

大型机械产品可靠性定量设计技术的研究

机械工业部重大装备司 吴晓华

上海发电设备成套设计研究所 史进渊

随着科学技术的发展和进步,机械产品的可靠性技术日益引起机械制造和使用行业的重视。可靠性理论的发展已有 40 多年的历史,机械制造业推广可靠性技术也历经 15 年,然而可靠性定量设计技术迄今机械行业仍未广泛使用。虽然使用应力和强度干涉模型确定机械零件可靠度的方法在一些可靠性专著[1-5]中均有介绍,但是有许多机械零件是可修零件,评价其广义可靠性的主要指标是可用度,目前在设计阶段定量确定可修机械零件的可用度尚有一定难度。多数机械产品是可修产品,在设计阶段预测产品的可用度尚无成熟的经验和数据。大型机械产品是由成千上万个零件和众多子系统组成的可修产品,产品故障的后果十分严重,经济损失巨大。目前国内外用户对大型机械产品可靠性的要求也愈来愈高,故研究和探讨其可靠性的定量设计新技术是一项有益的工作。

一、产品可靠性定量设计的基础工作

1. 现场可靠数据的收集和数据库

大型机械产品可靠性的定量设计离不开可靠性基础数据。由于大型机械产品的特点是产品大、批量小,可修复、系统复杂,产品的可靠性试验在实验室无法进行。对现有大型机械产品在现场实际使用的可靠性数据进行摸底和调研,建立和完善产品可靠性使用信息的跟踪和反馈制度,长期地收集、分析和积累产品可靠性的使用数据和建立可靠性数据库是大型机械产品可靠性定量设计的一项基础工作。

工程上,大型机械产品可靠性数据库通常包括下列内容:用户名称、产品型号、出厂日期、产品首次投入使用时间,故障发生时间、故障的定性和定量征兆、产品退出工作状态的时间、产品修复后重新投入使用的时间、停机小时数、从产品首次投入使用到本次停机的累计工作小时数,停机类型(故障维修、计划维修或备用),损坏零件名称、所属子系统名称、损坏部件、失效模式、失效后果,故障原因、故障责任,故障处理措施,故障预防措施、改进效果。收集和汇总产品的可靠性数据时,应力求每次停机有关的上述信息都能贮存入数据库。

2. 分析可靠性薄弱环节和严重失效模式

(1)研制可靠性分析软件,建立可靠性分析程序库。大型机械产品可靠性分析常用软件有:可靠性数据分布检验软件、可靠性指标点估计和区间估计软件、可靠性增长分析软件、零件失效模式及故障原因统计分析软件、可靠性预测软件等。

(2)产品可靠性薄弱环节的统计分析。大型机械产品的不可用时间包括故障停机时间和计划停机时间部分。计划停机属于预防维修,是按产品的检修规程安排的,故障停机是由于产品可靠性问题造成的。通常把累计故障停机时间比较长的处于前 10 位的零件称为大型机械产品可靠性的薄弱环节或关键零件。利用产品可靠性数据库和可靠性分析程序库,对大量现场可靠性数据进行统计分析可确定大型机械产品可靠性的薄弱环节。集中精力对产品的可靠性薄弱环节进行改进,可避免盲目对成千上万个零件平均使用力量,有效地提高整台产品的可靠性水平。

(3)零件严重失效模式的统计分析。大型机械产品零件严重的失效模式指的是零件失效后造成整台产品停机的失效模式。利用产品可靠性数据库和可靠性分析程序库,对大量数据进行统计分析可得出产品的每个零件在长期使用中所暴露的严重的失效模式以及每个零件每一种严重的失效模式引起的累计停机小时数和累计停机次数。

3. 确定可靠性设计量的分布参数

通过对关键零件严重的失效模式进行统计分析可以确定其失效的主要原因,诸如静强度或疲劳强度差、振动或刚度问题,等等。对关键零件进行可靠性设计需确定同关键零件主要失效原因有关的可靠性设计量的分布参数。由于材料特性和制造工艺的离散性以及运行参数和载荷的随机性,关键零件的可靠性设计量不是定值而是随机变量,确定设计量分布参数的常用方法有实测数据统计法、Taylor 级展开法和数值算法,详见文献,文中不再赘述。

二、产品可靠性的定量计算公式

1. 关键零件的可靠度

当关键零件的主要失效原因是静强度、疲劳、振动或刚度问题时,可使用概率设计法计算关键零件的可靠度。

(1) 静强度

用 s 和 σ 分别表示零件的静应力和材料的静强度,用 $f(s)$ 和 $g(\sigma)$ 分别表示 s 分布的概率密度数和 σ 分布的概率密度函数,根据应力分布和强度分布的干涉模型,关键零件静强度设计的可靠度 R_c 为

$$R_c = P(\sigma > s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \left[\int_s^{\infty} g(\sigma) d\sigma \right] ds \quad (1)$$

