

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.009

# 星载偏振成像仪供配电系统可靠性分析

方璐璐<sup>1,2</sup>, 洪津<sup>2\*</sup>, 张爱文<sup>2</sup>, 金洁<sup>2</sup>, 骆冬根<sup>2</sup>

(1 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;

2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 供配电系统是星载偏振成像仪电子学系统的重要组成部分, 它不仅要满足将卫星平台提供的一次电源转换成载荷所需的各种二次电源的功能需求, 同时还需要满足载荷在轨运行时的高可靠性和长寿命要求。电子元器件的应力分析法是分析电子系统可靠性的一种重要方法, 基于应力分析法并根据 GJB/Z 299C-2006《电子设备可靠性预计手册》, 对星载偏振成像仪供配电系统各组成部件的电子元器件进行失效率计算, 并结合系统结构框图对系统的可靠度进行分析。分析结果表明, 采用冷贮备的冗余设计方式可以明显提高系统的可靠度。

**关键词:** 星载偏振成像仪; 供配电系统; 可靠度; 应力分析法; 失效率计算

中图分类号: TP802

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-617-010

## Reliability analysis of power supply and distribution system for directional polarization camera

FANG Lulu<sup>1,2</sup>, HONG Jin<sup>2\*</sup>, ZHANG Aiwen<sup>2</sup>, JIN Jie<sup>2</sup>, LUO Donggen<sup>2</sup>

(1 Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** As an important part of the spaceborne directional polarization camera, the power supply and distribution system not only needs to meet the functional requirements of converting the primary power provided by the satellite platform into the various secondary power supplies required for the loads, but also needs to meet the requirements of high reliability and long life when the loads are on orbit. The stress analysis procedure is an important method for analyzing the reliability of electronic systems. Based on the stress analysis procedure and according to GJB/Z 299C-2006 "Electronic Equipment Reliability Prediction Manual", the failure rate calculation of the electronic components in the power supply and distribution system of the directional polarization camera is carried out, and the reliability of the power supply and distribution system is analyzed by combining the structural block diagram of the system. The analysis results show that the redundancy design of cold standby can significantly improve the reliability of the system.

**基金项目:** 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分, 30-Y20A19-9007-15/17), 王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(GJTD-2018-15)

**作者简介:** 方璐璐(1998-), 女, 安徽桐城人, 硕士研究生, 主要从事可靠性工程方面的研究。Email: fangluluzs@163.com

**导师简介:** 洪津(1969-), 浙江杭州人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱偏振遥感技术、航天遥感工程技术等方面的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-11-09; 修改日期: 2021-12-22

\*通信作者。

**Key words:** directional polarization camera; power supply and distribution system; reliability; stress analysis procedure; failure rate calculation

## 0 引言

我国航天工业从20世纪50年代中后期发展至今,一些关键领域及重要的技术已经上升至世界领先水平。但与此同时,中国的航天工业也正处于重大战略机遇期,由于航天产品所独有的高性能、小批量、风险高、系统复杂、影响巨大等特点,为了确保航天任务的万无一失,在产品的设计、研制过程中务必重视质量及可靠性,采用科学有效的设计以提高产品的固有可靠性<sup>[1]</sup>。

产品的可靠性是指在规定条件下和时间内,完成规定任务的能力<sup>[2]</sup>,它可以直观地反映出产品的各项功能。电子产品的可靠性预计是根据组成系统的元器件、组件等可靠性经验数据及可靠性模型,对电子部件、整机以及所构成的电子系统的可靠性水平进行估计<sup>[3]</sup>。可靠性预计在产品的研制过程中扮演着非常重要的角色,是电子设备可靠性从定性分析转入定量控制的关键,利用可靠性预计,可以评估产品的可靠性指标是否满足设计要求、发现设计薄弱环节,并可以为设计的改进提供有效依据。同时,它对产品设计过程中的可行性决策、元器件的选用、产品的试验验证方案等都起着十分关键的作用<sup>[4]</sup>。

中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的大气气溶胶多角度偏振成像仪(DPC)是集光学、精密仪器及电子技术于一体的空间载荷,电子学系统是载荷的控制核心,而光机头部的供配电系统是电子学系统中最为基础的部分,供配电系统的可靠性可以直接影响整个载荷系统运行。本文针对DPC所用的供配电电路板进行元器件层面上的可靠性预计,为整机的可靠性预计提供参考依据。

