机零部件在 $[0, L - \Delta L]$ km 这段里程内不发生失效的前提下,行驶到 L km 处是否

发生失效这一事件,可以用式(1)所示的应力与强度干涉模型来表示,即

$$g(L) = \delta(L) - s(L) \quad (1)$$

式中 $g(L)$ ——发动机零部件在车辆行驶到 L km 处时的功能函数;

$\delta(L)$, $s(L)$ ——发动机零部件在车辆行驶到 L km 处时的强度和应力。

显然,车用发动机零部件在车辆行驶至 L km 处的失效状态可以用式(1)的不同取值来表示。当 $g(L) > 0$ 时表示发动机零部件在车辆行驶至 L km 处时未发生失效,当 $g(L) \leq 0$ 时则表示发动机零部件在车辆行驶至 L km 处时发生失效。要想全面地描述车用发动机零部件在车辆行驶 L km 时的失效行为,在考虑车辆行驶至 L km 处时发动机零部件所对应应力与强度之间相对大小关系的同时,还应当考虑发动机零部件在车辆行驶 $[0, L - \Delta L]$ km (ΔL 为微小增量)这段里程内的失效情况。

实际上,由于载荷、应力、强度等参数均存在一定的不确定性,车用发动机机械零部件在随车使用过程中所表现出的失效行为也不尽相同,这也使得发动机机械零部件的实际寿命具有不确定性。

3 零部件B10可靠寿命计算模型

下面,以车辆行驶里程作为发动机机械零部件的寿命度量指标,运用应力-强度干涉理论建立车用发动机机械零部件的B10可靠寿命计算模型。

通常,车用发动机机械零部件的强度会随着车辆行驶里程的增加在逐渐降低,车辆行驶 L km 后发动机机械零部件的剩余强度 δ_L 可以表示为初始强度 δ 和行驶里程 L 的函数,即 $\delta_L = F(\delta, L)$ 。此外,由于结构尺寸、制造工艺、材料性能等均存在不同程度的不确定性,发动机机械零部件的初始强度也相应地具有一定的分散性。

车用发动机机械零部件的应力与其载荷历程有着密切的联系。受行驶路况、气候环境、驾乘习惯等的影响,车用发动机的工作剖面一般都较为复杂且具有较强的随机性,相应地,发动机机械零部件的载荷历程也会存在不确定性。在这里,采用“二维载荷描述法”来描述发动机机械零部件的载荷历程^[2, 20],具体如下:用参数为 $\lambda(L)$ 的泊松随机过程描述发动机机械零部件经历的载荷作用次数随行驶里程的变化规律,用随机变量(其累积分布函数和概率密度函数分别为 $F_s(s)$ 和 $f_s(s)$)描述发动机机械零部件在载荷作用下的应力响应。

首先,考虑发动机机械零部件初始强度 δ 为确

定值的情况, 行驶 L km 后发动机机械零部件的剩余强度 δ_L 也为确定值。根据二维载荷描述法, 发动机机械零部件在间隔里程 $(L, L + \Delta L)$ km 内经历载荷作用的概率为 $\lambda(L)\Delta L$ 。由全概率公式可知, 发动机机械零部件在车辆行驶里程达到 $L + \Delta L$ 时的可靠度 $R(L + \Delta L)$ 可以表示为

$$R(L + \Delta L) = R(L)P(\delta_{\hat{L}} > s, \forall \hat{L} \in [L, L + \Delta L]) \times \lambda(L)\Delta L + R(L)(1 - \lambda(L)\Delta L) \quad (1)$$

根据应力-强度干涉理论, 式(1)可以进一步表示为

$$R(L + \Delta L) = R(L) + R(L)\lambda(L)\Delta L \left(\int_0^{\delta_{\hat{L}}} f_s(s) ds - 1 \right) = R(L) + R(L)\lambda(L)\Delta L (F_s(\delta_{\hat{L}}) - 1) \quad (2)$$

