

柴油机可靠性水平评估与分析

熊 堃, 段舒展, 张武高, 陈晓玲, 浦耿强

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 以某重型商用柴油机为例, 以大量用户维修数据为信息源, 分析了衡量柴油机可靠性的典型参数, 包括里程、失效数、失效部件、失效季节以及平均无故障间隔里程等, 评估了发动机的可靠性及其影响因素。结果表明, 降低大载荷周期性运动件的失效数是改善商用柴油发动机可靠性的关键。研究还发现, 该型柴油机的平均无故障里程较高, 失效数较低, 早期失效率虽然高于寿命期内的平均失效率, 但相应的故障性质比较轻微, 说明该型柴油机的可靠性已经具有较高水平。

关键词: 柴油机; 可靠性; 评价指标; 评估

中图分类号: TK427 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)03-0018-04

Evaluation and Analysis of the Reliability of Diesel Engines

Xiong Kun, Duan Shuzhan, Zhang Wugao, Chen Xiaoling, Pu Gengqiang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: A certain commercial heavy duty diesel engine was taken as an example to analyze the typical parameters on evaluating the reliability of engines, including mileage, failure times, failure parts, failure season and MKB, which were based on large number of maintenance database from users. The results showed that reducing the failure times of the moving parts under high cyclic load was the key point to improve the reliability of commercial diesel engine. Moreover, it was found that this type of diesel engine featured longer MKB and less failure times, and though the earlier failure rate was higher than the average failure rate across the whole service life, and the relative failures were always minor ones, which means this type of diesel engine boast relatively high reliability.

Keywords: diesel engine; reliability; evaluating index; evaluation

0 引 言

可靠性增长是通过逐步改正产品设计和制造中的缺陷, 不断提高产品可靠性的过程^[1], 可靠性增长能有效地帮助企业发现产品的潜在缺陷或薄弱环节, 提高产品可靠性。

可靠性增长从数学概念到在车用发动机领域的有效应用经历了很长的发展时期。德国数学家罗伯特推翻了系统可靠性的概率乘积法则, 开创了可靠

性指标量化的先例^[2], 目前已经有包括 AMSAA 模型^[3]或 Crow 模型^[4]在内的几十个增长模型被应用到可靠性工程之中^[5]。可靠性技术真正用于柴油机行业是在二十世纪六十年代^[6], 美国约翰迪尔公司于 1964 年底成立了可靠性研究部门, 对柴油机可靠性提出了平均故障间隔时间 (MTBF)、保修费占出厂成本百分比等四项指标^[7]。可靠性技术对保证柴油机的正常使用也具有重大意义^[8]。

柴油机可靠性增长须要以当前可靠性水平为依

收稿日期: 2013-10-18

基金项目: 国家自然科学基金, 项目编号 50976070, 51176119

作者简介: 熊堃(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为燃油润滑性和柴油机可靠性, E-mail: gavinxk@gmail.com。

据, 制定其可靠性增长目标。这就应首先对当前产品的维修数据进行统计分析, 对其可靠性水平做出评估^[9]。

本文针对某典型重型商用柴油机, 以服务站反馈的维修数据作为数据源, 从故障率和平均故障间隔时间等方面出发, 分析了柴油机可靠性的典型参数, 包括其里程、失效数、失效部件、失效季节以及平均无故障间隔里程等, 评估了当前柴油机的可靠性水平, 为后期该型柴油机的可靠性增长提供依据^[10]。

1 柴油机可靠性评估的参数定义

选取平均故障间隔时间/平均故障间隔里程 (MTBF/MKBF) 和单位失效数为评价柴油机的可靠性的主要指标, 从故障率和平均故障间隔时间等方面来评估当前柴油机的可靠性水平^[9]。

从统计学上讲, 抽样对总体参数做出估计时, 样本的随机性会导致其结论的不确定。因此, 采用数理统计中的区间估计法, 选取估计值与总体参数在一定的允许误差范围以内的概率, 将这个相应的概率称作置信水平。即置信水平是指总体参数值落在样本统计值某一区域内的概率; 而置信区间是指在某一置信水平下, 样本统计值与总体参数值间误差范围。置信区间越大, 置信水平越高。

点估计和区间估计是常用的柴油机可靠性指标估计方法, 其中点估计能够给出可靠性指标明确的数量概念, 但不能反映估计的可信程度; 区间估计可以给出可靠性指标的置信上限和置信下限。它们的定义分别是:

