

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

智能服务 预测性维护 预测算法与模型

Intelligent service — Predictive maintenance — Predictive algorithm and model

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 总则	3
5 算法测评分类	3
6 算法测评流程	4
6.1 概述	5
6.2 状态监测算法指标	5
6.2.1 阈值判别算法指标	5
6.2.2 健康度评估算法指标	6
6.3 故障诊断算法指标	6
6.3.1 专家系统算法指标	6
6.3.2 图谱分析算法指标	7
6.3.3 机器学习算法指标	7
6.4 预测算法指标	8
6.4.1 健康程度指标	8
7 算法测试方法	8
7.1 状态监测算法测试	9
7.1.1 测试数据要求	9
7.1.2 算法测试	9
7.1.3 测试结果	9
7.2 故障诊断算法测试	9
7.2.1 测试数据要求	9
7.2.2 测试方法	9
7.2.3 测试结果	10
7.3 预测算法测试	10
7.3.1 测试数据要求	10
7.3.2 测试方法	10
7.3.3 测试结果	11
8 测评数据要求	11
8.1 概述	11
8.2 数据入库要求	11
8.2.1 格式与内容要求	11
8.2.2 校核要求	11
8.2.3 数据转换	12
8.2.4 数据入库	12
8.2.5 数据入库后检查	12

前 言

本文件按照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。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会（SAC/TC124）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

智能服务 预测性维护 预测算法与模型

1 范围

本标准规定了预测性维护中的预测算法与模型，以及算法测评分类、测评流程、测试指标、测试方法、评价体系等。

本标准适用于预测性维护中状态监测、故障诊断、寿命预测等算法与模型。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 40571-2021 智能服务 预测性维护 通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

预测性维护 predictive maintenance

根据观测到的状况而决定的连续或间断进行的维护，以监测、诊断或预测构筑物、系统或部件的条件指标。这类维护的结果应明确当前和未来的功能能力或计划维护的性质和时间表。

[来源：GB/T 40571-2021，3.5]

3.2

置信度 confidence level

表示诊断/预测的正确程度的质量准则。

注1：它以百分率来表示。

注2：这个值实质上是一个数字，它表示误差源对输出结果精度的最终可靠性或置信程度的累积影响，可以通过计算或者加权评估系统来确定。

4 总则

预测性维护基于设备运行状态数据的采集，完成状态监测、故障诊断、寿命预测等功能，并预先提供维修和维护方案，支持设备的维修维护管理。状态监测、故障诊断、寿命预测的准确性直接影响了预测性维护实施的效果。根据应用目标的差异，可分别对状态监测、故障诊断、寿命预测的算法和模型进行测评。本文件中算法与模型统称为算法。

