

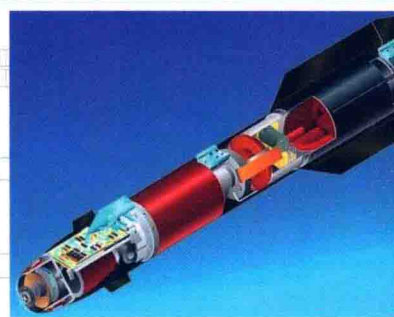


通用弹药导弹保障技术重点实验室 2015学术会议

The Conference on Ammunition & Missile Sustainment Technology Laboratory' 2015

弹药导弹保障理论与技术

2015论文集



国防工业出版社

National Defense Industry Press



通用弹药导弹保障技术重点实验室 2015

The Conference on Ammunition & Missile Sustainment Technology Laboratory 2015

弹药导弹保障理论与技术 2015 论文集

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

弹药导弹保障理论与技术 2015 论文集/军械工程技术研究所编. —北京: 国防工业出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-118-11089-0

I. ①弹… II. ①军… III. ①弹药 - 导弹 - 学术会议 - 文集 IV. ①TJ76-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 296044 号

※

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 889 × 1194 1/16 印张 35½ 字数 1109 千字

2016 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—900 册 定价 298.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

目 录

一、弹药导弹储存可靠性与寿命评估

1.1 弹药导弹性能检测技术	(3)
基于可靠度分析的导弹控制系统故障预测	黄考利, 刘晓芹 (3)
针刺火帽发火感度测量技术研究	邢立平, 张人何, 何小斌 (9)
S 波段无线电引信电性能半实物仿真检测系统	郑晨皓, 崔鹏飞, 石彩玲, 陈晶晶 (13)
基于 VXI 总线的某型导弹测试系统研制与开发	何 鑫, 史连艳, 罗 锦, 周海俊 (18)
基于 ARM9 的弹药导弹电性能通用检测平台设计	张 兵, 王恒新, 王玉刚, 赵兴堂 (21)
一种基于双环境力模拟下的弹载热电池测试方法研究	柳维旗, 肖志刚, 郑 波, 林 华等 (25)
某型热电池动态参数存贮测量系统	马力生, 段桂茹 (30)
关于某常规弹药长贮性能试验的研究	陈 岩, 于 衡, 卢凤生 (33)
某型导弹飞行数据记录装置改进设计	马力生, 张建虎 (36)
某型反坦克导弹飞行数据记录系统设计与实现	刘欣添, 李 辉, 车宝明, 马亚林 (39)
某型反坦克导弹控制线路故障分析与维修	文 军 (43)
无线电引信连续波辐照效应及能量耦合通道研究	简 勋, 张希军, 熊久良, 杨 洁 (46)
地空光电干扰火箭弹电子时间引信电性能综合测试系统设计	王晓方, 李治源, 杨 光, 石志彬 (50)
基于涡轮发电机频率测量的迫弹弹道辨识技术	张烜工, 陈建华, 赵晓东 (57)
齐射榴弹引信电磁互扰效应试验装置设计	孙永卫, 熊久良, 杨 洁, 武占成 (60)
1.2 弹药导弹储存寿命试验方法与技术	(66)
某型反坦克导弹半实物仿真与性能评估研究	杨锁昌, 张 凯, 张宽桥 (66)
基于随机过程的弹药储存寿命评估方法	郑 波, 柳维旗, 刘冬青 (71)
弹药机电类部组件加速储存退化预试验方法研究	葛 强, 牛跃听, 郑 波 (74)
通用导弹失效模式与质量监控任务分析	王振生, 李万领 (77)
全寿命周期复杂环境应力下航天机电产品加速储存试验方法	李 星 (80)
某型火箭弹控制舱加速度计加速寿命试验优化设计	牛跃听, 穆希辉, 王永南 (84)
制导弹药储存失效影响因素分析	张有峰, 李 超, 崔云航 (89)
弹药失效分析信息化系统研究	郝永平, 郭胜精 (93)
某型导弹初始可靠性统计分析	李 宁, 宋祥君, 李万领, 刘宏涛 (97)
某型导弹储存失效因素及储存可靠性研究	李 岩, 李 柯, 郑思龙 (100)
一种新型烟火剂的可靠性试验研究	张启功, 安振涛, 李金明 (104)
弹药导弹电子元器件储存可靠性研究	季向东, 王文周, 朱 珠 (107)
武器弹药延寿工程中的元器件储存可靠性技术	杨少华, 恩云飞 (110)
橡胶材料寿命预测方法进展及案例分析	尹文华, 刘晓丹, 谢宇芳 (114)
某型枪榴弹质量问题原因分析与思考	王卫民, 张 勇 (120)
某型单兵火箭发动机破膜压力对后抛物抛射距离的影响研究	吴正东, 蒋 黎, 李丽丽 (124)

1.3 弹药导弹储存可靠性分析与评估方法	(127)
弹药导弹试验评定技术及其在批抽检中的应用	唐雪梅, 徐文旭 (127)
弹药储存寿命评估方法研究	赵晓利, 成云 (131)
火工品储存可靠性试验样本容量的确定	郑波, 柳维旗, 刘冬青 (134)
基于继承因子的高价值火工系统贝叶斯可靠性评估	梁启海, 董海平, 伊泉剑, 秦斌 (136)
固体火箭发动机储存可靠性及寿命评估	贾春宁, 胡景胜, 张峪, 周雯 (140)
基于正态-二项叠合模型的波动型参数退化建模与可靠性评估	冯静, 孙权, 潘正强 (144)
基于继承因子的弹载装置相似信息融合研究	王永南, 周云川, 牛跃听, 杜峰坡等 (148)
导弹装备储存寿命预估方法研究	史连艳, 邢娅浪, 王成 (152)
某型导弹批抽检飞行试验抽样方案分析	宋佳祺, 张松, 荀爽 (156)
通用弹药储存寿命与基础数据处理的相关性	苏振中, 罗锦, 汪海军, 王彬 (159)
信息化弹药寿命评估研究概述	罗赓, 穆希辉, 赵晓东, 孙也尊 (162)

