

基于功能仿真的电子产品性能退化分析方法

张辉, 王陶, 李明, 曾晨晖

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: **目的** 研究基于功能仿真对电子产品长期工作过程中性能退化问题进行分析的方法。**方法** 以 DC-DC 电源模块为对象, 一种方式是直接对电源模块进行加速退化试验, 并基于试验数据进行可靠性分析; 另一种方式是对电源模块中性能退化关键元器件进行加速退化试验, 并将试验数据模型注入到电源模块功能仿真模型中, 进行性能退化仿真与可靠性分析, 最终对两种分析结果进行对比, 验证仿真分析技术的有效性。**结果** 对比显示, 加速退化试验分析得到的电源模块平均寿命为 281 560 h, 仿真分析得到的电源模块平均寿命为 357 290 h。**结论** 由于仿真分析方法只考虑了性能退化的关键元器件, 结果偏乐观, 但是偏差在合理的范围内, 证明该方法对于性能退化可靠性分析是有效的, 并且应用该方法更便于进行设计改进和迭代分析。

关键词: 电子产品; 性能退化; 仿真分析; 加速退化试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.05.009

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)05-0043-06

Analysis Method of Performance Degradation of Electronic Product Based on Function Simulation

ZHANG Hui, WANG Tao, LI Ming, ZENG Chen-hui

(China Aero-Polytechnic Establishment, Beijing 100028, China)

ABSTRACT: Objective To study the analysis method of performance degradation during long-term operation based on function simulation. **Methods** Accelerated degradation test was directly carried out on the power supply module, and the test data was used for reliability analysis. At the same time, accelerated degradation test was carried out on the key components of performance degradation in power supply circuit. The test data was injected into the function simulation model of power supply to simulate performance degradation and analyze the reliability. Finally, the results of the two kinds of analyses were compared to demonstrate the effectiveness of the proposed simulation method. **Results** Comparison showed that average life span of power supply was 281 560 hours based on the accelerated degradation test while 357 290 hours based on the degradation simulation analysis. **Conclusion** The result of the simulation method was too optimistic, since it only considered the performance degradation of the key components. But the deviation was within a reasonable range, which proved that the method was effective, and the application of this method could assist design improvement and iterative analysis.

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-07-02

Received: 2014-05-30; Revised: 2014-07-02

作者简介: 张辉(1983—), 男, 陕西人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航空电子产品可靠性分析与设计。

Biography: ZHANG Hui(1983—), Male, from Shaanxi, Ph. D., Senior engineer. Research focus: reliability analysis and design of avionics.

KEY WORDS: electronic product; performance degradation; simulation analysis; accelerated degradation test

导致电子产品失效的故障模式主要有 2 种^[1], 第一种是突发型故障, 如焊点、通孔、元器件引脚、元器件壳体等材料的断裂; 第二种是退化型故障, 如在连接器插针或继电器触点上形成腐蚀薄膜、电介质和电缆护套的脆裂、电子元器件特性随时间的漂移等。

在早期的武器装备中, 电子产品的失效主要是由突发型故障导致的。随着失效分析、设计改进以及评估技术的不断发展, 电子产品的可靠性达到了一个新的水平, 越来越多的电子产品失效是由退化型故障导致的^[2]。现有的可靠性技术对于电子产品性能退化问题尚缺乏有效的分析方法, 从而严重制约了电子产品可靠性的进一步提高。在航空、航天、舰船和导弹等现代武器装备中, 电子产品所占比重逐渐增大, 作用愈加突出, 高可靠性和长寿命设计已成为未来军用电子产品共有的特征和目标。因此研究有效的方法来分析性能退化对电子产品可靠性的影响, 避免或延迟产品出现退化型故障, 对于进一步提高电子产品可靠性水平具有十分重要的意义。

文中提出基于功能仿真手段的电子产品性能退化分析方法, 利用该方法对 DC-DC 电源模块进行了性能退化仿真分析, 与基于加速退化试验的分析方法进行了对比验证, 证明了该方法的有效性。