## 1 电子产品可靠性预计方法

可靠性预计常用的方法有:相似产品法、元件计数法、评分预计法以及应力分析法。四种预计方法各自所适用的阶段、实施方式都不尽相同,具体内容详见表1。

综合对比以上四种可靠性预计方法,由于星载偏振成像仪的供配电系统设计工作已经完成,系统中选用的元器件信息都较为齐全,为了更为精确地评估系统的可靠度,选择采用应力分析法进行可靠性预计。

## 2 电子元器件失效率计算

本节主要通过元器件应力分析法对系统进行可靠性分析,由于选用的元器件大多为国产器件,因此根据GJB/Z 299C-2006《电子设备可靠性预计手册》对供配电系统的可靠性进行分析,计算各电子元件的失效率 $\lambda_p$ ,再依据系统的可靠性框图进行系统的可靠性预计。

元器件应力分析需要评估每一个元器件在预期使用中的平均工作应力水平,这需要根据元器件的具体种类进行划分,主要考核元器件种类、使用环境、使用温度、质量等级、具体技术类别等参数对元器件失效率的影响<sup>[8]</sup>。供配电系统中所采用的电子元器件的失效率计算结果见表2。表格中列出的 $\lambda_p$ 表示各器件的工作失效率, $\lambda_b$ 表示各器件的基本失效率,S为电应力比,其中固体钽电容和二类瓷介电容的失效率会根据电应力比的变化而发生变化。 $\pi_E$ 为环境系数, $\pi_Q$ 为质量系数, $\pi_{CV}$ 为电容量系数, $\pi_{SR}$ 为串联电阻系数, $\pi_{ch}$ 为表面贴装系数, $\pi_R$ 为电阻系数, $\pi_K$ 为种类系数, $\pi_p$ 为接触件系数, $\pi_c$ 为插孔结构系数, $\pi_l$ 为产品性能额定系

表 1 各可靠性预计方法的特点

Table 1 Characteristics of each reliability prediction method

方法	适用阶段	实施方式	方法特点
相似产品法	数据缺乏的设计初期阶段	确定与新产品相似性最高的现有产品, 比较新旧产品的相似点, 在已有产品的可靠性预计结果的基础上, 依据两产品的相似点分析, 经过修正, 对新产品的可靠性水平进行预计 <sup>[3]</sup>	分析时所需的数据量较小, 仅适用于有继承性的产品
元件计数法	设备方案论证阶段以及初步设计阶段	利用串联模型来预计产品可靠性的方法, 不考虑系统的元器件连接方式, 根据元器件的数量、通用失效率、质量系数来初步估计系统的可靠性 <sup>[5]</sup>	结果较为粗糙、不详细
评分预计法	产品的可靠性数据较为缺乏时	根据工程技术人员的工程经验, 对已知可靠性数据的单元与其他单元的几种影响因素进行评分, 将其他单元的评分结果与已知可靠性数据单元的评分进行对比, 得出评分系数, 最后根据评分系数及已知的可靠性数据对其他单元进行可靠性预计 <sup>[6]</sup>	分析的结果依赖于评分人员的工程经验, 需在后期实践中不断进行修正
应力分析法	产品的详细设计阶段	根据系统的组成及工作原理, 建立可靠性模型, 分析系统组成单元的元器件的工作环境、工作应力, 再汇总各元器件的详细信息, 对各元器件的失效率进行计算, 最后依据系统的可靠性模型, 逐级计算系统的可靠性指标 <sup>[7]</sup>	所得的结果更为贴近元器件的实际状态, 且在分析的过程中, 可以发现系统的可靠性薄弱环节, 便于采取相应措施进行改进

数,  $\pi_A$  为应用系数,  $\pi_{s_2}$  为电压应力系数,  $\pi_T$  为温度系数,  $\pi_s$  为应力系数。具体各参数的确定与预计, 均参照 GJB/Z 299C-2006 《电子设备可靠性预计手册》进行。供配电模块中选用的熔断器 (Fuse) 为进口熔断器, 查 GJB/Z 299C-2006 附录 A 可直接确认其失效率  $\lambda_p = 0.003 \times 10^{-6}/h$ 。详细预计直流-直流稳压 (DC-DC) 模块失效率的方法是将所有构成该模块的元器件失效率相加, 但由于缺乏构成 DC-DC 模块的元器件信息, 无法通过此方法计算模块的失效率。查 DC-DC 的元器件手册, 可得其制造商预测的模块平均无故障时间 (MTBF,  $t_{MTBF}$ ) 信息, 对于可维修系统,  $t_{MTBF} = \int_0^{\infty} R_S(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_s t} dt = 1/\lambda_s$ , 模块失效率  $\lambda = 1/t_{MTBF}$ 。

