

## 星载 EPC 的可靠性分析<sup>1</sup>

刘红民 张 锐 阴和俊

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘 要:** 气象卫星星载 EPC 工作环境恶劣且要求在轨有效期长于 3 年, 因此对 EPC 的可靠性提出了较高的要求. 该文对气象卫星行波管放大器用 EPC 的可靠性进行了分析, 给出了其可靠性参数  $\lambda$ , MTBF 的评估方法.

**关键词:** EPC 电路, 可靠性, MTBF

**中图分类号:** TN86 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1168-05

## Reliability Analysis of Spaceborne EPC

Liu Hong-min Zhang Rui Yin He-jun

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Spaceborne Electronic Power Controller(EPC) works in severe environment and its lifetime must be over 3 years. Therefore its reliability should be under great consideration. This paper, analyzes on the reliability of EPC used in weather satellite and the estimations of its  $\lambda$  and Mean Time Between Failures(MTBF) are given.

**Key words** Electronic Power Controller(EPC), Reliability, Mean Time Between Failures(MTBF)

### 1 前言

按设计要求, C 波段气象卫星用行波管放大器的电子功率调节器 (Electronic Power Controller, EPC) 在空间环境和  $-20^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$  温度变化条件下, 其在轨无故障有效期长于 3 年, 在轨期间两台 EPC 轮换工作, 轮换周期为 3 个月, 失效率要求小于  $0.6 \times 10^{-6}/\text{h}$ . 由 EPC 的工作状态可知 EPC 属长寿命, 结构复杂, 实际的任务时间短于设计寿命的设备, 其可靠性可以用 MTBF(Mean Time Between Failures) 或失效率  $\lambda$  来描述<sup>[1]</sup>. EPC 由电子电路构成, 对 EPC 的可靠性的分析就是对构成 EPC 的电路的可靠性进行分析. 由于 EPC 属星上专用设备, 产量少, 设计寿命较长, 因此其可靠性较难通过获得大量的后期观察数据而进行统计分析, 只能依靠系统结构和元件的寿命分布来对其可靠性进行概率推断. 本文在计算 EPC 可靠性指标的要求、分配和对 EPC 作出失效模式影响分析、环境应力加速试验的基础上, 对 EPC 的可靠性指标进行了估测.

### 2 EPC 的可靠性指标要求及单元电路的可靠性指标分配

#### 2.1 EPC 的可靠性指标要求

EPC 由电子电路构成, 属电子产品, 故其失效率  $\lambda$  为常数且其可靠度分布函数  $R(t)$  服从指数分布, 即有  $R(t) = e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda = \text{常数}$ .

根据要求, EPC 设计失效率  $\lambda_0$  为  $\lambda_0 \leq 0.6 \times 10^{-6}(1/\text{h})$

<sup>1</sup> 2003-03-04 收到, 2003-05-28 改回

中科院知识创新工程项目资助课题

由统计理论可知  $\lambda = 1/(\text{MTBF})$ , 因此有 EPC 平均故障间隔时间  $\text{MTBF}_s$  要求为  $\text{MTBF}_s \geq 1/\lambda_s \approx 1.67 \times 10^6 (\text{h})$ . EPC 可靠度  $R_s(t)|_{t=13140}$  要求为  $R_s(t)|_{t=13140} \geq e^{-0.6 \times 10^{-6} \times 13140} \approx 0.9922$ .

## 2.2 单元电路的可靠性指标分配

EPC 由预稳电路、高压供电逆变电路和灯丝供电逆变电路构成. 这 3 个单元电路有 1 个出现故障都会使 EPC 失效, 因此在可靠性上 3 个电路串联, 具有相同的重要性.

3 个单元电路的可靠性指标分配采用 AGREE (Advisor Group of Reliability of Electronic Equipments) 分配法, 这是美国电子设备可靠性顾问组所推荐的分配方法. 这种方法在进行指标分配时同时考虑各单元的相对重要度和复杂度因子, 合理性较好. 表 1 给出了 EPC 各单元组件数, 任务时间及重要度.

