

产品与应用

机械可靠性在高压电器上应用

刘培宏

上海华通开关厂研究所 (200072)

摘 要 文章介绍了如何使可靠性这一新兴边缘科学在高压电器设计上得到应用,通过对可靠性及其设计计算与操作步骤的阐述,并以机电一体化产品分段器为例说明可靠性设计的应用,体现实用性、合理性及优化性,为今后在高压电器上采用可靠性及其设计提供了原理和方法。

关键词 可靠性 设计方法 应用

Application of Mechanical Reliability in High Voltage Electric Apparatus

Liu Peihong

Shanghai Huatong Switchgear Factory Research Institute

Abstract: This paper introduces how to apply the reliability, a newly established edge science, in the design of high voltage apparatus, via exposition of reliability and its design calculation and operation procedures, and takes for instance the electromechanical integrated product sectionalizer to describe the application of reliability design, showing its practicability, reasonableness and optimization providing principles and methods for high voltage apparatus to be adopted with reliability and its design.

Key words: reliability design method application

一. 可靠性概述

在近代科学技术突飞猛进的发展过程中,可靠性技术随着生产和科学技术的发展而产生,同时在不断地解决可靠性技术问题的过程中也促进了生产和科学技术的发展。产品的可靠性是指产品在规定的条件下及规定的时间内完成规定功能的能力。简单地说:就是指产品在规定的条件下的实际使用过程中能否按期、按质发挥其使用效果的问题。而可靠性技术就是指与产品可靠性有关的工程方法。在尚未明确提出可靠性技术以前,人们在谈到产品的质量时常用产品的耐久性、寿命、稳定性、安全性以及可维修性等术语来表达,而这些术语与可靠性是密切相关的。

在电器方面美国在1964年发布了可靠性要求的“电磁继电器总规范”;日本在1980年也发布了有可靠性要求的“小型控制继电器通则”。国内电器产品可靠性应用研究工作起步较晚,20世纪七十年代末期开始对电力半导体器件的可靠性进行了试验研究;20世纪八十年代初对高低压电器的可靠性开始进行了研究。1988年机械电子部发布了“关于公布机械工业第三批限期达到可靠性指标的产品的通告”,公布了第三批限期考核可靠性指标的产品,并发布了“机电产品可靠性

指标考核管理办法”。近几年,机械部、电子部多次召开可靠性工作会议,极大促进了我国电工产品可靠性应用研究工作的开展。在“八五”规划中限期考核可靠性指标的机电产品将达到数千种,其中包括相当多的电工产品。在“九五”期间,我国电工产品的可靠性应用研究工作已得到了进一步发展。

1. 可靠性与失效规律

产品的可靠性是产品质量的一个重要方面,电工产品的质量应包括其技术性能指标和可靠性指标两个方面。对于一个高质量的产品来说,高可靠性与先进的技术性能指标是缺一不可的。

产品的失效率是指已工作到时刻 t 的产品在 t 时刻后的单位时间内发生失效的概率。人们对大量的试验数据和使用中所得到的数据进行统计分析,发现很多产品的失效率与时间的关系曲线如图1所示。图1中曲线的形状象浴盆,故通常称为浴盆曲线。从曲线上可看出,产品失效随时间的变化大致可划分为三个阶段:即早期失效期、偶然失效期与耗损失效期。

2. 可靠性技术工作的基本内容

可靠性技术就是指与可靠性有关的工程方法,提高电工产品的可靠性是国民经济发展的需要,

也是提高电工产品质量的一个重要方面。影响产品可靠性的因素很多,从确定产品可靠性指标、研究、试制、设计、制造、试验、鉴定直到投入使用为止的各个阶段都与可靠性密切相关。而且产品失效后对产品进行的失效分析也与产品可靠性密切相关。图2为产品可靠性技术基本内容的方框图,图中表示了从产品设计、制造、可靠性筛选、可靠性试验、产品现场使用以及对失效产品进行失效分析并将所得到的信息反馈到设计、制造及可靠性筛选中去以找到相应改进措施的全过程。

