

机械产品的运行状态理论及其在可靠性中的应用

The Theory for Operational State of Mechanical Product and Its Application in Reliability

装甲兵工程学院□何成铭 单志伟 王玉泉

摘 要 机械产品可靠性设计与分析是当今世界可靠性工程界的难点问题之一。本文从机械产品的工作能力入手,介绍了运行状态的基本理论,并分析了运行状态理论在机械零件可靠性设计与分析中的应用。

关键词 机械产品 工作能力 运行状态 可靠性

1 引言

任何机械产品都是为完成一定的功能而设计制造的。产品完成规定功能的能力就是工作能力,产品丧失了工作能力则意味着故障或失效。按照可靠性的定义,可靠性从另一个角度讲也就是使机械产品维持其工作能力的能力。机械产品的工作能力是随着工作时间而逐渐耗损的,工作能力的耗损过程可以用其运行状态来描述,这是机械产品不同于电子产品的一个显著特点,同时也启发我们可以通过运行状态来研究机械产品的可靠性。

2 机械产品的工作能力及其耗损过程

(1) 产品的输出参数及其极限值

任何产品及产品的各个层次都有一定的输出参数。输出参数是根据产品的用途和对产品提出的不同要求而制定的种种特性指标,这些指标可以是工作精度、机械强度特性,也可以是运动参数、动力参数等。输出参数在产品运行过程中是变化的,为保证产品正常的工作,输出参数的变化不应超出某一极限值,任何一个输出参数达到极限值,产品即可能或将要发生故障(或失效)。输出参数的允许值应在技术文件中作具体规定并

附有说明。

(2) 机械产品的工作能力

电子产品若不考虑元器件的老化,对于工作过的时间是没有记忆的。机械产品则不然,其技术状况是随时间而退化的。产品的技术状况,也就是工作能力状况,在使用中是不断的耗损着的。所谓工作能力,乃是在规定的使用条件下,产品在保证各项性能参数处于技术文件规定范围以内的同时,完成规定功能所处的状态。它不仅包括产品所具有的工作本领,还包括将产品的性能参数保持在允许范围内的能力。

(3) 工作能力的耗损过程

随着使用时间的增长,产品在各种内外因素的作用和影响下,其工作能力将逐渐耗损,技术状况也就逐渐恶化。产品在服役过程中,要承受来自内外部的各种能量的作用,这些能量对产品及其零部件都将产生一定的影响,并引起产品内部一系列的变化。能量的反复作用造成零件材料性能和尺寸形状的逐渐变化,零件的输出参数劣化,工作能力逐渐耗损,从而使产品的输出参数劣化,产品工作能力下降。当输出参数达到极限值时,产品将丧失工作能力而发生故障或失效。例

如：机械能使金属切削机床各个零件逐渐磨损，使连接件表面形状发生畸变，从而使机床的主要输出参数—几何精度下降，加工误差增大，当机床精度下降到极限值时，加工误差超出了允许的范围，机床就发生了故障。机械产品工作能力的耗损过程可以用图 1 描述。

