

团 体 标 准

T/GITIF XXX—2021

基于信息物理系统（CPS）的产线设备故障 预测

Fault Prediction of Production Line Equipment based on CPS

（征求意见稿）

2021—XX—XX 发布

2021—XX—XX 实施

广东省电子信息联合会 发布

目 次

前言.....	2
1 范围.....	3
2 规范性引用文件.....	3
3 术语和定义.....	3
4 缩 略 语	3
5 故障预测要求	4
6 故障预测设计流程	4
7 预测方法的选取原则	6
8 故障预测方法	7
9 预测报告	9
附录 A 预测报告例子.....	10

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本标准由工业和信息化部电子第五研究所提出。

本标准由广东省电子信息联合会归口。

本标准起草单位：工业和信息化部电子第五研究所，中车工业研究院有限公司，清华大学工业工程系，中车青岛四方车辆研究所有限公司，中车永济电机有限公司。

本标准主要起草人：孟冬辉，付云骁，李彦夫，王黎明，齐影，袁超，何世烈，李晓华，钱敏，田寅，陈勇坤，周振威，时林林，刘俊斌，俞鹏飞等。

基于信息物理系统（CPS）的产线设备故障预测

1 范围

本规范规定了产线设备故障预测技术的通用要求和验收评价规则等内容。

本规范适用于产线设备 PHM 系统故障预测技术与配套模块论证、设计、检验等寿命周期过程。

2 规范性引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本规范的条款。凡是注明日期的引用文件，其随后所有的更改单（不包含勘误的内容）或修订版本均不适用于本规范，然而，鼓励根据本规范达成协议的各方研究是否使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本规范。

GJB 451A-2005 可靠性维修性保障性术语

GJB 841-1990 故障报告、分析和纠正措施系统

3 术语和定义

3.1

预测时间 test time

用来表征PHM系统在故障预测期间内完成预测所耗费的时间。

3.2

稳定度 stability

用于反映在同一损伤尺度下检测置信度的波动情况。

3.3

载荷灵敏度 load sensitivity

描述不同工作应力水平下检测置信水平的变化。

3.4

平均绝对百分比误差 MAPE

真实值和预测值之差的绝对值与真实值之比的平均值。

3.5

剩余寿命 diagnosis coverage

产品可以继续可靠工作的时间。

注：时间的单位可以是天数、循环周期数，也可以是公里数等

3.6

预测置信水平 diagnosis the confidence level

计算的可靠度能达到或改善的可能性估计。

注1：预测置信水平是指示预测值正确程度的指标。

注2：预测置信水平由预测置信因子决定。

4 缩略语

下列缩略语适用于本标准。

PHM——Prognostic and Health Management，故障预测与健康管理；

FMEA——Failure Mode and Effects Analysis，故障类型与影响分析；

RCM——Reliability-Centered Maintenance，以可靠性为中心的维修；

CBM——Condition based Maintenance，视情维修体系；
KB——Knowledge Base，知识库；
FM——Fault Mode，故障模式。

5 故障预测要求

故障诊断和故障预测在某种意义上，它们都是一种推理过程，故障诊断技术规范中关于推理的要求对故障预测同样适用。

- 构建故障预测系统的基本原则与通用要求主要包括以下几方面：
- 前置数据处理方法的多样性；
 - 预测算法和推理机制的多样性；
 - 自适应能力；
 - 自学习能力；
 - 独立原则，知识库、征兆库与推理机相分离；
 - 知识库可维护原则，用户可方便对知识库进行维护；
 - 可扩充性，人工或自动对知识库进行扩充、求精或学习；
 - 知识库中的知识表达直观易懂，知识表示方法要能充分反映知识间的各种关系；
 - 强的解释能力；
 - 数据管理与获取能力强大，自动获取与提取监测数据库中信息特征；
 - 推理机制与知识表达有较强的处理小确定性知识与数据的能力；
 - 通用性和实用性原则。

6 故障预测设计流程

故障预测技术是比故障诊断更高级的维修保障形式，它以当前装备的使用状态为起点，结合已知预测对象的结构特性、参数、环境条件及历史数据，对装备未来的故障进行预测、分析和判断，确定故障性质、类别、程度、原因及部位，指出故障发展趋势及后果，以便预先消除故障，保证训练和作战任务的顺利完成。



