

文章编号: 1674-8190(2024)04-064-10

某型电子程控器可靠性仿真分析与优化设计

马芳云, 孙茜, 雷华金

(中国航空工业集团有限公司 航空防护救生技术航空科技重点实验室, 襄阳 441003)

摘要: 随着人们对电子产品可靠性的要求越来越高, 利用失效物理方法识别产品潜在的薄弱点在产品设计中备受关注。基于失效物理理论, 采用可靠性仿真分析方法, 对电子程控器进行可靠性分析。通过建立电子程控器数字样机模型, 开展相应的应力分析与故障预计, 评估电子程控器可靠性指标平均首发故障时间(MTTFF), 并根据仿真分析发现的薄弱环节进行优化设计。结果表明: 可靠性仿真结果与理论计算结果相差较小, 可以作为型号可靠性指标评估的依据, 减少采用物理样机进行可靠性试验的周期和费用; 优化改进后的电子程控器其可靠性得到较大提升。本研究可为后续型号可靠性评估与设计提供理论参考。

关键词: 电子程控器; 可靠性仿真; 故障预计; 平均首发故障时间; 薄弱环节; 优化设计

中图分类号: V445.2; V443

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.08

Reliability simulation analysis and optimization design of the electronic control proceeding controller

MA Fangyun, SUN Xi, LEI Huajin

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Life-support Technology, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Xiangyang 441003, China)

Abstract: With the increasing reliability requirements of electronic products, the use of failure physics methods to identify potential weak points in product design has attracted much attention. In this paper, the theory of failure physics and reliability simulation analysis method are used to analyze the reliability of electronic controller. By establishing a digital prototype model of electronic controller, the corresponding stress analysis and fault prediction are conducted to evaluate the mean time to first failure (MTTFF) reliability index of the electronic controller, and optimize the design based on the weak links found in simulation results. It is indicated that the difference between the reliability results and the theoretical calculation results are not significant, and can be used as a basis for evaluating the reliability indicators of models, reducing the cycle and cost of using physical prototypes for reliability testing. At the same time, the optimization and improvement have significantly improved the reliability design of the electronic controller, laying a theoretical foundation for subsequent model reliability evaluation and design.

Key words: electronic control proceeding controller; reliability simulation; fault prediction; mean time to first failure (MTTFF); weak link; optimal design

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-10-19

通信作者: 马芳云(1977-), 女, 硕士, 高级工程师。E-mail: mafangyun@sina.com

引用格式: 马芳云, 孙茜, 雷华金. 某型电子程控器可靠性仿真分析与优化设计[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 64-73.

MA Fangyun, SUN Xi, LEI Huajin. Reliability simulation analysis and optimization design of the electronic control proceeding controller[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 64-73. (in Chinese)

0 引言

某型电子程控器与火箭弹射座椅配套使用,是火箭弹射座椅与飞行员分离及射出救生伞的电子控制装置,它能感受人椅系统弹射出舱瞬间来自飞机的静压和总压参数、弹射后人椅所在高度的静压值,根据不同的速度与高度,选择相应的工作状态,输出电能,使人椅分离,弹出救生伞,帮助飞行员成功获救。随着电子程控器功能越来越复杂,对其可靠性的要求也越来越高,研制周期越来越短,传统的依据GJB/Z299C、MIL-HDBK-217F等标准进行可靠性预计^[1]及物理样机试验的方法已不能满足电子程控器高可靠性的需求,因为统计计算方法均是基于指数分布和恒定失效率假设,未考虑产品制造过程和使用条件等的不确定性影响,可靠性预计结果常与实际偏差较大,对方案的决策产生不利影响^[2-5]。基于故障物理的可靠性仿真方法为解决上述问题提供了新的有效途径。可靠性仿真方法通过产品数字样机和故障物理模型,对影响产品可靠性的热、振动、电等环境因素进行综合仿真分析,预测产品的首发故障时间(TTF),识别产品在可靠性设计中的薄弱环节,如潜在故障位置、故障原因等信息,从而改进产品设计,提升其可靠性水平^[6-11]。

20世纪80年代美国马里兰大学最先提出了基于可靠性仿真的可靠性指标评估技术,之后在美国的航空航天装备研究中得到广泛应用^[12]。2011年,美国发布了ANSI/VITA 51.2《失效物理可靠性预计》,用于指导基于失效物理模型的可靠性仿真寿命预测。随着失效物理分析方法研究的兴起与发展,基于可靠性仿真方法进行寿命预测已成为电子系统可靠性预测的必然趋势^[13-14]。目前国内利用可靠性仿真方法来进行可靠性评估的研究仍处于起步阶段,部分高校正在进行相关理论研究,并逐步开展工程化应用^[2],同时配套的可靠性仿真软件也应运而生,这也为可靠性仿真方法的工程应用提供了可能^[15-17]。虽然可靠性仿真技术理论较为成熟,但不同产品的模型简化、参数选取等工程实践各不相同,必须针对具体的产品进行进一步地研究和探讨。

电子程控器作为复杂的航空电子设备,目前的可靠性分析评估都是在设计阶段的后期完成物

理样机后通过可靠性试验进行评估,一旦试验过程中发现问题,就必须重新进行设计改进,导致设计的反复和研制周期的不确定性。本文采用可靠性仿真方法对某型电子程控器进行可靠性建模与评估,主要探究热振建模过程中此类产品的模型简化要求、可靠性评估中参数的设置要求,同时将可靠性仿真评估结果与理论计算结果进行对比分析,以期型号产品的工程化应用提供一套可行的技术途径。

