ICS 03.120
L 05

团 体 标 准

T/GDEIIA 4—2020

工业机器人可靠性指标评价方法

Evaluation method of reliability index of industrial robot

（征求意见稿）

2020－**－ **发布 2020－**－ ** 实施

广东省电子信息行业协会 发布

目　　次

目次 I
前言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 故障分类和统计原则 2
　4.1 故障判据 2
　4.2 故障分类 2
　4.3 故障统计原则 3
5 可靠性指标评估的流程 3
6 故障数据的收集与统计 4
　6.1 故障数据收集 4
　6.2 故障数据统计 4
7 可靠性模型的参数估计 5
　7.1 双参数指数分布的参数估计 5
　7.2 威布尔分布的参数估计 5
　7.3 正态分布的参数估计 6
　7.4 对数正态分布的参数估计 7
8 可靠性模型的拟合优度检验 8
9 可靠性模型的优选 9
10 可靠性指标的评估 9

前　　言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由广东省电子信息行业协会提出并归口。

本标准起草单位：待定。

本标准主要起草人：待定。

本标准是首次发布。

工业机器人可靠性指标评价方法

1 范围

本标准规定了工业机器人可靠性指标评价方法的术语和定义、故障分类和统计原则、可靠性指标评估的流程、故障数据的收集与统计、可靠性模型的参数估计、可靠性模型的拟合优度检验、可靠性模型的优选、可靠性指标的评价等。

本标准适用于各类工业机器人的可靠性指标评价。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修订版）适用于本文件。

GB/T 2900.99-2016 电工术语 可信性

GB/T 12643-2013 机器人与机器人装备 词汇

GJB 451A-2005 可靠性维修性保障性术语

GJB 899A-2009 可靠性鉴定和验收试验

3 术语和定义

GB/T 2900.99-2016、GB/T 12643-2013和GJB 451A-2005中确立的，以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可靠性 reliability

在给定的条件，给定的时间区间，能无故障地执行要求的能力。

3.2

故障 fault/failure

产品不能完成要求的功能的状态。预防性维修或其他计划的行动或因缺乏外部资源的情况除外。

3.3

故障率 failure rate

设在时间区间开始时刻前未发生故障，不修理的产品在时间区间$(t,t+\Delta t)$内出现一个故障的条件概率与区间长度Δt之比，当$\Delta t\rightarrow 0$时的极限(如果存在)。

3.4

产品 item；entity

能够被单独考虑的任何零部件、元器件、装置、分系统、功能单元、设备或系统。

3.5

工作时间 operating time
产品处于工作状态的时间区间。

3.6

平均故障前时间 mean time to failure；MTTF
故障前时间的数学期望。

3.7

故障判据 failure criterion
预先定义的接受确证故障的条件。

3.8

可靠度reliability；*R*
产品在给定的条件下和给定的时间区间 (t_1,t_2) 内，能完成要求的功能的概率。

3.9

可靠性模型 reliability model
为预计或估算产品的可靠性所建立的框图和数学模型。

4 故障分类和统计原则

4.1 故障判据

工业机器人满足如下条件之一即为故障：

a) 在规定的条件下，一个或多个功能丧失；
b) 在规定的条件下，一个或多个性能参数超出允许范围；
c) 在规定的条件下，出现影响样品功能、性能和结构完整性的机械部件、结构件或元器件的破损、断裂或损坏状态。

4.2 故障分类

根据GJB899A的故障分类，试验期间出现的所有故障，分为关联故障和非关联故障。
非关联故障：已经证实是未按规定的条件使用而引起的故障，或预期在现场使用中不会发生的故障。
关联故障：在现场使用中预期会出现的所有故障，关联故障又分为责任故障与非责任故障。

4.2.1 责任故障

因样品本身缺陷而引发的关联独立故障以及由此引起的从属故障计为一次责任故障，责任故障是判决样品试验通过与否的依据。责任故障包括：

a) 由于设计、工艺等引起的故障；
b) 零部件和材料设计、制造、选用不当引起的故障；
c) 软件错误引发的故障；
d) 由于提供的操作、维护和维修程序不当引起的故障；

e) 未证实的故障（指无法重现或尚未查清原因的故障）。

对于已划定的责任故障，不应因为采取纠正措施进行纠正而列入非责任故障。

4.2.2 非责任故障

不是由样品或某个单元本身引发的故障为非责任故障。非责任故障不作为判决样品试验通过与否的依据。非责任故障包括：

a) 由独立故障引起的从属故障；
b) 故障未修复而再发生的故障；
c) 由试验设备、测试仪器引起的受试样机的故障；
d) 操作、维护和修理不当引起的故障；
e) 施加了不符合本大纲规定的试验应力而引起的故障。

