

# 基于数实结合的测控装备健康监测 系统设计与实现

蒋立民, 王维通, 方宗奎

(中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

**摘要:** 针对测控业务领域装备种类多、型号杂、布站分散、技术保障人力不足、远程技术协助手段落后等实际问题, 结合测控装备自身特点和运维保障规律, 提出了采用数字技术构建功能级数字测控装备, 并利用数字装备和实体装备间物联网使数实装备状态数据一致, 实现基于数实结合的测控装备健康监测, 实现装备状态数实同步, 并可利用数实同步有效的评估装备状态、进行故障诊断和健康趋势预估, 实现了运维保障数字化。

**关键词:** 数实结合; 健康监测; 状态同步; 趋势预估; 数字化

## Design and Implementation of Health Monitoring System of Measurement Equipment Based on Combination of Data and Reality

JIANG Limin, WANG Weitong, FANG Zongkui

(Unit 91245 of PLA, Huludao 125001, China)

**Abstract:** For the problems of multiple types, mixed models, scattered stations, insufficient technical support manpower, and backward remote technical assistance methods of the range measurement equipment, combined with the characteristics of the range measurement equipment itself and the law of operation and maintenance support, digital technology was proposed to build functional digital measurement and control equipment, and the internet of things network between digital equipment and physical equipment was used to make the status data of the digital and real equipment consistent. To realize the health monitoring of measurement and equipment based on the combination of data and reality, realize the data and reality synchronization of equipment status, and use the data and reality synchronization to effectively evaluate the equipment status, fault diagnosis and health trend prediction, and realize the digitalization of operation and maintenance support.

**Keywords:** combination of data and reality; health monitoring; state synchronization; trend prediction; Digitization

### 0 引言

测控装备是测控体系的重要组成部分, 承担着大量试验、训练、演练任务的测控任务, 任务过程中, 测量数据获取、视频图像摄录都需要通过测控装备的跟测来实现, 因此, 测控装备是否能以良好健康状态参试就成为决定一次任务成败的关键因素。良好的健康状态取决于规范、全面、细致的技术保障工作。当前, 控装备种类多、数量大、使用中布站分散, 又因技术保障人力不足, 致使装备使用过程中的技术保障, 由原来基本覆盖全装的伴随式保障转变为对关键装备的伴随式保障+远程技术协助, 从实际效果看, 目前的远程技术协助效果并不理想。

本文根据当前技术保障工作现状和实际需求, 利用数字技术、软件编程技术结合实装信号感知设备, 设计了基于数字装备和实装感知相结合的装备健康监测系统, 系统能够实现对测控装备全生命周期、全工作流程的数字化健康监测<sup>[1]</sup>, 并利用算法实现短期内健康预测, 可有效解决

当前测控装备技术保障领域数字化程度低、远程技术协助手段落后的问题。

### 1 系统原理

系统的工作原理是利用实装上大量状态感知设备, 感知装备实际状态信息, 通过物联网将状态信息传递给构建的数字装备, 实现实装信息到数字装备的实时映射, 实现基于实际装备和数字装备结合下的装备状态监测<sup>[2-6]</sup>。同时, 可通过人工干预或者数据库智能比对的方式进行远程协助技术保障, 并可对状态信息进行记录积累, 进而对装备状态走势做出预测。系统原理示意图如图 1 所示。

#### 1.1 实体装备端

系统设计上, 对于实体装备端而言就是需要采集尽可能全的状态信息。测控装备各个组合、板卡基本都有各自的测试点, 可实现在线测试的端点达到 95% 以上, 因此, 需要解决的就是为实际装备添加状态感知设备, 通过各个测试点感知装备状态信息, 将感知的状态信息汇集到数据

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-02-27。

作者简介: 蒋立民(1979-), 男, 工程师。

引用格式: 蒋立民, 王维通, 方宗奎. 基于数实结合的测控装备健康监测系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 211-217, 224.

