

石油装备的可靠性指标及考核评定

北京石油勘探开发科学研究院机械所 赵 众

作者简介 赵 众,教授级高级工程师,生于1934年,1958年毕业于哈尔滨工业大学机械系,现在北京石油勘探院机械所从事机械可靠性研究和链、带、绳挠性传动及机械设计研究工作,任中国石油学会可靠性学会(筹)副主任,中国机械工程学会可靠性学会理事,中国现场统计研究会可靠性学会理事,全国链传动标准化委员会副主任等。

摘要 提出石油装备的可靠性指标体系包括无故障性指标、耐久性指标、维修性指标、装备完好性指标、经济性指标及综合性指标等6大类;阐明石油装备可靠性指标体系具有区分任务可靠性和基本可靠性、合同指标和使用指标等概念以及推荐优先选用的5项指标等特点。指出指标考核评定的意义及实施中的几个重要问题。

主题词: * 石油机械 可靠性 质量评定

近几年来,石油装备可靠性问题受到了各方面的普遍重视,油田用户和石油装备生产企业的可靠性意识也不断增强,逐渐认识到可靠性是石油装备的重要质量特征。提高产品质量的关键是提高其可靠性。常规的质量观念是产品的性能(功能)指标符合产品标准规定性能的程度,即使用前(或出厂检验时)的质量,也即工作时间 $t=0$ 的质量。可靠性是指产品的性能(功能)指标的保持性。它是一种时间质量指标,即工作时间 t 到达预计的寿命 T 的时刻, $t=T$ 时,产品在规定的使用条件下,完成规定的性能(功能)的能力。可靠性是使用中的质量,是质量的核心,是社会主义企业商品生产目的的直接体现,是企业自身生存发展的需要,是市场竞争的焦点。这些就是对可靠性的基本认识。

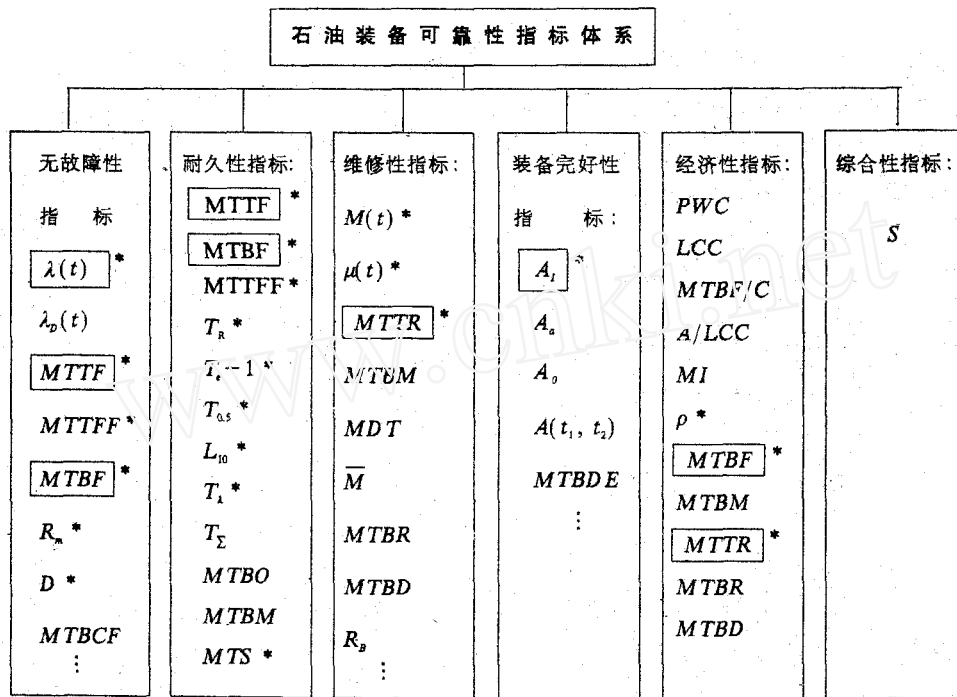
国内石油装备市场可靠性竞争意识尚不强烈,不少油田用户还没有根据自己的需要把可靠性指标写入定货合同中去;产品责任法规还不健全,由可靠性差造成的油田损失得不到补偿;某些部门、地区的保护主义在一定范围内严重存在,推进可靠性工作必须依靠行政干预的手段。中国石油天然气总公司装备局(91)装科字11号文和38号文颁布了石油装备可靠性考核评定规范导则,并开展了首批石油装备限期达到可靠性指标产品的申报等工作。如此自上而下地抓好产品可靠性指标考核评定工作,必将有力地促进我国石油装备可靠性水平的提高。