(1) 平均故障间隔时间/里程 (MTBF/MKBF)

$$\textcircled{1} \text{ 点估计值 } \hat{\theta}_b: \hat{\theta}_b = \frac{Nt}{n} \quad (1)$$

② 区间估计置信下限值 θ_{bl} :

$$\theta_{bl} = \frac{2Nt}{\chi^2_{1-\alpha}(2n+2)} \quad (2)$$

其中, N 代表柴油机产量; n 代表故障柴油机台数; t 代表保修截止里程, 单位 km; α 代表置信水平。

(2) 单位失效数 λ_F

$$\textcircled{1} \text{ 点估计值 } \hat{\lambda}_F: \hat{\lambda}_F = \frac{n_F}{N} \quad (3)$$

② 区间估计置信上限值 λ_{FU} :

$$\lambda_{FU} = \frac{\chi^2_{1-\alpha}(2n_F+2)}{2N} \quad (4)$$

其中, N 代表柴油机产量; n_F 代表保修期内故障

柴油机台数; α 代表置信水平。

2 某重型商用柴油机的可靠性分析

基于以上制定的研究方法和评价指标, 收集现有机型的维修数据, 对故障率和平均故障间隔时间等进行分析, 从里程、失效数、失效部件、失效季节和平均无故障间隔里程出发, 得到某重型商用柴油机的可靠性水平结果。

2.1 里程分析

图 1 是取样分析某型发动机数据后得到的年平均运行里程图, 该企业 2010 全年共生产某重型柴油机 1 262 台。随机抽取其中的 615 台进行统计分析, 占总数的 48.7%。从图中可知, 在年运行里程数小于 10^5 km 时, 柴油机台数随年运行里程数增加而增大; 当年运行里程数大于 10^5 km 时, 柴油机台数随年运行里程数增加而减小, 且减小的速率相对较快。被统计的柴油机全部年运行里程基本都 $\leq 2 \times 10^5$ km。其中超过 80% 的发动机的年运行里程数 $\leq 1.1 \times 10^5$ km, 超过 60% 的柴油机的年运行里程集中于 $7 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ km 之间。被统计的全部柴油机的年运行里程平均值为 95 513 km。

年运行里程分析结果将在后面的分析中作为各项指标分析的基础。

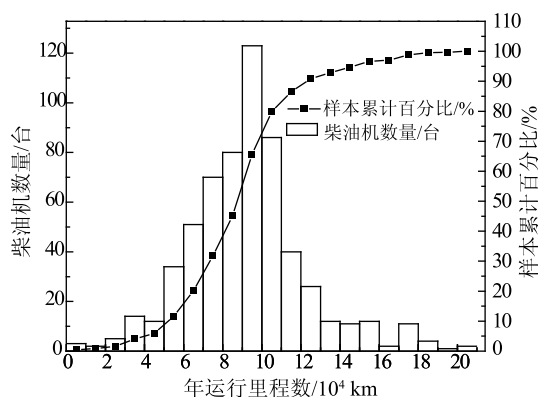


图 1 柴油机平均年运行里程分析

2.2 失效数分析

图 2 是对 2010 年生产的全部的 1 262 台某型柴油机运行满一年后进行统计, 得出的单位失效数分析图。由图可知, 某型柴油机台数随年失效数的增加急剧下降, 其中, 694 台柴油机年失效数为 0, 占有柴油机的 55.5%; 80.1% 的柴油机年失效数 ≤ 3 ; 柴油机失效数最大 12 次; 2010 年一年内, 某柴油机总失效数为 1 822 次, 单位失效数为 1.444 个, 单位失效数的置信区间为 (1.335, 1.553)。