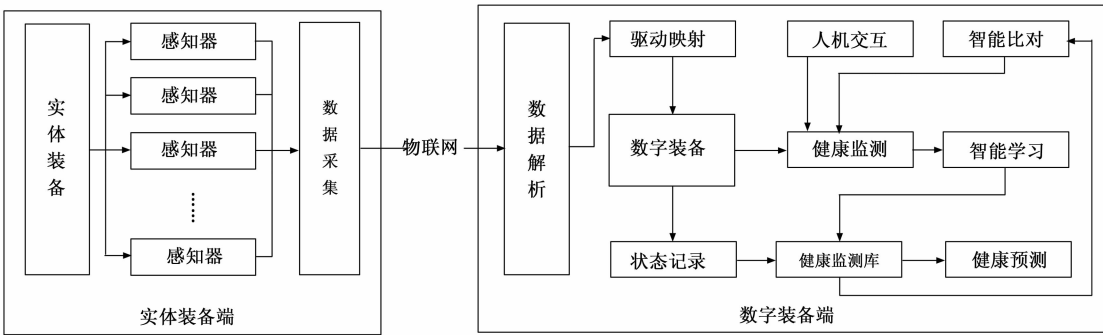


图 1 系统原理示意图

采集设备，进行数据编排，并通过物联网将数据传输到远端数字装备的数据接口上。

1.2 数字装备端

数字装备是实际装备在数字空间的镜像，利用三维建模技术构建数字装备模型<sup>[7]</sup>，利用数据处理技术解析实装状态数据，通过行为映射来驱动数字装与实装状态实时同步，以实现基于数字结合的装备健康监测。同时，对数字装备的状态信息进行记录，构建健康检测库，对人工干预或者智能比对处理的异常情况进行提取记录，利用智能学习迭代更新健康监测库，最后利用算法工具，分析评估健康监测库数据，预测短期内装备健康趋势。

2 数据传输

系统内部数据传输主要包括数据感知、数据预处理、数据采集、数据融合、数据传输、特征量提取和映射赋值等过程，其中：

数据感知是利用感知设备，从装备的组件或板卡预留的测试端点上采集组件或板卡的状态信息，因采集的状态信息多为模拟量，这就需要对采集信息进行 A/D 转换等数据预处理，上述感知和预处理两个步骤通常在感知器内完成；完成预处理的状态数据通过内部端口汇集到数据采集

设备上，通常数据采集设备由计算机和配套的工作软件组成，采集设备按照时间同步，将汇集来的多路数据按照约定好的协议进行数据编排，融合封装，形成网络数据包，数据包通过内部物联网发送给远端数字装备端；数字装备端接收到数据包后，首先要对数据包进行解析，解析过程实际上是数据融合封装的逆向操作，通过解析提取出装备组件标识码及对应的状态信息，根据标识码将各自对应的状态信息发送给驱动映射模块，用以驱动数字装备上对应的板卡组件，上述为一次数据传输的具体流程<sup>[8-12]</sup>，如图 2 所示。

3 数字装备模型构建

数字装备模型构建主要包括实装的三维模型构建和逻辑行为模型构建。

3.1 三维模型构建

测控装备属于复杂的装备，需要建立精细化的几何模型，以更准确地模拟其运行情况。这可以通过采用高精度建模软件或工具来实现，包括 Creo、3d max、Maya 等工具。在建模过程中采用模型轻量化技术和分层设计技术，实现精细化的几何模型设计。在建立三维模型时，需要尽可能地保留实际装备的物理特性和运行状态。这意味着需

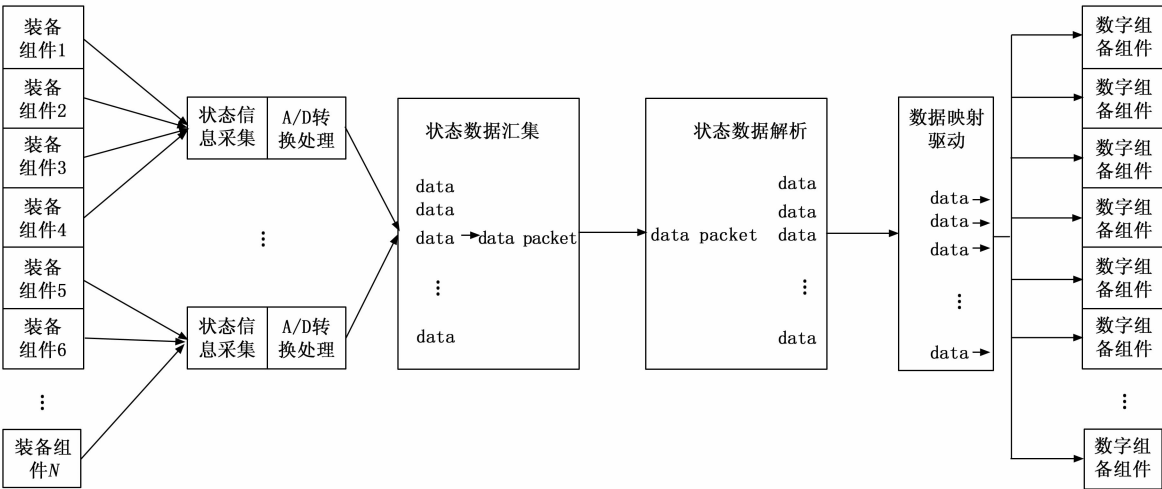


图 2 数据传输流程示意图

要收集更详细、更全面的数据,并在建模过程中充分考虑各种因素,以确保模型的保真度。在建模过程中,模型尺寸采用装备设计的 CAD 图纸中实际的尺寸,模型材质和纹理采用拍摄采集的装备的高清照片进行建模。图 3 中为装备的部分模型示意图。

