

可靠性工程中自然环境条件量化分析数据库构想

胡冬, 吕卫民, 谢劲松

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要:在可靠性工程应用中,基于失效物理的分析过程需要引入自然环境数据进行仿真计算。首先对比分析了现有自然环境数据库,明确了新开发的数据库的需求与特点;然后提出了在自然环境条件量化分析数据库研发过程中的关键技术;最后,通过一个应用算例演示数据库的运行过程。该数据库目前已具备一定的通用分析能力和工程应用价值。

关键词:自然环境条件;量化分析;失效物理;软件平台

中图分类号: TP311.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)03-0076-06

Thought on Database for Quantitative Analysis of Natural Environmental Conditions in Reliability Engineering

HU Dong, LV Wei-min, XIE Jin-song

(Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In engineering applications, it is necessary for reliability analysis based on physics-of-failure to introduce natural environmental data into simulated calculation. The existing databases of natural environment were compared, and the needs and characteristics of new database were determined. The key techniques in the research and development process were proposed. The database operation was demonstrated by an example. The new database was provided with general analytic functions and engineering application value.

Key words: natural environmental conditions; quantitative analysis; physics-of-failure; software platform

基于失效物理的可靠性分析,要求在给定的工作负载与工作环境下对产品进行建模仿真,从而进行寿命评价,这就需要引入产品实际所经受的自然环境条件。由于产品所经历的环境应力描

述形式、所受载荷的计算方法以及要求的载荷输出形式往往各具特点^[1-2],使得原来针对不同的研究对象都需要一套在可靠性工程应用中的环境特征量数据分析工具。此外,在项目研发过程中由

收稿日期: 2010-10-10

基金项目: 总装预研基金(9140A27020210JB1404)

作者简介: 胡冬(1981—),男,四川都江堰人,硕士研究生,助理工程师,研究方向为电子产品可靠性、失效物理、PHM等。

于部分产品设计方与使用方没有原始自然环境数据的积累,或者设计方无法保证此数据的科学性,或者出于其他涉密限制造成无法得到设计方的原始数据,因此给可靠性工程师在开展工程实践时带来了诸多不便。基于上述实际应用需求,笔者在自行研制的 RelSIMTM 仿真软件平台上逐步开发可用于自然环境条件量化分析的自然环境数据库模块。该数据库目前已具备一定的通用分析能力和工程应用价值。

1 应用需求与特点

典型的可靠性工程主要包括可靠性设计(Design for Reliability, DfR)、故障预测和健康监控系统(Prognostics and Health Management, PHM)以及装备延寿。在这些工程应用中,自然环境数据库的应用需求如下。

1) DfR。在产品需求分析时,需提供所受环境应力的量化描述,有时还需给予用户已有的环境数

据支持,以得出产品未来可能的使用环境。同时,在进行可靠性试验或环境试验之前,要综合产品未来可能经受的实际环境应力进行仿真分析和试验设计,以便找出薄弱环节以及相应的敏感应力^[3]。

2) PHM。在基于失效物理的PHM系统中,设计传感器硬件系统需要结合产品失效机理,定位监测部位,具体提出传感器的相应技术指标,如温度测试范围、振动测试频率等^[4]。

3) 装备延寿。在装备延寿能力评估中,需要通过逆向工程推导出迄今为止产品实际服役的环境描述,如温度剖面、功率载荷谱、冲击响应谱等,以得出待考察的不利差量^[5]。

目前,现有的自然环境类型数据库主要有3类,包括各类气象组织发布的数据集、基于综合环境数据表示与交换规范(Synthetic Environment Data Representation and Interchange Specification, SEDRIS)的综合自然环境(Synthetic Natural Environment, SNE)、国外环境试验三大标准所对应气候数据值。在此将这3类作比较(见表1)。

表1 现有自然环境数据库

Table 1 The existing databases of natural environment

项目	类 别		
	气象数据集 ^[6-8]	SNE ^[9-12]	三大标准 ^[13-15]
目的	用于气候的预报、监测与研究	用于作战模拟与装备采办	用于环境适应性试验
对象	社会生活	军事作战/军用装备	军用装备/民用产品
分辨率	中	高	低
数据量	很大	较大	小
动态特性	长期连续性显著	短期连续性显著	长期离散性显著
运算速度	较快	很快	N/A(主要为人工查阅)
通用程度	通用	通用	专用

