

ACCURACY RETENTION EVALUATION

精度保持性评估完整运行逻辑与案例说明

整机综合评价 + 功能部件评价

文档用途

用于软件演示、项目汇报和用户培训。重点回答：系统具体录入什么数据；参数进入哪一个公式；公式输出什么中间量；中间量如何归一化、赋权和逐层汇总；最终页面展示什么结果。

版本日期：2026 年 6 月 15 日

适用软件：数控机床中试验证阶段精度保持性综合评价系统

参考文件

- 《一种数控机床整机精度保持性多层次、多维度综合评价方法》（项目文件：说明书.docx）
- 《车削类机床精度保持性验证评价规范 20260320》
- 软件当前数据库配置、测试记录、制品样本和后端评价算法

1. 一句话先讲清楚

整机评估

把几何精度、位置精度的长期退化序列，以及加工制品的批次样本，分别计算成五类评价量，再统一转成百分制，通过动态组合权重形成单项得分，最后按“指标层→准则层→目标层”逐层汇总为整机综合得分。

部件评估

每个加载循环后记录部件精度，先判断是否有任一指标超过失效阈值：已失效则回答“能保持多久”；未失效则回答“保持得有多好”。

1.1 权重到底是输入还是输出？

权重名称	性质	来源	进入哪一步	是否在结果中输出
评价维度主观权重 u_j	输入	规范/AHP 专家判断的已验证结果；软件预置几何/位置为 0.25、0.50、0.25，加工为 0.50、0.50	与客观权重融合	是，指标明细中返回
评价维度客观权重 v_j	计算输出	由本次各维度百分制得分占比动态计算	与主观权重融合	是
评价维度组合权重 W_j	计算输出	$W_j = \sqrt{(u_j v_j)} / \sum \sqrt{(u_j v_j)}$	计算单个精度指标综合分	是
指标层权重 W_{Ci}	配置输入	设备台账配置；缺失时按机型和规范推荐表匹配	指标分→准则层分	是，归一化后输出
准则层权重 W_{Bk}	配置输入	设备台账配置；默认几何 0.25、位置 0.25、加工 0.50	准则层分→整机总分	是

演示时建议这样说

不是所有权重都由用户手工填写。管理员配置的是“各精度指标在同类中的重要程度”和“三大精度集的重要程度”；系统根据本次数据表现自动计算客观权重和最终组合权重。

1.2 软件中的三类参数

类型	典型内容	维护位置	作用
管理员配置	指标绑定、 δ_0 、 δ_{th} 、USL/LSL、指标层权重、准则层权重、单循环小时	设备台账；加工公差还来自制品指标配置	定义评价对象、边界和汇总关系
操作者录入	周期检测值、检测时间、制品批次、样本值、循环试验记录	数据采集/制品数据录入	形成算法的动态实测输入
系统固定	ARDR/ARD/AFD/ACD/AD公式、正逆向归一化、客观赋权、拉格朗日融合、逐层汇总	后端算法	保证相同数据和配置得到相同结果

2. 整机精度保持性综合评价

整机评价采用目标层—准则层—指标层三层体系。目标层是整机综合得分；准则层是几何精度、位置精度和加工精度；指标层是工作台平面度、定位精度、外圆圆度等具体指标。



图1 整机精度保持性综合评价完整数据流 (Image 2 生成)

2.1 整机评价需要哪些输入

输入组	具体字段/数据	数据库或页面来源	后续用途
资产与体系	资产编号、机床类型、指标分类、指标名称	设备台账、指标字典	建立目标层—准则层—指标层关系，并匹配机型推荐权重
几何/位置边界	出厂初始精度 δ_0 、失效精度 δ_{th} 、单位	设备台账→配置指标	ARD 计算、状态判定
加工公差	USL、LSL、单位	制品指标配置；设备与加工指标绑定	计算 $T= USL-LSL $ 和 $M=(USL+LSL)/2$
归一化边界	理想值 Ideal、极限值 Limit	设备台账可选；留空使用系统规范默认值	把不同量纲的评价量统一映射到 0~100 分
层级权重	指标层权重 W_{Ci} 、准则层权重 W_{Bk}	设备台账→配置指标	指标层向准则层、目标层汇总

