DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2017.07.045

航空发动机成品可靠性设计与验证方法研究及应用

刘海年*，王志会，吴新，栾旭，李昌红，张生
中国航空发动机集团公司 沈阳发动机研究所，辽宁 沈阳 110015

摘 要：长寿命、高可靠性是航空发动机的研制目标，提高发动机配套成品的可靠性对降低发动机故障率、提高装备完好性具有重要意义。本文阐述了发动机成品可靠性设计与验证的工作流程，明确了成品的可靠性仿真、试验和评估方法，提出了基于指数（Exponential）分布和威布尔（Weibull）分布的可靠性和寿命试验方案设计方法，为实现成品可靠性、耐久性和性能的一体化设计提供指导。最后，以某型发动机成品可靠性设计与验证效果为例，说明方法的合理性和有效性。

关键词：航空发动机成品；可靠性设计；可靠性试验；寿命试验；可靠性评估

中图分类号：V239　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-5453 (2017) 07-0045-07

航空发动机工作具有高温、高压和高转速的特点，其配套成品较其他装备工作环境更为复杂和恶劣，内外场使用表现为故障率居高不下。据统计，国内航空发动机因成品问题导致的故障占整机故障的 70%~80% 以上[1]，严重影响了发动机的使用。因此，建立适用于航空发动机成品的可靠性设计与验证方法，对实现成品的长寿命、高可靠性指标要求具有重要意义。

本文在借鉴国外发动机成品和国内飞机机载设备研究成果的基础上，开展发动机成品可靠性设计与验证方法研究，研究制定了成品的可靠性仿真、试验和评估方法，提出了基于指数分布和威布尔分布的可靠性和寿命试验方案设计方法，为成品研制单位完善产品研发体系，实现产品可靠性、耐久性和性能的一体化设计提供支持。

1 国内外研究现状

1.1 国外研究现状

为提高成品研制质量，降低研制成本，波音公司、普拉特·惠特尼集团公司（普惠公司）等开展了大量的可靠性仿真分析与验证技术的研究，如波音公司开展可靠性强化试验验证[2]；霍尼韦尔公司燃油泵产品设计开展结构应力计算、多体动力学仿真、疲劳寿命计算等；普惠公司采用威布尔分布确定成品寿命试验方案[3]，完成了轴承保持架断裂、齿轮泵的故障分析和寿命评估等工作，国外已经积累了丰富的工程经验，将成品的可靠性设计与验证方法与成品的研发体系相融合，实现仿真分析与试验验证的相互支撑。

1.2 国内研究现状

国内飞机研究院所在部分型号的机载设备研制中已经应用了可靠性设计与验证技术，并取得一定成效。但在发动机研制中，由于成品类别多、工况复杂、技术难度大等原因，研制过程中往往注重成品功能、性能的实现和验证，缺少产品的可靠性仿真与验证工作，导致成品可靠性设计与验证技术没有很好地在发动机领域得到应用，在成品可靠性仿真分析、试验方案确定、试验评估等方面需要深入研究。

2 成品可靠性设计与验证方法

2.1 成品可靠性设计与验证工作流程

通过总结电子类成品的故障模式和失效机理，对电子成品开展可靠性仿真分析、可靠性强化试验、可靠性摸底试验和鉴定试验等方法研究；总结机械（机电）类成品的耗损

收稿日期：2017-05-09；　退修日期：2017-05-15；　录用日期：2017-06-05
* 通讯作者 . Tel：15604019916　E-mail：283506493@qq.com
引用格式：LIU Hainian, WANG Zhihui, WU Xin, et al. Investigation on the reliability design and verification methods for aero-engine accessories and its application[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (07) : 45-51. 刘海年，王志会，吴新，等 . 航空发动机成品可靠性设计与验证方法研究及应用 [J]. 航空科学技术，2017, 28 (07)：45-51.

