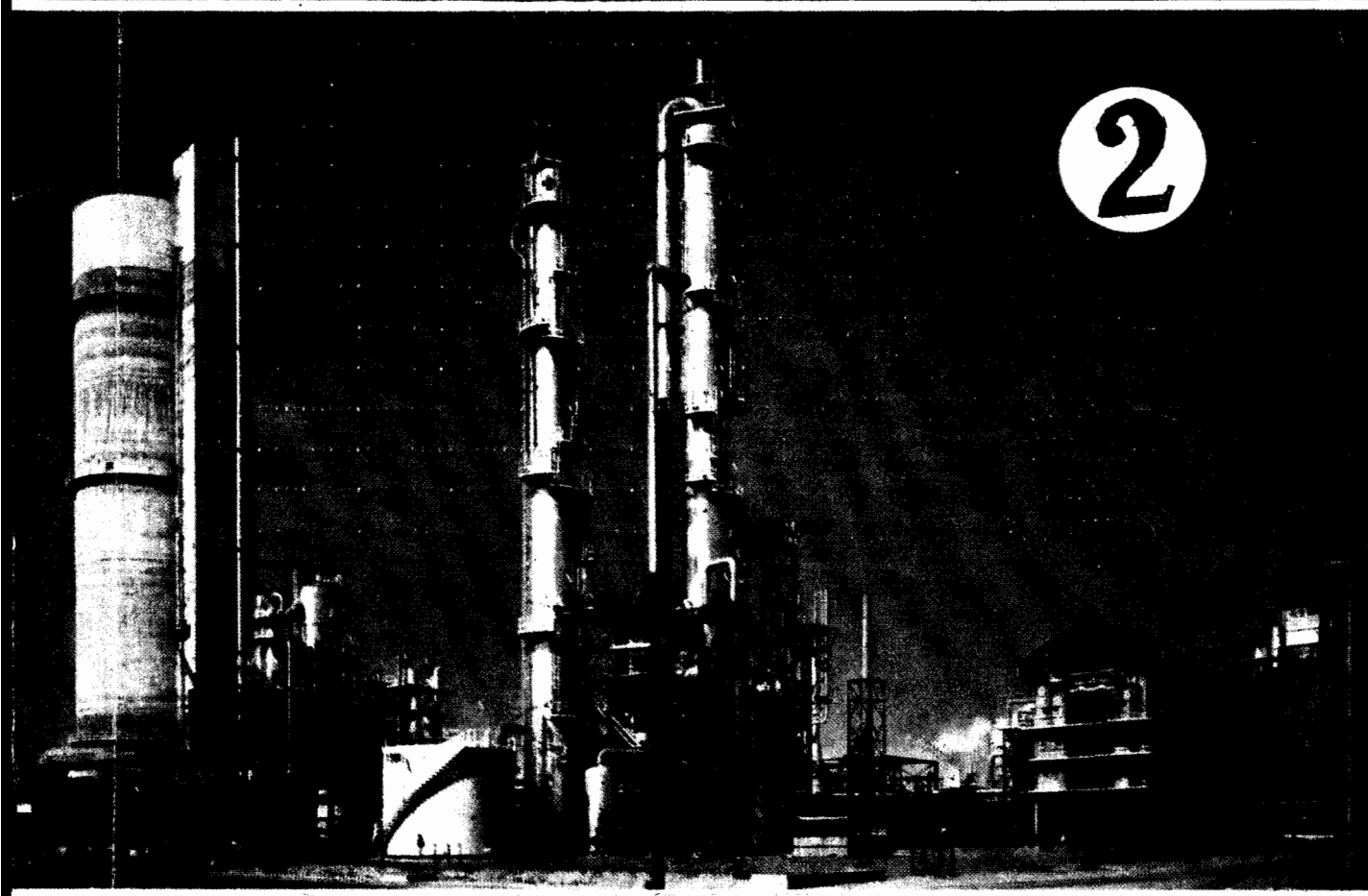


# 大氣肥



1986·DADANFEI 2

# 大氮肥系统故障机理 与可靠性研究

——大氮肥管理技术研究之一

韩文光

(金陵石油化工公司)

\*\*\*\*\*  
 \* **编者按:** 作者将收集到的大量的设备故障数据, 运用统计的方法上升到理性去认识, 提出了自己的观点和看法, 以期对指导大氮肥厂设备运行的可靠性能有所帮助。本文在第六届引进大化肥合成氨技术年会上宣讲后, 得到大家的好评。目前, 我国引进的大化肥装置已运行10年或接近10年了, 许多设备到了易出问题的时候了, 希望有关人员加强对设备管理继续发表自己的看法和经验, 使我国大化肥厂在设备安全运行方面能达到或超过世界先进水平。  
 \*\*\*\*\*

## 一、问题的提出

可靠性工程是二十世纪后半叶兴起的一门科学技术。这种技术之所以取得蓬勃的发展, 是由于当今时代出现了大量复杂的系统与产品, 这些系统与产品已经对人类和社会的政治、经济、生活各个方面带来了巨大的影响。四、五十年代随着军事和电子工业的发展, 美国设立了电子设备可靠性咨询委员会 (AGREE), 开始对可靠性的理论与方法进行研究。七十年代以来, 大多数工业发达国家也都开始了可靠性工程的研究和普及工作。目前可靠性技术的应用范围已从电子工业、核反应堆工程推向飞机、汽车、家用电器等产品领域。并在发电、通讯等大型复杂工业系统的设计中开始应用这一技术。我国可靠性技术的研究与使用也首先始于电子和航天工业。自七十年代后期开始, 在通讯卫星、地下电缆工程、雷达武器等各个领域, 已逐步开始推广应用可靠性工程技术, 并取得了良好的效果。

现代石油化学工业, 由于设备的大型化、单机化、自动化的程度越来越高, 设备的故障停产损失越加巨大。产品的产量、质量及生产经济效益, 对设备的依赖性越来越

大。因而，对设备的可靠性提出了更高的要求。我国七十年代引进的十三套大氮肥装置，每次故障停车造成的经济损失，往往以十几倍甚至数十倍于六十年代以前的老厂。对于这样重要的工厂，是应该具有较高的可靠度的，但无论从我国的十三套工厂还是从世界范围同类型工厂的实际统计来看，这类装置所表现的可靠性，可以说尚不能令人满意。不断发生和出现的故障，迫使人们去思考这样一些问题：大氮肥系统的可靠性为何如此之差？各种故障的发生有没有一定的规律？如何去揭示和认识这些规律，在大氮肥系统管理中是否可以应用可靠性工程技术以采取有效对策从而显著地提高工厂经济效益等等。为了回答这些问题，本文试图结合我国大氮肥工厂近十年来的生产管理实践，探讨现代系统管理技术，设备故障统计与分析理论，可靠性工程等管理理论与技术的实际应用。由于笔者自身水平所限，错误在所难免。如果本文能引起读者对可靠性工程及现代管理技术的兴趣以及更多的大氮肥工作者的探讨，那就实现了笔者撰写此文最大的心愿了。本文执笔过程中曾得到南京栖霞山化肥厂许多同志的大力帮助，脱稿后又得到了南京工学院张安康讲师的指导和修订。在此，表示笔者的由衷感谢。

## 二、大氮肥系统故障特点与机理探讨

设备故障统计理论是可靠性工程基础理论之一。其基本内容是利用统计技术和方法，对零部件、设备或系统的故障模式进行描述和分析，以研究确定故障机理<sup>(1)</sup>。为采取正确对策提高可靠性提供信息和依据。提高系统可靠性的根本措施固然取决于设计阶段，但对已经实际存在着的系统而言，通过具体出现故障的统计与分析，一方面为可靠性预测和可靠性设计提供准确的信息反馈，更重要的是对改进现有系统的可靠性给出明确的方向和决策的依据。因此，故障统计理论也是现代设备管理技术的重要组成部分。

### 1. 基本概念

为了便于本文有关的叙述和研究，首先引入必要的基本概念。

可靠度 (Reliability)：是指系统、机器产品或零部件等在规定的条件下和预期的使用期内，完成其功能的概率<sup>(2)</sup>。或以一批对象（产品、系统等）在工作了时间  $t$  以后仍能无故障工作的幸存部分的百分率表示。因此，也可以称为幸存概率<sup>(1)</sup>。

随着时间的延长，系统与设备的可靠度都要降低，可靠度与时间  $t$  的关系，以可靠度函数  $R(t)$  表示。

反之，对于发生故障的概率则称之为不可靠度函数。或称累计故障函数。用  $F(t)$  表示。

如果有  $n$  台设备（或  $n$  个系统）在同样条件下工作，到时间  $t$  时，发生故障的设备数为  $r(t)$  台，则不可靠度函数为

$$F(t) = \frac{r(t)}{n} \quad (1)$$

可靠度函数则表示为

$$R(t) = \frac{n - r(t)}{n} = 1 - F(t) \quad (2)$$

由此可知

$$R(t)+F(t)=1 \quad (3)$$

故障密度函数：从时间t开始到t+dt之间的故障发生概率，称为故障密度函数，表示为对F(t)的微分

$$\text{即} \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (4)$$

反之，亦可表示为

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (5)$$

平均故障间隔期MTBF(Mean Time Between Failure)。MTBF指对可修复的对象而言，修好后又能继续工作，在此情况下，从一次故障到下一次故障的平均时间间隔，亦可称平均修理间隔期。