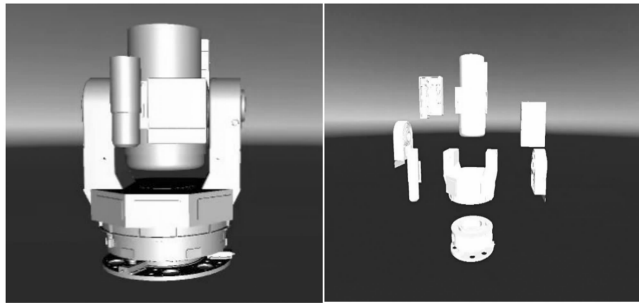


图 3 某装备三维模型及拆解示意图

其中,模型三维构建主要采用计算机图形技术来实现,常用的图形重构技术主要有云点重建、曲面拟合、体素化等技术<sup>[13-16]</sup>,本文在采用工具软件建模的基础上结合采用了曲面拟合技术进行三维模型重构,即利用参数曲面来重构几何规则模型,处理算法采用的 B 样条曲线拟合曲面<sup>[17]</sup>的方法来实现。B 样条曲线可以拟合各种曲线构成的曲面,是广泛应用的图形设计方法。其  $k$  次 B 样条曲线方程为:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n p_i \cdot F_{i,k}(t), t \in [t_k, t_{n+1}] \quad (1)$$

式中,  $p_i, i = 1, \dots, n$  为控制顶点,按照顺序连接生成 B 样条多边形。  $F_{i,k}(t), i = 1, \dots, n$  为  $k$  次 B 样条基函数,  $F_{i,k}(t)$  是一个  $k$  次分段多项式,其表达式:

$$F_{i,k}(t) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{k-i} (-1)^j \cdot c_{k+1}^j \cdot (t+k-j)^k, t \in [t_k, t_{n+1}] \quad (2)$$

式中,

$$c_{k+1}^j = [j! \cdot (k+1-j)!] / (k+1)! \quad (3)$$

根据三维模型的应用需求,在建立装备模型时遵循以下原则:

- 1) 模型完整性。在建模过程中,需要确保模型的完整性,三维模型能够表征装备总体结构布局和形态特征。
- 2) 物理特性模拟。模型应能够准确模拟装备的物理特性,如结构、材料等。
- 3) 模型的层级。在建模过程中,按照层级构建,从系统到分系统到组合,一直到插件,分层级进行建模,最小粒度到插件级,同时三维模型能够模拟装备的正常状态和故障状态,突出显示故障状态和恢复状态。

三维模型构建完成后,各个板卡组件的模型均具有信息关联接口,用以和行为驱动数据进行关联,实现信息流程和行为逻辑的可视化。

### 3.2 逻辑行为模型构建

对于测控装备而言,装备的工作原理、内部信息流程、系统组件间的逻辑关系在装备制造完成后就可看作为固化

的定量,因此,构建装备的初始逻辑行为模型实际上就是对装备工作原理、内部信息流程和系统组件间逻辑关系的数字化表达。考虑到实际装备原理的复杂、内部信息流程和逻辑关系的繁杂,初始模型的构建采用软件编程来实现,软件流程如图 4 所示。

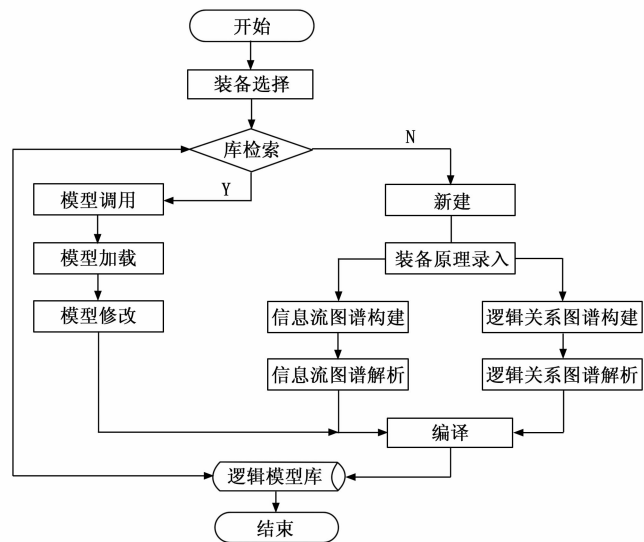


图 4 逻辑模型构建流程图

在初始模型构建<sup>[18-19]</sup>过程中,装备工作原理的录入主要采用人机交互的方式,工作量较大且准确性要求较高,首次录入时需要人工反复校验以确保原理准确。工作原理录入后,以系统原理为基础确定系统内部信息流程图谱和逻辑行为图谱。因测控装备内部信息流过于复杂且实际状态监测过程中也只需要监测到板卡级,因此,本文流程图谱和逻辑行为图谱构建也只到板卡级,对板卡内部信息流程和逻辑关系不作考虑,并且与实装感知设备节点相对应。

