装备通用质量特性及寿命评估

# 基于故障物理的集成控制器电路板可靠性预计

# 刘凌<sup>1</sup>,孙富强<sup>2</sup>,章桐<sup>1</sup>

(1.同济大学,上海 201804; 2.北京航空航天大学,北京 100191)

摘要:目的 实现商用电动汽车集成控制器的可靠性预计与提升,采用应力仿真与故障物理相结合的方法对 其关键电路板进行可靠性预计。方法 针对集成控制器的数字样机,开展热、振动仿真应力分析,采用故障 模式机理及影响分析 (FMMEA)方法,分析电路板可能存在的故障模式和故障机理,确定潜在故障模式的 故障物理模型。将应力分析结果作为故障物理模型的输入,进行基于故障物理的可靠性预计,寻找设计薄 弱环节,并提出改进措施。结果 找到了电路板的 8 个高温器件和热集中区域,振动仿真分析表明,电路板 顶端与中心振动强度较大,可能引起疲劳失效,需要给予关注。通过 FMMEA 分析,得到电路板的主要故 障模式为焊点开裂,主要受温度循环影响,造成热疲劳失效。最后采用 Coffin-Mason 模型,计算得到电路 板的平均故障间隔时间为 15 869 h,找出了电路板的可靠性设计的薄弱环节。结论 该方法基于故障物理, 相对传统基于手册的可靠性预计方法精度更高,同时能够在产品研制阶段与性能设计并行,通过分析和改 进产品设计,达到正向可靠性设计的目的,为新能源汽车领域电子产品的可靠性预计提供新的思路。 关键词:电动汽车;故障物理;应力分析;故障模式机理及影响分析;可靠性预计;可靠性设计 中图分类号:TB114.3; V243 文献标识码:A 文章编号: 1672-9242(2021)04-0133-08 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.04.020

# Reliability Prediction for Integrated Controller Circuit Board Based on Physics of Failure

LIU Ling<sup>1</sup>, SUN Fu-qiang<sup>2</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>

(1.TongJi University, Shanghai 201804, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT:** In order to achieve the reliability prediction and improvement of the integrated controller of commercial electric vehicles, the method of combining stress simulation and physics of failure is used to predict the reliability of its key circuit boards. The thermal and vibration simulation stress analysis was carried out for the digital prototype of the integrated controller. The failure mode mechanism and effect analysis (FMMEA) method is used to analyze the possible failure modes and failure mechanisms of the printed circuit board, and the failure physical model of the potential failure mode is determined. The results

- Received: 2020-08-26; Revised: 2020-09-28
- 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0104504)

LIU Ling, SUN Fu-qiang, ZHANG Tong. Reliability prediction for integrated controller circuit board based on physics of failure[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(4): 133-140.

收稿日期: 2020-08-26; 修订日期: 2020-09-28

Fund: Supported by the National Key R & D Program of China (2018YFB0104504)

作者简介:刘凌(1974-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电动汽车驱动系统与基于大数据技术的可靠性、运行经济性。

**Biography:** LIU Ling (1974—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: electric vehicle drive system and the reliability and operation economy based on big data.

通讯作者:孙富强 (1983—),男,博士,副研究员,主要研究方向为可靠性与耐久性基础理论与验证评估。

**Corresponding author:** Sun Fu-qiang (1983—), Male, Ph. D., Associate researcher, Research focus: basic theory and validation evaluation of reliability and durability.

引文格式: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.

of the stress analysis are used as the input of the failure physical model, the reliability prediction based on the physics of failure is performed, the weak points of the design are found, and the improvement measures are proposed. Through the thermal simulation and vibration simulation analysis of the key circuit board of the integrated controller, eight high-temperature devices and thermal concentration areas of the circuit board are found. The vibration simulation analysis shows that the top and center vibration strength of the circuit board is large, which may cause fatigue failure, so attention should be paid to it. FMMEA analysis shows that the main failure mode of the circuit board is solder joint cracking, which is mainly affected by temperature cycling and caused thermal fatigue failure. Finally, the Coffin-Mason model was used to calculate the average failure interval of the circuit board is 15869 h, and the weak links of the circuit board reliability design can be found out. This method is based on physics of failure, which is more accurate than the traditional manual-based reliability prediction method. At the same time, it can be parallel with performance design during the product development stage. It can achieve the purpose of forward reliability design by analyzing and improving the product design, for the new energy automotive electronic product reliability prediction is expected to provide new ideas.