输入组	具体字段/数据	数据库或页面来源	后续用途
跟踪检测数据	检测时间 t_i 、指标实测值 δ_i ；同一时段多次采样先取均值	数据采集→整机精度检测	拟合 $A(t)$ ，计算 ARDR、ARD、AFD
加工制品数据	产品、批次、加工数量、同一加工指标的样本 $X_1 \dots X_m$	设备台账绑定制品→制品数据录入	计算 ACD、AD；当前算法使用最新批次样本

2.2 从输入到最终得分的逐步链路

环节	输入	处理/公式	本环节输出	输出进入下一环节
A. 数据预处理	同一指标的(t_i, δ_i)或同一时段多次测量	同一时段多次采样取均值；按时间升序；时间换算为相对天数	每个指标的有序退化序列	几何/位置三维特征计算
B1. 退化函数	相对天数 t_i 、 δ_i	最小二乘直线 $A(t)=at+b$	斜率 a 、拟合值 $A(t_i)$	ARDR 直接取 $ a $ ；AFD 使用拟合残差
B2. ARDR	拟合斜率 a	$ARDR= dA(t)/dt = a $	精度退化速率	逆向模糊归一化
B3. ARD	δ_i 、 δ_0 、 δ_{th}	$\Delta\delta_{mean}=(1/n)\sum[\delta_i-\delta_0]$ ； $ARD=p \cdot \exp[-\Delta\delta_{mean}/(\delta_{th}-\delta_0)]$	精度保持度	正向模糊归一化
B4. AFD	δ_i 、 $A(t_i)$	$AFD=\sqrt{[(1/(n-1))\sum(\delta_i-A(t_i))^2]}$	精度波动度	逆向模糊归一化
C1. ACD	最新制品批次 X_i 、USL、LSL	样本标准差 s ； $T= USL-LSL $ ； $ACD=T/(6s)$	加工精度一致性	正向模糊归一化
C2. AD	X_i 、USL、LSL	X ； $M=(USL+LSL)/2$ ； $AD=2 X-M /T$	精度偏离度	逆向模糊归一化
D. 百分制归一化	ARDR/ARD/AFD 或 ACD/AD、Ideal、Limit	正向： $(Current-Limit)/(Ideal-Limit) \times 100$ ；逆向： $(Limit-Current)/(Limit-Ideal) \times 100$ ；结果截断到 0~100	每个维度 $Score_j$	客观权重和组合权重
E1. 客观权重	同一指标下各 $Score_j$	$v_j=Score_j/\sum Score_j$	本次数据驱动的客观权重 v_j	拉格朗日融合
E2. 组合权重	主观权重 u_j 、客观权重 v_j	$W_j=\sqrt{(u_jv_j)}/\sum\sqrt{(u_jv_j)}$	动态组合权重 W_j	单指标综合分

环节	输入	处理/公式	本环节输出	输出进入下一环节
E3. 单指标得分	Score_j、W_j	$S_i = \sum(W_j \times \text{Score}_j)$	每个具体精度指标得分 S_i	准则层汇总
F1. 准则层	同一精度集内 S_i、指标层权重 W_Ci	$B_k = \sum(S_i \times \text{归一化 } W_{Ci})$	几何/位置/加工分项得分	目标层汇总
F2. 目标层	B_k、准则层权重 W_Bk	$S = \sum(B_k \times \text{归一化 } W_{Bk})$	整机综合得分	页面展示、薄弱环节识别

2.3 归一化默认边界

评价量	方向	系统默认 Ideal	系统默认 Limit/ Extreme	解释
ARDR	逆向，越小越好	0	0.1	退化速度越接近 0 越好
ARD	正向，越大越好	1	0	完全保持初始精度时接近 1
AFD	逆向，越小越好	0	1	拟合残差越小越稳定
ACD	正向，越大越好	1	0.5	公差带相对样本离散程度越大越好
AD	逆向，越小越好	0	1	均值越接近公差中心越好

重要说明

设备台账中的“归一化理想值/极限值”留空时，系统使用上表规范默认值；填写后则覆盖默认值。这里的 Ideal 和 Limit 不是原始精度的 $\delta 0$ 、 δth ，而是 ARDR、ARD、AFD、ACD、AD 这些评价量的评分边界。

2.4 整机案例：重型立式车床整机样机

资产：WHOLE-LATHE-001；机型：立式数控车床。当前数据库配置 9 项有效指标，10 期跟踪检测记录，并绑定阀套试件的 10 个制品批次。算法回归结果完整，缺失项为 0。