由于剩余强度 $\delta_{\hat{L}}$ 可以表示初始强度 δ 和行驶里程 \hat{L} 的函数, 因此有

$$R(L + \Delta L) = R(L) + R(L)\lambda(L)\Delta L (F_s(\delta, \hat{L}) - 1) \quad (3)$$

当 $\Delta L \rightarrow 0$ 时, $\hat{L} \rightarrow L$, 可得

$$\frac{dR(L)}{dL} = R(L)\lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) \quad (4)$$

解微分方程式(4), 可得

$$\ln R(L) = \int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL + C \quad (5)$$

显然, $L = 0$ 时, $R(L) = 1$ 。因此有

$$R(L) = \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] \quad (6)$$

当发动机机械零部件的初始强度 δ 用概率密度函数为 $f_\delta(\delta)$ 的随机变量描述时, 车辆行驶 L km 时发动机机械零部件的可靠度

$$R(L) = \int_0^{+\infty} f_\delta(\delta) \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] d\delta \quad (7)$$

令 $R(L) = 0.9$, 便可以得到车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命计算模型, 即

$$\int_0^{+\infty} f_\delta(\delta) \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] d\delta = 0.9 \quad (8)$$

通过求解式(8), 可以计算出以车辆行驶里程为寿命度量指标时, 车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命 L_{B10} 。

由式(8)可以看出, 在“初始强度、强度退化规律、载荷历程、应力响应”等参数已知的情况下, 便可以运用式(8)计算出车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命, 能够在设计阶段对车用发动机机械零部件进行可靠寿命预测。

进一步, 由式(7)可以得出车用发动机机械零部

件的寿命累积分布函数 $F_L(L)$, 即

$$F_L(L) = 1 - \int_0^{+\infty} f_\delta(\delta) \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] d\delta \quad (9)$$

寿命概率密度函数 $f_L(L)$, 即

$$f_L(L) = \int_0^{+\infty} f_\delta(\delta) \lambda(L)(1 - F_s(\delta, L)) \times \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] d\delta \quad (10)$$

失效率计算模型, 即

$$h(L) = \frac{\int_0^{+\infty} f_\delta(\delta) \lambda(L)(1 - F_s(\delta, L))}{\int_0^{+\infty} f_\delta(\delta) \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] d\delta} \times \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] d\delta \quad (11)$$

同时, 还可以推导出车用发动机机械零部件平均失效里程(Mean kilometer to failure, MKTF)的计算模型, 即

$$L_{\text{MKTF}} = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f_\delta(\delta) \times \exp \left[\int_0^L \lambda(L)(F_s(\delta, L) - 1) dL \right] d\delta dL \quad (12)$$

4 算例

设车用发动机某机械零部件的初始强度为服从均值 850 MPa、标准差 65 MPa 的正态分布, 强度退化规律为 $\delta(L) = \delta \cdot \exp(-0.000\,000\,08L)$; 载荷作用历程服从参数为 $\lambda(L) = 60 \text{ km}^{-1}$ 的泊松随机过程, 该机械零部件在载荷历程作用下的应力响应服从均值为 465 MPa、标准差为 80 MPa 的正态分布。

将上述应力和强度参数代入式(8)便可以计算得到该机械零部件的 B10 可靠寿命 L_{B10} 为 43.2 万 km。同时, 将上述参数依次代入式(7)、(9)~(11)中, 可以分别计算得到该机械零部件的可靠度随行驶里程的变化规律(图 2)、失效率随行驶里程的变化规律(图 3)以及寿命累积分布函数曲线(图 4)和寿命概率密度函数曲线(图 5)。