性故障模式和失效机理，开展耐久性仿真分析、常规寿命摸底试验和加速寿命试验等方法研究；根据试验结果，评估成品的可靠性和寿命指标，确定成品可靠性设计、验证与评估工作流程，如图 1 所示。

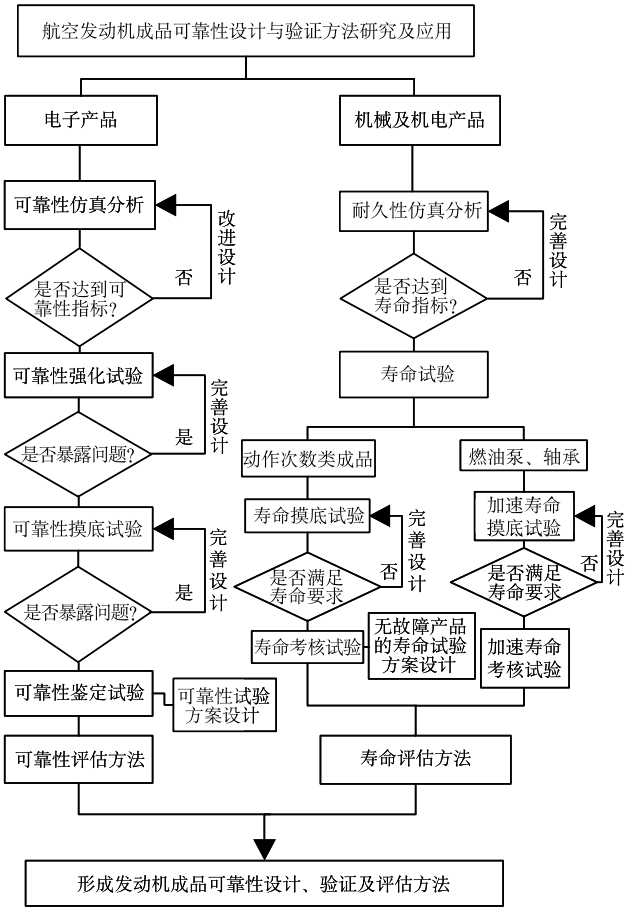

图 1 成品可靠性设计、验证与评估工作流程

Fig.1 The flowchart of the reliability design testing and evaluation for accessories

2.2 成品可靠性设计方法

成品可靠性设计方法主要针对电子类和机械（机电）类产品开展可靠性和耐久性仿真分析，通过构建三维数字样机，进行结构强度、振动特性、可靠性指标预计、耐久性评估等分析工作，确定产品的薄弱环节，完善设计，提高产品的可靠性。

2.2.1 可靠性仿真分析方法

可靠性仿真分析适用于电子类成品，通过建立产品的数字模型，施加产品在各种不同任务过程或工况中所经历的环境和工作载荷，通过应力分析将载荷分解到产品各组成模块，而后进行故障预计和可靠性评估，计算产品的平均故障时间。可靠性仿真分析的工作流程，如图 2 所示。

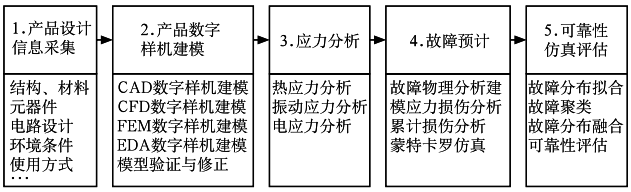

图 2 可靠性仿真分析工作流程

Fig.2 The flowchart of the reliability simulation analysis

2.2.2 耐久性仿真分析方法

耐久性仿真试验适用于具有耗损性失效模式的机械（机电）类成品，主要通过在产品的数字样机上模拟施加产品所经历的载荷历程（包括工作载荷和环境载荷），进行应力分析和耗损性失效时间计算，从而找出产品的薄弱环节，评价产品的寿命水平，为产品设计改进与后续加速寿命试验奠定基础。耐久性仿真分析的工作流程如图 3 所示。