表 2 供配电系统所用电子元器件失效率计算

Table 2 Calculation of failure rate of electronic components used in the power supply and distribution system

Component	Calculation model	Electrical stress ratio (S)	Calculation result
Solid tantalum capacitor	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_{CV} \pi_{SR} \pi_{ch}$	S = 0.071	$\lambda_p = 0.000356 \times 10^{-6}/h$
		S = 0.214	$\lambda_p = 0.000393 \times 10^{-6}/h$
		S = 0.343	$\lambda_p = 0.000356 \times 10^{-6}/h$
		S = 0.600	$\lambda_p = 0.001181 \times 10^{-6}/h$
Non-solid tantalum capacitor	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_{CV}$		$\lambda_p = 0.001478 \times 10^{-6}/h$
Ceramic capacitor	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_{CV} \pi_{ch}$	S = 0.280	$\lambda_p = 0.000161 \times 10^{-6}/h$
		S = 0.025	$\lambda_p = 0.000103 \times 10^{-6}/h$
		S = 0.075	$\lambda_p = 0.000103 \times 10^{-6}/h$
		S = 0.150	$\lambda_p = 0.000129 \times 10^{-6}/h$
		S = 0.060	$\lambda_p = 0.000103 \times 10^{-6}/h$

Continued

Component	Calculation model	Electrical stress ratio (S)	Calculation result
Chip film resistor	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_R$		$\lambda_p = 0.00035 \times 10^{-6}/h$
Wire wound resistor	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_R \pi_K$		$\lambda_p = 0.01221 \times 10^{-6}/h$
Electrical connector	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_P \pi_K \pi_C$		$\lambda_p = 0.02617 \times 10^{-6}/h$
Inductor	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_K \pi_C$		$\lambda_p = 0.0021 \times 10^{-6}/h$
Diode	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_I \pi_A \pi_{S2} \pi_C$		$\lambda_p = 0.000027 \times 10^{-6}/h$
Fuse			$\lambda_p = 0.003 \times 10^{-6}/h$
Metal-oxide-semiconductor field effect transistor	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_T \pi_S$		$\lambda_p = 0.000047 \times 10^{-6}/h$
Magnetic latching relay	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_T \pi_S$		$\lambda_p = 0.000347 \times 10^{-6}/h$
Filter	$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q$		$\lambda_p = 0.096 \times 10^{-6}/h$
DC-DC convert	$\lambda_p = 1/t_{MTBF}$		Prototype phase: $\lambda_p = 2.342 \times 10^{-6}/h$ Flight model phase: $\lambda_p = 1.289 \times 10^{-6}/h$

### 3 偏振成像仪供配电系统可靠度预计

#### 3.1 系统设计方案

大气气溶胶多角度偏振成像仪是一台能实现多光谱、多角度和偏振辐射信息同步探测的航天载荷<sup>[9]</sup>，是集光学、精密机械、电子信息技术于一体的空间遥感设备。其中电子系统是载荷的控制核心，而载荷光机头部的供配电系统更是电子控制系统中最基本的组成部分，是载荷工作中十分重要的一环。供配电系统在载荷电子系统中的作用如图 1 所示。