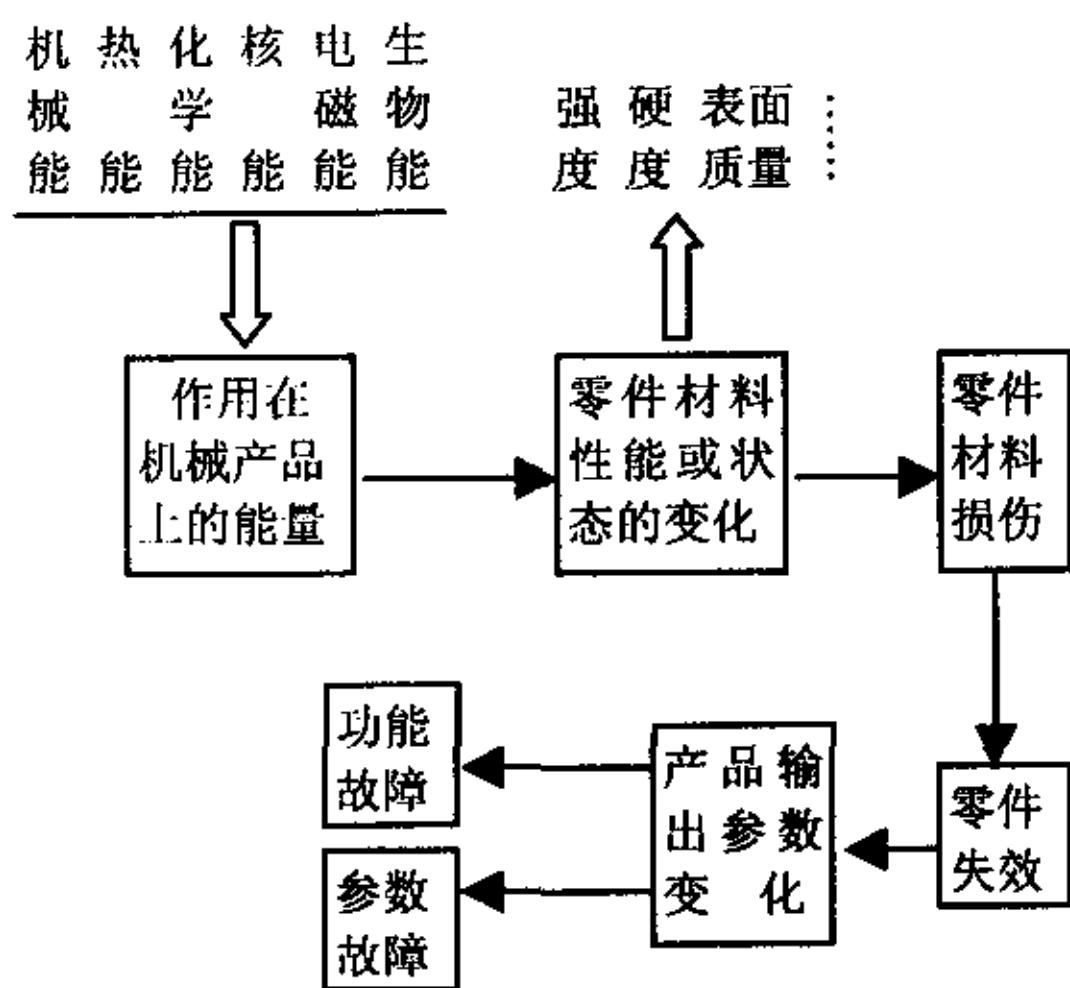


图 1 机械产品工作能力的耗损过程

3 机械产品的运行状态

(1) 运行参数和参数的极限值

任一机械产品都有若干个输出参数（功能参数） $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，这些参数在产品的运行过程中由于各种能量的作用会发生变化，都是时间的随机函数，它们确定了产品的运行状态。可以用随机矢量函数 $X(t)$ 在以 n 个反映产品工作能力、结构参数、功能的输出参数或征兆参数所组成的状态空间中的运行轨迹和在相应时刻 t 所处的相位空间的位置来描述机械产品的运行状态。轨迹描述了产品技术状况的变化过程，而在 t 时刻所处的位置则表示产品在该时刻的技术状况。 n 个参数的极限值构成了极限状态空间，以矢量函数 $[X]$ 表示。在任意的时刻 t ，产品正常工作的条件是：

$$X(t) \in [X] \quad (1)$$

或者表示为

$$X_i(t) < [X_i], i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

按照可靠性的定义，有

$$R(t) = P\{X(t) \in [X]\} = P\{X_1(t) < [X_1], X_2(t) < [X_2], \dots, X_n(t) < [X_n]\} \quad (3)$$