**KEY WORDS:** electric vehicles; physics of failure; stress analysis; failure mode and mechanism effect analysis; reliability prediction; reliability design

随着能源安全、环境污染和城市交通问题的日新 凸显,国家高度重视并大力推进新能源汽车的推广应 用和自主创新<sup>[1]</sup>。集成控制器是新能源电动汽车的关 键核心零部件,但目前国产集成控制器仍存在功率密 度低、成本高、可靠性差的问题<sup>[2]</sup>。特别是电动汽车 工作场景多样,环境复杂恶劣,其集成控制器受温度、 振动、湿度和电应力多物理场耦合应力作用,造成其 电路板存在多种失效机理,同时电路板结构、功能、 材料、电参数等因素对产品可靠性也造成影响。恶劣 的工作环境和复杂的产品结构设计使得集成控制器 电路板的可靠性预计工作变得十分困难。

目前,国内外常用的可靠性预计方法通常是借助 GJB/Z 299C、MIL-HDBK-217F 等标准进行<sup>[3]</sup>。这些 方法均是基于指数分布和恒定失效率假设,用统计方 法描述产品故障,未考虑产品制造过程和使用条件的不 确定性影响,可靠性预计结果常常与实际偏差较大[4], 对系统决策产生不利影响[5-7]。基于故障物理的可靠 性仿真试验方法为解决上述问题提供了新的有效途 径。可靠性仿真试验通过产品数字样机和故障物理模 型,将产品工作环境应力与潜在故障发展过程联系起 来,从而定量地评估产品设计的可靠性,发现薄弱环 节,并采取有效的改进措施<sup>[8-10]</sup>。可靠性仿真试验方 法结合产品的设计特性,完整地考虑产品预期寿命环 境及工作载荷历程、制造过程波动、其他随机因素等 的影响,对产品故障详细定义,通过数字化产品样机, 实现产品的应力分析。同时根据故障物理模型预计产 品故障和平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF),发现薄弱环节,支持产品改进,提 高可靠性水平[11]。

由于可靠性仿真试验能够在产品研制阶段与性 能设计并行地分析和改进产品设计的可靠性,真正实 现"可靠性是设计出来的"这一目标,受到了航空、航 天等领域广泛关注,已成功应用于大量的电子系统的 可靠性评估<sup>[12-17]</sup>。因此,文中将此技术引入新能源汽车领域,为集成控制器电路板可靠性预计提供新的思路。

# 1 基于故障物理的可靠仿真试验方法

基于故障物理的可靠性仿真试验方法主要包括 应力分析、故障模式机理及其影响分析(Failure Mode, Mechanism and Effect Analysis, FMMEA)<sup>[18-19]</sup>和基于 故障物理的可靠性预计等 3 部分,总体框架如图 1 所示。

首先通过仿真软件建立产品的数字样机,施加产品所经历的载荷历程(包括温度和振动),进行应力分析。在此基础上,采用 FMMEA 方法,对电路板可能存在的故障模式和故障机理进行分析,得到各潜在故障模式的故障物理模型。将应力分析的结果作为故障物理模型的输入,进行基于故障物理的可靠性预计。根据故障关系建模,计算产品的 MTBF,从而找出产品的设计薄弱环节,提出设计改进措施,提高集成控制器电路板的可靠性水平,优化其内部设计。

## 1.1 应力分析

集成控制器在使用过程中会经受温度、振动、湿 度和电应力等多种环境应力的作用,为了对其开展可 靠性分析,首先确定敏感环境因素。对于大多数电子、 机电产品而言,温度、振动、湿度等环境应力对产品 的可靠性影响最大。据统计分析,由环境因素引起的 故障占总故障的 52%,其中由温度引起的故障占 40%,由振动引起的故障占 27%,二者占环境因素引 起的总故障的 67%。因此,本文在开展可靠性仿真试 验时,主要考虑温度和振动这两种环境应力类型。