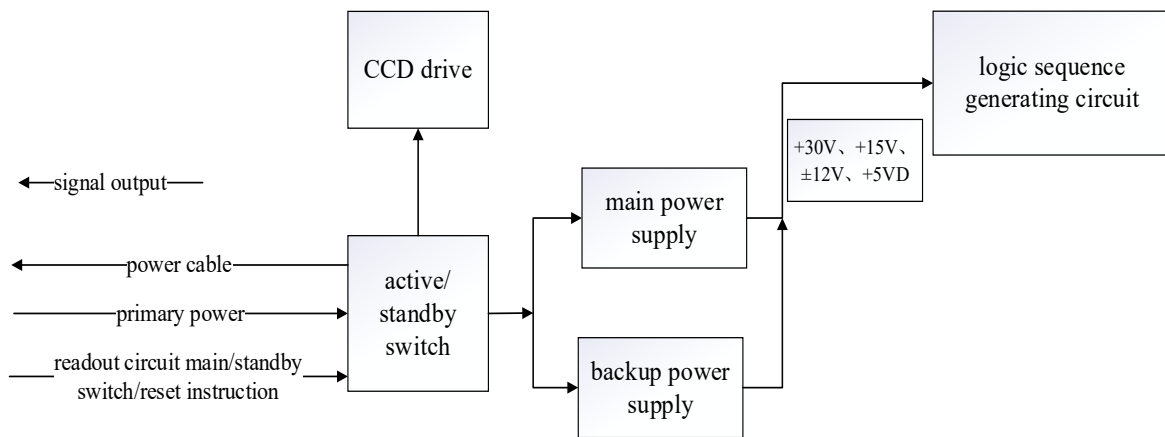


图 1 供配电系统功能示意图

Fig. 1 Function diagram of power supply and distribution module

供配电系统的主要功能是将卫星平台母线提供的一次 +28V 直流电源经过二次电源功能模块转换成载荷所需要的各种二次电源。考虑到卫星平台的状态复杂、各系统之间会互相影响，从而会引入一定的噪声干扰，导致供电不稳定等问题，在供配电设计中需要采取一定的保护措施，包括浪涌抑制设计、滤波设计以及保护电路设计等<sup>[10]</sup>。

### 3.2 模块可靠性预计

供电系统根据功能可以分为主备切换电路、保护电路、浪涌抑制电路和DC-DC电路四部分,根据前文各电子元器件的失效率预计,结合各模块的可靠性框图,可得出各模块的失效率。

#### 3.2.1 串并联系统失效率计算方法

##### 1) 串联系统失效率计算

一个系统由 $n$ 个单元组成,且当每个单元都能正常工作时,系统才能正常工作,这样的系统为串联系统。当串联系统中每个单元的寿命分布都为指数分布形式时,系统的失效率 $\lambda_s$ 为各单元失效率之和,可表示为

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

式中 $\lambda_i$ 为各单元的失效率<sup>[11]</sup>。

##### 2) 并联系统失效率计算

一个系统由 $n$ 个单元组成,当所有单元都失效时,系统才会失效,这种系统被称为并联系统。在各单元相互独立工作且寿命分布都是失效率为 $\lambda_i$ 的指数分布前提下,并联系统的平均寿命 $t_{\text{MTBF}}$ 可表示为

$$t_{\text{MTBF}} = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \frac{(-1)^{n-1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}}, \quad (2)$$

此时并联系统失效率 $\lambda_s$ 可表示为

$$\lambda_s = \frac{1}{t_{\text{MTBF}}}, \quad (3)$$

#### 3.2.2 主备切换电路可靠度计算

主备切换电路的可靠性框图如图2所示,图中 $\lambda$ 值为各元件对应的失效率。根据可靠性框图及串并联系统的失效率计算方法,主备切换电路失效率 $\lambda_k$ 可表示为

$$\lambda_k = \lambda_{k1} + 2\lambda_{k2} + 2\lambda_{k3}, \quad (4)$$

式中 $\lambda_{k1}$ 为接插件的失效率, $\lambda_{k2}$ 为片式膜电阻器并联后失效率, $\lambda_{k3}$ 为继电器与二极管并联后的失效率,元件并联之后的失效率可根据公式(2)、(3)计算,代入相应元器件的失效率后,得主备切换电路的失效率 $\lambda_k = 0.0267 \times 10^{-6}/\text{h}$ 。

#### 3.2.3 保护电路可靠度计算

主备份的保护电路可靠性框图如图3所示。根据可靠性框图及串并联系统的失效率计算方法,保护电路失效率 $\lambda_B$ 可表示为

$$\lambda_B = \frac{1}{t_{\text{MTBF}}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{B1}} + \frac{1}{\lambda_{B1} + \lambda_{B2}} - \frac{1}{2\lambda_{B1} + \lambda_{B2}}}, \quad (5)$$

式中 $\lambda_{B1}$ 为熔断器的失效率, $\lambda_{B2}$ 为线绕电阻器的失效率,代入相应元器件的失效率后,可算出保护电路的失效率 $\lambda_B = 0.0231 \times 10^{-6}$ 。