一、石油装备可靠性指标及其体系

产品的可靠性有定量要求和定性要求两类。定量要求是可以可靠性指标定量表示的,可以经过试验或现场数据的采集加以考核和评定的可靠性要求。

石油装备可靠性的定量要求有: 无故障性要求、耐久性要求、维修性要求、装备完好性要求、经济性要求和综合评价要求等共 6 项。和上述 6 项相对应的有 6 类可靠性指标, 形成了石油装备的可靠性指标体系(见下表)。

石油装备可靠性指标体系表



表中: $\lambda(t)$ ——故障率

$\lambda_p(t)$ ——当量故障率

MTTF ——平均失效前工作时间

MTTFF ——平均首次故障时间

MTBF ——平均无故障工作时间

R_m ——任务可靠度

D ——可信度

MTBCF ——致命故障间的任务时间

T_R ——可靠寿命

T_{e-1} ——特征寿命

$T_{0.5}$ ——中位寿命

L_{10} ——额定寿命($R=0.90$)

T_1 ——更换寿命

T_Σ ——总寿命

MTS ——平均贮存寿命

MTBO ——平均大修间隔

MTBM ——平均维修间隔

$M(t)$ ——维修度

$\mu(t)$ ——修复率

MTTR ——平均修复时间

MDT ——平均停机时间

$\bar{M}$ ——平均维修时间

MTBR ——平均拆卸间隔

MTBD ——平均需求间隔

R_g ——基本可靠度

A_i ——固有可用度

A_a ——可达可用度

A_o ——使用可用度

$A(t_1, t_2)$ ——平均可用度

MTBDE ——平均停机事件间隔时间

PWC ——工厂保修费用率

LCC ——全寿命周期费用

MTBF/C ——费用平均无故障工作时间

A/LCC ——费用可用度

MI ——人员配备指数

ρ ——维修系数

S ——可靠性综合指标

注: 有*指标属于合同指标(或称固有的、基本的指标)类型, 其余属于用户使用的指标类型; 有方框的指标是优先选用指标。

二、石油装备可靠性指标体系的主要特点

(一) 区分任务可靠性和基本可靠性

这个体系吸取了 GJB450-88、MIL-STD-785B 和 MIL-STD-721C 中把可靠性的定量要求分为任务可靠性 R_m (Mission Reliability) 和基本可靠性 R_b (Basic Reliability) 等更为严谨科学的内容、术语和指标。任务可靠性反映产品的使用效能; 基本可靠性是与用户使用费用相关联的。这就表达了可靠性工程提高产品使用效能和降低使用费用的总目标。度量任务可靠性指标仅考虑那些影响任务完成的故障(产品的功能故障), 度量基本可靠性要考虑所有必须维修的故障, 它们未必都影响产品完成任务或执行功能。由于提出了任务可靠性与基本可靠性的不同概念, 则故障的定义也就要予以更新。我国 GB3187-82 规定的故障定义是: “产品丧失规定的功能”。这一定义与 1966 年 MIL-STD-721B 是相同的, 在 1981 年颁布的 MIL-STD-721C 基础上故障的定义发展为: “产品或产品的一部分不能或将不能完成预定功能的事件或状态。”这一新的故障定义不同于但又包含了 GB3187-82 的概念。它包含了任务可靠性指标所考虑的故障(危及任务完成的事件和状态, 有的称为致命故障), 以及基本可靠性指标所考虑的故障(判别准则是凡引起维修工作的事件和状态均算作故障, 不考虑是否影响产品完成规定的功能)。既然有维修就要花去拆卸、检查、更换零部件、修理、安装、检验等费用, 所以基本可靠性是与使用费用相关联的。