二、弹药导弹安全性监测与评价

2.1 检测技术	(169)
NEPE 推进剂中硝酸酯的迁移规律研究	潘清, 胡建建, 王明, 贾林, 史爱娟 (169)
湿热环境下 A-IX-II 炸药装药的变化模式	贾林, 张林军, 张冬梅, 王克勇, 李晓宇等 (173)
基于微观结构分析的 HTPB 推进剂老化行为研究	魏小琴, 符朝旭, 文静, 罗天元 (177)
丁羟推进剂老化的动态力学特征	刘晋湘, 杜建锋, 张维海, 王宇, 杨雅, 张军 (180)
温度对某型改性双基推进剂比热容影响规律研究	江劲勇, 胡哲, 路桂娥, 贾昊楠等 (184)
高能高固螺压改性双基推进剂使用安全性能研究	王庆华 (187)
基于内嵌式传感器的固体发动机界面监测系统设计与试验	董可海, 张春龙, 陈国峰, 张波 (192)
长储条件下包覆层与推进剂的相容性研究	路桂娥, 江劲勇, 葛强, 王韶光等 (198)
两种固体推进剂的热安定性能研究	陈明华, 陈永康, 葛强, 王韶光, 王恒闯 (204)
某型双基推进剂的热安定性研究	陈明华, 王恒闯, 陈永康, 王韶光 (207)
温度对某型发射药热导率影响规律研究	胡哲, 江劲勇, 路桂娥, 葛强, 王韶光, 贾昊楠 (210)
单基药温-湿度老化性能试验研究	梁忆, 丁黎, 郑朝民, 徐露萍, 安静等 (213)
固体火箭发动机脱粘检测方法研究进展	李晨, 路桂娥, 江劲勇, 葛强, 王韶光, 王彬 (215)
2.2 安全性评价方法	(219)
高温老化对某含铝压装炸药装药发射安全性的影响研究	张林军, 贾林, 张冬梅, 常海等 (219)
舰艇携行弹药安全评估模型研究	严平, 任俊鹏 (223)
底排弹火焰烤燃特性的数值模拟	李文凤, 余永刚, 叶锐, 杨后文 (228)
某型地空导弹发动机药柱裂纹扩展方向分析	霍连利, 蒙上阳 (233)
GHT-1A 推进剂热自燃数值模拟研究	王彬, 路桂娥, 江劲勇, 贾昊楠, 胡哲, 李晨 (237)
某型战斗部装药 B 炸药储存寿命研究	马文国, 周雷, 翟树峰, 赵海, 郭广文 (241)
2.3 其他	(245)
固体推进剂储存寿命试验理论与方法概述	李泽华, 黄文明, 赵方超, 魏小琴 (245)
偏二甲肼与材料的相容性探讨	杨蓉, 侯立平, 周伟勇 (248)

三、弹药导弹延寿与非军事化

3.1 弹药导弹维修决策	(253)
基于状态的火箭发动机维修模式探讨	侯立平, 杨蓉, 冯翔 (253)
关于通用导弹质量监控与延寿的分析与思考	谷宏强, 刘彦宏, 姜会霞 (258)

以可靠性为中心的炮射导弹维修策略研究	郭 亮, 王 军 (261)
俄罗斯某型防空导弹延寿工作的启示	刘彦宏, 李万领 (265)
通用弹药维修计划决策问题及对策研究	吕晓明, 穆希辉, 王 琦, 姜志保 (267)
3.2 弹药导弹维修、延寿技术	(271)
机载制导弹药延寿方法综述	李敬玉, 赵 海, 翟树峰, 石 爽, 郭广文, 胡 鹰 (271)
基于检测修理一体化的新型弹药技术保障建设	李良春, 宋桂飞, 吕晓明, 牛正一, 姜志保 (275)
引进导弹装备维修备件仿制质量管理与控制	赵 昉, 刘焕照 (278)
通用导弹延寿整修质量检测信息采集研究	邓大权, 韩 磊 (282)
某产品延寿试验方案的确定与总结	徐向东 (285)
美军装备维修转型对信息化弹药维修的启示	王 琦, 穆希辉, 吕晓明, 罗 磊 (288)
3.3 弹药导弹非军事化技术	(292)
关于深化报废弹药材料回收利用的思考	宋桂飞, 姜志保, 夏福君, 路桂娥, 陈明华, 柳维旗 (292)
报废发射药绿色销毁及再利用技术研究	刘鹏安, 金昌根, 曹宏安, 罗亚田 (296)
国外报废弹药处理技术综述	李宇明 (299)
梯黑铝炸药水力空化倒药机理研究	满海涛, 丁玉奎, 闫青春 (302)
用含硝化棉的废旧火药制备固体醇燃料	曹宏安, 张怀智, 黄鹏波, 谢俊磊 (307)
多重氧化法处理 TNT 废水试验研究	姚安东, 张人何, 龚华雄 (310)
关于子母弹破甲子弹销毁方法的试验研究	梁全义, 吕 游, 任亮亮 (313)
退役导弹改制靶弹技术现状与发展	宋祥君, 王振生, 邓大权, 邓福平 (316)
电磁感应加热技术用于小口径弹药底火击发可行性研究	闫青春, 杨 超 (320)
废旧发射药绿色无害化处理发展趋势及方法	李宾频, 张翔宇, 张 涛 (325)
报废弹药绿色销毁技术发展思路探讨	何正文, 沈 龙, 张明兵, 赵 龙 (327)
小口径定装弹自动分解系统	杨润泽, 张 治, 尹晓春, 唐香琚, 韩 凯 (330)
连续式超临界水氧化炸药废水处理实验系统的建立	夏福君, 宋桂飞, 吕晓明, 牛正一 (334)
废药回收的黑索今纳米化研究	姬文苏, 李 超 (337)
弹药技术保障“五定五限”安全准则及其实践	宋桂飞, 李良春, 夏福君 (340)
一种火箭弹电点火具击发装置	蒋勇壮, 任青君, 陈前进 (343)
小口径枪弹的大批量销毁实践	周玉兵, 赵 武, 郭飞翔, 单聪明 (346)