应力分析是一种利用计算机仿真分析软件,对实际的或设想的设备进行数字模型应力分析和计算的 方法,具体流程如图 2 所示。

· 134 ·



图 1 总体思路框架 Fig.1 General thought framework



图 2 应力分析流程 Fig.2 Stress analysis process

 1)收集产品设计信息(设备名称、功能、安装 位置及方式等)、使用信息(任务类型和使用条件、 通风散热形式等)、基本可靠性要求(MTBF等)。

2)利用常用的软件 CATIA、UG、Solid Works 等建立 CAD(Computer Aided Design, CAD)数字样 机,分别针对温度和振动搜集相应的信息,建立热仿 真数字样机和振动仿真数字样机。

3)根据实际的热仿真数字样机,将具体的给定条件输入至热仿真数字样机中,得到温度场分析结果,以了解产品内部温度的分布情况。通过电路板温度场测试及关键器件点温度测试,进行电路板模型校核,保证电路板热仿真分析的准确性。根据实际的振动仿真数字样机,设置约束条件和振动载荷。划分网格,输出以云图或网格变形图的形式描述的仿真结果。分析输出结果,通过模态测试、频响测试和随机响应测试,保证建模和边界条件的准确性,以验证数

字样机模型与物理样机的一致性。

应力分析通过数字化样机,将产品的结构、材料 几何特性、变化的载荷历程,通过软件进行模拟,得 到产品的热应力和振动应力的分析结果。

#### 1.2 FMMEA 方法

故障模式机理及影响分析(FMMEA)是研究产 品每个组成部分可能存在的故障模式、故障机理,并 确定各个故障模式对产品其他组成部分和产品功能 影响的一种分析方法。此方法来源于故障模式及影响 分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)。 在 FMEA 的基础上,增加了故障机理分析,以及采 用故障物理模型定量计算故障机理风险的步骤。将电 路板上所有的元器件、零部件和互连等看成是潜在故 障点,分析这些潜在故障点可能存在的故障模式、故 障机理。FMMEA的流程如图 3 所示。

 1)通过前期的产品定义,参考相似产品的故障 模式,从导致产品发生潜在故障模式的设计、制造、 贮存、运输或使用条件中,查找故障模式发生的环境 或者载荷条件。

2)根据被分析产品的特征,确定所有可能的故障模式。

3)依据专家经验、相似产品法以及失效分析等



图 3 FMMEA 流程 Fig.3 FMMEA process 方法分析故障产生的原因,确定潜在故障机理。

4)根据前面的分析,确定产品的故障物理模型, 同时按照风险程度对故障模式及故障机理进行排序, 确定产品的主机理、薄弱环节、对应的敏感载荷以及 监测参数。

通过对产品功能和结构的分解,针对其构成元 器件的故障模式进行分析,得到其故障产生的原因 (应力载荷)。根据故障机理确定相应的故障物理 模型,实现从微观的故障物理到性能退化的宏观表 征。部分元器件的典型故障模式、机理与故障物理 模型见表 1<sup>[3]</sup>。

表	₹1	部分元	器件典型故	障模式、	机理与物	理模型	
Tab.1 Typical f	failure	e mode,	mechanism	and physi	cal model	of some	components

