

文章编号: 2095-2163(2019)05-0007-06

中图分类号: TP391.9;O211

文献标志码: A

可靠性仿真检验方法

傅惠民, 文歆磊, 杨海峰

(北京航空航天大学 小样本技术研究中心, 北京 100191)

摘要: 产品寿命的不断提高使得可靠性试验费用大、时间长, 工程上往往难以承受, 同时随着数字化设计、智能制造的快速发展, 都对基于数字仿真的可靠性测试需求越来越迫切。但是可靠性仿真的可信性问题长期困扰着人们, 为此, 本文建立了一种可靠性仿真检验方法, 能够以高置信水平判断产品可靠度和可靠寿命的仿真是否正确。同时, 鉴于产品性能退化是其可靠性降低并逐步失效的主要原因, 文中还给出性能退化曲线可靠性仿真的检验方法, 能够以高置信水平判断性能退化曲线在哪一时间段已被正确仿真, 在哪一时间段尚未被正确模拟, 为进一步分析性能退化曲线未被正确仿真的原因提供指导。本文方法不但对正态分布、Weibull分布、极值分布、指数分布、二项分布等任意分布都适用, 而且对完全数据、不完全数据和无失效数据等各种类型的数据也均适用。并且计算简单, 便于工程应用。

关键词: 可靠性仿真; 仿真检验; 可靠度; 寿命; 性能退化; 机电产品

Test method for reliability simulation

FU Huimin, WEN Xinlei, YANG Haifeng

(Research Center of Small Sample Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

【Abstract】 High cost and long duration of reliability experiment arisen by the improvement of product lifetime, as well as the rapid development of digital designing and intelligent manufacturing, lead to the urgent demand for reliability test based on digital simulation. To settle the credibility issue of simulation, a test method for reliability simulation is proposed in this paper to judge whether the reliability and reliable lifetime of product are simulated correctly with high confidence level. Considering the performance degradation is the main reason for product reliability reduction and even failure, a test method for reliability simulation of degradation curve is further presented, which can distinguish the correct simulated segment and the incorrect one with high confidence level. The proposed methodology is applicable to any distribution, as well as a wide variety of data including the complete failure data, incomplete data and zero-failure data. In addition, the easy calculation also makes it convenient for engineering application.

【Key words】 reliability simulation; simulation test; reliability; lifetime; performance degradation; mechanical and electrical products

0 引言

仿真技术已成为理论分析和物理试验之后的第三大科学研究手段, 特别是在当前电子产品、机械产品、机电产品等寿命越来越长, 可靠性试验费用越来越高, 以及数字化设计、智能制造快速发展的背景下, 可靠性仿真发挥着越来越重要的作用^[1-3]。另一方面, 对于火星车、月球基地设备等在地面无法开展试验的研究对象, 只能通过仿真对其寿命和可靠性进行预测^[4-5]。但是, 仿真系统是否正确可信一直困扰着人们, 如何对仿真系统进行校核、验证和确认 (Verification, Validation and Accreditation, VV&A) 至关重要^[6-7]。在整个 VV&A 过程中, 最关

键的环节是通过建立科学合理的验证方法, 判断仿真系统与实际系统是否一致。工程上, 通常选取若干个典型条件下的仿真结果与相同条件下的试验结果进行对比检验, 若二者无显著性差异即可认为仿真正确。文献[8-11]给出了正态分布均值和方差、指数分布均值、二项分布参数等仿真结果的检验方法。在实际应用中, 还常常遇到经假设检验仿真结果的均值和方差都无显著差异, 而可靠度和可靠寿命却存在显著差异的情况。文献[12-14]通过引入母体特征值置信分布的概念, 系统地建立了基于“大概率原则”的置信检验理论。在此基础上, 本文进一步建立可靠性仿真检验方法, 能够对任意分布下的可靠度、可靠寿命和可靠性退化曲线的仿真结

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB720000); 2018年智能制造综合标准化项目《基于数字仿真的机械产品可靠性测试方法标准研究与试验验证》。

