

从预计到预防：远离 MTBF 的转变

摘要：今天的产品开发环境要求创新、提高可靠性水平、加快产品上市时间和降低成本。本文介绍了从预测转向预防并针对上述所有四个目标的一个可靠性工程过程。联合技术公司在过去 20 多年以各种形式应用了这一过程。

1 引言

在大型跨国公司中，可靠性预计几十年来一直是一个基本的部分，并应用于各种产品线，从飞机的航空电子和功率电子产品、航天器制导系统和喷气发动机控制，到升降机和 HVAC 设备。

在我们花费无数个小时收集计算平均无故障工作时间（MTBF）及类似指标所需的数据，并将信息传播给内部和外部人员之后，从中获得了什么？

简单的答案是：不多。经验研究表明，预计大多不准确，把这些时间花在实际预防可靠性问题的形成会更好。

本文提供了联合技术公司（UTC）从可靠性预计到更现代和主动方法的逐渐转变历程。该公司为财富 50 强企业，在目前的航空和建筑行业中具有很强的竞争力。

2 背景

有许多年 UTC 承接的大部分军用合同都要求用 MIL-HDBK-217 “电子设备的可靠性预计”中的方法进行可靠性预计，该手册于 1961 年由美国 DoD 首次出版。

1980 年代早期，本文作者作为一名可靠性工程师首个任务就是对三台在 B-2 隐形轰炸机上使用的航空电子设备进行预计。

1980 年代后，国防采购热潮结束，许多 UTC 员工转到公司的商业部门，可靠性预计（包括 MTBF 的预计）也随之而去。今天这类计算在某些产品线（如喷气发动机控制）依然进行，部分原因在于军用项目的遗留问题。

但到了 1990 年代，UTC 开始从 MTBF 类的预计转向更主动和有效的做法，如设计和生产过程中的加速试验和持续改进活动。高加速寿命试验（HALT）、

机械应力大的场合

高加速应力筛选 (HASS) 和市场反馈分析 (MFA) 等方法开始在 UTC 的升降机和商业航空部门出现, 之后又回到国防相关的业务中。

3 古老的历史: MTBF 预计

在早期, 联合技术公司内的平均无故障工作时间 (MTBF) 预计要消耗较多的可靠性工程资源, 包括用 MIL-HDBK-217 的模型计算所有电子元器件的故障率, 然后求和、取倒数:

$$MTBF = 1 \div \sum \lambda(i)$$

其中 $\lambda(i)$ 是单个元器件失效率 (单位为失效数每百万小时)。

公司有一个内部开发的计算机程序, 称为“元器件应用分析” (PAA), 安装在 VAX 系统中, 可自动进行这一过程。MIL-HDBK-217 新版本出版后, 需要可靠性小组的软件专家对程序进行维护和修改。

预计过程还要求有电设计、系统工程和热分析部门提供的输入, 这需要占用产品研发的资源。

一个典型的预计需要数百个工时才能完成, 结束的时候通常是 ppt 上的单行或两行的项。即便没有达到 MTBF 要求, 公司通常也没有采取措施改进产品。而是修改假设条件以便符合 MTBF。

公司的商业部门 Otis 升降机公司和 Carrier (HVAC 设备的提供商) 可靠性水平开始下降。

例如, 1980 年代和 1990 年代早期 Otis 一般的升降机系统装置平均每年每台装置维修 (称为“召修”) 次数达到 4 次。在 Carrier, 由于大型变压器在印刷电路板上安装方法的选择这样一个简单的设计问题, 造成一个加热炉控制线路由于潜在火灾风险而被召回。不用说, 当合同到期续约时, 客户另择他人。

一个 UTC 航空部门的研究表明, MTBF 预计值与实际值相比往往不准确, 喷气发动机控制的偏差一般为 3:1。

预计方法假设较复杂或机械元器件 (如微处理器和继电器) 最可能在现场失效, 且绝对温度水平是主要的可靠性驱动因素。围绕公司的一个“经验法则”表明, 降低温度 10℃ 或 20℃ 可奇迹般地使 MTBF 翻倍。故障模型并不一定考虑设计错误 (如选择了错误类型的元器件)。

复杂元器件有时会失效, 但大多数都不会。电阻、电容和焊接等复杂度较低的元器件会发生失效, 有时远超预计的失效率。要降低产品温度会增加复杂度 (从而降低可靠性)、费用、重量和产品上市时间。设计错误会造成许多失效, 而非元器件缺陷。

4 新的时期：预防

1990 年代早期思路开始转变。客户（尤其对公司而言变得比国防业务更为重要的商业产品线客户）开始对改进可靠性有了更多的需求。

Otis 管理层向工程部门提出以 10:1 的比例提高可靠性，同时采取其他措施，如引入创新，缩短产品上市时间，降低成本。

公司成立了跨专业小组来研究这一问题，该小组决定引入几个新的工具，包括 HALT、HASS 和 MFA，并对现有的几个工具（如故障模式与影响分析 (FMEA)）进行改进。

4.1 试验

新方法和改进方法一起组成了名为“快速产品开发”过程的一部分。例如，下图显示了设计可靠性试验 (DRT)（包括 HALT）和持续可靠性试验 (ORT)（包括 HASS）以及市场反馈分析，是如何配合 UTC 的开发过程的。开展的工作还包括对以往产品经验教训的回顾并从中获得有价值的东西用于未来的项目。

设计可靠性试验在产品开发早期进行，并着重于发现设计错误造成的缺陷，如选择了错误的部件或散热不足。

这一过程的目标是让产品“更健壮”，通过发现和纠正相关缺陷或在使用中最可能出现的试验故障，使产品更能耐受目标应用环境。通常在试验过程中施加的应力水平达到了“技术的基础极限”或实际缺陷出现的最大值。