1 可靠性仿真方法概述

可靠性仿真是基于失效物理的可靠性建模、可靠性分析技术,通过收集仿真对象的结构、材料、使用环境及方式等信息,开展计算机辅助设计(CAD)、计算流体力学(CFD)、有限元分析(FEA)等数字样机建模,并根据使用条件、环境要求进行热、振动应力的分析,建立故障物理模型,再参照产品的模态试验开展数字样机的校对。对仿真模型中的薄弱点进行设计更改,最终满足产品的设计需求。可靠性仿真分析的一般流程如图1所示。

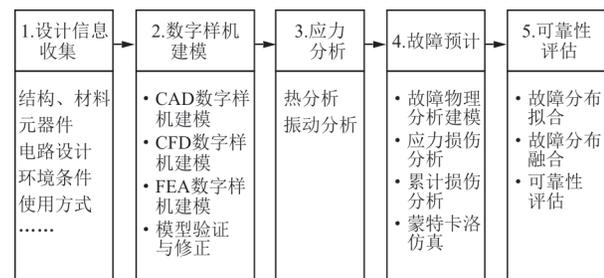


图1 可靠性仿真分析流程图^[3]

Fig. 1 Flow chart of reliability simulation analysis^[3]

2 某型电子程控器可靠性仿真分析

2.1 产品简介

电子程控器是火箭弹射座椅的主要装置,是一种多因素输入、多模态控制的多任务弹射程序控制系统。主要功能是根据人一椅系统不同的弹射离机状态及弹射出舱后人一椅系统运动参数(包含中央拉环信号、热电池通断信号、行程开关信号、浮动插头信号、实时速度、海拔高度、俯仰角、横滚角、三向加速度、三向角速度、经度、纬度等),根据系统内嵌多模态/多模式数字弹射控制

模型,实时地自动选择弹射控制程序,决定火箭弹射座椅上多路机构的工作与否和工作时机,对座椅全程弹射顺序进行优化,确保对飞行员的安全救生。

某型电子程控器主要由上壳体、下壳体、上侧板、大电容、滤波器、连接器、传感器组件、DY 电路板组件、OUT 电路板组件、SEL 电路板组件、K 电路板组件和 K1 电路板组件组成,如图 2 所示。



图 2 电子程控器组成示意图
Fig. 2 Schematic diagram of electronic control proceeding controller

某型电子程控器可靠性指标(MTBF)要求为:设计定型 2 000 h,生产定型 2 500 h;散热方式为自然冷却。

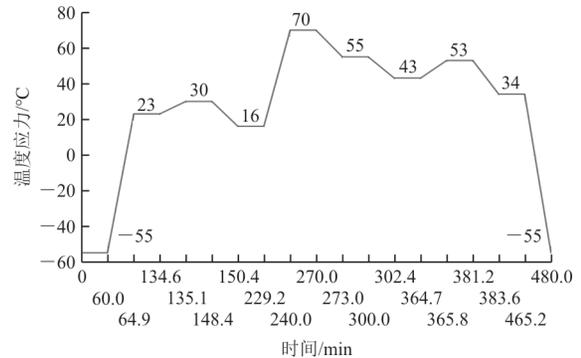
2.2 设计信息收集

拟对电子程控器开展可靠性仿真,需要收集其 SD-DY 电路板组件、SD-OUT 电路板组件、SD-SEL 电路板组件、SD-K 电路板组件、SD-K1 电路板组件,上述 5 个模块的环境参数、印制电路板(PCB)设计、元器件材料特性(包括质量等级、封装方式、外形尺寸等信息)、使用方式及装机数量等信息。电子程控器 5 个模块共有 37 种型号、555 只元器件(如表 1 所示),收集各元器件的封装方式、质量等级、外形尺寸等信息近 1 000 条。

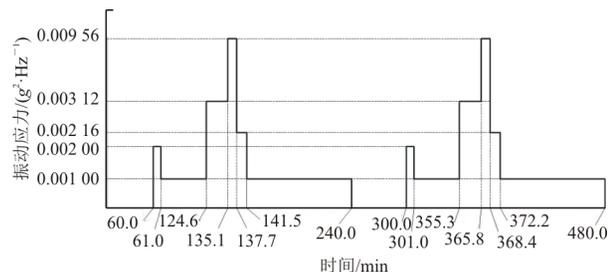
表 1 某电子程控器组成
Table 1 Composition of an electronic control proceeding controller

序号	组件名称	信息说明
1	SD-DY 电路板组件	含 PCB 板和 59 个元器件等
2	SD-OUT 电路板组件	含 PCB 板和 44 个元器件等
3	SD-SEL 电路板组件	含 PCB 板和 44 个元器件等
4	SD-K 电路板组件	含 PCB 板和 203 个元器件等
5	SD-K1 电路板组件	含 PCB 板和 205 个元器件等