在指标体系中除了列入任务可靠度 R_m 和基本可靠度 R_b 指标以外, 无故障性指标、耐久性指标、装备完好性指标与任务可靠性有关; 维修性指标, 经济性指标与基本可靠性有关。

关于任务可靠度、基本可靠度及其故障判别参见图 1。

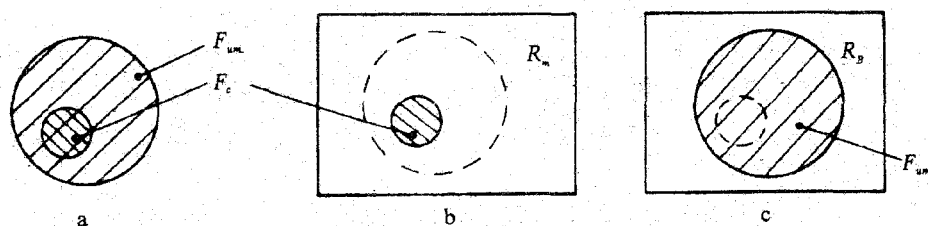


图1 任务可靠度、基本可靠度及其故障判别

F_c —致命故障概率 F_{rm} —需要维修排除的故障概率 R_m —任务可靠度 ($R_m=1-F_c$) R_b —基本可靠度 ($R_b=1-F_{rm}$)

a) 故障判别 b) 任务可靠度 c) 基本可靠度

(二) 区分合同指标和使用指标

在可靠性指标中区分为合同指标类型和使用指标类型两大类是本指标体系的又一特点。

体系表中有方框的是优先选用指标。有“*”号的指标属于合同指标(又可称为固有指标), 其余属于用户使用指标。合同指标(术语)是指企业承包商有能力控制的, 可以用试验等方法验证的可靠性指标, 承包企业对此负有合同责任。使用指标(术语)是指在计划的使用环境和保障环境中的可靠性要求。使用可靠性指标术语一般包括那些不由承制企业控制, 因而也就不能直接写入合同中的可靠性指标。

合同指标一般用固有可靠性值表示; 使用指标用使用可靠性值表示。当某些装备的可靠性、维修性指标不能或不可能采用厂内试验方法验证时, 合同中亦可能出现使用可靠性指标, 应由使用方与承包企业协商在使用中验证这项指标。

承包企业进行产品的可靠性设计、可靠性预计、可靠性分配及将可靠性指标分配给分承制企业的分系统、部件、零件或成品,其可靠性指标必须用合同(固有)类型指标。

使用指标与合同指标可以相互转换,这需要利用指标间的相关性或统计归纳建立的关系式。

(三) 提出装备完好性指标

本体系按可靠性定量要求分类的结构形式,实用方便。本体系用装备完好性代替惯用的有效性(近年来多用可用性)。装备完好性概念是:时刻 t 具有能正常工作的概率。不关心时刻 t 以前是否发生故障,发生多少次,维修过多少次,只关心 t 时刻系统是否完好,能否正常工作。装备完好性与有效性(GB3187)、可用性在时间上都是“点”概念,都不包括任务时间,它们的区别是前者包括贮存时间和闲置时间,后者中的固有可用度 A_i 是 MTBF、MTTR 的函数,可达可用度 A_d 包括预防维修时间,使用可用度 A_o 包括后勤时间和管理时间。 A_i 、 A_d 、 A_o 都不包括贮存、闲置时间,因而采用装备完好性更为全面合理。在装备完好性指标中除各种可用度外还有其他指标,如平均停机事件间隔时间 MTBDE 等。

(四) 增加了综合指标

增加了综合指标 S_i 。这是因为前 5 类指标之间虽然存在某些联系,但它们概念不同,没有可比性。在行业评比、产品评价时需要有一个能考虑到这前 5 类可靠性不同要求的综合指标,把这不同“质”的指标人为地综合成一个指标,这样就可以评定优劣。 S 可按下式计算:

$$S_i = K_1 \frac{I_{1i}}{I_{1\max}} + K_2 \frac{I_{2i}}{I_{2\max}} + K_3 \frac{I_{3i}}{I_{3\max}} + K_4 \frac{I_{4i}}{I_{4\max}} + K_5 \frac{I_{5i}}{I_{5\max}}$$