1 方法流程

基于功能仿真的电子产品性能退化分析流程如图 1 所示, 主要分为 3 步: 确定性能退化关键元器件, 建立关键元器件的性能退化模型, 将元器件性能退化模型注入到产品功能仿真模型中进行产品性能退化仿真分析。

1.1 关键元器件分析

由于电子元器件种类繁多, 而相对应的元器件性能退化数据和模型在厂家和用户都比较匮乏, 该方法主要使用基于木桶原理的转化法, 将电子产品的性能退化问题等效为对容易产生退化并且对产品性能参数敏感的元器件(称为性能退化关键元器件)的性能退化分析问题。因此第一步就是确定所

分析产品中的性能退化关键元器件, 针对易退化和参数灵敏两个关键因素, 主要包含电子元器件可靠性数据分析和电子产品参数灵敏度仿真分析。

1) 电子元器件可靠性数据分析。通过对日常收集和厂家提供的常见军用电子元器件可靠性数据进行汇总分析, 对比该产品中包含的电阻、电容、半导体分立器件、微电路等各种元器件产生退化的时间、退化的速度、寿命的长短, 明确各类电子元器件退化速度和寿命的数量级, 按照器件退化速度和寿命进行排序, 以便于对容易产生退化的元器件进行重点分析。

2) 电子产品参数灵敏度仿真分析。电子产品参数灵敏度仿真分析是建立在电子产品功能仿真模型基础上的, 利用参数灵敏度仿真分析方法, 确定对电子产品性能参数最为敏感的一系列元器件。然后结合可靠性数据分析的结果, 即可以确定所分析产品的性能退化关键元器件。

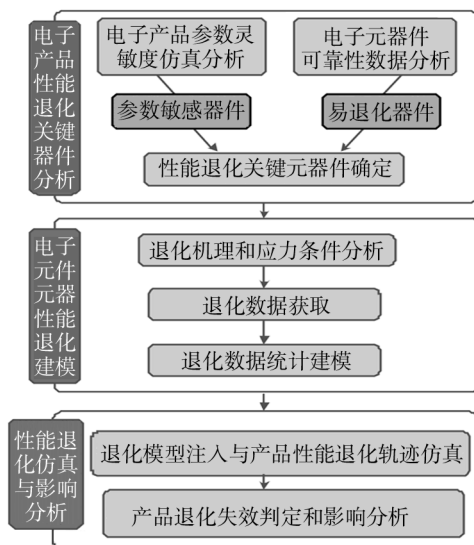


图 1 方法流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed method

1.2 退化建模

第二步是建立所分析产品中性能退化关键元器件的性能退化模型。

1) 关键元器件退化机理和应力条件分析。根据电子产品的环境载荷特点, 分析在各种综合环境

应力条件下的元器件退化机理,明确可能出现性能退化的元器件性能参数,确定元器件性能参数在相应环境应力条件下随时间变化的基本关系。

2) 关键元器件退化数据获取。针对确定的电子产品性能退化关键元器件的关键性能参数,通过外场数据、相似产品数据、文献资料等渠道获取性能退化数据,而鉴于目前可用数据的匮乏,最常用的方式是根据所分析产品的环境载荷谱建立加速退化试验综合环境应力条件,按照环境载荷谱进行加速退化试验,获取元器件性能退化数据。

3) 关键元器件性能退化建模。基于加速退化试验数据建立元器件性能退化模型。性能退化模型主要包括退化量分布模型和退化轨迹模型^[3-5],根据退化量分布模型的常见分布和退化轨迹模型的常见模型,利用基于加速退化试验数据的外推方法和非规则数据的规则化方法,通过统计分析估计模型参数。

1.3 仿真与影响分析

在建立电子产品性能退化关键元器件的性能退化模型后,就可以基于电子产品功能仿真模型进行性能退化模型注入,仿真分析整个电子产品由于长期工作导致的性能退化轨迹。根据电子产品的设计指标确定性能退化失效阈值,获得产品由于性能退化而导致的失效分布^[6-7]。