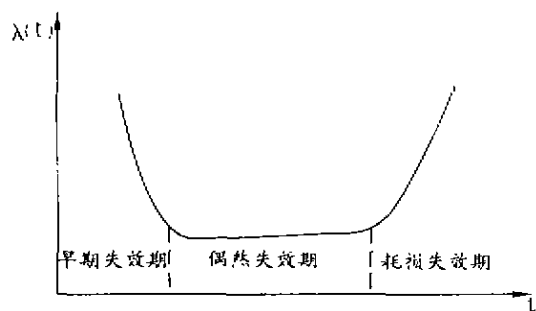


图1 产品典型失效率曲线

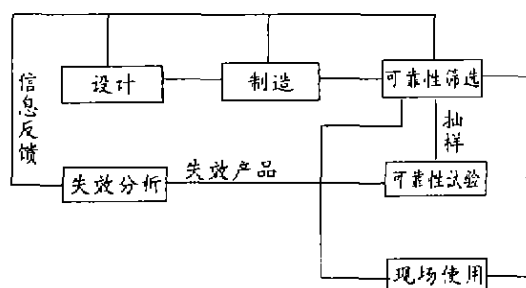


图2 可靠性技术基本内容方框图

顺便指出,产品的可靠性还与可靠性管理密切相关,并且产品在可靠性设计和试验时抽样方案的确定及试验结果的评估都要用到排列组合、集合、特别是概率论等数学工具,即所谓可靠性数学,所以可靠性技术还与可靠性数学密切相关。

3. 数学模型 (详细推导过程略)

一批产品在进行寿命试验时,各个产品的失效时间可能相差很多,但是失效数据是遵循一定规律的,用数理统计的语言来说,产品的失效时间服从一定分布的。只要我们对失效数据进行适当的处理和加工,就能找到反映事情本质规律性。画失效率直方图和累积失效率直方图就是一种失效数据的加工处理方法,从图中可直观看出失效数据的大致分布情况,并进而引出失效密度

函数及累积分布函数,这两个函数在可靠性设计中的地位十分重要,由它们可求出可靠度函数、失效率函数以及表示寿命的一些可靠性特征量。

(1) 失效率直方图

$$\sum_{i=1}^j f_i = \sum_{i=1}^j \frac{\Delta m_i}{n}$$

其数学模型表达式

$$f_i = \frac{f_i^*}{\Delta t}$$

$$F_i = \sum_{j=1}^i f_j^* = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta m_j}{n} \quad \text{其中}$$

失效率的直方图如图3所示

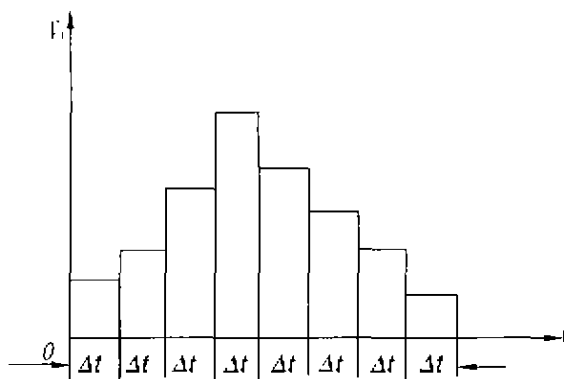


图3 失效率直方图

(2) 失效密度函数:

其数学模型表达式

$$P(a \leq \xi \leq b) = \begin{cases} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq \xi \leq t + \Delta t)}{\Delta t} dt & b \\ a \quad (\text{其中 } \xi \in [a, b]) \end{cases}$$

失效密度函数如图4所示

(3) 累积失效率直方图及累积失效分布函数。这两个函数的图形如图5和图6所示,其数学模型表达式见下面一节。

4. 常见失效分布类型

失效分布类型是指失效密度函数 $f(t)$ 或累积失效分布函数 $F(t)$ 的函数类型。电工产品可靠性技术中常见的失效分布类型有指数分布、威布尔分布、正态分布、对数正态分布等几种。