此外, 将上述应力和强度参数代入式(12), 还可以计算得到该机械零部件的平均失效里程 L_{MKTF} 为 176.22 万 km。

从图 2、3 可以看出, 随着车辆行驶里程的增加, 该发动机机械零部件的可靠度逐渐降低, 失效率呈现出“先减小, 后增大”的变化趋势, 具有“浴盆曲线”的形状特征。当车辆行驶里程达到 43.2 万 km(即 B10 寿命 L_{B10})时, 该机械零部件的可靠度下降为 0.9, 失效率变化呈现出“增大”的趋势, 零部

件进入“耗损失效期”。

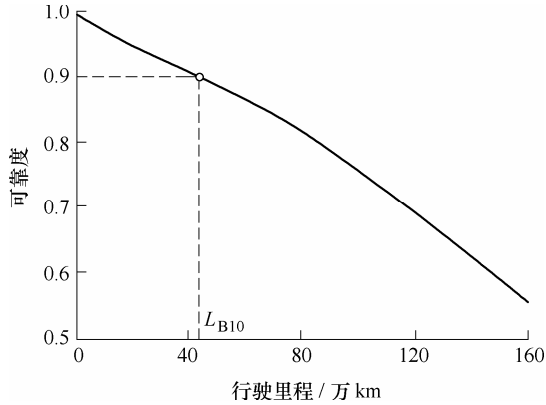


图2 可靠度随车辆行驶历程的变化

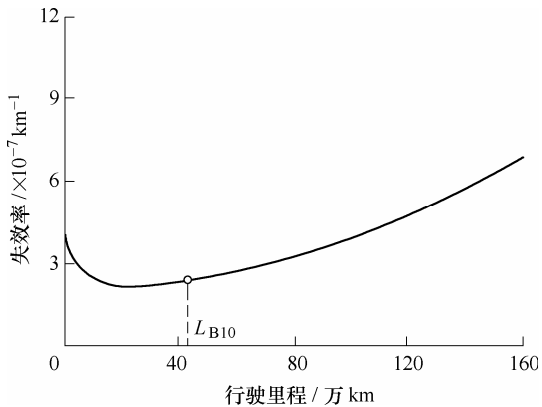


图3 失效率随车辆行驶历程的变化

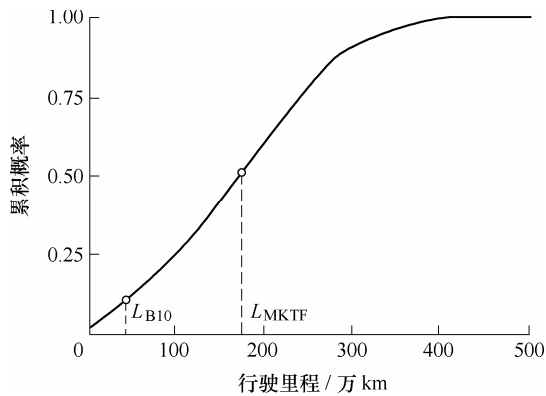


图4 寿命累积分布函数

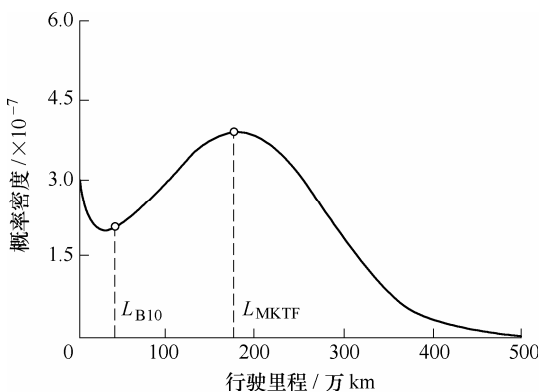


图5 寿命概率密度函数

从图4可以看出,当车辆行驶里程达到43.2万km(即 L_{B10} 寿命)时,该机械零部件的累积失效概率为0.1;当车辆行驶里程达到176.22万km(即平均失效里程 L_{MKTF})时,该机械零部件的累积失效概率为0.504。从图5可以看出,该机械零部件的失效概率密度在初期较大,随着车辆行驶里程的增加呈现出“先减小、后增大、然后又减小”的变化趋势。显然,该机械零部件的寿命不确定性特征,不能简单地用常见的“指数分布”、“正态分布”或“威布尔分布”等概率模型来描述,而是具有“指数分布”和“正态分布”的组合特征,或者说具有“不同参数威布尔分布”的组合特征。