在初始模型构建过程中,装备工作原理的录入主要采用人机交互的方式,工作量较大且准确性要求较高,首次录入时需要人工反复校验以确保原理准确。工作原理录入后,以系统原理为基础确定系统内部信息流程图谱和逻辑行为图谱。因测控装备内部信息流过于复杂且实际状态监测过程中也只需要监测到板卡级,因此,本文流程图谱和逻辑行为图谱构建也只到板卡级,对板卡内部信息流程和逻辑关系不作考虑,并且与实装感知设备节点相对应。

信息流程图谱是以系统工作原理为基础确立,是系统原理、内部信息流的图形方式表述,主要是构建系统内部信息流程的参与者、信息流程、确定行为事件、建立行为规则等的图谱,来描述系统信息流程,图谱构建完成后,利用软件工具逆向解析图谱,得到数字化表达的系统信息流程。

逻辑关系图谱同样是以系统工作原理为基础构建,通过绘制状态转换图来描述系统状态转换的关系、确定状态转换触发事件、产生状态转换表征等,图谱构建完成后,利用软件工具逆向解析图谱,得到数字化表达的内部逻辑

关系。

在信息流程和内部逻辑关系图谱完成逆向解析产生数字化表达数字量值后,通过编译器完成对信息流程和逻辑关系的编译,完成逻辑行为模型的构建。

### 2.3 逻辑行为模型校验

逻辑行为模型建立后,要利用特定的方法验证模型的正确性和可行性,查找并修正模型建立过程中可能存在的问题和错误,本文采用的是实测映射比较法来校验模型,即通过比较实际测量的状态信息的映射量值与逻辑模型仿真量值来验证逻辑行为模型。校验过程如图 5 所示。

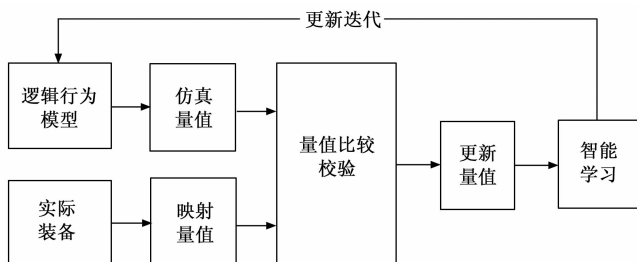


图 5 模型校验过程示意图

模型校验过程中,实际上是以实际装备通过感知器得到的状态信息为真值进行校验,因此在校验开展前,为确保实装上感知器采集的系统状态信息的准确性,首先要对实际装备进行一次彻底、全面的装备状态验证、系统性标定,保障装备各个系统、工作模块处于良好的性能状态,而后再行开展模型校验。模型校验过程中,首先利用逻辑行为模型得到与实装感知设备对应节点的仿真量值  $F_i$ ,其中  $i$  感知器对应编号,根据内部协议约定,表达式为:

$$F_i = \{f_1, f_2, \dots, f_i\} \quad (4)$$

仿真量值集合构建完成后,将仿真量值作为量值比较校验的待验量送往量值比较器。

同时,将实装上感知器采集的实测信息在校验平台上的映射量值以同样方式构建集合  $S_i$ ,其中  $i$  感知器对应编号,根据内部协议约定,表达式为:

$$S_i = \{s_1, s_2, \dots, s_i\} \quad (5)$$

映射量值集合构建完成后,将映射量值作为量值比较校验的真值量送往量值比较器。

需要注意的是,  $F_i$  与  $S_i$  均为随着时间变化的实时量,因比较器运行时是自动以时刻取齐,比较同一时刻下的映射值与仿真值,所以表述中不在对时刻作特殊强调。量值比较校验过程中就是将相同感知器编码的仿真量值与映射量值作差值比较,确定  $f_i - s_i \neq 0$  时的  $f_i$  为异常量值,当校验过程中出现异常量值时,用当前时刻  $s_i$  替换  $f_i$  更新量值完成修正模型,因上述过程是在实际装备完全处于良好的技术状态下进行,对装备系统的异常状态未作出验证,所以还需在实际应用过程中利用智能学习算法不断修正完善逻辑模型。