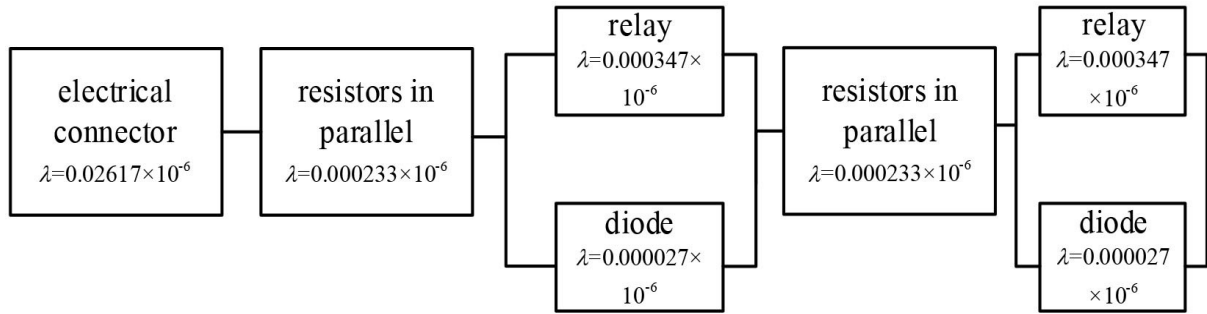


图2 主备切换电路可靠性框图

Fig. 2 Reliability block diagram of main and standby switching circuit

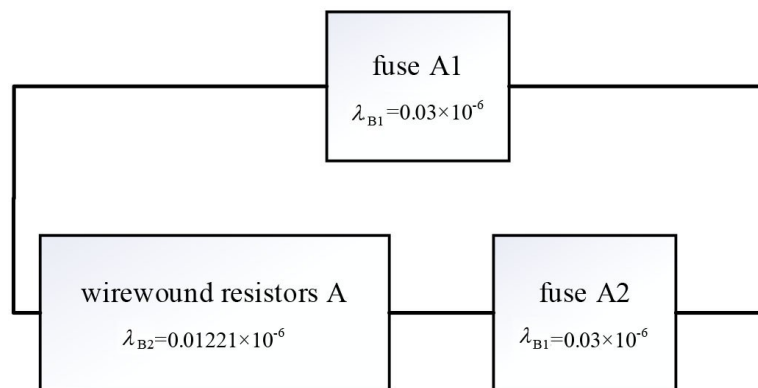


图3 保护电路可靠性框图

Fig. 3 Reliability block diagram of protection circuit

### 3.2.4 浪涌抑制电路可靠度计算

浪涌抑制电路主要是通过采用金属-氧化物半导体场效应晶体管同时辅助一些无源器件的浪涌抑制方式,通过RC电路控制MOS管栅极电压的上升速率,并通过源漏导通电阻控制负载电流上升速率,从而达到浪涌抑制的目的。浪涌抑制电路的可靠性框图如图4所示。

根据元器件的失效率及串并联系统特点,浪涌抑制电路失效率 $\lambda_L$ 可表示为

$$\lambda_L = \frac{1}{\frac{2}{\lambda_{L1}} + \frac{1}{\lambda_{L2}} - \frac{1}{2\lambda_{L1}} - \frac{2}{\lambda_{L1} + \lambda_{L2}} + \frac{1}{2\lambda_{L1} + \lambda_{L2}}} + \lambda_{L3} + \lambda_{L4}, \quad (6)$$

式中 $\lambda_{L1}$ 为两片式膜电阻器串联后的失效率, $\lambda_{L2}$ 为两瓷介电容串联后的失效率, $\lambda_{L3}$ 为MOS管失效率, $\lambda_{L4}$ 为滤波器失效率。将以上失效率代入式(6),可以算出浪涌抑制电路模块的失效率 $\lambda_L = 0.0964 \times 10^{-6}$ 。

### 3.2.5 DC-DC 电路可靠度计算

DC-DC 电路是供电系统的核心,主要是将卫星平台提供的一次电源直流+28V 母线经二次电源功能模块转变成载荷所需的各种二次电源。由于航天供电系统工作状态较复杂,各系统之间相互影响,母线具有不稳定性,会引入一定的干扰,而有效载荷的二次电源功能模块在直流变换过程中也容易产生噪声干扰,因此在设计DC-DC转换电路时,出于系统工作效能及安全性考虑,应当在DC-DC电路中设置滤波及输出保护电路,简化的可靠性框图如图5所示。