图 1 故障预测设计流程

6.1 确定预测需求

故障预测按时间长短可分为短期故障预测和长期故障预测，不同的预测方法对短期和长期的故障预测效果是不同的。如基于时间序列模型的方法适用于序列变化比较均匀的短期预测情况，不适合于中长期预测；而基于故障预兆监控和推理的方法依赖于输入的历史数据，当历史数据均为短期内时，适用于短期预测，而当历史数据为长期数据时，则适用于长期预测；灰色预测模型是一个指数函数，如果预测量是在以某一指数规律发展的，则可望得到较高精度的预测结果，比较适合短期预测，但对于长期预测，灰色预测方法精度不高。因此应明确预测对象的预测需求，明确预测的时间长短、参数要求和历史数据等。

6.2 确定故障类型

不同的故障预测系统可能适合不同的故障类型，因此虽对设备的故障类型进行确定。电子设备的故障从故障发生的时间历程可分为两类，即突发性故障和渐进性故障。突发性故障是由于系统外部原因对系统冲击而造成的，它在发生之前所表现的征兆是不明显的，且征兆没有确定性的发展趋势，难以通过对其的征兆进行监测，这种故障表现出较强的随机性。渐近性故障是由于系统参数的逐步劣化产生的，这种故障能够状态监测进行早期预测，正常使用下一般在其有效寿命的后期表现出来。

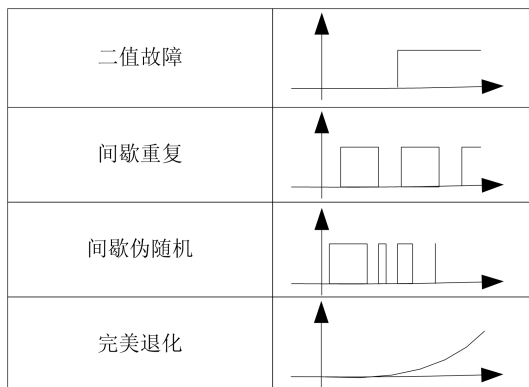


图 2 故障的几种形式

故障类型有不同的表现形式，图 2 给出了常见的几种形式。其中，二值型故障是指简单的故障/无故障情形，这种故障很容易进行检测，但不得于进行有效的预测；间歇重复型故障也可以被简单推理和高级时间特征集关联组合等手段隔离出来，但由于本质上还是二值的，因此不利于预测；间歇伪随机型故障难于隔离，也难于预测；完美退化型故障可以使用系统模型和时间关联跟踪参数方法进行检测和预测，同时这种故障也是最适合进行预测的故障。

6.3 分析支撑数据

电子设备的故障预测是以数据状态为起点，结合已知预测对象的结构特性、参数、环境条件及历史数据，这些数据统称为故障预测的支撑数据。不同的故障预测方法需要不同的数据作支撑，如基于保险和预警装置方法需要预测对象的结构特性、参数、环境条件等；基于模型的方法需要预测对象的物理模型或者数学模型，具体为工作机理、失效机理、退化形式和模型；基于故障预兆监控和推理的方法需要故障历史数据、观测序列、连续状态序列、系统拓扑结构和部件先验概率、条件概率等。

在此阶段，应分析支撑数据的类型和程度，为选择预测方法提供基础。

6.4 选择预测方法

针对不同的对象和数据特点，用于故障预测的方法通常是不同的。目前可用于故障预测的方法包括基于保险和预警装置的故障预测方法、基于模型的故障预测方法、基于规则的专家系统预测方法、基于神经网络的预测方法、多传感器信息融合的故障预测方法等多种，在选择诊断方法时应综合考虑预测需求、对象特点、预测要求、数据特点等多项因素。

7 预测方法的选取原则

7.1 预测方法适用性

统计法所用技术比较成熟，预测过程简单。但统计模型误差较大，外推特性差。该方法还要求样本量大且有较好的分布规律。当预测的长度大于已有的原始数据长度时，采用该方法进行预测在理论上不能保证预测结果的精度。另外，可能出现量化结果与定性分析结果不符的现象，有时也难以找到合适的统计类型。