(2) 机械产品的运行状态图

若 $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$ 是互不相关的随机变量，则产品的运行状态可以用 n 个独立的耗损过程来表征。通常， $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$ 之间存在着相互作用和影响，即这 n 个随机变量是不独立的。尽管可以用 $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$ 的联合分布函数来描述产品的运行状态，但是 $X(t)$ 的联合分布规律难于掌握，计算分析比较困难。为此，可以在一定的假设条件下作简化处理，将多维分布转化为若干个独立变量的一维分布。这样，复杂的耗损过程就被分解为若干个独立的基本耗损过程，使分析计算大大简化。每一个基本的耗损过程都是某一状态参数随运行时间（可以是工作时间、行驶里程或工作循环次数等）的变化过程，可以用一个单变量随机过程 $X(t)$ 来描述，而由这一基本耗损过程表征的产品的运行状态可以用运行状态图来描述（如图 2）。图中 $X(t)$ 表示产品或零件的某一基本耗损过程的状态参数（如结构参数、功能输出参数或征兆参数等），它是随机散布的曲线束； $X_{\max}$ 是状态参数 $X(t)$ 的极限水平，当某一产品的 $X(t)$ 超过 $X_{\max}$ 时，该产品即宣告故障或失效；一般说来， $X(t)$ 的运行轨迹不是光滑的曲线或直线，在一定的概率要求下，采用线性回归或曲线拟合的方法，可以得到 $X(t)$ 的变化范围，斜线 X_p, X'_p 即是在某一概率 p 下确定的状态参数 $X(t)$ 的变化范围，它们与 $X_{\max}$ 的交点对应的运行时间分别为 T_p, T'_p ； $\bar{X}(t)$ 是 $X(t)$ 分布曲线的均值的连线，它对应的运行时间为 $\bar{T}$ 。