四、弹药导弹储存与供应

4.1 弹药导弹供应保障理论与技术	(351)
通用弹药保障信息化建设的思考	姜志保, 高 飞 (351)
战时弹药储供保障面临的问题及对策	陈智勇, 马伟标, 董 雷 (355)
舰载机弹药保障存在问题及对策探讨	侯 明, 张连生, 戴学谦, 宋妙恬 (359)
对军地一体化弹药保障的思考	刘振宇, 张宝华, 严凤斌 (362)
对通用弹药物流技术体系建设的几点思考	高 飞, 姜志保, 张文亮 (364)
信息化条件下弹药物流构建研究	权 伟, 连晋峰, 许海斌 (369)
我军弹药保障面临的问题及对策	姜玉璞, 李 靓, 秦旭全 (372)
弹药储存管理的重点与难点	连晋峰, 权 伟, 孙国辉 (375)
搬运型下肢外骨骼机器人研究	杜峰坡, 罗 磊, 陈建华, 韩 涛, 刘锐朕 (377)
渡海登岛作战海上弹药运输研究	张彦刚, 燕 辉 (381)
后方仓库弹药紧急供应保障面临的问题及对策	武 强, 贺 鑫 (384)
后方弹药仓库战时弹药保障模式研究	康 健 (387)
军队战备储备物资更新轮换运行机制研究	周京京, 王开勇, 陈海艳 (390)

大数据应用对弹药保障的启示	方文改, 李永刚 (393)
4.2 勤务环境监测与防护技术	(397)
电火工品弹药“无线射频”安全防护距离研究	张余清, 甄义林, 石铁忠 (397)
露天集装箱储装弹药控温方法研究	孙永山 (400)
依据美军标准探讨弹药爆炸的安全距离	张余清, 甄义林 (403)
弹药库房最小允许距离及相关问题研究	张文亮 (408)
弹药洞库内爆模拟试验装置相似准则研究	刘国庆, 王国栋, 张玉令 (411)
通用弹药组合基数表达方法与运用	罗 磊, 杜峰坡, 姜志保, 高 飞 (415)
一种机动式模块化野战弹药库设计	牛正一, 李良春, 高 飞, 姜志保 (419)
国外弹药包装的应用与发展研究	赵安东, 邓 涛, 王 勋 (424)
弹药包装问题及对策研究	张晓康 (428)
某型碳纤维筒体透湿率试验研究	周 云, 杜 丹, 韩彦中, 张永顺 (431)

五、弹药导弹通用质量特性

5.1 弹药导弹通用质量特性论证	(435)
基于实战化标准的弹药导弹通用质量特性问题研究	穆希辉, 王韶光, 牛跃听, 宋桂飞 (435)
舰炮弹药通用质量特性要求研究	张 俊, 崔东华, 魏军辉 (441)
弹药储存性设计对策研究	石志彬, 李治源, 杨 光, 王晓方 (444)
陆军战术导弹储存质量监控概述	宋祥君, 刘彦宏, 李万领 (450)
新型弹药维修性问题与对策	王韶光, 葛 强, 江劲勇, 袁帅, 马会娟 (454)
导弹全寿命质量监控现状及发展构想	姜会霞, 谷宏强, 魏保华, 范书义 (458)
通用弹药质量监控工作当前存在问题及对策研究	汪海军, 苏振中, 王 彬 (462)
导弹质量监控信息标准现状与启示	姜会霞, 范书义, 魏保华 (465)
5.2 弹药导弹通用质量特性验证	(468)
储存延寿工作的导弹安全性研究	吴 勋, 冯 翔, 王志吉, 杨 蓉, 周伟勇 (468)
无线电引信电磁安全性评估与防护	陈亚洲, 程二威, 张冬晓 (476)
引信电子安全定向多点起爆系统电磁安全性分析	韩克华, 任 西, 张鹏辉, 刘卫东, 李 慧 (482)
装备全寿命周期中的测试性模型应用分析	陈 鹏, 李万领, 杨 森 (488)
某型无线电引信可靠性分析	杨 洋, 张 勇, 张天降 (492)
某型导弹战斗部安全性分析	季向东, 杨 鹏, 宋佳祺 (495)
热电池性能影响因素及对策研究	段桂茹, 孙志伟 (498)
某型导弹质量测试评估方法研究	罗 锦, 郑思龙, 何 鑫, 孔子华 (501)
便携式防空导弹动力装置安全性浅析	赵潇童, 郑振龙, 王 鹤 (505)

六、其 它

以需求为“订单”, 以阵地为“课堂”探索基层部队弹药装备组训方法	高欣宝, 崔 亮等 (511)
美军弹药导弹保障现状与发展趋势	杨 洋, 董贵阳, 邓童亚 (516)
一类可用于制备复合含能材料的方法综述	林少森, 闫 军, 杜仕国, 李洪广 (519)
论旋压技术在弹药产品药筒制造上的应用	杨宝利, 张守科 (523)
装药辅助工艺对质量的影响	杨青山 (525)
浅谈军区弹药保障机构环境保护建设	李 靓, 许海斌, 孙国辉 (528)
信息化弹药现状概述	赵晓东, 张 鹏, 赵铁山 (531)
无损检测技术在导弹质量监测中的应用研究	刘耀周, 宋祥君, 李万领, 李 宁 (536)