一般来说,表示产品可靠性的所有特征量都与该产品的失效分布类型有密切关系。已知失效

分布函数,则可求出可靠度函数 $R(t)$ 、失效率函数 $\lambda(t)$ 以及表示寿命的许多特征量,不知道具体的分布函数,但如果已知失效分布类型也可以通过参数估计的方法求得某些可靠性特征量的估计值。

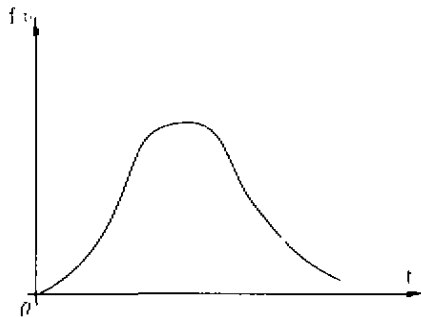


图4 失效密度曲线

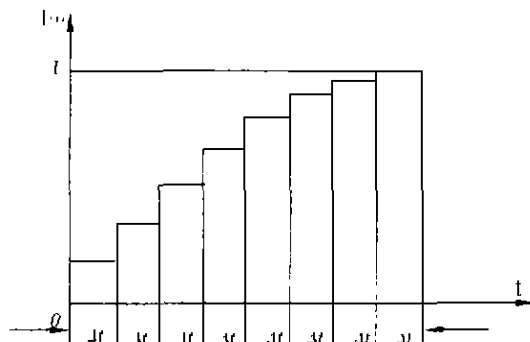


图5 累积失效频率直方图

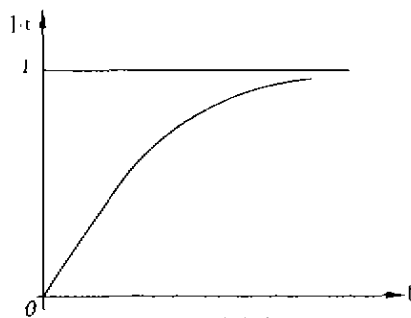


图6 累积失效分布曲线

(1) 指数分布 (以单参数为例)

随机变量 T 的密度函数(T 表示产品的质量)

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

其累积分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} & (0 \leq t < \infty) \\ 0 & (-\infty < t < 0) \end{cases}$$

(2) Weibull分布

Weibull分布数学表达式

失效密度函数

$$f(t) = \begin{cases} \frac{m}{t} (t-r)^{m-1} e^{-\left[\frac{(t-r)^m}{t_0}\right]} & (t \geq r) \\ 0 & (t < r) \end{cases}$$

其累积失效分布函数为:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left[\frac{(t-r)^m}{t_0}\right]} & (t \geq r) \\ 0 & (t < r) \end{cases}$$

式中: m -形状参数 t_0 -尺度参数 r -起始参数

(3) 正态分布

随机变量 X 的密度函数

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

($-\infty < x < \infty$)

其正态分布的分布函数为:

$$F(x) = \begin{cases} \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s-\mu}{\sigma}\right)^2\right] ds & \\ -\infty & (-\infty < x < \infty) \end{cases}$$

式中: μ -位置参数 σ -尺度参数

(4) 对数正态分布

随机变量的失效密度函数 $f_{LN}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} b_1 t}$

$$\exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - a_1}{b_1}\right)^2\right] \quad (t > 0)$$

其随机变量寿命服从对数正态分布的累积失效分布函数为:

$$F_{LN}(t) = \begin{cases} \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi} b_1 x} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - a_1}{b_1}\right)^2\right] dx & \\ 0 & \end{cases}$$

式中: a_1 -对数均值 b_1 -对数标准偏差

二. 可靠性计算初步

1、常见可靠性设计方法:

(1) 概率设计法

这主要是运用可靠性数学,通过概率的计算和数理统计的计算比较,达到可靠性设计的要求,详见下面关于“概率法计算一般表达式”一节。

(2) 失效树分析 (FTA)