如果车用发动机某机械零部件的初始强度为服从均值850 MPa、标准差65 MPa的正态分布,强度退化规律为 $\delta(L) = \delta \cdot \exp(-0.000\ 000\ 16L)$;载荷作用历程服从参数为 $\lambda(L) = 60\text{ km}^{-1}$ 的泊松随机过程,该机械零部件在载荷历程作用下的应力响应服从均值为400 MPa、标准差为50 MPa的正态分布。将上述应力和强度参数代入式(8)便可以计算得到该机械零部件的B10可靠寿命 L_{B10} 为195万km。同时,将上述参数依次代入式(7)、(9)~(11)中,可以分别计算得到该机械零部件的可靠度随行驶里程的变化规律(图6)、失效率随行驶里程的变化规律(图7)以及寿命累积分布函数曲线(图8)和寿命概率密度函数曲线(图9)。此外,将上述应力和强度参数代入式(12),还可以计算得到该机械零部件的平均失效里程 L_{MKTF} 为261.22万km。

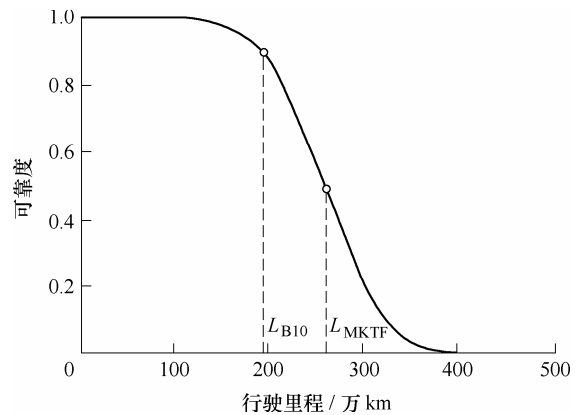


图6 可靠度随车辆行驶历程的变化

从图6、7可以看出,随着车辆行驶里程的增加,该发动机机械零部件的可靠度逐渐降低,失效率呈现出“开始平缓,然后增大”的变化趋势,只具有“浴盆曲线”的后两个阶段(即“偶然失效期”和“耗损失效期”)的特征。当车辆行驶里程达到195万km(即B10寿命 L_{B10})时,该机械零部件的可靠度下降为0.9,失效率变化开始呈现出“增大”的