火工品检测过程中的静电危害及安全防护	刘冬青, 陆瑞卿 (540)
新型导弹装备维修设备管理浅议	程旭德, 杨博文, 常 庆 (543)
解析某型锤击试验机常见故障与排除方法	张彦国, 曹 辉, 张阿娣, 于 洋, 晏育建 (545)
某型测速雷达测枪弹初速的问题研究	林正才, 谢春雨, 林 涛 (549)
基于云技术的实验室信息管理体系建设研究	杨 毅, 宋国栋, 赵思源 (552)
如何提高弹药销毁干部骨干的业务素质	赵 龙, 何正文, 朱 光, 沈 龙 (556)
军民一体化装备维修保障探讨	宋现锋, 秦 健, 王景辉, 张清富 (559)

一、 弹药导弹储存可靠性 与寿命评估

1.1 弹药导弹性能检测技术

基于可靠度分析的导弹控制系统故障预测

黄考利¹, 刘晓芹²

(1. 总装军械技术研究所 通用弹药导弹保障技术重点实验室, 河北石家庄 050003;

2. 陆军航空兵学院, 北京 101123)

摘 要: 针对存在退化失效的某型导弹控制系统, 给出一种以性能退化数据为输入、可靠度为输出的 SVM 非线性故障预测模型。该模型从获得的历史数据出发, 分别采用 Kamplan Meier (KM) 估计和核概率密度估计 (KDE), 对存在截尾的失效寿命数据和性能退化数据进行可靠度估计; 通过训练多输出 SVM 来模拟性能退化数据和可靠度间的非线性关系, 从而对某型导弹控制系统后续时刻的可靠度进行预测。最后, 以该导弹控制系统中的电源组合为例, 验证了预测模型的有效性。

关键词: 多输出 SVM; Kamplan Meier 估计; 核概率密度估计; 失效寿命数据; 性能退化数据

0 引言

同很多电子系统一样, 某型导弹控制系统的失效也可分为突发失效与退化失效两种。前者是由于过应力造成的失效, 通常只有两种状态, 要么具有某种功能, 要么不具有某种功能, 尚无规律可循, 难以形成有效的预测方法; 后者是由于耗损型应力造成的失效, 是一个连续积累的过程, 其失效的判定是由失效阈值来确定的, 即当系统的某性能值退化量达到某一数值时, 就不再满足功能要求, 判定为失效。在退化状态下, 系统的固有可靠性水平是不断下降的过程。

在导弹装备使用过程中, 存储了大量反映导弹控制系统在运行过程中的健康状态的历史监测数据, 包括失效寿命数据 (记录了失效时间) 和性能退化数据 (随工作时间退化)。

导弹控制系统的可靠度可以通过对这些大量的历史监测数据的失效过程统计分析而得到。尤其是性能退化数据, 具有以下优点。

(1) 性能退化数据是系统性能退化过程的反映, 记录了系统整个性能退化过程的监测数据, 可

为产品的可靠度提供更多有用的信息;

(2) 在系统可靠度较高时, 往往会有极少的失效, 甚至零失效, 无法得到失效寿命数据, 而无论产品失效与否, 退化数据都能通过定时监测来获得反映系统整个性能退化过程的信息;

(3) 利用退化数据建立的故障预测模型能够更多地反映系统退化的过程, 可以为故障预测提供更多的信息。

鉴于性能退化数据的优点, 性能退化数据越来越得到各种专家和研究人员的关注, 开始应用于可靠性评估和故障预测等领域^[1-3]。但这些研究成果中将性能退化数据用于故障预测的文献较少。

本文针对存在退化过程的某型导弹控制系统, 通过分析失效寿命数据和性能退化数据与可靠度之间的非线性关系, 给出一种基于可靠度分析的预测方法。该方法以未来可靠度下降趋势为预测目标, 采用 KM 估计和核概率密度估计 (KDE) 对历史监测数据 (包括失效寿命数据和性能退化数据) 进行可靠度分析, 并用多输出支持向量机拟合监测数据和可靠度下降过程间的非线性映射关系, 实现对系统可靠度的多步预测。这种方法的优点是不需要大量的模型假设, 不需要预先设定阈值。

1 基于 KM 估计和 KDE 估计的可靠度分析

1.1 失效寿命数据的 KM 估计

失效寿命数据中除了失效时间（记录了精确的故障时间）之外，还可能包含无故障数据和截尾数据（图 1），反映了系统的生存概率。

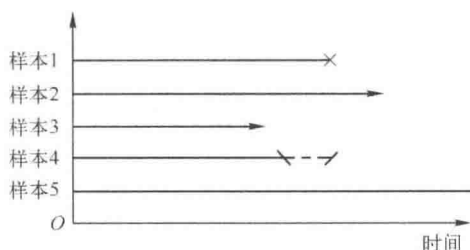


图 1 不同种类的失效寿命数据

图 1 中，样本 1 属于故障数据；样本 5 属于无故障数据，产生原因是一直部件被撤换都未发生故障，无法判断失效时间；样本 2、3、4 都属于截尾数据。样本 2 和 3 是右截尾数据，产生原因是其他部件故障或者预测到整个模块故障，导致该未故障部件被替换；样本 4 属于左截尾数据，产生原因是只能预测故障时间处于某区间内，而无法像样本 1 那样判断具体故障时间。

根据失效寿命数据的分类，KM 估计^[4]包含对三类数据的处理过程。

(1) 观测到故障的失效寿命数据，在故障发生前可靠度为 1，在故障发生后可靠度为 0，其表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_i \\ 0, & t \geq t_i \end{cases} \quad (t_i \text{ 表示故障时间})$$

