

# 电子设备可靠性预测与设计

周长林<sup>1</sup>, 常青美<sup>1</sup>, 左秀彦<sup>2</sup>, 周琪<sup>3</sup>

(1. 信息工程大学, 河南 郑州 450001; 2 河南省商业学校, 河南 郑州 450002;

3. 杭州美轮信号技术有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 可靠性是电子设备的重要指标。该文讨论可靠性指标预测方法、可靠性预测模型和可靠性设计方法, 给出了高精度多功能开关电源失效率的预测实例, 并预计出高失效率单元和关键元器件, 指导其可靠性设计。

**关键词:** 可靠性设计; 可靠性预测模型; 故障率; 平均故障间隔时间 (MTBF)

**中图分类号:** TN70 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897 (2005) 14-0092-04

## 0 引言

电子设备的可靠性是衡量产品质量的重要指标, 它表示 "产品在规定的条件下和规定的时间内, 完成规定功能的能力" 或 "在规定的条件下和规定的时间内所允许的故障数"。电子产品的整体可靠性高低代表产品质量的优劣, 标志着设计者的水平和竞争力。

电子设备可靠性最为常用和直观的数学表达式是设备平均故障间隔时间 (MTBF), 以及平均修复时间 (MTTR)。根据美国军用电子设备可靠性统计<sup>[1]</sup>, 设备不可靠性的原因中, 设计占 40%, 元器件质量占 30%, 操作和维护占 20%, 制造占 10%。另据我国军用设备资料统计, 设备故障原因设计占 26%, 元器件失效占 34%, 生产调试占 24%, 维护占 14%, 自然老化占 2%。因此, 为了取得产品的高可靠性, 必须从方案论证、设计各个环节考虑可靠性的预计与分配, 采用现代设计技术和方法, 实现电子设备的可靠性设计。本文探讨电子产品的可靠性设计, 并结合电子系统设计实践, 讨论高精度多功能开关电源的可靠性预计分析。

## 1 可靠性指标

电子设备的可靠性预测是根据所使用的元器件、元器件性能和工作环境等情况推测设备平均无故障工作时间 (MTBF)。按照电子设备的元器件寿命服从指数分布规律<sup>[2]</sup>, 即故障率为常数, 设备总故障率为

$$s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

这里  $\lambda_i$  是组成电子设备的各子部件的平均故障率。电子设备是由电阻、电容、二极管、三极管、集

成电路等标准化的元器件组成, 国产电子元器件可采用国家军用标准 GJB /Z 299A - 91《电子设备可靠性预计手册》进行预计, 进口电子元器件可采用美国军标 MIL - HDBK - 217F《电子设备可靠性预计》进行预计。进一步分析, 更加具体的通用故障率计算公式为

$$s = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_{gi} \lambda_{qi}) \quad (2)$$

式中  $s$  为系统的总故障率 (1/h);  $\lambda_{gi}$  为第  $i$  种元器件的通用故障率 (1/h);  $\lambda_{qi}$  为第  $i$  种元器件的通用质量系数;  $N_i$  为第  $i$  种元器件的数量;  $n$  为设备所用元器件的种类数目。

考虑元器件所处电应力、环境温度等因素影响, 可得更加准确的元器件故障率计算公式为  $p = b (e q r a s c)$ 。其中  $p$  是元器件工作故障率 (1/h),  $b$  是元器件基本故障率 (1/h),  $e$  是环境系数,  $q$  是质量系数,  $r$  是电流额定值系数,  $a$  是应用系数,  $s$  是电压应力系数,  $c$  是配置系数。最终可得系统的总故障率 ( $s$ ):

$$s = \sum_{i=1}^n N_i p_i \quad (3)$$

式中:  $p_i$  为第  $i$  种元器件的工作故障率 (1/h)。

## 2 可靠性预测模型

建立可靠性预测模型是为了定量分配、估算和评估产品的可靠性。产品可靠性模型是在产品工作原理图的基础上画出产品的可靠性框图, 按照各种串联、并联和旁联的方框组合表示系统各组成单元之间的完成规定功能的关系。这与表示产品各单元之间的功能联系的工作原理图是不同的。在建立产品的可靠性框图模型时, 可从系统级向分系统、设备、部件级细化分解, 根据具体情况确定相应的可靠