5 算法测评分类

预测性维护算法测评分类，具体如图 1 所示。

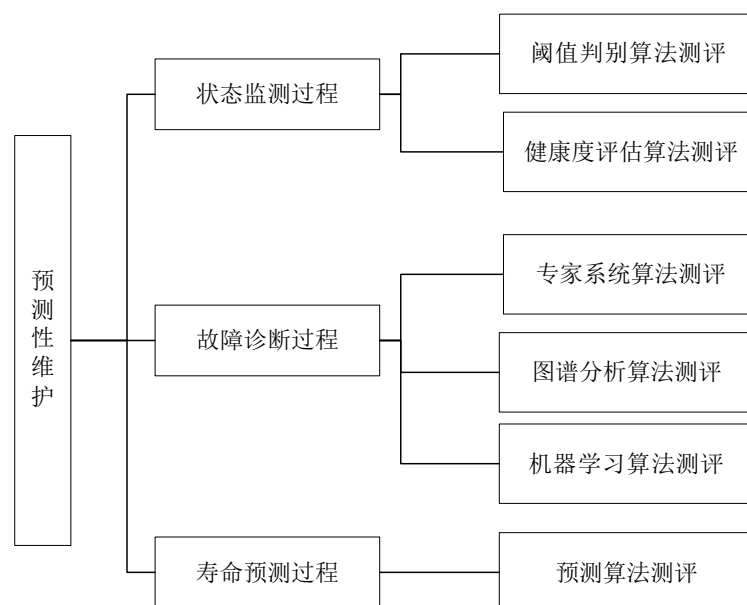


图1 算法测评分类

根据 GB/T 40571-2021，预测性维护可分为状态监测、故障诊断和寿命预测过程，依据目标和技术路径的不同，算法测评可进行如下分类：

- 阈值判别算法测评：阈值判别算法应设置报警阈值，通过输出信号的特征参数分析，与预设的报警阈值进行对比，获得状态监测的结果。
- 健康度评估算法测评：健康度评估算法应设置多级阈值对设备状态进行健康区间划分。基于输出信号对设备运行状态进行监测，并与预设的健康度阈值进行对比，获得状态监测的结果。
- 专家系统测评：专家系统可应用人工智能技术和计算机技术，根据领域专家的知识 and 经验，进行推理和判断，基于专家系统的特征数据匹配度，获得故障诊断的结果。
- 图谱分析算法测评：图谱分析算法针对监测的状态信号进行图谱分析，并通过专家知识或经验对结果进行自动分析，获得故障诊断的结果。
- 机器学习算法测评：机器学习算法可分为分类算法和聚类算法，通过状态特征的分类或聚类，获得故障诊断的结构。
- 预测算法测评：寿命预测算法通过回归分析等进行故障衰退趋势预测，基于用户定义的失效阈值，预测算法能够推演预测特征的轨迹在何处与失效阈值相交，并得到寿命终点时间，进而获得寿命预测的结果。

6 算法测评流程

本文件规定的算法测评指标及测评方法适用于算法的黑盒测试和白盒测试。

算法测评流程可分为测试准备阶段、算法测试阶段、算法调试阶段，如图2所示。

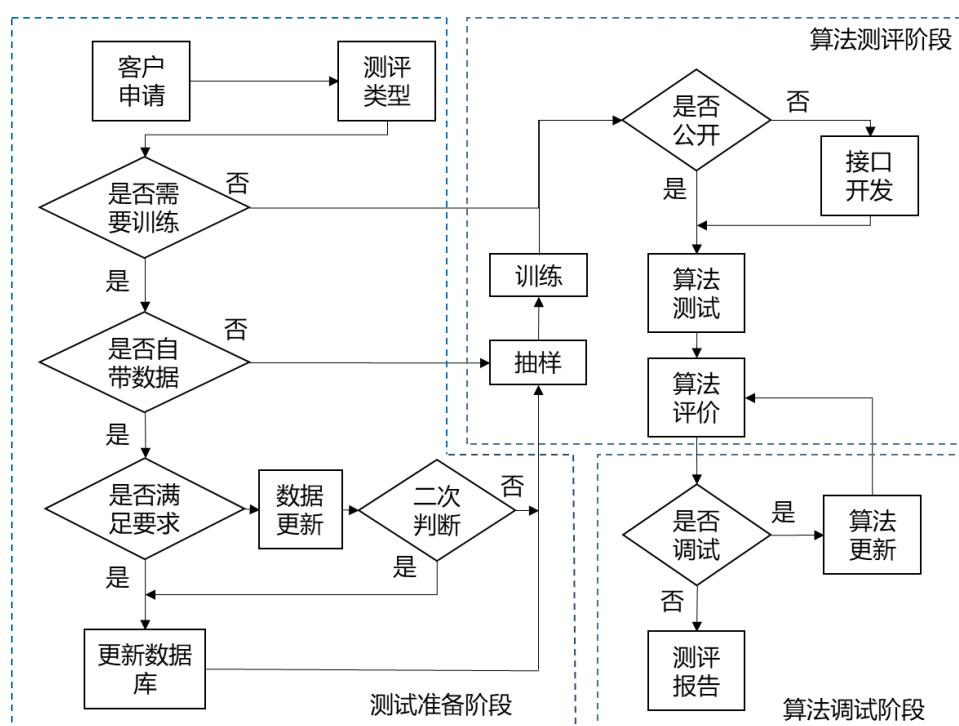


图2 算法测评流程

算法测评流程具体如下：

- 测试准备阶段：测试准备阶段包括客户申请、测评类型选择、数据库更新等活动。基于客户提出的测评申请，首先确定测评类型，判断是否需要训练模型，如需训练则进行是否自带数据判断，如自带数据则进行数据要求判断，不带数据则进行数据库抽样；客户自带数据如满足数据要求，则更新进数据库再进行数据库抽样，如不满足，允许更新数据进行二次判断，合格的更新进入数据库；无需训练则进入测试阶段。
- 算法测试阶段：算法测试阶段包括抽样、训练、是否公开判断、接口开发、算法测评等活动。需要训练的算法经过抽样、训练后根据客户需要判断是否可以公开，无需训练算法则直接进行是否可以公开判断，如允许公开，则进入白盒测试，运行算法并进行测评；如不允许公开，则进入黑盒测试，开发调用接口进行算法接入。
- 算法调试阶段：算法调试阶段包括是否调试判断、算法更新、出具报告等活动。测评结果如没有达到客户满意度，允许进行算法调试和更新，重新进行测评，更新次数不超过2次，达到客户满意度则输出测评报告。算法测试指标。