根据电子程控器使用环境和试验剖面,确定其在进行热振仿真分析时的载荷剖面如图 3 所示,振动应力量级如表 2 所示,振动谱型如图 4 所示。



(a) 温度应力随时间变化曲线



(b) 振动应力随时间变化曲线

图 3 载荷剖面

Fig. 3 Load profile

表 2 振动应力量级表
Table 2 Vibration stress level

振动应力条件	功率谱密度/ ($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	均方根 值/ g	总加权时 间/ min
起飞振动量值 $W0_{起飞}$	0.002 00	1.656 5	2.0
连续振动量值 $W0_{连续}$	0.001 00	1.171 3	324.2
中间振动量值 $W0_{中间}$	0.003 12	2.068 9	21.0
最大振动量值 $W0_{最大}$	0.009 56	3.621 6	5.2
最小振动量值 $W0_{最小}$	0.002 16	1.721 4	7.6

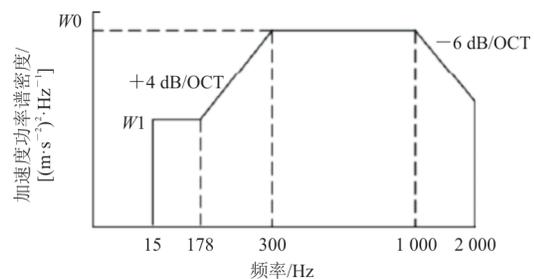


图 4 振动谱型图

Fig. 4 Vibration spectrum type

2.3 数字样机建模

电子程控器的数字样机模型是结合其设计信

息,借助专业软件建立的。数字样机建模有:CAD、CFD、FEA三种。其中,CAD数字样机是体现几何特征的三维模型,是开展CFD和FEA数字样机的基础;CFD、FEA数字样机是开展热、振动应力分析的前提。

在建模的过程中,不同的模型简化要求也不一样,具体要求如下:

- 1) 必须保证所建模型结构的完整;
- 2) 通过接口程序导入CAD数字样机,建立CFD和FEA数字样机的主体几何结构;
- 3) 通过手工修改和适当地简化与等效,完善CFD和FEA数字样机几何结构:

①在保证PCB板的重量和面积相等的情况下,PCB板可看作单层结构并简化成单一的各向异性材料;

②在保证元器件的重量、体积相等的情况下,元器件可看成是各部分材料均匀分布的实体,省略其管脚;

③不需要建立焊点、通孔、管脚;

④不需要反映焊接、胶接这类连接关系;

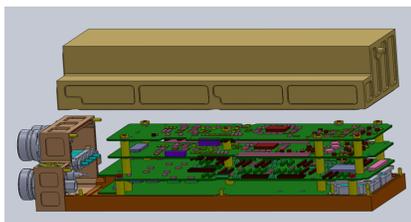
⑤小的表贴电阻、表贴电容根据其数量和质量等效到电路板上;

⑥大的元器件(如变压器、线圈等)以实体形式建立模型;

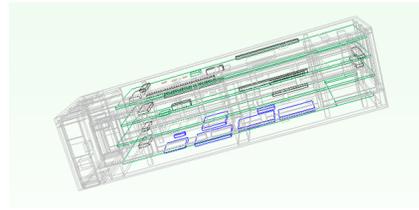
⑦导热条根据附着电路板的面积和质量等效在电路板的局部结构上;

⑧冷板应根据实际结构和质量等效为薄板形式的模型。

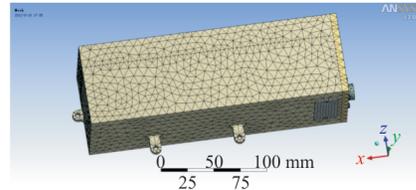
根据电子程控器的设计信息及模型简化原则,建立电子程控器的CAD数字样机;根据CAD数字样机经简化处理后建立电子程控器CFD数字样机模型;根据CAD数字样机经简化处理后建立电子程控器FEA数字样机模型,如图5所示。



(a) 电子程控器CAD数字样机



(b) 电子程控器CFD数字样机



(c) 电子程控器FEA数字样机

图5 某型电子程控器数字样机示意图

Fig. 5 Digital prototype of electronic control proceeding controller

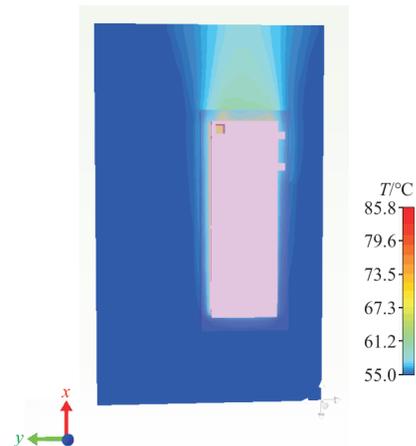
2.4 热应力分析

热应力分析是为了得到产品热应力薄弱环节和热应力分布情况,为产品故障预计提供输入。在仿真分析前参数的设置按如下原则:

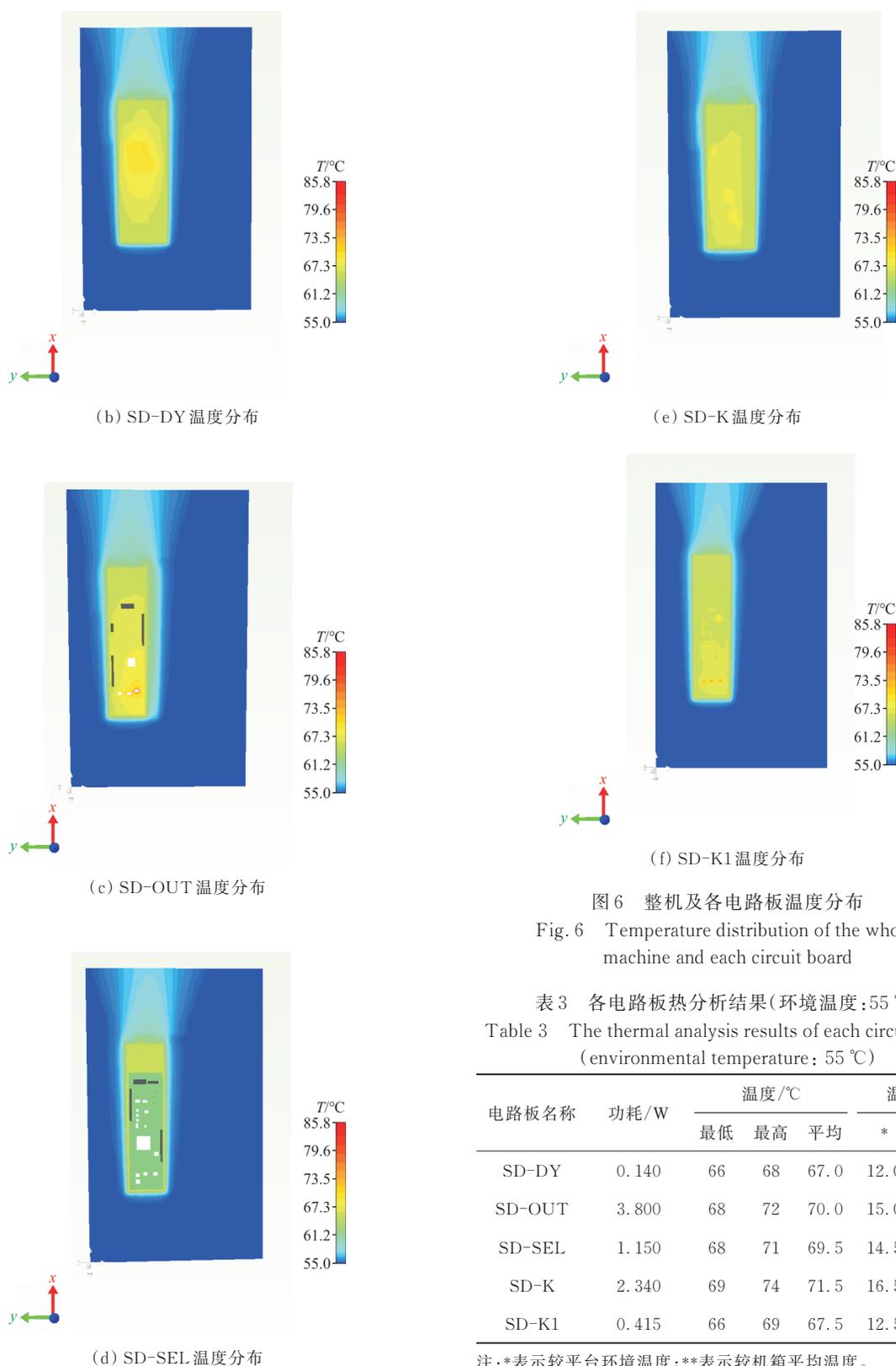
1) 器件功耗设定:功耗 ≥ 0.01 W的器件,按实际功耗进行设定,其他器件的功耗直接附加在电路板上;

2) 封装材料设定:根据器件特性,设定建模器件的封装材料。

本文基于主流热仿真软件对某型电子程控器进行热应力仿真分析,通过分析得到产品在平台环境 55°C 条件下,整机及各电路板温度分布如图6所示,各电路板热分析结果如表3所示。



(a) 整机温度分布



2.5 振动应力分析

振动应力分析是为识别在振动工况下,产品振动设计的缺陷部位,了解其应力分布情况,为产品故障预计提供输入。在仿真分析之前参数的设置按如下原则:

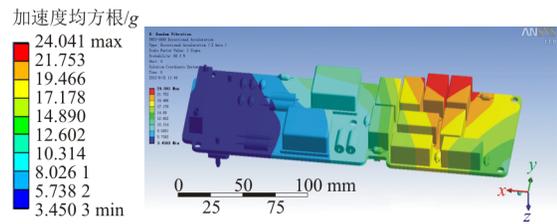
1) 器件质量设定:根据器件实际质量,对所有质量大于 1 g 的器件进行建模及质量设置,剩余质量平均到整个电路板上;

2) 封装材料设定:根据器件封装材料,对所有需要建模的器件设定相应的封装材料。

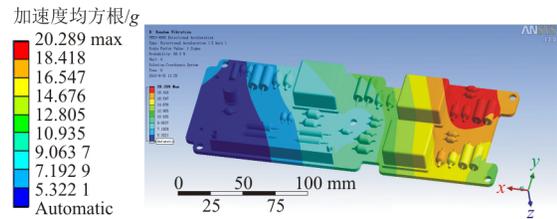
本文基于 ANSYS 软件对电子程控器进行振动仿真分析,通过分析得到电子程控器及其电路板的随机振动加速度响应分析结果,如表 4 所示,随机响应加速度均方根云图如图 7 所示;随机振动位移响应分析结果如表 5 所示,随机响应的位移均方根云图如图 8 所示。

