

可拓学在工程质量评定中应用的研究^{*}

戴琳

(南京师范大学物理科学与技术学院, 210042, 南京)

[摘要] 可拓学是一门新兴的、介于数学、物理学和工程学的边缘学科。它的理论基础是物元理论和可拓集理论。近年来得到迅速发展。在失效物理中, 将可拓学原理应用于失效分析和产品质量的评定, 工程案例的研究表明本文提出的方法是简便、可行的。

[关键词] 可拓学, 失效物理, 质量评定

[中图分类号] TB114.3; [文献标识码] B; [文章编号] 1672-1292(2002)03-0021-05

1 概述

从20世纪60年代起, 在工业发达国家内, 由于产品的复杂化和工作环境的严酷, 对工程产品的可靠性要求越来越高。于是, 除在许多尖端工程技术以外, 可靠性工程技术和可靠性的管理也逐步推广应用到众多工业部门, 并有了明确的可靠性指标。人们已认识到: 有时, 一个零件的失效可导致整个系统的故障, 造成灾难性的后果。美国在登月成功之后, NASA(宇航局)就将可靠性工程技术列为三大技术成就之一。自从可靠性的科学概念和理论、方法得到确认以来, 已在可靠性数学、可靠性物理和可靠性工程等领域内得到发展。

以不相容问题为研究中心, 用矛盾可化为相容的基本思想, 从形式化角度去研究矛盾的变化, 揭示研究对象之所以产生矛盾的内在机制及其相互转化规律与契机的一门新兴学科——可拓学(Extenics), 自1983年创立以来, 被认为是介于数学、物理学与工程学之间的一门边缘学科, 10多年来已形成了它的理论框架, 并得到迅速发展。在失效(可靠性)物理方面, 笔者进行了可拓学在工程质量评定方面的应用研究, 并结合工程案例对研究结果作简要阐述。

2 可拓学^[1]

可拓学的理论基础是物元理论和可拓集理论。研究内容是探讨处理矛盾问题的规律和方法, 即研究事物的数量关系及其变化, 又研究事物之间性质变化的关系, 并把二者结合起来。

2.1 物元的定义 事物(用 N 表示)、特征(用 c 表示)和特征值或量值(用 v 表示)三者组成的三元组, 记作: $R = (N, c, v)$ 或者 $R = (N, c, c(N))$,

式中 R 表示物元。如果将特征(c)及其量值(v)构成二元组, 则称为特征元(M), 记作: $M = (c, v)$ 。

事物在物元理论中指的是事物名称, 记作 $I(N)$ 。特征指的是性质、功能、状态等事物特点。量值表示特征的量化值或量度。量值的取值范围称为量域。记为 $V(c)$, 或 $V = (a, b)$, 其中 a, b 为取值范围。

多维物元的表示方法:

* 收稿日期: 2002-09-05。

作者简介: 戴琳, 1952-, 南京师范大学物理科学与技术学院副教授, 主要从事工科物理的教学及研究。

$$R = \begin{bmatrix} N, c_1, v_1 \\ c_2, v_2 \\ \dots \\ c_n, v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $R_i = (N, c_i, v_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$. 称为 R 的分物元.

2.2 物元理论 事物变化的可能性, 称为物元的可拓性. 物元理论主要内容是研究物元的可拓性和物元的变换以及物元变换的性质.

2.3 可拓集理论 在处理和解决事物之间的矛盾问题时, 必须将各种矛盾解决过程作定量化处理. 可拓学中定量化的基础就是可拓集理论, 它包括可拓集合、关联函数和可拓关系^[1].

3 可拓方法的失效分析^[1]

失效物理中进行失效分析时, 大多以所建立的失效物理模型为基础, 通过试验确定的参数数据, 加以推断或试验验证, 寻求失效的原因, 并求得失效概率^[2].

本文利用可拓集合理论关联函数概念研究了失效分析的有关问题, 并结合工程实例作了探讨^[3].

