

团 体 标 准

T/GITIF XXX—2021

基于 CPS 的产线设备维护决策指南

**Maintenance Decision Guide Production-line Equipment Based on Cyber
Physical System**

（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	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 产线设备维护策略	2
5 预测性维护决策要求	4
6 预测性维护决策流程	4
6.1 健康评估输入要素	4
6.2 故障诊断输入要素	5
6.3 故障预测输入要素	5
6.4 预测性维护决策方法	5
6.5 维护知识库要求	5
6.6 维护方案输出要求	5
6.7 维护执行	6
7 维护决策方法	6
附录 A（参考性附录）维护决策参考模型	7
附录 B（参考性附录）设备维护知识库模板	9

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、广州博依特智能信息科技有限公司、格创东智（深圳）科技有限公司、湖南红太阳新能源科技有限公司。

本标准主要起草人：蒋诗新、刘振国、胡宁、陈冰泉、李继庚、曲宗福、张福家。

引 言

随着制造业产线的柔性化、智能化发展，产线设备的复杂程度越来越高。产线设备对企业的影响度不断增大，设备的性能决定产品的质量，设备故障导致的停机事件则会降低企业的生产效率、削弱生产控制力、降低市场响应速度。同时，设备突发故障还会导致许多重大事故，造成人员的伤亡和经济财产的损失。企业重视设备服役期内的安全性，并积极采取适当的措施来维护保证设备安全性以及延长设备使用寿命。然而，传统的设备维护方法无法依据设备的运行状态进行适当的维护安排，从而导致维护的不足或过剩，进而使得维护成本居高不下。

基于信息物理系统的设备维护决策，依托设备实时运行数据，构建设备数字孪生模型，实现赛博空间与物理空间的双向精确映射，人、机、料、环的精确协同，以及工业设备、设备用户和设备商全数字打通的智能运维模式，达到视情使用、视情维护和视情管理，对于提高设备质量可靠性、设备利用率，降低设备维护及运维成本具有重大意义。

标准编写组通过对基于信息物理系统的设备维护决策方法的不断跟踪和深入研究，结合国内外制造行业典型企业的调研和实践经验总结，编写了此标准，希望能对制造行业产线设备的维护决策提供指导，有效降低设备维护成本，提高设备质量可靠性、设备利用率，实现转型升级和高质量发展发挥作用。

基于 CPS 的产线设备维护决策指南

1 范围

本标准规定了基于 CPS 的产线设备的维护决策的术语和定义、维护决策策略、预测性维护决策要求、预测性维护决策流程、决策方法等。

本标准适用于基于 CPS 的工业产线设备的维护决策。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 20921-2007 机器状态监测与诊断 词汇

GB/T 2298-2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 9873.1 机器状态监测与诊断 振动状态监测与诊断 第1部分：总则

GB/T 22393-2008 机器状态监测与诊断 一般指南

GB/T 22394.1-2015 机器状态监测与诊断-数据判读和诊断技术 第1部分：总则

GB/T 23713.1-2009 机器状态监测与诊断 预测 第1部分：一般指南

GB/T 7826-2012 系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析（FMEA）程序

GB/T 25742.1-2010 机器状态监测与诊断 数据处理、通信与表示 第1部分：一般指南

GB/T 25742.2-2013 机器状态监测与诊断 数据处理、通信与表示 第2部分：数据处理

GB/T 26221-2010 基于状态的维护系统体系结构

3 术语和定义

GB/T 12643-2013、GB/T 20921-2007、GB/T 20921-2007 中确立的以及下列术语和定义适用于本部分标准。

3.1

信息物理系统 Cyber Physical System (CPS)

一个综合计算、网络 and 物理环境的多维复杂系统，通过 3C(Computation、Communication、Control) 技术的有机融合与深度协作，实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务。

3.2

产线设备 Production-line equipment

产线上涉及的具体设备，也是企业在生产中所需要的机械、装置、仪器和设施等物质资料的总称。

3.3

故障/失效 fault/failure

设备不能执行规定功能的状态，预防性维修或其他计划性活动或缺乏外部资源的情况除外。

3.4

故障模式 fault mode

设备故障的表现形式。

3.5

故障特征 fault characteristic

用来表征故障是否发生、严重程度的征兆参数。

3.6

状态监测 condition monitoring

检测与收集反映设备状态的信息和数据。

3.7

维修/维护 maintenance

设备技术状态劣化后，为恢复其功能而进行的技术活动。

3.8

事后维护 corrective maintenance (CM)