趋势，零部件逐渐进入“耗损失效期”。

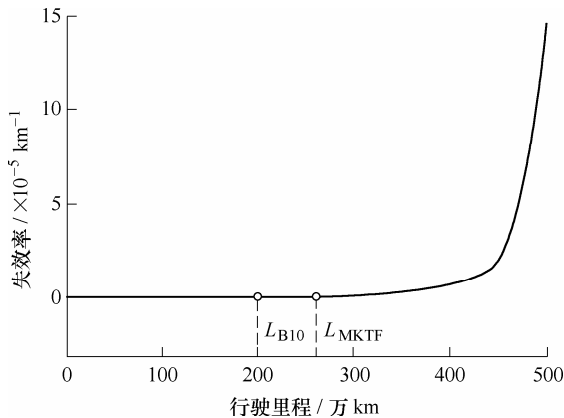


图 7 失效率随车辆行驶历程的变化

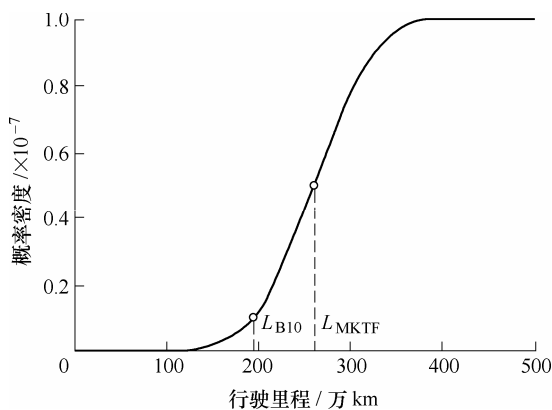


图 8 寿命累积分布函数

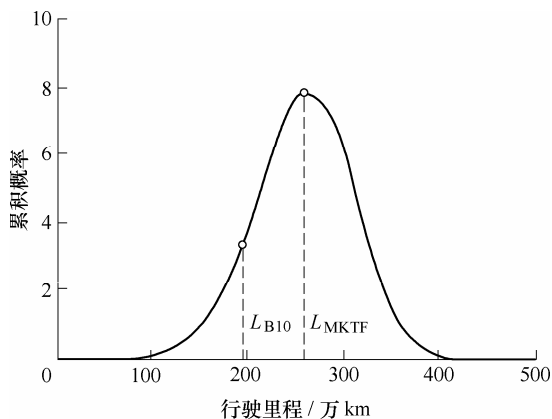


图 9 寿命概率密度函数

从图 8 可以看出，当车辆行驶里程达到 195 万 km (即 L_{B10} 寿命) 时，该机械零部件的累积失效概率为 0.1；当车辆行驶里程达到 261.22 万 km (即平均失效里程 L_{MKTF}) 时，该机械零部件的累积失效概率为 0.502。从图 9 可以看出，该机械零部件的失效概率密度在初期较小且基本保持不变，随着车辆行驶里程的增加呈现出“先增大、后减小”的变化趋势。该机械零部件的寿命不确定性特征可以近似地采用“正态分布”概率模型来描述。

从图 2~9 可以看出，零部件的寿命概率分布

特征以及可靠度与失效率的变化规律主要由其应力、强度等参数所决定，当应力、强度等参数的取值不同时，零部件的寿命概率分布特征也会明显不同，同时，零部件的可靠度与失效率曲线也会呈现出不同的变化规律。

5 结论

(1) 针对车用发动机机械零部件具有“使用寿命长、可靠性要求高”的特点，对比分析了“寿命数据统计法”和“失效行为法”这两种寿命建模方法，指出“失效行为法”更适用于车用发动机机械零部件在设计阶段的可靠性评价与寿命预测。

(2) 研究了基于应力-强度干涉理论的车用发动机机械零部件失效行为表达方法，以行驶里程为寿命度量指标，建立起车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命计算模型，同时分别推导出可靠度函数、失效率函数、寿命累积分布函数、寿命概率密度函数以及平均失效里程计算模型。

(3) 运用本文建立的方法及模型，能够结合车用发动机的工作剖面，利用应力、强度等参数，科学地计算出车用发动机机械零部件的 B10 可靠寿命、可靠度与失效率的变化规律以及寿命概率分布特征；同时，还可以计算得到发动机机械零部件的平均失效里程。

(4) 车用发动机机械零部件的寿命概率分布特征由其应力、强度等参数所决定，当应力、强度等参数的取值不同时，零部件的寿命概率分布特征也明显不同，相应地，零部件的可靠度与失效率曲线也会呈现出不同的变化规律。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国内燃机工业“十二五”发展规划[M]. 北京: 中国内燃机工业协会, 2011. Ministry of Industry and Information Technology of the People Republic of China. The 12th five-year development planning of internal combustion engine industry of China[M]. Beijing: China Internal Combustion Engine Industry Association, 2011.
- [2] 王正, 谢里阳. 机械时变可靠性理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012. WANG Zheng, XIE Liyang. Time-dependent reliability theory and method for mechanical products[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [3] SCOTT D, BRIEN F, ADAM G, et al. The new ford 6.7L V-8 turbocharged diesel engine[R]. SAE International,