(2) 未观测到故障的样本数据，可靠度估计恒为 1，即 $r(t) = 1$ 。

(3) 截尾数据在截尾之前可靠度为 1，截尾后采用 KM 估计，其表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_i \\ \prod_{j \geq i} \left(1 - \frac{d_j}{n_j}\right), & t \geq t_i \end{cases} \quad (t_i \text{ 表示截尾时间})$$

1.2 性能退化数据的 KDE 估计

目前，常用 KDE^[5]估计对性能退化数据进行可靠度估计。它是一种基于数据驱动的非参数统计模型，避开了预设模型和参数估计不确定性问题，能在一定最优准则下描述非线性时间序列的一些复杂

关系，而且适用于高维数据结构分析，具有广泛的适应性。考虑到导弹控制系统在不同时刻的退化数据也是高维的非线性时间序列，与核概率密度估计的思想是一致的，因此采用 KDE 估计对性能退化数据的可靠度进行估计。

但是，传统的基于 KDE 的可靠度估计方法大多以故障时间（故障时间通常定义为监测值与故障阈值的交叉点）为基点对样本的总体特性进行估计，如图 2 所示， $f(t)$ 表示故障时间概率密度函数， T 时刻的可靠度定义为阴影部分的面积，表达式为

$$r(t) = 1 - \int_0^T f(t) dt$$

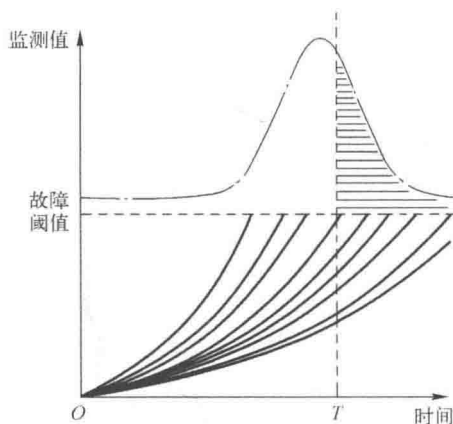


图 2 传统的可靠度估计方法

这种可靠度估计方法存在以下两点不足。

一是不能反映系统运行期间的变化趋势。这种方法把系统当作一个“黑箱”，仅考虑了系统的两种状态：正常状态和故障状态。但维修人员通常需要了解“黑箱内部的工作状态”，以推理系统的退化过程。

二是仅能反映整体的可靠度估计。这种估计方法可能对大批量生成的生产厂商有用，但对于终端用户作用不大。相比于平均故障时间，维修人员更关心特定产品在运行过程中的可靠度信息。

本文给出一种新的基于 KDE 的可靠度估计方法。假设样本 X_i 的性能退化数据表示为 $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ ， m 表示总的监测时间，若 $x_{it}(t=1, 2, \dots, m)$ 大于等于阈值 $x_{\text{threshold}}$ 就表示故障发生。样本 X_i 的可靠度估计的过程如下。

STEP 1：利用 KDE 估计以性能退化数据和随时间改变的过程为基点进行核概率密度估计，得到每个时刻 t 的密度函数 $f_i(x)$ ；

STEP 2：利用下式估计样本 X_i 在第 t ($1 \leq t \leq m$) 个时刻的可靠度，即

$$r_{\text{KDE}}(t) = \prod_{j=1}^t \frac{\int_{x_{ij}}^{x_{\text{threshold}}} f_j(x) dx}{\int_{x_{ij}}^{\infty} f_j(x) dx}$$

上式的推导过程为

$$\begin{aligned} r_{\text{KDE}}(t) &= \Pr(T > t | X(t) > x_{it}, X(t-1) > \\ &\quad x_{it-1}, \dots, X(t_1) > x_{it_1}) \\ &= \prod_{j=1}^t \Pr(T > j | X(j) > \\ &\quad x_{ij}, X(j-1) > x_{ij-1}) \end{aligned}$$

根据贝叶斯概率公式, 得

$$\begin{aligned} r_{\text{KDE}}(t) &= \prod_{j=1}^t \frac{\Pr(T > j, X(j) \geq x_{ij} | X(j-1) \geq x_{ij-1})}{\Pr(X(j) \geq x_{ij} | T > j-1, X(j-1) \geq x_{ij-1})} \\ &= \prod_{j=1}^t \frac{\Pr(x_{\text{threshold}} \geq X(j) \geq x_{ij} | x_{\text{threshold}} \geq X(j-1) \geq x_{ij-1})}{\Pr(X(j) \geq x_{ij} | x_{\text{threshold}} \geq X(j-1) \geq x_{ij-1})} \\ &= \prod_{j=1}^t \frac{\int_{x_{ij}}^{x_{\text{threshold}}} f_j(x) dx}{\int_{x_{ij}}^{\infty} f_j(x) dx} \end{aligned}$$

这种基于性能退化数据的可靠度估计方法表达为样本退化点的概率分布, 反映了寿命周期内样本性能退化的过程, 对样本的退化特性有一个更全面的概括。

2 基于可靠度分析的故障预测方法

2.1 故障预测模型

除了用于可靠度估计过程中较失效寿命数据的优势之外, 性能退化数据本身还具有缓慢性、长期性、规律性的特点, 这就决定了它不能在较短的时间内反映导弹控制系统性能的退化, 而且无法从直观上准确认识其退化的本质。因此, 对性能退化数据进行非线性映射, 研究其变化趋势和规律, 对实现长期预测具有不容忽视的重要作用。

支持向量机理论和神经网络理论是目前最有代表性的非线性映射回归算法, 其中支持向量机理论表现出优于神经网络的性能^[6], 尤其是在时间序列预测方面能够很好地解决神经网络存在的问题。目前采用支持向量机的故障预测方法大多集中于对未来时刻观察值序列的预测^[8], 而且多为单步预测,