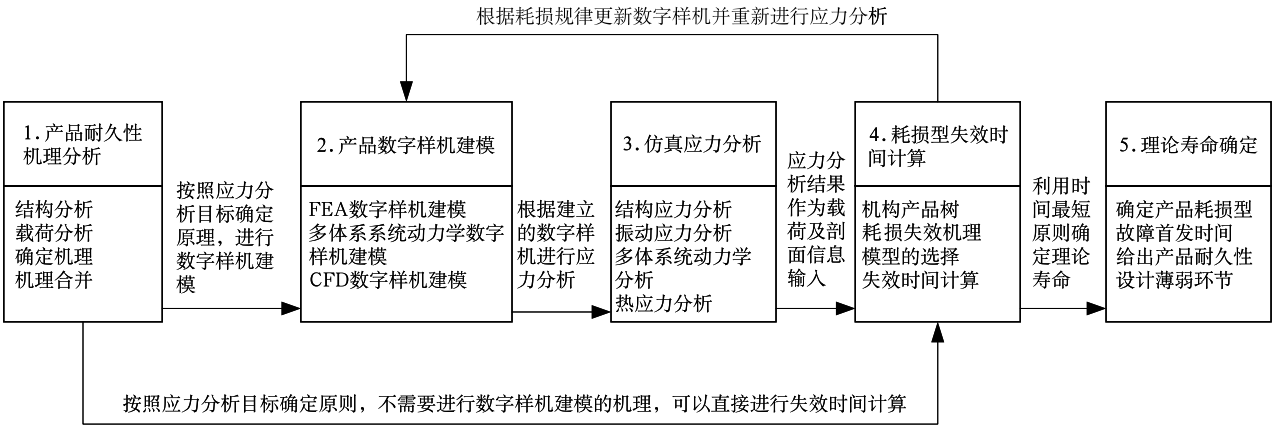

图 3 耐久性仿真分析工作流程

Fig.3 The flowchart of the durability simulation analysis

2.2.3 振动应力仿真分析方法

成品振动仿真分析是确定产品的振动特性和内部振动响应分布情况，确定产品的薄弱环节，为产品完善设计提供指导。成品振动仿真分析方法采用 ANSYS WORKBENCH 有限元分析软件[4]，对随机振动载荷下的产品结构进行疲劳强度分析，通过动力学数值计算，得到产品在随机激励下的应力 / 应变响应，根据线性累计损伤理论及三区间技术进行结构的疲劳寿命计算，进而可以求得结构危险点位置的疲劳累积损伤和疲劳寿命。振动疲劳寿命仿真分析工作流程，如图 4 所示。

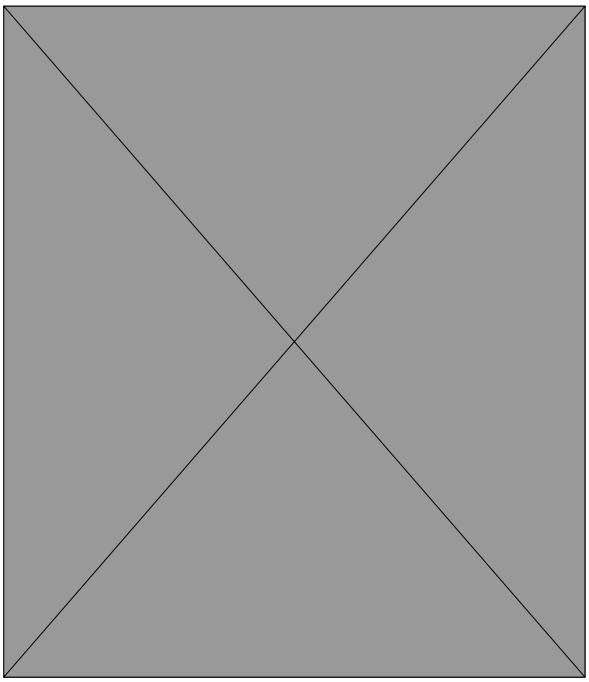

图 4 振动应力仿真分析工作流程

Fig.4 The flowchart of vibration simulation analysis

2.3 成品可靠性试验方案设计方法

电子类产品采用指数分布；机械（机电）类成品采用威布尔分布[5]。电子类成品通常综合考虑使用方和承制方的风险，制订定时截尾的试验方案；机械（机电）类成品通常综合考虑产品的样本量、置信度和可靠度，制订无故障寿命试验方案。

2.3.1 电子类成品可靠性试验方案设计

电子类产品按照 GJB 899A—2009《可靠性鉴定与验收试验》[6] 的要求制订定时截尾试验统计方案，标准中给出试验方案设计计算公式，如式（1）和式（2）所示：

$$1-\alpha=\sum_{k=0}^{r-1}\frac{(T/\theta_0)^k\,\mathrm{e}^{-T/\theta_0}}{K!} \tag{1}$$

$$\beta=\sum_{k=0}^{a}\frac{(T/\theta_1)^k\,\mathrm{e}^{-T/\theta_1}}{K!} \tag{2}$$