性预测模型<sup>[4,5]</sup>。



图 1 串联型可靠性框图模型

Fig 1 Model of shunt reliability block

图 1是最常见的串联型可靠性框图模型,串联模型表示组成产品的所有单元中的任一单元发生故障都会导致整个产品故障。串联模型系统的数学表达式为

$$\begin{cases} R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \\ \lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \\ MTBF_s = 1/\lambda_s \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $R_s$ 、 $R_i$ 分别表示系统的可靠度和各个单元的可靠度,  $MTBF_s$ 表示系统的平均故障间隔时间。可见串联系统的可靠性与各个单元的可靠性及单元数目有关,系统的单元数目越多,总可靠度降低。

图 2是一种并联模型,亦称作工作储备模型。当组成系统的所有单元都发生故障时系统才出现故障,只要其中有一个单元可靠工作,就能保证其可靠性。并联模型的可靠度数学表达式为

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (5)$$

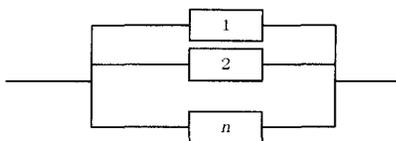


图 2 并联模型(工作储备模型)

Fig 2 Shunt model (work reserve model)

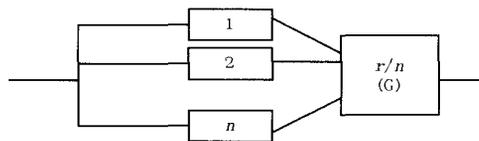


图 3  $r/n$ 模型(表决模型)

Fig 3  $r/n$  model (decision model)

如果组成产品的所有单元都工作,如图 3所示,但至少  $r$ 个正常,产品才能正常工作,该系统模型称为  $r/n$ 模型,亦称表决模型。其可靠度数学表达式为式(6)。

$$\begin{aligned} R_s(t) &= \sum_{i=0}^{n-r} C_n^i R(t)^{n-i} \times [1 - R(t)]^i \\ C_n^i &= \frac{n!}{i!(n-i)!} \end{aligned} \quad (6)$$

另外,在实际工作中还有一些复杂的系统,对应有混联、旁联和网联,根据具体情况可建立其可靠性预测模型,进行可靠度预测计算。

### 3 可靠性设计

根据以上分析,电子设备的可靠度与系统的元器件的故障率、电路结构、单元级联形式等因素有关。因此,实现电子设备的可靠性设计,首先要做好元器件的选择与控制。在电子设备设计和生产过程中,建立元器件选用的控制机构,制定元器件控制方案,控制标准和非标准元器件的使用,拟定元器件优选清单,对承制的元器件进行控制,并进行必要的元器件老化、应力筛选等。这是保证系统固有可靠性、减少元器件规格品种、降低故障费用、实现电子设备可靠性设计的根本措施。

元器件降额设计是提高系统可靠度的有效措施,设计电子元器件的工作应力适当低于其规定的额定值,从而达到降低基本故障率,保证系统可靠性的目的。电子元器件的故障率对电应力和温度应力比较敏感,因此降额设计是电子产品可靠性设计中的最常用的方法。各类电子元器件,都有其最佳的降额范围,在最佳降额范围内,酌情采取一级降额、二级降额和三级降额等级,能实现可靠性增长和花费代价的最优化组合。

电子设备热设计有利于提高系统可靠性,在满足性能要求的前提下,通过热设计尽可能减少设备内部产生的热量,减少热阻,降低电子元器件的失效率。根据设计条件,如设备的功耗、发热量、允许温升、设备外形尺寸、设备放置的环境条件等,选择设备的最佳冷却方式。并分别对关键性元件、线路、印制电路板和机箱进行特殊热设计。

采取冗余设计技术,使系统或设备具有多于一种手段执行同一种规定功能的能力。设置冗余可提高系统的可靠性,但同时又增加了系统的复杂性、重量和体积。只有当采用更可靠的元器件、简化设计和降额设计等方法仍不能满足系统可靠性要求时才考虑采用冗余,或者在经费和进度都有限止时,采用成熟设计的冗余技术才是实现高可靠性的有效途径。一般在低层次和关键关节的情况下使用冗余设计可获得较好的效果,某些冗余技术的采用需增加若干故障检测和冗余通道切换装置,在它们的失效率远低于受控部分时,才能发挥冗余技术的优越性。因此,在工程实践中,应酌情确定冗余等级,选定冗余类型,确定冗余配置方案,确定冗余管理方案。

