



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 基于用户数据的往复式内燃机可靠性评估 指南

Guidelines for reliability assessment of reciprocating internal combustion engines  
based on user data

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2025.8)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

目次

前言 ..... II

1 范围 ..... 3

2 规范性引用文件 ..... 3

3 术语和定义 ..... 3

4 可靠性评估流程 ..... 4

5 可靠性评估方法 ..... 5

    5.1 明确评估指标 ..... 5

    5.2 数据收集 ..... 5

    5.3 数据清洗 ..... 6

    5.4 可靠性评估 ..... 7

6 评估结果应用 ..... 10

参考文献 ..... 11

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国内燃机标准化技术委员会（SAC/TC 177）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 基于用户数据的往复式内燃机可靠性评估指南

## 1 范围

本文件提供了基于用户数据的往复式内燃机可靠性评估流程和评估方法，包括明确评估指标、数据收集、数据清洗、可靠性指标评估等内容。

本文件适用于基于用户数据的往复式内燃机可靠性评估。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 17691-2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）

GB/T 20891-2014 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（中国第三、四阶段）

GB/T 34987 威布尔分析

## 3 术语和定义

GB/T 17691-2018、GB/T 18352.6-2016、GB/T 1883.1-20xx、GB/T 1883.2-20xx、GB/T 1883.3-xx、GB/T 20891-2014、GB/T 34987-2017界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**数据清洗 data cleaning**

识别、修正、删除数据中错误、缺失、异常的信息。

### 3.2

**T 检验 T-test**

一种符合T分布的假设检验方法，用于确定两个样本均值之间是否存在显著差异。

### 3.3

**失效 failure**

发动机完成要求功能的能力中断。

[来源：GB/T 1883.3-20xx, 3.1.4]

### 3.4

**故障 fault**

发动机的功能、零部件或整机过早失效或损坏。

[来源：GB/T 1883.3-20xx, 3.1.4]

### 3.5

**平均故障间隔时间 mean time between failures; MTBF**

相邻两次故障之间的平均工作时间，单位为h。

[来源：GB/T 1883.2-20xx, 3.1.1.8]

### 3.6

**首次故障前平均工作时间 mean time to first failure; MTTF**

发动机出现首次故障时的累积工作时间的平均值，单位为h。

[来源：GB/T 1883.2-20xx, 3.1.1.9]

### 3.7

**累计失效概率 cumulative failure rate**

发动机整机或系统零部件在运行一定时间或里程后，失效次数与样本总数的比值。

注：累计失效概率表示发动机产品在从开始使用到时间t为止的累积失效概率，单位%。

[来源：GB/T 1883.3-20xx, 3.1.7]

### 3.8

**当月故障率 current month failure rate**

内燃机在某月市场运行期间内发生的故障数和当月市场保有量的比值，单位为PPM。

### 3.9

**使用频率 usage rate**

发动机在统计时间内的运行时间或里程。

示例：道路用发动机使用频率可以是年使用里程，如25万公里/年。

[来源：GB/T 1883.3-20xx, 3.1.19]

### 3.10

**可靠寿命 reliable life**

发动机达到一定累积失效概率所对应的寿命值。

[来源：GB/T 1883.3-20xx, 3.2.2]

### 3.11

**B10 寿命 B10 life**

10%发动机发生失效时对应的寿命值。发动机B10寿命（可靠度为90%）通常指B10大修周期。

[来源：GB/T 1883.3-20xx, 3.2.3]

### 3.12

**删失 censoring**

在规定的试验时间或规定的失效样本数量后终止试验。

注：如果一个试验在其终止后还存在未失效样品，我们称它为“删失试验”，从试验中得到的试验时间数据被称为“删失数据”。

[来源：GB/T 34987-2017, 3.1.1]

