

# 高复杂度综合系统的可靠性预计

王树清

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 针对装备可靠性工作的焦点问题, 在各个设备的可靠性要求的框架下, 依据国家军用标准《GJB/Z 299C 电子设备可靠性预计手册》及美军标手册 MIL-HDBK-217《电子设备可靠性预计手册》的应力分析法, 采用比较实用、高效的 ITEM ToolKit 可靠性平台对某高复杂度仪器设备进行可靠性预计, 在任务实施中探索一种比较实用、高效的可靠性预计方法。

**关键词:** 可靠性预计; 冗余设计; 可靠性分配

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20112803.0047

## Reliability Prediction of High Complexity Synthesis Systems

WANG Shu-qing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

**Abstract:** An utility and high efficient ITEM ToolKit reliability flat roof is used to predict the reliability for a complicated instrument, which aims at the focus problem of reliability work in equipment in China and according as the stress analytical method of <GJB/Z 299C Electron Equipment Reliability Prediction Handbook> and MIL-HDBK-217<Electron Equipment Reliability Prediction Handbook>. The reliability request of each model task collectivity is the frame in work. At the same time, an utility and high efficient reliability prediction method is explored in working.

**Keywords:** reliability prediction; redundancy design; reliability allocation

# 1 引言

随着国内前沿技术的飞速发展，我国国防及重要领域民用产品的可靠性工程愈加成熟，提高系统可靠性的手段也在不断地更新；无论是载人飞船的可靠性、安全性标准的细化程度，还是国防、气象研究等领域技术规范的覆盖程度，其技术水平及管理模式都有了相当快的提升。本文通过对某高复杂度系统的可靠性预计，介绍一种比较实用、高效的ITEM ToolKit 可靠性分析平台。