表 4 随机振动加速度响应分析结果
Table 4 The results of random vibration acceleration response

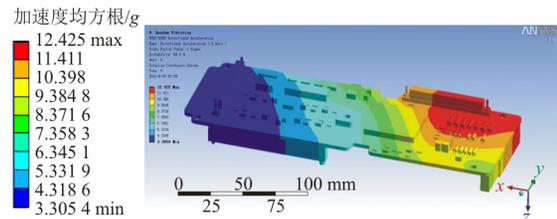
名称	一阶频率/Hz	加速度均方根最大值/g
整机	185.44	24.04
SD-DY	774.78	22.83
SD-OUT	705.86	24.04
SD-SEL	887.32	20.28
SD-K	988.98	12.42
SD-K1	901.88	19.78



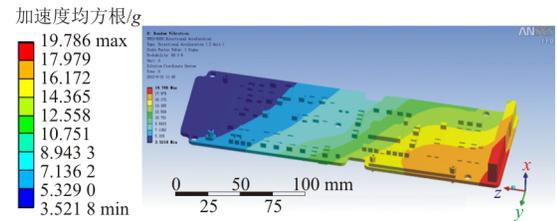
(c) SD-OUT 云图



(d) SD-SEL 云图



(e) SD-K 云图



(f) SD-K1 云图

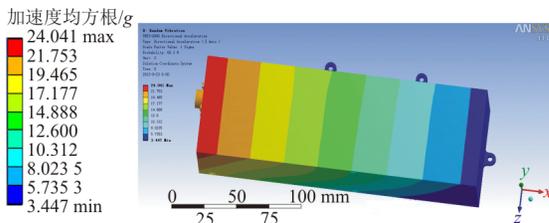
图 7 加速度均方根值云图

Fig. 7 Cloud chart of root mean square acceleration values

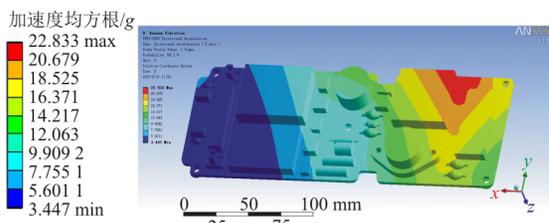
表 5 随机振动位移响应分析结果

Table 5 The results of random vibration displacement response

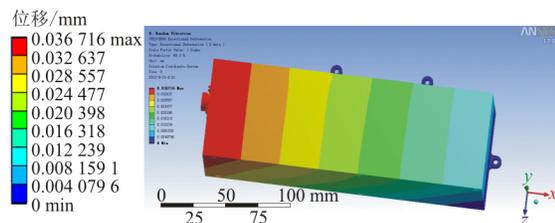
名称	位移最大值/mm	名称	位移最大值/mm
整机	0.036 7	SD-SEL	0.032 1
SD-DY	0.036 1	SD-K	0.019 8
SD-OUT	0.035 8	SD-K1	0.031 4