2 电源模块仿真分析案例

鉴于电源模块的输出为稳定的连续性电压信号,便于测量和试验过程中的实时监测,选取某 DC-DC 电源模块作为案例对象。该电源模块标称输出为 12 V 直流电压,根据产品手册选取±1% 作为寿命阈值。

2.1 电源模块性能退化关键元器件分析

为了确定性能退化关键元器件,首先需要基于功能仿真模型进行参数灵敏度仿真分析。文中基于 Synopsys 公司的 Saber 软件建立电源模块的功能仿真模型,如图 2 所示。该电路的主要功能是在输入为 18~36 V 直流电压的情况下,输出为 12 V 稳定直流电压,所以选定输出电压作为电源模块的主要性能参数。

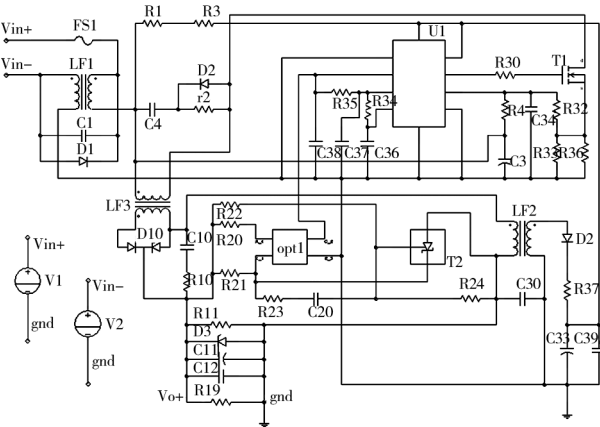


图 2 电源模块功能仿真模型
Fig. 2 Function simulation model of the power supply module

通过参数灵敏度仿真,分析了各个元器件参数分别扰动变化时电源模块输出电压的变化情况,分析结果为输出电压关于元器件参数在标称值处的导数,数值越大表明输出电压对于该元器件参数的变化越敏感,仿真分析得到的灵敏度见表 1 第 2 列。表 1 第 3 列为各个元器件在电源模块寿命时间点的退化比率,它表示了在产品性能退化分析所关注的时间段内元器件的易退化程度。由于相关数据的缺乏,退化比率采用基于历史数据和相似产品数据打分的方式获得,随着数据的逐渐积累,退化比率的衡量将会更加准确。在此基础上,定义性能退化关键度为灵敏度与退化比率的乘积,其含义是在产品到寿时刻由于该元器件参数退化所导致产品性能参数的变化,如表 1 第 4 列所示,通过对比确定电阻 R 22 为电源模块的性能退化关键元器件。

表 1 性能退化关键元器件分析
Table 1 Key components analysis based on performance degradation

	灵敏度	退化比率/%	关键度
电阻 R 22阻值	0.753	0.5	0.3765
光电耦合器 P1 电流传输比	0.0183	2	0.0366
电容 C3 容值	0.0769	0.3	0.0231
二极管 D3 面积	0.0085	0.1	0.0008
...	...	...	...

2.2 关键元器件性能退化建模

电阻 R 22为金属化膜电阻器,其主要的退化机

理包括导电材料的结构变化、气体吸附与解吸以及氧化,影响退化的主要应力因素有温度、湿度、电应力和压力。在实际使用过程温度变化最为剧烈,尤其是在考虑电阻本身发热的情况下,温度对于退化的影响最大,所以一般金属化膜电阻器性能退化模型主要是温度应力下的阻值退化模型^[8]。

通过高温加速退化试验来获取电阻 R22 的性能退化数据^[9-10]。如图 3 所示,试验仪器主要采用高温老化箱,并内置测试系统 BTS-E280,能够自动进行数据采集。由于试验主要是验证仿真分析结果和试验结果的一致性,试验只选择了 1 个温度值进行试验验证。为了保证各加速应力水平下产品的失效机理不变,失效模式不变,同时有一定加速性,需要慎重选择试验环境温度。通过预试验得到试验对象的高温上限约为 120 ℃,保留一定的裕度,确定试验环境温度为 110 ℃。



