doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.023
引用格式:马顺南,王强. 靶场测控装备状态及故障预测方法[J]. 电讯技术,2014,54(9):1298-1302. [MA Shun-nan, WANG Qiang. State and Fault Prediction Method for TT&C Equipment in Range[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(9):1298-1302.]

靶场测控装备状态及故障预测方法*

马顺南**,王 强

(解放军 91550 部队 92 分队,辽宁 大连 116023)

摘 要:靶场测控装备的管控与状态预测对于确保靶场试验任务的顺利开展有着重要的意义,也是状态/故障处理研究领域的发展方向。结合装备结构关系网络,通过对状态信号的分析,给出了靶场测控设备单元的状态预测方法。依据电子元器件寿命规律,结合状态异常出现的分布函数,重点构建了离散型状态变量的预测模型,提出了相应的预测流程和方法。仿真计算表明,提出的状态及故障预测模型和方法有效,可为提高任务期间装备的可靠性提供判断依据。

关键词:测控装备;状态/故障预测;结构关系网络;置信概率;预测精度;寿命分布函数
中图分类号:V556;TP206.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2014)09-1298-05

State and Fault Prediction Method for TT&C Equipment in Range

MA Shun-nan, WANG Qiang

(Subunit 92, Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: Management & control and state prediction for range's TT&C equipment plays an important role in test task, and is also a tendency of research and application. A state prediction method for range's TT&C equipment is proposed in this paper. The network relationship for equipment structure is constructed. According to electronic parts and components' life rules, a distribution function for state abnormality is designed and the prediction model for discrete state variable is established, and corresponding prediction flow and method are presented. The simulation indicates that the proposed method is valid, and it also offers technical support for improving equipment reliability during test task.

Key words: TT&C equipment; state/fault prediction; structure network; confidence probability; prediction precision; life function

1 引 言

大型导弹试验任务准备周期较长,所投入的人力、物力、财力及精力多[1]。在导弹试验阶段,一旦靶场测控装备/设备状态异常或发生故障,则试验必须暂停,势必会影响试验任务的进行,浪费大量的人力和物力。因此,需要时时刻刻掌握测控设备的状态,并能根据装备当前的状态预测装备/设备寿命期内的状态/故障变化,为装备的管理、使用、维护提供科学的依据。在靶场测控装备中,无论是无线电雷达还是光学设备,都是一个庞大的系统,其组成的分系统多,相互之间的关系复杂,一种状态异常或故障现象往往涉及多个分系统或板卡,状态的预测也与每一个分系统或板卡密切相关,故障的预测必将会涉及诸多因素[2-3]。因此,靶场测控装备的故障定位、状态预测以及故障预测存在较大的难度。

目前国内外状态预测技术已经取得一些进展,其方法大多数是基于设备状态模型,也即基于模型的状态或故障预测[4]。然而,由于实际设备使用过

* 收稿日期:2014-05-19;修回日期:2014-08-11 Received date:2014-05-19;Revised date:2014-08-11
** 通讯作者:mashunnan@163.com **Corresponding author**: mashunnan@163.com

程中,常受到系统不确定性和外部干扰的影响,故障难以精确建模,降低预测的精度和可信度,使得基于模型方法的应用受到很大限制[5]。而基于信号处理的预测方法直接利用设备输出的状态信号来提取故障特征信息,降低了对系统精确数学模型的依赖,取得了丰富的应用成果。

本文在装备结构关系网络构建及装备状态转移矩阵设计的基础上,通过对存储在数据库中的大量装备状态信息进行分析,构建正常状态的分布函数,并对一定时间内的设备状态进行预测;通过对电子元器件寿命规律的分析,结合状态异常出现的时间序列,构建了状态预测函数进行设备故障预测,同时结合装备结构关系网络及状态转移矩阵,将状态异常定位至装备的分系统或者板卡,为提高任务期间装备的可靠性提供判断依据。仿真计算表明,本文提出的状态及故障预测模型和方法有效。