4.3 故障统计原则

工业机器人可靠性指标评估过程中只统计关联故障。关联责任故障应按以下原则进行统计：

a) 可证实是由于同一原因引起的间歇故障只计为一次故障；
b) 当可证实多个故障现象由同一原因引起时，可计为一次故障；
c) 有多个元器件在试验过程中同时失效时，当不能证明是一个元器件失效引起另一些元器件失效时，每个元器件的失效计为一次独立的故障；若可证明是一个元器件失效引起另一些元器件失效时，则所有元器件合计为一次故障；
d) 已经报告过的由同一原因引起的同一部位发生的独立故障，由于未能真正排除而再次出现时，应和原来报告过的故障合计为一次故障，其间试验时间无效；
e) 若不能确定故障发生的准确时刻，则有效试验时间的统计追溯到上一检测点时间，即上一检测点至发现故障检测点之间的试验时间无效；
f) 在故障检测和修理期间，若发现受试产品还存在其它故障而不能确定为是由原有故障引起的，则应将其视为单独的责任故障进行统计；
g) 在现场运行中，对于零部件的轻微缺陷，若不丧失规定功能，并且能够按照维修规程通过日常检查予以原位修复（不引起拆卸）的事件，经确认后，不计入关联责任故障。

5 可靠性指标评估的流程

工业机器人运行可靠性指标评估的流程如图1所示，包括：

a) 收集与统计工业机器人的故障数据，初步得到工业机器人的可靠度和累计故障概率；
b) 采用双参数指数分布、威布尔分布、正态分布以及对数正态分布可靠性模型分别对工业机器人的累计故障概率进行拟合，获取可靠性模型的未知参数；
c) 采用Kolmogorov-Smirnov检验法对可靠性模型进行拟合优度检验，来评估可靠性模型对于工业机器人累计故障概率的吻合性；如果多个可靠性模型通过模型的拟合优度检验，则需要开展可靠性模型的优选；
d) 采用残差平方和最小的方法对工业机器人的可靠性模型进行优选，从而获得工业机器人的最优可靠性模型；
e) 根据得到的工业机器人可靠性模型，评估工业机器人的可靠性指标。

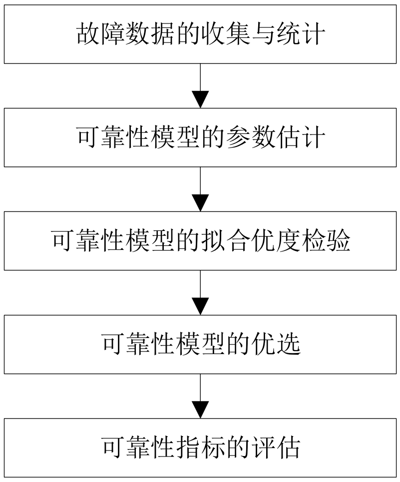

图1　工业机器人可靠性指标评估流程

6　故障数据的收集与统计

6.1　故障数据收集

按照一定的表格收集某批次工业机器人的故障数据。

6.2　故障数据统计

工业机器人故障数据统计的步骤如下：

a)　将工业机器人所有的故障数据的故障前工作时间由小到大排序 $t_1 \le t_2 \le \cdots t_i \cdots \le t_n$， n 为总故障数， $i = 1, 2, \cdots, n$；

b)　采用近似中位秩公式计算工业机器人各故障时间对应的可靠度 $R(t)$ 和累计故障概率 $F(t)$，其计算公式分别如下所示，其中 N 为工业机器人总数；

$$R(t) = 1 - (i - 0.3)/(N + 0.4) \tag{1}$$

$$F(t) = (i - 0.3)/(N + 0.4) \tag{2}$$

c)　统计得到如表1所示的工业机器人的可靠度和累计故障概率。

表1　可靠度和累计故障概率的统计结果

序号	时间 t（小时）	可靠度 $R(t)$	累计故障概率 $F(t)$
1	t_1	$1-(1-0.3)/(N+0.4)$	$(1-0.3)/(N+0.4)$
2	t_2	$1-(2-0.3)/(N+0.4)$	$(2-0.3)/(N+0.4)$
…	…	…	…
n	t_n	$1-(n-0.3)/(N+0.4)$	$(n-0.3)/(N+0.4)$