本文通过对某仪器的电路模块的元器件的技术参数及分系统的环境影响分析，对系统进行可靠性预计，以考核其满足任务可靠性指标要求的程度。

# 2 可靠性框图

可靠性框图是依据系统的原理和功能关系而建立的。系统分系统可靠性框图见图1。系统一级可靠性框图见图2，是以硬件设计的各PCB板作为基本

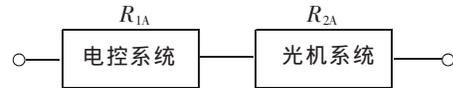


图1 系统可靠性框图

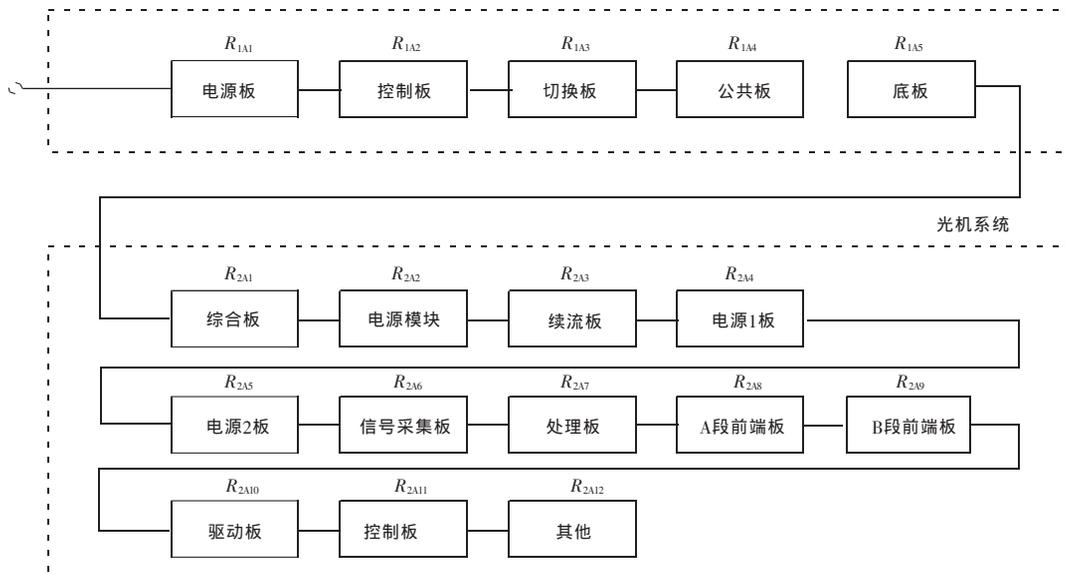


图2 一级可靠性框图

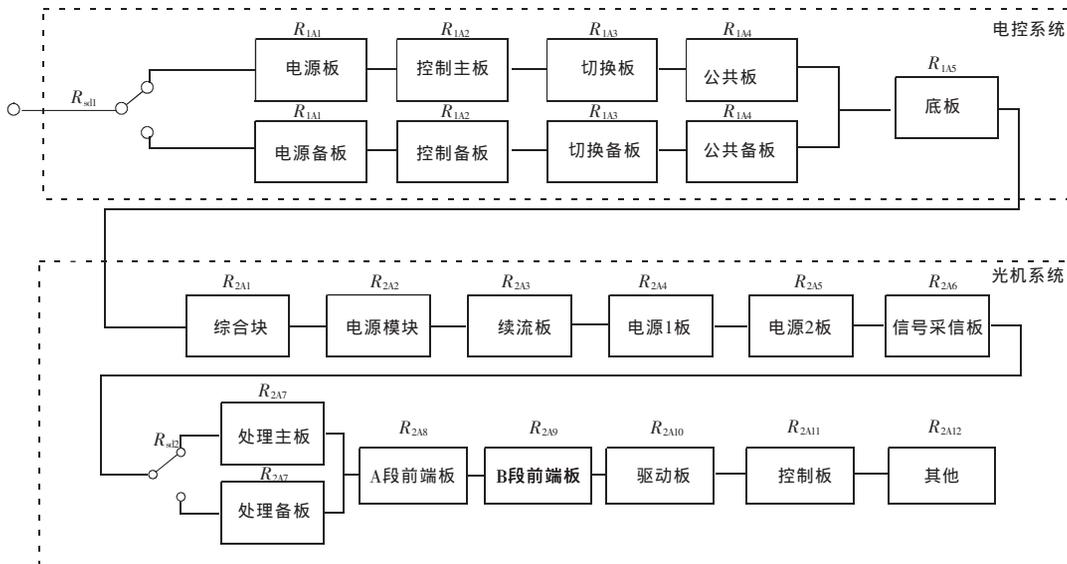


图3 二级可靠性框图

节点形成框图。按照可靠性指标的要求,对于需要提高安全性及可靠性的PCB板进行冗余设计,由此得到的系统二级可靠性框图见图3。

依据任务剖面的分析结果及任务可靠性框图的分析结果,确认了除电源及切换板、控制板为持续工作外,其余各板均为间歇工作。在系统中,共有2个切换开关,其中sd1为电控箱内公共板主份和备份相互切换控制开关,该开关控制可通过外部指令直接控制完成;sd2为光机系统上处理板主份和备份相互切换控制开关,该开关控制可通过指令解析后,产生直接命令控制。

### 3 可靠性数学模型

令 $R_{S1}$ 表示系统工作时的可靠度; $R_{1A}$ 表示系统控制的可靠度; $R_{2A}$ 表示光机主体的可靠度;令 $R_{1\#1}$ , $R_{1\#2}$ 表征电源板、公共板、切换板、控制板各板串联后的可靠度; $R_{1\#}$ 表征主备切换装置sd1与两套电源板、公共板、切换板、控制板冷备后的可靠度; $R_{2A8}$ 表征主备切换装置sd2与两块信号处理板组成冷备份后的可靠度; $R_{sd1}$ , $R_{sd2}$ 为主备切换装置的可靠度。