Failure mode	The failure mecha- nism	Environment and operational stress	PoF model
Open circuit, short circuit, high resistance, leakage	Electro migration (EM)	Relative humidity, voltage, temperature	Black model
The threshold voltage increases, increase of switching voltage	Time-lapse break- down of gate oxide (TDDB)	Electrical stress, tempera- ture, channel large electric field	Wu model
Short circuit	Hot carrier effect (HCI)		HCI model
Gate current	Negative bias tem- perature instability effect (NBTI)	High temperature, strong field, negative gate pressure	NBTI model
Open circuit	Chip corrosion	Temperature, overcurrent stress	Pecht model
Open and burn	Chip bonding layer fatigue	Temperature cycle	Suhir model
Breakdown and burn	Dielectric breakdown	Electrical stress, temperature	Rawal model
Signal is intermittent or open	Thermal fatigue	Temperature cycle	Coffin-Mason model
Signal is intermittent or open	Thermal fatigue	Temperature cycle	CALCE model
	Failure mode Open circuit, short circuit, high resistance, leakage The threshold voltage increases, increase of switching voltage Short circuit Gate current Open circuit Open and burn Breakdown and burn Signal is intermittent or open Signal is intermittent or open	Failure modeThe failure mechanismOpen circuit, short circuit, high resistance, leakageElectro migration (EM)The threshold voltage increases, increase of switching voltageTime-lapse break- down of gate oxide (TDDB)Short circuitHot carrier effect (HCI)Gate currentNegative bias tem- perature instability effect (NBTI)Open and burnChip corrosionOpen and burnDielectric breakdownSignal is intermittent or openThermal fatigue	Failure modeThe failure mechanismEnvironment and operational stressOpen circuit, short circuit, high resistance, leakageElectro migration (EM)Relative humidity, voltage, temperatureThe threshold voltage increases, increase of switching voltageTime-lapse break-down of gate oxide (TDDB)Electrical stress, temperatureShort circuitHot carrier effect (HCI)Hot carrier effect (HCI)High temperature, strong field, negative gate pressureOpen circuitChip corrosionTemperature, overcurrent stressOpen and burnDielectric breakdownElectrical stress, temperature cycleBreakdown and burnDielectric breakdownElectrical stress, temperature cycleSignal is intermittent or openThermal fatigueTemperature cycle

# 1.3 基于故障物理的可靠性预计

电子产品的故障发生过程如图 4 所示,根据底层 故障物理模型,对元器件的可靠性进行精确预计,进 而对电路板进行寿命评估与可靠性预计。具体思路 为:根据 FMMEA 确定的产品故障机理模型,输入可 靠性仿真试验确定的温度循环和振动谱等,针对每种 可能的故障机理,由应力分析结果计算得到该故障点 在某一应力水平下的损伤量。考虑的故障机理间的关 系为损伤累积关系和竞争关系,计算产品在多机理下 的总损伤量,通过蒙特卡洛仿真得到产品的 MTBF, 从而达到识别产品的薄弱环节及影响其失效的首要 故障机理类型的目的。

通过基于故障物理的可靠性预计,根据故障物理 模型计算产品的应力损伤量,推断每个元器件平均故 障间隔时间,进而得到电路板的故障预计以及平均故 障间隔时间,由故障传递关系实现由元器件到产品的 可靠性预计。





# 2 案例分析

# 2.1 应力分析

#### 2.1.1 产品定义

以某型集成控制器电路板为例进行分析,电路板

构造如图 5 所示。该设备所处湿度环境条件良好、需 承受的最高温度为 70 ℃、振动应力以 0.001 21 g<sup>2</sup>/Hz 等为测试条件,制定振动应力剖面。同时,结合温度 和振动设置,综合试验剖面。此电路板共有 9 种类别 的元器件,共计 83 个。



图 5 某型电路板 Fig.5 Certain type of circuit board

#### 2.1.2 数字样机建立及应力分析

1)热仿真分析。通过软件建立热仿真数字样机, 进行热仿真分析,可以得到电路板上每个元器件的结 温信息。在平台环境温度 70℃的条件下,对电路板 进行温度应力分析,可以得到温度分布结果,如图 6 所示。模块高温器件见表 2。

Tab.2 High temperature device in a circuit board					
The shell temperature/℃	Temperature rise/°C				
97.3	0.3				
97.5	0.5				
96.6	-0.4				
99.0	2.0				
99.3	2.3				
99.5	2.5				
99.6	2.6				
99.5	2.5				
	Emperature device in a           The shell           temperature/°C           97.3           97.5           96.6           99.0           99.3           99.5           99.6           99.5           99.5           99.5				