## 4 智能学习

数据的采集、传输、处理等过程,目的都是为了给远

端基于数字装备的健康监测提供数据源和可视化的监测场景,当系统提示异常或故障告警时,需要人工参与判定异常现象及提出处理方案,由于测控装备种类多,型号杂,作为判定参与者的技术人员未必能完全掌握光学、雷达、遥测装备的全方面的知识,这时就需要有辅助手段来帮助技术人员来完成异常情况的处理。本文设计的系统是通过智能检索构建的健康检测库来辅助技术人员判定异常情况并给出解决方案,同时利用智能算法学习人工处理异常情况的全过程,迭代更新健康监测库,是健康监测库更完善、更全面。其中,智能检索是利用异常提示或故障告警的关键表征信息为关键字,检索健康检测库,如检索到相关内容以人机交互窗口反馈给技术人员,如未检索到相关记录,反馈提示技术人员无相关信息,并建议人工干预。在技术人员进行人工干预的同时,系统启动智能学习功能,根据故障表征、人工解决方法等信息进行学习记录,完成案例学习。系统流程如图 6 所示。

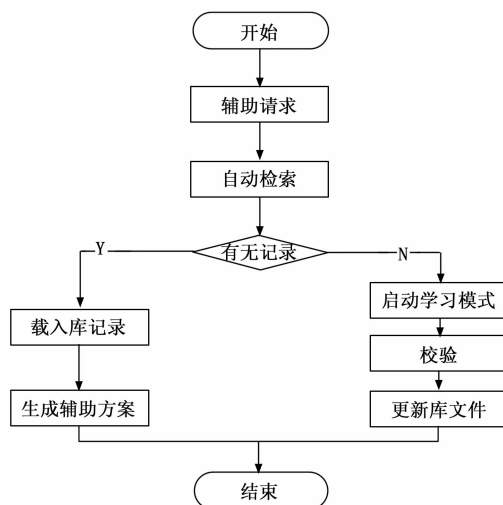


图 6 检索与学习流程示意图

### 4.1 自动检索

自动检索采用的是有信息的启发式检索。健康监测库在构建过程中采用了故障树构建机理,由四层特征量所标识关键检索节点,第一层为装备名称标识码;第二层为状态标识码,包括故障状态和异常状态;第三层为感知器编码;第四层感知器接口编码。检索过程中首先,系统根据出现异常或故障装备的反馈信息确定所属装备,完成库文件第一次筛选,得到对应装备的库文件;而后根据状态标识码进行第二次筛选,得到该装备对应状态的库文件;再根据感知器编码进行第三次筛选,确定该装备在目前状态下对应感知器的库文件;最后根据感知器接口编码进行第四次检索,确定异常或故障的装备组件,读取对应的困文件,为技术人员提供异常或故障机理和解决方案。整个检索过程是根据感知的状态改变和发生状态改变部位对应的四层编码由系统自主完成,也可人工辅助的方式进行。

## 4.2 智能学习

在检索的过程中存在健康检测库内查无记录的情况, 该情况是由于库文件建立不够全面或者该状态信息表征的实际异常为首次产生。当出现此类情况时, 系统会自动弹窗提示人工干预, 同时根据状态信息对应的装备名称标识码、状态标识码、感知器编码和感知器接口编码为标识, 构建知识库检索特征节点, 以人工排除异常状态的人机交互过程为输入量, 利用神经网络学习算法<sup>[20]</sup>完成知识学习, 生成学习记录, 技术人员对学习记录进行人工校验和修改完善后更新到健康监测库当中, 实现对健康监测库的不断完善。本文采用的神经网络如图 7 所示。

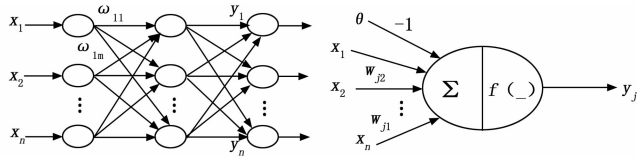


图 7 神经网络及神经元示意图

如图所示, 该神经网络具有递阶分层结构, 由同层间不存在相互交连的神经元组成, 从输入层的  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  至输出层的  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$  的信号通过单向连接传输, 其神经元的模型如图 7 所示。

该神经元每个单元由多个输入元  $x_i$  和一个输出元  $y$  组成, 其中  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , 过程的中间状态由输入量的权和来表示, 输出量可表示为:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ji} x_i - \theta_j\right) \quad (6)$$

式中,  $\theta_j$  为神经元单元的阈值,  $\omega_{ji}$  为连接权系数,  $n$  为输入量值数目,  $y_i$  为神经元输出,  $f(\_)$  为输出激励函数, 通常情况下  $f(\_)$  采用二值函数 (0 或 1) 或 S 形函数表示, 函数都是连续和非线性的, 本文采用的 S 形函数表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}, 0 < f(x) < 1 \quad (7)$$