式中：T 为试验时间；a 为试验接收的故障数；$r=a-1$ 为拒收的故障数；α 为使用方风险；β 为承制方风险；θ_0 为检验上限，θ_1 为检验下限，即平均故障间隔时间（MTBF）。

根据式（1）和式（2），在已知使用方风险和承制方风险、产品的 MTBF 的条件下，可以计算试验系数、接收和拒绝的故障数，为电子产品制订可靠性试验方案提供指导。

假设某型数字电子控制器的 MTBF 为 5000h，按照式（1）和式（2）在使用方和承制方风险为 0.2 和 0.3 时，计算可靠性试验方案的结果如表 1 所示。也就是说，在试验为 8050h 和 12200h 时，出现 0 个和 1 个故障，试验通过。按照同样方法计算 GJB 899A 中方案 21 的试验系数应为 1.2，表中为 1.1 的试验系数有误。

表 1 电子产品可靠性试验方案设计

Table1 The reliability testing concept design for electronic accessories

序号	使用方风险	承制方风险	试验系数	试验时间	接受	拒绝
1	0.2	0.2	1.61	8050	0	1
2	0.3	0.3	2.44	12200	1	2

2.3.2 机械（机电）类成品寿命试验方案设计

机械（机电）类成品寿命试验通常按照《航空技术装备寿命和可靠性工作暂行规定》[7] 要求，采用工程经验法完成 2 件产品寿命指标要求的 1.5 倍试验。该方法在一定程度上考虑了产品寿命的分散性，但不能准确反映产品试验系数和寿命分布、可靠度等的关系。

本文确定的寿命试验方案设计就是为定量描述产品寿命分布、样本量、置信度和可靠度与试验系数的关系，给出产品的试验方案。假设机械（机电）类成品寿命服从两参数威布尔分布。

$$F(x)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \tag{3}$$

式中：m 为形状参数，η 为尺度参数（也称特征寿命），形状参数反映产品分散性，形状参数越大，分散性越小。查阅国内材料标准件的形状参数统计结果为 2.2[8]，考虑实际构件的分散性，本文假设国内构件形状参数为 2。也可根据产品的寿命数据，采用极大似然估计法进行威布尔分布拟合[9]，确定产品形状参数。根据小子样零故障寿命试验方法[10]，基于威布尔分布的无故障寿命试验方案设计，如式（4）

所示。

$$T=[-\ln(1-\gamma)]^{\frac{1}{m}}\cdot\frac{t}{[-\ln(R(t))]^{\frac{1}{m}}} \tag{4}$$

式中：γ 为置信度，$R(t)$ 为寿命可靠度，n 为样本量，T 为试验时间，t 为成品寿命指标。

假设某产品的寿命为 5000h，试验件为 2 台，产品的分散系数为 2，根据式 (4) 计算获得不同可靠度和置信度要求的试验时间，如表 2 所示。按照同样方法计算 2 件产品 1.5 倍的试验系数，在置信度为 0.8 的条件下，可靠度为 0.70，不满足研制总要求 0.9 的要求。

表 2 试验时数 T（n=2，m=2，单位：h）

Table 2 The test time T（n=2，m=2，unit：h）

可靠度 \ 置信度	0.95	0.90	0.85	0.80
0.95	27019	23688	21502	19804
0.90	18852	16528	15002	13818
0.85	15179	13308	12079	11126
0.80	12954	11357	10309	9495

2.4 成品可靠性试验方法

成品可靠性试验方法主要依据成品可靠性和耐久性仿真分析的结果，明确产品的失效机理和敏感应力，针对电子类产品开展可靠性强化试验和可靠性（摸底）鉴定试验，针对机械（机电）类产品开展寿命（摸底）试验或加速寿命试验。