6.1 概述

算法性能主要针对监测、诊断和预测三类算法分别进行测试，具体测试指标包括监测算法指标、诊断算法指标、预测算法指标三类，其中监测算法指标包括阈值判别和健康度评估；诊断算法指标包括专家系统、图谱分析和机器学习三类。

6.2 状态监测算法指标

6.2.1 阈值判别算法指标

6.2.1.1 阈值判别准确率

状态判别准确度是指设备状态监测结果分类的准确率。设备状态分为正常、低级别报警、高级别报警三种。处于正常状态的设备允许无限制长时间允许，处于低级别报警表明设备状态相对正常状态时发生了明显改变，此时设备允许一定时间范围内的观察运行；处于高级别报警表明设备结构完整性等将有突发失效的风险，此时设备应尽快停机。

状态判别算法应设置两条报警阈值，通过输出信号的特征参数分析，与预设的报警阈值进行对比，获得状态判别的结果。报警阈值的设定可参考GB/T 22393-2015。

当同一设备具有多种监测特征参数时，设备整体状态取报警级别最高结果。

状态判别准确率的计算，可用状态判别准确率的百分比进行测试。

$$\text{准确率} = \frac{\text{状态判别正确的样本数目}}{\text{总数目}} \times 100\%$$

6.2.2 健康度评估算法指标

健康度评估准确度是指设备多参数融合监控结果识别的准确率。采取多参数加权打分原则，对设备监控结果进行量化评估，并根据打分结果所属区级，对设备进行健康等级划分。

一般情况下，监控参数包括振动监控和温度等过程量监控。推荐振动监控和过程量监控的权重分别为：50%，50%。当有来自于设备生产厂家或现场运行经验数据，表明权重需要重新调整时，可视情对权重进行重新分配。

设每一种监控参数*i*（振动、过程量）的低级别报警阈值为 L_{1i} ，高级别报警阈值为 L_{2i} ，权重为 k_i ，当前监控值为 x_i ，则该监控参数的打分结果：

$$\text{Score}_i = k_i \times \max\left(\min\left(100 - \frac{x_i - L_{1i}}{L_{2i} - L_{1i}} \times 50, 100\right), 0\right)$$

设备的融合监控打分结果为：

$$\text{Score} = \sum_{i=1}^n \text{Score}_i$$

设备健康度区间划分方式为：

$$\text{健康状态} = \begin{cases} \text{健康}, \text{Score} = 100 \\ \text{亚健康(早期)}, \text{Score} \in [80,100) \\ \text{亚健康(中期)}, \text{Score} \in [60,80) \\ \text{亚健康(后期)}, \text{Score} \in [40,60) \\ \text{故障}, \text{Score} \in [0,40) \end{cases}$$

健康度评估准确率可用正确判断健康状态的百分比进行测试。

$$\text{准确率} = \frac{\text{健康状态评估正确的样本数目}}{\text{总评估数目}} \times 100\%$$

6.3 故障诊断算法指标

6.3.1 专家系统算法指标

基于专家系统的故障诊断算法应先对有/无故障识别正确率进行测试，然后再对故障类别识别正确率进行测试，进一步，对输出置信度的专家系统算法，可采用置信度均值进行测试。

有/无故障识别正确率是对于给定的诊断测试数据集，正确识别样本有/无故障的数量占总样本数量的百分比。

$$\text{有/无故障识别正确率} = \frac{\text{正确识别样本有/无故障数目}}{\text{总样本数目}} \times 100\%$$

故障类别识别正确率是对于给定的诊断测试数据集，正确分类的样本数量占总样本数量的百分比。

$$\text{故障类别识别正确率} = \frac{\text{正确识别故障类别的样本数目}}{\text{总样本数目}} \times 100\%$$

6.3.2 图谱分析算法指标

6.3.2.1 通则

基于图谱分析的诊断算法通过监测信号进行图谱分析，并通过专家知识或经验进行自动分析。图谱分析算法的评价指标包括图谱质量评价指标和计算复杂度。用于故障诊断的图谱分析包括波形图、频谱图和时频图，可根据具体应用场景和需求选择图谱分析算法。