因 S 形函数输出量均为真值, 实际过程中的输出量可能为负责, 所以应用过程中常用双曲正切函数来取代 S 形函数, 双曲正切函数表达式为:

$$f(x) = \frac{1 - e^{-ax}}{1 + e^{-ax}}, -1 < f(x) < 1 \quad (8)$$

## 5 健康预测

测控装备在实际使用过程中, 随着时间的推移, 其内部的各个组件的健康状态也会发生改变, 进而影响到装备整体的性能。通常情况下, 我们采取的是对装备进行定期的技术状态检测来确认装备技术状态, 这种方式工作量大、周期较长, 需要耗费较大大力。本文设计的健康监测系统在构建起来后可很好的解决这个问题, 系统在监测装备各个组件的健康状态的同时将健康装备记录, 利用算法分析一定时间段内组件状态值所处的状态区间及趋近的状态阈值, 来预测健康状态的走势, 绘制状态变化趋势曲线使健康状态图形化、可视化, 辅助技术保障人员对装备运维方

案的制定。某一时间端内状态估算过程如下:

1) 通过健康状态监测记录每次装备开机运行后各个组件的状态检测量值, 构建量值集  $S_{it}$ ,  $n$  是装备组件标识码,  $t$  是时间,  $S_{it}$  可表示为:

$$S_{it} = \begin{bmatrix} S_{1t_1}, S_{1t_2}, \dots, S_{1t_i} \\ S_{2t_1}, S_{2t_2}, \dots, S_{2t_i} \\ \dots \\ S_{nt_1}, S_{nt_2}, \dots, S_{nt_i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2) 根据测算需求, 从  $S_{it}$  中选取要进行健康预测的组件状态检测量值集  $\{s_{t_1}, s_{t_2}, \dots, s_{t_i}\}$ , 从库文件中提取该组件状态阈值及对应的状态信息;

3) 以时间  $t$  为横轴, 以状态量  $S$  为纵轴绘制二维坐标系;

4) 以组件的状态阈值为边界线, 绘制状态阈值边界, 如图 8 所示。

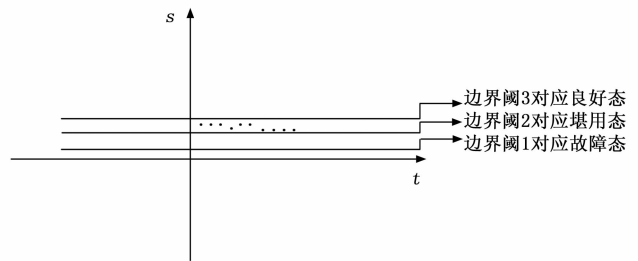


图 8 阈值划分示意图

通常情况下, 我们根据组件健康监测量值集的各个量值连接的曲线变化来查看装备健康走势, 也可根据一段时间  $k$  内统计的组件健康监测量值的平均值与边界阈值做比较来认定  $k$  时间内装备健康状态。假如需要统计的时间段  $k$  对应的组件状态检测量值集为  $\{s_t, s_{t+1}, \dots, s_{t+k}\}$ , 则  $k$  时间段内组件的状态量值可表示为:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^k s_i}{k} \quad (10)$$

利用得到的  $s$  值与组件的阈值比较, 当  $s$  从趋近于良好态向逐渐趋近于堪用态变化时, 说明组件性能在逐渐变差, 可酌情处理; 当  $s$  从趋近于堪用态向逐渐趋近于故障态变化时, 说明组件已经位于使用寿命临界, 应当及时更换。另外当装备状态逐渐趋近于堪用态时应适当开展技术状态的预测, 可采用多层感知机算法开展健康度的趋势预测。算法以历史组件的评估结果为输入, 通过多层神经网络的线性组合与非线性变换, 输出时间维度上未来的健康度预测趋势, 并结合预定的故障阈值实现故障预报。其算法流程如下。

假如采用的样本空间中有  $n$  个量值样本, 表示为:

$$S_i = \{x_{i1}, \dots, x_{im}, \hat{y}_{i1}, \dots, \hat{y}_{ij}\}, i = 1, \dots, n \quad (11)$$

样本  $i$  通过神经网络后的输出的量值为:

$$y_i = \{y_n, \dots, y_{it}\} \quad (12)$$

假设算法神经网络有  $T$  层结构, 其中第 1 层为输入层,

第  $T$  层为输出层, 第 2 到第  $T-1$  层为隐藏层, 连接权值矩阵为:

$$W^t = [w'_{i',x_{t+1}}], t = 1, \dots, T-1 \quad (13)$$

层间的偏置值为:

$$b^t = (b'_1, \dots, b'_{s_t}) \quad (14)$$

其中:  $s_t, s_{t+1}$  分别表示第  $t$  与  $t+1$  层节点的个数。

使用 BP 梯度下降算法对网络中的各权值进行更新, 获得目标函数极小值。按照梯度下降公式得各层之间的连接权值与偏置的更新方程为:

$$w'_{ij} = w'_{ij} - \alpha \frac{\partial F}{\partial w'_{ij}}, b'_{ij} = b'_{ij} - \alpha \frac{\partial F}{\partial b'_{ij}} \quad (15)$$

