


 综述

油气管道可靠性评价指标及其计算

曲慎扬*

(中国石油天然气管道勘察设计院)

曲慎扬:油气管道可靠性评价指标及其计算,油气储运,1996(4)15,1~4。

摘要 按照可靠性理论对管道工程某部分或整体的结构性质计算可靠性指标,然后根据这些指标评价其可靠性。用于管道工程可靠性评价的指标较多,欧美国家用故障率 λ 、可靠度 R 、可用度 A ;前苏联用可靠度 H 、准备系数 K_r 。列出了这些指标的计算公式,介绍了国外可靠性指标的计算资料。泵站由若干单件设备组合而成,其可靠性取决于单件设备的可靠性和它们的组合形式,据此可建立该系统可靠性模型,通常用可靠性逻辑框图表示。国外有关机构建立了可供油气管道可靠性评价用的数据库。

主题词 输油管道 输气管道 可靠性 评价 计算 指标

近十年来,国外的长距离油、气输送管道设计中出现了可靠性设计。管道工程的可靠性设计一般只限于就管道工程的构成做可靠性评价,还没有发展到进行可靠性优化设计。这里所说的可靠性评价,是指在设计阶段就管道工程和结构的可靠性进行分析,不涉及施工阶段和投产后操作阶段的可靠性。由于管道工程的特殊性,可靠性评价存在许多不完整和不成熟的地方。我国的管道工程设计还没有正式进行可靠性评价,相应的研究工作亟待加强。

从国外所做的管道工程可靠性评价看,各家设计公司所用方法及评价的深度大不一样,有的只对工程的线路部分及泵(压气)站的组件(管子、阀门、设备)做可靠性的定性分析,或根据各组件的故障率对其可靠性进行预测,比较深入的,则进行整个系统的可靠性评价。由于存在不同的可靠性指标,采用的基本参数也不相同,所以评价的结果难以对比。所谓管道工程的可靠性评价,是就管道某一部分(例如线路或泵站)或整体的结构性质,按照可靠性理论计算某些指标,然后根据这些指标评价该工程的某部分或整体的可靠性。指标是评价工程可靠性的定量标准,是开展油、气管道工程可靠性评价必须首先研究的对象。

评价管道工程可靠性所用指标很多,其主要的:欧、美各国使用故障率(Failure rate) λ ,可靠度

(Reliability) R ,可用度(Availability) A ;前苏联使用可靠度(Надежность) H ,准备系数(Коэффициент готовности) K_r 。系统或组件的故障率是根据元件(管件或单件设备)的故障率按一定逻辑关系计算而得。元件故障率是利用元件在使用中产生故障的历史资料统计得来。故障率是该元件产生故障的频率,它表征元件的基本质量。按照美国核管理委员会 NUREG 0492 的规定^[1],故障的分布服从指数定律,也即元件可靠度和故障率有以下关系:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中 t ——所分析的时间。

可靠度 R 是所分析工程对象可靠性的概率量度。组件和整体工程的可靠度 R 要根据元件、组件的组合关系计算,它是表征组件或整体工程可靠性的基本指标。

可用度是工程的某一部分或整体在某时刻具有规定功能的概率,可按下式计算:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2)$$

式中 μ ——组件的修理率,1/h,是平均修理时间的倒数;

λ ——组件的故障率,1/h。

准备系数的含义相同于可用度,按下式计算^[2]:

$$K_r = T_p / (T_p + T_B) = 1 / (1 + \gamma) \quad (3)$$

* 102849,河北省廊坊市金光道22号;电话:(0316)2074249

式中 T_p —— 组件总工作时间, h;

T_B —— 组件强迫停机时间, h;

γ —— T_B/T_p 。

油气管道工程可靠性评价主要针对管道线路部分、泵(压气)站和自控系统。国外有的设计公司认为,泵(压气)站内的电气、自动化系统(包括软件)由于其元(组)件固有可靠性大大高于机械设备,所以不对其进行可靠性分析。对于线路部分,因管子质量较好,也不对其进行分析。线路部分的评价目前是根据相应的故障率预测。世界各主要经营油、气管道的地区和国家都积累有油气管道线路部分故障率的资料。线路故障率 λ 的含义是一定长度管道在一定时间内出现故障的次数,单位是 $1/(1\ 000\ \text{km} \cdot \text{a})$ 或 $1/(\text{km} \cdot \text{a})$ 。欧洲输气管道使用的故障率 λ 可按管道通过的地区类别、管道壁厚选取。表 1 为某工程所用数据。