## 4 可靠性评估流程

往复式内燃机（以下简称“内燃机”）可靠性评估包含明确评估指标、数据处理、可靠性评估、评估结果应用，评估流程见图1。

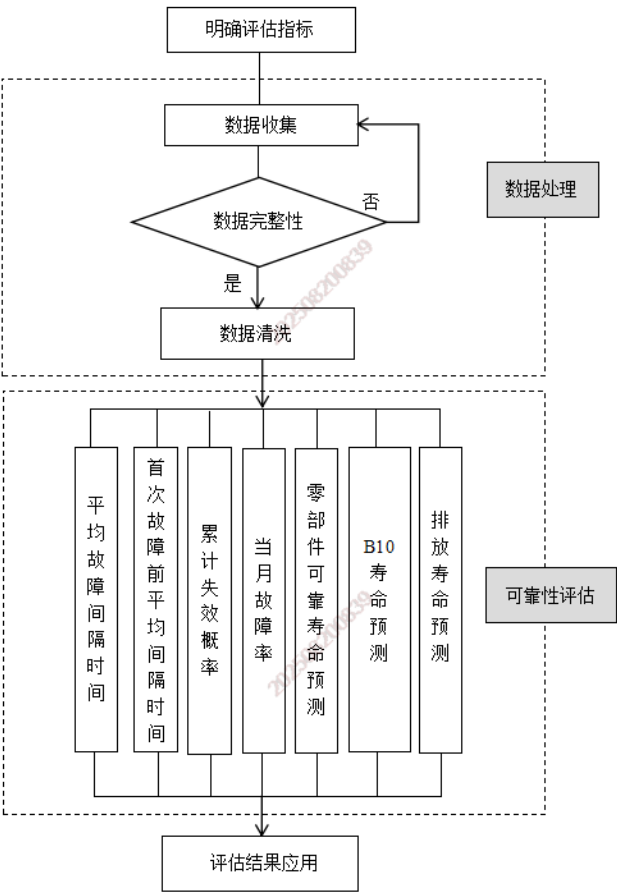


图1 可靠性评估流程

5 可靠性评估方法

5.1 明确评估指标

内燃机可靠性指标宜采用平均故障间隔时间 (MTBF)、首次故障前平均工作时间 (MTTF)、累计失效概率、当月故障率、零部件可靠寿命、B10寿命、排放寿命等指标。

5.2 数据收集

5.2.1 数据来源

收集来源为内燃机生产企业、主机厂、终端用户或第三方机构。

5.2.2 数据范围

收集数据主要分为以下5类：

- a) 内燃机基础数据：品牌、型号、排量、功率、排放阶段、生产日期、内燃机编号，关注零部件名称、件号、供应商、生产批次等。
- b) 主机厂数据：销售日期、销售区域、三包期、配套主机、配套行业、运行时间、运行里程、销售数量等。

- c) 三包内故障数据：故障时间、故障里程、故障地点、故障表现、故障类型、故障部位、维修方式、换件明细等。
- d) 三包外维修数据：故障时间、故障地点、故障表现、故障类型、故障部位、维修方式、换件明细等。
- e) 排放数据：NO<sub>x</sub>排放检测值、PN（颗粒数量）排放检测值、HC 排放检测值、CO 排放检测值、PM（颗粒大小）排放检测值、NH<sub>3</sub>排放检测值、烟度排放检测值等。

5.3 数据清洗

5.3.1 清洗异常数据

清洗方法宜采用直接判断法、T检验法等方法：

- a) 直接判断法：删除超出物理规律的数据。

示例：如日运行时长超过 24 h、日运行里程超过 2400 km、销售日期小于生产日期。

- b) T 检验法：删除显著性水平偏低的数据。

5.3.2 清洗缺失数据

5.3.2.1 对于缺失数据使用插值算法进行插补，常用的插值算法有线性插值、多项式插值，不同插值算法分析见表 1。如数据大段缺失，无法通过数据插补补全，宜将缺失数据删除。

表1 缺失数据插值算法

分类	插值算法	适应的数据类型
线性插值	均值填充、中位数填充、同类补充	生产日期、销售日期、维修费用、换件费用、故障里程、运行时间
多项式插值	相关性数据拟合填充	故障里程、运行时间