在整个开发过程要不断地对样机以及生产前版本、甚至生产版本的产品进行设计可靠性试验，而不是仅仅在项目结束时进行。

试验要尽量在最低“约定 (indenture)”或产品配置层级上进行，以便应力

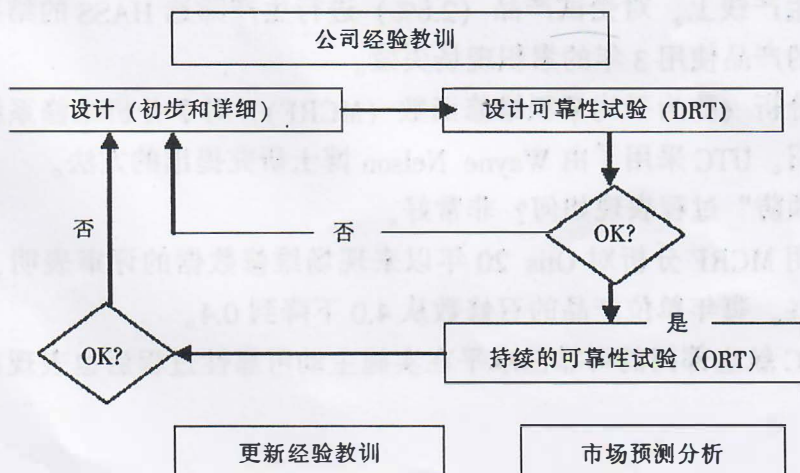


图 1 结合经验教训

可快速并集中施加在所有可能的失效位置上。约定层级可不止一个，以提高试验效率和效果。例如，每个印刷电路板和包含所有板的组件可分开进行试验。

某些试验过程要施加应力直至产品失效，包括“使用性的”（应力去除后样品可恢复）或“破坏性的”（样品不能恢复）试验。其余试验则进行到预定循环数或时间为止。

持续可靠性试验是对电子产品在生产过程中进行，主要目标有两个：

- a) 确定与设计措施有关的、可能进入产品并降低其健壮性的任何缺陷；
- b) 筛选生产引发的缺陷。

要达到第一个目标，需重复进行部分或全部设计可靠性试验，以确定元器件替换、供应商或生产位置更改或其他问题是否会影响可靠性。某些部门每年不论是否进行了更改都要重复进行 DRT，另一些则是在累积几个重大变更后重复试验。

对于第二个目标，可对已经较为健壮的产品进行 HASS 和生产版的 HALT，以发现和检测特定的缺陷，如元器件强度退化或焊接问题。

要抽样进行相关筛选 HASA（高加速应力审查），有时还要通过统计分析确定接受试验的产品数。

4.2 分析

市场反馈分析包括了几个不同的方法。

威布尔（或 Weibayes）方法常常用于分析试验和现场数据。1980 年代早期 UTC 首次推出的标准目前依然在用。

例如，用威布尔比较加速应力试验结果和旧产品的现场性能就是一个有价值的工作。它体现了主动可靠性方法的好处。

在一个生产线上，对受试产品（2.6%）进行生产筛选 HASS 的结果等于没有经过试验的产品使用 3 年的累积现场失效。

非参数分析（称为平均累积维修函数（MCRF））对于分析维修系统的现场数据非常有用。UTC 采用了由 Wayne Nelson 博士研究提出的方法。

那么“预防”过程表现如何？非常好。

例如，用 MCRF 分析对 Otis 20 年以来现场维修数据的评审表明，现场故障下降了 90%。每年单位产品的召修数从 4.0 下降到 0.4。

其他 UTC 航空部门的可靠性水平在实施主动可靠性过程后也表现出明显的改进。

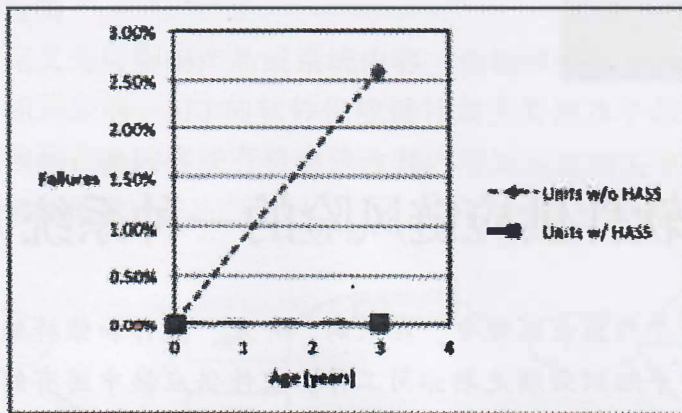


图2 例子的试验结果

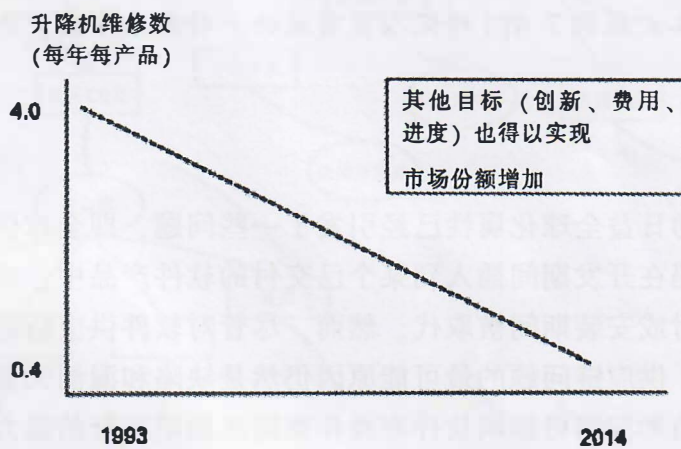


图3 Otis 可靠性改进

(蔡少英 供稿)