不适用于对系统未来退化程度预测的需求。

本文提出采用多输出支持向量机回归算法来建立故障预测的非线性模型, 如图 3 所示。 $x(t-n), \dots, x(t-1), x(t)$ 表示前 n 个时刻组件的观测值序列, $r(t+1), r(t+2), \dots, r(t+k)$ 表示第 $t+1$ 时刻到第 $t+k$ 时刻的可靠度。

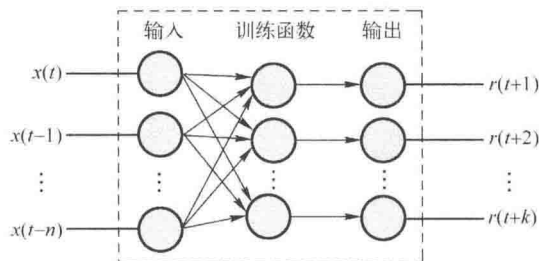


图3 多输出SVM模型结构

故障预测模型的输入为样本的性能退化数据序列（每个样本序列均以时间顺序排列），输出为对应样本的可靠度。样本可靠度的计算是可靠度估计结果的均值, 定义为

$$r(t) = \text{mean}(r_{\text{KM}}(t), r_{\text{KDE}}(t))$$

故障预测模型的工作原理就是, 通过训练多输出SVM来拟合性能退化数据和可靠度间的非线性关系, 用训练好的SVM预测组件将来时刻的可靠度。

设性能退化数据样本 X_i 表示为 $\{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)\}$ 。在训练期间, 对于样本 X_i 来说, 输入向量表示为

$$\text{input_vector} = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ x_i(t-1) \\ \vdots \\ x_i(t-n) \end{bmatrix}$$

输出向量表示为

$$\text{output_vector} = \begin{bmatrix} r_i(t+1) \\ r_i(t+2) \\ \vdots \\ r_i(t+k) \end{bmatrix}$$

把输入和输出向量分别送入到故障预测模型中, SVM的训练将以使实际输出结果接近目标输出向量为目标。当所有样本训练结束后, 输入未知的测试样本, SVM就会生成一个可靠度预测向量, 即

$$\text{reliability_vector} = \begin{bmatrix} \hat{r}(t+1) \\ \hat{r}(t+2) \\ \vdots \\ \hat{r}(t+k) \end{bmatrix}$$

这个可靠度预测向量也可以用曲线形式来表

示,如图4所示。

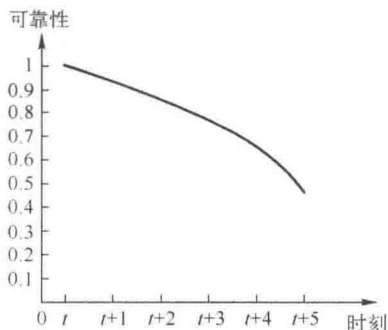


图4 可靠度预测向量

2.2 故障预测方法的总体结构

故障预测方法的总体结构如图5所示。这种基于可靠度分析的故障预测方法主要有以下三个

优点。

(1) 提供未来时刻系统的可靠度,而不是状态观测值。根据被预测系统或组件在整个装备中的作用和地位,设定维修可靠度值。当系统处于核心地位时,设定的可靠度值应较大,以更大概率来预防故障。这种预测模型更有利于维修人员综合各种因素制订维修计划,防止灾难性事故的发生。

(2) 实现多步预测,而不是目前绝大多数方法只能进行的一步预测,这样更有利于系统的健康管理。

(3) 充分利用维修人员和用户在研制、测试及使用阶段已积累的大量历史观测数据,同时为故障预测提供装备失效寿命数据信息和性能退化状态信息,更全面地反映装备的特性。

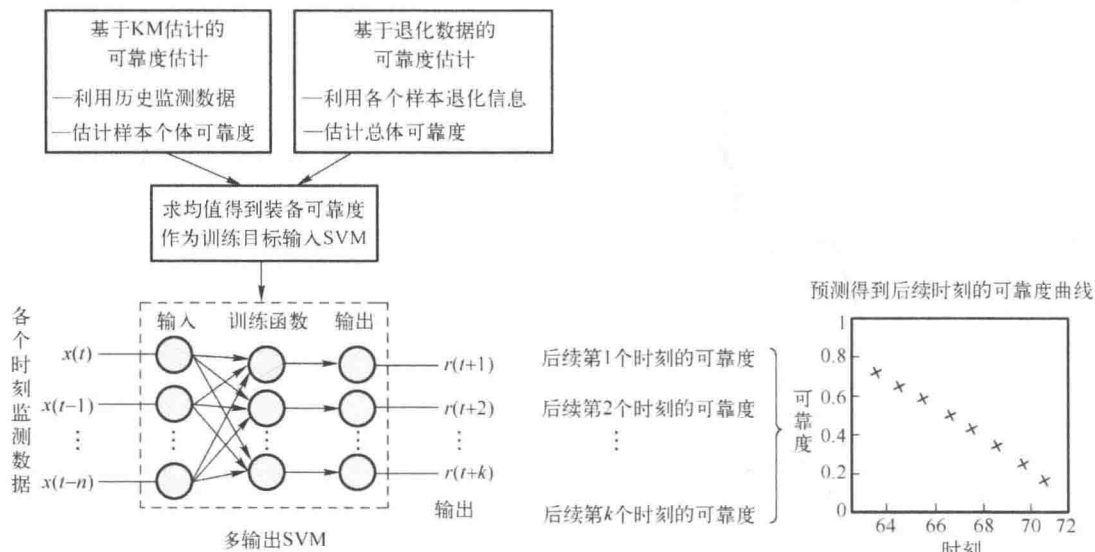


图5 故障预测方法的总体结构

2.3 某型导弹控制系统电源组合的可靠度预测

导弹控制系统中,电源组合是重要组成部分,其健康状态的好坏直接关系到系统的寿命,决定了系统的可靠性和性能,而且电源组合也是易发生故障的模块,因此需对其进行故障预测。