MTBF可以μ表示，其单位一般以小时计。

故障率λ：又称瞬时故障率。它的定义是零件、设备或系统工作到某一时间t后，幸存部分在下一个单位时间内发生故障的概率。其数值表现为故障密度与可靠度（幸存概率）之比

$$\text{即} \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (6)$$

很明显故障率λ(t)要比故障密度函数f(t)更具有实际意义。这可以理解为：已经发生了故障的设备或系统是业已产生了的事实，而人们更关心的是，对尚未发生故障的设备或系统（即幸存部分）在下一个单位时间中将何以何种概率出现故障。

## 2. 故障分布类型及其意义

设备故障通常系指事故型故障（指外界事故影响。如管理不善，操作失误等等）和自身故障的总称。设备自身故障按其技术性质分类，一般分为老化性、磨损性、腐蚀性和断裂性四大类。现代设备管理科学的研究表明，各种故障的分布形态，按其性质的不同，通常都具有一定的规律。大多数是能够用几种类型的分布函数来近似地反映出来。常见的数学模型有以下三种。

(1) 负指数分布。这是在化工生产和成套系统设备中最常见的一种重要的分布。在正常生产过程中，化工系统流程中的设备及其零部件的故障，大多是随机的，出现故障的概率表现为一个常数，而与工作时间的长短无关。在这种情况下，可以证明(1)

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (7)$$

由式(5)得

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (8)$$

由式(3)得

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (9)$$

由式(6)得

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (10)$$

式(9)和(10)表明：当系统设备的故障机理服从负指数函数时，其可靠度 $R(t)$ 也是一个负指数函数。而其故障率函数 $\lambda(t)$ 表现为常数 $\lambda$ 。而且，根据Drenick极限定理(2)可以得知，对由相当多设备所组成，一般在发生故障后可以修复重新投产的化工系统来说，其故障率

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (11)$$

根据式(7)(9)(10)，可以画出在这种故障机理情况下的 $f(t)$ ， $R(t)$ ， $\lambda(t)$ 和时间的关系。如图1所示。

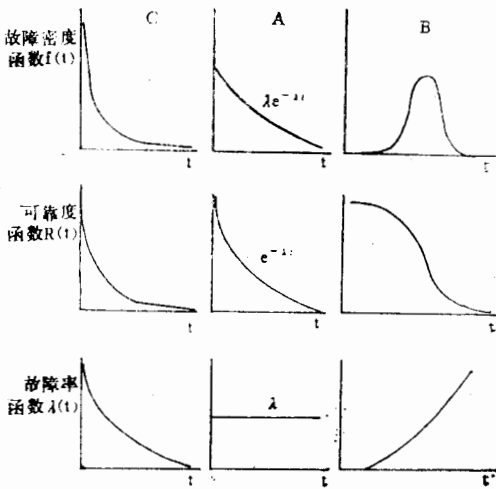


图1 三种函数分布曲线

图中：C—超指数分布，试运转故障；A—负指数分布，偶发故障；B—正态分布，耗损故障。

(2) 正态分布。又称耗损型分布。其故障密度函数 $f(t)$ 呈一个对称钟形的正态分布。其故障机理为耗损型故障。当设备处于使用寿命后期，由于整体各部分的磨损与蚀损接近极限，此时只能靠极为频繁的维修来保持运行，设备处于上升型故障期。其数学模型一般表现为正态分布

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (12)$$

式中 $Z$ 为正态分布参数。

各种函数曲线见图1所示。

(3) 超指数分布。又称试运转型分布。很多类型的设备，在安装后不久试运转初期的一段时间内，发生故障的概率要比以后正常使用时的概率大得多。反映在故障密度函数 $f(t)$ 上，先是急剧变化的指数下降阶段，然后是缓慢下降阶段。产生这一现象的原因，是由于制造、安装过程中存在固有的缺陷。在试运转阶段才陆续暴露并被排除。因而，这一类型的故障可称为试运转型故障。

超指数函数比较复杂，一般可用威布尔(Weibull)函数在一定条件下的分布函数表示。这时，可靠度用下式表示(3)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (13)$$

式中的 $m$ 称为形状参数， $t_0$ 称为尺度参数。威布尔分布，随着 $m$ 值 $< 1$ ， $= 1$ ， $> 1$

的种种变化而改变形状。当 $m < 1$ 时，故障特性接近于试运转型超指数函数。当 $m = 1$ 时等于负指数函数。当 $m = 3 \sim 4$ 时近于正态分布。其故障率随 $m$ 值不同的变化如图2所示。可以看出，不同条件下的威布尔函数包括了上述三种不同故障机理的函数分布。

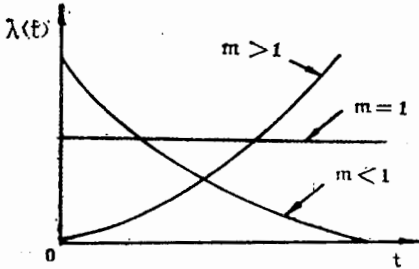


图2 威布尔函数三种范例

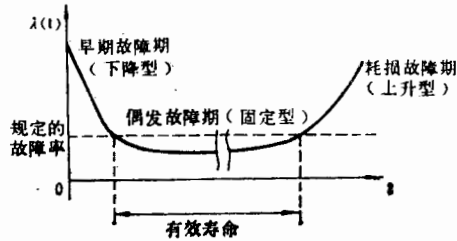


图3 典型的故障模型曲线

(4) 复杂设备与系统在整个使用期限内的典型故障模型。大量事实和研究结果表明，复杂设备与系统的故障发生状态，随着时间的推移，从设备安装投产运行直至设备的自然寿命终了的整个使用期限，一般都遵循着如图3所示的一种故障模型。这个图形很像浴盆，故称浴盆曲线 (bath-tub Curve)。图中明显地包括了故障发生频率不同的三个时期。其数学模型分别相应于前节所述的三种函数分布，并可为威布尔函数的三种范例所包括：

- 1) 早期故障期。相对应于超指数函数试运转型故障，表现出很高的故障率并迅速下降。
- 2) 偶发故障期。在这一时期，故障的特点是偶发的，随机的。通过良好的运转及维修管理，可以把偶发故障压缩在某一最低限度。这一个时期是设备运行的最佳时期，称为设备的有效寿命。
- 3) 耗损故障期。设备或系统经过有效寿命期后，故障率再度上升，此时就进入耗损故障期。其特点是由于磨损、腐蚀、疲劳等原因引起的老化性故障。

浴盆曲线所反映的是一般设备的故障率特征。对于不同特点的设备，其 $\lambda$ 的绝对水平、三个阶段的相对长度等，差别可以很大，其中有一两个阶段甚至可以不存在，如对可靠性要求很高的飞行设备和采用无维修设计的设备来讲，第三阶段并不存在。对于很多采用成熟设计并有严格质量保证的运转设备，以及许多化工塔器设备，第一阶段并不十分明显。

### 3. 大氮肥系统故障统计与讨论

我国早期引进的十三套大氮肥厂至今已有6~8年的运转历史。虽然这些工厂的设计、制造、运转、维修等条件不尽相同，但从宏观上仍可以看成为近似的系统而进行统计。

在故障统计的各种数学模型和参数中，最重要和最直观的是瞬时故障率函数 $\lambda(t)$ 曲线，对于可以修复的复杂化工系统，如前所述，可以用平均故障率来代替。即式(11)

$$\lambda = \frac{1}{\mu}$$

$\mu$  即平均修理间隔期或平均无故障工作时间MTBF。

根据实际数据求MTBF时，可用下式

$$MTBF = \frac{T}{r} \quad (14)$$

式中T—总工作时间（各个观测对象工作时间总和），

r—在T时间内对象的总故障数。

为了保证统计结果的统一性，规定：

(1) 以每厂的合成氨系统做为一个统计对象，以系统停车次数代表故障次数（包括所有各种事故及修理停车）。

(2) 以一年做为一个时间间隔进行平均统计，每年均以工作7200小时(300天)计。

(3) 在迭加各厂数据时，为使工作时间有一个统一基础，均以各厂投产年份的下一个年头做为第一个工作年。（前六套以1977年计，云天化以1978年计，赤天化及法型三厂以1979年计，两湖以1980年计）。

