

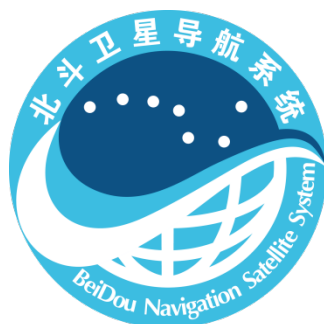
BD

中国第二代卫星导航系统重大专项标准

BD 210010-2022

北斗星载氢钟寿命评估方法

Life evaluation methods for passive hydrogen maser of BeiDou
navigation satellite



2022-08-01 发布

2022-09-01 实施

中国卫星导航系统管理办公室 批准

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 目的.....	1
5 一般要求.....	1
6 数据采集与处理.....	2
6.1 数据采集项.....	2
6.2 数据采集范围.....	2
6.3 数据处理.....	2
6.4 数据检验.....	2
7 评估方法.....	2
7.1 基于一元 Wiener 过程的寿命评估方法.....	2
7.2 基于二元 Wiener 过程的寿命评估方法.....	4
7.2.1 二元独立退化失效寿命评估方法.....	4
7.2.2 二元相关退化失效寿命评估方法.....	5
附录 A（资料性附录）氢钟数据采集卡.....	6

前 言

本标准的附录A为资料性附录。

本标准由中国卫星导航系统管理办公室提出。

本标准由全国北斗卫星导航标准化技术委员会（SAC/TC 544）归口。

本标准起草单位：中国航天标准化研究所、北京无线电计量测试研究所、中国科学院上海天文台。

本标准主要起草人：王小宁、李 晶、王文明、谢勇辉、陈鹏飞、郑 恒、周 侗、角淑媛、王晋婧、张 锐、龚佩佩、郑紫霞、程海龙、冉迎春、申 林。

北斗星载氢钟寿命评估方法

1 范围

本标准规定了北斗星载被动型氢钟（以下简称氢钟）基于退化失效的寿命评估的目的、一般要求、寿命特征参数选取、数据采集与处理和评估方法等内容。

本标准适用于氢钟整钟地面长期寿命考核试验、在轨使用过程中的寿命评估。星载类似原子钟产品的寿命评估可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本标准。

GB/T 4889 数据的统计处理和解释 正态分布均值和方差的估计与检验

GJB 451 可靠性维修性保障性术语

GJB 813 可靠性模型的建立和可靠性预计

GJB 7346-2011 航天器测轨数据处理方法

3 术语和定义

GJB 451、GJB 813确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

退化失效 degenerate failure

氢钟在工作过程中，其性能随时间延长逐渐缓慢下降，直至达到无法正常工作的状态。

4 目的

氢钟寿命评估的目的包括评估氢钟寿命是否满足指标要求，为氢钟在轨使用及整星运维策略提供支持。

5 一般要求

氢钟寿命评估的一般要求如下：

- a) 单个氢钟和批次氢钟均可进行寿命评估。当对氢钟进行批次性评估时，参与评估的氢钟的设计、工艺和过程控制应状态一致，或虽基本一致但不存在影响评估结果的状态差异。
- b) 应选取直接或间接反映氢钟关键性能指标、具有明显退化趋势的参数，包括二次谐波幅度和电离泡光强。
- c) 随着氢钟寿命试验时间或在轨使用时间的积累，应动态更新评估结果。

- d) 对于文中提供的方法，当出现评估结果不一致且差异较大时，可根据附录A采集的其余遥测值作为评估参考；当评估结果一致或差异较小时，推荐使用基于二元Wiener过程的寿命评估方法。