(2) 疲劳强度

零件应力幅 σ_a 和平均应力 σ_m 之比称为应力比,当应力比为常数时,零件疲劳强度的可靠性计算模型如图 1 所示。当应力比为变量时,零件疲劳强度的可靠性计算模型如图 2 所示。在这两种情况下,零件疲劳强度设计可靠度的计算方法详见

文献[1-6]。当应力比为随机变量时，按文献[8]提出的可靠性模型确定可靠度。如图 3 所示，通过作图法确定等效复合疲劳应力 σ_e 和等效复合疲劳强度 σ_r 的分布参数。用 $f(\sigma_e)$ 和 $g(\sigma_r)$ 分别表示 σ_e 分布的概率密度函数和 σ_r 分布的概率密度函数，利用概率设计法，关键零件疲劳强度设计的可靠度 R_a 为

$$R_a = P(\sigma_r > \sigma_e) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sigma_e) \left[\int_{\sigma_e}^{\infty} g(\sigma_r) d\sigma_r \right] d\sigma_e \quad (2)$$

(3) 振动

用 f_i 和 f_k 分别表示激振力频率和零件最接近激振力频率的固有频率，用 $f(f_i)$ 和 $g(f_k)$ 分别表示 f_i 分布的概率密度函数和 f_k 分布的概率密度函数。当 $\bar{f}_k < \bar{f}_i$ 时，根据零件固有频率分布和激振力分布的干涉模型，关键零件避开共振的可靠度 R_f 为

$$R_f = P(f_k < f_i) = \int_{-\infty}^{\infty} g(f_k) \left[\int_{f_k}^{\infty} f(f_i) df_i \right] df_k \quad (3)$$

同理，当 $\bar{f}_k > \bar{f}_i$ 时，有

$$R_f = P(f_k > f_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(f_i) \left[\int_{f_i}^{\infty} g(f_k) df_k \right] df_i \quad (4)$$

(4) 刚度

用 y 和 $[y]$ 分别表示零件的挠度，用 $f(y)$ 表示 y 分布的概率密度函数。利用近似概率设计法，关键零件挠度设计的可靠度 R_y 为

$$R_y = P(y < [y]) = \int_{-\infty}^{[y]} f(y) dy \quad (5)$$

同理，用 θ 和 $[\theta]$ 分别表示零件的偏转角和许用偏转角，用 $f(\theta)$ 表示 θ 分布的概率密度函数，关键零件偏转角设计的可靠度 R_θ 为

$$R_\theta = P(\theta < [\theta]) = \int_{-\infty}^{[\theta]} f(\theta) d\theta \quad (6)$$

(5) 可靠度的计算公式

关键零件 S_{ij} 的损坏可能同静强度裕度不足、疲劳强度差、避开共振不好、刚度不足等失效模式有关。事实上，在这 4 种失效原因中只有一种失效原因发生时， S_{ij} 就有可能损坏，同时考虑这 4 种失效模式的情况下， S_{ij} 设计的可靠度 R_{sij} 为

$$R_{sij} = P1Rc + P2Ra + P3Rf + P4Ry \quad (7)$$

式中， $0 \leq P_i \leq 1$ ， $\sum_{i=1}^4 P_i = 1$ 。这里 P_1, P_2, P_3, P_4 分别为静强度差、疲劳强度差、共振，刚度差等造成 S_{ij} 损坏的百分比，设计时 P_i 可取现场数据统计值。

2. 关键零件的可用度

根据文献[9]，在时间 $t=t_2-t_1$ 内零件 S_{ij} 的平均失效率 $m(t)$ ，平均无故障工作时间 $MTBF_{sij}$ 与零件可靠度 R_{sij} 的关系为

$$m(t) = -\frac{\ln R_{sij}}{t} \quad (8)$$

$$MTBF_{sij} = \frac{1}{m(t)} = \frac{t}{\ln R_{sij}} \quad (9)$$

零件 S_{ij} 的平均修复的时间 $MTTR_{sij}$ 取现场数据的统计值， S_{ij} 的可用度 A_{sij} 为

$$A_{sij} = \frac{MTBF_{sij}}{MTBF_{sij} + MTTR_{sij}} = 1 - \left(\frac{MTTR_{sij}}{MTBF_{sij}} + 1 \right)^{-1} = 1 - \left(1 - \frac{t}{MTTR_{sij} \cdot \ln R_{sij}} \right) \quad (10)$$

3. 普通零件的可靠度和可用度

(1) 可靠度

通过类似产品在现场使用数据的统计分析法可预测普通零件的可靠度。用 T 表示零件的寿命 t_1, t_2, \dots, t_n ，是 T 的一组观测值，经统计分析可确定 T 的分布参数和分布类型。用 $f(t)$ 表示 T 分布的概率密度函数，使用寿命数据统计法确定零件 S_{ij} 的可靠度函数 R_{sij} 为

$$R_{sij}(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (11)$$

对于寿命较长的耐用零件，现场的寿命数据较少，使用非法参数法[9]来估计其可靠度 R_{sij} 。

(2) 可用度

利用可靠性数据库,可以得出零件 S_{ij} 的累计工作小时数 X_{ij} 和由第 k 种失效模式引起零件的累计停机小时数 Y_{aijk} 。根据文献[10],零件发生第 k 种失效模式的可用度 A_{sijk} 的计算公式为