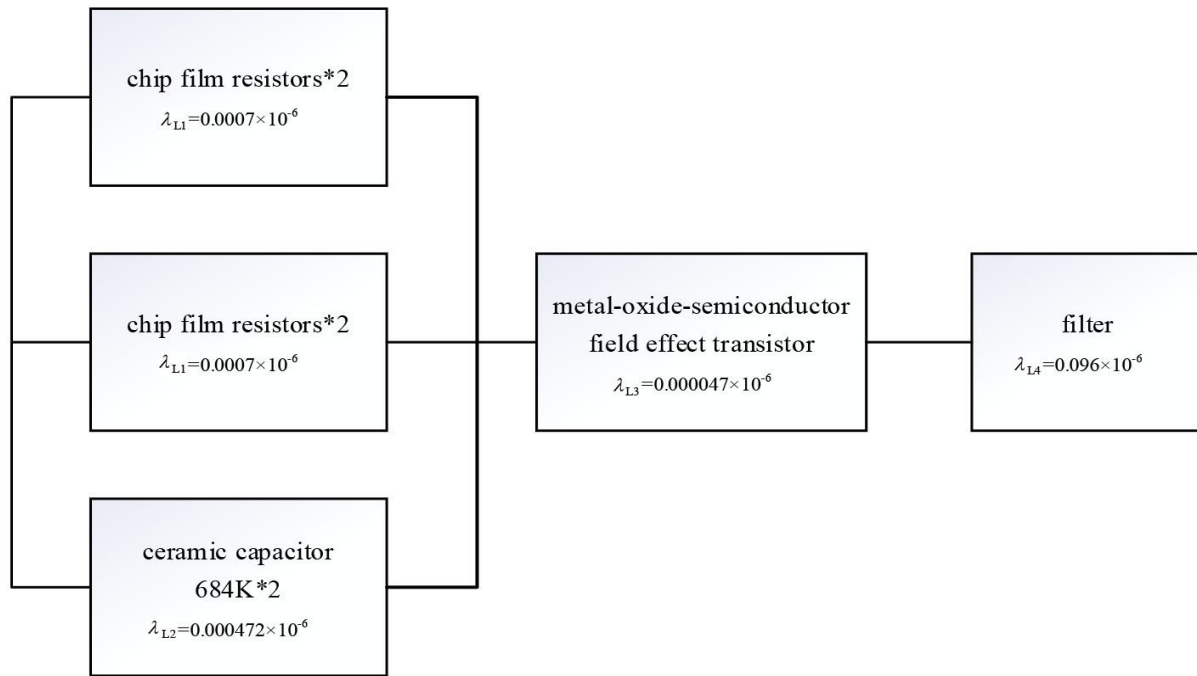


图 4 浪涌抑制电路可靠性框图

Fig. 4 Reliability block diagram of surge suppression circuit

供配电系统中的 DC-DC 转换电路分为四部分 (参见图 1), 分别将 +28V 母线电压转换为 +5V、+30V、+15V 以及 ±12V 直流电压, 四路 DC-DC 转换电路之间采用并联的方式, 其中每一路的结构都如图 5 所示, 由输出电路、滤波电路和保护电路串联而成, 每一路 DC-DC 输出电路即为对应的 DC-DC 芯片。

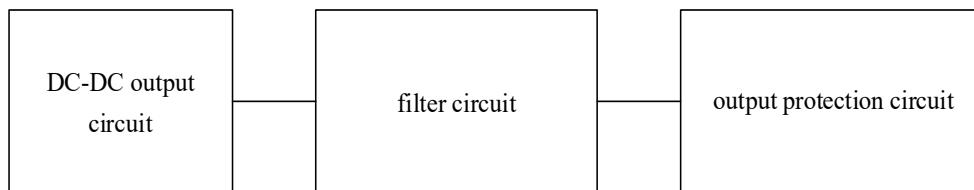


图 5 DC-DC 电路可靠性框图

Fig. 5 DC-DC circuit reliability block diagram

初样供配电系统选用了 VPT 公司的 DVHF 系列 DC-DC 模块, 正样供配电系统选用的为同一公司的 SVHF 系列 DC-DC 模块。相比 DVHF 系列, SVHF 系列更适合在恶劣辐射环境中工作, 通过使用硬化半导体元件、非硬化组件的辐射批验收测试和分析来保证性能, 可以更好地适应在太空环境下工作。

根据转换所得直流电压不同, 将整个 DC-DC 电路分为四个并联的部分, 对四个部分分别进行失效率计算。由于初样和正样系统中选用的 DC-DC 模块等级不同, 因此将初样系统与正样系统分开进行计算, 初样系统和正样系统的相关失效率以上标进行区分, 例如  $\lambda_1'$  和  $\lambda_1$  分别代表初样和正样系统 +5V 电路的失效率。计算结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 初样系统中各路 DC-DC 转换电路失效率计算

Table 3 Calculation of failure rate of each DC-DC conversion circuit in prototype phase