表 2	电路板中的高温器件
Tab 2 High tem	perature device in a circuit h



图 6 电路板温度分布

Fig.6 Circuit board temperature distribution: a) front of circuit board; b) back of circuit board

从受试产品的热分布图可以看到, 背面 R542— R546 共 5 个电阻器区域温度较高,并且引起正面 N511、N512 温度较高。在环境温度 70 ℃条件下, N511、N512 温度分别达到 97.3 ℃和 97.5 ℃。仿真 结果表明,应该考虑分散热集中区域,或者考虑增加 散热措施。

2)振动仿真分析。通过软件建立振动仿真数字 样机,进行振动仿真分析,可以得到电路板上元器件 的振动模态。在平台环境温度 70 ℃条件下,对电路 板进行振动应力分析,前三阶的振型结果如图 7 所 示,频率结果见表 3。





Fig.7 The first three-order modal analysis results of the printed circuit board: a) the first order modal; b) the second order modal; c) the third order modal

表 3 电路板谐振频率及位置

Tab.3 Reso	onance frequency and	a position of circuit board
Order	The resonant frequency/Hz	Local mode position

	frequency/Hz	•
N511	349	The top of the PCB
545	500	Near PCB top and struts
546	827	PCB center left and right

根据振动仿真结果可以看出,受试电路板一阶模 态条件下,产生谐振频率区域为模块顶端。该区域主 要为印制板,产生谐振的原因是电路板强度问题以及 与其他器件的临近安装问题。二阶和三阶模态条件 下,产生谐振频率区域主要为模块中心部分。该区域 主要为元器件集中部分,产生谐振的原因是器件安装 的位置处于振动较强处,应力较大,有可能引起疲劳 失效,需要给予关注。建议设计人员关注这一现象, 在条件允许的情况下,改变器件布局。

在完成上述仿真分析后,还通过热测量试验的方法,得到了电路板关键器件点温度测试结果和机箱关键部位点温度测试结果,对已建立的 CFD 初始模型进行了修正,保证了 CFD 数字样机的准确性。采用

模态试验对 FEA 数字样机的初始模型进行了修正, 通过对电路板进行约束条件下的模态分析,保证仿真 分析设置的边界条件的准确性,验证了数字样机模型 与物理样机的一致性。

## 2.2 FMMEA

采用 FMMEA 方法,对元器件的失效模式进行分析,可以得到部分元器件故障物理(见表 4)。如通 过对 C593 的分析,确定其故障物理模型为与焊点热 疲劳相关的 Coffin-Mason 模型:

$$N_{\rm f} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \gamma}{2\varepsilon_{\rm f}} \right)^{\frac{1}{c}} \tag{1}$$

式中: $N_{\rm f}$ 为疲劳寿命; $\Delta\gamma$ 为应变范围,根据应 力分析得到; $\varepsilon_{\rm f}$ 为材料常数,可根据电路板材料为 63Sn37Pb 确定;c为温度循环相关的参数,  $c=-0.0442-0.0006T_{\rm s}+0.017\ln(1+360/t_{\rm D})$ ,其中 $T_{\rm s}$ 为焊 点温度循环中的平均温度, $t_{\rm D}$ 为最高温度的保温时 间,根据设定的温度剖面决定。

表 4 部分元器件的 FMMEA Tab.4 FMMEA table for some components

Potential fault location	Failure mode	The failure mechanism	Environmental load	Fault physical model
C593	Solder joint cracking	Thermal fatigue	Temperature cycle	Coffin - Mason model <sup>[20]</sup>
R556	Solder joint cracking	Thermal fatigue	Temperature cycle	Coffin - Mason model <sup>[20]</sup>

## 2.3 基于故障物理的可靠性预计

## 2.3.1 故障预计

采用软件对电路板进行建模,如图 8 所示。设置 材料、结构、载荷等信息为随机变量,假设随机变量 服从均匀分布,设置对应元器件的故障物理模型,采 用 Monte Carlo 仿真,仿真次数为 1000。基于上述 设置,可以计算大量单点故障时间数据。根据累计损 伤理论,可以计算潜在故障点在多个故障机理共同作 用下的损伤和故障前时间。潜在故障点位置如图9所 示,故障预计结果见表5。