7 可靠性模型的参数估计

7.1 双参数指数分布的参数估计

双参数指数分布的累计故障概率函数 $F(t)$ 如下所示：

$$F(t)=1-e^{-\lambda(t-T)},t>T \tag{3}$$

式中：

λ——工业机器人的故障率；

T——双参数指数分布的位置参数。

采用最小二乘法对双参数指数分布的未知参数进行估计。

令

$$y=\ln\frac{1}{1-F(t)} \tag{4}$$

$$x=t \tag{5}$$

$$A=-\lambda T \tag{6}$$

$$B=\lambda \tag{7}$$

则有

$$\hat{B}=\frac{l_{xy}}{l_{xx}} \tag{8}$$

$$\hat{A}=\overline{y}-\hat{B}\overline{x} \tag{9}$$

其中：

$$l_{xx}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2=\sum_{i=1}^{n}x_i{}^2-n\overline{x}^2 \tag{10}$$

$$l_{xy}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})=\sum_{i=1}^{n}x_iy_i-n\overline{x}\cdot\overline{y} \tag{11}$$

最终，得到故障率 λ 和参数 T 的估计值 $\hat{\lambda}$ 和 $\hat{T}$ 分别为：

$$\hat{\lambda}=\hat{B} \tag{12}$$

$$\hat{T}=\text{-}\hat{A}/\hat{B} \tag{13}$$

7.2 威布尔分布的参数估计

威布尔分布的累计故障概率函数 $F(t)$ 如下所示：

$$F(t)=1-\exp[-(\frac{t}{\eta})^m] \tag{14}$$

式中：

η——尺度参数；

m——形状参数。

采用最小二乘法对威布尔分布的未知参数进行估计。

对累计故障概率函数 $F(t)=1-\exp[-(\frac{t}{\eta})^m]$ 进行变换，得

$$\ln\ln\frac{1}{1-F(t)}=-m\ln\eta+m\ln t \tag{15}$$

若令

$$y=\ln\ln\frac{1}{1-F(t)} \tag{16}$$

$$x=\ln t \tag{17}$$

$$A=-m\ln\eta \tag{18}$$

$$B=m \tag{19}$$

则有

$$\hat{B}=\frac{l_{xy}}{l_{xx}} \tag{20}$$

$$\hat{A}=\overline{y}-\hat{B}\overline{x} \tag{21}$$

其中：

$$l_{xx}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2=\sum_{i=1}^{n}x_i{}^2-n\overline{x}^2 \tag{22}$$

$$l_{xy}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})=\sum_{i=1}^{n}x_i y_i-n\overline{x}\cdot\overline{y} \tag{23}$$

最终，得到尺度参数 η 和形状参数 m 的估计值 $\hat{\eta}$ 和 $\hat{m}$ 分别为：

$$\hat{\eta}=\exp(-\hat{A}/\hat{B}) \tag{24}$$

$$\hat{m}=\hat{B} \tag{25}$$

7.3　正态分布的参数估计

正态分布的累计故障概率函数 $F(t)$ 如下所示：

$$F(t)=\int_0^t\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{1}{2}(\frac{t-\mu}{\sigma})^2]dt \tag{26}$$

式中：

μ——均值；

σ——标准差。

采用最小二乘法对正态分布的未知参数进行估计。

累计故障概率函数变换，得

$$F(t)=\int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{1}{2}(\frac{t-\mu}{\sigma})^2]dt=\Phi(\frac{t-\mu}{\sigma}) \tag{27}$$

由于标准正态分布函数$\Phi(x)$是严格单调上升的，故其存在反函数，且反函数为

$$\Phi^{-1}[F(t)]=\frac{t-\mu}{\sigma} \tag{28}$$

若令

$$y=\Phi^{-1}[F(t)] \tag{29}$$

$$x=t \tag{30}$$

$$A=\frac{1}{\sigma} \tag{31}$$

$$B=-\frac{\mu}{\sigma} \tag{32}$$

则有

$$\hat{B}=\frac{l_{xy}}{l_{xx}} \tag{33}$$

$$\hat{A}=\overline{y}-\hat{B}\overline{x} \tag{34}$$

其中：

$$l_{xx}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2=\sum_{i=1}^{n}x_i{}^2-n\overline{x}^2 \tag{35}$$

$$l_{xy}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})=\sum_{i=1}^{n}x_i y_i-n\overline{x}\cdot\overline{y} \tag{36}$$