6.3.2.2 波形图质量评价指标

波形图质量评价指标可用波形信噪比和波形相似度进行测试。

波形信噪比的计算公式如下：

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N T^2(i)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T(i) - T_r(i)]^2}$$

波形相似度的计算公式如下：

$$c_t = \frac{|\sum_{i=1}^N T^2(i) T_r^2(i)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N T^2(i) \sum_{i=1}^N T_r^2(i)}}$$

其中， T 和 T_r 分别为基准信号和算法处理后的信号。

6.3.2.3 频谱图质量评价指标

频谱图质量评价指标可用特征频率信噪比和频谱相似度进行测试。

特征频率信噪比的计算公式如下：

$$CSNR(F_x, F_y) = 10 \lg \frac{A_F^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F(i) - F_t(i)]^2}$$

频谱相似度的计算公式如下：

$$c_f = \frac{|\sum_{i=1}^N F^2(i) F_r^2(i)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N F^2(i) \sum_{i=1}^N F_r^2(i)}}$$

其中， F 和 F_r 分别为基准信号图谱和算法处理后信号频谱， A_F 为算法降噪后信号频谱图中特征频率的幅值。

6.3.3 机器学习算法指标

6.3.3.1 通则

机器学习的分类算法评价指标主要有准确率(Accuracy)、精确率(Precision)和召回率(Recall), 计算方式可分为宏平均与微平均两类。其中宏平均是先计算每一类的指标值, 然后在对所有类求算术平均值, 而微平均指把数据集中的所有实例不分类别汇总在一起计算出最终的指标值。

6.3.3.2 准确率

准确率指正确诊断的样本数占总诊断样本数的比值, 它不考虑诊断的样本是正例还是负例, 反映的是算法整体性能。对于n分类, 准确率(Accuracy)宏平均计算公式如下:

$$\text{Accuracy} = \frac{1}{n} \times \left(\frac{\text{TP1} + \text{TN1}}{\text{TP1} + \text{TN1} + \text{FP1} + \text{FN1}} + \frac{\text{TP2} + \text{TN2}}{\text{TP2} + \text{TN2} + \text{FP2} + \text{FN2}} + \dots + \frac{\text{TPn} + \text{TNn}}{\text{TPn} + \text{TNn} + \text{FPn} + \text{FNn}} \right) \times 100\%$$

其中, TPn是诊断为故障n真正例的样本数, TNn是诊断为故障n真负例的样本数, FPn是诊断为故障n假正例的样本数, FNn是诊断为故障n假负例的样本数。

准确率(Accuracy)微平均计算公式如下:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP1} + \text{TN1} + \text{TP2} + \text{TN2} + \dots + \text{TPn} + \text{TNn}}{\text{TP1} + \text{TN1} + \text{FP1} + \text{FN1} + \text{TP2} + \text{TN2} + \text{FP2} + \text{FN2} + \dots + \text{TPn} + \text{TNn} + \text{FPn} + \text{FNn}} \times 100\%$$

准确率取值范围为 $0 \leq \text{准确率} \leq 100\%$, 且准确率越大越好。

6.4 预测算法指标

6.4.1 健康程度指标

6.4.1.1 平均绝对误差(MAE)

平均绝对误差(MAE)是预测值与真实值之间接近程度的度量。MAE公式如下:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_*(t_i) - r(t_i)|$$

其中,

$r_*(t_i)$ 为*i*时刻RUL的实际值;

$r(t_i)$ 为*i*时刻RUL的预测值。

6.4.1.2 均方根误差(RMSE)

均方根误差(RMSE)定义为误差平方平均值的方根, 可加入权重因子改良指标性能。这个指标对于误差大的值会有更高的权重, 任意一个过大的误差都会让RMSE的值很差。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta^l(t_i)^2}$$