2.4.1 成品可靠性强化试验

发动机成品的可靠性强化试验是以新研和改进较大的关键、重要电子类成品为试验对象，进行故障模式、影响及危害性分析（FMECA），确定产品主要的故障模式以及敏感应力，依据分析结果制订可靠性强化试验方案，在较短的时间内对产品施加步进应力，尽早发现成品的潜在设计与工艺缺陷，通过试验、分析、改进的过程，使成品在研制初期达到较高的可靠性水平。对于电子类成品，试验方案主要包括低温步进试验、高温步进试验、快速温变循环试验、振动步进试验、综合环境应力试验。可靠性强化试验的具体工作流程可参考文献 [1]。

2.4.2 电子类成品可靠性（摸底）试验

电子类产品可靠性（摸底）试验主要验证产品的可靠性指标是否达到规定要求，可靠性试验通常制定温度－振动－电应力的综合环境试验剖面，进行三综合试验。电子产品可靠性试验剖面需要综合考虑发动机典型任务剖面及混频，结合发动机整机试车及试飞数据，确定不同工作状态环境温度、振动量值等，考虑发动机冷天 / 热天的工作环境，采用比例加权法获得产品的可靠性试验剖面，如某型发动机电子产品的可靠性综合环境试验剖面如图 5 所示。

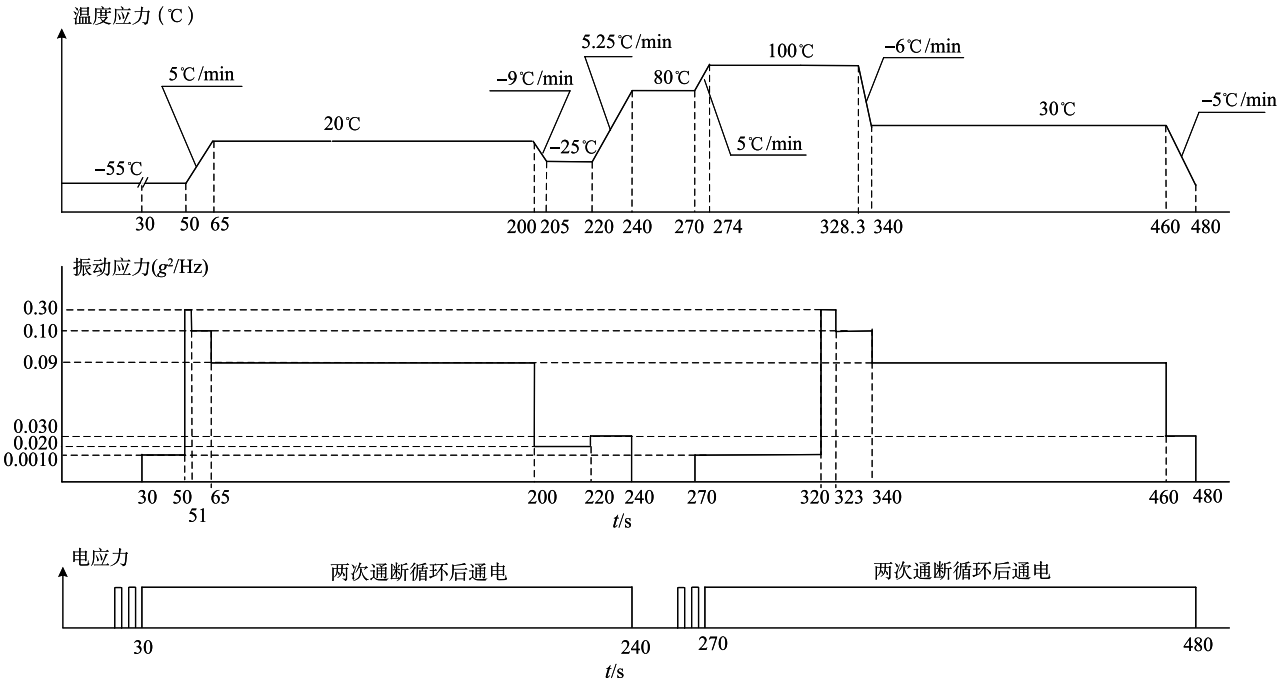

图 5 成品可靠性试验综合环境剖面

Fig.5 The reliability testing synthetic environment profiles

2.4.3 机械（机电）类成品寿命试验

机械（机电）类产品寿命试验主要验证寿命指标是否达到规定要求，对于该类成品一般开展常规寿命试验或加速寿命试验。根据产品的失效机理和敏感应力，对活门类、作动筒类、动作次数类成品采用常规寿命试验或等效加速试验，具体试验方法如表 3 所示。对于泵调类、轴承类成品制定加速寿命试验方法，通过开展产品故障机理分析、敏感应力加速性分析、加速因子确定、高应力水平确定、制订加速试验方案等分析工作，明确加速寿命试验方案，具体试验方法如表 4 所示。加速寿命试验方法要合理确定加速因子，避免因为增加试验应力导致不符合实际工况载荷引起的破坏。