通过对电路板进行故障预计后发现,主故障为热 疲劳,电路板正面 R550—551、R553、R555—557 和 C590、C593 的焊点预计寿命小于设计要求。综上所 述,电阻器是整个电路板的薄弱环节。其中电阻器位 置在 RII-9 型大功率电阻区域附近,温度较高,可能



图 8 电路板故障预计模型

Fig.8 Circuit board failure prediction model: a) front of circuit board; b) back of circuit board



图 9 电路板的潜在故障点位置

Fig.9 The location of potential failure spots on the circuit board: a) front of circuit board; b) back of circuit board

表 5 电路板的主要故障信息矩阵 Tab.5 The main failure information matrix of the circuit board

The fault location	Failure mode	Main failure mechanism	Expect MTBF/h	Minimum failure time/h	Maximum failure time/h
C593	Solder joint cracking	Thermal fatigue	31 876	13 334	91 469
R556	Solder joint cracking	Thermal fatigue	33 117	22 046	51 903
C590	Solder joint cracking	Thermal fatigue	33 653	14 624	117 968
R551	Solder joint cracking	Thermal fatigue	33 361	22 970	53 168
R550	Solder joint cracking	Thermal fatigue	33 823	23 944	57 791
R557	Solder joint cracking	Thermal fatigue	33 823	23 944	70 080
R553	Solder joint cracking	Thermal fatigue	34 894	23 749	56 185
R555	Solder joint cracking	Thermal fatigue	34 967	23 749	56 210

会由于焊点的热疲劳造成失效。CAK45 由于体积较 大且接近高温区域,故也有可能会由于焊点的热疲劳 失效。建议更换散热性能更好的器件,或者采取必要 的散热措施。

#### 2.3.2 可靠性评估

根据故障预计得到表 5 所示的潜在故障点故障 首发时间及大样本故障数据,根据潜在故障点的蒙特 卡洛仿真大样本量故障时间数据,采用统计数学方法 拟合该潜在故障点的故障时间分布,得到故障数据符 合的分布,经K-S 拟合优度检验,得到单个器件的故 障数据分布。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)。所有Ⅱ型故障类中的故障数据,对其 进行满足其分布下的抽样随机化,得到仿真故障数 据,并进行故障分布融合,得到设备使用寿命期内的 故障时间分布。经过分析,案例故障数据符合三参数 威布尔分布,其概率密度函数和平均首发故障时间表 达式为:

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left(\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right)$$
(2)

$$t_{\rm MTFF} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \tag{3}$$

式中: *m* 为形状参数; η 为尺度参数; γ 为位置 参数。

最终得到电路板的寿命分布和平均首发故障时 间,结果见表 6。

表 6 电路板寿命分布参数 Tab.6 Life distribution parameters of the circuit board

	•	
Dist	Weibull	
Distributed	Shape parameter	3
	Scale parameter	16 207
purumeters	location parameter	1477
Mean time to first failure		15 869

# 3 结语

应用基于故障物理的可靠性仿真试验方法在产 品研制阶段通过数字化实现可靠性预计,不仅考虑了 电路板的材料、几何特性及其预期工作条件和环境载 荷,同时也考虑了制造过程波动、随机因素等的影响, 表征了从微观故障物理到宏观产品性能退化的过程, 实现了正向可靠性设计的目的。针对试验中发现的设 计问题,可通过迭代改进提高电路板的可靠性水平, 为新能源汽车集成控制器的可靠性提升提供有效的 技术支撑<sup>[21]</sup>。

目前由于新能源汽车领域应用该技术还存在环 境载荷谱确定困难、电动汽车失效机理模型不成熟等 问题,论文仅对温度和振动两种主要环境因素进行了 分析,未来还需考虑综合环境的影响,加强多应力耦 合分析,提高可靠性分析结果的准确性。

#### 参考文献:

- 李云,朱世武,吴春冬,等. 电动汽车电机控制器的发展[J].大功率变流技术, 2015(2): 12-17.
   LI Yun, ZHU Shi-wu, WU Chun-dong, et al. Development of motor control unit for electric vehicle[J]. High Power converter technology, 2015(2): 12-17.
- [2] 谢锐波.关于电动汽车技术发展趋势及前景分析[J]. 中国战略新兴产业, 2017(16): 47-48.
   XIE Rui-bo. On the development trend and prospect of electric vehicle technology[J]. China strategic emerging industry, 2017(16): 47-48.
- [3] 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.