2　装备结构关系网络及状态关联矩阵

基于状态信号的故障预测需要直接利用设备的状态来提取故障特征信息,而设备的状态是由各传感器测量得到的,也即靶场测控装备可提供的状态信息仅为设备各板卡或部件等的工作状态信息。实际应用中,需要根据板块或部件等推算到各分系统,甚至是整机的工作状态,这就需要通过构建装备结构的功能逻辑关系图,结合装备的物理结构组成,将整个装备划分为若干相互关联的分系统和板卡,构建状态转移矩阵,实现与分系统或者板卡间的数学关联,最后设计等效试验方法,以推算出整机的工作状态。

对靶场测控装备进行分析,从故障分析的角度出发,要建立装备结构关系网络,需要分析装备的分系统或关键部件的工作原理、故障发生的机理,并进一步确定结构图中各元素之间的关联关系和耦合程度关系,结合设备的物理结构,采用了数据链方式建立了装备结构关系网络。图 1 给出了某脉冲雷达设备结构连接及各状态的对应关系,图中实线框为分系统或板卡,虚线框为可获取的状态参数。实际应用中,还可以根据环境、设备状态对结构关系网络进行修订。

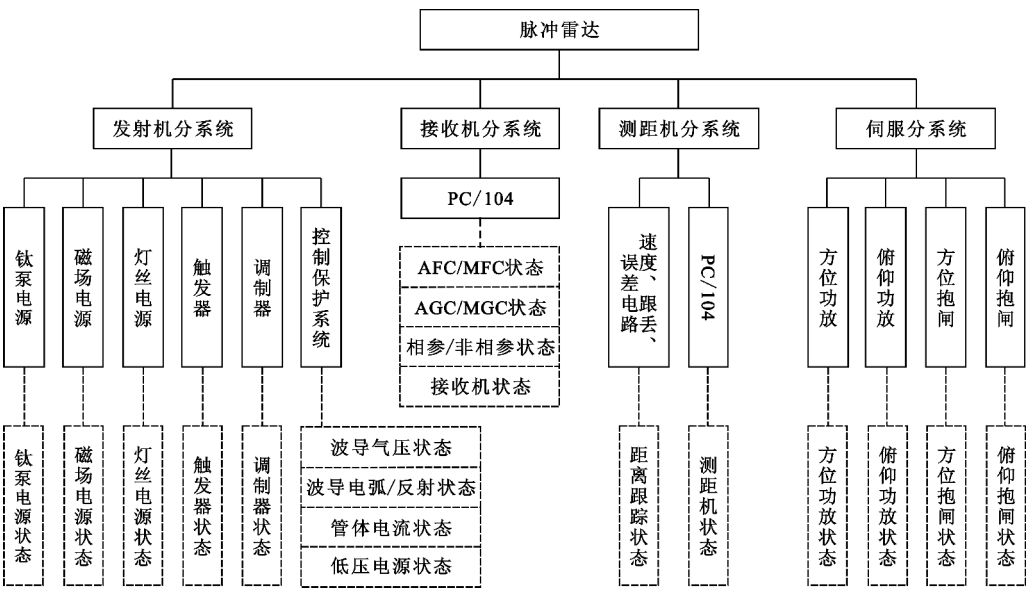

图 1　脉冲雷达设备结构连接及各状态的对应关系

Fig. 1 Structure connection and corresponding relation for each state of a pulse radar

根据图 1 的结构连接关系,可以建立状态转移及关联矩阵。设被测关键板卡或分系统的相关性数学模型可以用下述矩阵来表示,即

$$\boldsymbol{D}_{m\times n}=\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中,d_{ij} 表示第 i 个组成单元(板卡或分系统)状态在第 j 个测试点上的反应信号,第 i 行矩阵为

$$\boldsymbol{F}_i=[d_{i1}\quad d_{i2}\quad \cdots\quad d_{in}] \tag{2}$$

表示第 i 个组成单元状态在各个测试点上的反应信号,它表明了 $\boldsymbol{F}_i$ 与各个测试点 $\boldsymbol{T}_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的相关性,而第 j 列矩阵

$$\boldsymbol{T}_j=[d_{1j}\quad d_{2j}\quad \cdots\quad d_{mj}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

表示第 j 个测试点可测得各组成单元的状态信息。它表明了 $\boldsymbol{T}_j$ 与各个组成单元 $F_i(i=1,2,\cdots,m)$ 的相关性。其中：