表 1 欧洲输气管道故障率数据

通过地区类别	管壁厚 (mm)	故障率 λ ($1/\text{km} \cdot \text{a}$)
I	7.1	5×10^{-4}
II	8.7	4×10^{-4}
III	10.3	3×10^{-4}
IV	14.3	1×10^{-4}

从表 1 数据可看出,故障率 λ 数据随壁厚增大而减小。表 2 为美国运输部(U. S. DOT)根据 1982 年至 1991 年期间美国成品油管道线路部分的事故统计资料计算出的故障率 $\lambda^{[1]}$ 。

表 2 美国成品油管道故障率

事故原因	故障率 λ ($1/1\ 000\ \text{km} \cdot \text{a}$)
外力	0.168
腐蚀	0.152
其它	0.144
误操作	0.031
管子缺陷	0.028
焊接缺陷	0.015
泄压设备	0.012
合计	0.552

加拿大能源保护局(Energy Resources Conser-

vation Board)统计 1955 年至 1982 年期间的资料^[1]得出:原油管道故障率为 $1.2/(1\ 000\ \text{km} \cdot \text{a})$,输气管道故障率为 $0.7/(1\ 000\ \text{km} \cdot \text{a})$ 。前苏联采用的输气管道线路部分故障率为:通过草原与盛含盐土的荒漠地区时取 $1.5 \times 10^{-3}/(\text{km} \cdot \text{a})$,其它地区(冻土、林区、山地)取 $0.5 \times 10^{-3}/(\text{km} \cdot \text{a})$,平均值为 $0.8 \times 10^{-3}/(\text{km} \cdot \text{a})$ ^[2]。也有研究结果认为故障率与管径有关,即

$$\lambda \times 10^3 = 2.26D - 0.84 \quad (4)$$

式中 D —— 管道直径, m。

对线路部分可靠性的评价,直接采用与所评价线路相对应的故障率,按式(1)计算可靠度。也可以按下式计算该线路部分发生故障的概率:

$$F = 1 - R = 1 - e^{-\lambda} \quad (5)$$

图 1 为按照美国运输部的成品油管道故障率得出的故障率分布图^[1]。

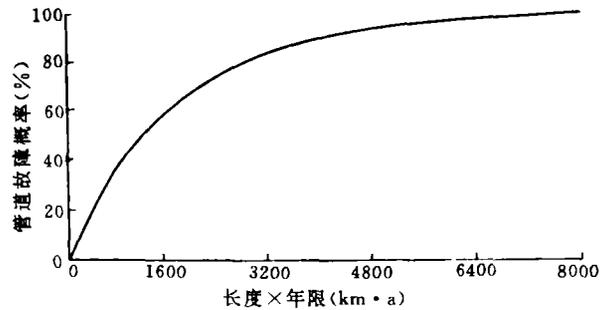


图 1 管道线路故障率分布图

已知线路检修所用时间,再根据故障率及管道长度可得出管道总工作时间 T_p 。按式(3)求得管道的准备系数 K 。前苏联提供的有关数据见表 3。

前苏联《干线输油管道工艺设计规范》(BHII 2-86)中要求长度为 400~500 km 的管道部分的准备系数为 0.995。

表 3 不同管径管道的准备系数计算数据

管径 (mm)	平均修理时间 T_a (h)	修理时间上限 (h)	参 数 (γ)	1 000 km 输气管道准备系数 K
720~820	22.7	36.3	0.001~0.006	0.999~0.994
1 020	34.0	59.8	0.002~0.010	0.998~0.990
1 220	47.5	86.5	0.003~0.015	0.997~0.985
1 420	69.0	117.0	0.004~0.020	0.996~0.980

在式(2)与式(5)中, $A = \mu / (\lambda + \mu) = 1 / (1 + \lambda / \mu)$, $K_r = T_p / (T_p + T_R) = 1 / (1 + T_R / T_p)$, μ 为修理时间的倒数, 即 $1 / \mu = T_R$ 。而 $1 / T_p$ 为一定长度管道发生故障的频率, 即 $1 / T_p = \lambda$ 。所以式(2)与式(3)中可用度与准备系数是一致的。

目前评价管道线路部分所用故障率数据, 尚不能充分反映不同管子结构(管材与防腐涂层)及管道所经地带特点(土壤腐蚀性、工程地质)所引起的差别, 对评价结果有一定影响。