其中:  $\alpha \in (0, +\infty)$  为学习速率,  $i$  表示第  $t$  层的第  $i$  个节点,  $j$  表示第  $t+1$  层的第  $j$  个节点。每一层的权重梯度都等于这一层权重所连接的前一层的输入乘以所连接后一层的反向输出。

## 6 实际应用

本文设计的数实结合测控装备健康监测系统完成设计后, 在某型测控装备上进行了实际应用, 检测了设计方法的可行性。

### 6.1 健康检测应用

根据前文设计的健康监测方法, 利用 3d max、Microsoft Visual C++、MATLAB 等三维建模与程序开发平台, 开发装备三维模型和健康监测应用软件, 通过软件将构建方法转化为实际运用, 软件界面如图 9 (a) 所示。

实现过程: 首先软件运行后, 将系统与设备联机, 联机过程中实装到数字装备的映射完成情况会通过后台自检的模式完成测试, 软件界面中心区域的数字装备模型会随着装备运动进行实时同步联动以表示自己完成且正常, 主界面除显示数字装备联动状态外, 还对装备整体和分系统级的实时状态进行显示, 插箱级和板卡组件的状态如需关注, 需点选进行观测; 如装备内部某系统出现异常或者故障, 软件将自动加载对应系统的数字模型, 并以红色警示色提升, 如图 9 (b) 所示。

当出现异常或故障警示且系统给出具体具体部位通过数字模型显示后, 技术人员可鼠标点击红色警示组件, 系统将给出具体故障原因和处理方案。如图 10 所示。

技术人员可根据弹窗内故障信息栏内的信息来确认故障的系统及系统内具体的组件、故障组件对应的组件编码, 对应的感知器编码; 然后根据处置方案信息栏内给出的具体处置方案解决故障, 如组件损坏需更换的情况下, 特殊提示信息栏还会给出当前组件备件的数量和状态, 并根据情况提示购置或维修备件。实际使用过程中, 从事无线电测量专业的技术人员也能够利用该系统辅助处置光学测量装备的故障, 很好的解决了技术保障人力不足的问题。

### 6.2 健康预测应用

根据前文健康预测方法, 利用 Microsoft Visual C++ 程序开发平台, 开发健康预测应用软件, 通过软件将构建



(a)



(b)

图 9 (a, b) 健康检测软件界面



图 10 软件故障信息弹窗界面

方法转化为实际运用, 软件界面如图 11 所示。

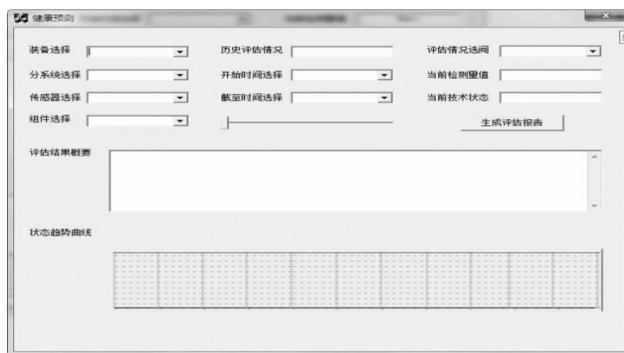


图 11 健康评估预测软件界面

表 1 采样量值统计表

记录时间	11.13	11.16	11.18	11.25	11.27	12.01	12.02	12.07	12.11	12.12.	12.13	12.19	12.21
软件在线	2.73	2.75	2.68	2.77	2.8	2.69	2.66	2.64	2.64	2.63	2.61	2.62	2.59
人工本地	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.7	2.7	/	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
差值对比	0.03	0.05	0.02	0.03	0	0.01	0.04	/	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01

通过健康预测软件可实现对装备组件的健康评估与预测，首先在软件运行状态下依次选择要进行状态评估的装备、装备的分系统、分系统所属的感知器编码、组件编码；然后软件系统会根据选择情况自动调用对应的库文件；再根据实际需要选择评估开始时间和截至时间，在截至时间选择后，软件将自动开始进行评估分析，并给出结果摘要和绘制状态趋势曲线，后台将记录评估结果更新库文件。同时，可根据需要选阅历史评估记录，在软件运行状态还可实时查看组件当前状态检测值和对应的技术状态。评估流程完成后可根据需求选择是否生成评估报告文本，如选择生成，软件将创建生成报告的.doc 格式文本。