FTA法是在系统设计过程中,通过对可能造成系统失效的各种因素(包括硬件、软件、环境、人为因素)进行分析画出逻辑框图(即失效树)以确定系统失效原因的各种可能组合方式及其发生概率,以计算系统失效概率,采取相应的纠正措施,即提高系统可靠性的一种设计分析方法。

FTA法的主要操作步骤有4点:(a)选择和确定事件;(b)自上而下地建造失效树;(c)失效树的定性分析;(d)失效树的定量计算。

(3) 失效模式、影响及致命度分析 (FMECA)

FMECA法是在系统设计过程中,通过对系统各组成单元潜在的各种失效模式及其对系统功能的影响,对产生后果的严重程度进行分析,提出可能采取的预防改进措施,提高产品可靠性的一种设计分析方法。

FMECA法的主要操作步骤有6条:(a)按照系统功能图画出可靠性框图,弄清系统的所有零件及其功能;(b)确定分析的范围,列出每个零件明显的和潜在的失效模式及影响;(c)研究如何检测各种失效模式的方法;(d)针对各种失效模式,找出失效原因,提出可能的预防措施;(e)估计各种失效模式的发生概率,并计算致命度;(f)填写FMECA分析表以及作出结论。

2、可靠性设计内容与步骤:

(1) 设计内容

可靠性设计最基本的内容有以下几点:

- 确定可靠性指标及其量值;
- 对可靠性指标进行合理分配;
- 把规定的可靠度直接设计到零件中去。

(2) 设计方法的实施步骤

- ① 确定设计的问题及任务的轮廓;
- ② 确定有关的设计变量和参数;
- ③ 进行失效模式、影响及致命度分析(FMECA法);
- ④ 确定零件的失效模式是独立的还是相关的;
- ⑤ 确定设计到的每种失效模式的判据;
- ⑥ 确定应力函数;
- ⑦ 确定每个失效模式下的应力分布;
- ⑧ 确定强度函数;
- ⑨ 确定每个失效模式下的强度分布;
- ⑩ 对于每一种致命的失效模式,确定其与应力分布和强度分布相关的可靠度;
- ⑪ 确定同时考虑到所有致命失效模式的零件的整个可靠度;
- ⑫ 确定零件可靠度的置信度;

⑬ 对于系统中所有的关键零部件重复上述步骤求出各自的可靠度;

⑭ 在已知每个零部件可靠度的基础上,计算子系统的以及整个系统的可靠度;

⑮ 对整个可靠设计的要求内容进行优化。

3、概率法计算一般表达式(推导过程略)。

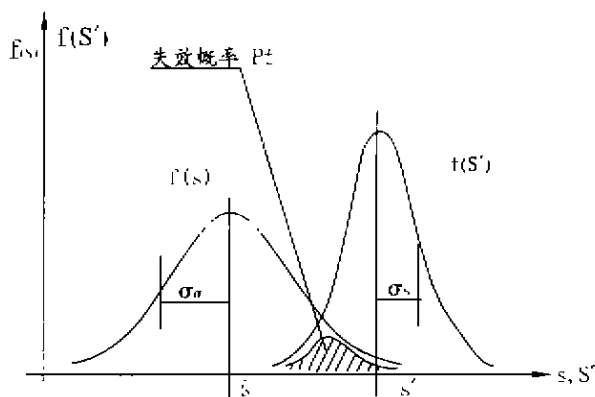


图7 时间为t时应力-强度分布干涉模型

从应力分布和强度分布的干涉理论出发,可靠度是强度大于应力的整个概率。如图7所示

$$R(t) = P\{S > s\} = P(S - s > 0) = P\left(\frac{S - \bar{s}}{\sigma_s} > -\frac{s}{\sigma_s}\right)$$

$$P(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(n) \left(\int_{n}^{+\infty} f(N) dN \right) dn$$