所有的电气及电子系统,包括其分系统、仪器、设备、组件、元件等,在执行预定的任务时都会遇到各种电磁环境(系统内部的、外部的、人为的及天然的),通过电磁兼容设计,能使系统性能不降低、参数不超出允许的上下限,而仍能协调地、有效地工作。实现系统电磁兼容设计,要注意解决好频率和频谱的选择、信号电平的选择、阻抗的选择、仪器及电路的布置等一系列问题。还要在接地与搭接、屏蔽、滤波、电缆网设计、仪器电路设计、结构设计、材料和零部件及其工艺、防静电等方面采取有效措施,并进行电磁兼容性测试验证。

另外,通过电子元器件和电路的容差分析,进行系统设计、参数设计和容差设计的综合平衡,来达到系统健壮性设计。还可经过潜电路分析,预见能引起功能异常或抑制正常功能的潜在电路,从而为改进设计提供依据,这些方法都有利于系统的可靠性设计。

#### 4 可靠性预测实践

电子设备的可靠性设计、预测和分析,在现实电子系统设计中非常重要。作者曾就所设计的高精度多功能开关电源进行可靠性预测和分析,对提高其可靠性指标,改善系统性能,效果较好。该电源的设计基于电流型 PWM 稳压技术和线性集成稳压技术,具有高稳定度的一路  $1 \sim 20 \text{ V}$  稳压输出、一路  $10 \text{ mA} \sim 1 \text{ A}$  稳流输出和一路标准电压  $1.01860 \pm 0.00005 \text{ V}$  输出,其可靠性预测模型如图 4 所示,是一种典型的串联型系统。

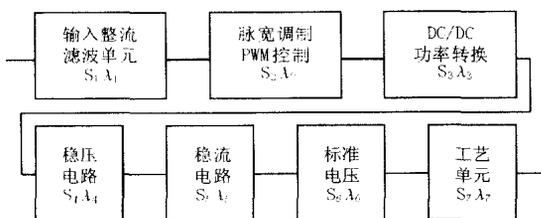


图 4 开关电源串联型可靠性预测模型

Fig 4 Prediction model for switch source shunt reliability

根据各个单元内电阻、电容、电感、二极管、三极管、集成电路等元器件种类和数目,参考国家军用标准 GJB/Z 299《电子设备可靠性预计手册》和美国军标 MIL-HDBK-217E《电子设备可靠性预计》标准<sup>[2,3]</sup>,按照通用故障率计算公式(2)或(3)统计计算,可得各个单元失效率如下:

输入整流滤波单元  $S_1$ ,失效率  $\lambda_1 = 3.52 \times 10^{-6} / \text{h}$ ,占总失效率的 7.10%;

脉宽调制 (PWM) 控制单元  $S_2$ ,失效率  $\lambda_2 = 4.11 \times 10^{-6} / \text{h}$ ,占总失效率的 8.29%;

DC/DC 功率转换单元  $S_3$ ,失效率  $\lambda_3 = 6.86 \times 10^{-6} / \text{h}$ ,占总失效率的 13.84%;

稳压电路单元  $S_4$ ,失效率  $\lambda_4 = 7.92 \times 10^{-6} / \text{h}$ ,占总失效率的 15.97%;

稳流电路单元  $S_5$ ,失效率  $\lambda_5 = 6.75 \times 10^{-6} / \text{h}$ ,占总失效率的 13.61%;

标准电压单元  $S_6$ ,失效率  $\lambda_6 = 18.90 \times 10^{-6} / \text{h}$ ,占总失效率的 38.12%;

制造工艺单元  $S_7$ ,失效率  $\lambda_7 = 1.52 \times 10^{-6} / \text{h}$ ,占总失效率的 3.07%。

从以上统计结果可知,标准电压单元、稳压电路单元、DC/DC 功率转换单元、稳流电路单元占总失效率比重较大。其中标准电压单元电路复杂、元件种类多失效率比重最大,占总失效率的 38.12%。精密线绕电位器、VMOS 功率管、PWM 控制器、集成稳压器、电解电容、二极管是失效率比较大的器件。在进行该电源可靠性设计时,应重视这些重要单元电路的设计,重点控制好关键元器件的选择和使用。

计算该电源总失效率  $\lambda_s$

$$\lambda_s = \sum_{n=1}^7 (1 + \lambda_n) = 52.06 \times 10^{-6} / \text{h} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_n$  是补充系数,用来补充未被统计进去的失效因素,一般  $\lambda_n = 0.01 \sim 0.1$ ,这里取 0.05。

