

# 可靠性基础知识讲座

## 第二讲 可靠性设计

廖炯生

产品可靠性首先是设计出来的，设计决定了产品的固有可靠性水平。所谓固有可靠性水平，是指产品可靠性的一个上限值：除非经过改进设计，不可能超过这个上限；只有在生产、试验、包装、运输、使用过程中都做得尽善尽美、保证实现设计意图、不引入任何不可靠因素，就达不到这个上限。通常产品实际可靠性要低于固有可靠性。因此，概括起来可以说：可靠性是设计出来的、生产出来的、管理出来的。而管理必须贯穿于设计、生产、使用全过程。

但是，这决不意味着对于可靠性分析计算和可靠性试验的重要性有丝毫忽视。没有分析计算就没有设计，没有试验就不能暴露问题加以改进。

这一讲以可靠性设计为中心，分别介绍产品可靠性指标论证、可靠性模型的建立、可靠性指标分配、可靠性预测等方面的基本概念。

### 可靠性指标论证

可靠性是产品质量的重要内容。

研制的武器装备，如果只有战术技术指标要求，不进行可靠性设计，生产出来的产品可靠性就不会高。民用产品也有类似情况，例如过去国产电视机只有电光声指标，没有可靠性指标。尽管电视机合格出厂，但是不可靠，需要大量返修。针对这个问题，电视机工业部门把可靠性指标 MTBF 作为质量管理的主攻方向，努力攻关，从而提高了电视机可靠性。

为什么过去产品设计没有订可靠性指标？这也有“客观原因”。因为可靠性是概率，不是用一个仪表能测量的。产量很少的大型复杂系统，要对全系统试验结果进行统计推断是很困难的。要有板有据地确定这种系统的可靠性指标，要验证所确定的可靠性指标也很困难。但必须知难而进，坚持在开始产品方案论证的同时进行可靠性指标论证，坚持订出可靠性指标，坚持进行可靠性设计。这本身，首先表明了产品设计指导思想要转变，要从不重视可靠性到重视可靠性设计，从“可靠性尽量做”的含糊观念到可靠性量化管理，从单纯追求高精尖技术指标转变到“在满足任务书技术要求的条件下以简单可靠为第一位”。另一方面，可靠性定量指标的相对关系比绝对数字的准确性更重要。可靠性指标的论证确定、分配和预测是作为一种控制手段，用来相对比较不同方案，揭露薄弱环节。所以每个工程设计人员，应当从一开始工作就养成一种习惯：结合可靠性来考虑任何一个产品的工程设计问题。

如何确定产品可靠性指标？原则上，根据任务书要求，现实的元器件和原材料及工艺水平，部件研制经验，时间进度和投资能力，并参考国内外同类产品的可靠性指标，加以综合权衡比较来确定。这是一项系统工程决策，只能对具体问题作具体分析，没有通用的现成答案。

定了系统可靠性指标，要分配到各个分系统，大家来保证。但是往往有这种情形：下面哇哇叫，都说达不到。怎么办？答

曰：哇哇叫也得分配下去，要各分系统各部件找薄弱环节，针对性地改进，逐步提高可靠性。

定指标当然要考虑如何检验。小子样产品无法检验怎么办？大系统可以对分系统、部件级检验。还要注意可靠性指标有检验和保障两方面的意义，不能检验的要认真保障。

可靠性指标能影响系统技术性能指标的确定和系统结构的选择，也就是影响系统方案的选择。这种能动的反作用很重要。正确的系统方案往往需要多方面反复推敲，有问题及早向总设计师提出建议，免得“木已成舟”，来不及补救。

### 可靠性模型的建立

进行可靠性指标论证、分配以及分析系统、设备的可靠性，首先要建立可靠性模型。可靠性模型反映系统及其各单元间的可靠性逻辑关系和数学关系，是可靠性工程中一项基础工作。

可靠性模型包括可靠性框图和可靠性数学模型。可靠性框图表示系统所有单元之间的可靠性关系，它能简单又直观地说明完成任务需求各种串、并联网络图。要编制可靠性框图需要清楚地了解产品任务要求及各种使用条件。可靠性框图不同于功能框图，功能框图说明为达到性能要求系统各单元间功能关系。可靠性数学模型说明系统故障率与其各单元故障率之间的数学关系，用以定量预计、分配可靠性。