图 3 加速退化试验装置

Fig. 3 Equipment for accelerated degradation test

加速退化试验共包含 64 个电阻样本,获得的电阻 R22 阻值退化数据如图 4 所示,可以看到电阻器在长期高温使用情况下阻值会缓慢增大,退化现象符合电阻器退化机理分析。常见的退化轨迹模型包括线性模型、指数模型、幂律模型、对数模型、Lloyd-Lipow 模型等^[11-13]。将退化数据利用 Matlab 拟合工具箱拟合退化轨迹模型,并根据拟合优度选择最优模型。最终得到电阻 R22 的退化轨迹模型为:

$$R(t) = a \times t^b \quad (1)$$

其中系数均满足正态分布, $a : N(9.872\ 86, 0.015\ 503\ 1)$, $b : N(0.000\ 796\ 575, 1.146\ 99e-007)$ 。

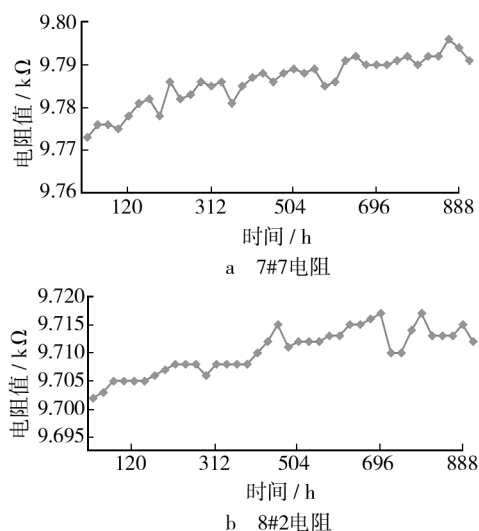


图 4 电阻 R22 退化数据曲线

Fig. 4 Degradation data curve of R22

2.3 电源模块性能退化仿真与影响分析

将电阻 R22 的退化轨迹模型注入到如图 2 所示的电源模块功能仿真模型中,基于 Saber 软件首先对退化轨迹模型系数 a, b 进行蒙特卡洛抽样,再对时间进行参数扫描,获得电源模块的输出电压由于 R22 阻值退化而出现的变化规律,如图 5a 所示。可以看出电源模块在长时间高温使用时输出电压缓慢上升,多

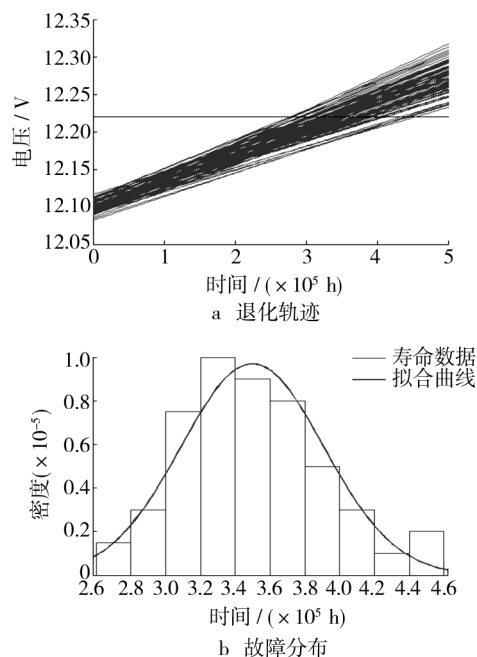


图 5 电源模块性能退化仿真结果

Fig. 5 Simulation results of performance degradation of the power supply module

条退化轨迹表示电源模块不同个体的差异性。

设定电源模块故障判定标准为输出电压变化大于初始值的 1%, 基于此得到电源模块由于性能退化所导致的故障时间分布如图 5b 所示, 计算得到平均寿命为 357 290 h。

仿真分析过程中已经确定导致性能退化的关键元器件为电阻 R22, 所以如果根据仿真结果需要改进设计, 进一步提高电源模块寿命, 则可以提高电阻 R22 的精度, 选用不易于退化的电阻器, 或者基于退化机理分析, 在电阻 R22 附近进行散热优化设计, 降低环境温度, 从而减缓性能退化^[14]。