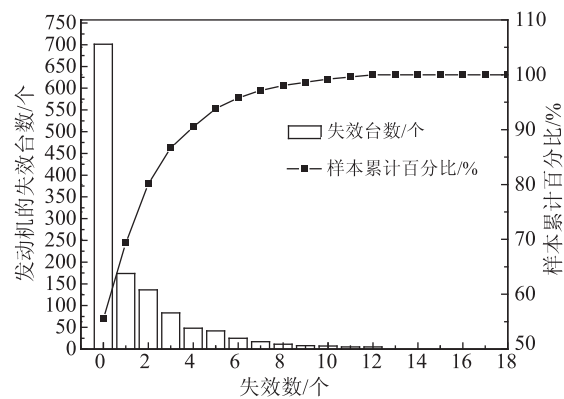


图2 柴油机单位失效数分析

此结果表明，某型柴油机大部分在一年内失效数较低，可靠性较好。为进一步提高发动机的可靠性，下文将对失效部件进行单独分析，以求锁定失效概率最大的某个或某一类部件。通过提高此个或此类部件的可靠性，可有效提高发动机的整体可靠性。此结果将为改善柴油机的实际生产，提供重要的参考。

2.3 失效部件分析

众所周知，柴油机的失效都是由零部件故障引起。表1为统计分析了2010年某型柴油机的维修数据后得到的零部件的单位失效数排序情况。

表1 单位失效数前十几位零部件列表

序号	组件(零部件)	故障数	单机故障数
1	皮带张紧轮裂纹/异响、轴承损坏	85	0.067
2	起动机故障	57	0.045
3	水泵损坏、漏水	48	0.038
4	曲轴后油封漏油(油封原因)	46	0.036
5	空压机总量攒有、失效	44	0.035
6	喷油器发卡、漏油、功能失效	39	0.031
7	活塞破裂	38	0.030
8	电喷发动机 ECU 功能失效	37	0.029
9	增压器漏气、漏油、主轴异常磨损	32	0.025
10	飞轮壳开裂	27	0.021
11	发动机动力不足	27	0.021
12	高压油泵损坏	27	0.021
13	排气歧管挠曲变形、漏气	26	0.021
14	曲轴前油封漏油	25	0.020

对以上失效数据进行分类发现：运动部件如皮带、起动机、水泵等，总失效数为392次；而固件如曲轴后油封、发动机ECU等，失效总数为120次，远小于运动部件。所以，运动部件在实际使用过程中，更加容易出现故障。

就运动部件而言，故障数最多的组件为皮带张

紧轮和轴承，为85次，单机故障率为0.067。而且除去故障率较明显的皮带张紧轮和轴承、起动机等部分组件外，其他大部分组件故障率都相对较低。可见：受较大的周期性力的运动部件，出现故障的可能性更高。

该结论有助于锁定本型号柴油机最容易发生故障的部件，以开展后期的可靠性增长工作，也能为其他同类型柴油机提供借鉴。

2.4 失效季节性分析

图3为对2010年生产的某型柴油机样本进行的运行超过一年的失效发生趋势分析，每个月所分析的柴油机均等于当月装机总数。结果显示，2010年3月份到4月份，单位失效数从0.7降到了0.5，柴油机失效发生的情况较少，且维持在一个较稳定的状态；而2010年5月生产的柴油机单位失效数却达到了2.4个；自2010年6月之后生产的柴油机失效发生的情况比较稳定，单位失效数平均为1.5个。

2010年5月装机的某型柴油机失效数明显异常，分析原因时发现，该企业在当时的生产过程中出现了状况^[11]，例如经历五一长假，人员因为休假等导致生产线稳定性下降。但公司针对5月份出现的问题及时做出了管理上的改进，同样有长假的10月就没出现同样的现象。

此结果表明：及时分析和总结生产中所遇到的具体问题，可有效提高生产的可靠性。

除去5月份这一较特殊情况，6~8月装机的柴油机单位失效数明显处于一个相对较高的水平。其原因与夏季温度较高，整体生产环境恶化，导致生产设备以及员工的稳定性均有所下降有关。

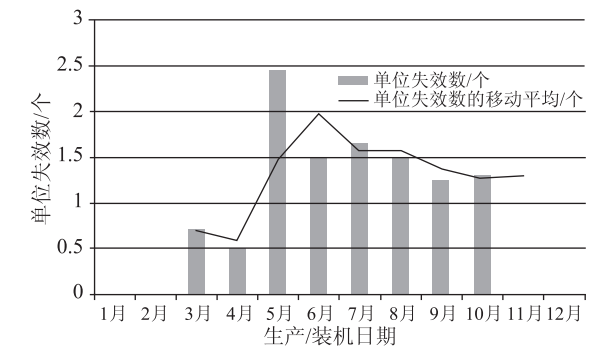


图3 单位失效数趋势分析

因此，加强假期前后的生产管理，提高酷暑等恶劣环境下的员工工作条件，有利于提高员工的稳定性，进而提高整体生产的可靠性。及时分析和总结生产中所遇到的具体问题，并且落实改进措施，有利于提高生成过程的稳定性。