作者简介: 傅惠民(1956-), 男, 博士, “长江学者”特聘教授, 主要研究方向: 小样本信息技术、信号分析与处理、数据融合方法、可靠性及估计理论研究。

收稿日期: 2019-07-20

果进行检验。

1 可靠度仿真检验方法

设 R 为产品在 t 时刻的可靠度, R^* 为通过仿真得到的产品在 t 时刻的可靠度。由于 R 是未知的, 所以无法直接判断 R^* 与 R 是否相等, 亦即无法判断该可靠度仿真是否正确。下面给出一种统计学意义下的可靠度仿真检验方法。

设 R_U 和 R_L 分别为通过试验得到的可靠度 R 的置信水平为 γ ($\gamma \geq 50\%$) 的单侧置信上、下限, 即:

$$P(R \leq R_U) \geq \gamma, \quad (1)$$

$$P(R \geq R_L) \geq \gamma, \quad (2)$$

1.1 仿真结果稳定的情况

对于仿真得到的可靠度 R^* 已趋于稳定, 即再增加仿真次数 R^* 的变化可忽略不计的情况, 若有:

$$R^* > R_U, \quad (3)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠度 R^* 大于产品的可靠度 R , 即:

$$P(R^* > R) \geq \gamma, \quad (4)$$

此时, 可以置信水平 γ 断定仿真不正确, 对工程应用来说, 偏于危险。

若有:

$$R^* < R_L, \quad (5)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠度 R^* 小于产品的可靠度 R , 即:

$$P(R^* < R) \geq \gamma, \quad (6)$$

此时, 虽然仿真不正确, 但仿真结果偏于保守, 许多情况工程仍然可以应用, 且偏于安全。

若有:

$$R_L \leq R^* \leq R_U, \quad (7)$$

则下式成立:

$$P(|R^* - R| \leq R_U - R_L) \geq 2\gamma - 1, \quad (8)$$

当 $R_U - R_L \leq \delta$ 时, 可以置信水平 $2\gamma - 1$ 断定仿真正确, 即在给定的精度 δ 下认为 $R^* = R$ 。当 $R_U - R_L > \delta$ 时, 还不能以置信水平 $2\gamma - 1$ 断定仿真是否正确, 此时需进一步补充试验才能做出判断。

对于式(7)成立的情况, 也相当于假设检验中, 在显著度 $\alpha = 2(1 - \gamma)$ 下不拒绝仿真可靠度 R^* 与产品可靠度 R 相等 ($R^* = R$) 的假设。

1.2 仿真结果未稳定的情况

对于仿真计算量大, 要得到稳定的可靠度 R^* 仿真时间超长的情况, 可以通过仿真得到的可靠度 R^* 的置信水平为 γ 的单侧置信上限 R_U^* 和下限

R_L^* , 即:

$$P(R^* \leq R_U^*) \geq \gamma, \quad (9)$$

$$P(R^* \geq R_L^*) \geq \gamma, \quad (10)$$

进行检验, 若有:

$$R_L^* > R_U, \quad (11)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠度 R^* 大于产品的可靠度 R , 即式(4)成立。此时, 可以置信水平 γ 断定仿真不正确, 对工程应用来说, 偏于危险。

若有:

$$R_U^* < R_L, \quad (12)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠度 R^* 小于产品的可靠度 R , 即式(6)成立。此时, 虽然仿真不正确, 但仿真结果偏于保守, 对工程应用来说, 偏于安全。

若有:

$$R_L^* \leq R_U, \quad (13)$$

$$R_U^* \geq R_L, \quad (14)$$

则下式成立:

$$P(|R^* - R| \leq R_U - R_L) \geq (2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1), \quad (15)$$

其中, γ_U^* 和 γ_L^* 分别是使下式成立的置信水平, 即:

$$P(R^* \leq R_U) \geq \gamma_U^*, \quad (16)$$

$$P(R^* \geq R_L) \geq \gamma_L^*, \quad (17)$$

当 $R_U - R_L \leq \delta$ 时, 可以置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1)$ 断定仿真正确, 即在给定的精度 δ 下认为 $R^* = R$ 。当 $R_U - R_L > \delta$ 时, 还不能以置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1)$ 断定仿真是否正确, 此时需进一步补充试验才能做出判断。此外, 通过增加仿真次数可以提高 γ_L^* 和 γ_U^* , 进而可以提高置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1)$ 。