3 加速退化试验验证

为了验证仿真分析结果的有效性, 文中还对电源模块整体进行了加速退化试验, 直接对试验得到输出电压退化数据进行分析, 获得电源模块的寿命, 与仿真得到电源模块寿命进行对比验证^[15]。为了消除环境因素对验证结果的干扰, 电阻 R 22 和电源模块加速试验在同一温度箱内相同的试验板上进行, 试验板如图 6 所示。试验共有 8 个试验板, 每个试验板上安装 8 个电源模块。

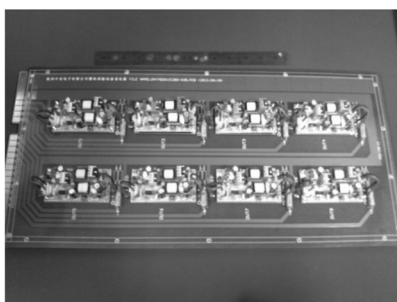


图 6 电源模块试验板照片
Fig. 6 Photo of the test board of power supply

将电源模块退化数据利用 Matlab 拟合工具箱拟合退化轨迹模型, 并根据拟合优度选择最优模型。最终得到电源模块的退化轨迹模型为:

$$V(t)=a\times t^b \tag{2}$$

其中系数均满足正态分布, $a: N(12.198\ 8, 0.011\ 612\ 5)$, $b: N(0.000\ 862\ 837, 0.000\ 318\ 846)$ 。

拟合得到退化轨迹如图 7a 所示, 同样设定电源模块故障判定标准为输出电压变化大于初始值的 1%, 基于此得到电源模块由性能退化所致的故障时

间分布如图 7b 所示, 计算得到平均寿命为 281 560 h。

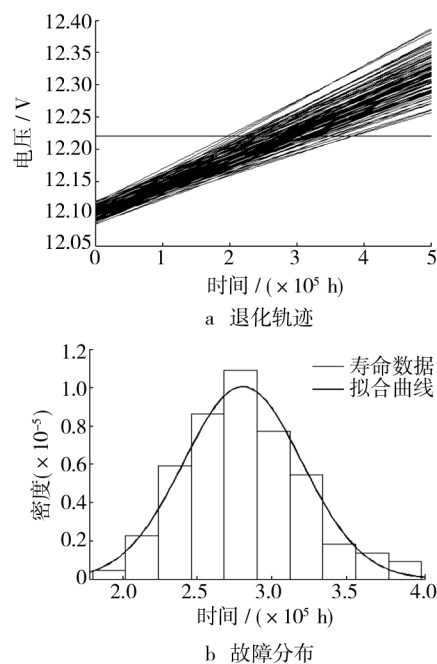


图 7 电源模块加速退化试验结果
Fig. 7 Results of accelerated degradation test of the power supply module

对比仿真分析结果和试验分析结果可以看出, 仿真分析方法给出的寿命时间偏差约为 26%, 是一种可接受的便捷有效的性能退化分析方法。仿真分析结果相比试验结果较为乐观, 并且故障时间分布较为集中, 这是因为仿真只考虑了对性能退化影响最大的 1 个或几个关键元器件, 忽略了其他次要影响的元器件。另外由于电源模块是一种广泛应用于各种电子产品中的成熟功能电路, 对输出电压稳定性有着很高的要求, 电路设计考虑了各种元器件参数波动对输出电压的影响, 如该试验中所用到的电源模块使用负反馈方法来减小局部参数波动的影响, 所以最终分析得到的电源模块寿命时间均比较长。

4 结语

文中提出了在定位性能退化关键元器件的基础上, 通过功能仿真手段对电子产品性能退化进行分析的方法, 并以 DC-DC 电源模块为对象, 分别进行了性能退化仿真分析和加速退化试验分析。分析结果表明仿真分析方法便捷有效, 结果合理可信, 并且能够快速给出设计改进建议, 与加速退化试验相比