由表1可知,定位用于可靠性典型工程应用的自然环境数据库应该具备如下特点:

1) 覆盖典型工程应用的环境数据或参考标准,如有关大气温度、大气相对湿度、大气硫化物、路面谱、海浪谱等;

2) 引进权威且共享的数据源,并可对其进行标准化数据导入、保存、修改、计算、传输等处理;

3) 需要不同的数据计算模型(包括物理计算、统计计算)来进一步计算时,可重复编写程序模块,同时达到算法可优化、可拓展;

4) 在整个软件平台中,与可靠性仿真评价(如寿命评价和预测)相配套,实现数据自动调用计算。

2 数据库关键技术

在进行自然环境量化分析以及数据库的开发中发现,由于其开发过程存在多学科交叉,且失效物理学科本身处于不断丰富发展的过程,因而研发所面临的技术问题不仅仅在于软件技术层面,还在于软件的开发管理层面,后者在某种意义上说难度比前

者更甚。以下着重总结这2个层面的问题。

2.1 数据库系统构成

自然环境数据库是一个工作在 RelSIM™ 软件平台之上的环境条件量化分析计算的功能模块^[14-15], 即包括图1中系统管理和用户操作两部分, 其主要功能包括:

1) 从数据库中获取由数据源导入的原始自然环境数据, 且可对其进行有效筛查、标准化批量处理;

2) 可调用、管理模型库中的自然物理常数、物理模型与统计模型以及相应的计算内核;

3) 将模型计算内核的输出结果在不同的模型间共享, 且可传递到 pofAN™, pofPWA™ 的失效物理模型中进行可靠性分析;

4) 整个自然环境数据计算过程中, 管理输入输出结果的处理和图形显示, 且可以提供下载;

5) 为用户提供后台在线服务, 系统数据管理与用户操作使用分隔开, 同时对用户设定不同的使用权限。

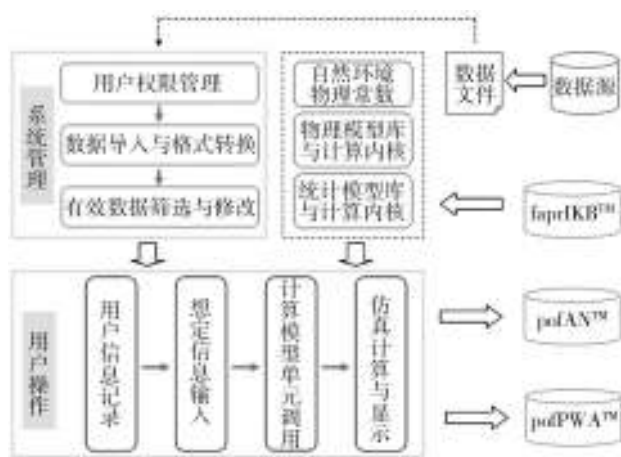


图1 系统构成

Fig. 1 System architecture

2.2 数据源的获取与筛选

为保证在进行失效物理模型计算前加载实际的自然环境应力, 原始自然环境数据往往来源于各类气象组织发布的数据集, 比如国家气象信息中心、国家海洋信息中心、英国 Hadley 中心以及世界气象组织, 而国外环境试验三大标准所对应气候数据值仅

供诸如温度极值等部分环境数据参考时使用。其中, 不同的数据集规定各自的使用权限或付费标准, 给项目研究带来了一定的成本要求。此外, 自然气候数据一般存在海陆区分, 这在研究产品可靠性时能较好地统一起来。按照生成的时间顺序来划分, 数据可分为历史数据、现时数据、预报数据和标准数据, 通过不同的数据需求论证, 可采纳不同种类数据。由于原始数据的采集能力限制等原因, 数据集中可能包含缺省项或无效项, 对此就需对数据进行有效筛选。筛选的过程可以选择在平台外或平台内进行, 这需要针对具体的数据集而定。