2 可靠寿命仿真检验方法

设 T 为产品的寿命, 是一个随机变量, t_R 为产品在给定可靠度 R ($R \geq 50\%$) 下的寿命, 即:

$$P(T \geq t_R) = R, \quad (18)$$

t_R^* 为通过仿真得到的产品在给定可靠度 R 下的寿命。同样, 由于 t_R 是未知的, 所以无法直接判断 t_R^* 与 t_R 是否相等, 也就无法判断该可靠寿命仿真是否正确。下面给出一种可靠寿命仿真检验方法。

设 t_{RU} 和 t_{RL} 分别为通过试验得到的可靠寿命 t_R 的置信水平为 γ ($\gamma \geq 50\%$) 的单侧置信上、下限, 即:

$$P(t_R \leq t_{RU}) \geq \gamma, \quad (19)$$

$$P(t_R \geq t_{RL}) \geq \gamma, \quad (20)$$

2.1 仿真结果稳定的情况

当 t_R^* 稳定时,若有:

$$t_R^* > t_{RU}, \quad (21)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠寿命 t_R^* 大于产品的可靠寿命 t_R ,即:

$$P(t_R^* > t_R) \geq \gamma, \quad (22)$$

此时,可以置信水平 γ 断定仿真不正确,对工程应用来说,偏于危险。

若有:

$$t_R^* < t_{RL}, \quad (23)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠寿命 t_R^* 小于产品的可靠寿命 t_R ,即:

$$P(t_R^* < t_R) \geq \gamma, \quad (24)$$

此时,虽然仿真不正确,但仿真结果偏于保守,许多情况工程仍然可以应用,且偏于安全。

若有:

$$t_{RL} \leq t_R^* \leq t_{RU}, \quad (25)$$

则下式成立:

$$P(|t_R^* - t_R| \leq t_{RU} - t_{RL}) \geq 2\gamma - 1, \quad (26)$$

当 $t_{RU} - t_{RL} \leq \delta$ 时,可以置信水平 $2\gamma - 1$ 断定仿真正确,即在给定的精度 δ 下认为 $t_R^* = t_R$,其中 δ 为事先给定的精度。当 $t_{RU} - t_{RL} > \delta$ 时,还不能以置信水平 $2\gamma - 1$ 断定仿真是否正确,此时需进一步补充试验才能做出判断。

对于式(25)成立的情况,也相当于假设检验中,在显著度 $\alpha = 2(1 - \gamma)$ 下不拒绝仿真可靠寿命 t_R^* 与产品可靠寿命 t_R 相等 ($t_R = t_R^*$) 的假设。

2.2 仿真结果未稳定的情况

当可靠寿命的仿真结果 t_R^* 未稳定时,设 t_{RU}^* 和 t_{RL}^* 分别为 t_R^* 的置信水平为 γ 的单侧置信上、下限,即:

$$P(t_R^* \leq t_{RU}^*) \geq \gamma, \quad (27)$$

$$P(t_R^* \geq t_{RL}^*) \geq \gamma, \quad (28)$$

若有:

$$t_{RL}^* > t_{RU}, \quad (29)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠寿命 t_R^* 大于产品的可靠寿命 t_R ,即式(22)成立。此时,可以置信水平 γ 断定仿真不正确,且偏于危险。

若有:

$$t_{RU}^* < t_{RL}, \quad (30)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠寿命 t_R^* 小于产品的可靠寿命 t_R ,即式(24)成立。此时,虽然

仿真不正确,但仿真结果偏于保守,对工程应用来说,偏于安全。

若有:

$$t_{RL}^* \leq t_{RU}, \quad (31)$$

$$t_{RU}^* \geq t_{RL}, \quad (32)$$

则下式成立:

$$P(|t_R^* - t_R| \leq t_{RU} - t_{RL}) \geq (2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1), \quad (33)$$