式中, S_i ——产品 i 的综合可靠性指标值; $K_1, K_2, \dots, K_5$ ——分别为无故障性、耐久性、维修性、装备完好性和经济性的加权系数; $I_{1i}, I_{2i}, \dots, I_{5i}$ ——分别为 i 产品的无故障性、耐久性、维修性、装备完好性和经济性的具体指标量值; $I_{1\max}, I_{2\max}, \dots, I_{5\max}$ ——分别为对比产品中各项指标量值中的最大值。

$K_1, K_2, \dots, K_5$ 加权系数值可以根据行业中的薄弱环节、主要问题、需求及行业产品特点等由行业领导协商确定。它具有评比的导向作用。可以根据 S 进行行业中相同产品的可靠性评比,并可作为产品升级、评优的依据。

(五) 推荐优先选用的 5 个指标

本体系推荐出优先选用的指标 5 个,它们是从体系表所列 37 个指标中选出的最常用的。不同产品使用不同的指标表示更为恰当,可靠性指标比表列的还要多,而且也可能逐渐发展变化。现把这 5 个优先选用指标简述如下。

1. 故障率 $\lambda(t)$

定义:工作到某时刻 t 尚无故障的产品,在该时刻后单位时间内发生故障的概率为 $\lambda(t)$ 。可用下式表示:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t / T > t)}{\Delta t}$$

式中, T ——产品发生故障的时刻。

从样本试验数据可以得到故障率的观测值 $\hat{\lambda}(t)$:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_i(t)}{N_s(t) \Delta t}$$

式中, $N_s(t)$ ——样本在某时刻 t 尚未发生故障的样本数; $\Delta N_i(t)$ ——在 $(t, t + \Delta t)$ 时间区间内发生故障样本数。

$\lambda(t)$ 是工作时间 t 的函数, 一般情况下 $\lambda(t)$ 与工作时间的关系呈图 2 的浴盆曲线状。 $\lambda(t)$ 值愈小, 表示产品的无故障性愈好。图 2 中产品 B 的无故障性优于产品 A, 产品 B 在工作中少出故障, 但产品 A 比产品 B 耐久性好。 $\lambda(t)$ 指标在可靠性数据库中可以查到, 它是产品无故障性的重要指标。

2. 平均失效前工作时间 $MTTF$ 和平均无故障工作时间 $MTBF$

$MTTF$ 用于不可维修产品

(它并不一定是不可修复的产品, 不少情况下是没有必要修复它或不值得修复的产品)。不可维修产品的故障一般都称为失效。平均失效前工作时间的观测值 $\widehat{MTTF}$ 可用下式计算:

$$\widehat{MTTF} = \sum_{i=1}^n t_i / n$$

式中, t_i ——第 i 个样本失效前工作时间; n ——样本总数。

$MTBF$ 用于可维修产品, 它是指产品两次相邻故障间工作时间的平均值*。它是按事后维修方式进行维修的。

若系统(产品)包含各单元的寿命分布服从指数分布, 故障是独立的, 系统为串联可靠性模型时, 其平均无故障工作时间的观测值为:

$$\widehat{MTBF} = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i = \frac{1}{\lambda(t)}$$

在系统为并联可靠性模型时:

$$\widehat{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}]$$

$r/n(G)$ 表决系统可靠性模型(系统 n 个部件中至少有 r 个部件正常, 则系统才正常)时:

$$\widehat{MTBF} = \sum_{i=r}^n \frac{1}{i\lambda} = \frac{1}{n\lambda} + \frac{1}{(n-1)\lambda} + \frac{1}{(n-2)\lambda} + \dots + \frac{1}{r\lambda}$$

上述几式中, λ_i ——组成系统 i 单元故障率; n ——系统包含单元总数; $R_i(t)$ ——组成系统 i 单元的可靠度; $\lambda(t)$ ——系统故障率; $R(t)$ ——系统可靠度; λ ——各组成单元 λ_i 均相等, 且等于 λ 。

* 中华人民共和国专业标准 ZBJ00001-89《机械可靠性术语》规定了平均无故障时间 $MTBF$ 和平均无故障工作时间 $MOTBF$ 两个术语。但是 GB3187、GJB450, 甚至 ZB N04.004-88 等标准中均定义 $MTBF$ 为平均无故障工作时间, 本文按国标及其他标准定义, 与 ZB J00 001-89 定义不同, 使用时请注意。