泵(压气)站是由若干单件设备(如阀门、泵、压气机等)按照其各自的功能组成若干子系统, 并最终形成一个系统。系统的可靠性既取决于构成系统的单件设备的可靠性, 也与它们的组合形式有很大关系。分析泵(压气)站系统可靠性时, 就要根据这种组合形式建立系统的可靠性模型。这种模型通常用可靠性逻辑框图表示。这种框图揭示系统可靠或故障与各个单件设备之间的逻辑关系, 也即明确它们之间是串联或并联关系。框图明了直观, 有助于对系统可靠或故障作出判断。例如在一加热输送的泵站中, 可能具有给油泵、主泵、换热器、燃油系统、锅炉、供水系统等, 它们之间在功能上的关系如图 2 所示。

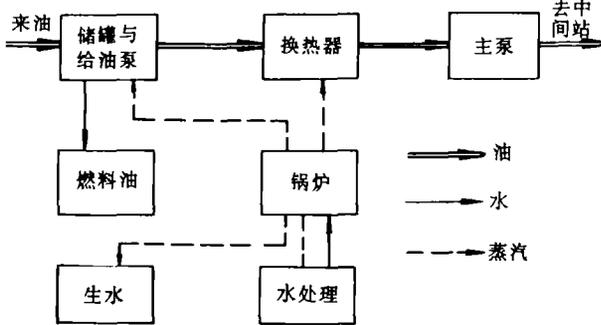


图 2 泵站简化功能框图

根据各个设备之间、设备与子系统之间的关系确定泵站的可靠性逻辑关系, 如图 3。

对系统进行故障模式与效果分析(Failure Mode and Effect Analysis), 确定各个设备发生故障的原因及后果, 并估计其故障率。在子系统中, 有几台设备可以工作, 当这几台设备全部停止工作才使系统停止工作, 该子系统中的设备为并联关系。反之, 子系统中任一台设备工作停止即能使系统停止工作, 则为串联关系。从输油工艺角度看, 输油泵站的泵机组工作方式有并联与串联两种, 但在可靠性

分析上, 这两种泵机组的工作方式都属于并联, 因为对于串联方式, 当一台泵机组停止工作, 备用泵机组可以立即启动, 接替停运泵的工作, 不影响泵站的输送。

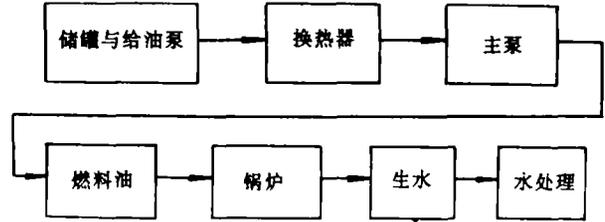


图 3 泵站可靠性逻辑框图

如果假定各个设备的故障率与修理特性互为独立, 则串联系统可靠度为:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (6)$$

系统故障率为:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (7)$$

系统可用度为:

$$A_s = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (8)$$

式(6)~(8)中的 R_i 、 λ_i 与 μ_i 分别为各单件或组合的可靠度、故障率与修理率。

泵(压气)站工作的可靠性受很多因素影响, 例如供电系统、辅助系统及控制系统等。在这里只讨论机组本身对泵(压气)站可靠性的影响。前面说过, 机组在可靠性分析上属于并联, 而且一般都有备用机组。因为备用机组只在运行机组停止工作时才投入运行, 所以, 这种系统称做被动并联系统。被动并联系统的各机组间包含了并联问题, 即设备的故障与修理互相影响^[3,4], 这就不同于主动并联系统(所有并联机组同时运行)。如近似地认为故障率和修理率与时间独立, 则可以用马尔柯夫过程来分析泵(压气)站中机组系统的可靠性。在分析中首先根据机组投入运行的几种可能状态绘成状态转移图, 列出几种状态的马尔柯夫方程, 然后求解方程。这些运算通常是借助计算机完成的。表 4 是对输油泵站装备 4 台和 3 台泵机组, 按四种不同组合方式运行时, 所计算出的可靠度^[5]。可靠度随组合情况而异, 也与机组的故障率和修理率有关。表 4 中 I、II、III、IV 四种情况分别为: 机组两用两备、三用一备、两用一备与三