其中, γ_U^* 和 γ_L^* 分别是使下式成立的置信水平,即:

$$P(t_R^* \leq t_{RU}) \geq \gamma_U^*, \quad (34)$$

$$P(t_R^* \geq t_{RL}) \geq \gamma_L^*, \quad (35)$$

当 $t_{RU} - t_{RL} \leq \delta$ 时,可以置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1)$ 断定仿真正确,即在给定的精度 δ 下认为 $t_R^* = t_R$ 。当 $t_{RU} - t_{RL} > \delta$ 时,还不能以置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1)$ 断定仿真是否正确,此时需进一步补充试验才能做出判断。同样,增加仿真次数可以提高置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1)$ 。

3 递减型退化曲线仿真检验方法

产品的性能退化是其可靠性降低并逐步失效的主要原因,所以常常要对性能退化曲线进行可靠性仿真。为此,进一步给出性能退化曲线可靠性仿真的检验方法。

设 $Y(t)$ 为产品在 t 时刻的性能指标,是一个随机变量, $y_R(t)$ 为产品在给定可靠度 R 下的性能退化曲线,即:

$$P[Y(t) \geq y_R(t)] = R \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (36)$$

$y_R^*(t)$ 为通过仿真得到的产品在给定可靠度 R 下的性能退化曲线。由于 $y_R(t)$ 是未知的,所以无法直接判断 $y_R^*(t)$ 与 $y_R(t)$ 是否相等,即无法判断该可靠性退化曲线仿真是否正确。

典型的产品性能退化曲线包括递减型和递增型两大类。本节讨论递减型性能退化情况,即当 $t_i < t_j$ 时,有 $y_R(t_i) \geq y_R(t_j)$ 。设在工程上关心的时间段 $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$ 内, $y_{RU}(t)$ 和 $y_{RL}(t)$ 分别为可靠度 R ($R \geq 50\%$)、置信水平 γ ($\gamma \geq 50\%$) 的性能退化量单侧置信上、下限曲线,即:

$$P[y_R(t) \leq y_{RU}(t)] \geq \gamma, \quad (37)$$

$$P[y_R(t) \geq y_{RL}(t)] \geq \gamma, \quad (38)$$

3.1 仿真结果稳定的情况

当 $y_R^*(t)$ 不随仿真次数增加而显著变化时,即可靠度 R 的仿真性能退化曲线 $y_R^*(t)$ 稳定时,若有:

$$y_R^*(t) > y_{RU}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (39)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 大于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$, 即:

$$P[y_R^*(t) > y_R(t)] \geq \gamma \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (40)$$

此时, 可以置信水平 γ 断定仿真不正确, 对工程应用来说, 偏于危险。

若有:

$$y_R^*(t) < y_{RL}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (41)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 小于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$, 即:

$$P[y_R^*(t) < y_R(t)] \geq \gamma \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (42)$$

此时, 虽然仿真不正确, 但仿真结果偏于保守, 许多情况工程仍然可以应用, 且偏于安全。

若有:

$$y_{RL}(t) \leq y_R^*(t) \leq y_{RU}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (43)$$

则下式成立:

$$P[|y_R^*(t) - y_R(t)| \leq y_{RU}(t) - y_{RL}(t)] \geq 2\gamma - 1 \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (44)$$

当 $y_{RU}(t) - y_{RL}(t) \leq \delta(t)$ 时, 可以置信水平 $2\gamma - 1$ 断定仿真正确, 即在给定的精度 $\delta(t)$ 下认为 $y_R^*(t) = y_R(t)$ 。当 $y_{RU}(t) - y_{RL}(t) > \delta(t)$ 时, 还不能以置信水平 $2\gamma - 1$ 断定仿真是否正确, 此时需进一步补充试验才能做出判断。

对于式(43)成立的情况, 也相当于假设检验中, 在显著度 $\alpha = 2(1 - \gamma)$ 下不拒绝仿真可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 与产品可靠性退化曲线 $y_R(t)$ 相等, 即 $y_R(t) = y_R^*(t)$ 的假设。

3.2 仿真结果未稳定的情况

对于仿真结果 $y_R^*(t)$ 未稳定的情况, 设 $y_{RU}^*(t)$ 和 $y_{RL}^*(t)$ 分别为通过仿真得到的可靠度 R 、置信水平 γ 的性能退化量单侧置信上、下限曲线, 即:

$$P[y_R^*(t) \leq y_{RU}^*(t)] \geq \gamma, \quad (45)$$

$$P[y_R^*(t) \geq y_{RL}^*(t)] \geq \gamma, \quad (46)$$

若有:

$$y_{RL}^*(t) > y_{RU}^*(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (47)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 大于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$, 即式(40)成立。此时, 仿真结果不正确, 且偏于危险。