表 3 成品常规寿命试验方案

Table 3 The general life testing concept development

成品类别	敏感应力	常规寿命试验
点火系统	振动、温度载荷	综合环境条件下的点火次数试验
作动筒类	振动、环境温度、介质温度、压力载荷	工作循环试验 振动耐久试验
散热器类	振动、温度、压力、流量载荷	温度冲击 压力交变 振动耐久试验
传感器类	振动、温度载荷	振动耐久试验 温度交变试验

表 4 成品加速寿命试验方案

Table 4 Accelerated life testing concept development

成品	敏感应力	加速寿命试验
燃油泵调节器	转速、压力、燃油温度	工作转速、压力和介质温度
轴承	转速、工作载	提高轴承额定载荷

2.5 成品可靠性评估方法

建立小子样故障数据的成品可靠性评估方法，针对电子成品建立基于指数分布的可靠性评估方法；针对机械（机电）类成品建立基于威布尔分布的寿命评估方法，为成品可靠性和寿命指标评估提供指导。

2.5.1 电子类成品可靠性指标评估方法

根据数理统计学方法[11, 12]，针对电子类成品确定基于指数分布的定时截尾试验可靠性指标 θ 置信下限的计算方法，如式 (5) 所示。当试验过程中未出现故障，可参考文献 [13] 确定置信下限的计算方法，如式 (6) 所示。

定时截尾有故障：

$$\begin{cases} T=\sum_{i=1}^{r} t_i+(n-r)t_s \\ \theta_L=\dfrac{2r}{\chi^2_{(1-c)/2}(2r+2)}\hat{\theta} \end{cases} \tag{5}$$

定时截尾无故障：

$$\begin{cases} T=\sum_{i=1}^{n} nt_s \\ \theta_L=\dfrac{T}{\ln(\alpha)} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\hat{\theta}=T/r$，$\hat{\theta}$为平均故障间隔时间；T 为总的试验时间；n 为样本数；r 为故障数；t_i 为故障时间；t_s 为定时截尾时间；θ_L 为置信下限；c 为置信度。

假设某电子产品寿命服从指数分布，定型试验为定时截尾试验，样本量为 3，截尾时间为 1000h，试验中有 1 个产品故障，故障时间为 490h。给定置信度 80%，按照式 (5) 的计算方法获得产品的 MTBF 点估计及单侧置信下限结果。

(1) 产品 MTBF 点估计：

$$\hat{\theta}=T/r=\frac{\sum_{i=1}^{r} t_i+(n-r)t_s}{r}=\frac{490+(3-1)\times 1000}{1}=2490$$

(2) 产品 80%单侧置信下限 MTBF 估计：

$$\frac{2r}{\chi^2_{(1-c)/2}(2r+2)}\hat{\theta}=\frac{2\times 1}{\chi^2_{0.1}(2\times 1+2)}\times 2490=640.2$$

2.5.2 机械（机电）类成品寿命指标评估方法

按照试验数据的处理方法[14]，针对机械（机电）类成品建立基于威布尔分布的寿命指标评估方法，如式 (7) 所示，确定产品寿命指标的可靠寿命。

$$\hat{t}_R=\hat{\eta}\times\left[\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right]^{\frac{1}{\hat{m}}} \tag{7}$$

假设某机械产品样本量为 5，试验期间故障为 2 个，按照极大似然估计法获得产品寿命分布服从形状参数为 2，尺寸参数为 550h 的两参数威布尔分布，按照式 (7) 的计算方法获得产品在可靠度为 0.9 的可靠寿命点估计为：

$$\hat{t}_R=\hat{\eta}\times\left[\ln\left(\frac{1}{R}\right)\right]^{\frac{1}{\hat{m}}}=550\times\left[\ln\left(\frac{1}{0.9}\right)\right]^{\frac{1}{2}}=178.5$$