式中: n-工作循环次数

N-失效循环次数

当应力和强度呈正态分布时,其概率密度函数分别为:

$$f(s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s - \bar{s}}{\sigma_s}\right)^2\right]$$

$$f(s') = \frac{1}{\sigma_s' \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s' - \bar{s}'}{\sigma_s'}\right)^2\right]$$

构造一个f(ξ)函数,并根据概率数理统计理论,可得:

$$R(t) = \int_{\xi}^{+\infty} f(\xi) d\xi = \int_z^{\infty} \phi(z) dz$$

$$\text{式中: } \phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

$$z = \frac{\xi - \bar{\xi}}{\delta \xi}$$

$$\left(\text{当 } \xi = 0, z = -\frac{\bar{s} - \bar{s}'}{(\sigma_s^2 + \sigma_{s'}^2)^{1/2}} \right)$$

对于多维随机变量, 设 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 在 $X_0=\mu_n$ 处展开, 得 Taylor 级数: $y=f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$= f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} (x_i - \mu_i) + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right) (x_i - \mu_i) (x_j - \mu_j) + R, \text{ 对该式取前两项,}$$

求方差, 得:

$$V(y) = V[f(u_1, u_2, \dots, u_n)] + V\left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} (x_i - \mu_i)\right] \\ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 V(x_i)$$

称 $V(y)$ 为 y 的二阶中心矩。

三、可靠性应用

1. 螺栓联结的典型设计步骤:

(1) 确定设计准则:

假设每个螺栓内的应力为沿断面均匀分布, 但由于载荷分布, 动态应力集中系数和几何尺寸等因素的变异性; 对于很多螺栓来说, 每个螺栓内的应力值的大小是不一样的, 而是呈分布状态, 在没有充分的根据说明这种分布是别的分布类型时, 通常第一个选择是假定它为正态分布。

对于有紧密性要求的螺栓联接, 假定其失效模式是螺栓产生屈服, 因此, 设计准则为: 螺栓材料的屈服极限大于螺栓应力的概率必须大于或等于设计所要求的可靠度 $R(t)$, 表示为:

$$P(\sigma_s > s) = P(\sigma_s - s > 0) \geq R(t)$$

(2) 选择螺栓材料, 确定其强度分布:

根据经验, 可取螺栓拉伸强度的变异系数为:

$$V_s = 5.3\sim 7\%$$

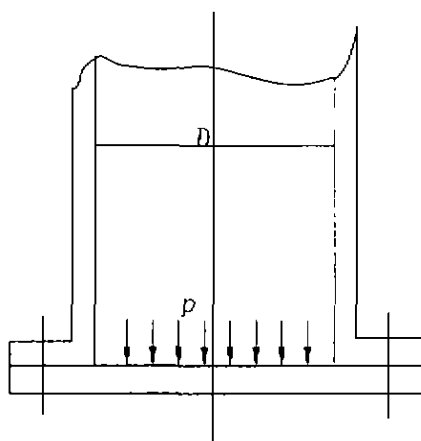


图8 分段器筒体盖板受拉紧螺栓联接示意图

(3) 确定螺栓的应力分布;

(4) 应用联结方程, 确定螺栓直径。

2. 受压筒体螺栓联接的计算:

机电一体化产品——交流高压自动分段器, 它的灭弧室内充有六氟化硫气体。现以它为例, 按可靠性算法设计一下在 SF_6 气体的作用下, 分段器充气筒体与盖板螺栓联接的可靠度以及螺栓的选择。如图8所示, 分段器的筒体参数已知如下: 筒体内直径 $D=330\text{mm}$; 筒体内 SF_6 工作气压 $P=0.2\text{MPa}$; 筒体安装螺栓数目 $n=12$, 此筒体盖板螺栓应如何设计, 要求螺栓联接的可靠度为0.999。