也称修复性维修，故障发生后采取维修的方式。

3.9

预防性维护 preventive maintenance (PM)

在故障发生前，为降低设备失效概率或防止功能退化，按规定准则进行的维修。

3.10

预测性维护 predictive maintenance

强调对失效的预测，并依据设备的状态采取行动，以预防失效或劣化的维修

[GB/T 20921-2007 机器状态监测与诊断 词汇 术语 2.13]

4 产线设备维护策略

产线设备维护决策是在充分考虑安全、成本等因素基础上，将故障诊断、健康评估、故障预测的输出结果与产线设备管理相结合，进行相应的维护维修决策，实现维护成本、维护资源等最优化。

在工业设备运行维护中，设备维护策略一般有三种：事后维护、预测性维护和预防性维护。

(1) 事后维护：在设备发生故障、不能正常运行时，开展维护维修工作；

(2) 预防性维护：在设备故障发生之前，在一定的时间间隔，有计划对设备进行主动

维护。

(3) 预测性维护：在设备技术状态劣化但没有故障停机时，基于设备状态运用大数据、机器学习技术，开展设备的预测性维护；

注：本标准的对象是预测性维护决策，因此标准中规定的技术条款主要针对第二类预测性维护决策的实施。具体产线设备维护策略的选择如下：

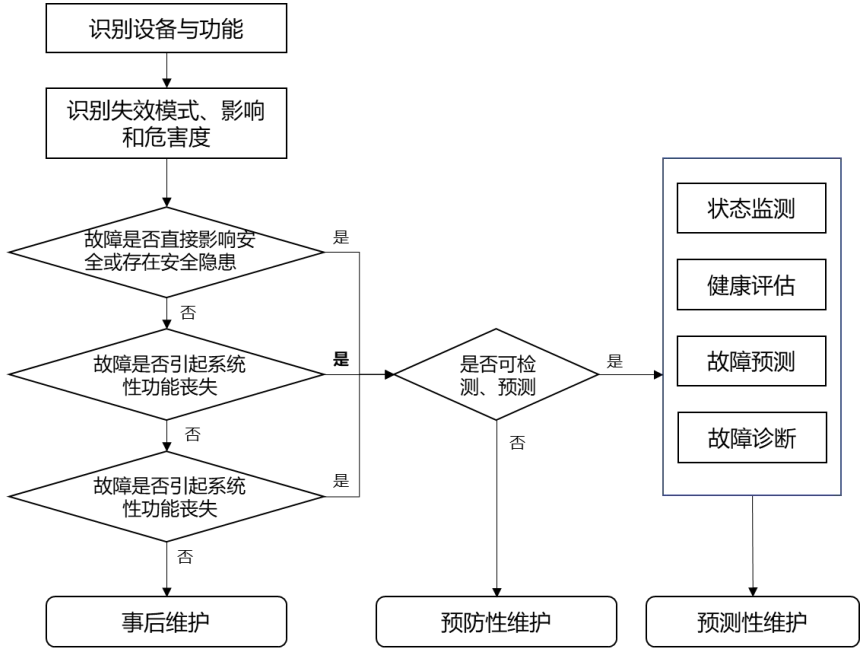


图 1 产线设备维护策略

- 1) 识别设备与功能：设备结构与功能是开展维护工作的关键输入，需识别设备结构、性能、运行环境、工况等特征。
- 2) 对产线设备进行失效模式及影响分析，识别失效模式、影响和危害度，当设备故障不直接影响安全、不存在安全隐患、不会引起系统性功能丧失、不导致经济损失时，则可以进行事后维护。
- 3) 明确设备关键部件和故障模式，能否可预测、可检测，如果企业或设备，缺少实时监测能力，或预算成本有限，则可以进行预防性维护，制定周期性维护计划。
- 4) 设备关键部件和故障模式能够实时采集数据，且成本可控，则进行预测性维护。

5 预测性维护决策要求

预测性维护决策是以设备工作状态为依据的维护决策方式，通过持续监测设备运行状态，预判故障可能发生的时间，在故障发生之前确定成本效益最优的维护时机，并采用合适的维护活动，阻止设备运行状态的劣化，最大限度地减少设备的计划外停机时间并降低维护

成本。预测性维护决策跟故障诊断、故障预测一样，都是一种推理寻优过程，故障预测技术规范中关于推理寻优的要求对维护决策同样适用。

构建维护决策系统的基本原则与通用要求主要包括以下几方面：

- a) 决策算法和推理机制的多样性；
- b) 自适应能力；
- c) 集成能力，可集成故障诊断、故障预测、健康评估系统数据，支持数据互通；
- d) 知识库可维护原则，用户可方便对知识库进行维护；
- e) 可扩充性，人工或自动对知识库进行扩充；
- f) 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；
- g) 通用性和实用性原则。