$d_{ij}=1$（T_j 与 F_i 相关）或 $d_{ij}=0$（T_j 与 F_i 不相关）　　(4)

基于系统功能结构框图的直接分析法，可以建立相关性模型 D。

3　装备状态预测模型及方法

状态预测是装备管理的一个很重要的组成部分，其基本原理在于利用装备单元的历史状态信息，根据装备单元状态的时序相关性和电子设备（单元）的本身消耗规律，建立合理的预测模型，并以一定的置信概率预测装备单元的状态在指定时间段内的变化趋势，并结合装备物理组成结构及关系，等效推导到分系统及整机的变化趋势。

3.1　状态预测流程

先设定所要进行预测的设备类型及相应的预测分系统，确定分系统中所涉及到的各种单元，明确单元状态类型（以便选择不同的预测模型），找出与该状态类型相关的单元状态，并设定所用历史信息时间段和状态预测时间，然后收集指定时间内所要预测的单元状态的历史信息，结合状态类型、特点选取并调用预测模型函数，设定预测置信概率，得到状态预测结果；另一方面，为了验证预测结果的合理性，需要采用 Monte Carlo 仿真方法，根据电子设备（单元）本身的消耗规律，产生多组多次同一历史时段和预测时段内的状态模拟数据，以验证实际预测结果的正确性和合理性。如果仿真预测结果与实际预测结果不符，则问题主要出在两个方面：一是预测模型函数中所用的电子设备（单元）的消耗规律与实际消耗规律不符，则需要调整消耗规律中的相关参数；二是预测函数不合理，则需要调整预测模型中的相关参数，或者改选其他预测模型。

不断调整预测模型函数和电子设备（单元）消耗规律中的参数，直至仿真预测结果与实际预测结果相符。此时根据所预测的单元状态，利用装备结构关系网络及状态关联矩阵，推断出分系统或整机的状态变化趋势，包括单元/分系统/整机状态异常概率趋势、状态正常概率趋势及可靠工作时间趋势。装备状态预测流程如图 2 所示。

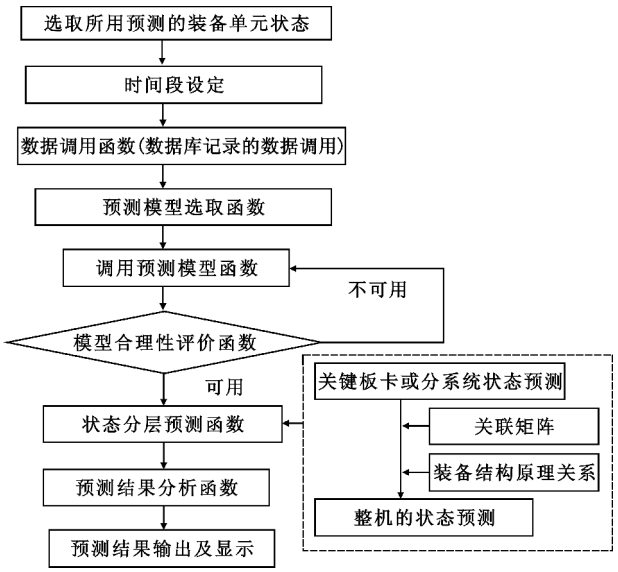

图 2　测控装备状态预测流程

Fig. 2 Flow of TT&C equipment′s state prediction

3.2　状态预测方法

在测控装备状态预测中，难点与核心在于状态预测模型的确定、电子设备（单元）本身消耗规律的确定。显然，首先它们与装备单元状态的类型有着密切的关系，不同的状态类型有不同的预测规律。而对于设备单元或电子元件的输出信号，其输出状态信号主要有两类，即布尔型状态（离散状态）和浮点型时序状态（连续状态），而绝大多数输出状态为离散型信号。下面给出离散型状态的预测方法。

由于布尔型状态所涉及的信号输出仅为布尔型 0、1 数据（或多于 2 个的状态数值），0 表示状态正常，1 表示状态异常。此时可以假设状态为一随机变量，其值仅取 0、1，故随机变量可认为服从二点分布（贝努里试验），而对未来时间内状态的预测，也即为 n 重贝努里试验。假设状态异常的概率为 p，则未来 n 重贝努里试验中出现 k 次 1 的概率为 $b(k;n,p)$，也即二项分布。