$$A_{sijk} = 1 - \frac{Y_{aijk}}{\sum_{i=1}^n Y_{aijk} + X_{ij}} \quad (12)$$

假设至少有一种失效模式出现时零件即失效。在零件对应的每一种可能的失效模式的可用度 $A_{sij1}, A_{sij2}, \dots, A_{sijn}$, 都确定之后,该零件的可用度 A_{sij} 为

$$A_{sij} = \prod_{i=1}^n A_{sijk} \quad (13)$$

4. 子系统的可靠度和可用度

(1) 串联子系统

由 m 个零件组成的串联子系统 S_i 的可靠度 R_{si} 和可用度 A_{si} 分别为

$$R_{si} = \prod_{j=1}^m R_{ij} \quad (14)$$

$$A_{si} = \prod_{j=1}^m A_{ij} \quad (15)$$

(2) 并联子系统

由 m 个零件的并联子系统 S_i 的 R_{si} 和 A_{si} 分别为

$$R_{si} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - R_{ij}) \quad (16)$$

$$A_{si} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - A_{ij}) \quad (17)$$

(3) 混联子系统

有些大型机械产品的子系统是由串联部分和并联部分组成的混联子系统。先将混联子系统中的串联部分或并联部分简化为等效单元后,按式(14)、(15)或式(16)、(17)确定各等效单元的可靠度和可用度。然后借助于可靠性框图将混联子系统等效为串联子系统或并联子系统,再确定子系统 S_i 的 R_{si} 和 A_{si} 。

5. 产品的可靠度和可用度

多数大型机械产品 s 是由 n 个子系统组成的串联系统,其可靠度 R_s 和可用度 A_s 的计算公式分别为

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_{si} \quad (18)$$

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_{si} \quad (19)$$

当某型大型机械产品 s 是由 n 个子系统组成的混联系统时,按本文二.4.(3)节确定混联子系统可靠度和可用度类似的方法确定产品的 R_s 和 A_s 。

在大型机械产品可靠性设计基础数据库建成的情况下,设计阶段产品可靠性预测的主要步骤为:(1)对产品进行可靠性薄弱环节分析,对零件进行失效模式和效应分析以及严重的失效模式分析;(2)使用概率设计法和现场数据统计法确定关键零件的可靠度和可用度;(3)使用现场数据统计法确定普通零件的可靠度,以及零件对应每一种失效模式的可用度和普通零件的可用度;(4)画出机械产品的可靠性框图,确定子系统的可靠度和可用度;(5)根据系统的可靠性框图,确定机械产品的可靠度和可用度。如果在设计阶段对某些零件进行了可靠性改进,使得某些零件的某些严重的失效模式不再发生,重复前面的步骤(2)至(5),可以确定改进后大型机械产品的可靠度和可用度。

算例。某型号汽轮机,利用已建成的汽轮机可靠性数据库,使用文中给出的方法,计算得出汽轮机本体(S_1)、控制保护子系统(S_2),供油及润滑油子系统(S_3)热工检测子系统(S_4)、汽封、疏水汽缸法兰螺栓加热子系统(S_5)的可用度分别为, $A_{s1}=97.78\%$, $A_{s2}=99.23\%$, $A_{s3}=99.78\%$, $A_{s4}=99.68\%$, $A_{s5}=99.78\%$,该汽轮机可用度的预测值为 $A_s=96.29\%$ 。该型号 13 台汽轮机在 60 台年的运行中, A_s 的实际统计值为 97.51%,预测值和实际值相近。在设计阶段对产品进行了可靠性改进,若能使叶片断、高压转子大轴弯曲、轴承油膜振荡、负荷晃动和甩负荷共 5 种严重的失效模式不再发生,再次计算得出产品改进后的可靠性指标为 $A_{s1}=99.40\%$, $A_{s2}=99.53\%$, $A_s=98.18\%$ 。

三、结论

(1) 机械产品可靠性的定量设计离不开可靠性基础数据。长期地收集和积累产品的现场使用可靠性数据、建立可靠性设计基础数据库、分析可靠性薄弱环节和严重的失效模式以及确定可靠性设计量的分布参数是大型机械产品可靠性定量设计的一项基础工作，有关单位必须予以足够的重视。

(2) 本文首次完整地介绍了大型机械产品的可靠性设计，使得机械产品的可靠性在设计阶段定量预测成为可能。使用文中给出的方法，可以在设计阶段定量确定零件、子系统和系统设计的可靠性指标，为大型机械产品固有可靠性的分析、设计和改进提供了科学的依据。

(3) 文中提出的大型机械产品可靠性的定量设计方法，数学模型简单，物理意义明确，工程上是可行的。以现场数据收集为基础，针对可靠性薄弱环节和严重的失效模式进行可靠性设计和改进，通过定量计算来预测产品的可靠性水平，为机械产品的可靠性设计提供了一种实用而有效的途径。