2.4.1 几何精度案例：工作台平面度

输入项	案例值
设备台账配置	$\delta_0=6\text{ }\mu\text{m}$ ； $\delta_{th}=18\text{ }\mu\text{m}$ ；指标层原始权重=0.1101；几何精度准则层权重=0.25
10 期实测序列（ μm ）	6.3, 6.7, 7.1, 7.5, 7.9, 8.4, 8.8, 9.2, 9.7, 10.1
检测间隔	2026-01-10 至 2026-07-09，约每 20 天一次

步骤	计算输出	如何进入下一步
最小二乘拟合	ARDR=0.021242 $\mu\text{m/day}$ ；拟合曲线同时给出各时点 $A(t_i)$	ARDR 进入逆向评分； $A(t_i)$ 与实测值共同计算 AFD
保持能力	ARD=0.834574	进入正向评分
波动程度	AFD=0.033434 μm	进入逆向评分
模糊归一化	ARDR 78.76 分；ARD 83.46 分；AFD 96.66 分	形成客观权重 v_j
动态组合赋权	$W_{ARDR}=0.2806$ ； $W_{ARD}=0.4085$ ； $W_{AFD}=0.3109$	与三个维度得分加权
单指标综合	工作台平面度得分=86.24 分	乘几何精度内归一化指标权重 0.1616，进入几何精度准则层

讲解链条：10 期实测值 + δ_0/δ_{th} → 拟合和三维特征 → 三个百分制得分 → 动态组合权重 → 工作台平面度 86.24 分 → 几何精度分项。

2.4.2 加工精度案例：外圆圆度

输入项	案例值
产品与批次	阀套试件；批次 PRD-VC-001-20260709
公差配置	USL=0.03 mm；LSL=0 mm；T=0.03 mm；M=0.015 mm
最新批次 5 个样本	0.015, 0.016, 0.014, 0.016, 0.015 mm

步骤	计算输出	如何进入下一步
样本统计	样本均值 $\bar{X}$ =0.0152 mm，样本标准差由 5 个样本计算	与 T、M 共同进入 ACD 和 AD
二维评价量	ACD=5.976143；AD=0.013333	分别进行正向、逆向归一化
百分制评分	ACD=100 分；AD=98.67 分	形成客观权重
动态组合赋权	W_{ACD} =0.5017； W_{AD} =0.4983	计算外圆圆度综合分
单指标综合	外圆圆度=99.34 分	按加工精度内指标权重进入加工精度准则层

2.4.3 逐层汇总结果

准则层	准则层得分 B_k	准则层权重 W_{Bk}	对整机总分的贡献
几何精度	82.11	0.25	20.5275
位置精度	75.69	0.25	18.9225
加工精度	96.04	0.50	48.0200
整机目标层	87.47	1.00	$82.11 \times 0.25 + 75.69 \times 0.25 + 96.04 \times 0.50$

案例结论

整机综合得分 87.47 分，数据覆盖率 100%，有效指标 9 项。加工精度 96.04 分表现最好；位置精度 75.69 分相对较低，其中垂直刀架 Z1 轴定位精度 68.91 分，是应优先关注的薄弱方向。