若有:

$$y_{RU}^*(t) < y_{RL}^*(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (48)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线

$y_R^*(t)$ 小于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$, 即式(42)成立。此时, 虽然仿真不正确, 但仿真结果偏于保守, 对工程应用来说, 偏于安全。

若有:

$$y_{RL}^*(t) \leq y_{RU}^*(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (49)$$

$$y_{RU}^*(t) \geq y_{RL}^*(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (50)$$

则下式成立:

$$P[|y_R^*(t) - y_R(t)| \leq y_{RU}^*(t) - y_{RL}^*(t)] \geq (2\gamma - 1)(\gamma_U^* + \gamma_L^* - 1) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (51)$$

其中, γ_U^* 和 γ_L^* 分别是使下式成立的置信水平, 即:

$$P[y_R^*(t) \leq y_{RU}^*(t)] \geq \gamma_U^* \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (52)$$

$$P[y_R^*(t) \geq y_{RL}^*(t)] \geq \gamma_L^* \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (53)$$

当 $y_{RU}(t) - y_{RL}(t) \leq \delta(t)$ 时, 可以置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_L^* + \gamma_U^* - 1)$ 断定仿真正确, 即在给定的精度 $\delta(t)$ 下认为 $y_R^*(t) = y_R(t)$ 。当 $y_{RU}(t) - y_{RL}(t) > \delta(t)$ 时, 需进一步补充试验才能做出判断。同样, 增加仿真次数可以提高置信水平 $(2\gamma - 1)(\gamma_L^* + \gamma_U^* - 1)$ 。

4 递增型退化曲线仿真检验方法

下面进一步给出递增型退化曲线可靠性仿真检验方法。此时, 若 $t_i < t_j$, 有 $y_R(t_i) \leq y_R(t_j)$ 。设 $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$, $y_{RU}(t)$ 和 $y_{RL}(t)$ 分别为可靠度 R ($R \geq 50\%$)、置信水平 γ ($\gamma \geq 50\%$) 的性能退化量单侧置信上、下限曲线, 如式(37)和(38)所示。

4.1 仿真结果稳定的情况

如果 $y_R^*(t)$ 已趋于稳定, 若有:

$$y_R^*(t) < y_{RL}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (54)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 小于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$, 即:

$$P[y_R^*(t) < y_R(t)] \geq \gamma \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (55)$$

此时, 可以置信水平 γ 断定仿真不正确, 对工程应用来说, 偏于危险。

若有:

$$y_R^*(t) > y_{RU}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (56)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 大于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$, 即:

$$P[y_R^*(t) > y_R(t)] \geq \gamma \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (57)$$

此时, 虽然仿真不正确, 但仿真结果偏于保守, 许多情况工程仍然可以应用, 且偏于安全。

若有:

$$y_{RL}(t) \leq y_R^*(t) \leq y_{RU}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (58)$$

则可以得到与3.1节相同的结论。

4.2 仿真结果未稳定的情况

如果仿真结果 $y_R^*(t)$ 还未稳定,则设 $y_{RU}^*(t)$ 和 $y_{RL}^*(t)$ 分别为通过仿真得到的可靠度 R 、置信水平 γ 的性能退化量单侧置信上、下限曲线,由式(45)和(46)给出。

若有:

$$y_{RU}^*(t) < y_{RL}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (59)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 小于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$,即式(55)成立。此时,仿真结果偏于危险。

若有:

$$y_{RL}^*(t) > y_{RU}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (60)$$

则可以置信水平 γ 断定仿真得到的可靠性退化曲线 $y_R^*(t)$ 大于产品的可靠性退化曲线 $y_R(t)$,即式(57)成立。此时,虽然仿真不正确,但仿真结果偏于保守,对工程应用来说偏于安全。

若有:

$$y_{RU}^*(t) \geq y_{RL}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (61)$$

$$y_{RL}^*(t) \leq y_{RU}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}, \quad (62)$$