5.3.2.2 补充运行里程数据

针对市场数据收集截止时间内未失效样本，宜通过删失方法处理，预估出现失效时的运行里程。将内燃机预估里程和三包规定运行里程作对比，取其中较小值作为运行里程数据。方法如下：

- a) 使用公式（1）计算该内燃机平均使用速度；

$$v = \frac{S}{t_1 - t_2} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- v——某台内燃机平均使用速度，单位：km/天或h/天；
- S——内燃机最后一次维修时的运行里程，单位：km或h；
- t<sub>1</sub>——内燃机最后维修时的日期；
- t<sub>2</sub>——销售日期。

- b) 使用公式（2）计算内燃机预估使用里程；

$$S_y = v \times T \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- S<sub>y</sub>——内燃机预估里程, 单位：km或h；
- T——截止数据导出时的内燃机运行天数或三包期规定天数，二者取最小值，单位：天。

5.3.3 清洗多次失效样本数据

同一台内燃机发生相同失效两次及以上时，取最后失效的里程或者工作时间作为确切数据。

## 5.4 可靠性评估

### 5.4.1 平均故障间隔时间 (MTBF)

整机和零部件的平均故障间隔时间计算方法采用公式(3)。如果内燃机的累计工作时间不可获取，采用公式(4)计算；其中产品使用频率及总运行里程分别按公式(5)、公式(6)计算。

$$MTBF(t) = \frac{1}{n} \sum_{c=1}^N t_c \dots\dots\dots (3)$$

式中：

t——某时间段，例如6个月、1年等；

$t_c$ ——第c个产品的累计运行时间，h；

N——运行满t时间的产品总数；

n——运行满t时间产品在t时间内发生的故障总数。

$$MTBF(t) = \frac{N}{n} \times U(t) \dots\dots\dots (4)$$

$$U(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{S}_i(t)}{n} \dots\dots\dots (5)$$

$$\hat{S}_i(t) = \frac{S_i}{T_i} \times t \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$U(t)$ ——产品使用频率；

$\hat{S}_i(t)$ ——第i个故障产品在t时间内的总运行里程，可以使用km或h；

$S_i$ ——第i个故障产品发生最后一次故障时的总运行里程；

$T_i$ ——第i个故障产品发生最后一次故障时的总运行时间。

### 5.4.2 首次故障前平均间隔时间 (MTTF)

首次故障前平均间隔时间适用于不可维修的零部件。

当故障时间明确时，使用公式(7)计算；三包期内未发生故障时，按公式(4)采用使用率预估。

$$MTTF = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n t_i \dots\dots\dots (7)$$

式中：

n——故障总数；

$t_i$ ——第i个产品故障前所工作的时间， $i=1, 2, \dots, n$ 。

### 5.4.3 累计失效概率

累计失效概率通常规定一定时间，如3个月、6个月、12个月，以该周期内的产品及失效总数计算，见公式(8)。

$$F(t) = \frac{n}{N} \dots\dots\dots (8)$$

式中：



$F(t)$ ——累计失效概率；

$N$ ——产品总数；

$n$ ——失效总数。

#### 5.4.4 当月故障率

当月故障率采用公式（9）计算。

$$\text{当月故障率} = \frac{\bar{n}}{N_{\text{保有量}}} \times 1000000 \dots\dots\dots (9)$$

式中：

当月故障率——百万分之不合格率，单位PPM；

$\bar{n}$ ——当月在三包期内的故障总数；

$N_{\text{保有量}}$ ——当月在三包期内的产品总数。

#### 5.4.5 零部件可靠寿命预测

内燃机零部件可靠寿命预测建议采用威布尔分布，根据GB/T 34987获取威布尔形状参数 $\beta$ 和威布尔特征寿命参数 $\eta$ ，估计出零部件可靠寿命。计算方法如下：

a) 双参数威布尔分布的累积分布函数采用公式（10）计算。

b) 当未发生故障或故障数较少时，威布尔形状参数 $\beta$ 可通过以往经验、历史故障数据和故障物理的工程知识，威布尔特征寿命参数 $\eta$ 计算公式采用（11）。