各厂历年系统停车次数如表1所示。

根据表1计算的各厂自投产后第一年起的平均系统故障率 $\lambda$ （包括第6~8年相应预测部分），计算结果绘成曲线如图4所示。

表1 十三套大氮肥厂合成装置历年系统停车次数统计

| 工 厂  | 年 份  |      |      |      |      |      |      |      | 投 产 日 期    |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
|      | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 |            |
| 四 川  | 16   | 4    | 5    | 4    | 1    | 8    | 2    | 2    | 76、6、22、投产 |
| 大 庆  | 20   | 6    | 8    | 12   | 12   | 10   | 7    | 7    | 76、9、2     |
| 辽 河  | 24   | 14   | 8    | 9    | 16   | 10   | 2    | 6    | 76、9、26    |
| 齐鲁二化 | 9    | 6    | 6    | 3    | 7    | 5    | 7    | 5    | 76、10、9    |
| 泸天化  | 26   | 9    | 3    | 6    | 5    | 4    | 6    | 5    | 76、11、28   |
| 沧 州  | 19   | 8    | 6    | 8    | 13   | 6    | 8    | 6    | 77、4、2     |
| 云天化  |      | 11   | 13   | 2    | 8    | 4    | 4    | 5    | 77、10、30   |
| 赤天化  |      |      | 15   | 12   | 9    | 3    | 7    | 6    | 78、9、30    |
| 栖 化  |      |      | 21   | 13   | 9    | 18   | 10   | 7    | 78、10、9    |
| 安 庆  |      |      | 14   | 14   | 13   | 21   | 17   | 17   | 78、11、30   |
| 广 州  |      |      | 21   | 21   | 19   | 19   | 17   | 17   | 78、12、6    |
| 湖 南  |      |      |      | 9    | 5    | 3    | 3    | 4    |            |
| 湖 北  |      |      |      | 6    | 11   | 8    | 15   | 9    |            |
| 合 计  | 114  | 58   | 120  | 119  | 128  | 119  | 105  | 96   |            |

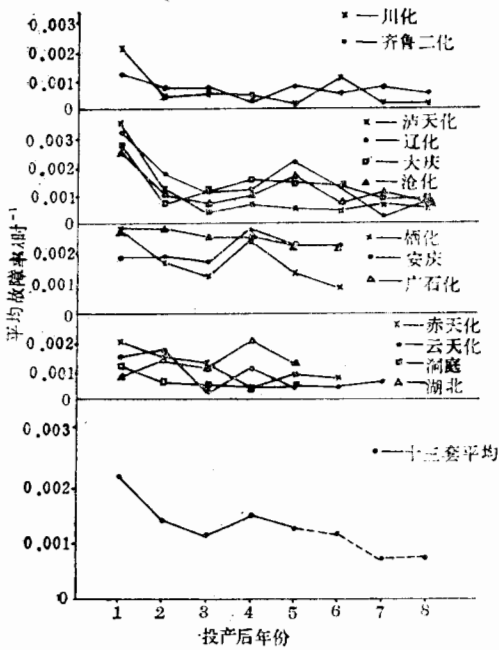


图4 大氮肥厂历年平均故障率曲线

小时。美型厂居中，平均 $\lambda$ 为0.001，MTBF为1000小时。法型厂最高， $\lambda$ 为0.0022，MTBF为455小时。与日型厂相差达三倍多。

根据凯洛格公司于七十年代中期对北美30个大型氨厂及八十年代初期对世界范围内88个大型氨厂调查的资料报导〔4, 5〕，国外大氮肥工厂故障停车情况及相应折算数据如表2、表3所示。

表2 1969—1976年北美若干大型氨厂故障停车情况

| 年 限                           | 1969—1970 | 1971—1972 | 1973—1974 | 1975—1976 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 工 厂 数                         | 22        | 27        | 30        | 30        |
| 停 车 总 天 数                     | 50        | 45.5      | 49        | 50        |
| 停 车 次 数                       | 9.5       | 8.5       | 10.5      | 11        |
| MTBF(小时)                      | 922       | 1030      | 834       | 796       |
| $\lambda$ (小时 <sup>-1</sup> ) | 0.0011    | 0.00097   | 0.0012    | 0.0013    |

\* 图中虚线部分是将未到运转年限的工厂做了预计计算而得。例如：第六年，已知前11厂总计停车108次。则预计13个厂的停车次数为 $108 + \left(\frac{108}{11} \times 2\right) = 128$ 次，

$$MTBF = \frac{7200 \times 13}{128} = 731.3 \text{ 小时}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = 0.00137 \text{ 小时}^{-1}$$

根据图4的统计结果，可以对大氮肥系统故障机理与特点得出下列认识：

1) 从5~8年的运转实践来看，我国大氮肥系统目前表现出来的故障特征，基本符合浴盆曲线的早期和中期特征。一般在投产二年以内表现为服从超指数函数分布。投产第三年起表现为服从于负指数函数分布。

2) 我国大氮肥系统在偶发故障期，故障率平均水平约为0.001小时<sup>-1</sup>。由此可知其MTBF为1000小时。如果对不同类型工厂分别进行观察（见图4曲线上面四组），还可以发现，三种类型的系统在偶发故障期的 $\lambda$ 数值还有较大的差别。其中日型厂最低， $\lambda$ 为0.0006，MTBF为1667



表3 1977—1981年世界各地若干大型氨厂故障停车情况

| 地 区                           | 北 美       | 欧 州       | 其 他       | 全 世 界  |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 年 限                           | 1977—1981 | 1978—1981 | 1978—1981 |        |
| 工 厂 数                         | 39        | 24        | 25        | 88     |
| 停车总天数                         | 44.3      | 65.6      | 75.1      | 55.2   |
| 停车次数                          | 8.4       | 8.7       | 11.1      | 9.2    |
| MTBF(小时)                      | 1043      | 1007      | 789       | 952    |
| $\lambda$ (小时 <sup>-1</sup> ) | 0.00069   | 0.00099   | 0.0013    | 0.0011 |

从我国大型氨厂和世界大型氨厂平均水平对比, 平均故障率  $\lambda$  数值基本相同, 由此可以认为,  $\lambda = 0.001 \text{小时}^{-1}$  这个数值, 是大氮肥系统设计所形成的可靠度的表现。要使基本故障率本身进一步下降, 必须通过工艺和设备的技术改造才能实现。就国内三种不同类型工厂反映出三种不同故障率现象而言, 也可以进一步证实上述观点。同时, 也给人们以启发, 可以通过日型厂与法型厂的实际故障调查与系统可靠度分析、比较, 找出提高法型厂乃至美型厂系统可靠度的措施, 减少故障停车, 进一步提高工厂的经济效益。

3) 仔细观察十三套系统的故障率曲线, 可以看到, 有半数以上的工厂, 在投产后第3~4年, 出现了故障率明显上升的趋势。这一趋势在十三套平均故障率曲线中, 也在投产第三年之后表现了出来。

从明显具有这一故障特征的辽河、沧州、云天化、栖霞、安庆、湖北等六厂, 在偶发故障期故障率各为该厂最高数字的年份实际停车原因的分析, 可以得到下列数字:

六厂该年份总停车次数为92次。其中属于偶发性事故(如断电、原料故障、操作事故、仪表跳车、轴承烧坏、密封刺漏、氨涨库、紧固件松动等等)63次, 占68.5%。

其中属于老化性事故(如换热器腐蚀泄漏、透平断轴断叶片、阀杆及管道疲劳断裂等等)共29次, 占31.5%。在这29次故障中, 换热器腐蚀泄漏达20次, 占老化故障的68.9%(在统计中, 所有仪表故障均列入偶发性故障, 共计18次。如对其原因详细研究, 可能也包括一部分老化故障在内)。

上述数字表明, 尽管大氮肥系统主体设备的设计寿命均在100000小时以上, 但在整个系统的许多辅助设备、以及某些主要设备的少数零部件, 实际寿命远远小于100000小时。因而, 较早地发生了耗损型故障, 造成系统故障的上升, 对于这一问题, 应引起人们足够的重视。

### 三、大氮肥系统可靠度研究

#### 1. 可靠度函数曲线

对属于负指数型的偶发性故障, 式(9)表明, 其可靠度函数也为负指数型。本文

第二节的分析结果，证明大氮肥系统在有效寿命期内运行时，其故障特性符合偶发型故障特性，其  $\lambda = 0.001$  小时<sup>-1</sup>。已知

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

由此，可以求出大氮肥系统的理论可靠度函数，（均指在偶发故障期，下同）。见表 4 和图 5。

表 4 大氮肥系统理论可靠度数值(取  $\lambda = 0.001$ )

|              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 运行时间<br>(小时) | 20   | 50   | 80   | 100  | 200  | 300  | 400  | 500  | 700  |
| $\lambda t$  | 0.02 | 0.05 | 0.08 | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.7  |
| 可靠度R(t)%     | 98.0 | 95.1 | 92.3 | 90.4 | 81.8 | 74.0 | 67.0 | 60.6 | 49.6 |

|              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 运行时间<br>(小时) | 1000 | 1500 | 2000 | 2400 | 3000 | 4000 | 4800 | 6000 | 7200 |
| $\lambda t$  | 1.0  | 1.5  | 2.0  | 2.4  | 3.0  | 4.8  | 4.8  | 6.0  | 7.2  |
| 可靠度R(t)%     | 36.8 | 22.3 | 13.5 | 9.1  | 5.0  | 1.8  | 0.82 | 0.25 | 0.08 |