电源组合的失效方式为退化失效,通常测试的是电压信号,即使输出电压有一定的偏离但还不足以维修时,那么就需要密切关注其输出电压并能对其进行准确的故障预测。下面以某型导弹控制系统中的某电源组合为例,采集电压信号数据,分析其电压测试信号的特点,对其进行故障预测。

电源组合对导弹控制系统的影响主要由电源电压的退化引起,因此电源电压的测试是一项重要内

容,图6给出了该电源组合的电压监测值,可以看出电压值大体呈上升趋势(下降趋势相同,本文以上升趋势为例)。

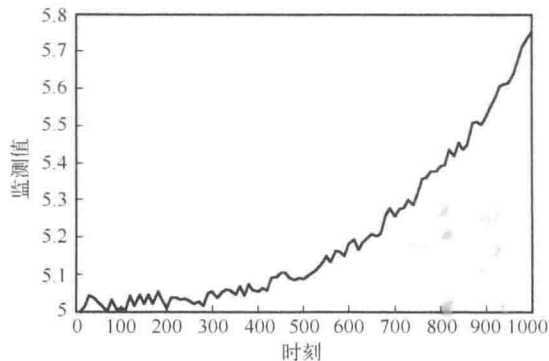


图6 导弹控制系统中某电源组合的电压监测值

等间隔采集的 3 组电压数据（单位：V）见表 1，其中：第一组是第 20 个时刻到第 40 个时刻的监测值；第二组为第 50 个时刻到第 70 个时刻的监测值；第三组为第 80 个时刻到第 100 个时刻的监测值。从表 1 中可知：随着电源组合的使用时间增加，电压不断增加（逐渐偏离正常值），且增加的幅度逐渐加大，电压的上升趋势非常明显却非线性上升。由此，可得出此参数随着电源组合系统健康状况的逐渐变差，总体呈非线性上升趋势，因此使用电压作为被预测特征以实现对电源组合的故障预测。

表 1 输出电压的监测值数据

监测序号	电压	样本标号		
		1	2	3
1		5.002	5.183	5.447
2		5.005	5.217	5.438
3		5.010	5.221	5.444
4		5.012	5.224	5.449
5		5.019	5.257	5.456
6		5.036	5.247	5.469
7		5.051	5.261	5.481
8		5.069	5.270	5.500
9		5.074	5.276	5.493
10		5.071	5.291	5.514
11		5.078	5.296	5.532
12		5.081	5.302	5.547
13		5.087	5.306	5.561
14		5.079	5.305	5.584
15		5.076	5.302	5.592
16		5.099	5.317	5.601
17		5.111	5.327	5.627
18		5.089	5.338	5.638
19		5.103	5.354	5.655
20		5.109	5.362	5.682

应用 2.1 和 2.2 节的可靠度估计过程、图 3 的多输出 SVM 结构模型及图 5 的故障预测模型，采用多输出 SVM 中的径向基核函数（RBF）进行故障预测。三组测试样本的预测结果分别如图 7～图 9 所示。

从图 7～图 9 中数据可以看出：①这 3 组测试样本的获取是针对 3 个不同阶段的，样本 1 是初始阶段的，样本 2 是中间阶段的，样本 3 是接近故障阶段的，具有代表性。②第 3 组测试样本的预测结果中，预测到在后续的 $t = 7$ 时刻的可靠度为 0.49，小于 0.5，需要在此之前更换电源组合。在后续

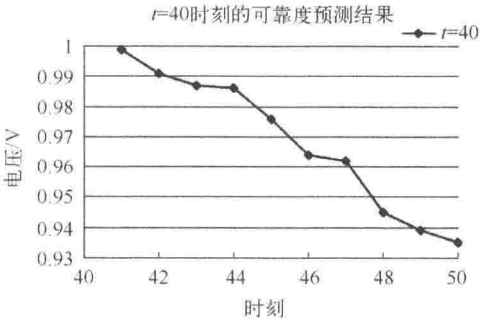


图 7 $t = 40$ 时刻的预测结果

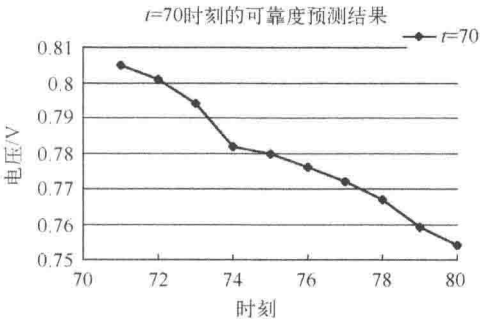


图 8 $t = 70$ 时刻的预测结果

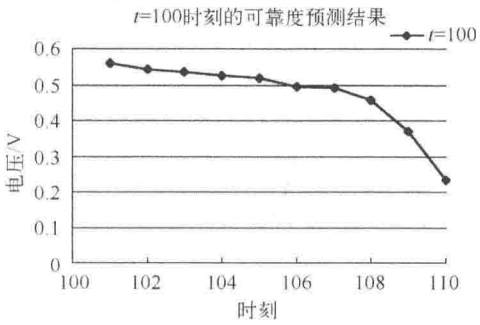


图 9 $t = 100$ 时刻的预测结果

$t = 10$ 时刻（真正故障时间）发生故障之前预测到了故障的发生。

预测精度指标 PA 用于评估预测方法的性能，定义为

$$PA = \begin{cases} 1 - \lambda \frac{T - \hat{T}}{T}, & \hat{T} < T \\ 1, & \hat{T} = T \\ 1 - \mu \frac{T - \hat{T}}{T}, & \hat{T} > T \end{cases}$$