由于可靠性设计有两个目标，一是提高产品完成预期任务的能力，二是减少维修及后勤保障要求，因此提出了任务可靠性、基本可靠性两个概念。

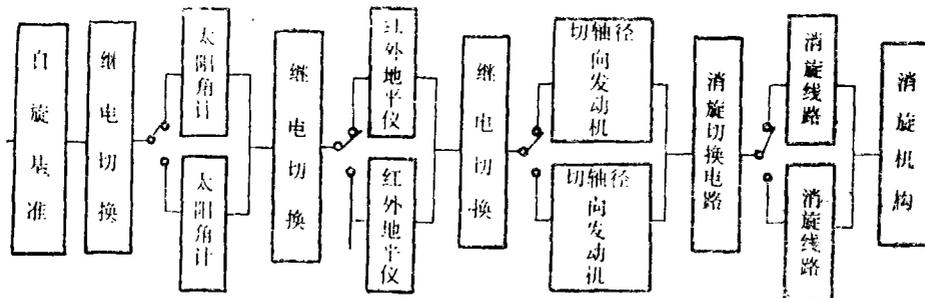
基本可靠性模型是一个全串联的模型，用它可以估计系统及其组成单元所引起的维修及后勤保障要求。基本可靠性模型一般不能用来估计任务可靠性。

任务可靠性模型说明为完成任务使命产品各组成单元预期的用途。由于产品各组成单元在完成使命中用途不同，因此任务可靠性模型一般是一个复杂的串并联模型。任务可靠性模型用来确定任务剖面内的任务可靠性，为产品系统效能分析提供依据。

下面以通讯卫星控制系统为例，简述建立可靠性模型的过程：

控制系统的任务剖面是：

1. 卫星与运载火箭分离后，程控指令卫星起旋并利用遥控实现维持一定的转速；
2. 在过渡轨道段测定轨道和卫星姿态，并作姿态机动，以建立远地点发动机点火姿态；
3. 通过远地点发动机点火使卫星进入准同步轨道，控制系统再调整、修正轨道使进入定点位置，在几年寿命期内保持定点精度；
4. 卫星定点后指令消旋系统工作，控制天线指向地心，建立通信姿态，几年保持一定的精度；
5. 卫星倾角的控制。



控制系统可靠性框图

在清楚地确定各阶段任务的基础上建立控制系统可靠性框图如上图所示。

起旋阶段的任务可靠性模型只包含起旋线路和切向发动机；（各有并联备份）过渡段和准同步轨道段的转速、姿态、轨道控制系统任务可靠性模型如上图但不包括上图中的消旋部分；为了提高可靠性，通信卫星控制系统主要部件都采用了备份切换。

可靠性串联、并联、表决、冷（热、温）贮备系统以及非串并联复杂网络的概率表达式在可靠性书籍中都有介绍，这里不赘述。

### 可靠性预测

可靠性预测是在设计阶段（当产品还在图纸上的时候），定量地估计未来产品可靠性的方法。在早期阶段，定量估计产品可靠性，是用以往的工程经验，尤其是元器件的失效率数据作为基础。预测结果取决于：①反映系统及其元部件可靠性关系的概率表达式（系统可靠性模型）；②经过分析和简化，可用于元部件可靠性预测的可靠性数据。

要使预测有价值，就必须及早进行预测。早期可靠性预测虽然很难准确，但它的意义在于：提供预测值和系统可靠性指标要求相对比，作为可靠性指标分配的基线；提供衡量研制阶段可靠性增长的基准，衡量生产、使用和维修阶段不降低可靠性的基准。在设计和研制阶段，可靠性预测也是采取可靠性保障措施、设计更改措施、以及判断设计修改是否符合可靠性要求的判据。因此，可靠性预测使可靠性成为产品设计过程的一个组成部分，它把工程变量和可靠性变量联系起来。

在所用数据和预测方法相同的条件下，预测可靠性值对比较不同方案和发现薄弱环节是有效的；而且有了预测值这条基线，评价整个研制过程中的可靠性增长是方便的。就是说，可以互相对比和自己前后对比。

建立可靠性模型和进行可靠性预测、分配，都不是只做一次。在产品方案论证、工程研制、定型期间的每一次设计评审都要重做一次预测与分配，以便及时掌握研制流程中产品可靠性状况，到产品定型阶段有一个相对比较准确的可靠性数据。

可靠性预测方法因不同的研制设计阶段而不同。在方案论证和早期设计阶段只能作粗略估计，一般采用相似设备或相似电路类比法、有源器件组估算法。在技术设计阶段，可用元器件计数法。到产品定型设计，具备了附有元器件应力数据的元器件清单时，就可以采用元器件应力分析法进行细致的预测。总的来说，和产品设计进程相适应，可靠性预测也是由粗到细、越做越细的。

美军手册MIL-HDBK—217对于电子设备可靠性预测的元器件计数法和元器件应力分析法作了详细规定，提供了相当完整的电子元器件失效率数据。20多年来这个手册本身也不断改进，已经修订出版五次。