- [4] 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 Wen-zhi, NING Qi. Application and analysis of reliability simulation technology in circuit design[J]. Ship electronic engineering, 2013(12): 78-81.
- [5] CHRISTOPHER S, JERRY W. Raytheon assessment of prism as a field failure prediction tool[C]. The Journal of the Reliability Analysis Center, 2004: 37-42.
- [6] BROWN L. Comparing reliability predictions to field data for plastic parts in military, airborne environment[C]// Proceedings of annual reliability and maintainability symposium. Tampa: IEEE, 2003.
- [7] 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.
- [8] 陈萍, 杜绍华, 汪旭, 等. 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 Shao-hua, WANG Xu, et al. Life prediction techniques and applications based on reliability simulation method[J]. Electric drive for locomotives, 2017(2): 9-14.
- [9] CUNNINCHAM J, VALENTIN R, HILL-MAN C, et al. A demonstration of virtual qualification for the design of electronic hardware[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2001: 201-213.

- [10] KUMAR U, ABHIJIT D. Physics-of-failure guidelines for accelerated qualification of electronic systems[J]. Quality and reliability engineering international, 1998, 14(1): 433-447.
- [11] 江振宇,张磊,王有亮,等. 战斗部虚拟试验多级模型 集成方法研究[J]. 系统仿真学,2008(15):4179-4185.
  JIANG Zhen-yu, ZHANG Lei, WANG You-liang, et al. Multi-models integration approach in warhead virtual experiment[J]. Journal of system simulation, 2008(15): 4179-4185.
- [12] MCLEISH J G. Enhancing MIL-HDBK-217 reliability predictions with physics of failure methods[C]// Annual proceedings of reliability and maintainability symposium(RAMS). San Jose: IEEE, 2010: 1-6.
- [13] 乔亮,李传日,刘龙涛. 基于故障物理的可靠性仿真试验的应用[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 7-11.
   QIAO Liang, LI Chuan-ri, LIU Long-tao. Application of reliability simulation test based on failure physic[J].
   Equipment environmental engineering, 2012, 9(2): 7-11.
- [14] 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 Ming-zhu, KANG Rui, LIU Fa-wang. A review of reliability prediction methods for electronic products[J].
  Electronic science & technology, 2014(2): 246-256.
- [15] 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 Si-wen, KANG Li. Application of re-

liability simulation based on failure physic in avionics device[J]. Modeling and simulation, 2013, 2(2): 14-21.

- [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.
  [17] CEOPCE E. Beliability physics in electronics: A historic
- [17] GEORGE E. Reliability physics in electronics: A historical view[J]. IEEE transaction on reliability, 1998, 47(3): 379-389.
- [18] GANESAN S, EVELOY V, DAS D, et al. Identification and utilization of failure mechanism to enhance FMEA and FMECA[C]// Proceedings of the IEEE workshop on accelerated stress testing & reliability(ASTR), Austin: IEEE, 2005.
- [19] DAS D, AZARIAN M, PECHT M. Failure modes, mechanisms, and effects analysis(FMMEA) for automotive electronics[C]// 11th annual AEC workshop. Indianapolis: [s. n.], 2006.
- [20] LEE W W, NGUYEN L T, SELVADURAY G S. Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale package[J]. Microelectronics Reliability, 2000(40): 231-244.
- [21] JEFFREY H. Revision of MIL-HDBK-217, reliability prediction of electronic equipment[C]// Proceedings of reliability and maintainability symposium. San Jose: IEEE, 2010.