时间序列分析法所需历史数据少、工作量少，但它要求影响预测对象的各因素不发生突变，因此，它适用于序列变化比较均匀的短期预测情况，不适合于作中长期预测。

灰色预测模型是一个指数函数，如果预测量是以某一指数规律发展的，则可期望得到较高精度的预测结果。灰色预测可用于故障的短期预测和长期预测。但对于长期预测，灰色预测方法精度不高。

神经网络具有较强的非线性映射能力，能逼近任意非线性函数，因而能较好地反映出装备实际工作状态的发展趋势与状态信号之间的关系。另外，神经网络能进行多参数、多步预测，动态自适应能力强，适合非线性复杂系统的智能预测。但它也存在难以对所得结果作出合理解释、网络训练时间较长、输入变量和隐含层数及节点数选取困难、极易陷入局部最小值等缺点。尽管存在着上述缺点，应该看到神经网络为预测技术的发展开辟了一条新的道路，其发展前景是不容置疑的。

专家系统预测技术主要用于那些没有精确数学模型或很难建立数学模型的复杂系统，特别在非线性系统领域被认为是一种很有前景的方法。然而，一个实用的预测专家系统的研制需要较长时间原始资料的积累和模型修正，开发周期长。另外，专家的知识是经过大量实践而形成的，且未能形成统一的知识标准，有可能导致在综合各个专家知识时存在着偏差和失误。

SVM 应用于故障预测的两大优势在于：

a) 小样本学习。

统计学理论致力于寻求小样本情况下学习问题的最优解，而不需要利用样本数趋于无穷大的渐进性条件。SVM 是在统计学理论框架的基础上发展起来的一种新的机器学习方法，适合于小样本决策。而工程系统故障样本的获取又有一定的困难，解决有限样本的故障预测问题体现出了 SVM 实际应用的优越性。

b) 学习能力强。

SVM 基于结构风险最小化原则，表现出了很强的学习能力和泛化能力，可以很好地克服局部极小点、维数灾难以及过拟合等传统机器学习方法所不可避免的问题。所以说，SVM 能够在有限特征信息情况下，最大限度地发掘数据中隐含的分类知识，对未来的故障信息进行状态预测，提高系统的整体预测性能。

7.2 选取方法

对于失效物理模型或者数学模型比较明确的对象系统，可选择基于物理模型的预测方法；

对于较难得到失效物理模型或者数学模型，但是可以通过预测手段得到历史预测数据，可选用时间序列法、卡尔曼滤波、隐马尔科夫或灰色模型建立数学模型进行故障预测；

对于预测对象成本不高，退化过程平稳，只需在预测对象在失效前给出报警信号的情况，可选择基于保险预警装置方法；

对于较难得到失效物理模型或者数学模型，但是可以得到若干样本的情况，可选择基于故障预兆监控和推理的方法。

8 故障预测方法

故障预测方法在总体上分为三大类：基于保险和预警装置的方法、基于模型的方法和基于故障预兆监控和推理的方法。

8.1 基于保险和预警装置的方法

该方法又叫损伤标尺法，是通过在实际产品中增加保险或预警装置来提供故障的早期警告。这种方法借鉴了采矿行业利用金丝雀的死亡来警告有害气体存在，提示矿工赶快离开矿区隧道的原理。基于对被监控对象特定失效机理的认识，保险或预警装置可以做到定量设计，其预期寿命一般都比被监控对象短。通过一系列不同健壮程度的保险或预警装置，可以实现电子产品损伤过程的连续定量监控,解决 LCM 方法累计损伤程度难以证实的问题。

8.2 基于模型的方法

该方法基于产品的失效物理模型，对产品的环境应力和工作应力进行监测和累计损伤计算，进而推断出产品的剩余寿命。基于模型的故障预测技术，有多项式曲线拟合、主观概率预测、卡尔曼滤波器、时间序列法、灰色模型等。这类方法优点，是能够深入描述对象系统本质的性质，并且能够实现实时故障预测；缺点是需要已知对象系统的数学模型，若模型的假设与实际不符，预测性能就会很差。对于复杂系统来说，很难建立精确的数学模型，所以该方法的应用受到一定限制。

模型分为两类：一种是物理模型，通过研究物理、化学和生物作用机理获得；一种是回归数据模型，通过分析输入、输出和状态参数之间的关系获得，如卡尔曼状态估计模型、ARMA 模型和隐马尔科夫模型。