	DC-DC output	Filter	Output protection	Conversion
+5 V	$\lambda_{11}' = 2.342 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{12}' = 0.002643 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{13}' = 0.000727 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_1' = \lambda_{11}' + \lambda_{12}' + \lambda_{13}' = 2.3454 \times 10^{-6}/\text{h}$
+30 V	$\lambda_{21}' = 2.342 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{22}' = 0.002643 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{23}' = 0.000377 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_2' = \lambda_{21}' + \lambda_{22}' + \lambda_{23}' = 2.3450 \times 10^{-6}/\text{h}$
+15 V	$\lambda_{31}' = 2.342 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{32}' = 0.005731 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{33}' = 0.000727 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_3' = \lambda_{31}' + \lambda_{32}' + \lambda_{33}' = 2.3485 \times 10^{-6}/\text{h}$
$\pm 12$ V	$\lambda_{41}' = 2.342 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{42}' = 0.002628 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{43}' = 0.000441 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_4' = \lambda_{41}' + \lambda_{42}' + \lambda_{43}' = 2.3451 \times 10^{-6}/\text{h}$

表 4 正样系统中各路 DC-DC 转换电路失效率计算

Table 4 Calculation of failure rate of each DC-DC conversion circuit in model phase

	DC-DC output	Filter	Output protection	Conversion
+5 V	$\lambda_{11} = 1.289 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{12} = 0.002643 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{13} = 0.000727 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} = 1.2924 \times 10^{-6}/\text{h}$
+30 V	$\lambda_{21} = 1.289 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{22} = 0.002643 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{23} = 0.000377 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} = 1.2920 \times 10^{-6}/\text{h}$
+15 V	$\lambda_{31} = 1.289 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{32} = 0.005731 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{33} = 0.000727 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_3 = \lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{33} = 1.2955 \times 10^{-6}/\text{h}$
$\pm 12$ V	$\lambda_{41} = 1.289 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{42} = 0.002628 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_{43} = 0.000441 \times 10^{-6}/\text{h}$	$\lambda_4 = \lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43} = 1.2921 \times 10^{-6}/\text{h}$

四路转换电路并联后所得初样 DC-DC 电路的失效率  $\lambda_{D初}$  为

$$\lambda_{D初} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + (-1)^3 \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\lambda_i}}} = 3.128 \times 10^{-6}/\text{h}, \quad (7)$$

四路转换电路并联后所得正样 DC-DC 电路的失效率  $\lambda_{D正}$  为

$$\lambda_{D正} = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + (-1)^3 \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\lambda_i}}} = 1.724 \times 10^{-6}/\text{h}. \quad (8)$$

由此可以看出,在选用不同等级的芯片时,系统的可靠度也会受到一定的影响。

### 3.3 系统可靠度预计

为保证偏振成像仪的供配电系统在轨期间能够高可靠性、长寿命地稳定工作,对于这种在极端环境下工作,且必须长期处于运行状态、停机将带来巨大经济损失的系统,普遍的提高系统可靠性的方式是采用贮备冗余设计。贮备系统与并联系统的区别是:并联系统同机工作且无转接装置,而贮备系统待机工作,单元的替换可以人工进行,也可以自动转接。一般的并联系统冗余结构设计方式有热贮备方式、温贮备方式及冷贮备方式三种。冷贮备方式,即无载贮备,当工作单元工作时,贮备单元不工作,此时贮备单元在贮备期间的失效率为  $0^{[2]}$ 。由于冷贮备方式中的贮备系统具有为零的失效率,可靠度较高,因此成像仪上的供配电系统采用了冷贮备方式,通过主备切换模块,可以在主份电路出现故障时,快速切换至备份工作电路,以此保证在轨期间供配电系统的高可靠性。

由于主备切换电路并不完全可靠,由前文可知,主备切换电路的失效率  $\lambda_k = 0.0267 \times 10^{-6}$ 。当各单元的



失效率相等时,二单元冷贮备系统的可靠性模型如式(9)<sup>[12]</sup>, $R$ 为系统可靠度。串联系统的系统失效率计算模型如式(10)

$$R = e^{-\lambda t} + \frac{\lambda}{\lambda_k} \left[ e^{-\lambda t} - e^{-(\lambda+\lambda_k)t} \right], \quad (9)$$

$$\lambda = \lambda_B + \lambda_L + \lambda_D. \quad (10)$$

式中 $\lambda_k$ 为主备切换电路失效率, $\lambda$ 为主、备份单元失效率, $\lambda_B$ 为保护电路失效率, $\lambda_L$ 为浪涌抑制电路失效率, $\lambda_D$ 为DC-DC电路失效率。

在初样系统中,根据表3和式(7)可以看出,初样DC-DC电路的失效率为 $\lambda_{D初} = 3.128 \times 10^{-6}/h$ ,代入式(9)、(10)中可得出,未使用冷贮备设计前,单路的主份系统失效率 $\lambda = \lambda_B + \lambda_L + \lambda_D = 3.2475 \times 10^{-6}/h$ ,其对应的可靠度 $R' = e^{-\lambda t} = 0.7965$ ,采用冷贮备设计后,初样系统的可靠度 $R_{初} = 0.9789$ 。