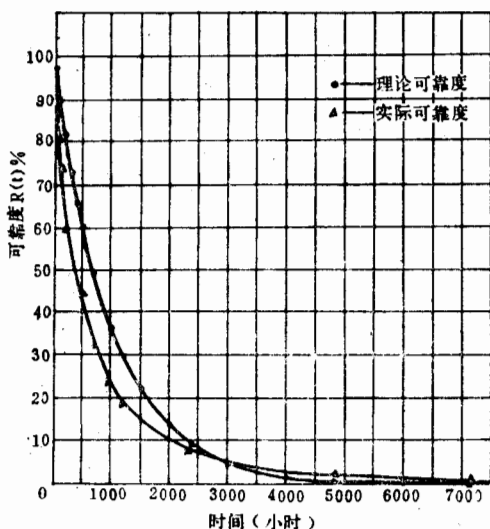


图 5 大氮肥系统可靠度曲线

全国大氮肥系统在进入偶发性故障期以后时期内，每次故障停车修复或恢复后开车，做为一个统计对象，也就是将其看成一个新的系统（发生故障的零部件已修复或更换，系统中存在着新的零部件和已经使用了数年的零部件共存的现象，但由于从宏观上看此时系统及其零部件尚未达到耗损故障期，此时期产生的故障多系随机偶发性的，因此，这时修复的系统是可以做为一个新的系统看待）。那么，整个故障停车次数，就可以成为

## 2. 大氮肥系统的实际可靠度

根据可靠度定义，图 5 曲线可以做这样的具体理解：设在某一工作时间  $t$  时  $R = 70\%$ ，可以认为，如果有 100 个这样的系统运转，其中有 30 个系统在时间  $t$  以前将发生故障。而能坚持到  $t$  以后继续运行的只剩下 70 个系统。按照表 4 的数据，当  $t = 1000$  小时时只剩下 37 个系统。而能够坚持运行到 100 天以上的，只有 9 个系统。能运行到 300 天（7200 小时）以上的则仅有 0.08 个系统。

上述数据是否符合实际情况呢？

我们可以以这样的方式进行统计：将

可靠度的分母项。而将所有经历了不同连续运转时间的各个系统，按不同的实际运行时间层次分为若干组进行统计相加，成为各个相应时间的可靠度的分子项。这样就可以得出大氮肥系统的实际可靠度函数 $R(t)$ 数据。

按上述原则对1979~1984年期间全国大氮肥系统按不同的连续运转天数分组统计的系统数及由此计算的相应时间的生存概率（即可靠度） $R(t)$ 列于表5，为便于对比，将按相等时间计算的理论 $R(t)$ 也列入该表。并将实际统计的 $R(t)$ 标注在图5的座标中。

表5 十三套大氮肥系统按历年实际运行情况统计的系统可靠度\*

| 分<br>项<br>时间<br>(天) | 失效系统<br>数 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 总计<br>失效数 | 累计<br>失效数 | 幸存<br>系统数                                    | 实际可靠度<br>(生存概率) $R(t)$<br>以小时计 % |       | 理论可靠度<br>$R(t)=e^{-\lambda t}$<br>$\lambda = 0.001$ |
|---------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|-----------|-----------|--|----------------------------------|-------|---|
|                     |           | 年    | 年    | 年    | 年    | 年    | 年    |           |           |  |                                  |       |   |
| 0—1                 | 2         | 12   | 9    | 14   | 8    | 11   | 56   | 56        | 540       | $R(24) = \frac{540}{596} \times 100 = 90.6$  |                                  | 97.6  |   |
| 1—3                 | 7         | 8    | 16   | 10   | 10   | 12   | 63   | 119       | 477       | $R(72) = \frac{477}{596} \times 100 = 80.03$ |                                  | 93.1  |   |
| 3—5                 | 4         | 6    | 10   | 4    | 5    | 2    | 31   | 150       | 446       | $R(120) = 74.83$                             |                                  | 88.7  |   |
| 5—10                | 6         | 11   | 15   | 25   | 19   | 14   | 90   | 240       | 356       | $R(240) = 59.73$                             |                                  | 78.7  |   |
| 10—20               | 15        | 14   | 18   | 17   | 19   | 8    | 91   | 331       | 265       | $R(480) = 44.46$                             |                                  | 61.9  |   |
| 20—30               | 5         | 10   | 23   | 14   | 16   | 6    | 74   | 405       | 191       | $R(720) = 32.05$                             |                                  | 48.7  |   |
| 30—40               | 4         | 6    | 11   | 7    | 8    | 8    | 44   | 449       | 147       | $R(960) = 24.66$                             |                                  | 38.3  |   |
| 40—50               | 4         | 5    | 4    | 8    | 5    | 4    | 30   | 479       | 117       | $R(1200) = 19.63$                            |                                  | 30.1  |   |
| 50—100              | 5         | 12   | 14   | 13   | 12   | 13   | 69   | 548       | 48        | $R(2400) = 8.05$                             |                                  | 9.1   |   |
| 100—200             | 2         | 4    | 3    | 9    | 6    | 13   | 37   | 585       | 11        | $R(4800) = 1.85$                             |                                  | 0.82  |   |
| 200—300             | 2         | 2    | 1    | 1    | 2    | 1    | 9    | 594       | 2         | $R(7200) = 0.34$                             |                                  | 0.08  |   |
| >300                | 0         | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 2    | 596       | 0         | $R(>7200) < 0.34$                            |                                  | <0.08 |   |
| 合 计                 | 56        | 91   | 125  | 122  | 110  | 92   | 596  |           |           |  |                                  |       |   |

表5和图5所示的数据表明，大氮肥系统六年左右的实际运转情况是完全符合故障分析与可靠性工程理论的。其可靠度函数的变化，尽管在绝对数字上有一定的误差（概率理论的数字是一个数学期望值，一定范围的误差也是必然的），然而就图5所显示

\*根据图4所示各厂的不同偶发故障期，本表数字1979年不包括法型三厂及两湖，1980年不包括两湖，其余年份均包括所有各厂。本表数据取自各厂技术经济月报及《大氮肥》有关年报。

的曲线特征来看，可以十分明显地看出其指数分布的规律。因此，我们应该根据指数分布的特点对大氮肥系统的可靠度进行科学地分析与研究。

从上述认识出发，在认真对表 5 数据进行分析之后，起码可以得出如下几点结论：

(1) 可以运用负指数函数的可靠度函数公式对大氮肥系统在有效寿命期内的可靠度进行预测与研究，即

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{\mu}}$$

(2) 在一定客观条件下（诸如系统的设计水平，设备的制造水平，工厂的管理水平及外界环境等），大氮肥系统长周期运转的可能性，是受幸存概率规律所限制的。就个别情况而言，较多地突破概率范围是有可能的。而就宏观指导思想来看，在生产管理上不宜片面强调追求长周期指标。否则，必将事倍功半，甚至事与愿违。不但可能造成不安全的隐患及经济的损失，还会挫伤广大职工的积极性。这一认识，近几年来通过实践经验的总结，已经为许多大氮肥工作者所觉察和接受。通过对大氮肥系统可靠度的分析，是可以找出其理论根据的。

(3) 在现有大氮肥系统的条件下，对于提高大氮肥系统可靠度问题，人们是可以大有作为的。但是要取得良好的经济效果，就必须进一步研究可靠性工程及现代设备管理工程理论。根据大氮肥系统的特点，找准关键问题，必将能把我国大氮肥系统的管理推向世界先进水平。为此目的，本文拟用少量的篇幅对大氮肥系统可靠度计算与改进方向进行初步的讨论。

### 3. 大氮肥系统可靠度的计算和研究

为了进行计算，首先引入关于可靠性模型的若干概念。

#### (1) 串联模型

当考察一个系统的功能时，其中有一个构成要素发生故障，就会引起全系统发生故障，对于具有这样性质的系统，就可以认为是串联模型。这时，系统可靠度  $R_s(t)$  等于构成系统诸要素的可靠度  $R_i(t)$  之乘积

$$\begin{aligned} R_s(t) &= R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_n(t) \\ &= \prod_{i=1}^n R_i(t) \end{aligned} \quad (15)$$