定义: 距 —— 一点与区间的距离. 设 x 为实域 $(-\infty, +\infty)$ 上的任一点, $X_0 = (a, b)$ 为实域上的一个区间.

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{1}{2}(b-a) \quad (2)$$

称 x 与区间 X_0 的距.

这里距的含义与数学中距离的含义不同, 当点 x 在 X_0 之外时, $\rho(x, X_0)$ 与数学中点与区间的距离含义相同; 当点 x 在 X_0 之内时, x 与区间之距为负值, 按(2)式计算. 负值的大小表示点 x 在区间 X_0 内位置的不同.

在处理实际问题时, 除了考虑点与区间的位置关系外, 还经常要考虑区间与区间, 及一个点与两个区间的位置关系. 设 $X_0 = (a, b)$, $X = (c, d)$, 且 $X_0 \subset X$, 则点 x 与 X_0, X 的位置值为:

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0), & x \notin X_0 \\ -1, & x \in X_0 \end{cases} \quad (3)$$

$D(x, X_0, X)$ 意义如图1所示.

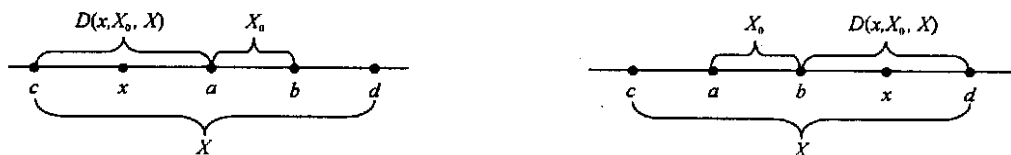


图1 x 位置关系图

它们之间的关联函数是:

$$K(x) = \frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)} \quad (4)$$

进行失效分析时, 可按下列步骤进行:

(1) 确定事物 N 的失效特征元集

设事物 N 可能产生失效集为 $I = (I_1, I_2, I_3, \dots, I_n)$, 若 N 发生失效 I_i , 则记为: $I_i(N)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). $I_i(N)$ 发生, 具有的特征元集:

$$\{M_i\} = \{M_j\}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

其中 $M_{ij} = (c_{ij}, V_{ij})$, $(V_{ij}) = (a_{ij}, b_{ij})$.

如前所述, 上式中 c_{ij} 表示特征; 量值(v) 的量化值或量域为 V_{ij} , 它的取值范围为 (a_{ij}, b_{ij}) . 另记 $V'_{ij} = (a'_{ij}, b'_{ij})$ 表示 $I_i(N)$ 发生时, 事物特征(c_{ij}) 容许的量域.

(2) 建立事物 N 可能失效的物元

$$R_i = \begin{bmatrix} I_i(N), c_{i_1}, v_{i_1} \\ c_{i_2}, v_{i_2} \\ \dots, \dots \\ c_{i_k}, v_{i_k} \end{bmatrix}$$

(3) 建立描述事物 N 现状的物元

$$R = \begin{bmatrix} N, c_1, v_1 \\ c_2, v_2 \\ \dots, \dots \\ c_k, v_k \end{bmatrix}$$

(4) 计算关联函数

$$K_{ij}(v_{ij}) = \frac{\rho(v_{ij}, V_{ij})}{\rho(v_{ij}, V'_{ij}) - \rho(v_{ij}, V_{ij})} \quad (6)$$

根据关联函数的计算结果, 判断失效程度.

4 可拓方法的质量评定^[1]

对产品的质量, 可靠性关心的是 $t > 0$ 的质量, 即“明天的质量”, 它使用的量度与时间有关, 例如: 可靠度、失效率等. 失效物理学对产品质量评定, 主要根据产品可靠度或失效概率分析及性能指标参数所建立的模型进行评定^[4], 并要求以定量数值表示评定结果.