其分析过程与3.2节相同,这里不再赘述。

此外,根据以上递减型和递增型两种退化曲线可靠性仿真检验方法,还能判断性能退化曲线在哪一时间段已被正确仿真,在哪一时间段尚未被正确模拟,为进一步分析性能退化曲线未被正确仿真的原因提供指导。

5 实例计算

现要求对某航天器零部件可靠性仿真系统进行验证,经研究决定检验其10年寿命(1.5×10^6 循环)的可靠度。首先,通过可靠性仿真,得到该零部件10年寿命的可靠度 $R^* = 0.998$ 。然后,通过试验得到该零部件无失效寿命数据:共试验8个试件,每个试件均在 10^7 处中止。已知该钛合金零部件的寿命服从两参数 Weibull 分布,则根据文献[15]可取形状参数的下限 $\alpha_0 = 3$,对应于10年寿命、置信水平 $\gamma = 0.9$ 的可靠度置信下限为:

$$R_L = \exp\{t^{\alpha_0} \ln(1 - \gamma)\} / \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} = 0.999$$

因为

$$0.998 = R^* < R_L = 0.999$$

所以,可以置信水平 $\gamma = 0.9$ 断定仿真得到的可靠度 R^* 小于产品的可靠度 R ,仿真系统偏于保守。此时,虽然仿真不正确,但由于工程上要求该零部件10年寿命的可靠度在置信水平 $\gamma = 0.9$ 下,满足 $R \geq 0.996$ 即可,而仿真结果 $R^* = 0.998$ 大于0.996。所以,该仿真系统虽偏于保守,但结果能满足应用要求,工程上可以采用。

上面给出了 Weibull 分布无失效数据的可靠性仿真检验方法的应用算例,对于其它分布和数据类型,相应的可靠度和可靠寿命估计方法可参见相关文献^[15-17],再结合本文方法即可进行仿真检验,这里不再赘述。

6 结束语

(1)建立了可靠性仿真检验方法,能够以高置信水平判断产品可靠度、可靠寿命和可靠性退化曲线的仿真是否正确。

(2)本文方法不仅对正态分布、Weibull 分布、极值分布、指数分布、二项分布等任意分布都适用,而且对完全数据、不完全数据和无失效数据等各种类型的数据也均适用。

(3)本文方法对电子、机械等各类产品和系统均适用,并且可用小样本进行检验,计算简单,便于工程应用。

参考文献

- [1] BESTORY C, MARC F, LEVI H. Statistical analysis during the reliability simulation[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(9-11):1353-1357.
- [2] HU Chenming. IC reliability simulation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1992, 27(3): 241-246.
- [3] XU Jianfeng, XIE Yalian, XU Dan. Mechanical reliability simulation[C] // The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Guiyang, China:IEEE, 2011:1147-1150.
- [4] 安昊,屈桢深,王常虹.基于 Matlab 的交会对接全数字仿真系统[J].系统仿真学报,2015,27(6):1227-1234.
- [5] 李书胜,吴清文,杨献伟,等.月基探测器热设计和计算机仿真[J].计算机工程与设计,2011,32(6):2083-2087.
- [6] SARGENT R G. Verification, validation and accreditation of simulation models[J]. Applied System Simulation, 1997, 1(4): 487-506.
- [7] 王维平,朱一凡,华雪倩.仿真模型有效性确认与验证[M].长沙:国防科技大学出版社,1998.
- [8] 傅惠民.极小子样可靠性评定方法[J].机械强度,2005,27(3):335-338.
- [9] 傅惠民.仿真结果统计检验方法[J].机械强度,2005,27(5):598-603.
- [10] 傅惠民,陈建伟.动态仿真结果距离检验方法[J].机械强度,

2007, 29(2):206-211.

- [11]傅惠民, 邹文娟. 确定性仿真结果检验与状态分析方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5):1124-1127.
- [12]傅惠民, 梁朝虎. 置信检验理论[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2):167-174.
- [13]傅惠民, 梁朝虎. 正态分布置信检验方法[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3):305-312.
- [14]傅惠民, 梁朝虎. 二项分布置信检验方法[J]. 机械强度,

2003, 25(5):513-518.