如果各要素的可靠度遵循指数分布，即

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (16)$$

$$\text{由此可得 } R_s(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda t} \quad (17)$$

$$\text{此时 } \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (18)$$

例：由四个相同阀门串联组成的一个系统，每一阀的瞬时故障率均为相同的常数， $\lambda = 0.0001 \text{小时}^{-1}$ ，求

1) 运行1000小时后系统的可靠度  $R_s(t)$ ；

2) 系统无故障平均工作时间MTBF。

解

1) 每阀工作1000小时后的可靠度为

$$R(1000) = e^{-0.0001 \times 1000} = 90.5\%$$

根据式(15), 整个系统工作1000小时后的可靠度为

$$R_s(1000) = 0.905 \times 0.905 \times 0.905 \times 0.905 = 67.0\%$$

2) 根据式(18), 系统的故障率

$$\lambda = 0.0001 + 0.0001 + 0.0001 + 0.0001 = 0.0004 (\text{小时}^{-1})$$

根据式(11), 系统的无故障工作平均时间

$$MTBF = \frac{1}{0.0004} = 2500 (\text{小时})$$

$$\text{每阀的MTBF} = \frac{1}{0.0001} = 10000 (\text{小时})$$

### (2) 并联模型

与串联模型不同, 并联模型中有两个以上的构成要素并联工作。只要其中有一个要素工作, 系统功能就能维持。此时, 系统的不可靠度 $F_s(t)$ , 等于各并联要素不可靠度的乘积, 即

$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (19)$$

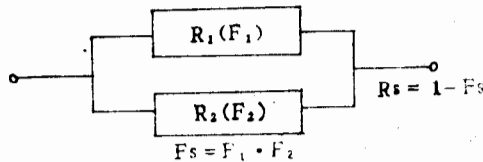


图6 二要素并联模型

图6列举了最简单的二要素并联模型, 在这样的系统中, 系统的可靠度

$$R_s = 1 - F_s = 1 - F_1 \times F_2 = 1 - (1 - R_1) \times (1 - R_2) \quad (20)$$

如果两个要素的可靠度均为90%, 则并联系统的可靠度

$$\begin{aligned} R_s &= 1 - (1 - 0.9) \times (1 - 0.9) \\ &= 1 - 0.01 = 99\% \end{aligned}$$

这就是说, 在并联模型中, 通过附加的多余要素, 可以提高系统的可靠度。这种性质称为冗余(redundancy)。在工业设计中通称为冗余设计或备用设计。在实际生产中是很容易理解的传统概念。

以上简单介绍了有关串联并联模型可靠度计算公式。下面讨论大氮肥系统的可靠度实际计算。

表6列举了国内外各地区大氮肥系统的实际故障统计数字和根据这些数字进行的有

表 6 世界各地大氮肥系统实际故障停车统计分析及运行720小时的可靠度推算数据表

| 统计来源<br>项 目<br>类别 | 1969~1976年北美22~30个大型<br>氨厂统计平均数字 |           |              |                                  | 1977~1981年世界88个大型氨<br>厂统计平均数字 |           |           |              | 1980~1984年我国十三套大<br>型氨厂统计平均数字    |                |           |           |              |                                  |                |
|-------------------|----------------------------------|-----------|--------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|--------------|----------------------------------|----------------|-----------|-----------|--------------|----------------------------------|----------------|
|                   | 年停车<br>次数                        | 年停车<br>天数 | MTBF<br>(小时) | $\lambda$<br>(小时 <sup>-1</sup> ) | 可靠度%<br>R(720)                | 年停车<br>次数 | 年停车<br>天数 | MTBF<br>(小时) | $\lambda$<br>(小时 <sup>-1</sup> ) | 可靠度%<br>R(720) | 年停车<br>次数 | 年停车<br>天数 | MTBF<br>(小时) | $\lambda$<br>(小时 <sup>-1</sup> ) | 可靠度%<br>R(720) |
|                   | 按故障类型划分                          | 5.38      | 23.9         | 1472                             | 0.00068                       | 61.3      | 4.8       | 19.1         | 1651                             | 0.00061        | 64.4      | 3.89      | 10.8         | 2036                             | 0.00049        |
| 设备                | 1.13                             | 1.13      | 7008         | 0.00014                          | 90.4                          | 0.9       | 1.6       | 8808         | 0.00011                          | 92.4           | 0.67      | 1.13      | 11821        | 0.000085                         | 94.1           |
| 电气                | 1.5                              | 1.13      | 5230         | 0.00019                          | 87.2                          | 1.7       | 1.7       | 4656         | 0.00021                          | 86.0           | 1.46      | 2.03      | 5425         | 0.00018                          | 87.8           |
| 仪表                | 0.63                             | 19.4      |              |                                  |                               | 0.8       | 21.8      |              |                                  |                | 1*        | 30        |              |                                  |                |
| 停修**              | 1.3                              | 3.13      | 6096         | 0.00016                          | 89.1                          | 1.0       | 11.0      | 7920         | 0.00013                          | 91.3           | 1.77      | 6.32      | 4475         | 0.00022                          | 85.1           |
| 其他**              | 9.9                              | 48.7      |              |                                  | 40.6                          | 9.2       | 55.2      |              |                                  | 43.3           | 8.79      | 50.3      |              |                                  | 45.0           |
| 合计                | 1.5                              | 7         | 5280         | 0.00019                          | 87.2                          | 0.6       | 3.6       | 13200        | 0.000076                         | 94.7           | 0.15      |           | 52860        | 0.000019                         | 98.6           |
| 按主要子系统划分          | 0.5                              | 3         | 15840        | 0.000063                         | 95.6                          | 0.3       | 2.4       | 26400        | 0.000038                         | 97.3           | 0.34      |           | 23294        | 0.000043                         | 97.0           |
| 一段转化              | 1                                | 2         | 7920         | 0.00013                          | 91.1                          | 0.6       | 1.8       | 13200        | 0.000076                         | 94.7           | 0.83      |           | 9542         | 0.0001                           | 93.1           |
| 二段转化              | 0.5                              | 2         | 15840        | 0.000063                         | 95.6                          | 0.6       | 1.6       | 13200        | 0.000076                         | 94.7           | 0.23      |           | 34434        | 0.000029                         | 98.0           |
| 净化                | 2                                | 7.5       | 3960         | 0.00025                          | 83.5                          | 2.2       | 6.8       | 3600         | 0.00028                          | 81.7           | 2.06      |           | 3845         | 0.00026                          | 82.9           |
| 合成                | 0.5                              | 1.5       | 15840        | 0.000063                         | 95.6                          | 0.6       | 2.9       | 13200        | 0.000076                         | 94.7           | 0.2       |           | 39600        | 0.000025                         | 98.2           |
| 主要透平              | 6                                | 23        |              |                                  |                               | 4.9       | 19.1      |              |                                  |                | 3.81      |           |              |                                  |                |
| 压缩机组              | 0.5                              | 1.5       | 15840        | 0.000063                         | 95.6                          | 0.6       | 2.9       | 13200        | 0.000076                         | 94.7           | 0.34      |           | 23294        | 0.000043                         | 96.9           |
| 其他设备              | 0.75                             | 22008     | 0.000045     | 96.8                             |                               |           |           |              |                                  | 95.6           | 0.93      |           | 8516         | 0.00012                          | 91.7           |
| 合计                | 0.34                             |           | 14952        | 0.000067                         | 95.3                          |           |           |              |                                  |                | (0.62)    |           |              |                                  |                |
| 废热锅炉              | 0.75                             |           | 22008        | 0.000045                         | 96.8                          |           |           |              |                                  |                |           |           |              |                                  |                |
| 换热器<br>(其中水冷器)    |                                  |           |              |                                  |                               |           |           |              |                                  |                |           |           |              |                                  |                |

\*\*此数字为估算数。\* \*此栏包括原燃料供应不足、产品胀库、操作事故等。

关可靠度的数据计算。表中的数据来源于两个方面：一个是凯洛格公司调查的结果。一个是国内十三套大氮肥厂实际运行情况。仔细研究表中的各种数据可以得出许多令人感兴趣的、认识。首先，可以看到在世界不同地区、不同范围工作的大氮肥系统，不仅整个系统的MTBF和 $\lambda$ 十分相近，而就其组成原因分析来看，无论按故障类型划分还是按主要子系统划分，其数据有相当大的部分是近似的。

由此，可以得出这样的结论：大氮肥系统的故障原因有相当的规律性，其中大部分平均数据，是可以用来做为系统可靠度计算的根据。目前，国外已出版了不少资料，有关平均故障率和修理时间的数据，可供设计和计算者参考<sup>(6, 7)</sup>，其中有些数据还与本文接近。

对于大型复杂系统的可靠度计算，应该按照设备、部件、零件的不同层次，以及这些对象在各个层次中不同的功能和上一层对象故障的逻辑关系来划分出串联或并联模型。只有对故障形成“或”门逻辑关系的对象才组成串联模型，而“与”门关系则属于并联模型。大氮肥系统的部分设备和子系统故障逻辑关系如图7所示。