6 预测性维护决策流程

预测性维护决策主要依据状态监测、状态评估、故障预测、故障诊断结果，通过维护决策方法构建维护决策模型，在维护知识库中匹配维护方案，决策维护时间、维护方式、维护资源调度等，输出设备详细维护方案，支持设备维护执行与维护验证。

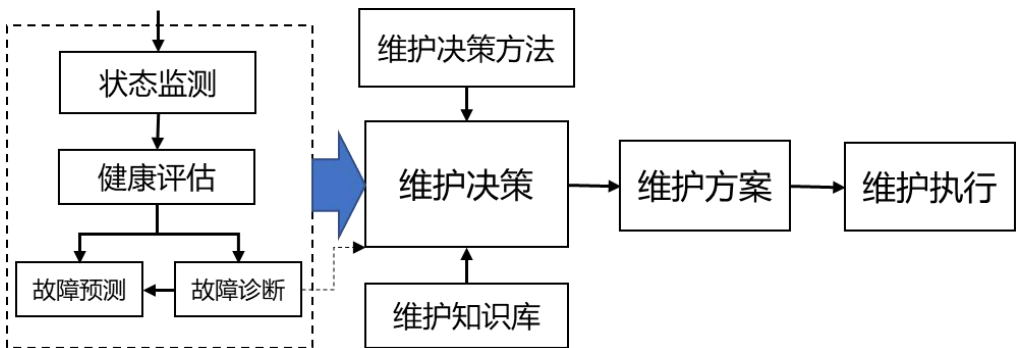


图 2 预测性维护决策流程

6.1 健康评估输入要素

健康状态评估可根据状态监测数据评估产线设备健康状态，对异常状态进行预警，是维护决策关键输入之一。设备健康状态评估主要输入要素包括但不限于：

- 设备/部件的健康评估结果；
- 监测参数，包括温度、压力、振动、电流、电压等；
- 参数报警信息；

6.2 故障诊断输入要素

故障诊断可以针对设备异常参数的分析判断,对故障部位进行精准定位以及对故障类型进行准确判断,故障诊断主要输入要素包括但不限于:

- 故障模式、故障类型信息;
- 故障定位信息;
- 故障报警信息;
- 监测参数,包括温度、压力、振动、电流、电压等

6.3 故障预测输入要素

故障预测可根据设备当前健康状态对设备的退化趋势进行预测,包含故障预警与剩余使用寿命预测。故障预测主要输入要素包括但不限于:

- 设备/零部件的当前状态信息;
- 设备/零部件的历史状态信息;
- 设备/零部件的剩余使用寿命;

6.4 预测性维护决策模型

预测性维护决策模型是维护决策的内核,建模要综合考虑产线设备的经济相关性、结构相关性、故障相关性,按照目标预测性维护决策模型可分为三大类:

- 1) 以最大化系统可靠性为目标,维护时间、维护费用等维护资源为约束。如串联模型产线,整体运行可靠性较低,采用该模型在保证产线具有最大化运行可靠性的前提下尽可能减少维护成本;
- 2) 以最小化系统总维护成本为目标,系统可靠度要求和维修时间为约束。如并联模型的产线,整体运行可靠性较高,采用该模型在保证产线具有一定的运行可靠性的前提下最小化维护成本。
- 3) 以最小化总维护时间为目标,系统可靠度要求为约束。

6.5 维护知识库要求

以产品维护手册和历史维护数据,构建初始维护知识库,后期发生的新故障,动态更新扩展维护知识库。

6.6 维护方案输出要求

基于维护决策方法从维护知识库中匹配相关维护方案,并输出详细的维护方案,主要包

括维护对象、维护时间、维护措施和维护资源等，支持维护执行。主要输出要素包括但不限于：

- 维护时机；
- 维护措施；
- 维护资源调度；
- 维护验证指标；

6.7 维护执行

按照维护决策方案，进行维护执行，并结合维护后状态监测数据验证维护方案的有效性。

7 预测性维护决策方法

产线设备维护决策方法一般包括单机的预测性维护决策和多机系统的预测性维护决策。预测性维护决策是基于维修成本、可靠性、可用度/产量、效率等多目标优化权衡的过程，综合考虑产线设备的经济相关性、结构相关性、故障相关性等因素构建维修决策模型，以设备的当前监测信息、故障预测与健康评估信息为基础，运用遗传算法等智能算法进行模型的求解，从而获得维修计划和维修方案。