实际应用过程：选取某型经纬仪的伺服分系统的伺服控制组件进行评测，以装备在 2023 年 11 月 13 日至 12 月 21 日这段时间内 13 次开机运行所记录的状态监测量为源值进行评估，软件评估过程及结果如图 12 所示。

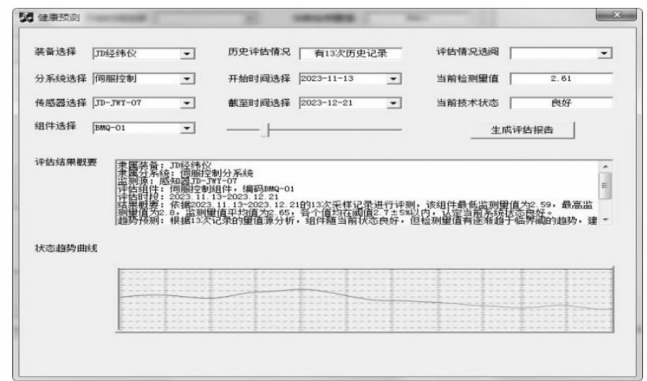


图 12 健康评测过程界面截图

如图 12，依据 2023 年 11 月 13 日至 12 月 21 日这段时间内 13 次采样记录进行评估，该组件最低监测量值为 2.59，最高监测量值为 2.8，监测量值平均值为 2.68，各个值均在阈值  $2.7 \pm 5\%$  以内，认定当前系统状态良好。另外，软件界面中的状态趋势曲线可看出，曲线由绿色变为了深黄色，这表示组件的状态由良好状态变为趋近于临界值的亚健康状态，在软件的“评估结果摘要”栏内也给出了相关提示，跟据该提示被测组件应该进行系统性的维修检测，以消除未来一段时间内的故障隐患。在本次测试后，未对该组件进行维修维护，该组件于 2024 年 1 月 29 日出现故障，导致装备整机无法正常工作，侧面验证了该软件的状态预测能力。

为验证健康监测系统的状态评测功能的准确性，在 13 次采样的过程中，装备本地操管人员采用人工测试的方式，

同样记录了该组件的状态量值，将之与健康监测系统在线测试记录的结果进行了对比验证，如表 1 所示。

由表 1 内的数据量值可以看出，软件在线监测记录的量值与人工在装备本地记录的量值差异（人工 12.07 漏记 1 次）均值在 0.03 左右，考虑到人工记录时，是通过人工观测表针读取量值的方式，因测试表最小刻度为 0.1，无法读取小数点后第二位，因此，可以认为软件在线监测记录的量值与人工在装备本地记录的量值差异值可忽略。经此验证，健康监测系统的状态评测功能的准确性是可信的，能够实现装备状态监测值评估功能。

7 结束语

为解决测控业务领域装备种类多、型号杂、布站分散、技术保障人力不足、远程技术协助手段落后等实际问题，通过前文设计的方式方法，利用成熟的数学算法结合计算机建模、智能学习方式构建了测控装备健康监测系统，在此基础上，利用 Microsoft Visual C++ 编程开发的软件与实际装备结合，实现了在某型测控装备上的实际应用，实现了基于数实结合的测控装备健康监测。结果表明设计可行，利用本设计建立的健康检测系统，能够实现装备状态数实同步，远程技术支持可利用数实同步有效的评估装备状态、进行故障诊断和健康趋势预估，实现了运维保障数字化。该方式具有较好的实用价值，可推广至以测控为智能的单位所有测控装备上，目前对于系统的健康评估预测功能只做到了组件级，对于分系统或装备整机的健康评估预测的能力还都具体，这也是下一步需具体完善和努力的方向。

参考文献：

[1] 洛 刚，尚 娜，等. 国家靶场开展装备作战试验问题研究 [J]. 装备学院学报, 2013, 24 (1) : 114-118.

[2] 陆剑锋，张 浩，赵荣泳. 数字孪生技术与工程实践 [M]. 北京：机械工业出版社，2022.

[3] 方志刚. 复杂装备系统数字孪生 [M]. 北京：机械工业出版社，2022.

[4] 梁乃明. 数字孪生实战 [M]. 北京：机械工业出版社，2023.

[5] 王 鹏，祝建成，彭 勇. 数字孪生驱动战场复杂电磁环境建模与仿真 [M]. 北京：电子工业出版社，2023.

[6] 陶 飞，刘蔚然，等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24 (1): 1-18.

[7] 赵浩然，刘检华，等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (6): 1432-1433.

(下转第 224 页)