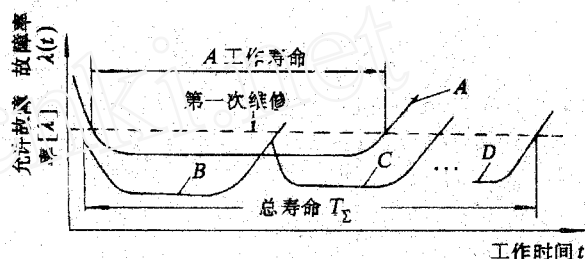


图 2 无故障性与耐久性

$MTTF$ 和 $MTBF$ 又称为平均寿命 (Mean Life), 它们可以反映产品的无故障性、耐久性以及经济性。它是可靠性的重要基本特征量。

3. 平均修复时间 $MTTR$

定义: 修复时间的平均值。严格地说, $MTTR$ 是在特定的测量区间和规定的修理等级上的修复性维修时间总数除以在该修理等级上产品总故障数。其观测值是:

$$\widehat{MTTR} = \sum_{i=1}^N t_i / N$$

式中, t_i ——第 i 故障维修时间; N ——总故障(维修)次数。

若组成部件按指数分布, 则:

$$\widehat{MTTR} = \sum_{i=1}^N \lambda_i t_i / \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

式中, λ_i ——第 i 部件的故障率; t_i ——第 i 部件的平均维修时间; N ——部件总数。

$MTTR$ 是产品维修性的基本特征量。它可以反映产品的维修性和经济性。

4. 固有可用度 A_i

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

固有可用度 A_i 是 $MTBF$ 和 $MTTR$ 的函数, 是考虑了可靠性与维修性的综合指标。它是可用度的极限值或稳定值, 又称稳态有效度。实际工程中可维修系统就是经历故障 → 维修后正常工作 → 再故障 → 再维修 → 再工作的多次反复逐渐趋近于稳态的过程, 这时系统处于正常状态的时间大约为 A_i 。

A_i 和 $MTBF$ 、 $MTTR$ 的相关性表现为函数关系, 这三个指标中的任意两个都可以决定第三个的量值, 因而这三个指标不能分别独立确定, 否则造成错误。

上述 $\lambda(t)$ 、 $MTTF$ 、 $MTBF$ 、 $MTTR$ 和 A_i 等 5 个指标, 也并非完全没有联系: 若它们服从指数分布时, 则:

$$MTBF(\text{或 } MTTF) = 1/\lambda(t)$$

而 A_i 又是 $MTBF$ 和 $MTTR$ 的函数, 在此情况下, 只要知道 $MTBF$ 和 $MTTR$ (或 $\lambda(t)$ 和 $MTTR$), 其他指标也就确定了, 所以 $MTBF$ 和 $MTTR$ 是最基本的可靠性指标。

上述 5 个推荐优先选用指标都属于合同类型的指标。签订合同时可以直接采用。同时它们也都是产品固有的指标。在可靠性预计、可靠性计算、分配、厂内可靠性试验等工作项目中必须使用这些固有的指标。

三、可靠性指标的考核评定

由石油装备生产企业申报, 经可靠性专业归口单位制定、上报总公司装备局批准颁布限期达到可靠性指标产品名单, 并组织行业归口单位按照规范化的办法进行可靠性指标的考核评定, 是自上而下地改进产品质量和可靠性的有效方法。这一作法已经被兄弟部门实践所证实。例如, 机械委第一批考核的 20 种自动化仪表, 经考核, 产品可靠性水平显著提高, $MTBF$ 平均增加 1 ~ 3 倍; 各种型号凿岩机平均无故障凿岩米数从 250m 增加到 500m 以上, 超过

了进口样机水平,由此扩大了销路;165F汽油机MTTF由100h经改进考核时提高到200h以上。

有远见的企业领导应当自觉走“以质量取胜”的道路,抓住产品的可靠性,就抓住了质量的要害与核心。这是提高企业效益,增强企业竞争力的有效途径。因为这是由不以人们意愿为转移的客观规律所决定的。企业领导应大力抓好这项考核工作。