表 1 各单元组件数, 重要度及任务时间表

单元	基本组件数 $n_i$	任务时间 $t_i (\text{h})$	重要度 $W_i$
预稳压	69	13140	1.0
高压供电	113	13140	1.0
灯丝供电	84	13140	1.0
元件总数 $N$	266		

按 AGREE 分配法, 单元  $i$  的可靠性分配公式为

$$\text{MTBF}_i = NW_i t_i / [n_i (-\ln R_s)] \quad (1)$$

其中  $R_s$  为总系统要求可靠度,

$$R_i = e^{-t_i / \text{MTBF}_i} \quad (2)$$

将表 1 中的数据代入式 (1) 和式 (2), 得到要求 EPC 各单元达到的可靠性指标如下:

$$\begin{cases} \text{预稳电路要求可靠性指标} \\ \text{高压电路要求可靠性指标} \\ \text{灯丝电路要求可靠性指标} \end{cases} \begin{cases} \text{MTBF}_1 \approx 6.5 \times 10^6 (\text{h}) \\ R_1(t)|_{t_1=13140} \approx 0.9978 \\ \text{MTBF}_2 \approx 4.0 \times 10^6 (\text{h}) \\ R_2(t)|_{t_2=13140} \approx 0.9967 \\ \text{MTBF}_3 \approx 5.3 \times 10^6 (\text{h}) \\ R_3(t)|_{t_3=13140} \approx 0.9975 \end{cases}$$

## 3 EPC 电路的可靠性分析

### 3.1 FMEA 分析及 EPC 可靠性参数计算

**3.1.1 失效模式影响分析 FMEA** FMEA (Failure Model Effect Analysis) 的目的之一是分析电路中元件的故障模式对 EPC 的工作的影响, 其次是列出导致该电路 I 类严酷度故障的项目表, 为进一步分析提供参考. 分析采用硬件法进行, 分析程序符合 GJB1391-92 《故障模式影响及危害性分析程序》的规定, 利用 ITEM 公司提供的 FMLib 软件数据库 (其数据来自 MIL-STD-338 以及美国可靠性分析中心的 FMD-91 《故障模式机理及分布》的故障模式库) 及其 FailMode 软件作为辅助分析工具.

定义故障严酷度等级及判据为

I 类故障: 导致 EPC 不工作, 电路无电压输出的故障. I 类故障又分为:

I(a) 类故障: 导致 EPC 电路稳压控制功能失效而使电路无直流电压输出的元器件故障.

I(b) 类故障: 引起误动作导致脉宽调制 (PWM) 电路非正常关闭使电路无直流电压输出的元器件故障.

II 类故障：导致 EPC 输出电压发生较大偏差的元器件故障。

III 类故障：不影响 EPC 正常工作的元器件故障。

这里我们以预稳电路为例，给出引起预稳电路 I 类故障的部分主要元器件的 FMEA 结果如表 2 所示，表中还列出了关键元器件的失效率  $\lambda_p$  (单位为  $10^{-6}(1/h)$ )，关键故障模式的频数比  $\alpha$  以及该故障模式的失效率 (故障模式的失效率 = 元器件的失效率  $\times$  频数比，单位为  $10^{-6}(1/h)$ )。表 2 只列出那些故障模式的失效率较高的元器件的 FMEA 结果。从 FMEA 中可以看出哪些元器件对可靠性起主要影响 (在预稳电路中是 M109 和 M111 这两个元件)，因此在研制 EPC 时，对这些元器件的质量要严格控制，不断加以老化筛选和应力测试，使其可靠性得到提高 [2]。

表 2 EPC 预稳电路 I 类故障的主要元器件 FMEA 结果

器件标识码	功能	故障模式	故障后果	严酷度	元件失效率 $\lambda_p$ $10^{-6}(1/h)$	频数比 $\alpha$	故障模式失效率 $10^{-6}(1/h)$
M110	提供 12V 电压	源漏极短路	过压，无 36V 输出	Ia	0.00294	23.4%	0.000688
M109	调节 36V 输出	源漏极短路	过流，无 36V 输出	Ia	0.0214	50%	0.0107
M111	调节 36V 输出	源漏极短路	过流，无 36V 输出	Ia	0.0214	50%	0.0107
Z210	限制母线电压	源漏极短路	无 36V 输出	Ia	0.000702	52.2%	0.0003664
Z106	钳位	短路	无 12V 输出	Ia	0.000702	52.2%	0.0003664
R101	偏置	开路	无 36V 输出	Ia	0.000263	77.2%	0.000203