(1) 首先选择螺栓的材料, 这里选用中碳钢或其它高碳钢; 其次螺栓的性能等级选用8.8级, 并假定其强度分布为正态分布 (此为可靠性设计的统计量所得) 则 $\bar{\sigma}_s=800\text{N/mm}^2$, $\bar{\sigma}_{0.2}$ (或 $\bar{\sigma}_s$) $=640\text{N/mm}^2$, 屈服极限的标准离差为 $\bar{\sigma}_{\sigma_s}=0.07\bar{\sigma}_s=44.8\text{N/mm}^2$ 。

(2) 假定螺栓的应力分布为正态分布, 则问题在于如何确定应力的均值及标准离差, 筒体盖板上所受的最大工作载荷的均值为:

$$F_T = \bar{P}_{max} \frac{\pi D^2}{4} = 0.204 \times \frac{3.14 \times 330^2}{4} = 17439.2\text{N}$$

每个螺栓上所受的最大工作载荷的均值为

$$\bar{F} = \frac{F_T}{n} = \frac{17439.2}{12} = 1453.3\text{N}$$

至于工作载荷的变异系数, 可取 $V_F = \frac{\sigma_F}{\bar{F}} =$

0.08, 因此, 工作载荷分布的标准离差 $\sigma_F = 0.08\bar{F} =$

$$0.08 \times 1453.3 = 116.3\text{N}$$

每个螺栓内由工作载荷引起的应力均值为:

$$\bar{S}_p = \frac{\bar{F}}{\bar{A}} = \frac{1453.3}{\frac{\pi}{4} (\bar{d})^2} = \frac{1851.3}{\bar{d}^2}$$

应力分布的标准离差为:

$$\sigma_{\sigma_F} = 0.08 \bar{S}_p = \frac{148.1}{\bar{d}^2}$$

众所周知, 有预紧力的受拉伸载荷的紧螺栓联接在工作时, 螺栓的总拉力为:

$$F_t = F + F_i \quad (3-1)$$

或

$$F_t = \frac{C_1}{C_1 + C_2} F + F_i \quad (3-2)$$

式中: F —螺栓上所受的工作载荷

F_1 —预紧力

F_2 —剩余预紧力

C_1 —螺栓刚度系数

C_2 —被联接件刚度系数

$\frac{C_1}{C_1+C_2}$ 相对刚度

令 $\frac{C_2}{C_1}=B$, 则公式 (2) 可改写为

$$F_0 = \frac{1}{1+B} F + F_1 \quad (3-3)$$

将上式除以螺栓断面面积 A , 可得螺栓总应力分布的均值。

$$\bar{S} = \frac{\bar{F}_0}{A} = \frac{1}{1+B} \bar{S}_0 + \bar{S}_1 \quad (3-4)$$

当预紧力 F_1 与螺栓的强度成一定比例时, 可达到一定的可靠度。根据经验, 取预紧应力分布的均值 $\bar{S}_0 = 0.5 \bar{S}_1 = 320 \text{ N/mm}^2$, 标准偏差 $\bar{\sigma}_0 = 0.15 \bar{S}_0 = 48 \text{ N/mm}^2$ 。

实际上, 螺栓的刚度系数 C_1 可以较精确的算出 ($C_1 = \frac{\pi d^3 E}{4L}$) 而被联接件的刚度系数 C_2 却需要

估计, 一般认为, 比较恰当的估计是取比例系数 $\bar{B}=8$, 而其变异系数 $V_B=0.10$, 所以 B 的标准偏差为 $\sigma_B=0.10\bar{B}=0.8$ 将有关数值代入式 (3-4) 得:

$$S = \frac{1}{1+B} \bar{F} + \bar{S}_1 = \frac{205.7}{d^2} + 320$$

(3) 应用联结方程求解螺栓直径联结方程为

$$z = \frac{\bar{\sigma}_S - \bar{S}}{(\sigma_{\bar{\sigma}_S} + \sigma_S)^{1/2}} = - \frac{\bar{\sigma}_S - \bar{S}}{\sigma_S} \quad (3-5)$$