可拓方法的质量评定能较完整地反映产品综合质量水平, 而且易于用电子计算机进行工作, 可以获得精度较高的评定结果. 这个方法的思路是:

首先, 根据某一产品在实际生产中累积的资料, 将产品质量分成若干等级, 例如: 优等、良好、合格、不合格 4 个等级. 按照所积累的资料进行统计分析或依据专家经验给出表征各等级特征(c) 的内容和它们的量值或量值的取值范围 $V = (a, b)$. 其次是将待评定质量的产品特征指标代入各等级集合中进行评定, 评定结果按照它与各等级集合的关联函数进行比较, 关联函数越大, 它与某等级集合的符合程度愈接近.

评定步骤如下:

(1) 列出产品质量等级标准的物元;

(2) 给出产品失效(质量不合格) 的物元;

(3) 列出待评产品物元实际值;

(4) 计算关联函数(公式(4)), $K_i(v_i)$;

(5) 根据产品性能的特征, 确定加权系数 α_i , 并有如下关系: $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$;

(6) 计算待评产品等级关联度;

$$K(p) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_i(v_i) \quad (7)$$

式中: p 表示产品.

(7) 质量等级评定

$$K_0(p) = \max_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} K_i(p) \quad (8)$$

式中: $K_0(p)$ 为产品评定的质量等级关联度.

[案例] 柔性制造系统是集机械、电子控制于一体的高技术、多功能加工系统. 构成柔性制造模块基本功能的装置有: 使工艺设备加工动作自动化的数控装置和执行机构(c_1); 在工艺过程的实现条件发生变化时, 工艺过程参数调节自动化的自适应控制装置(c_2); 加工时或加工后的自动化检验测量装置(c_3); 检查与排除故障的自动化诊断装置(c_4).

我国自行开发的 TH6340 柔性生产线组合加工中心^[5], 主体设备数控机床, 其质量等级可以按照研制时动态性能试验和仿真试验, 由各机构功能指数加以确定. 下面列出它们的数值:

$$R_1 = \begin{bmatrix} (\text{优等}), c_1, & (8.8, 9.3) \\ c_2, & (8.5, 9.0) \\ c_3, & (12, 12.5) \\ c_4, & (4.5, 5.5) \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} (\text{良好}), c_1, & (8.5, 9.3) \\ c_2, & (8.3, 9.0) \\ c_3, & (11, 12) \\ c_4, & (4, 5) \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} (\text{合格}), c_1, & (8.3, 8.8) \\ c_2, & (8.2, 8.5) \\ c_3, & (10.5, 11.5) \\ c_4, & (4, 5) \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} (\text{不合格}), c_1, & (8.2, 8.8) \\ c_2, & (8.0, 8.3) \\ c_3, & (10, 11) \\ c_4, & (3.5, 4.5) \end{bmatrix}$$

式中, R_i —— 产品质量等级标准的物元, $i = 1, 2, 3, 4$.

定义: R' 为产品失效物元, 即该类型机床功能指数的极限值或容许值, 超过此范围, 判为失效(质量不合要求). 参考类似设备的相关数据, 经统计处理, 设定其值为:

$$R' = \begin{bmatrix} (\text{数控机床}), c_1, & (8.0, 10.0) \\ c_2, & (7.8, 9.8) \\ c_3, & (9.5, 12.5) \\ c_4, & (3.5, 7.0) \end{bmatrix}$$

现有一台数控机床, 测得功能指数平均值分别为 $c_1 = 8.6, c_2 = 8.1, c_3 = 11.3, c_4 = 4.5$. 即待评产品物元实际值:

$$R = \begin{bmatrix} p, c_1, & (8.6) \\ c_2, & (8.1) \\ c_3, & (11.3) \\ c_4, & (4.5) \end{bmatrix}$$

待评机床的质量等级可按上述评定步骤(4) ~ (7) 进行评定:

(1) 计算关联函数(步骤“4”)