参考美军217手册和其他外国的经验，收集我国电子元器数据，我国军用手册GJB-899-87《电子设备可靠性预计手册》也已经出版颁行。实际进行可靠性预计应当以我国军用手册为指导，应当注意可靠性模型和所用失效率数据要符合实际，特别要注意所用各类元器件失效率之间的相对关系要正确（它比元器件失效率本身绝对值更重要）。

### 可靠性指标分配

可靠性分配是把经过论证确定的系统可靠性指标，自上而下地分配到各分系统、各部件以至元器件。这样来确定对于系统各组成部分的可靠性定量要求，即可靠性设计指标。通过各部分的论证、设计、采取保障措施，实现各自的指标，从而保证整个系统可靠性指标的最后实现。

可靠性分配本质上是一个工程决策问题，是人力、物力的统一调度和运用问题。

一般来说,系统中不同的整机、不同元器件的现实可靠性水平是很不相同的。作为一个系统,应着重改善薄弱环节。由于薄弱环节往往是技术难度大、复杂度高,要提高其可靠性所需代价大,耗时多。因此需要在这些互相矛盾的要求之间综合权衡,力求优化。另一方面,只要模型正确,可靠性预测方法是统一的,所用数据的相对关系正确,那么可靠性预测结果基本上能反映出系统各组成部分之间在复杂程度和现实可靠性水平之间的相对差别,加上对其技术难度和相对重要度的判断,在可靠性预测基础上来分配可靠性指标是合理的。工程上通常也就这么做。

可靠性分配的方法有多种,下面只提一下常用方法的基本概念

1. 等分分配法,对于n个相同部件组成的串联系统,就是把系统可靠性指标R<sub>0</sub>等分下去:

$$\text{单元可靠性指标 } R_i = \sqrt[n]{R_0}, i=1, 2, \dots, n$$

2. 比例分配法,对于不同部件串联的系统,按部件可靠性预测值的比例来分配。近似可用下式计算

$$\begin{aligned} \text{部件分配失效率} &= \\ &= \text{部件预测失效率} \times \frac{\text{要求系统失效率}}{\text{预测系统失效率}} \end{aligned}$$

3. 考虑部件复杂性和重要性的分配法(AGREE法)第i个部件复杂性是按所用元器件计数结果n<sub>i</sub>对于全系统元器件总数N之比来考虑,部件重要度取W<sub>i</sub>,部件任务时间t<sub>i</sub>,则部件可靠性指标分配为

$$R_i(t_i) = 1 - \frac{1}{W_i} (1 - R_0^{n_i/N})$$

式中R为系统可靠性指标要求。

4. 可靠性分配的“努力最小算法”

把串联系统各部件可靠性预测值从小到大排列,如果它们都具有同样性质:把低可靠性部件提高一定增量Δ所用代价小,把高可靠性部件提高Δ需代价大,那么采取本算法,通过把排在前面K个部件可靠性提高

到R<sub>0</sub>的办法,使系统可靠性从预测值R<sub>i</sub>提高到R<sub>0</sub>,则总代价最小。

5. 动态规划法

如果串联系统各部件的“努力函数”(改善可靠性所花代价与可靠性初始值的关系)不相同,“努力最小算法”不适用,则可用动态规划法来达到最优分配的目的。

6. 专家评分法

这种方法是请在产品设计、加工、使用维修方面富有经验的各方面专家,按照复杂度、技术发展水平、工作时间和环境条件四方面因素,对产品中各个部件打分,再综合起来,把产品可靠性指标分配给各部件。

以上着重介绍了产品可靠性设计的几个主要步骤的基本概念。可靠性设计必须紧密结合技术功能设计来进行,产品可靠性设计只能在产品设计之中去做。(待续)

## 一院召开第七次质量工作会议

4月8日,航空部第一研究院召开了第七次质量工作会议。会议主要是总结八七年质量工作和表彰先进,讨论审定《型号产品质量奖惩办法》和《型号产品质量可靠性控制程序》两个文件,动员全院同志做好质量保证工作,为实现质量管理目标,全面完成八八年艰巨而光荣的任务而努力奋斗。会上,部、院领导指出,87年是一院创优质,夺奖牌获得空前大面积丰收的一年,共有十项产品获部以上优质产品称号,其中长二丙全箭,长三氢氧发动机分别获国家金质和银质奖,此外,在质量立法、标准化、电子元器件质量可靠性,QC小组和信息管理等方面也做出了显著成绩,涌现了大量先进集体和先进个人。他们勉励大家要百尺竿头,更进一步,为确保“867”工程圆满完成,为实现党中央国务院2000年高技术发展规划努力拼搏!

(春江)