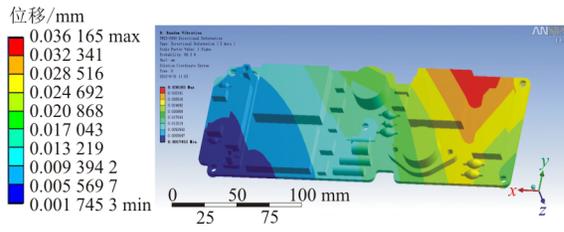
(a) 整机云图



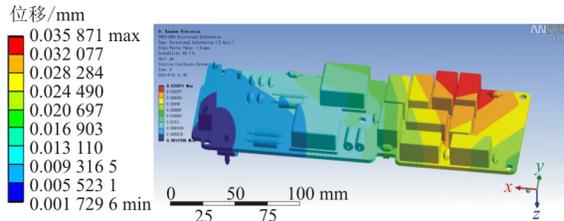
(b) SD-DY 云图



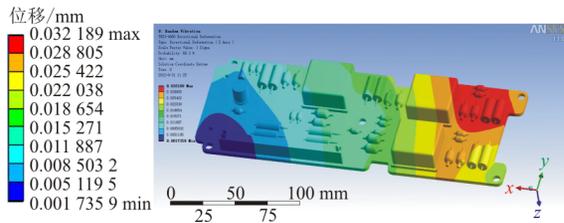
(a) 整机位移云图



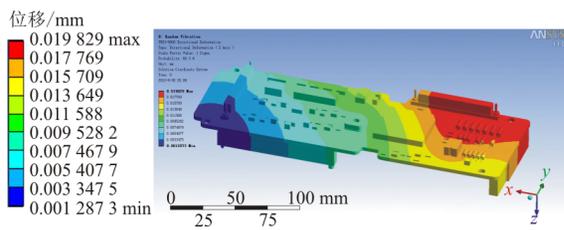
(b) SD-DY 位移云图



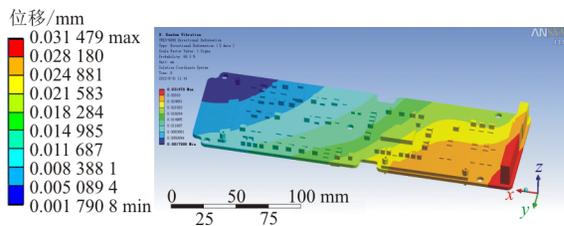
(c) SD-OUT 位移云图



(d) SD-SEL 位移云图



(e) SD-K 位移云图



(f) SD-K1 位移云图

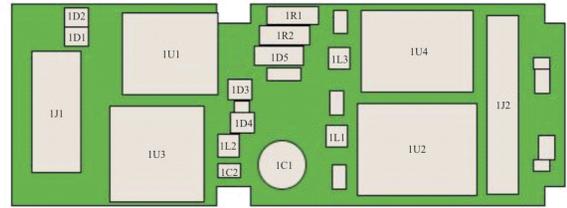
图 8 位移均方根值云图

Fig. 8 Cloud chart of root mean square displacement values

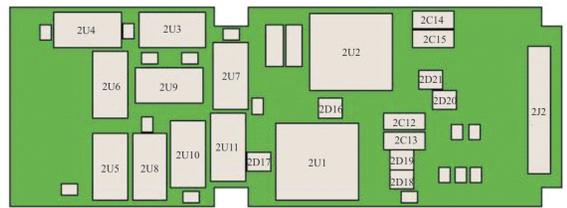
2.6 故障预计

故障预计是指基于故障物理原理,通过建模与仿真手段对产品的可靠性进行设计和分析。以热应力分析和振动应力分析的结果作为输入,结

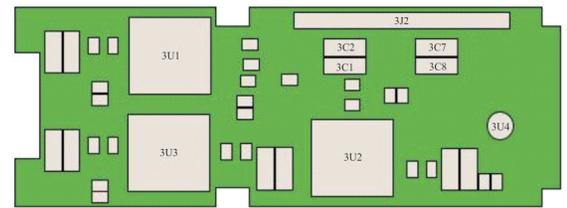
合产品的应力损伤模型,采用CRAFE可靠性分析软件对产品进行故障预计,最终得到产品的故障信息矩阵,包括故障位置、故障模式、故障机理、故障时间等信息^[18]。电子程控器故障预计分析模型如图9所示。SD-DY电路板相对薄弱点故障信息矩阵如表6所示,SD-DY电路板潜在故障点位置如图10所示。



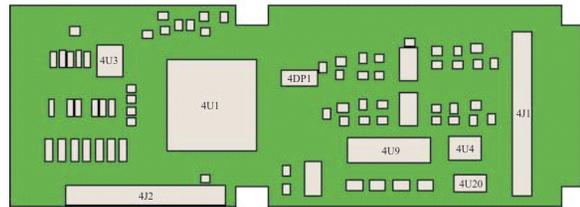
(a) SD-DY 故障预计模型



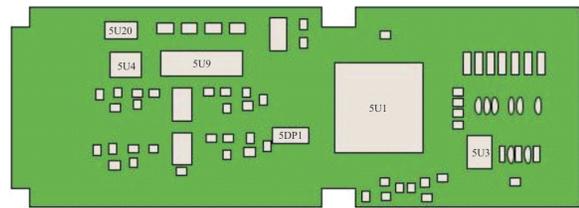
(b) SD-OUT 故障预计模型



(c) SD-SEL 故障预计模型



(d) SD-K 故障预计模型



(e) SD-K1 故障预计模型

图 9 电子程控器故障预计模型
Fig. 9 The fault prediction model of electronic control proceeding controller

表 6 SD-DY 电路板相对薄弱点故障信息矩阵表
Table 6 Fault information matrix for relative weakness points of SD-DY circuit board

电路板	位号	故障模式	故障机理	预计故障时间/h		
				最小	最大	均值
SD-DY 模块	1L1	焊点开裂	温度疲劳	2 272	5 866	3 678
	1L2	焊点开裂	温度疲劳	2 174	5 754	3 510
	1L3	焊点开裂	温度疲劳	2 298	6 353	3 782

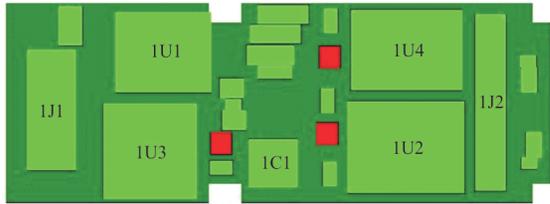


图 10 SD-DY 电路板的潜在故障点位置
Fig. 10 Potential fault location of SD-DY circuit board

2.7 可靠性评估

可靠性评估是对故障分析所获得的大样本数据进行故障密度分布拟合,并从大量的故障数据中挑选出符合需要的数据,再将这部分故障的故障密度分布采用仿真方法融合为产品或模块的故障密度分布,最后评估出产品的可靠性水平。

按基于密度分布的相似性对故障进行聚类,将故障分为 I 型故障类(设备有效寿命早期)、II 型故障类(应力累积损伤造成的故障)和 III 型故障类(耗损期)。对于电子产品的故障大部分属于 II 型故障类,型号工程中推荐采取三参数威布尔分布进行设备的可靠性评估^[18-19],如表 7 所示。

表 7 电子程控器及各电路板可靠性评估表
Table 7 Reliability evaluation table for electronic control proceeding controller and each circuit board