3. 功能部件精度保持性评价

部件评价适用于刀架、主轴、回转台、刀库和铣头等。它不采用整机的三层加权总分流程，而是先执行失效判定，再在“保持时间”和“保持度”之间选择评价方法。

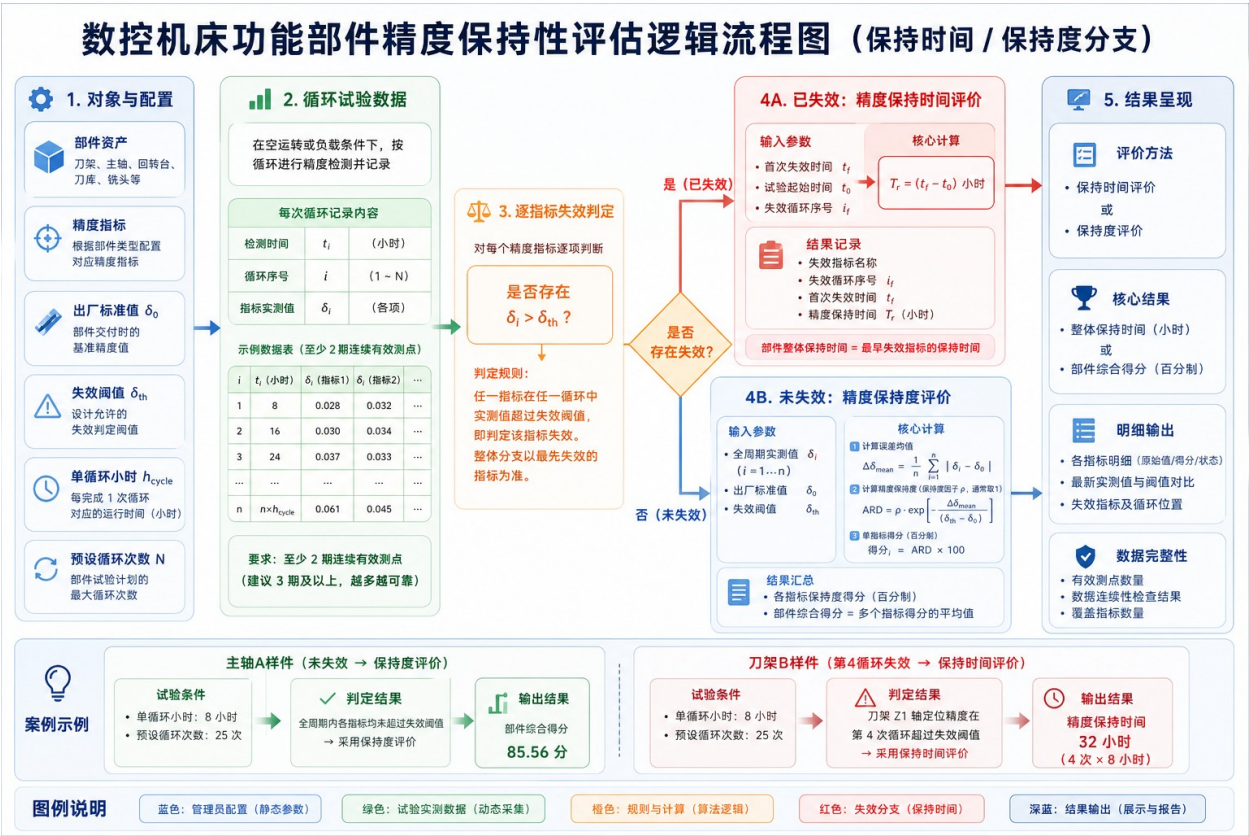


图 2 功能部件精度保持性评价分支逻辑 (Image 2 生成)

3.1 部件评价需要哪些输入

输入组	具体字段/数据	来源	用途
部件资产	部件编号、名称、类型 (主轴/刀架/回转台/刀库/铣头)	设备台账	确定被评对象和应绑定的精度指标

输入组	具体字段/数据	来源	用途
指标边界	每项指标出厂标准值 δ_0 、失效阈值 δ_{th} 、单位	设备台账→配置指标	失效判定和 ARD 计算
循环参数	单循环小时 h_{cycle} ；试验计划预设循环次数 N	设备台账；试验方案	把失效循环换算为保持时间； N 控制试验终止边界
循环记录	循环后的检测时间 t_i 、循环次序 i 、各指标实测值 δ_i	数据采集	逐指标失效判定和保持度计算

关于预设循环次数 N

规范要求试验方案预设固定循环次数。当前软件由“已经录入的循环记录范围”体现试验终止边界，尚未把 N 作为独立数据库字段参与公式；演示时可将 N 解释为试验计划参数。单循环小时已作为独立配置并实际用于保持时间换算。

3.2 部件评价逐步链路

环节	输入	判断/公式	输出	后续
A. 完整性检查	绑定指标、 δ_0 、 δ_{th} 、至少 2 期有效记录	缺失任一关键项则标记缺失，不给出完整评价	可评价指标集合、缺失清单	逐项失效判定
B. 失效判定	每项 δ_i 与 δ_{th}	按时间顺序寻找首次 $\delta_i > \delta_{th}$	是否失效、首次失效循环 i_f 、失效时间 t_f	决定保持时间或保持度分支
C1. 已失效分支	i_f 、 h_{cycle} ；若未配置 h_{cycle} 则使用 $t_f - t_0$	$T_r = i_f \times h_{cycle}$ ；回退公式 $T_r = t_f - t_0$	该指标保持时间、失效循环	部件整体取最早失效指标的保持时间
C2. 未失效分支	全周期 δ_i 、 δ_0 、 δ_{th}	$\Delta\delta_{mean} = (1/n) \sum \delta_i - \delta_0 $ ； $ARD = \rho \cdot \exp[-\Delta\delta_{mean} / (\delta_{th} - \delta_0)]$	单指标保持度 ARD 及百分制 $ARD \times 100$	多个有效指标得分求平均
D. 结果呈现	分支结果、最新值、阈值、缺失项	按分支组织输出	保持时间或综合得分、指标明细、状态、完整性	页面展示