在正样系统中,由表4和式(8)可以看出正样DC-DC电路的失效率为 $\lambda_{D正} = 1.724 \times 10^{-6}/h$ ,代入式(9)、(10)中可得出,未使用冷贮备设计前,单路的主份系统失效率 $\lambda = \lambda_B + \lambda_L + \lambda_D = 1.8436 \times 10^{-6}/h$ ,其对应的可靠度 $R' = e^{-\lambda t} = 0.8788$ ,采用冷贮备设计后正样系统的可靠度 $R_{正} = 0.9893$ 。

## 4 结 论

本工作采用应力分析法对星载偏振成像仪光机头部供配电系统进行了可靠性预计,在分析过程中可以看出,该系统在设计过程中,运用了贮备系统的冗余设计方式来提高系统的可靠度。

通过对总系统的可靠度计算分析,由式(9)、(10)可以看出,系统未采用贮备设计时,对于初样系统,单路的主份系统可靠度 $R' = e^{-\lambda t} = 0.7965$ ;当系统采用冷贮备系统的设计方法后,初样总系统的可靠度为 $R = 0.9789$ 。而对于正样系统,单路的主份系统可靠度 $R' = e^{-\lambda t} = 0.8788$ ;当系统采用冷贮备系统的设计方法后,正样总系统的可靠度为 $R = 0.9893$ 。由此可以看出,采用冷贮备的方式,可以在主份系统发生故障时切换至备份系统工作,很大程度上提高了系统的可靠度。

## 参考文献:

- [1] Li X L. *Reliability Analysis of Aerospace Models and Realization of Software* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014.  
李晓凉. 航天型号可靠性分析及软件的实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [2] Zhou Z F. *Reliability Engineering Fundamentals* [M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2009, 1-2.  
周正伐. 可靠性工程基础 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009, 1-2.
- [3] Zhang Z Z, Pan Y. *Electronic product reliability prediction* [M]. Beijing: Science Press, 2007, 1-2.  
张增照, 潘勇. 电子产品可靠性预计 [M]. 北京: 科学出版社, 2007, 1-2.
- [4] Luo M Z, Kang R, Liu F W. Summary of reliability prediction methods of electronic products [J]. *Electronic Science and Technology*, 2014, 1(2): 246-256.  
骆明珠, 康锐, 刘法旺. 电子产品可靠性预计方法综述 [J]. 电子科学技术, 2014, 1(2): 246-256.

- [5] Li X M, Wei M F, Qiu J Y, *et al.* Research on reliability prediction of electronic equipment [J]. *Network New Media Technology*, 2013, 2(4): 48-51.  
李晓敏, 韦闽峰, 邱靖宇, 等. 电子设备可靠性预计研究 [J]. 网络新媒体技术, 2013, 2(4): 48-51.
- [6] Li H X. Application of oroduct reliability prediction method [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019, (8): 43-44.  
李海霞. 产品可靠性预计方法应用 [J]. 科学技术创新, 2019, (8): 43-44.
- [7] Zhuo H Y, Zhang J R. Research on reliability prediction method of computer measurement and control system [J]. *Industrial Control Computer*, 2008, (7): 96-97.  
卓红艳, 张家如. 计算机测控系统的可靠性预计方法研究 [J]. 工业控制计算机, 2008, (7): 96-97.
- [8] Wu Y, Chen X T. Product reliability analysis technology [J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2004, (8): 50-53.  
吴跃, 陈晓彤. 产品可靠性分析技术 [J]. 家电科技, 2004, (8): 50-53.
- [9] Luo D G. *Design and Research of Photoelectric Detection System for Directional Polarization Camera* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.  
骆冬根. 多角度偏振成像仪光电探测系统设计与研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [10] Zhang A W, Li C F, Luo D G. A Design of power supply and distribution for spaceborne optical remote sensing equipment[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(2): 97-102.  
张爱文, 李从飞, 骆冬根. 一种星载光学遥感设备供电设计 [J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(2): 97-102.
- [11] Liu P. *Reliability Engineering Fundamentals: Revised Edition* [M]. Beijing: China Metrology Press, 2002, 26-30.  
刘品. 可靠性工程基础: 修订版 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2002, 26-30.
- [12] Li Z D. Reliability model of reserve system [J]. *Quality and Reliability*, 2004, (6): 29-33.  
李祚东. 贮备系统的可靠性模型 [J]. 质量与可靠性, 2004, (6): 29-33.