名称	故障时间概率密度函数				平均首发故障时间/h
	分布类型	形状参数	尺度参数	位置参数	
SD-DY	威布尔分布	4.41	1 603	1 690	3 153
SD-OUT	威布尔分布	4.96	7 828	8 997	16 185
SD-SEL	威布尔分布	11.44	13 657	0	13 029
SD-K	威布尔分布	3.09	7 977	308	7 457
SD-K1	威布尔分布	3.60	12 427	5 430	11 201
电子程控器	威布尔分布	4.05	4 950	2 311	3 118

2.8 结果分析

通过对某型电子程控器开展可靠性仿真分析,得到如下结果:

1) 电子程控器热设计合理,相对 55℃平台环境,机箱平均温升为 6.8℃;

2) 电子程控器整机振动设计合理,机箱一阶谐振频率为 185.44 Hz,与各电路板一阶谐振频率符合倍频程规则;

3) 电子程控器平均首发故障时间预计值为 3 118 h;

4) 共发现薄弱环节 3 个,分别为 SD-DY 电路板中的 1L1、1L2、1L3 三个器件,对应的型号为 SMRH6D38-3R3M,对应的故障模式为焊点开裂;这三个器件在 10 000 工作小时内出现故障的概率大于 63.2%。

3 可靠性优化设计

针对第一轮可靠性仿真分析中确定的电子程控器 SD-DY 电路板中存在的三个器件的可靠性薄弱环节,对应的故障机理主要为温度疲劳引起的焊点开裂。针对此薄弱环节,建议的优化改进方案为通过涂导热胶、增加散热垫、更换元器件等措施降低器件温度,通过增加焊盘面积、引脚高度、或者改进焊锡材料等措施提高器件抗疲劳特性。

在实际进行优化设计时,对于 SD-DY 电路板存在的薄弱环节,将原高温器件进行替换,提高质量等级,并增加焊盘面积;对其他电路板的更改主要是依据型号质量、体积、测试性、可靠性、散热、功耗、结构布局等要求综合考虑后进行优化设计。由于本文主要是对比改进措施的有效性,仅对采取改进措施的 SD-DY 电路板及电子程控器重新进行可靠性仿真评估,最终的可靠性评估结果如表 8~表 9 所示。

表 8 电子程控器优化后可靠性评估表
Table 8 Second round reliability evaluation table for electronic control proceeding controller

名称	故障时间概率密度函数				平均首发故障时间/h
	分布类型	形状参数	尺度参数	位置参数	
SD-DY	威布尔分布	3.47	3 518	4 899	7 722
电子程控器	威布尔分布	4.21	3 750	4 311	7 703

表9 电子程控器平均首发故障时间评估值对比
Table 9 The comparison of mean time to first failure for electronic control proceeding controller

序号	对比项	平均首发故障时间评估值/h	
		优化前	优化后
1	SD-DY 电路板	3 153	7 722
2	电子程控器	3 118	7 703

通过对改进后电子程控器的可靠性仿真及对比分析,结果表明:

1) 某型电子程控器的各电路板热设计较为合理,温升在合理的范围内,各电路板无热集中区域和高温器件,有效地消除了优化前SD-DY电路板存在的1L1、1L2、1L3三个器件存在的故障,改进效果显著;

2) 某型电子程控器的振动设计合理,机箱与各模块一阶谐振频率符合倍频程规则,大幅降低了其发生共振的可能性;

3) 某型电子程控器各模块无相对薄弱点,故障预计未发现薄弱环节;

4) 某型电子程控器平均首发故障时间评估值提高为7 703 h,较优化前提高了147%。

针对该电子程控器优化后指标评估提高情况,说明如下:

1) 由于可靠性评估采用的是累积损伤原理,单个电路板的评估结果对整个产品的评估结果影响较大;优化前DY板存在薄弱环节导致程控器平均首发故障时间为3 118 h,与实际理论计算值7 086 h存在较大差异,说明产品本身存在设计缺陷;

2) 优化设计后的程控器,针对薄弱环节改进后评估值为7 703 h,此评估值与计算值7 086 h量级相当,尽管较改进前仿真计算结果提高幅度较大,但可以说明可靠性仿真对产品设计优化的指导性。

4 可靠性仿真与计算结果的对比分析

采用GIB/Z 299C—2006中提供的各元器件的失效率计算模型和数据,对电子程控器进行可靠性计算,并将结果与仿真结果进行对比分析。电子程控器各电路板失效率理论计算结果如表10所示。

表10 电子程控器理论计算结果
Table 10 The theoretical calculation results of electronic control proceeding controller

电路板	失效率结果/ $(10^{-6} \cdot h^{-1})$
SD-DY	56.75
SD-OUT	20.15
SD-SEL	13.44
SD-K	23.17
SD-K1	27.61

根据电子程控器的可靠性数学模型及表10中各组件的失效率数据计算其基本可靠性,电子程控器理论计算结果和仿真评估对比分析结果如表11所示。

表11 平均首发故障时间评估值对比
Table 11 The comparison of Mean time to first failure

名称	理论计算值/h	仿真分析值/h
电子程控器	7 086	7 703

通过对比分析,电子程控器理论计算值与仿真分析值的差值满足《XX飞机可靠性仿真试验规范》中的要求,因此可以肯定采用可靠性仿真方法评估电子产品可靠性是有效的。

5 结 论

可靠性仿真的结果与理论计算结果相差较小,可以作为型号可靠性指标评估的依据,减少采用物理样机进行可靠性试验的周期和费用;同时优化改进对提高电子程控器的可靠性设计效果显著,可为后续型号可靠性评估与设计提供理论参考。