系统的平均故障间隔时间:

$$MTBF_s = 1 / \lambda_s = 1.921 \times 10^4 \text{ h}$$

以上可靠性预测计算结果表明,系统总可靠度指标 MTBF 近 2 万 h。这里仅考虑了元器件因素,综合考虑设计、元器件、生产调试、维护、自然老化各种因素,按元器件因素所占约 1/2 比重估算,该高精度多功能开关电源的平均故障间隔时间约 1 万 h。根据预测分析结果,作者进一步完善了系统可靠性设计,该稳定电源的平均故障间隔时间将远大于 1 万 h,具有更高的可靠性。

#### 5 结论

可靠性指标是产品质量的重要标志,电子设备的可靠度与系统的单元级联、电路设计结构、元器件的故障率等因素有关,在电子设备的开发、设计、生产、维护和使用中,应重视提高产品可靠性设计。实现电子设备可靠性设计要作好元器件的选择与控制,满足元器件降额设计,进行电子设备热设计、冗余设计、电磁兼容设计。并通过容差分析,可靠性预

测分析,明确影响产品的可靠性的关键件和重要件,预测可能发生的故障模式、机理,在设计时重点加以解决。同时,还要重视可靠性理论研究,应用各种可靠性分析方法,采用状态监控、故障诊断和故障预测技术,开展产品可靠性研制试验、鉴定与验收试验。

可靠性预测能定量地预测高失效率单元,并发现电、热应力设计上的潜在问题,为改进设计指明方向,并为优选设计方案提供依据,优化电子产品设计中的可靠性预计与分配工作。通过对高精度多功能开关电源的可靠性预测与分析,明确了影响该稳定电源可靠性的主要单元和失效率比较大的关键部件,并针对性的完善可靠性设计,有效地提高了该产品的可靠性指标。

#### 参考文献:

- [1] 陆廷孝,郑鹏皱. 可靠性设计与分析 [M]. 长沙:国防工业出版社, 1997.  
LU Ting-xiao, ZHENG Peng-zhou Reliability Design and Analysis [M]. Changsha: National Defense Industry Press, 1997.

- [2] M L-HDBK-217F-1991, Reliability Prediction of Electronic Equipment[S].  
[3] GJB/Z 299B-98,电子设备可靠性预计手册 [S].  
GJB/Z 299B-98, Handbook for Reliability Prediction of Electronic Equipment[S].  
[4] Pecht M, Das D, Ramakrishnan A. The IEEE Standards on Reliability Program and Reliability Prediction Methods for Electronic Equipment[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42: 1259-1266  
[5] IEEE Standard Methodology for Reliability Prediction and Assessment for Electronic Systems and Equipment (Second Edition). IEEE Reliability Society (July 1999) [EB/OL]. <http://standards.ieee.org/catalog/reliability.html>, 2003-12-10.

收稿日期: 2005-03-30

#### 作者简介:

周长林 (1961 - ),男,副教授,硕士,主要研究电子信息系统设计、电磁兼容;  
常青美 (1964 - ),女,副教授,硕士,主要研究方向是电路理论与计算。

### Prediction and design for electronic equipment reliability

ZHOU Chang-lin, CHANG Qing-mei, ZUO Xiu-yan, ZHOU Qi

(1. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Commercial School, Zhengzhou 450002, China;  
3. Hangzhou Meilun Signal Technology Co., Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Reliability is an important index of electronic equipment. This paper discusses reliability index prediction methods, reliability prediction models, and reliability design for electronic equipment. A prediction example of the failure rate for higher precision & multifunction switch-power in design is presented. The key parts and electronic components on higher failure rate are predicted. It is a reference to increase the reliability of the equipment being designed.

**Key words:** reliability design; reliability prediction model; failure rate; mean time between failure (MTBF)

## 合订本征订启事

为答谢广大读者厚爱,方便热心读者收藏和随时查阅,继电器杂志社推出 2004年精装合订本,硬皮烫金包装,内容详实,欢迎订购(8月15号之前购买印刷版享受8.5折优惠或赠送2004年合订本光盘一张)。

2004年合订本(印刷版)定价:300元(含邮费)

2004年合订本(光盘版)定价:100元(含邮费)

购买方式:

1. 邮局汇款

地址:河南省许昌市许继大道32号 461000

收款人:继电器杂志社(如需发票请写明抬头信息)

2. 银行转帐

户名:许昌继电器研究所

帐号:1708023029021010058-051

开户行:许昌市工行五一一路支行