现在的问题在于如何确定概率值 p 及试验次数 n。显然，对于概率值 p，一方面与电子设备（单元）本身消耗规律有关，另一方面与状态历史信息有关。本文利用电子设备本身消耗规律为先验信息，利用历史状态信息对其进行修正。根据电子设备（单元）的物理工作特性，电子设备状态异常的概率可以用一个分段曲线来描述，如图 3 所示。

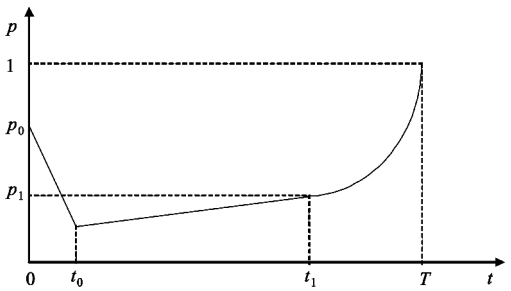

图 3　电子设备(单元)状态异常概率分段函数
Fig. 3 Probability subsection function for electronic equipment′s abnormal state

图 3 中第一阶段为新设备磨合期,为一单调下降函数,简单起见,用线性函数表示,其中 t_0、p_0 为模型参数;第二阶段为设备正常运作期,为一个慢时变的单调上升函数,其中 t_1、p_1 为模型参数;第三阶段为设备老化期,状态异常概率函数为一单调上升函数,当然也可用线性函数表示,其中 T 为设备的设计寿命,为模型参数。显然,图 3 所描述的异常概率函数为一连续的函数,每个时刻的 p 均不相同,而在实际状态预测算法中,可将其视为一个窗口函数,即在某一特定时间段内,异常概率值相同,时间窗口为参数 ΔT。因此,对于图 3 中的状态异常概率分段函数,其参数包括 $\beta=[t_0,p_0,t_1,p_1,T,\Delta T]$,当然以上参数均有一个先验值,现在就可以利用状态预测所用的历史时间段内的状态异常值数据,在大样本的情况下,估计出各个时刻状态异常概率值 $\hat{p}(t)$,此时 $p(t)(0<t<T)$ 为一个窗口分片连续函数。而另一方面,对于试验次数 n,则取决于未来的预测时间段,为一个确定的值。

二项分布的概率分布为

$$b(k;n,\hat{p}(t))=C_n^k\hat{p}(t)^k(1-\hat{p}(t))^{n-k},k=0,1,\cdots,n \tag{5}$$

其中,$b(k;n,\hat{p}(t))$ 为 n 重贝伯利实验中成功 k 次的概率,$\hat{p}(t)$ 为各个时刻估计的状态异常概率值。

特别地,

$$\sum_{k=0}^{n}b(k;n,\hat{p}(t))=\sum_{k=0}^{n}C_n^k\hat{p}(t)^k(1-\hat{p}(t))^{n-k}=1 \tag{6}$$

根据公式(5)就可以预测出未来某段时间段内出现状态异常的概率。

4　仿真试验及结果分析

4.1　仿真试验说明

这里采用离散型随机变量的二项分布,对设定时间段内的各个单元状态进行预测。当然预测结果取决于设备单元状态异常概率 p 和所假定状态变量的分布。

为了验证预测结果的合理性,采用了 Monte Carlo 仿真方法,设置不同历史时间段(10 个不同的时间段),根据不同的历史时间段及假定的状态异常概率表示函数(如图 3 所示),得到不同的分段函数模型参数的估计 $\hat{\beta}=[t_0,p_0,p_1,t_1,p_2,T,\Delta T]$,求其平均值,最后得到该类设备单元的状态异常概率函数的估计值。利用该估计值(即模拟的电子设备单元本身的消耗规律),产生多组多次(100 次)与所设定的预测时间段和历史信息时间段内的状态模拟数据,对 100 次状态模拟数据的规律进行统计分析,得出其状态出现异常的概率,并与实际预测的结果进行比对,验证预测结果的正确性与合理性。