参考文献

- [1] 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(2): 246-256.
LUO Mingzhu, KANG Rui, LIU Fawang. A review of reliability prediction methods for electronic products[J]. Electronic Science & Technology, 2014(2): 246-256. (in Chinese)
- [2] 陈颖,高蕾,康锐. 基于故障物理的电子产品可靠性仿真分析方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013(10): 444-448.
CHEN Ying, GAO Lei, KANG Rui. Research on reliability simulation prediction of electronic product based on physics of failure method[J]. Journal of Chinese Academy of

- Electronic Sciences, 2013(10): 444-448. (in Chinese)
- [3] 王文智, 宁琦. 可靠性仿真技术在电路设计中的应用与分析[J]. 舰船电子工程, 2013(12): 78-81.
WANG Wenzhi, NING Qi. Application and analysis of reliability simulation technology in circuit design[J]. Ship Electronic Engineering, 2013(12): 78-81. (in Chinese)
- [4] CHRISTOPHER S, JERRY W. Raytheon assessment of prism as a field failure prediction tool[C]// The Journal of the Reliability Analysis Center. [S.l. : s.n.], 2004: 37-42.
- [5] CHRISTOPHER J, BENJAMIN W, DIGANTA D. Reliability predictions-continued reliance on a misleading approach[C]// 2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Orlando: IEEE, 2013.
- [6] 陈萍, 杜绍华, 汪旭. 基于可靠性仿真的寿命预测技术及应用[J]. 机车电传动, 2017(2): 9-14.
CHEN Ping, DU Shaohua, WANG Xu. Life prediction techniques and applications based on reliability simulation method[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(2): 9-14. (in Chinese)
- [7] 刘凌, 孙富强, 章桐. 基于故障物理的集成控制器电路板可靠性预计[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 133-140.
LIU Ling, SUN Fuqiang, ZHANG Tong. Reliability prediction for integrated controller circuit board based on physics of failure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 133-140. (in Chinese)
- [8] 李付军, 敬敏. 可靠性仿真在机载雷达中的应用与分析[J]. 现代雷达, 2017, 39(2): 88-90.
LI Fujun, JING Min. Application and analysis of reliability simulation in airborne radar[J]. Modern Radar, 2017, 39(2): 88-90. (in Chinese)
- [9] 李春秀. 故障物理及可靠性物理技术的应用研究[J]. 中国高新科技, 2019: 50-51.
LI Chunxiu. Applied research in fault physics and reliability physics[J]. China hi-tech, 2019: 50-51. (in Chinese)
- [10] 邓蕾. 可靠性仿真技术在电路设计中的应用与分析[J]. 电子世界, 2021(10): 11-12.
DENG Lei. Application and analysis of reliability simulation technology in circuit design [J]. Electronic World, 2021(10): 11-12. (in Chinese)
- [11] 陈锋, 申斯文, 康力. 基于故障物理的可靠性仿真分析在航电设备中的应用[J]. 建模与仿真, 2013, 2(2): 14-21.
CHEN Feng, SHEN Siwen, KANG Li. Application of reliability simulation based on failure physic in avionics device [J]. Modeling and Simulation, 2013, 2(2): 14-21. (in Chinese)
- [12] FOUCHER B, BOULLIE J, MESLET B, et al. A review of reliability prediction methods for electronic devices [J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(8): 1155-1162.
- [13] ANSI. Physics of failure reliability predictions: ANSI/VITA 51.2-2016[S]. US: ANSI/VITA, 2016.
- [14] WHITE M, BERNSTEIN J B. Microelectronics reliability: physics-of-failure based modeling and lifetime evaluation: JPL-Publ-08-5[R]. Jet Propulsion Laboratory, 2008.
- [15] 王强, 吴海容, 陈晓晨. 基于故障物理的航空电子设备高可靠性评估[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 216-219.
WANG Qiang, WU Hairong, CHEN Xiaochen. High reliability evaluation of avionics equipment based on fault physics [J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2016, 33(2): 216-219. (in Chinese)
- [16] 李振. 航空电子产品的可靠性设计与仿真试验[J]. 舰船电子工程, 2014(6): 46-51.
LI Zhen. Reliability design and simulation test of the aerospace electronic products[J]. Ship Electronic Engineering, 2014(6): 46-51. (in Chinese)
- [17] 李永红, 曾晨晖. 电子产品基于故障物理的可靠性设计优化方法研究[J]. 航空标准化与质量, 2015(4): 39-43.
LI Yonghong, ZENG Chenhui. Research on reliability design optimization method based on fault physics for electronic products [J]. Aviation Standardization and Quality, 2015(4): 39-43. (in Chinese)
- [18] 曹胜. 基于故障物理的电子产品可靠性预计与试验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
CAO Sheng. Reliability prediction and test research of electronic products based on fault physics [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [19] 刘凌, 孙富强, 章桐. 基于故障物理的集成控制器电路板可靠性预计[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 133-140.
LIU Ling, SUN Fuqiang, ZHANG Tong. Reliability prediction for integrated controller circuit board based an physics of failure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 133-140. (in Chinese)

(编辑:马文静)