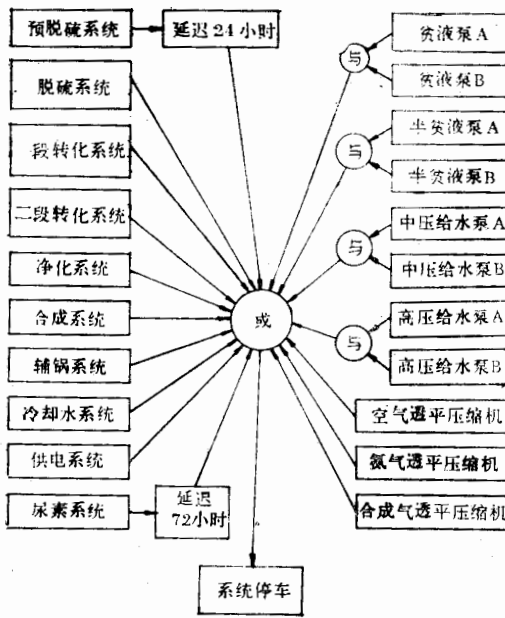


图7 大氮肥系统故障停车部分逻辑关系\*

$$MTBF = \frac{330 \times 24}{0.15} = 52800(\text{小时})$$

$$\lambda = \frac{1}{52800} = 1.89 \times 10^{-5}(\text{小时}^{-1})$$

$$R(720) = e^{-\lambda t} = e^{-0.000019 \times 720} = 98.6\%$$

\* 图中不包括全部子系统及设备，为表达逻辑关系起见，将部分运转设备由系统中取出排列。

然后求各子系统的可靠度，对于设备系统，根据式(15)

$$R_{\text{设备}}(720) = 0.986 \times 0.970 \times 0.931 \times 0.980 \times 0.829 \times 0.982 = 71.0\%$$

最后，求出整个大氮肥系统的可靠度

$$R_s(720) = 0.710 \times 0.941 \times 0.878 \times 0.851 = 49.9\% \text{ (未包括每年一次系统停修)}$$

由上述计算可以看出大氮肥系统可靠度低的主要关键在于设备系统。而设备系统的主要关键在于透平压缩机。

如果采取措施，使透平压缩机的 $R(720)$ 由82.9%提高到与其他系统相近的95%，则 $R_{\text{设备}}(720)$ 将由71.0%上升到81.4%，如果六个次子系统都能提高到98.0%，则整个设备子系统将上升到88.6%。由此再计算整个系统可靠度

$$R'_s(720) = 0.814 \times 0.941 \times 0.878 \times 0.851 = 57.2\%$$

$$R''_s(720) = 0.886 \times 0.941 \times 0.878 \times 0.851 = 62.3\%$$

以上两个数据计算整个系统的年停车次数，将得到表7所示的结果（计算方法见下节式(22)）。

表7 不同可靠度的年停车次数

|          |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|
| R(720)   | 49.9% | 57.2% | 62.3% |
| MTBF(小时) | 1036  | 1289  | 1522  |
| 年停车次数    | 7.6   | 6.1   | 5.2   |

#### 4. 提高大氮肥系统可靠度的方向

对于像大氮肥这样的石油化工生产系统，其工作时间是没有选择余地的，自然不能采取远离MTBF范围工作。一般来说，每个系统都只有运行到产生故障时才被迫停车，因而应该根据其技术

经济的特点提出正确的要求。这就是降低故障率 $\lambda$ ，从而延长平均无故障间隔期MTBF，以求得最好的经济效果。然而，为了降低 $\lambda$ ，一般情况下，将会引起投资费用的升高。因此，对于可靠度的正确选择，应该是在上述不同影响之间实现最佳的平衡，以求得总体上的最好经济效益。在专门研究了有关可靠性设计的论著〔2〕基础上，本文仅对已建成投入运行的大氮肥系统的可靠度问题进行了一些基本的探讨。对其中许多专题的深入研究将在另外的篇幅中进行论述。

(1) 提高大氮肥系统可靠度的经济准则。提高大氮肥系统可靠度的含义是针对相等的时间而言的。例如

已知MTBF = 1000小时 则 $R(720) = 48.6\%$

若 MTBF = 2000小时 则 $R(720) = 69.8\%$

因此，对于已运行系统，提高系统可靠度问题可以简化为减少系统故障停车次数，即降低 $\lambda$ 、提高MTBF的问题。

在我国现行经济体制和价格政策的条件下，每个大氮肥系统的每次故障停车所造成的直接经济损失可按下式计算

$$M = A + B + C \tag{21}$$

M—每次停车的直接经济损失，

A—停车期间减产引起的利税损失，



B—开停车物料经济损失,

C—其他损失(尿素系统物料损失,检修费用等)。

根据表6有关数据及我国十三套大化肥系统平均水平推算,可取下列数字为计算基础:

每次故障停车时间取  $\frac{20.3}{7.79} \times 24 \approx 63$ (小时),

每小时尿素产量取70吨,

每吨尿素利税对气头厂取200元,对油头厂取100元,

每小时开工物料损失(对氨系统):

气头厂  $180 \times 42 \times 0.6 = 4536$ (元/时),

油头厂  $280 \times 42 \times 0.6 = 7056$ (元/时),

开工时间,对气头厂取18小时,对油头厂取24小时,

每次故障其他损失取3万元,

由此计算M

气头厂  $M = 63 \times 70 \times 200 + 18 \times 4536 + 30000 = 99.4$ (万元)

油头厂  $M = 63 \times 70 \times 100 + 24 \times 7056 + 30000 = 64.0$ (万元)

由此,可以认为,如果我们采取某项措施,可以使大氮肥系统故障停车频率每年减少1次,而我们对于投资回收期的要求为不大于三年的话,对于气头工厂,这项措施的投资费用不超过300万元(对于油头工厂是190万元),在经济效果上就是可行的(为简化计算,均未考虑复利因素)。

对于未来的经过重新设计(包括进行可靠度设计)的大氮肥系统,究竟可靠度目标定在多少比较适宜,本文还不能做出确切的答案。但是从上述简单的经济核算中可以认为,如果新设计的大氮肥系统,用增加5~10%总投资额的代价(具体来说大约3000万元),能够使大氮肥系统的故障停车次数由现有的每年8~10次下降到1~2次的话,从经济效果上衡量,应该是可以接受和鼓励的。

对于现有的系统,应该定出分阶段的目标逐步进行整顿和改造。首先实现每年系统停车少于4~5次的目标,经过努力是完全有可能实现的。

## (2) 提高大氮肥系统可靠度的主要方向

1) 采用冗余设计,增加必要的备用设备,并提高备用设备的可靠性能。

如前所述,并联模型是提高可靠度的重要措施,纵观整个大氮肥工厂,原设计者对于价值在100万元以下的大多数关键运转设备,都采用了冗余设计。如高压锅炉给水泵(法型原值71万,美型57万),半贫液泵(法型原值约45万,美型19万)等大型设备均考虑了备用。而对于价值在200万元以上的四大机组则均未考虑备用,各机组原值如表8所示。

表8 几种大机组设备原值(合同价格) 单位(万元)

|     | 原料气机组 | 空压机机组 | 冰机组 | 合成气机组 |
|-----|-------|-------|-----|-------|
| 法型厂 | 无     | 303   | 198 | 594   |
| 美型厂 | 401   | 526   | 471 | 741   |

由表可见，设备投资大小是决定是否采取备用设计的重要因素，其取舍标准也与本文前述准则基本相符。

根据前述准则，针对实际生产过程中暴露出来的故障多发部位可以增设必要的备用设备（包括电气、仪表），以提高全系统的可靠度。

栖霞在这一方面曾采取了一定的措施，并收到了较好的效果。如为了保护废热锅炉炉管，针对必须连续使用强制循环泵的特点，增设了G1205的备用泵。为了保证发挥备用设备的作用，防止切换时引起的生产中断，在重燃料油泵出口，重要机组（合成气压缩机、锅炉给水泵、一段炉风机）润滑油泵的出口均增设了蓄压器。有效地防止了由于晃电等原因造成的停车。对于仪表系统，在即将通过更新改造采用的集中分散型控制系统中，大量采用冗余设计，将会有效地提高其可靠度。