对于特征 c_1 而言, 产品质量优等的量值为 $V_1 = (8.8, 9.3)$; 特征 c_1 的极限值或容许值为 $V' = (8.0, 10.0)$, 待评产品特征 c_1 的量值 $v_1 = 8.6$, 利用公式(2) 及(6) 计算关联函数:

$$\rho(v_1, V_1) = \left| 8.6 - \frac{8.8 + 9.3}{2} \right| - \frac{1}{2}(9.3 - 8.8) = 0.2$$

$$\rho(v_1, V'_1) = \left| 8.6 - \frac{8.0 + 10.0}{2} \right| - \frac{1}{2}(10.0 - 8.0) = -0.6$$

$$K_1(v_1) = \frac{0.2}{-0.6 - 0.2} = -0.25$$

同理, 待评产品特征 c_1 的量值与其他质量等级相应特征的关联函数为:

$$K_2(v_1) = 0.2, \quad K_3(v_1) = 0.5, \quad K_4(v_1) = 0.5$$

待评产品特征 c_2, c_3, c_4 的量值与各质量等级相应特征的关联函数为:

$$\begin{aligned} K_1(v_2) &= -0.57149, & K_2(v_2) &= -0.4, & K_3(v_2) &= -0.25, & K_4(v_2) &= 0.5 \\ K_1(v_3) &= -0.3684, & K_2(v_3) &= 0.3333, & K_3(v_3) &= 0.2, & K_4(v_3) &= -0.2 \\ K_1(v_4) &= 0, & K_2(v_4) &= 1.0, & K_3(v_4) &= 1.0, & K_4(v_4) &= 0. \end{aligned}$$

(2) 确定加权系数(步骤“5”)

根据数控机床功能要求,加工动作自动化数控装置和执行机构的功能占首要位置.据此,取加权系数为 $\alpha_1 = 0.4$.其他功能的加权系数,按其重要性经过权衡,设定为:

$$\alpha_2 = 0.2, \quad \alpha_3 = 0.3, \quad \alpha_4 = 0.1, \quad \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1.$$

(3) 计算待评产品等级关联度(步骤“6”)

待评产品等级关联度,按公式(7)计算

$$\begin{aligned} K_1(p) &= 0.4 \times (-0.25) + 0.2 \times (-0.57149) + 0.3 \times (-0.3684) + 0.1 \times (0) = -0.329498 \\ K_2(p) &= 1.9999, \quad K_3(p) = 0.31, \quad K_4(p) = -0.3. \end{aligned}$$

(4) 质量等级评定(步骤“7”)

按公式(8)以及 $K_i(p)$ 计算结果,有 $K_2(p) = \max_{i \in \{1,2,3,4\}} K_i(p) = 1.9999$

故待评数控机床的质量等级为“良好”.

5 结束语

作为一门系统工程而发展起来的可靠性工程,它是由元件的质量保证、可靠性评价而发展起来并扩展至物理学领域.结合于物理学和工程学,失效物理的应用面也在不断扩大.而以物元理论和可拓集合理论为基础的可拓学是介于数学、物理学和工程学的边缘学科,本文将可拓方法尝试地用于解决失效(可靠性)物理中的失效分析和产品质量评定,并结合工程实际作了有益的探索.发现在工程实践中,这个领域的前景十分广阔.

[参考文献]

- [1] 蔡文、杨春燕、林伟初.可拓工程方法[M].北京:科学出版社,2000.
- [2] 何国伟.可靠性概述[M].北京:北京工业大学出版社,1997.
- [3] 戴琳.失效物理分析中的有效工具—可拓学[J].南京师大学报,2001,1(3):21~24.
- [4] 黄祥瑞.可靠性工程.北京:清华大学出版社,1990.
- [5] 刘又午.振兴机床工业的技术策略—开发TH6340加工中心的启示[C].中国机械工程学会会讯,1998,10(10):1~4.

A Study on Extenics in Engineering Qualification Applications

Dai Lin

(College of Physics Science and Technology, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract The extenics is a newly subject, which is a border subject among mathematics, physics and engineering Recently, It's developing rapidly. The base theory of extenics is a theory of matter elements and of extension set. The principles of extenics have been used in failure analysis and product qualification in failure physics. Case studied in engineering practice shows that the method proposed is convenient and feasible.

Key words: extenics, failure physics, qualification

[责任编辑:刘健]