油田用户是服务的对象。当用户可靠性意识增强以后,除了自觉改进石油装备使用可靠性,做好维修、保养、故障数据采集、故障分析等本职工作之外,在石油装备及配件订购合同中还应增加可靠性指标要求。当用户觉悟到为了油田和整体利益对“没有达到可靠性指标的产品就不订货”,那时可靠性工作(包括考核评定)就将得到强大的动力而受到人们高度的重视。

四、可靠性指标考核评定中的几个问题

(一) 考核评定的目的

1. 考核评定的目的是为了提⾼使用可靠性。整个考核过程必须经过摸底、找出产品薄弱环节、攻关改进、试验或现场数据采集跟踪等达到可靠性增强的循环。

2. 可靠性试验和现场数据评定方法应逐步完善、规范化,其目的是尽可能暴露故障,摸清问题和对指标值作出合理的评定。

3. 鉴别优劣,推进行业评比,激励竞争机制。

4. 推进石油装备可靠性工作(如摸清行业重大产品攻关方向,积累数据,开展可靠性设计,加强可靠性管理等),促进经济效益的增长。

(二) 考核指标量值的确定

1. 从满足用户需求出发,摸清现有水平和存在问题,参照国际先进水平,确定经过努力可以达到的考核指标量值。

2. 指标的量值受使用条件(环境条件、工作条件、运行条件)和维修概念(维修政策、维修方式、维修条件等)的影响,因此在确定量值时应明确规定这些条件。

3. 指标量值受故障定义、故障判据的影响,因此在确定量值时应先征求设计、制造、使用各方意见,确定故障定义及判据。

(三) 考核评定时应注意故障分类及判据

1. 明确区分误用故障和本质故障;独立故障和从属故障;关联故障和非关联故障。

2. 解释试验结果或计算指标量值时不应计入非关联故障。非关联故障包括:误用故障、从属故障、公认外界偶然因素造成故障(地震、水灾等)以及使用或工艺要求的停机、更换零部件。

3. 按故障危害程度、对使用性能的影响程度和维修的难易程度,故障可以分为4个等级:致命故障、严重故障、一般故障和轻度故障。

(收稿日期:1991-09-09)

(本文编辑 王志权)

Sheng Zengshun, Wang Yilan, Zeng Shaoqing. Selecting a practical clearance of a subsurface pump. *CPM*, 1992,20(5) : 20 – 26

The selection of the clearance of a subsurface pump and the analysis of the leakage between plunger and barrel are of great importance by artificial lifting. By analyzing the actual conditions at the pump setting depth and the influence of the plunger movement on the leakage, this article presents a method for selecting the practical pump clearance, analyzes the overhaul period and service life of the pump, and provides two nomographs for simplifying the calculation.

Liu Huxiong. To increase the load rate of the electric motor on pumping units. *CPM*, 1992,20(5) : 27 – 29

There are several ways and means of energy saving on sucker rod pumping units. One of them is to increase the load rate of the electric motor, including the use of Y- Δ starter, voltage regulating device, variable frequency motor, two-speed motor or energy-saving coupling. Field tests show that, among the above-mentioned measures, the last two provide better energy saving effect.

Zhu Xiaoping. Rational structure of the four-leg post on pumping units. *CPM*, 1992,20(5) : 33 – 38

Three kinds of four-leg posts for beam pumping units are studied and optimized by means of finite element method. The result of calculation shows that the steel consumption of a four-leg post of 4.7 – 6.1 meters high can be reduced by 40 – 46 percent by reforming the structures of the two flanks. while on the flanks only a number of braces from bottom to top zigzag arranged with seven properly spaced joints on each leg, the post is still provided with the required load capacity.

Zhao Zhong. Reliability assessment of oilfield equipment. *CPM*, 1992,20(5) : 39 – 45

This article introduces a reliability index system for oilfield equipment, including the index of trouble-free operation, index of durability, index of accessibility for maintenance, index of overall perfectness, economy index and comprehensive index, indicates that this index system is characterized by defining the conceptions of job reliability, fundamental reliability, contract index and service index, and points out the matters needing attention by carrying out the index evaluation.