根据系统可靠性框图1,可以得到如下公式:

$$R_{S1}=R_{1A} \cdot R_{2A} \quad (1)$$

对于控制系统及光机系统两大模块,按照一级可靠性框图2、二级可靠性框图3的设计方案,根据串并联公式,可以得到如下公式:

$$\begin{aligned} R_{1\#1} &= e^{-\lambda_{1\#1}t_{1\#1}} = R_{1A1} \cdot R_{1A2} \cdot R_{1A3} \cdot R_{1A4} \\ &= e^{-\lambda_{1A1}t_{1A1}} \cdot e^{-\lambda_{1A2}t_{1A2}} \cdot e^{-\lambda_{1A3}t_{1A3}} \cdot e^{-\lambda_{1A4}t_{1A4}} \\ &= e^{-(\lambda_{1A1}t_{1A1} + \lambda_{1A2}t_{1A2} + \lambda_{1A3}t_{1A3} + \lambda_{1A4}t_{1A4})} \end{aligned} \quad (2)$$

并联支路的可靠度

$$R_{1\#2} = R_{1\#1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{1\#} &= e^{-\lambda_{1\#}t_{1\#}} (1 + R_{sd1} \cdot \lambda_{1\#1} \cdot t_{1\#1}) \\ &= e^{-(\lambda_{1\#1}t_{1\#1} + \lambda_{1\#2}t_{1\#2} + \lambda_{1\#3}t_{1\#3} + \lambda_{1\#4}t_{1\#4})} \end{aligned}$$

$$[1 + R_{sd1}(\lambda_{1A1} \cdot t_{1A1} + \lambda_{1A2} \cdot t_{1A2} + \lambda_{1A3} \cdot t_{1A3} + \lambda_{1A4} \cdot t_{1A4})] \quad (4)$$

电控箱的可靠度

$$\begin{aligned} R_{1A} &= R_{1\#} + R_{1A5} \\ &= e^{-(\lambda_{1\#1}t_{1\#1} + \lambda_{1\#2}t_{1\#2} + \lambda_{1\#3}t_{1\#3} + \lambda_{1\#4}t_{1\#4} + \lambda_{1A5}t_{1A5})} \end{aligned}$$

$$[1 + R_{sd1}(\lambda_{1A1} \cdot t_{1A1} + \lambda_{1A2} \cdot t_{1A2} + \lambda_{1A3} \cdot t_{1A3} + \lambda_{1A4} \cdot t_{1A4})] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R_{2A7\#} &= R_{2A7}(1 + R_{sd2}\lambda_{2A7} \cdot t_{2A7}) \\ &= e^{-\lambda_{2A7}t_{2A7}} \cdot (1 + R_{sd2}\lambda_{2A7} \cdot t_{2A7}) \end{aligned} \quad (6)$$

光机系统的可靠度

$$\begin{aligned} R_{2A} &= R_{2A1} \cdot R_{2A2} \cdot R_{2A3} \cdot R_{2A4} \cdot R_{2A5} \cdot R_{2A6} \cdot R_{2A7\#} \cdot R_{2A8} \cdot R_{2A9} \cdot \\ &R_{2A10} \cdot R_{2A11} \cdot R_{2A12} \\ &= e^{-\lambda_{2A1}t_{2A1}} \cdot e^{-\lambda_{2A2}t_{2A2}} \cdot e^{-\lambda_{2A3}t_{2A3}} \cdot e^{-\lambda_{2A4}t_{2A4}} \cdot e^{-\lambda_{2A5}t_{2A5}} \cdot e^{-\lambda_{2A6}t_{2A6}} \\ &\cdot [e^{-\lambda_{2A7}t_{2A7}} (1 + R_{sd2}\lambda_{2A7} \cdot t_{2A7})] \cdot e^{-\lambda_{2A8}t_{2A8}} \cdot e^{-\lambda_{2A9}t_{2A9}} \\ &\cdot e^{-\lambda_{2A10}t_{2A10}} \cdot e^{-\lambda_{2A11}t_{2A11}} \cdot e^{-\lambda_{2A12}t_{2A12}} \end{aligned} \quad (7)$$