2.3 数据处理

在数据处理方面, 主要需要考虑以下4个技术关键点。

1) 自然环境数据在时间与空间上存在分辨率技术指标要求。分辨率提高, 则数据量会成倍增长。由于数据库需要提供在线服务, 因此可能需要考虑数据库的硬件配置。分辨率指标决定于待考察产品的贮存和使用基本状况。例如, 在长期贮存过程中, 不需要在时间与空间上有较大的分辨率, 环境数据主要以载荷谱的形式描述即可; 但是对于短时间飞行的产品, 由于使用时间较短, 可能会考虑在空间上应力随时间的持续变化。

2) 与失效物理模型所需的应力相对应, 自然环境数据的计算包括物理模型数据与统计模型数据。统一于整个软件平台的技术构架, 上述两类模型分别归于标准化的数据计算模块以备调用。

3) 受原始数据源所限, 往往需要对其来源数据进行插值计算, 其容差范围需要与用户协商, 同时与实际的应用环境相比对, 以验证插值算法计算结果的合理性与精确性。

4) 一般而言, 数据源已设定为普遍通用的数据格式输出, 如.txt, .xls 格式等, 则数据的导入能够以此进行自动链接。数据的保存与传递统一于整个软件平台的技术构架, 同样采取模块化管理。计算结果的显示、输出以普遍通用的数据格式输出, 以便用户导出后进行查阅、验证。

2.4 数据库与平台兼容

该数据库作为软件平台的一个计算模块, 其操

作与其他计算模块具有统一性,在此对该软件平台的使用不作赘述。总的来说,数据库与平台应达到以下兼容性:

- 1) 数据库后台人员可实时维护与拓展系统原始自然环境数据、自然物理常数、模型库;
- 2) 将不同环境因素的量化要求划分出若干计算模块,再灵活组合模块;
- 3) 用户按照数据需求进行人机交互,如可加载自然环境想定信息、输入输出所需要的数据格式;
- 4) 与整个软件平台的操作使用一样,实现用户权限管理与在线升级。

2.5 数据库开发团队运行

整个自然环境数据开发的过程是在一个学科交叉运用的完全工程环境中进行的,因此高效的团队合作成为必要保证,其运行模式如图2所示。

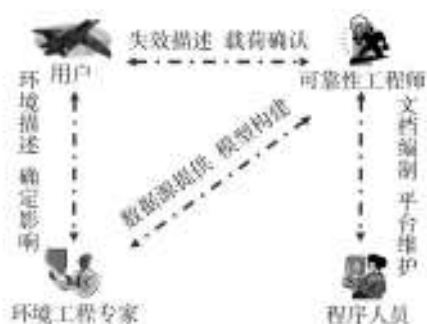


图2 团队运行模式

Fig. 2 Mode of team work

尤其要强调的是需要有一个在环境工程专业方面能够满足用户了解自然环境科学知识及其背景的系统,为用户提供有关使用和构建所需要物理模型的科学文献和依据,这就需要软件平台有相应的专家知识库 faprlKB™ 作为技术支撑。

3 数据库应用算例

笔者在此仅给出前期开发的一个实际算例,大致演示 RelSIM™ 仿真软件平台中自然环境数据库的应用情况。同时,结合数据库的实际需求,简要剖析研发过程中的关键技术。

温度对电子产品可靠性的影响主要有稳态温度、温度循环、温度梯度、温度随时间变化率^[9]。例

如,Arrhenius 模型中,需要输入工作温度 t 来计算器件的寿命^[19]; Engelmaier-Wild 模型中,需要输入器件与基板的温度循环 $\Delta \theta_c, \Delta \theta_s$ 来计算焊点疲劳寿命^[20]。那么,某个时间段内的工作温度与温度循环对应实际情况可认为,其环境特征量是该时间段内产品每天所历经的平均气温与温差,将其代入相应的失效物理模型,且运用 Miner 法则把每天的累积损伤进行线性累加^[9],即可算出产品的实际耗损寿命。以计算 1998 年 5 月 4 日海南省三亚鹿回头地点的日平均气温与气温日较差为例,计算过程依照如下顺序进行:

- 1) 输入想定点信息;
- 2) 人工寻找想定点所处温度类型,确认在经度上符合无差别要求的备选台站,即与想定点处于相邻的同种温度类型;
- 3) 备选台站在空间与时间维度上与想定点进行比对,明确是否有现成数据,若有,则直接输出,若没有,需继续补充计算;
- 4) 在空间维度上,首先对备选台站的气温数据进行海拔高度同一化处理,再在纬度上按照气温变化规律进行模型计算或依据关联数据进行回归分析;
- 5) 输出计算结果。

计算过程中的具体操作如下。

1) 数据源选用与导入。根据该算例自然环境的数据要求,选用中国气象科学数据共享服务网提供的《中国地面国际交换站气候资料日值数据集》。数据集为中国 194 个国际交换站 1951 年以来地面日值数据集,包括每天的平均气压、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、最大风速及风向、日照时数、降水量等。按照原始数据的导入方式,添加 1991 年—1998 年 5 月 4 日海南省海口、东方、琼海 3 个台站的日平均气温、日最高气温、日最低气温数据至数据库中,如图 3 所示。这里需要强调以下 3 点。

(1) 由于数据库使用权所限以及算例中的特征数据需求,最佳方案是从中国气象科学数据共享服务网选取《中国地面国际交换站气候资料日值数据集》。

(2) 空间维度处理。该数据集没有三亚台站的原始数据,因此需要人工处理:设定对于气温而言,已知海南岛的海口、东方、琼海台站与三亚处于同种



图3 原始数据加载

Fig. 3 Loading the raw data

温度类型B2^[14]。依据文献[21—22]可知,具有同种温度类型的相邻区域,其温度在经度上无太大差异,在海拔高度上按照每上升100 m气温下降0.65℃,在纬度上具有从北到南气温升高的规律。这里,笔者对气温在纬度上作一元线性回归处理。当然,如此处理后的气温数据的准确度需要与用户或环境工程专家确认其可否接受。

(3)时间维度处理。输入1991年—1998年5月4日海南省海口、东方、琼海3个台站的日平均气温、日最高气温、日最低气温数据。基于数据的标准化计算要求,倘若没有某年某月某日当天的数据(这与原始数据源有关),需要根据以往数据进行一元线性回归处理。本算例不需要该时间维度处理。

2) 用户想定信息输入。将以下想定信息输入,如图4所示。想定点名称:三亚鹿回头;时间:1998年5月4日;地点:北纬18.23°,东经109.50°,海拔



图4 想定点信息输入

Fig. 4 Inputting the specific information

高度275.1 m。

3) 结果计算。按照算例中的自然环境数据计算流程(如图5所示),结合数据源所提供的原始数据进行计算,结果得到日平均气温为26.75℃,气温日较差为6.32℃,如图6所示。

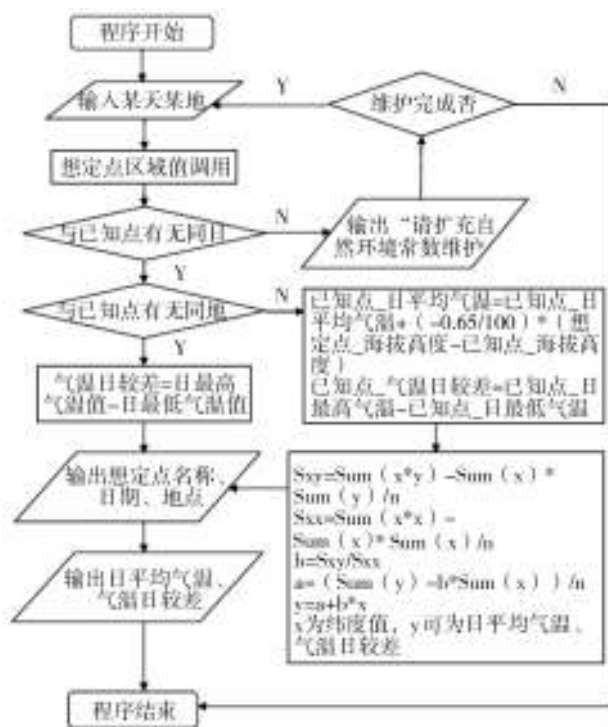


图5 计算流程

Fig. 5 Flow diagram of calculation



图6 计算结果

Fig. 6 Calculation result

如此得出具体的某日日平均气温与气温日较差,那么自然环境数据库模块可照此对其若干天的数据进行批处理,这样就获得了某一时间段内产品每天所经历的平均气温与温差,同时也具备了进入失效物理模型计算的基本数据形式。此外,从上述整个计算过程可以注意到,具体操作层面上所获取的原始数据源形式及其后续计算方法较大地影响了后续计算结果的认同度。