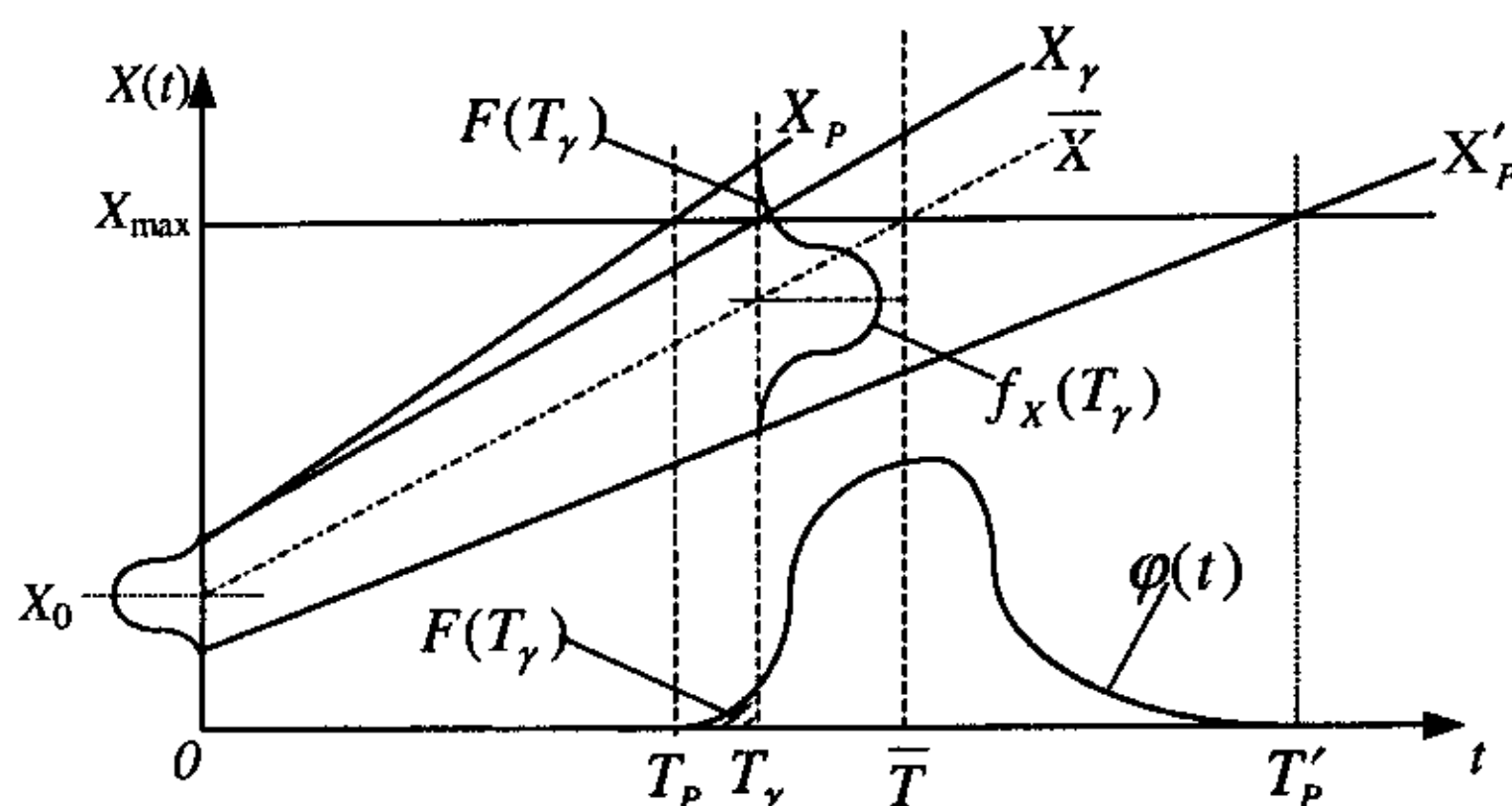


图2 机械产品运行状态图

通过运行状态图可以把机械产品在该耗损过程下的故障或失效与其寿命、可靠度（故障或失效概率）之间的联系清晰的表现出来。在任一时间截面 T_γ 上 $X(t)$ 均呈一定的概率分布，以 $f_X(T_\gamma)$ 表示， T_γ 的含义是，在规定的条件下运行，将有概率为 γ 的产品无故障的工作至 T_γ 。可以通过干涉模型计算出此时刻产品的可靠度

$$\begin{aligned}\gamma = R(T_\gamma) &= \int_0^{X_{\max}} F_X(T_\gamma) dx \\ &= 1 - \int_{X_{\max}}^{\infty} f_X(T_\gamma) dx\end{aligned}\quad (4)$$

显然，此时的故障概率为

$$F(T_\gamma) = \int_{X_{\max}}^{\infty} f_X(T_\gamma) dx = 1 - \gamma \quad (5)$$

$\varphi(t)$ 是寿命分布的概率密度曲线，对给定的时间 T_γ ，可以求得该时刻产品的可靠度 $R(T_\gamma)$

$$R(T_\gamma) = \int_{T_\gamma}^{\infty} \varphi(t) dt \quad (6)$$

相应的故障概率为

$$\begin{aligned}F(T_\gamma) &= 1 - R(T_\gamma) \\ &= 1 - \int_{T_\gamma}^{\infty} \varphi(t) dt = \int_0^{T_\gamma} \varphi(t) dt\end{aligned}\quad (7)$$

4 机械产品运行状态理论在机械零件可靠性设计与分析中的应用

机械零件的失效多是由于疲劳、磨损、老化等损伤过程引起的，其失效模式是可以列举的^[3-4]。通过使用环境条件分析、FMECA 分析等可以确定机械零件的主要失效模式。根据机械产品的运行状态理论，机械零件的运行状态可以分解为若干个独立的基本耗损过程，每一基本的耗损过程均对应于零件的某一失效机理或失效模式。根据对应于这一失效模式的损伤过程的变化规律，应用运行状态图，就可以针对该失效模式进行零件的可靠性分析。

(1) 机械零件单一失效模式下的可靠性分析

按照前面的分析，每一失效模式均对应着一个唯一的基本耗损过程，不同的零件或相同的零件在不同的使用条件下，同一基本耗损过程的变化规律往往是不同的。若零件的失效模式是单一的，则掌握了该零件在具体的使用条件下的耗损规律（它经常表现为某一输出参数或功能参数等对于运行时间 t 的随机函数 $X(t)$ ），并通过对零件的功能分析等确定了 $X(t)$ 的允许（极限）值 $[X]$ ，就可以得到该零件在这一失效模式下的运行状态图。在运行状态图上可以获得如下信息：

a) 零件的寿命分布；

b) 任一给定时间截面 T_0 上的 $X(t)$ 的分布函数 $f_X(T_0)$ ，由干涉模型可以计算得到 $R(T_0)$ ；

c) 给定 γ ，可以得到 γ 百分比寿命 T_γ 。

应当指出，机械零件的可靠性可以用一定工作时间 T 所对应的可靠度 $R(T)$ 表示，也可以用给定的可靠度 γ 所对应的工作时间 T_γ （即 γ 百分比寿命）来表示，但均包含了两个要素：寿命 T 和可靠度 γ ，因而也可以用一数组 (T, γ) 来表示。