由式 (3-4) 和 (3-5) 可知, 联结系数 z 与 4 个随机变量有关, 它们是 σ_S 、 S_0 、 B 和 S_1 , 对于多维随机变量, 由式 $V(y)$ 的二阶矩

$$V(y) = V[f(u_1, u_2, \dots, u_n)] + V\left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} (x_i - u_i)\right]$$

$$= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 V_i(x_i)$$

因此, 可知:

$$\begin{aligned} \sigma_S^2 &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial S}{\partial x_i}\right)^2 S_i^2 \\ &= \left(\frac{\partial S}{\partial S_0}\right)^2 \sigma_{S_0}^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial S_1}\right)^2 \sigma_{S_1}^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial S}{\partial S_0}\right)^2 \sigma_{S_1}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } \left(\frac{\partial S}{\partial S_0}\right) &= -1, \left(\frac{\partial S}{\partial S_1}\right) = \frac{1}{1+B}; \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right) = \\ &= \frac{-\bar{S}_0}{(1+B)^2}; \left(\frac{\partial S}{\partial S_1}\right) = 1 \text{ 代入前式后, 可得} \end{aligned}$$

$$\sigma_S^2 = (-1)^2 (44.8)^2 + \left(\frac{1}{1+8}\right)^2 \left(\frac{148.1}{-d^2}\right)^2 + \left[\frac{1}{(1+8)^2}\right]^2$$

$$\left(\frac{1851.3}{-d^2}\right)^2 (0.8)^2 + (1)^2 (4.8)^2 = \frac{490}{-d^4} + 4311$$

$$\text{所以 } \sigma_S = \left(\frac{490}{d^4} + 4311\right)^{1/2}$$

由标准正态分布表知, 当要求可靠度 $R(t)=0.9768$ 时, $z=4.84$ 于是

$$4.84 = \frac{640 - \left(\frac{205.7}{d^2} + 320\right)}{\left(\frac{490}{d^4} + 4311\right)^{1/2}}$$

化简, 整理, 求解上式后, 得: $\bar{d}=11.02 \text{ mm}$

因此: 螺栓的尺寸确定为 $d=12 \text{ mm}$ 。

对上述设计计算结果的讨论如下:

a. 由式 (3-4) 和 (3-5) 可以看出, 当螺栓材料、几何尺寸、工作载荷和联接的相对刚度一定时, 螺栓的预紧应力 S_1 是影响可靠度大小的主要因素;

b. 由式 (3-4) 可知, 当螺栓材料、几何尺寸、工作载荷和预紧应力一定时, 联接时相对刚度

$\frac{C}{C_1+C_2}$ 也是影响可靠度大小的因素之一;

c. 由式 (3-4) 和 (3-5) 可知, 螺栓材料的强度对于联接的可靠的有一定影响。对于有紧密性要求的螺栓联接, 应选用强度高的材料;

d. 如果螺栓材料的屈服极限数据是根据实验得到的, 而且与螺栓的受力次数或寿命相应, 则计算得到的可靠度即为时间的函数。(下转第38页)

降低,同时先进入模腔的材料遇模具的高温而快速凝胶,注料阻力增大,因此应及时调节注料压力,以保证注料时间。一般由人工控制时,由于受到操作者的经验习惯等人为因素的影响,所生产的零件往往会出现质量差异,现在由自动注料程序控制,使注料过程模拟最佳的人工操作过程,从而消除了人为因素造成的零件质量差异。

另外,在实际生产中,操作者除了要控制注料参数外,还要对前一批凝胶零件及时进行检查、清理,如去除凝胶零件的飞边、毛刺,安装固化夹具,刻生产编号等,如不能及时清理,则有可能出现凝胶零件变形收缩现象,使固化夹具的安