### 4 可靠性分配

可靠性分配(Reliability allocation)是指将工程设计规定的系统可靠度指标合理地分配给组成该系统的各个单元,确定系统各组成单元的可靠性定量要求,从而使整个系统可靠性指标得到保证<sup>[1]</sup>。

可靠性分配的本质是一个工程决策问题,应该按系统工程原则技术上合理、经济上效益高、时间方面见效快来进行。在进行可靠性分配时,必须明确目标函数的约束条件。随着目标函数和约束条件的不同,可靠性的约束方法也会不同。可靠度的分配方法有比例分配法、评分分配法、重要度和复杂度分配法、比例组合法和可靠度的再分配法。

根据前面提出的系统功能框图和任务失效判据建立产品的可靠性模型,同时又明确了各个PCB板的工作时间后,这里使用加权因子法把可靠性指标分配到仪器各PCB板上。

在分配时,我们遵循如下准则:

(1)对复杂度高的分系统、设备等,应分配较低的可靠性指标,因为产品越复杂,其组成单元就越多,要达到高可靠性就越困难,并且成本越高。

(2)对于技术上不成熟的产品,分配较低的可靠性指标。对这种产品提出高可靠性要求会延长研制时间,增加研制费用。

(3)对于处于恶劣环境条件下工作的产品,应分配较低的可靠性指标,因为恶劣的环境会增加产品的故障率。

(4) 当把可靠度作为分配参数时, 对于需要长期工作的产品, 分配较低的可靠性指标, 因为产品的可靠性随着工作时间的增加而降低。

(5) 对于重要度高的产品, 应分配较高的可靠性指标, 因为重要度高的产品的故障会影响人身安全或任务的完成。

根据电子产品可靠度指数分布理论公式  $R_s(t)=e^{-\lambda_s t}$ , 按总体给出的指标, 系统连续工作时间  $t=17\ 520\text{ h}$ , 可靠度  $R_s(17\ 520)=0.94$ , 所以, 技术指标给出的故障率  $\lambda_s=3.531\ 7\times 10^{-6}\text{ h}^{-1}$ , 即 MTBF 为  $283\ 149.667\ 7\text{ h}$ 。

我们采用加权因子法可以得到系统的可靠性分配值, 计算出分配到各子系统各电路模块 (或单板) 的可靠性指标。

## 5 可靠性预计

可靠性分配是由系统到单元、或由整体到个体对可靠性进行落实, 而可靠性预计 (Reliability prediction) 则是从单元到系统、个体到整体进行的。常用的单元可靠性预计方法有: 相似产品法、元件计数法、应力分析法、故障率预计法等<sup>[2]</sup>。

本文采用的应力分析法通常在产品的详细设计阶段对单元的电子元器件故障率进行预计。这种方法也是基于概率统计, 对某种电子元器件在实验室的标准应力与环境条件下, 通过大量的试验, 并对其试验结果进行统计, 从而根据该种元器件的质量等级、应力水平、环境条件等因素对其进行故障率修正。电子元器件的应力法已有成熟的标准和手册。对于国产电子元器件, 可采用国家军用标准《GJB/Z 299C 电子设备可靠性预计手册》进行预计; 而对于进口电子元器件, 则可采用美军标手册 MIL-HDBK-217《电子设备可靠性预计手册》进行预计。应力分析法的计算较为烦琐, 近几年许多国家早已利用计算机辅助预计, 可以大大节省人力及时间。

可靠性预计采用了由 ITEM 公司推出的新一代高度集成的可靠性工程软件 ITEM ToolKit 集成模块, 它允许客户基于 MIL-HDBK-217F 和 GJB/Z299C 标

准建立可靠性预计。ITEM ToolKit 可以通过导入元件表自动添加元件的故障率和 MTBF, 而且可自动更新元件故障率以及整个项目的故障率。故障率计算基于元件数据, 例如温度、环境和应力。

系统可靠性预计过程是以单元电路每种元器件的基础数据为依据的, 设计师将元器件基本信息导入 ITEM ToolKit 软件指定的项目数据库, 可以很快计算出系统各单元的失效率, 并自动生成单元 Pi 因子报告、单元可靠性预计报告等所需文档。