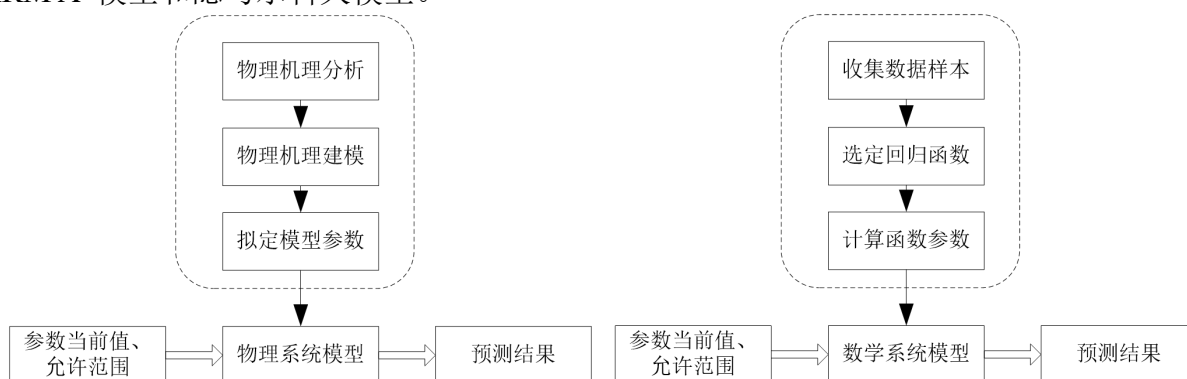


图3 基本模型的预测过程

8.21 时间序列法

时间序列预测法是一种历史资料延伸预测，也称历史引伸预测法。是以时间数列所能反映的故障现象的发展过程和规律性，进行引伸外推，预测其发展趋势的方法。

时间序列法的主要方法为 ARMA，ARMA 由自回归过程(Auto-regressive model,AR)和移动平均过程(Moving Average model,MA)两部分组成。

8.22 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种高效率的递归滤波器(自回归滤波器),它能够从一系列的不完全及包含噪声的测量中,估计动态系统的状态。

8.23 隐马尔科夫模型(HMM)

隐马尔可夫模型理论用一个隐变量序列来模拟系统动态行为的变化,模型的状态掩盖在系统的观测变量之中,这也就是隐马尔可夫模型名称的由来。HMM 是一种参数化模型,实践中它的参数集合可以通过实际观测到的试验数据集合运用统计方法而获得。

HMM 之所以得到了广泛的应用,是因为这种模型既反映了对象的随机性,又反映了对象的潜在基本结构,便于利用被研究对象的直观先验知识;另外 HMM 具有严格的数学结构,算法易于硬件实现。但是 HMM 也存在着不足之处:首先, HMM 是一种模式识别方法,强调的是其分类能力,但缺乏对故障本身的描述信息,而且对模型的学习参数不能完全恰当的解释; HMM 的初始模型的选取仍是一个悬而未决的问题,仅是凭经验选取;而且对于隐藏状态的物理意义不能给出恰如其分的解释。

8.24 灰色模型

灰色模型将一切随机变量看作是在一定范围内变化的灰色变量,通过对灰色变量进行数据处理,将杂乱无章的原始数据整理成规律性较强的生成数据来加以研究。在对模型的精度和可信度进行校验并修正后,即可用来进行预测。灰色预测模型是一个指数函数,如果预测量是以某一指数规律发展的,则可望得到较高精度的预测结果。灰色预测可用于故障的短期预测和长期预测。但对于长期预测,灰色预测方法精度不高。

8.3 基于故障预兆监控和推理的方法

该方法利用可以测量的产品性能期考状态变量的变化趋势、故障征兆等进行故障的预测。目前,在故障预测的工程应用和研究中,使用最多的方法需要选择对产品的故障敏感或者直接/间接受到故障影响的性能/状态变量进行监测。

8.31 基于统计学的故障预测

利用故障历史数据,拟合统计失效分布(如威布尔分布、指数分布)等,当可靠度达到某一个预先设定的值时,便认为该设备失效。利用这些信息,对系统当前的可靠度进行评定,从而计算出预测结果。目前对于复杂系统故障预测多数所采用的为此方法,虽然利用统计学方法可以进行故障预测,但却存在一定的问题,例如:缺少系统物理模型支持,预测值不够准确;对于环境影响等因素描述不够量化,进行数据统计时费时费力。