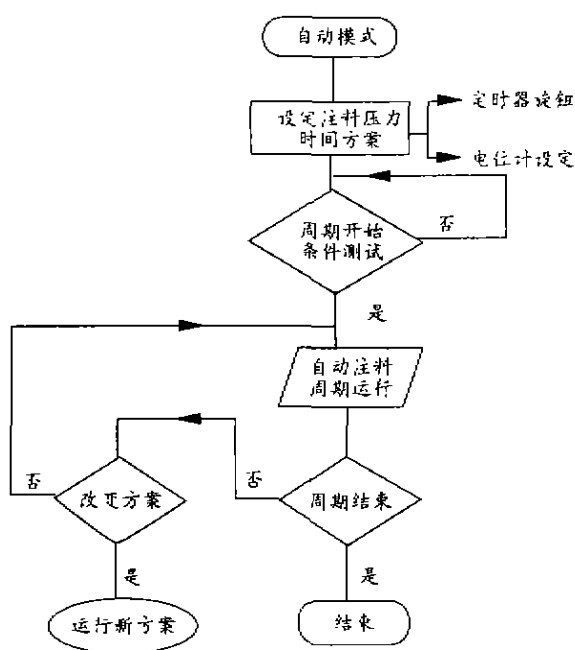


图4 自动注料程序框图

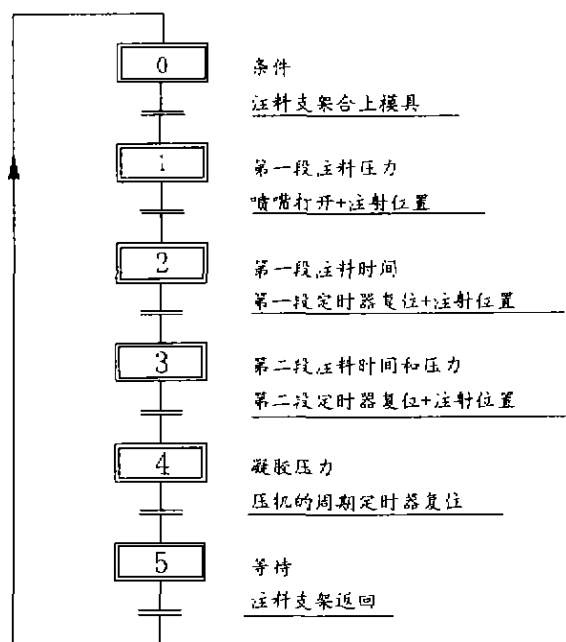


图5 自动注料程序流程图

装及清理困难。而自动注料系统可自动完成注料过程,使操作者能够及时进行前一批凝胶零件的清理,提高了生产效率,保证了凝胶零件的生产质量。

五、结束语

该套环氧树脂自动注料系统充分考虑到了压力凝胶生产的工艺要求,具有调节灵活可靠、操作方便的特点,使环氧树脂压力凝胶零件的质量得到了保证,同时也使压机的自动系统得到了完善,使环氧树脂压力凝胶生产作到了真正的自动化。

(上接第32页)要求有限寿命的零件,通过实验来得到强度数据,是十分必要的。

四、结束语

可靠性设计方法在高压电器产品上的应用是一种新的尝试,它比传统设计法考虑的更全面、更经济、更合理、更可靠,当然质量也是最佳的。因此它的冗余设计控制严,可靠性设计及其计算方法无论产品或系统更为合理、安全、稳定和优化,其可靠性达到最高,运行状态达到最佳,这不正是目前提高产品质量,提高产品的市场竞争能力,扩大企业经济效益,降低生产成本所要寻找的一条切实可行的,有实用价值的途径和有广阔发展前景的方向吗? 可靠性作为一门新型边缘学科有着很强的生命力。美国阿波罗飞船登月成

功,是可靠性工程技术取得伟大成就最生动的例证。可以认为,可靠性设计方法在高压电器上的普及、应用和推广会取得突破性进展。

参考文献

1. [日]高木主编,可靠性技术——制造和使用,国防工业出版社,1980
2. [美]阿姆斯特特,可靠性数学,科学出版社,1980
3. 茆诗松等,可靠性统计,华东师范大学出版社,1984
4. Carter A.D.S. a View of mechanical Reliability, Tribology International, 1980
5. Henley E.J. Und kumoto H. reliability engineering and risk assessment.