- [15]傅惠民, 王凭慧. 无失效数据的可靠性评估和寿命预测[J]. 机械强度, 2004, 26(3):260-264.
- [16]傅惠民. 不完全数据秩分布理论[J]. 航空学报, 1993, 14(11):578-584.
- [17]傅惠民, 岳晓蕊, 张勇波. 极少失效数据的可靠性评估和寿命预测[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8):1855-1859.

(上接第6页)

频传输方案。针对传统视频软传输系统中存在的不足,利用深度神经网络、基于图像组的稀疏表示和软传输技术设计了一种高效的无线视频广播方案。利用基于图像组的稀疏表示对基于块的编码方案进行低质图像复原处理。充分发挥卷积神经网络对于数据深层特征的挖掘能力,对信道噪声引起失真进行优化。通过软传输的方式,本文方案在广播场景下避免了悬崖效应的发生,并展示了出色的质量可伸缩性。实验结果表明本文提出的基于深度神经网络的无线视频广播方案在性能上明显优于传统数字视频广播系统。

参考文献

- [1] Digital Video Broadcasting (DVB)[EB/OL]. [2009]. http://www.etsi.org/deliver/etsien/300700300799/300744/01_06_0160/en300744v010601p.pdf.
- [2] SHACHAM N. Multipoint communication by hierarchically encoded data [C]//INFOCOM '92. Eleventh Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Florence, Italy: IEEE, 1992:2107-2114.
- [3] MCCANNE S, JACOBSON V, VETTERLI M. Receiver-driven layered multicast [M]//Readings in multimedia computing and networking. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2001:593-606.
- [4] WU Feng, LI Shipeng, ZHANG Yaqin. A framework for efficient progressive fine granularity scalable video coding[J]. IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(3):332-344.
- [5] SCHWARZ H, MARPE D, WIEGAND T. Overview of the scalable video coding extension of the H.264/AVC standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(9):1103-1120.
- [6] JAKUBCZAK S, KATABI D. A cross-layer design for scalable mobile video [C]//Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM 2011. Las Vegas, Nevada, USA; ACM, 2011:289-300.
- [7] JAKUBCZAK S, KATABI D. SoftCast: One-size-fits-all wireless video [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 41(4):449-450.

- [8] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4):1289-1306.
- [9] SHEN Meiyin, KUO C C J. Review of postprocessing techniques for compression artifact removal [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 1998, 9(1):2-14.
- [10] YEH C H, KANG Liwei, CHIOU Yiwen, et al. Self-learning-based post-processing for image/video deblocking via sparse representation [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(5):891-903.
- [11] BREDIES K, HOLLER M. A total variation based JPEG decompression model [J]. SIAM Journal on Imaging Science, 2012, 5(1):366-393.
- [12] JUNG C, JIAO Licheng, QI Hongtao, et al. Image deblocking via sparse representation [J]. Signal Processing: Image Communication, 2012, 27(6):663-677.
- [13] LIU Xianming, WU Xiaolin, ZHAO Debin. Sparsity-based soft decoding of compressed images in transform domain [C]// IEEE International Conference on Image Processing. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2013:563-566.
- [14] CHANG Huibin, NG M K, ZENG Tiejong. Reducing artifacts in JPEG decompression via a learned dictionary [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):718-728.
- [15] O'ROURKE T P, SETVENSON R L. Improved image decompression for reduced transform coding artifacts [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for video Technology, 1995, 5(6):490-499.
- [16] JAIN V, SEUNG S. Natural image denoising with convolutional networks [C]// Proceedings of the Twenty-Second Annual Conference on Neural Information Processing Systems. Vancouver, British Columbia, Canada; ACM, 2008:769-776.
- [17] BURGER H C, SCHULER C J, HARMELING S. Image denoising: Can plain neural networks compete with BM3D? [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2012). Rhode Island, USA: IEEE, 2012:2392-2399.
- [18] XIE Junyuan, XU Linli, Chen Enhong. Image denoising and inpainting with deep neural networks [C]//Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012). Lake Tahoe, Nevada, USA; ACM, 2012:350-358.
- [19] CHEN Y, POCK T. Trainable nonlinear reaction diffusion: A flexible framework for fast and effective image restoration [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6):1256-1272.