- 2010-01-1101, 2010.
- [4] DOGAN S, ERGUN G, OMER R E, et al. The development of the new ford heavy duty truck engine, ECOTORQ[R]. SAE International, 2004-01-2688, 2004.
- [5] GREEN D, GARRETT S, LINDSAY M, et al. The design, development and application of a new range of turbochargers for light commercial vehicle markets[R]. Cummins: Cummins Turbo Technologies, 2001.
- [6] 敖长林, 李一军, 闫相斌, 等. 基于非齐次泊松随机过程的拖拉机发动机使用可靠性[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 206-210.
AO Changlin, LI Yijun, YAN Xiangbin, et al. Operational reliability of tractor engines based on no-homogeneous Poisson process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 206-210.
- [7] MARKO N, FRANK L, MICHAEL H. Damage operator based lifetime calculation under thermo-mechanical fatigue for application on Ni-resist D-5S turbine housing of turbocharger [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18: 1565-1575.
- [8] 胡定云, 陈泽忠, 温世杰, 等. 某柴油机气缸盖疲劳的可靠性预测[J]. 车用发动机, 2008(176): 38-44.
HU Dingyun, CHEN Zezhong, WEN Shijie, et al. Fatigue reliability prediction for cylinder head of duty diesel engine [J]. Vehicle Engine, 2008(176): 38-44.
- [9] KELLER A Z, GOBLIN M T, FAMWORTH N R. Reliability analysis of commercial vehicle engines[J]. Reliability Engineering, 1985, 10(1): 12-25.
- [10] 张国庆, 黄伯超, 浦耿强, 等. 基于动力学仿真和有限元分析的曲轴疲劳寿命计算[J]. 内燃机工程, 2006, 27(1): 41-44.
ZHANG Guoqing, HUANG Bochao, PU Gengqiang, et al. Crankshaft fatigue life calculation base on dynamic simulation and FEA[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(1): 41-44.
- [11] YI C, MINGWU W, LING T. Fatigue strength reliability analysis of diesel connecting rod based on stochastic finite element method[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(4): 741-745.
- [12] JUNG D H, KIM H J, PYOUN Y S, et al. Reliability prediction of the fatigue life of a crankshaft[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23: 1071-1074.
- [13] DENKMAYR L. AVL's reliability engineering process for engine development[C] // Reliability and Maintainability Symposium 2003. Annual January 27-30, 2003, Florida, 2003: 455-458.
- [14] THOMAS N, JAN K, MANUEL P, et al. A new approach of accelerated life testing for metallic catalytic converters[R]. SAE International, 2004-01-0595, 2004.
- [15] 王增全, 王正. 车用涡轮增压器结构可靠性[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
WANG Zengquan, WANG Zheng. Structural reliability of turbocharger for vehicle application[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [16] GUÉDÉ Z, SUDRET B, LEMAIRE M. Life-time reliability based assessment of structures submitted to thermal fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 1359-1373.
- [17] XIE M, TANG Y, GOH T N. A modified Weibull extension with bathtub-shaped failure rate function[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76(3): 279-285.
- [18] AVINADAV T, RAZ T. A new inverted U-shape hazard function[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(1): 32-40.
- [19] WANG Zheng, XIE Liyang. Dynamic reliability model of components under random load[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(3): 474-479.
- [20] 王正. 零部件与系统动态可靠性建模理论与方法[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
WANG Zheng. Theory and method for time-dependent reliability models of components and systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.

作者简介: 王正(通信作者), 男, 1981年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为机械系统可靠性、柴油机可靠性技术、涡轮增压技术等。

E-mail: wzneu@126.com

王增全, 男, 1962年出生, 研究员, 中国兵器工业集团首席专家。主要研究方向为特种车辆发动机设计技术、柴油机可靠性技术、涡轮增压技术等。

E-mail: zengquanwang2005@163.com