范围 $[0, +\infty)$, 误差越大, RMSE越大。

7 算法测试方法

7.1 状态监测算法测试

7.1.1 测试数据要求

状态监测算法对测试数据要求的要求如下：

- 标准数据。需求包括数据、数据产生来源、数据采集方式、相应设备的元数据包括设备编号、设备类型、工况、数据标签（异常/正常）；
- 测试样本：需求包括数据、数据产生来源、数据采集方式、相应设备的元数据包括设备编号、设备类型、工况（该工况应属于标准数据中的工况范围）、数据标签（异常/正常）。

7.1.2 算法测试

针对某一待测算法，基于测评流程开展算法测评。首先输入测试样本，通过指标计算方法进行计算，得到阈值判别准确率或健康度评估等结果。

7.1.3 测试结果

根据测试结果选择重新测试或出具测试报告。

7.2 故障诊断算法测试

7.2.1 测试数据要求

7.2.1.1 专家系统和机器学习算法

对于专家系统和机器学习诊断算法的测试采用基于数据库形成的训练样本集和测试样本集。

- 训练样本集：从数据库中选取带有标签数据的故障状态的部件数据形成训练样本集。
- 测试样本集：从数据库中抽取包括多个零部件，每个零部件包括1组数据，数据集中包括1个或多个故障状态的部件，供被测试算法进行分析。

对于未训练的算法，需先基于训练样本集进行训练，然后利用测试样本集进行测试。对于已训练好的算法，可直接基于测试样本集进行测试。

7.2.1.2 图谱分析算法

对于图谱分析算法的测试，采用基于标准信号源或软件仿真产生的基准信号作为测试数据。

7.2.2 测试方法

7.2.2.1 专家系统算法

针对某一待测算法，依照测评流程开展算法测评。首先输入测试样本，根据专家系统输出结果按照算法指标计算专家系统有/无故障识别正确率；如果专家系统有/无故障识别正确率大于60%，则进行故障类别识别正确率测试；对于输出置信度的专家系统，可进一步进行置信度平均值测试。

7.2.2.2 图谱分析算法

收集被诊断设备的必要参数信息，计算该设备各种故障模式的故障特征频率等基于图谱的诊断判据。依照算法评测流程，利用测试样本集，部署算法、导入数据、运行算法，输出图谱并作出诊断结果。依据定义的公式计算出所有的图谱分析算法评价指标。完成评测，出具测试报告。

7.2.2.3 机器学习算法

针对某一待测算法，依照测评流程开展算法测评。利用样本集，通过算法指标计算得到故障诊断准确率，精确率等结果。

7.2.3 测试结果

根据测试结果选择重新测试或出具测试报告。

7.3 预测算法测试

7.3.1 测试数据要求

基于数据库抽样形成训练样本集和测试样本集。其中预测算法测试分为初级测试、中级测试和高级测试。测试准备如下：

——训练样本集：

- 初级和中级测试从数据库中选取某部件多种工况变化组合/动态工况变化的单一故障模式的全生命周期数据多条；
- 高级测试选取某部件具备多种工况变化组合/动态工况变化的多种故障模式的全生命周期数据多条，每条全生命周期数据具备单类故障模式；

——测试样本集：

- 初级测试选取同部件的生命周期片段数据，这些片段宜处于生命周期的各个阶段，考察算法在不同生命周期预测的能力，且故障模式与训练样本相同；
- 中级测试选取生命周期片段数据，这些片段最好处于生命周期的各个阶段，考察算法在不同生命周期预测的能力；故障模式与训练样本既有相同的，也有不同的，但每类样本的故障模式单一独立存在；
- 好几测试选取生命周期片段数据，这些片段宜处于生命周期的各个阶段，考察算法在不同生命周期预测的能力；故障模式与训练样本既有相同的，也有不同的，每类样本的故障模式既有独立存在的，也可叠加共存；测试样本所包含的故障模式存在训练样本中不存在的故障模式。

对于未训练的算法，需先基于训练样本集进行训练，然后利用测试样本集进行测试。对于已训练好的算法，可直接基于测试样本集进行测试。

7.3.2 测试方法

针对某一待测算法，基于测评流程开展算法测评。首先选择初级测试，利用初级测试样本集，基于测试指标进行计算，得到初级测试结果；如通过初级测试，则进入中级测试，如未通过初级测试输出测试报告。