3.3 部件案例一：精密主轴 A 样件（未失效）

指标	δ_0	δ_{th}	最新值	判定	保持度	得分
主轴径向跳动	3.0 μm	10.0 μm	5.1 μm	未失效	0.864816	86.48
主轴端面跳动	2.5 μm	8.0 μm	4.3 μm	未失效	0.846482	84.65
部件综合	—	—	—	保持度评价	两项平均	85.56

讲解链条：各循环实测值均未超过 δ_{th} → 对每项计算 $\Delta\delta_{\text{mean}}$ 和 ARD → ARD×100 形成单项分 → 两项平均得到部件综合得分 85.56 分。

3.4 部件案例二：立式刀架 B 样件（已失效）

输入/事件	案例值	进入的计算
失效指标	刀架 Z1 轴定位精度	该指标决定部件切换到保持时间评价
边界	$\delta_0=5.0\ \mu\text{m}$ ； $\delta_{th}=14.0\ \mu\text{m}$	逐循环比较 $\delta_i>14.0$
首次失效	第 4 个加载循环后超过阈值；最新值 15.2 μm	$i_f=4$
单循环小时	$h_{\text{cycle}}=8$ 小时	$T_r=i_f\times h_{\text{cycle}}$
保持时间	$4\times 8=32$ 小时	部件整体精度保持时间=32 小时
另一未失效指标	Z1 轴重复定位精度保持度得分 72.86	保留在明细中，但整体评价方法仍以最先失效指标为准

为什么不是再给一个平均分？

规范规定，功能部件任一关键精度指标超过设计允许值即可判为精度失效。此时最有意义的结果是“有效精度维持了多久”，所以整体输出 32 小时，而不是把已失效指标与未失效指标继续平均成一个分数。

4. 软件页面与数据存储的对应关系

业务环节	用户看到的页面	主要持久化数据	评价时读取
建设对象	设备台账	整机/部件资产、机型、资产编码	选择评估对象和机型分类
配置整机指标	设备台账→配置指标	绑定指标、 $\delta 0$ 、 δth 、权重、归一化边界、单位	整机特征、评分和逐层汇总
配置加工制品	设备台账→绑定制品；参数设置→制品指标	产品定义、资产产品绑定、加工指标 USL/LSL	加工 ACD/AD
录入整机检测	数据采集	检测时间、指标值或多次样本	几何/位置退化序列
录入制品样本	制品数据录入	产品批次、生产数量、各加工指标样本值	最新批次 ACD/AD
录入部件循环数据	数据采集	循环后的检测时间与各指标值	失效判定、保持时间/保持度
查看结果	数据分析	当前版本实时计算，不依赖旧结果快照	总分/保持时间、分项、明细、完整性

4.1 配置字段的业务含义

字段	适用对象	含义	是否操作者日常修改
$\delta 0$ 出厂/标准值	几何、位置、部件	交付或试验开始时的基准精度	否，由管理员依据验收/出厂资料配置
δth 失效阈值	几何、位置、部件	超过后判定精度失效的边界	否，由管理员依据设计允许值配置
USL/LSL	加工精度	加工产品指标的公差上下限	否，由管理员依据产品图纸/工艺标准配置
Ideal/Extreme	整机四维评分	评价量转百分制的理想和极限边界	通常不改；留空使用规范值
指标层权重	整机	某具体精度指标在所属准则层中的重要度	管理员可按机型和任务调整
准则层权重	整机	几何、位置、加工三类对总分	管理员可按项目要求调整