(2) 机械零件单一失效模式下的可靠性设计思路

耗损（损伤）规律受到许多因素的影响，如：环境因素、使用条件因素等客观存在的

设计中无法控制的因素：材料的强度、硬度特性（材料因素）、结构尺寸因素、加工精度及热处理等由设计决定的因素。设计中材料的选择（考虑强度、硬度、塑性等）、结构及尺寸的变化、热处理等会改变耗损规律。一切机械设计最终总是要归结到材料选择、结构尺寸确定、热处理及技术要求等具体工作。机械零件的可靠性设计就是在给定的环境因素和使用条件等因素的制约下，通过选材、结构设计、尺寸设计、热处理工艺要求的确定等，影响耗损规律，使其满足所提出的可靠性要求。图 3 说明了机械零件在某一确定的失效模式下的可靠性分析与设计思路。

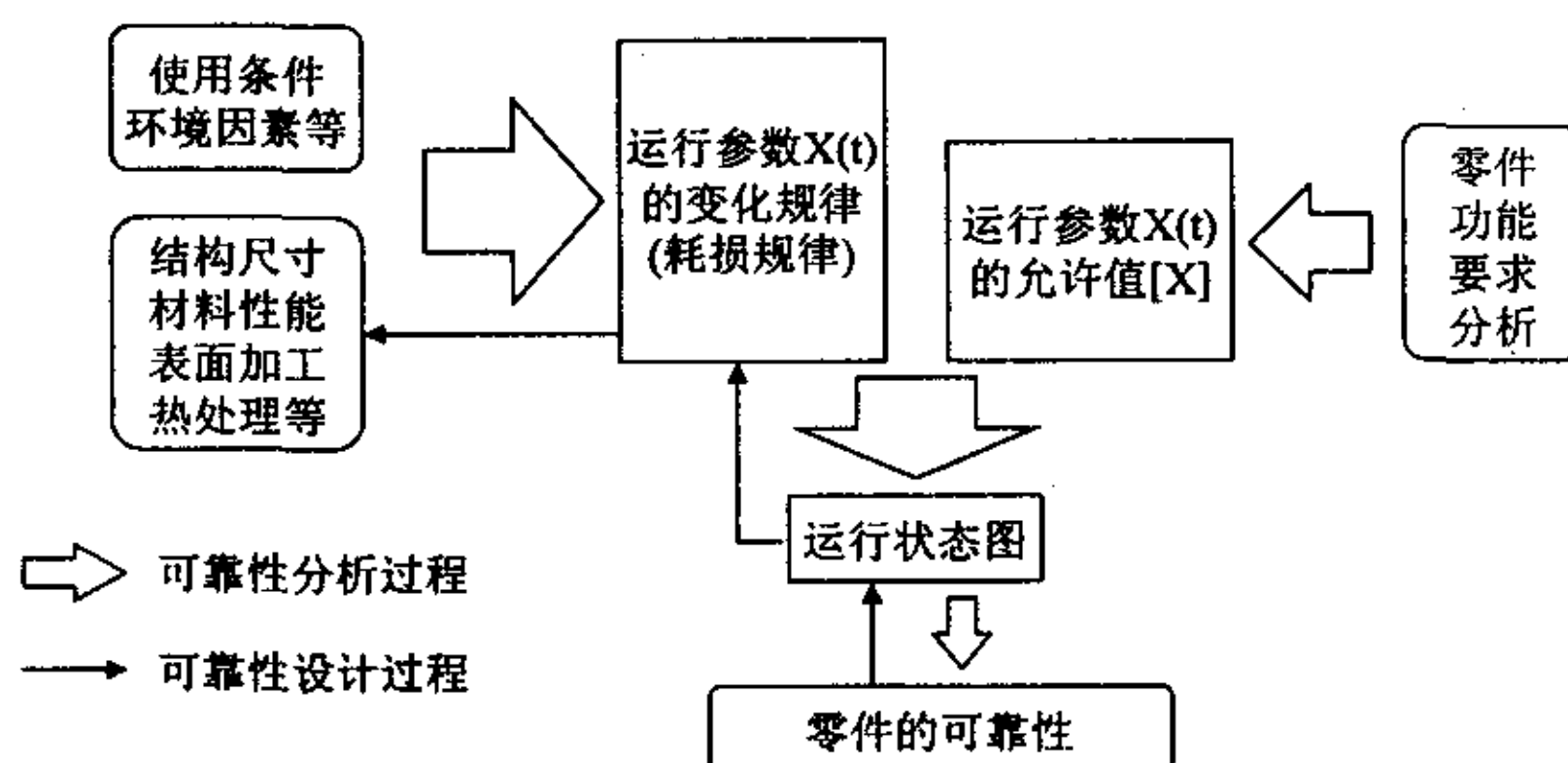


图3 机械零件在确定的失效模式下的可靠性分析与设计

(3) 零件多失效模式情况下的可靠性分析与设计

当一个零件有多种失效模式时，若这多种失效模式之间是独立不相关的，则可以把它们视为串联模型来考虑。前面已经讨论了零件在单一失效模式下的可靠性分析与设计的思路问题。设某一零件有 n 种主要失效模式，在每一种失效模式下的可靠性水平为 (T_i, γ_i) ，则该零件在这 n 种失效模式下的总的可靠性分析有两种方法。

方法一：利用运行状态图进行可靠性分析。首先是确定零件的工作时间 T_0 ， T_0 按一定的原则选取，通常是取最小值，即令

$$T_0 = \min\{T_1, T_2, \dots, T_n\} \quad (8)$$

也可以取 n 个寿命值的平均值或者其他的方法如根据维修间隔期选取。对每一种失效模式，在运行状态图上求得 T_0 对应的 γ'_i ，而后，用串联模型计算零件在 n 种失效模式下的耐久性参数值 (T_0, γ) ，其中

$$\gamma = \prod_{i=1}^n \gamma'_i \quad (9)$$