中级测试和高级测试步骤同初级测试。

7.3.2.1 测试流程

预测算法测试流程如下：

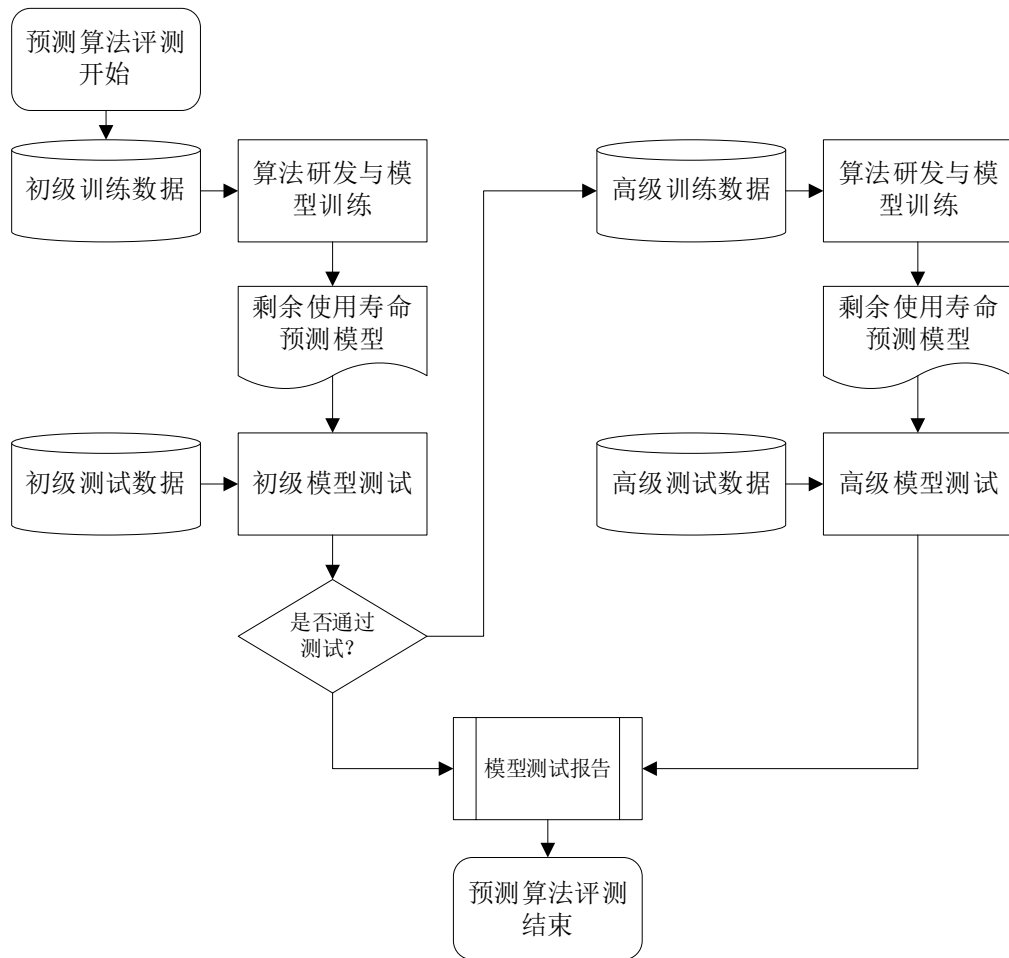


图3 预测算法测试流程

7.3.3 测试结果

根据测试结果选择重新测试或出具测试报告。

8 测评数据要求

8.1 概述

数据库是算法测试的基础，可支撑算法测试流程中的数据库更新、数据抽样等环节。

8.2 数据入库要求

8.2.1 格式与内容要求

数据库格式和字段名称应按照数据项及表达规则进行命名，并保持严格统一，数据内容应与实际采集的数据保持一致。

8.2.2 校核要求

入库前，应依据数据质量要求对数据进行校核，对于数据不完整的、数据质量不高的数据，应进行明确标记，允许修改后重新上传；对于缺项严重的数据库，应及时进行纠正，并满足质量要求后方可进入数据库。

8.2.3 数据转换

入库数据应根据数据库要求进行一致性转换，主要包括数据格式转换等。

8.2.4 数据入库

数据入库应根据所选择的数据组织方式进行。数据入库可以选用手动添加或程序批量入库。数据入库完成后应记录数据入库日志。

8.2.5 数据入库后检查

数据入库后检查的内容包括：数据是否存放在规定的数据库表中、入库后数据是否完整、和入库数据是否一致、数据是否重复入库、数据拼接是否无缝和入库参数是否正确等内容。