8.32 神经网络(NN)

神经网络在设备故障预测领域中的应用主要集中在以下两个方面:一是从模式识别的角度应用其作为分类器进行故障预测,二是将神经网络与其他预测方法结合而形成复合故障预测方法。

8.33 支持向量机(SVM)

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是人们根据统计学理论提出的一种机器学习方法。它是建立在统计学理论 VC 维理论和结构风险最小原理基础上的,综合考虑了样本误差和模型的复杂度,以及实际风险的两个决定因素:经验风险和置信范围,有效地解决了复杂性与推广能力之间的矛盾。

在故障预测中,支持向量机引入了一种新的损失函数— ϵ 不敏感损失函数,将模式识别问题中的估计指示函数得到的结论推广到回归估计中的估计实函数中,这样就可以得到基于支持向量机的回归估计方法,即支持向量回归机(SVR)。

8.34 贝叶斯网络

贝叶斯网络方法是基于概率分析、图论的一种不确定性知识表达和推理模型。它是一

个有向无环图，其中节点代表论域中的变量，有向弧代表变量间的关系，变量之间的关系强度由节点与其父节点之间的条件概率来表示。这种表示在系统测试的各个信号中可以准确地反映它们之间的依赖关系，并通过条件概率反映信息的不确定性。

8.35 粒子滤波（PF）

粒子滤波(PF:Particle Filter)的思想基于蒙特卡洛方法(Monte Carlo methods)，它是利用粒子集来表示概率，可以用在任何形式的状态空间模型上。其核心思想是通过从后验概率中抽取的随机状态粒子来表达其分布，是一种顺序重要性采样法(Sequential Importance Sampling)。简单来说，粒子滤波法是指通过寻找一组在状态空间传播的随机样本对概率密度函数进行近似，以样本均值代替积分运算，从而获得状态最小方差分布的过程。这里的样本即指粒子,当样本数量 $N \rightarrow \infty$ 时可以逼近任何形式的概率密度分布。

8.36 基于专家系统的故障预测方法

专家系统的基本原理结构如图 16 所示，其中箭头方向为数据流动的方向。专家系统通常由人机交互界面、知识库、推理机、解释器、综合数据库、知识获取等 6 个部分构成。

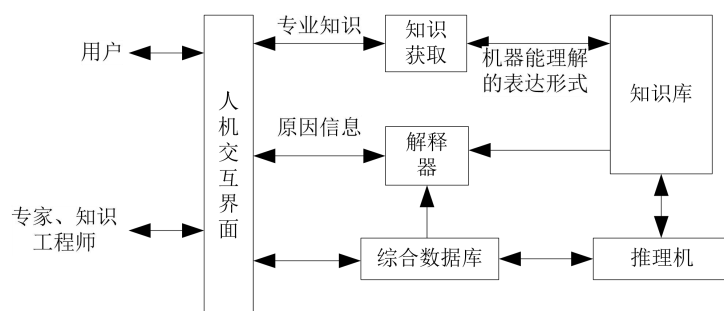


图 16 专家系统的基本原理

9 预测报告

预测报告一般是

指出系统的剩余寿命和状态等级；

列举与元件相关的剩余寿命；

给出预计失效的元件和故障模式；

给出每个预期故障可观察的潜在征兆

命名每个要用的状态监测描述符

指出维护建议和效果。

附录 A
预测报告例子

预测报告	
预测人：	预测日期：
设备级别	
预测对象	
工作时间	
剩余寿命：	状态等级：
预测结果	
元件	剩余寿命
预计失效	
元件	故障，失效模式名称
.....	
验证的必要征兆	
1.....	
2.....	
3.....	
验证的强化征兆	
1.....	
2.....	
3.....	
失效模式的原因或根原因	
.....	
.....	
对象历史	
相似案例	
故障危险度	置信水平
失效模式	失效模式
.....	
提议的校正活动	
要求的维护活动，维护活动的最大延迟	
暂时的维护操作	
反馈：提升寿命的推荐	
作者	签名