方法二：用当量失效概率法进行折算。 T_0 的确定同方法一，不同的是要应用当量失效概率的概念，将每一种失效模式下的耐久

性 (T_i, γ_i) 折算为 (T_0, γ'_i) 。而后用式(9)计算零件在 n 种失效模式下的耐久性指标值。当零件在各失效模式下的运行状态无法得到或信息不全时,可以在经验数据的基础上用此法分析。

5 结束语

机械产品的可靠性设计与分析是可靠性工程领域的难点问题之一。本文探讨了一种根据机械产品的运行状态和工作能力耗损规律来进行机械产品可靠性设计与分析的思路。

参考文献

- [1] 何成铭, [刘秘].机构的工作能力储备及工作能力计算模型[J].装甲兵工程学院学报, 1997, 11(1)
- [2] 何成铭.机械产品可靠性中的耐久性研究(硕士学位论文).装甲兵工程学院, 1997.12
- [3] 四川省机械工程学会社被维修专业委员会编译.机器可靠性[M].成都:四川人民出版社, 1983.12
- [4] 孔烦柯, [刘秘]等.军用车辆运用工程[M].北京:国防工业出版社, 1993
- [5] 赵俊臣译.Д.Н.列舍托夫, А.С.伊万诺夫, В.С.法杰耶夫著.机械可靠性[M].全国军事装备可靠性标准化技术委员会, 1993.9

作者简介

何成铭, 男, 1972.8

职称: 讲师, 硕士

职务: 教研室副主任

专长: 机械可靠性、装备综合保障工程的教学与科研

单志伟, 男, 1962.7

职称: 教授

职务: 教研室主任

专长: 可靠性、维修性和综合保障工程的教学与科研

联系地址: 北京市长辛店杜家坎 21 号综合保障教研室, 100072

电话: 010-66717047

E-mail: hechm@cetin.net.cn

王玉泉, 男, 1964.12

职称: 副教授

专长: 装备管理和装备综合保障工程的教学与科研

联系地址: 北京市长辛店杜家坎 21 号综合保障教研室, 100072

电话: 010-66717047

E-mail: hechm@cetin.net.cn