字段	适用对象	含义	是否操作者日常修改
		的重要度	
单循环小时	部件	完成一次加载循环对应的有效试验时间	管理员按试验方案配置

4.2 数据不足时系统为什么不给最终评价

缺失情况	受影响步骤	处理方式
指标未绑定	无法建立指标体系	在设备台账配置指标
几何/位置少于 2 期	不能拟合 A(t)、计算 ARDR 和 AFD	继续录入周期检测；规范建议长期跟踪，至少 2 期是算法最低门槛
缺 δ_0 或 δ_{th}	ARD 和失效判定无边界	设备台账配置出厂值和失效值
加工批次样本少于 2 个	样本标准差无意义，ACD 无法计算	制品数据录入至少 2 个样本，建议 5 个及以上
缺 USL/LSL	不能计算 T、M、ACD、AD	在制品指标配置中填写公差上下限
缺指标层权重且未匹配推荐表	准则层无法完整汇总	设备台账配置权重
部件缺单循环小时	仍可用时间戳差计算保持时间，但不便于按循环讲解	按试验方案配置单循环小时

5. 对外讲解稿（可直接照此说明）

5.1 整机评估讲解稿

1. 第一步，我们先在设备台账建立整机的评价体系。几何精度和位置精度配置出厂初始值、失效值；加工精度则通过绑定的加工制品配置公差上下限。同时配置具体指标和三类精度集的权重。
2. 第二步，系统读取两类实测数据。几何和位置精度读取按时间连续检测的序列；加工精度读取产品批次中的多个样本值，所以加工精度不是直接拿机床测，而是通过机床加工出的产品来评价。
3. 第三步，几何和位置精度经过最小二乘拟合，得到退化速度 ARDR、保持能力 ARD 和波动程度 AFD；加工样本得到一致性 ACD 和偏离度 AD。
4. 第四步，由于五类评价量单位不同，系统利用理想值和极限值统一换算成百分制。保持度和一致性越大越好，其余三项越小越好。
5. 第五步，规范给出的主观权重与本次数据计算出的客观权重进行融合，得到动态组合权重，再计算每一个具体精度指标的综合分。
6. 第六步，具体指标按指标层权重汇总成几何、位置、加工三个分项，再按准则层权重汇总成整机综合得分。页面同时给出分项、明细、雷达图和薄弱环节。

5.2 部件评估讲解稿

7. 部件评估对象包括主轴、刀架、回转台、刀库和铣头。管理员先配置每项精度的出厂标准值、失效阈值和一次循环对应的小时数。
8. 试验过程中，每完成一次空运转或负载循环，就记录各项精度实测值。
9. 系统首先逐项判断是否超过失效阈值。只要任一关键指标首次超限，部件整体就切换为保持时间评价。
10. 保持时间用首次失效循环数乘以单循环小时；如果没有配置单循环小时，系统回退使用失效时间与试验开始时间的时间差。
11. 如果在预设循环范围内所有指标都未失效，则对每项计算精度保持度，转成百分制后求平均，得到部件综合得分。
12. 因此部件模块回答两种不同问题：未失效时回答‘保持得有多好’，已失效时回答‘有效精度保持了多久’。

6. 当前实现与参考文档的对应说明

参考文档要求	软件实现状态	说明
三层整机评价体系	已实现	目标层、几何/位置/加工准则层、具体指标层
ARDR、ARD、AFD、ACD、AD	已实现	按文档公式计算；ARDR 使用拟合斜率绝对值表示退化速度
正向/逆向模糊归一化	已实现	支持设备级覆盖 Ideal/Extreme，留空用默认值
AHP 主观权重	以预置结果实现	系统保存并使用已通过专家/规范确定的 u_{ij} ，不在每次评价时重新展示判断矩阵和 CR 计算
比重客观权重与拉格朗日组合	已实现	v_j 和 W_j 随本次得分动态变化并随指标明细输出
指标层、准则层逐层汇总	已实现	配置权重会先归一化再参与汇总
部件保持时间/保持度分支	已实现	任一指标首次失效即整体采用保持时间
预设循环次数 N	由试验记录边界体现	当前未设置独立 N 字段；不影响已有记录的分支计算，但后续可作为试验计划字段增强
评价结果快照	当前实时计算	原始数据与配置持久化；评价结果按当前数据库实时重算

7. 结论

对象	输入	中间输出	最终输出
整机	设备配置、周期检测序列、加工制品样本	ARDR/ARD/AFD/ACD/AD、百分制得分、客观权重、组合权重	单指标得分、三类准则层得分、整机综合得分、薄弱环节
部件	部件边界参数、循环检测记录	首次失效判定；未失效时计算ARD，已失效时计算失效循环和保持时间	部件综合得分或精度保持时间、指标明细、数据完整性