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$F(t)$ ——累计失效概率；

$\eta$ ——威布尔特征寿命参数；

$\beta$ ——威布尔形状参数。

$$\eta = \left[ \sum_{i=1}^A \frac{t_i^\beta}{r} \right]^{\frac{1}{\beta}} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$\eta$ ——威布尔特征寿命参数；

$A$ ——所有样本数；

$t_i$ ——第 $i$ 个样本的运行里程；

$r$ ——故障的样本数，当没有故障发生时，设置 $r=1$ ；

$\beta$ ——威布尔形状参数。

c) 零部件可靠寿命  $X$  采用公式（12）计算。

$$X = \frac{e^{\left(\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)/100}\right)\right)}}{\beta} + \ln(\eta) \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$X$ ——零部件预计可靠寿命，单位里程或时间；

$F(t)$ ——累计失效概率；

$\eta$ ——威布尔特征寿命参数；

$\beta$ ——威布尔形状参数。

#### 5.4.6 B10 寿命预测

B10寿命为所有大修零部件累积故障概率达到10%的运行里程，可使用Excel、Matlab等软件按公式（13）计算。

$$F(t) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^M (\frac{B10}{\eta_i})^{\beta_i}} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

$F(t)$ ——累计失效概率；

$M$ ——大修件样本总数；

$\eta_i$ ——第*i*个样本的威布尔特特征寿命参数；

$\beta_i$ ——第*i*个样本的威布尔形状参数。

#### 5.4.7 排放寿命预测

5.4.7.1 基于采集的排放数据，可采用线性拟合、多项式拟合、威布尔分布函数拟合等模型模拟各排放指标的劣化曲线。结合排放限值，预测出各指标的排放寿命。整机排放寿命取各指标预测寿命的最小值。

5.4.7.2 线性拟合见公式（14），多项式拟合见公式（15），威布尔分布函数拟合见公式（16），可借助MATLAB、EXCEL等软件进行计算。

$$y = ax + b \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$x$ ——排放寿命，单位为时间或里程；

$y$ ——排放限值，如：重型国六内燃机排放限值应符合GB/T 17691中规定，非道路用内燃机排放限值应符合GB/T 20891中规定；

$a$ 、 $b$ ——拟合参数。

$$y = \sum_{i=0}^L a_i x^i \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$y$ ——排放限值，如：重型国六内燃机排放限值应符合GB/T 17691中规定，非道路用内燃机排放限值应符合GB/T 20891中规定；

$L$ ——多项式阶数；

$a_i$ ——第*i*次的拟合参数；

$x$ ——排放寿命，单位为时间或里程。

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

$y$ ——排放限值，如：重型国六内燃机排放限值应符合GB/T 17691中规定，非道路用内燃机排放限值应符合GB/T 20891中规定；

$x$ ——排放寿命，单位为时间或里程；

$\eta$ ——威布尔特特征寿命参数；

$\beta$ ——威布尔形状参数。

5.4.7.3 多次拟合后需通过模型拟合优度确认准确性，见公式（17）。多项式模型拟合优度推荐 $R^2 < 0.95$ 。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^k (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (17)$$

式中：  
 $R^2$ ——模型拟合优度；  
 $k$ ——样本数；  
 $Z$ ——模型预测值；  
 $\hat{y}_i$ ——实际观测值；  
 $\hat{y}$ ——实际观测值的均值。

6 评估结果应用

将可靠性评估结果汇总至表2中。

表2 可靠性评估结果

指标	可靠性评估结果
平均故障间隔时间	
首次故障前平均工作时间	
累计故障概率	
当月故障率	
零部件可靠寿命	
B10寿命	
排放寿命	

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 17691-2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）
  - [2] GB/T 18352.6-2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）
  - [3] GB/T 1883.1-20xx 往复式内燃机 词汇 第1部分：发动机设计和运行术语
  - [4] GB/T 1883.2-20xx 往复式内燃机 词汇 第2部分：发动机维修术语
  - [5] GB/T 1883.3-20xx 往复式内燃机术语 第3部分：发动机可靠性
  - [6] GB/T 20891-2014 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（中国第三、四阶段）
-