3 应用效果

某型发动机对配套成品在原型机研制阶段开展了成品可靠性设计与验证研究与应用工作，该方法很好地支撑了发动机 55 项成品可靠性仿真和耐久性仿真分析、可靠性强化试验、可靠性摸底和耐久性试验的开展，其中，4 项电子类成

品发现薄弱环节 35 处 改进 20 处，改进实施率超过 57%；25 项机械（机电）类成品耐久性仿真分析，发现薄弱环节 45 处，落实设计更改 26 项，改进实施率超过 42%；55 项成品的可靠性和寿命试验累计暴露 110 项故障，落实设计更改 65 项，改进实施率超过 59%，为成品研制暴露了大量的薄弱环节，提高了成品的可靠性和寿命水平。

发动机成品可靠性和寿命试验暴露的故障如图 6 所示，成品故障主要集中在燃油泵－调节器、数字电子控制器等产品。电子类产品暴露芯片引脚断裂、元器件质量不合格、性能超差、焊接裂纹、脱焊等故障模式，其原因为在高量值振动环境条件下，暴露产品可靠性问题；机械（机电）类产品主要暴露超转阀门断裂、叶轮轴断裂、作动筒暴露漏油、连杆断裂等故障模式，其主要原因为循环载荷作用下的疲劳破坏。成品可靠性和寿命试验结果与发动机整机试车和半物理试验暴露问题基本一致，表明试验方法的有效性。

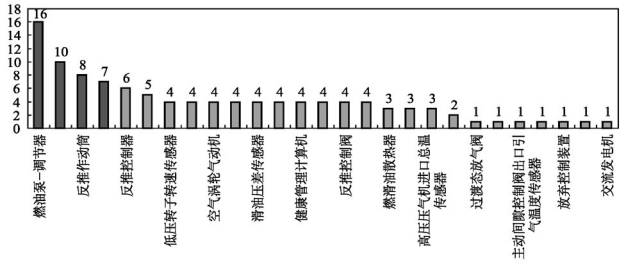

图 6 发动机成品可靠性和寿命试验暴露故障统计

Fig.6 The failure statistic for accessories reliability and life testing

4 结论

本文依据航空发动机成品研制的现状，结合可靠性基本理论，研究制定了电子类成品的可靠性仿真分析、试验和评估方法；明确了机械（机电）类产品的耐久性仿真分析、（加速）寿命试验和评估方法；提出了基于指数分布和威布尔分布的可靠性和寿命试验方案设计方法；并以某型发动机成品可靠性设计与验证的工作效果为例，表明该方法能够为完善成品设计体系，开展成品可靠性设计与验证工作，提高成品可靠性和寿命水平，为实现成品可靠性、耐久性和性能的一体化设计提供指导。 AST

参考文献

[1] 刘文兴，刘海年，刘慧娟 . 航空发动机成品研制中的可靠性强化试验技术的应用 [J]. 航空维修与工程，2013（3）：40–43.
LIU Wenxing，LIU Hainian，LIU Huijuan. Application of reliability enhancement testing in the development of aero-engine accessories[J]. Aviation Maintenance & Engineering，2013（3）：40–43.（in Chinese）

[2] 张青山 . 可靠性强化试验技术及其应用 [J]. 电子产品可靠性与环境，2003，12（6）：40–42.
ZHANG Qingshan. Reliability enhancement test and its application[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing，2003，12（6）：40–42.（in Chinese）

[3] 宋兆泓，译 . 威布尔分析手册 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1992：63–74.
SONG Zhaohong translated. Weibull analysis handbook[M]. Beijing：Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，1992：63–74.（in Chinese）

[4] 张岩 . ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通 [M]. 北京：机械工业出版社，2014：145–158.
ZHANG Yan. ANSYS Workbench 15.0 finite element analysis from introduction to master[M]. Beijing：Mechanical Industry Press，2014：145–158.（in Chinese）

[5] 谷耀新 . 三参数威布尔分布参数估计方法 [J]. 沈阳工业学院学报，1997，16（4）：54–57.
GU Yaoxin. The estimation method for there parameters of Weibull distribution[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology，1997，16（4）：54–57.（in Chinese）