4 结语

前期的工作仅提供了一定的自然环境数据计算能力,目前尚未覆盖所有环境特征量的计算和达到整个RelSIM™仿真软件平台通用化、模块化、开放性的应用研发要求。下一步工作主要在以下4个方面开展:

1) 针对具体项目,进一步定义计算模块、优化算法,尤其是根据环境特征量拓展统计计算模块,同时改善人机交互界面;

2) 根据后续数据源需求,遵照共享数据源使用规定,履行后续使用协议,以便可持续扩充原始数据;

3) 自然环境数据计算输出结果即环境特征量,需要广泛满足失效物理模型的输入且力求标准化计算,这样自然环境数据才能与可靠性评价完全链接,同时减少针对不同的环境特征量重复开发计算程序的工作量;

4) 制订并固化自然环境数据库拓展与使用流程,形成典型可靠性工程应用中自然环境数据需求的解决方案。

参考文献:

- [1] 施建荣,王晓侠,党弦. 装备全寿命环境剖面与任务剖面[J]. 装备环境工程,2010,7(2):18—21, 28.
- [2] 傅耘,祝耀昌,陈丹明. 装备环境要求及其确定方法[J]. 装备环境工程,2008,5(6):46—51.
- [3] CROWE Dana, FEINBERG Alec. Design for Reliability[M].

Boca Raton: CRC Press, 2001: 8—19.

- [4] PECHT M G. Prognostics and Health Management of Electronics[M]. Hoboken: Wiley, 2008: 25—45.
- [5] STANAG 4370 AECTP-600, The Ten Step Method for Evaluating the Ability of Materiel to Meet Extended Life Requirements and Role and Deployment Changes[S].
- [6] 中国气象科学数据共享服务网, 中国地面气候数据集[EB/OL]. <http://cdc.cma.gov.cn>, 2005-07-26.
- [7] 海洋科学数据共享中心, 海面气象数据集[EB/OL]. <http://mds.coi.gov.cn>, 2006-06-30.
- [8] 英国 Hadley 中心, Global Average Temperature Series[EB/OL]. <http://hadobs.metoffice.com>, 2003-07-17.
- [9] 郭刚. 综合自然环境建模与仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004: 27—39.
- [10] 刘卫华, 王行仁, 李宁. 综合自然环境(SNE)建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2631—2635.
- [11] 孙丽卿, 王行仁. 综合自然环境数据库开发的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3688—3692.
- [12] ISO/IEC 18023, SEDRIS Standard[S].
- [13] MIL-HDBK-310, Global Climatic Data for Developing Military Products[S].
- [14] DEF STAN 00-35 Part 4, Environmental Handbook for Defence Materiel_Natural Environments[S].
- [15] STANAG 4370 AECTP-200, Allied Environmental Conditions Testing Publication_Environmental Conditions[S].
- [16] 谢劲松, 王冬梅, 胡冬. 构建一个基于失效物理的产品可靠性数值分析与仿真平台[C]// 航空行业质量与可靠性工程技术研讨会论文集. 北京: 中国航空工业集团公司质量工程技术和管理中心, 2009.
- [17] XIE Jing-song, WANG Zi-Li, ZHANG Jun-Ke, et al. Developing a Model-Based Software System for Prognostics of Electronic Products and Assemblies[C]// Proceedings of Prognostics & System Health Management Conference. Macau: IEEE Reliability Society, 2010.
- [18] LALL Pradeep, PECHT Michael G, HAKIM Edward B. Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997: 243—256.
- [19] 姚立真. 可靠性物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 150—155.
- [20] IPC-D-279, Design Guidelines for Reliable Surface Mount Technology Printed Board Assemblies[S].
- [21] 周淑贞, 张如一, 张超. 气象学与气候学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 50—58.
- [22] 陈登俊. 航海气象学与海洋学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 9—19.