更加节省成本,更加便于进行设计改进。文中性能退化关键元器件的退化数据虽然也是通过加速退化试验获得,但数据可复用,随着方法的进一步应用和数据的进一步积累,可使的仿真分析方法使用更加方便,结果更加精确,为高可靠、长寿命的电子产品可靠性分析评估和设计优化提供了新途径。

参考文献:

- [1] DASGUPTA A, PECHT M. Material Failure Mechanism sand Damage Models[J]. IEEE Trans On Rel, 1991, 40(5): 531—536.
- [2] 杨少华, 李坤兰. 光电耦合器的长期贮存退化特性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(1): 27—30.
YANG Shao-hua, LI Kun-lan. The Long-term Storage Degradation Characteristics of Opto-coupler [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2013, 31(1): 27—30.
- [3] 范志锋, 齐杏林, 崔平. 基于累积退化量的电子部件 SSADT 可靠性评估[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 130—133.
FAN Zhi-feng, QI Xing-lin, CUI Ping. Reliability Assessment of Electronic Parts Based on Cumulative Degradation by SSADT [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 130—133.
- [4] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 546—552.
DENG Ai-min, CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, et al. Reliability Assessment Based on Performance Degradation Data [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 546—552.
- [5] MA Ji-ming, ZHAN Xiao-yan, ZENG Sheng-kui. Real Time Reliability Analysis Based on the Performance Degradation Data and Bayesian Method [C]//9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). 2011: 90—94. (余不详)
- [6] SU Chun, JIANG You-hai. Evaluation Model for Products' Expected Life Based on Performance Degradation Amplitude Analysis [C]//8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). 2009: 425—428. (余不详)
- [7] KE W, REN C, JIN K, et al. System Performance, Degradation, and Reliability Assessment [C]//IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2007: 1216—1220. (余不详)
- [8] 李仁山. 热循环条件下金属膜电阻器的性能退化表征 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LI Ren-shan. Characterization of Property Degradation of the Metallic Film Resistors under Thermal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [9] 马甜, 李传日, 程祺, 等. 基于失效物理的微波组件贮存寿命加速试验及预测 [J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 30—33.
MA Tian, LI Chuan-ri, CHENG Qi, et al. Microwave Components Accelerated Life Test and Prediction Based on the Failure Physics [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 30—33.
- [10] 张国龙, 蔡金燕, 梁玉英, 等. 电子装备多应力加速退化试验技术及可靠性评估方法研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(12): 2815—2822.
ZHANG Guo-long, CAI Jin-yan, LIANG Yu-ying, et al. Research on Reliability Assessment Method of Electronic Equipment Based on Multi-stress ADT [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(12): 2815—2822.
- [11] 赵健印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
ZHAO Jian-yin. Study on Reliability Modeling and Applications Based on Performance Degradation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [12] TANG Yan-zhen, SUN Quan, FENG Jing. Research on Reliability Assessment of Metalized Film Capacitors Based on Performance Degradation Test [C]//9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). 2011: 18—22. (余不详)
- [13] 李享, 李岱霖, 叶雪荣, 等. LED 开关电源中铝电解电容性能退化模型的研究 [J]. 电源学报, 2012(6): 51—54.
LI Xiang, LI Dai-lin, YE Xue-rong, et al. Research on the Degradation Model of Aluminum Electrolytic Capacitors in LED SMPS [J]. Journal of Power Supply, 2012(6): 51—54.
- [14] ZHOU Yue-ge, YE Xue-rong, ZHAI Guo-fu. A Robust Design Method to Improve Performance Reliability Based on Degradation Characteristic [C]//Proc. Annual Reliability & Maintainability Symposium, 2013. (余不详)
- [15] 王玉明, 蔡金燕. 基于电子产品板级加速退化数据的可靠性分析 [J]. 测试技术学报, 2008, 22(4): 364—367.
WANG Yu-ming, CAI Jin-Yan. Reliability Analysis of Circuit Boards Based on Accelerated Degradation Test Data [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(4): 364—367.