[6] 中国人民解放军总装备部 . GJB 899A—2009 可靠性鉴定和验收试验 [S]. 北京：总装备部军标出版发行部，2009：27–30.
PLA General Armaments Department. GJB 899A—2009 Reliability testing for qualification and production acceptance[S]. Beijing：General Armaments Department Military Standard Press，2009：27–30.（in Chinese）

[7] 国防科学技术工业委员会 . 航空技术装备寿命和可靠性工作暂行规定 [S].1985：10–15.
Commission of Science，Technology and Industry for National Defense. Aviation technology equipment life and reliability working regulations[S]. 1985：10–15.（in Chinese）

[8] 贺小帆，刘文 . 服从不同分布的疲劳寿命分散系数分析 [J]. 北京航空航天大学学报，2002，28（1）：47–49.
HE Xiaofan，LIU Wen. On scatter factors of fatigue life obeying different distributions[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2002，28（1）：47–49.（in Chinese）

[9] 杨谋存，聂宏 . 三参数 Weibull 分布参数的极大似然估计数值

解法 [J]. 南京航空航天大学学报，2007，39（1）：31-34.
YANG Moucun，NIE Hong. Advanced algorithm for maximum likelihood estimation of three parameter Weibull distribution[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics，2007，39（1）：31-34.（in Chinese）

[10] 高雅娟，陆山 . 试飞阶段可靠性评估及试验设计方法 [J]. 航空发动机，2014，40（3）：66-70.
GAO Yajuan，LU Shan. Reliability assessment method and test scheme design during flight test[J]. Aeroengine，2014，40（3）：66-70.（in Chinese）

[11] 孙荣恒 . 应用数理统计 [M]. 北京：科学出版社，2004：38-45.
SUN Rongheng. Application of mathematical statistics[M]. Beijing：Science Press，2004：38-45.（in Chinese）

[12] 高社生，张玲霞 . 可靠性理论与工程应用 [M]. 北京：国防工业出版社，2002：217-226.
GAO Shesheng，ZHANG Lingxia. Reliability theory and engineering application[M]. Beijing：National Defense Industry Press，2002：217-226.（in Chinese）

[13] 牛鑫，宋清山，陈鸣，等 . 对可靠性试验参数和置信区间的探讨 [J]. 电子产品可靠性与环境试验，2003，31（5）：10-13.
NIU Xin，SONG Qingshan，CHEN Ming，et al. Research on reliability test parameter and confidence interval[J]Electronic Product Reliability and Environmental Testing，2003，31（5）：10-13.（in Chinese）

[14] 贺国芳，许海宝 . 可靠性数据的收集与分析 [M]. 北京：国防工业出版社，1995：147-152.
HE Guofang，XU Haibao. Collection and analysis of reliability data [M]. Beijing：National Defense Industry Press，1995：147-152.（in Chinese）

作者简介

刘海年（1984— ）男，硕士，高级工程师。主要研究方向：发动机研发体系建设。

Tel：15604019916 E-mail：283506493@qq.com

Investigation on the Reliability Design and Verification Methods For Aero-engine Accessories and Its Application

LIU Hainian*, WANG Zhihui, WU Xin, Luan Xu, LI Changhong, ZHANG Sheng

AECC Shenyang Engine research Institute, Shenyang 110015, China

Abstract: Long-lifetime & high-reliability are the researching goals of aero-engine as the power plant. It is very important to decrease the engine failure rate, ensure the equipment maturity. The procedure of reliability design and verification methods for aero-engine accessories were illuminated. In order to achieve the accessories reliability, durability and performance integration design, the reliability simulation, testing and evaluation methods were determined, the reliability and life testing concept design methods based on the Exponential and Weibull distribution were proposed. Finally, with the reliability design and verification methods for aero-engine accessories as an example, the rationality and validity of the methods were verified.

Key Words: aero-engine accessories; reliability design; reliability testing; life testing; reliability evaluation

Received: 2017-05-09； **Revised:** 2017-05-15； **Accepted:** 2017-06-05

***Corresponding author. Tel.：** 15604019916 **E-mail:** 283506493@qq.com