7.1 预测性维护决策建模

--单目标预测性维护决策模型：考虑维修成本、可靠性、生产效率等目标中的一个目标，使得该目标最优化，模型复杂程度低，易获得全局最优解；

--多目标预测性维护决策模型：综合考虑维修成本、可靠性、生产效率等目标中的若干个目标，使得多目标总体最优，模型复杂程度高，一般只能获得局部最优解；

7.2 模型求解方法

根据维护决策问题的规模、复杂程度选择模型求解方法，典型的模型求解方法有启发式算法和机器学习算法。

1) 启发式算法：主要用于处理从处理小规模为维护决策问题，获得近似最优解。典型的启发式算法有模拟退火、遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等。

2) 机器学习算法：主要用于处理复杂、大规模的维护决策问题，获得近似最优解。典型的机器学习算法有深度学习算法、强化学习算法等。

附表 A

（参考性附录）

维护决策参考模型

（1）产线单设备维护决策模型

对于产线单设备维护决策，在设备衰退演化规则的基础上，融合维护成本、设备可靠性/可用性的决策目标进行维护决策。单设备维护决策模型一般是在保障设备可靠性/可用性的前提下最小化维护成本。

$$\begin{cases} \min C_{total} = \sum (C_M + C_F + C_{Av}) \\ s.t. \quad T_{RUL} \geq T_0 \end{cases}$$

式中：

C_{total} 指产线单设备总体维护成本，包括设备维护成本 C_M 、设备故障停机成本 C_F 、设备资源成本 C_{Av} 。

T_{RUL} 指产线设备剩余使用寿命； T_0 指设备使用寿命阈值。

（2）产线多设备联合维护决策模型

产线多设备联合维护决策是系统性地分析产线设备间相互相关性，对各台设备的维护作业规划进行作业合并或作业分离，以优化实现降低系统整体维护成本的途径与方法。产线多设备联合维护决策需考虑结构相关性、经济相关性、故障相关性，根据产线结构特性，在产线设备衰退演化规则的基础上，构建综合可靠度、维护成本的维护决策模型，以实现产线系统的整体最优。

生产线一般的串并联结构有：串联结构、并联结构、混联结构，不同产线结构特征下结构相关性、经济相关性、故障相关性不同，如串联产线 1 台设备故障或者停机维护整条产线必须停机等待，根据产线结构特征，建立生产线串并联模型。



图 3 串联生产线模型

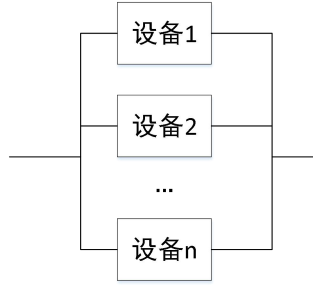


图 4 并联生产线模型

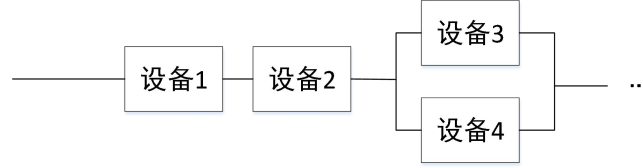


图 5 混联生产线模型

基于产线结构相关性、经济相关性、故障相关性，结合设备衰退演化规则，以最大化产线可靠性为目标建立基于可靠性的产线多设备维护决策模型：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{X_{ij}} \quad R = \prod_i R_i \\ s.t \quad \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} c_{ij} (X_{ij} - Y_{ij}) \leq C_0 \\ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} t_{ij} (X_{ij} - Y_{ij}) \leq T_0 \\ Y_{ij} \leq X_{ij} \end{array} \right.$$

式中：决策目标是产线下一次任务的成功率最大 R ，即产线的可靠度； R 为每个子系统正常工作的概率，即子系统的可靠性；第一项约束表示总维护成本约束；第二项约束表示总维护时间约束；第三项约束表示维护后部件转台不低于维护前的状态。

附表 B

(参考性附录)

设备维护知识库模板

产品/部件名称		型号		设备状态	
故障(异常)代码			维护级别	☐ 小修 ☐ 中修 ☐ 大修	
故障(异常)特征	特征 1	特征 2	特征 3	特征 4	---
维 护 方 案					
维护要求	维护项目				
	作用内容				
	技术要求				
维修措施	故障原因	故障模式	故障模式	故障模式	故障模式
	更换备件				
	维护步骤				
维护验证	维修后指标	功能性能	功能性能	功能性能	功能性能