在增加备用设备而使系统可靠度得到提高的情况下，其对系统的MTBF产生的影响，可以按下述方法计算〔8〕。

首先，对于负指数类型可靠度，可以求出下列关系

$$\lambda = - \frac{\ln R(t)}{t} = - \frac{2.302}{t} \lg R(t) \quad (22)$$

设原来系统的可靠度

$$R(720) = 0.5123$$

由式(22)可得出原系统的 $\lambda$

$$\lambda = - \frac{2.302}{720} \lg 0.5123 = 0.000929$$

$$\text{则原系统的MTBF} = \frac{1}{0.000929} = 1076(\text{小时})。$$

设年开车时间为330天，7920小时

$$\text{每年停车频率为} \frac{7920}{1076} = 7.36 \text{次。}$$

设由于某台设备增加备用后，根据式(20)计算系统可靠度上升为

$$R(720) = 0.5567$$

$$\text{则新的} \lambda' = - \frac{2.302}{720} \lg 0.5567 = 0.0008137$$

$$\text{MTBF}' = \frac{1}{0.0008137} = 1229(\text{小时})$$

$$\text{每年停车频率为} \frac{7920}{1229} = 6.44 \quad (\text{次})$$

通过这一项并联措施每年可以减少停车

$$7.36 - 6.44 = 0.92 \quad (\text{次})$$

由此可得的经济效益（不计投入部分）对于气头工厂为

$$99.4 \times 0.92 = 91.45(\text{万元})$$

除按上述公式核算外，对于简单的问题，可以直接按估计减少系统停车的次数计算

经济效益，其结果也近似准确。

## 2) 大力加强设备更新改造工作

就可靠性问题而言，大氮肥系统设备更新改造有以下两方面重要作用：

a. 由于大氮肥系统是由数百台设备以串联模型所组成的，而这些设备的有效寿命并不相同。由于腐蚀、疲劳、磨损等原因，有的设备在使用几年以后就较早地进入了耗损故障期，从而造成了如图 4 所示的某些大氮肥系统在有效寿命期内系统故障率出现较大的起伏，也就是马鞍形现象。为了保证全系统的最低故障水平，对于提早进入耗损期的设备，除了一部分可以采用维修办法解决外，相当一部分设备应考虑采取更新措施。

b. 对于某些由于设计原因形成先天不足的设备，必须结合设备更新采取技术改造措施，以改善和提高全系统的可靠性。

上述观点，在理论上似乎不存在什么问题。然而，在实际上却往往由于认识上的不同而影响正确的决策。这主要是由于我国现有大氮肥厂相当数量的管理者和决策者，在思想方法上和决策根据等方面，还比较多地受到我国中小氮肥厂（包括年产量超过十万吨氨的多系列大型老厂）的影响。这些老厂，许多管理经验仍是值得总结和发扬的，但在设备更新改造方面，由于受到解放三十多年来我国经济恢复和艰苦发展过程的影响，以及老厂生产规模、技术水平等因素的限制，表现出严重的“惜旧”思想。这种管理思想，在我国工业发展以速度为主，国家财政经济严重困难，机械制造能力不足，氮肥工业自身水平落后（多系列、能力小）的情况下，是有其一定的历史积极意义的。但是，如果仍用这种思想来指导大氮肥系统的设备更新改造，必然会严重阻碍生产的发展。例如，对于列管水冷器的更新，老厂的做法首先是逐次堵管，一直到堵管的面积达到总面积 10% 的时候才进行更新，而大氮肥系统如果也采取这种做法肯定是不行的。为了保证系统的可靠性，大氮肥系统设备更新的判别准则应该是设备的经济寿命而不是设备的自然寿命。仍以水冷器为例，如果由于腐蚀原因已经到了耗损故障期（其表现是在首次出现列管腐蚀泄漏后连续地发生新的泄漏），对于处在全系统串联模型之内的这种水冷器，即使是像合成系统合成气水冷器这样重达数十吨的换热设备，一旦发现进入耗损故障期的象征，也应该毫不犹豫地更新，其根据可以简化为式(21)。就是说对单体设备进行更新远比采用强化维修方针的经济损失要小。维修费用本身可能是无足轻重的（一般只占 M 的 1~2%），但系统的开停损失远远超过老厂的损失。

对于设备技术改造，应该认识到，这是提高大氮肥系统可靠性，从而提高工厂经济效益的根本措施。从目前我们所掌握的资料来看，无论日、美、法各国，大氮肥系统的设计者们还没有对这样的系统进行过认真而有效的可靠性设计。由于某些设备的可靠性太差，因而形成整个串联系统的可靠度大幅度下降。例如，合成气压缩机，废热锅炉等设备的频繁故障，已经在世界范围内造成了严重的经济损失并限制了大氮肥工业自身的发展。从我国已有的十三套系统来看，如果美型法型工厂都能达到日型工厂的平均故障率水平（ $\lambda = 0.0006 \text{ 小时}^{-1}$ ）的话，每年最少可为国家增加 5000 万元的利税收入，并可每年增产三十万吨尿素，数字是相当可观的。而为要取得这样的成绩，除了加强现有系统的管理之外，最根本的是要对薄弱环节进行技术改造工作。

在现代管理科学中，设备更新改造问题已形成了运筹学的一个重要分支—更新论<sup>(9)</sup>。这种管理科学的出现，反映了下述客观现实的需要：由于设备的大型化、

单机化带来了生产的大型化；由于科学技术的迅猛发展，设备的技术寿命和经济寿命都大大地缩减。因而，许多设备的更新改造问题，已经从一般决策上升到了企业的高级决策。决策正确与否，都伴随着重大的经济得失，甚至影响到企业的生存发展。因而，如何定量地正确地选择更新改造方案，就形成了一门专门的科学。更新论的内容很多，本文不可能全面进行讨论，与可靠性问题有着重要联系的就是系统管理的概念。在现代化大生产的情况下，局部与整体有着复杂关系和交叉效应。当我们在研究某个单元或子系统的性能时，必须考察它对系统性能的影响。任何这方面的决策，都必须有利于系统性能的改善，否则就是不可取的〔10〕。

在大氮肥系统更新改造工作中，经常会遇到这类问题。例如，对于前述的透平压缩机的碳钢结构油冷却器改变材料问题，单纯从设备投资角度来看，改用不锈钢材质可能要比原材质高出十数倍。如果由此而使系统可靠度提高并获得明显的总体效益的话，那么这种改造就是十分必要的。这就是系统管理思想的具体体现。这种思想，不仅工厂领导者要有，每个子系统的管理者和决策者也应该有。否则，在许多重大决策问题上，必将产生很多分歧和阻力。例如栖化的合成气压缩机，自1982年全系统负荷提高以后，开始出现低压压缩缸突发性的振动现象。每次振动，振值均达 $80\mu$ （轴承指示）以上，缸体和基础均有明显的振动和叫声，紧急停车后检查气封和轴承均遭受严重的破坏。自1982年5月至1983年11月，先后发生11次类似事故。损失氨产量4.8万吨，为了解决这一问题，该厂在化工部和中石化总公司的指导下，广泛邀请全国各方面专家学者会诊并组织全厂职工攻关，1982年大修期间和1983年4月两次对该机进行了技术改造。虽有一定的效果但未能彻底解决问题。系统只能在95%以下负荷运转。关于故障原因有两种意见，一种认为来源于油膜振荡，一种认为来源于气源振荡。但总的来讲，都认为原设计处于临界边缘状态而必须进行改造。并提供了不少改造方案。但共同特点都是带有一定的实验性。为了尽早解决这一难题，在上级主管部门的支持下，工厂与日本三菱重工进行了谈判。日方对故障的机理分析与我方相似，但其解决问题的方案不是着眼于各种机理的探讨摸索而是更换整组（已经日方长期生产实践考验的463B—5/5型，具有相当抗振性能的低压缸）。其代价为100万美元。交货期一年。这样，工厂便面临两种选择，一种是花较少的投资立足国内逐步摸索改造，一种是花较多的投资引进成熟设备一次解决问题。如果从延长这样重要设备的使用寿命和减少设备改造投资的角度来看，前者是具有一定吸引力的。但是，在仔细地分析了该机组在系统中所处的重要位置和对两种方案的投入产出进行认真的权衡之后，工厂决定采用后一种方案。其根本依据就是着眼于全系统的总体经济效益，而不是着眼于单台设备的技术和经济问题。1984年12月大修期间新的低压缸安装就位，开车一次成功。机组表现十分稳定。整个工厂生产负荷迅速达到并超过100%。年产量预计将提高2~3万吨氨。投入资金一年之内便可完全收回。工厂相当大的维修和管理力量得到了解放。整个工厂的生产形势出现了喜人的局面。

列举上述实例的目的是要提请每一位大氮肥工作者，应该充分注意到大氮肥系统在技术经济诸方面与老厂有相当不同的特点。

根据表6的统计数据以及实际情况，当前应该着重集中力量解决以下几个问题：

①对合成气压缩机组进行详细的故障分析，并在此基础上进行可靠性核算，采取有力措施提高其可靠度。

合成气压缩机组在我国和世界范围内实际所反映出来的故障情况是突出的，其统计及计算数据如表 9 所示。

表 9 合成气压缩机组故障统计及核算

| 项 目                           | 我国十三套系统1980~1984年统计 |         |          |         | 北美30个大型         | 世界88个大型         |
|-------------------------------|---------------------|---------|----------|---------|-----------------|-----------------|
|                               | 法型三厂                | 美型八厂    | 日型二厂     | 十三厂平均   | 氨厂1971~1976年 平均 | 氨厂1977~1981年 平均 |
| 年停车次数                         | 4.0                 | 1.35    | 0.4      | 1.82    | 1.0             | 1.5             |
| 年停车时间(小时)                     | 339                 | 39.7    | 2.6      | 103     | 96              | 123             |
| MTBF (小时)                     | 1980                | 5867    | 19800    | 4351    | 7920            | 5280            |
| $\lambda$ (小时 <sup>-1</sup> ) | 0.00051             | 0.00017 | 0.000051 | 0.00023 | 0.00013         | 0.00019         |
| R(720) %                      | 69.5                | 88.5    | 96.4     | 84.8    | 91.3            | 87.3            |
| R(2400) %                     | 29.5                | 66.5    | 88.5     | 57.6    | 73.2            | 63.4            |