最终，得到均值μ和标准差σ的估计值$\hat{\sigma}$和$\hat{\mu}$分别为：

$$\hat{\sigma}=\frac{1}{\hat{A}} \tag{37}$$

$$\hat{\mu}=-\hat{A}\hat{B} \tag{38}$$

7.4　对数正态分布的参数估计

对数正态分布的累计故障概率函数$F(t)$如下所示：

$$F(t)=\int_0^t \frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{1}{2}(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma})^2]dt \tag{39}$$

式中：

μ——对数均值；

σ——对数标准差。

同样，采用最小二乘法对对数正态分布的未知参数进行估计。

累计故障概率函数变换，得

$$F(t)=\int_{-\infty}^{\frac{\ln t-\mu}{\sigma}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2}}\,dx=\Phi(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}) \tag{40}$$

由于标准正态分布函数 $\Phi(x)$ 是严格单调上升的，故其存在反函数，且反函数为

$$\Phi^{-1}[F(t)]=\frac{\ln t-\mu}{\sigma} \tag{41}$$

若令

$$y=\Phi^{-1}[F(t)] \tag{42}$$

$$x=\ln t \tag{43}$$

$$A=\frac{1}{\sigma} \tag{44}$$

$$B=-\frac{\mu}{\sigma} \tag{45}$$

则有

$$\hat{B}=\frac{l_{xy}}{l_{xx}} \tag{46}$$

$$\hat{A}=\overline{y}-\hat{B}\overline{x} \tag{47}$$

其中：

$$l_{xx}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2=\sum_{i=1}^{n}x_i{}^2-n\overline{x}^2 \tag{48}$$

$$l_{xy}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})=\sum_{i=1}^{n}x_iy_i-n\overline{x}\cdot\overline{y} \tag{49}$$

最终，得到均值 μ 和标准差 σ 的估计值 $\hat{\sigma}$ 和 $\hat{\mu}$ 分别为：

$$\hat{\sigma}=\frac{1}{\hat{A}} \tag{50}$$

$$\hat{\mu}=-\hat{A}\hat{B} \tag{51}$$

8　可靠性模型的拟合优度检验

可靠性模型拟合优度检验采用 Kolmogorov-Smirnov 检验法。

原假设：近似中位秩公式计算得到累积故障概率函数 $F_n(t)$ =拟合得到累积故障概率函数 $F(t)$ 。

近似中位秩公式计算得到累积故障概率函数和拟合得到的累积故障概率函数之间的最大偏差 D_n 可由下面式子求得：

$$D_n = \sup_{0 \le t < +\infty} \left| F_n(t) - F(t) \right| = \max_{1 \le i \le n} \{ d_i \} \tag{52}$$

给定显著性水平 α，查表 D_n 的极限分布表得到临界值 $D_{n,\alpha}$。当 $D_n < D_{n,\alpha}$ 时，接受原假设；反之则拒绝。

9 可靠性模型的优选

采用残差平方和最小的方式进行可靠性模型的优选。其残差平方和 SSE 如下所示：

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} [F(t) - F_n(t)]^2 \tag{53}$$

可靠性模型的 SSE 值越小，模型的拟合效果越好。选择最小 SSE 值的可靠性模型作为工业机器人的最优可靠性模型。

10 可靠性指标的评估

根据得到工业机器人的可靠性模型 $F(t)$，评估其可靠性指标，包括：

a) 工业机器人故障密度函数 $f(t)$ 的计算公式如下所示：

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{54}$$

b) 工业机器人故障率 $\lambda(t)$ 的计算公式如下所示：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1\text{-}F(t)} \tag{55}$$

c) 工业机器人可靠度函数 $R(t)$ 的计算公式如下所示：

$$R(t) = 1\text{-}F(t) \tag{56}$$

d) 工业机器人平均故障前时间 $MTTF$ 的计算公式如下所示：

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \tag{57}$$

1) 对于双参数指数分布的可靠性模型，平均故障前时间 $MTTF$ 为：

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda(t-T)} dt = \frac{1}{\lambda} + T \tag{58}$$

2) 对于威布尔分布的可靠性模型，平均故障前时间 $MTTF$ 为：

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \frac{m}{\eta} (\frac{t}{\eta})^{m-1} \exp[-(\frac{t}{\eta})^m] dt = \eta \cdot \Gamma(1 + 1/m) \tag{59}$$

式中：$\Gamma(x)$ 为伽马函数。

3) 对于正态分布的可靠性模型，平均故障前时间 $MTTF$ 为：

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = u \tag{60}$$

4) 对于对数正态分布的可靠性模型，平均故障前时间 $MTTF$ 为：

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt = e^{\mu+\sigma^2/2} \tag{61}$$