式中： λ 和 μ 分别为故障前估计到故障和故障后估计到故障的参数，其值取决于待预测系统在整个装备中的地位和作用。如果待预测系统在整个装备中的地位非常重要， λ 应取较小的值， μ 应取较大的值。显然， λ 应当小于 μ ，因为故障后才估计到故障会造成灾难性事故，因此预测精度最差。设定

$\lambda = 1, u = 2$, 对电源组合的预测精度 $PA = 97.27\%$, 预测性能较好。

3 结束语

结合某型导弹控制系统在设计/测试和使用过程中积累的大量历史监测数据, 分别采用 KM 估计和 KDE 估计对失效寿命数据和性能退化数据进行可靠度估计, 以二者均值作为故障预测模型的训练目标; 以未来可靠度的多步预测为模型的预测目标; 最后利用多输出 SVM 模型建立的故障预测模型对某型导弹控制系统中的电源组合的可靠度进行预测, 方法可行, 与真实可靠度相比, 性能是可以接受的。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 钟强晖, 张志华, 吴和声. 基于退化数据的可靠性评估方法探讨 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31 (9): 2280 - 2284.
- [3] 上官芝, 付桂翠, 万博. 基于加速性能退化的元器件贮存寿命预测 [J]. 可靠性与环境适应性理论研究, 2009, 27 (5): 32 - 36.
- [4] 彭非, 王伟. 生存分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004.
- [5] Chapelle O, Vapnik V, Bousquet O, et al. Choosing Multiple Parameters for Support Vector Machines [J]. Machine Learning, 2002, 46 (1): 131 - 159.
- [6] 何熠. 基于支持向量机的非线性系统辨识建模与控制 [D]. 天津: 天津大学, 2006: 7 - 8.
- [7] 胡根生, 邓飞其. 具有多分段损失函数的多输出支持向量机回归 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24 (5): 711 - 714.
- [8] 陈伟, 胡昌华, 樊红东. 基于小波支撑向量机非线性组合预测的导弹惯性器件故障预报 [J]. 战术导弹技术, 2006, (4): 84 - 88.
- [9] 邹敏. 基于支持向量机的水电机组故障诊断研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 52 - 71.

[1] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估

针刺火帽发火感度测量技术研究

邢立平, 张人何, 何小斌

(78618 部队, 四川成都 610100)

摘要: 针刺火帽通常是弹药的初级发火源, 但单个火工品发火感度至今没有量化。本文利用 Hopkinson 压杆技术, 为针刺火帽输入一足量矩形脉冲应力, 测量加载应力—时间曲线和发火所需时间, 计算可得到火工品发火所消耗能量即发火感度。

关键词: 针刺火帽; Hopkinson; 压杆; 感度

0 引言

发火感度是火工品设计、生产验收过程中的重要参数, 传统的火工品针刺感度试验方法是在落锤式和落球式两种感度仪上进行^[1]。这种方法只能得到批产品的发火感度区间, 不能得到单个样品的发火感度。为解决单个火工品发火感度的测试问题, 本文利用 Hopkinson 压杆技术, 设计加载系统, 测试加载应力—时间曲线, 得到火工品发火所消耗的输入能量, 解决了单个火工品的机械感度测量问题。

1 测量原理

1.1 现行测量方法

火帽发火需要一定的外部刺激, 引起发火所消耗的外部刺激量就是火工品的感度。目前所用测试技术中, 针刺火帽发火输入的外部刺激是撞击击针的落锤或落球。虽然已知落锤或落球的下落高度, 进而可以计算撞击能量, 但并不知道引起火工品发

火所消耗的能量, 也就是不知道火工品感度的准确数值。尽管人们创造了升降法来计量批产品的发火感度, 但却无法测量单个产品的发火感度。

结论: 现行落锤法或落球法不能测量单个火工品的发火感度。

1.2 Hopkinson 压杆技术

早在 1914 年, Hopkinson 就提出了压杆测试技术, 是测试瞬态脉冲应力最早的方法。该技术不断完善, 1949 年 Kolsky 改进了 Hopkinson 装置, 提出了分离式 Hopkinson 装置。该装置将短试样置于两根压杆之间, 通过子弹撞击入射杆施加压力时间荷载, 产生一个弹性波在杆中传播, 并对试样加载。目前, 该技术已成为材料动态性能测试的重要工具^[2]。

典型的 SHPB 装置及数据处理系统如图 1 所示^[3], 包括: 子弹、压杆、测速系统、超动态应变放大器、瞬态波形采集存储系统和数据处理系统。压杆和子弹一般由高强度合金钢或铝合金制成, 压杆、试样的接触面加工平整并保持平行撞击, 压杆支座不能影响应力波的传递, 压杆包括入射杆、透射杆。撞击速度通过测速器测定, 入射杆和透射杆

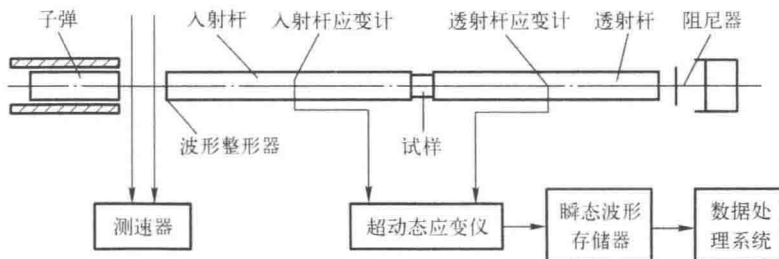


图 1 SHPB 装置及数据处理系统