系统的可靠性预计的数据来源于单元可靠性的失效率, 根据任务模式可换算成单元可靠度, 即可代入已经建立的可靠性数学模型公式中 (可靠性数学模型中  $R_{s11}$ ,  $R_{s12}$  为主备切换装置的可靠度, 这里取近似值为 0.99), 得到系统的最终预计结果。

控制系统的可靠度为:

$$R_{1A}=R_{1\#}\cdot R_{1A5}=0.990\ 007 \quad (8)$$

光机系统的可靠度:

$$R_{2A}=R_{2A1}\cdot R_{2A2}\cdot R_{2A3}\cdot R_{2A4}\cdot R_{2A5}\cdot R_{2A6}\cdot R_{2A7\#}\cdot R_{2A8}\cdot R_{2A9}\cdot R_{2A10}\cdot R_{2A11}\cdot R_{2A12}=0.976\ 980 \quad (9)$$

系统的总可靠度:

$$R_{SI}=R_{1A}\cdot R_{2A}=0.967\ 219 \quad (10)$$

至此, 已经完成了仪器的可靠性预计工作。由 ITEM ToolKit 软件自动生成的 Pi 因子报告, 是预计过程的重要数据, 具有可追溯性。

可靠性预计中可以完善元器件的原始数据, 修正单元的失效率, 在动态计算的平台上自如地进行可靠性预计更新, 以不断地完善系统的可靠性方案。软件的优势在于突显其工作效率, 大大提高了可靠性工作的进程。

可靠性数学模型中除指定单元外还设置了“其他”类单元, 考虑了子系统的外部器件失效率的影响, 如: 外部电缆接口的电连接器、电机组件、热控组件、光电子器件、卤钨灯等, 这些细节数据为更准确的预计准备了充分的依据。

在系统的可靠性预计过程中, 数学模型的建立和元器件基本数据的采集工作尽可能做到细致、准

确；数据录入后的计算过程完全由 ITEM ToolKit 平台完成。经过整机的可靠性评估，产品顺利完成了定型前的优化设计，最终取得了事半功倍的收效。

## 6 结 论

可靠性分配和预计是高复杂度系统研发的必要性基础工作。评估产品的可靠性设计是否满足任务

的总体指标要求，首先需要设计人员依据国家及行业标准及总体规范，选择适宜的可靠性预计方法，同时要选用科学的可靠性分析平台，快捷地作出可靠性预计分析结论，才能高效地实施各阶段的优化设计方案，以适应系统工程高节奏的任务需求。ITEM ToolKit 可靠性平台的升级、开发软件已经在国

## 参考文献

- [1] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
- [2] 曾声奎. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

作者简介: 王树清 (1960-), 女, 汉族, 辽宁大连人, 学士, 高级工程师, 1983年于大连工学院获得学士学位。主要从事可靠性设计及可靠性与质量分析等方面的研究。E-mail: wangshuqing522@sina.com

## 《光学 精密工程》 (月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办, 科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问, 陈星旦院士任编委会主任, 国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位, 集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自2007年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊  
中国科学技术协会择优支持期刊  
中国百种杰出学术期刊  
第一届北方优秀期刊  
吉林省双十佳期刊

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊  
中国学术期刊 (光盘版)  
万方数据系统数字化期刊  
台湾华艺中文电子期刊网  
中国科学引文数据库  
中国物理文献数据库  
中国期刊网

国际检索源:

《美国工程索引》 (EI Compendex)  
《美国化学文摘》 (CA)  
《英国INSPEC》 (SA)  
《俄罗斯文摘杂志》 (PЖ)  
《美国剑桥科学文摘》 (CSA)

中文核心期刊要目总览 (北大)  
中国学术期刊综合评价数据库  
中国光学与应用光学文摘  
中国科学期刊全文数据库  
中国光学文献数据库  
中国学术期刊文摘  
中国物理文摘

电 话: (0431) 86176855  
传 真: (0431) 84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn gxjmgc@sina.com  
<http://www.eope.net>