从表 9 可以看出，在世界范围内该机组都表现了很高的故障率，在运转2400小时后的平均可靠度仅有60%左右。做为在大型氨厂中占如此重要位置的设备却表现了这样差的可靠性，可以说是十分不相称的。从一定意义上来说（尤其对于大型单系列特点而言）可以认为这台机组在技术上还是不过关的。如果不是由于其投资昂贵，从可靠性角度出发，采用冗余设计是必要的。因此，对于重新设计的机组，必须增加可靠性设计的内容，而对于已投产的机组，则必须进行更新改造。从表 9 国内三种类型机组对比来看，法型故障率比日型高出10倍之多，（其中部分是由于原机组设计不过关，目前已有很大改善），美型也较日型高出3倍之多，这就说明，通过改造是完全有可能大幅度地改善其可靠性的。

②组织对废热锅炉的技术攻关。废热锅炉做为一个单体静止设备，其故障频率高达0.34次/年，数字也是相当可观的。目前国内有关单位已对此进行了数年的研究工作，而且已得出技术上的结论〔11, 12〕。当前的关键问题是组织实施。做为一项新技术在工业规模上推广是有一定风险的，但是为了工厂自身和全局的利益，这项工作有必要在全国范围内有组织地协调推行。

③注意电气、仪表系统存在的问题。电力系统的故障率高达0.6~1.1次/年，根据国内统计，63%是厂外供电系统引起的。改善外界供电可靠性的难度是很大的。但是，如果工厂有1500KW以上的自备发电机，就完全可以自供合成氨系统维持连续运转所需的电力（包括水处理及循环水系统）。因而，可以有效地减少由于外界供电中断而引起的停车。从最低限度来讲，如果各厂在原事故发电机的基础上，再增加一台500KW的柴油发电机组，或是利用余热蒸汽拖动的透平发电机，系统的短期生产仍是可以维持的。这样一台机组投资不过几十万元。而从提高系统可靠度来看，是完全值得的。

仪表系统的故障率高达1.5~1.7次/年。是研究系统可靠性时不容忽视的问题。

当然，大氮肥系统仪表故障还包括着一部分机械执行机构的故障。但是，改进的余地仍是很大的。其中包括可以大量采用冗余设计；对各种电子元件，根据可靠度的要求规定允许工作时间，在远离MTBF的时间区域按期进行更新等等。笔者认为，只要把提高可靠度的具体目标和原则，分解和落实到每一个责任管理者，并在各种必要的条件上给他们以支持（如改造所需的投资、改造可能引起的风险等等）。不断提高大氮肥系统可靠性的目标是一定可以实现的。

3) 表6统计表明，大氮肥系统可靠度固然主要是由其自身条件所决定，但是工厂的生产管理水平和若干外界条件也对其发生一定的影响。诸如操作事故、原燃料电力的供应、产品的销售等等。即使在维修政策上世界各地也有较大的差异。我国目前仍然采取每年定期大修一次的传统做法，而北美和欧洲许多工厂已转向18~24个月安排一次全厂大修。所有这些因素，都对大氮肥系统的可靠性和有效利用率产生影响。因而，做为工厂的管理者，一方面要抓好工厂的更新改造，一方面还要学习和研究现代管理技术，进行精心的组织和管理，确保大氮肥系统自身所固有的基本水平得到发挥，争取实现系统最低的故障率和最好的经济效益。

#### 四、小 结

1. 对世界范围和我国十三套大氮肥系统的实际故障率统计和分析表明，大氮肥系统的故障有明显的规律。在全部使用寿命的前期和中期，其系统故障率的变化符合浴盆曲线第一第二阶段的变化。在偶发故障期，其故障率服从负指数型函数分布，其平均故障率  $\lambda = 0.001 \text{小时}^{-1}$ 。

2. 理论分析和实际统计都表明，大氮肥系统可靠度服从负指数函数变化。其平均故障间隔期MTBF = 1000小时，因而整个系统的可靠度是很难令人满意的。当运转时间达到一个月时，可靠度即下降为40~50%。当运转达100天时，可靠度仅为8~9%。根据可靠度曲线，可以预测，在现有大氮肥系统的客观条件下，对于大多数系统，是难以经常实现100天以上的长周期运转的。因此，在当前生产管理者的指导思想中，不宜片面盲目追求长周期指标。在计划管理中，应该自觉地考虑到可靠度函数的下降因素，安排必要的检修和产供销平衡。才能起到正确指导生产的作用。

3. 大氮肥系统可靠度不高的原因，从根本上看是由于系统的单机化所决定的。由于处在串联模型中的若干子系统和设备还不能完全适应这种要求，加上透平压缩机，废热锅炉等关键设备技术上并没有完全过关（至少对可靠度而言是这样），因而大大地降低了全系统的可靠度。解决这个问题的出路，对现有系统来讲是大力推进设备的更新改造工作。对未来的系统来讲，必须在设计过程中引进可靠性设计并采取相应的措施。

4. 为了有效地推进大氮肥系统设备更新改造工作，必须树立系统管理和总体经济效益思想（以设备的技术寿命和经济寿命来做为更新决策的主要根据）。在我国现行价格体系和经济政策条件下，可以认为，对于能够取得系统故障停车次数每年降低0.1次效果的更新改造项目，当其投资数小于30万元（对油头厂约为20万元）在经济效果上就是可取的。就目前实际状况，在全国范围内运用可靠性工程理论，首先对合成气压缩机组、废热锅炉等关键设备以及电气仪表系统组织协作攻关是十分必要的。

5. 对国内三种类型大氮肥工厂实际故障统计和分析表明,日型工厂的可靠性明显的优于美型法型工厂。其 $\lambda = 0.0006$ 小时<sup>-1</sup>,仅为美型的二分之一和法型的四分之一。其合成气压缩机组的故障率仅为美型的三分之一和法型的十分之一。因此,有必要对此现象进行系统深入的调查分析,以提高全国大多数大氮肥厂的可靠性。

6. 提高大氮肥系统管理水平,减少操作事故和原料市场问题的影响,也是必须继续努力解决的问题。尤其是操作事故,我国平均数字较世界平均数字高出一倍,如果在这一方面取得突破,我国大氮肥系统的平均故障率将全面低于世界平均水平。对于定期停车大检修的间隔,随着我国管理水平的提高以及原燃料供应情况的好转,对我国大氮肥系统大修间隔期应当进行必要的技术经济分析。传统的每年大修一次的做法存在着维修过量的弊端,对工厂的经济效益有较大的影响,应该组织研究和改革。

7. 可靠性工程设计在许多工业发达国家已日益普及。因此,对于像大氮肥这样重要的系统,今后,在引进这种类型的工业装置时,应该增加装置可靠性数据的考察询价和谈判内容。我国的工程设计和管理部门,也应对此问题尽早采取有效措施。为了推动石油化工行业迅速推广运用可靠性技术,建议中石化总公司、化工部和机械工业部等部门,学习航天和电子工业部的经验,结合本行业的特点,成立可靠性技术研究机构 and 学术研究组织,建设可靠性数据中心,有计划有组织地结合消化吸收引进技术,普及可靠性技术,提高我国大氮肥工业技术水平和设计水平,为赶超世界先进水平创造良好条件。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] (英)A.凯利, M.J.哈仑斯:《工业生产的维修管理》,蒋云庭译,机械工业出版社,1982年,第17页
- [ 2 ] (日)坪内和夫:《可靠性设计》,汪一麟等译,机械工业出版社,1983年,第2~3页
- [ 3 ] (日)藤田董等:《管理技术讲座》,王世芳译,中国农业机械出版社,1983年,第263~264页
- [ 4 ] 氨厂停车情况,《大氮肥》,孙静宜译,第3期,1979年
- [ 5 ] 氨厂停车原因第四次调查,《大氮肥》第3期增刊,1983年
- [ 6 ] Dumner, G.W.A. "Reliability Chart" Electronic Components, Sept (1967)
- [ 7 ] Anyakora, S.N. "Some Data on the Reliability of Instruments in the Chemical Plant Environment" The Chemical Engineer, Nov, (1971)
- [ 8 ] 卢其庆、张安康:《半导体器件可靠性与失效分析》,江苏科技出版社,1980年,第1页
- [ 9 ] 北京系统信息控制科学研究会筹委会:《现代管理科学基础》下册,第16~29页
- [ 10 ] 夏禹龙等:《领导科学基础》,广西人民出版社,1983年,第46页
- [ 11 ] 西安交通大学陈昕宽等:U型管废热锅炉传热恶化特性的研究,1984年
- [ 12 ] 清华大学鲁仲琪等:法型厂U型管废热锅炉爆管事故防止对策的试验研究,《大氮肥》第6期,1984年