3.1.2 EPC 可靠性参数计算 EPC 可靠性参数的计算按 MIL-HDBK-217E 提供的计算方法。在考虑到元件的环境要求、应力系数、质量等级、降额系数和工作温度等参数后，由 ITEM 公司的电子产品可靠性预计软件 MilStress 计算得出。

根据各元件的失效率计算出 EPC3 个单元和 EPC 总的可靠性参数如下，计算的结果表明 EPC 的各单元及总体可靠性指标满足设计要求。

$$\begin{aligned}
 & \text{预稳电路可靠性指标} \begin{cases} \text{MTBF}'_1 \approx 9.7 \times 10^6 \text{ (h)} \\ R'_1(t)|_{t=13140} \approx 0.9987 \end{cases} \\
 & \text{高压电路可靠性指标} \begin{cases} \text{MTBF}'_2 \approx 6.0 \times 10^6 \text{ (h)} \\ R'_2(t)|_{t=13140} \approx 0.9978 \end{cases} \\
 & \text{灯丝电路可靠性指标} \begin{cases} \text{MTBF}'_3 \approx 8.0 \times 10^6 \text{ (h)} \\ R'_3(t)|_{t=13140} \approx 0.9984 \end{cases} \\
 & \text{EPC 可靠性指标} \begin{cases} \lambda'_s \leq 0.401 \times 10^{-6} \text{ (h)} \\ \text{MTBF}'_s \geq 2.5 \times 10^6 \text{ (h)} \\ R'_s(t)|_{t=13140} \geq 0.9948 \end{cases}
 \end{aligned}$$

3.2 环境应力加速试验后的可靠性参数估计

EPC 是设计寿命长，数量少的星上产品，因此无法完成足够长时间的试验和获得足够的数 据，只能用环境应力加速定时截尾试验来估算其可靠性参数 [3]，试验结果统计如表 3 所示。

表中的温度皆为环境温度。温度试验属环境应力加速试验，故在估算可靠性参数时其时间 还要乘上加速因子。根据阿列纽斯 (Arrhenius) 反应模型，加速因子为

$$A_F = \exp((E_A/k)(1/T_u - 1/T_A))$$

表 3 EPC 正样验收级环境应力加速试验统计表

	热真空试验	热循环试验	高温老练试验	常温老练试验
试验时间	65 小时 (+55°C)	28 小时 (+55°C) 28 小时 (-20°C)	585 小时 (+55°C)	324 小时 (+25°C)
故障次数	0			

其中  $k$  为玻尔茨曼常数,  $E_A$  为激活能,  $T_A$  为老练温度,  $T_U$  为工作温度 (+25°C)。温度为 +55°C 的加速因子  $A_F = \exp[(0.5/(8.62 \times 10^{-5}))(1/298 - 1/328)] \approx 5.925$ ; 温度为 -20°C 的加速因子  $A_F = \exp[(0.5/(8.62 \times 10^{-5}))(1/298 - 1/253)] \approx 0.032$ ; 有效试验时间  $t = 678 \times 5.925 + 28 \times 0.032 + 324 = 4342$  (h)。

由表 3 可以看出 EPC 内部 266 个元件在累积总时间内的失效数为零, 从失效数为零不能直接得到 EPC 的可靠性参数, 对于这种情况我们用两种方法来估算 EPC 的可靠性参数。

方法 1<sup>[4,5]</sup>: 贝叶斯 (Bayes) 可靠度点估计和可靠度的置信限

已知 EPC 的失效率服从指数分布, 根据 Bayes 法, 当失效数 = 0 时, 有

$$\text{可靠度估计值 } \hat{R} = (n+1)/(n+2) = (266+1)/(266+2) = 0.9963$$

当可靠度已知后, 设定置信度  $1-\alpha$ , 则保证系统在该可靠度工作的最小时间的单边置信下限 (定时截尾) 为:

$$t_L = [2T \ln(1/R)] / \{\chi^2[2(r+1), \alpha]\}$$

其中  $t_L$  为最短时间,  $T$  为系统工作时间,  $r$  为故障数。

由表 3, 已知 EPC 在故障数为 0, 可靠度为 0.9963 时至少可工作 4342 h, 因此有  $t_L \geq 4342$ 。所以当置信度  $1-\alpha = 0.9$  时, EPC 在故障数为 0, 可靠度为 0.9963 时的最短工作时间即 MTBF 的下限为

$$\text{MTBF}_L = \frac{t_L \chi^2[2(r+1), \alpha]}{2 \ln(1/R)} \geq \frac{4342 \chi^2(2, 0.1)}{2 \ln(1/0.9963)} \approx 2.7 \times 10^6 \text{ (h)}$$

当置信度  $1-\alpha = 0.6$  时, EPC 在故障数为 0, 可靠度为 0.9963 时的 MTBF 的下限为

$$\text{MTBF}_L \geq \frac{4342 \chi^2(2, 0.4)}{2 \ln(1/0.9963)} \approx 1.08 \times 10^6 \text{ (h)}$$

通过对环境应力加速试验的数据的分析说明 EPC 的无故障时间  $\text{MTBF}_L$  长于任务时间 (13140 h), EPC 可靠性指标满足设计要求。这种方法的好坏取决于有效的试验时间, 有效时间越长, 效果越好。

方法 2<sup>[1]</sup>: 可靠性保证试验计算

这是一种模拟工作条件下的无故障试验, 当产品在由最低 MTBF 值求得的无故障时间内, 产品未出现故障, 则认为通过试验。进行 MTBF 保证试验应具备以下条件: (1) 产品按 MIL-HDBK-217 或 GJB/Z299 进行了应力分析; (2) 产品进行了可靠性鉴定试验, 知道最低可接受 MTBF 值; (3) 通过了环境应力筛选试验; (4) 进行了保证试验前的老练试验。

满足上述要求后, 可靠性保证试验为

$$P_a = (M-1)^{t_s} (M+t_s) / M^{(t_s+1)} \quad (3)$$

其中  $P_a$  为通过 MTBF 保证试验的概率,  $M$  为产品的最低 MTBF 值,  $t_s$  为最短无故障时间。EPC 满足上述 4 项条件, 可以用上述方法来估算其可靠性。取  $M = 13140$ ,  $P_a = R_s = 0.9922$ , 代入式 (3) 时有  $t_s \approx 1525$  (h)。

实际 EPC 环境应力加速试验无故障时间大于按最低要求所得到的最短无故障时间, 所以 EPC 通过可靠性保证试验, 其可靠性指标满足设计要求。

#### 4 结论

我们根据 EPC 的特点,运用应力分析和 EPC 环境应力加速试验,通过一定的概率判定法对 EPC 的可靠性参数做出了估计。分析结论对于如何提高 EPC 的可靠性提供了理论指导,取得了满意的效果。由于在计算失效率  $\lambda$  时选用的是 MIL-HDBK-217 中的数据,而实际产品使用的电阻、电容多为“七专”产品,由此导致理论结果偏于乐观。通过对“七专”元器件的质量等级的严格控制 and 长时间老化筛选,使其失效率  $\lambda$  降至最小,而对 EPC 的环境应力加速试验结果说明这些措施使 EPC 的可靠性达到设计要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 王锡吉. 电子设备可靠性工程. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999: 78-84, 445-446.
- [2] MIL-HDBK-189, 1981.
- [3] Nelson W B. Accelerated Testing, Statistical Models, Test Plans and Data Analysis. John Wiley & Sons, 1990, Chapter 2-4.
- [4] [日] 盐见弘著, 彭乃学, 赵清, 赵秀芹译. 可靠性工程基础. 北京: 科学出版社, 1982: 97-107.
- [5] 陈希孺, 倪国熙. 数理统计学教程. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 192-216.

刘红民: 男, 1964 年生, 博士生, 从事空间行波管放大器可靠性研究工作。  
张 锐: 男, 1960 年生, 博士, 副研究员, 从事空间行波管放大器可靠性研究工作。  
阴和俊: 男, 1963 年生, 博士生导师, 研究员, 从事电磁场方面的研究工作。