当然,该预测结果也存在着一定的风险,也即电子设备(单元)本身消耗规律需满足图 3 所示的形式(当然模型函数是可变的),此外,状态数据的分布为多点分布。如果设备研制单位能够提供电子设备本身的消耗规律或者状态数据的分布规律,则预测结果将更加可信。

4.2　试验结果

针对不同的试验条件,包括置信概率 p_{ZXGL}、设备使用寿命 T 等参数进行多组 Monte Carlo 仿真试验。对于概率分段函数参数 $\hat{\beta}=[t_0,p_0,p_1,t_1,p_2,T,\Delta T]$,取设备使用寿命 T 为 10 年,时间间隔 ΔT 为 1 个月,t_0 为 2 个月,t_1 为 8 年,其意义为设备使用第一、二个月,运行状态趋于稳定,从第三个月直至第八年末,设备处于稳定并渐渐老化,最后两年由于设备老化,出现异常的概率急剧上升。设备使用之处出现异常的概率为 $p_0=0.8$,$p_1=0.02$,$p_2=0.2$。

图 4 给出了用图 3 中的概率分段函数计算的状态异常与预测得到的概率值之间的比对。

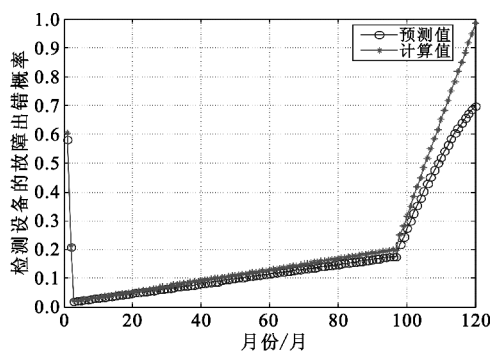

图 4　设备使用寿命 10 年下的状态异常计算值与预测概率比对
Fig. 4 Comparison between state abnormity calculation value and prediction value in ten years′ usage period

从仿真结果可以看出,所假定的电子设备的消耗规律和状态数据的分布规律是可信的,与实际情况相符合。

5 结 论

本文以靶场测控装备的状态异常定位及状态预测为研究对象,结合装备结构关系网络,依据电子元器件寿命规律,构建了状态异常的分布函数,并着重给出了一种离散型设备状态的预测方法,该方法已经在某靶场测控装备管控系统中得到应用。

进一步的工作主要在于两个方面:一是进一步分析和讨论不同离散型随机变量的分布在布尔型状态预测中的应用,二是讨论连续型状态(如设备电流、电压等)的时间序列建模与预测方法。

参考文献:

[1] 齐艳丽. 国外战略弹道导弹发展综述[J]. 中国航天,2007(4):41-44.
QI Yan-li. Development trends of strategy ballistic missile abroad [J]. Aerospace China, 2007 (4): 41 - 44. (in Chinese)

[2] Perner P. Concepts for Novelty Detection and Handling Based on a Case-Based Reasoning Process Scheme [D]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.

[3] Singh S, Tu Haiying, Donat W, et al. Anomaly detection via feature-aided tracking and Hidden Markov Models [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2009, 39(1): 144-159.

[4] 方睿. 基于支持向量回归的现代气象雷达寿命预测[J]. 电讯技术,2012,52(10):1686-1690.
FANG Rui. Weather Radar's Life Prediction using Support Vector Regression [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(10): 1686-1690. (in Chinese)

[4] Lin Ching-Fang. Predictive fault diagnosis system for intelligent and robust health monitoring [C]//Proceedings of 2010 AIAA Infotech @ Aerospace. Atlanta, Georgia: AIAA, 2010: 1-5.

作者简介:

马顺南(1966—),男,山西运城人,2012 年于国防科技大学获博士学位,现为高级工程师,主要从事测控总体工作;

MA Shun-nan was born in Yuncheng, Shanxi Province, in 1966. He received the Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2012. He is a now a senior engineer. His research concerns TT&C system.

Email: mashunnan@163.com

王 强(1978—),男,吉林白城人,2010 年于大连理工大学获硕士学位,现为工程师,主要从事测控总体工作。

WANG Qiang was born in Baicheng, Jilin Province, in 1978. He received the M. S. degree from Dalian University of Technology in 2010. He is a now an engineer. His research concerns TT&C system.