用无备, $R(t)$ 、 λ 与 μ 分别为泵机组系统可靠度、泵 机组故障率与修理率。

表 4 泵站泵机组系统可靠度

方式 编号	修理率 $\mu(1/h)$	各种故障率 $\lambda(1/h)$ 值的 $R(t)$				
		0.002	0.001	0.000 8	0.000 5	0.000 25
I	0.2	0.999 998	0.999 998	0.999 998	0.999 999	0.999 999
	0.1	0.999 988	0.999 997	0.999 998	0.999 998	0.999 999
	0.8	0.999 979	0.999 996	0.999 970	0.999 998	0.999 999
	0.04	0.999 846	0.999 978	0.999 988	0.999 996	0.999 999
	0.025	0.999 409	0.999 920	0.999 957	0.999 988	0.999 997
II	0.2	0.999 906	0.999 975	0.999 983	0.999 992	0.999 997
	0.1	0.999 636	0.999 906	0.999 938	0.999 975	9.999 993
	0.08	0.999 436	0.999 854	0.999 906	9.999 881	0.999 989
	0.05	0.997 838	0.999 436	0.999 637	0.999 854	0.999 961
	0.025	0.994 732	0.999 860	0.999 080	0.999 637	0.999 913
III	0.2	0.999 803	0.999 950	0.999 968	0.999 988	0.999 997
	0.1	0.999 226	0.999 803	0.999 874	0.999 950	0.999 988
	0.08	0.998 801	0.999 694	0.999 803	0.999 923	0.999 981
	0.04	0.995 400	0.998 801	0.999 226	0.999 694	0.999 923
	0.025	0.988 800	0.997 007	0.998 058	0.999 329	0.999 804
IV	0.2	0.970 590	0.985 149	0.988 095	0.992 537	0.996 259
	0.1	0.942 322	0.970 590	0.976 379	0.985 149	0.992 537
	0.08	0.928 599	0.963 418	0.970 590	0.981 482	0.990 683
	0.04	0.863 838	0.928 600	0.942 322	0.963 420	0.981 483
	0.025	0.793 832	0.888 997	0.909 832	0.942 419	0.970 590

自控系统是管道系统的管理系统,其功能是控制与调节各主要设备的运行,预防并预报各主要设备或系统的故障。自控系统不仅不能因自身的故障影响管道系统的正常运行,而且还必须有效地管理管道主系统。因此,对自控系统的可靠性要求较高,其系统元件的故障率应较低、修理率较大。重要环节应有必要的冗余设置。自控系统的可靠性即以可用度表示。自控系统的故障表现为:误操作使 SCADA 系统无法操作管道主系统;不能同应用软件交换或传输正确数据;不能向软、硬件上存储或调出、传输数据;丢失数据。根据自控系统中元件的故障率数据、修理率数据及元件的组合方式可计算出其可用度。

从上述的可靠性分析中可以看出,管道所使用的主要元件、设备的基本数据故障率 λ 与修理率 μ 是非常重要的。只有这些数据齐全准确,才能计算出较为可信的可靠性与可用度。国外有关机构为此建有各种用途的可靠性数据库。油气管道可靠性评价可供利用的可靠性数据库(国外)有:ENI 可靠性数据库、海洋可靠性数据第二版 OREDA—92、美国电机及电子工程师学会标准 IEEE Std 500—1984、化工过程安全中心(美国化学工程师学会)过程设备可靠性数据、危险与可靠性信息系统微机数据库 RMC

HARIS、欧洲 1970~1986 年输气管道事故数据、英国气体数据库等。

因为使用设备的性能、操作与修理条件都不尽相同,这些数据对我们不一定完全适用。但是可以做为编制自用数据的基础。数据库是进行可靠性评价的基础,在开展油气管道可靠性评价的研究工作时,应对可靠性数据库给予充分的重视。

参 考 文 献

1. Diane J. Hovey, Edward J. Farmer: Pipeline accident, failure probability determined from historical data. OGJ, 1993, July 12.
2. Е. Р. СТАВРОВСКИЙ, М. Т. СУХАРЕВ, А. М. КАРАСЕВИЧ. Методы расчета надежности Магистральных газопроводов, Недр, 1982.
3. 冯允成 夏国平(译):实用可靠性工程,航空工业出版社(北京),1991年。
4. 万耀青 阮宝湘(主编):机电工程现代设计方法,北京理工大学出版社(北京),1994年。
5. А. Т. ТУМЕРОВ, Р. З. ИРМЯКОВ, Н. Ж. ХАЛЕЗОВА. Влияние показателей надежности магистральных насосных агрегатов на эффективность функционирования нефтеперекачивающих станций, Нефтяное хозяйство, 1979(12).

(收稿日期:1996-02-27)

编辑:艾德铭