2.5 平均无故障间隔里程分析

进一步对 2010 年生产的 1 228 台某型柴油机样本进行了平均无故障间隔里程(MKBF)分析, 所分析的柴油机样本占全部生产的某型柴油机的 97.3%。

经综合数据分析可发现: 在 10 万公里保修期内, 柴油机的 MKBF 为 35 886 km, 在有效寿命期内的 MKBF 为 36 897 km, 且 90% 置信区间为 (34 330, 38 988)。在早期失效期内的 MKBF 为 28 294 km, 早期失效期内的失效率是有效寿命期内失效率的 1.3 倍。

该结果表明: 发动机初期使用的磨合阶段, 早期失效概率较大, 但早期发动机各部件较新, 综合状态较好, 因此即便早期失效期的失效率较高, 但是故障的严重程度较为轻微。相比之下, 有效寿命期内虽然失效率较低, 但是发动机使用后期部件相对老化, 因为应变、磨损等因素, 使得主要部件稳定性下降, 所以一旦发生故障, 往往程度严重。

可见, 注意磨合期发动机的合理使用, 有利于减小发动机使用初期的故障概率^[12]。而在发动机使用后期, 虽然发动机出现故障概率相对较小, 但是由于其严重程度较高, 所以更加应该注意日常的维护和检查, 以改善发动机使用的可靠性。

3 结 论

本研究将 MTBF/MKBF 和单位失效数作为柴油机的评价指标, 针对某型柴油机的可靠性水平进行了评估和分析, 结果认为:

(1) 发动机大载荷周期性运动件的失效数较高, 可靠性较低。改善此类零部件质量是改善发动机的整体可靠性的关键。

(2) 降低生产过程中人为因素的影响, 也是提高可靠性的关键一环。加强公共假期前后的生产质量管理, 改善极端天气条件下的生产环境, 可有效提高发动机生产的可靠性。

(3) 柴油机早期失效期的失效率高于有效寿命

期的失效率, 应注意磨合期发动机的合理使用, 虽然早期发生的故障的严重程度比较轻微; 在发动机寿命周期的后期, 鉴于故障严重程度较高, 更应注意发动机老化部件的日常维护和检查, 以改善发动机使用过程中的可靠性。

(4) 所研究的某典型重型商用柴油机的平均无故障里程较高, 失效数较低, 表明该重型柴油机可靠性已经达到了较好的水平, 如果能根据可靠性评估结果进一步强化可靠性增长工作, 将有望将其可靠性提高到一个更为先进的水平。

参考文献

- [1] 李瑞莹, 康锐. 广义可靠性增长过程及其控制方法研究[J]. 机械设计与制造, 2009(1): 234-236.
- [2] 李兵, 朱梅林, 郝强. 发动机可靠性研究述评[J]. 车用发动机, 1996(4): 1-6.
- [3] Lloyd D K, Lipow M. Reliability management, methods and mathematics[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1962.
- [4] Crow L H. Reliability analysis for complex repairable systems[R]. US Army Materiel Systems Analysis Activity, Technical Report 138, 1975.
- [5] MIL-HDBK-189, Reliability Growth Management[R]. February, 1981.
- [6] 赵士林. 九十年代内燃机[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [7] 赵秀荣, 谢里阳, 李成华, 等. 发动机可靠性及其评价技术分析[J]. 农机化研究, 2006(3): 206-208.
- [8] 刘鑫. 柴油机运行状态监测和故障诊断系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [9] 刘中星. 三包服务期内可修复配套件可靠性数学模型的优选[C]. 2004 年全国机械可靠性学术交流会议论文集, 2004: 43-47.
- [10] Peterson E, Larsen H. Usage of MTBF for exposure times of undetected faults in safety assessments[C]. SAE Technical Paper 2007-01-3831, 2007.
- [11] 郑文勇, 张静伟, 潘茗, 等. 考虑人为因素的可靠性评估[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(10): 26-29.
- [12] 李刚, 朱华, 吴兆宏, 等. 磨合过程的影响因素初探[J]. 煤矿机械, 2005(9): 51-52.