6 数据采集与处理

6.1 数据采集项

氢钟寿命评估需要采集氢钟地面长期寿命考核试验和在轨飞行时间数据，寿命试验和飞行中的二次谐波幅度、电离泡光强、高压源电流等关键性能数据，详细数据采集项参见附录A。

6.2 数据采集范围

数据采集的产品范围是：进行地面长期考核试验的氢钟，或在轨开机运行1年以上的氢钟。

数据采集的时间范围是：自氢钟开机运行至当前时间，或指定时间段的所有测试数据。

6.3 数据处理

数据平滑和异常值剔除的处理按照GJB 7346-2011中4.3的方法执行。

6.4 数据检验

对采集的原始数据应进行数据一致性检验，采用t-test检验可应用GB/T 4889中的方法来判断退化轨迹的一致性。

7 评估方法

7.1 基于一元 Wiener 过程的寿命评估方法

当选取的寿命特征参数为二次谐波幅度时，可采用基于一元Wiener过程的性能退化数据的寿命评估方法。

a) 评估模型

线性模型见公式（1）：

$$Y(t) = Y_0 + \lambda t + \sigma_B B(t) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$Y(t)$ ——在 t 时刻氢钟的二次谐波幅度值；

$Y(t_0)$ ——在 t_0 （初始）时刻，氢钟的二次谐波幅度的（初始）值；

λ ——漂移系数，表征氢钟随时间的退化率；

σ_B ——扩散系数；

$B(t)$ ——标准布朗运动， $B(t) \sim N(0, t)$ 。

根据维纳过程的特征，二次谐波幅度的退化增量 $\Delta Y = Y_i - Y_{i-1}$ 服从均值为 $\mu\Delta t$ ，方差为 $\sigma_B^2\Delta t$ 的正态分布，即 $\Delta Y \sim N(\mu\Delta t, \sigma_B^2\Delta t)$ 。

b) 数据

对所获取的遥测数据中的二次谐波幅度按照一定间隔（如12小时或24小时）分组处理，取每组的平均值作为该组二次谐波幅度值，共 $n_1 + 1$ (n_1 为正整数) 个点： (t_0, Y_0) ， (t_1, Y_1) ， \dots ， (t_{n_1}, Y_{n_1}) ，其中 $t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{n_1}$ ， $\Delta t = t_i - t_{i-1}$

c) 寿命计算方法

1) 数据处理

样本似然函数 $L(\lambda, \sigma_B)$ 见公式 (2)：

$$L(\lambda, \sigma_B) = f(\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_{n_1}) = f(\Delta Y_1) \cdot f(\Delta Y_2) \cdot \dots \cdot f(\Delta Y_{n_1}) \dots \dots \dots (2)$$

通过采用极大似然估计求解得到 λ 和 σ_B ，见公式 (3) 和公式 (4)。

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\Delta Y_i}{\Delta t_i} \dots \dots \dots (3)$$

$$\hat{\sigma}_B = \left[\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{(\Delta Y_i - \hat{\lambda} \Delta t_i)^2}{\Delta t_i} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (4)$$

2) 失效概率的求解

设 D 为失效阈值，产品的失效时间定义为 $Y(t)$ 退化到失效阈值 D 的首达时间 T 为 $T = \inf \{t | Y(t) \geq D\}$ 。根据Wiener过程的统计特性，寿命 T 服从逆高斯分布。

T 的分布函数和概率密度函数分别见公式 (5) 和公式 (6)：

$$F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{D - \lambda t}{\sigma_B \sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\lambda D}{\sigma_B^2}\right) \left[1 - \Phi\left(\frac{D + \lambda t}{\sigma_B \sqrt{t}}\right) \right] \dots \dots \dots (5)$$

$$f(t) = \frac{D}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(D - \lambda t)^2}{2\sigma_B^2 t}\right) \dots\dots\dots (6)$$

3) 产品寿命的均值见公式 (7) :

$$E(T) = \frac{D}{\lambda} \dots\dots\dots (7)$$

根据以上求出相应参数的估计值, 利用公式 (7) 得到氢钟产品的平均寿命估计。

7.2 基于二元 Wiener 过程的寿命评估方法

当选取的寿命特征参数为二次谐波幅度和电离泡光强时, 需要判断二次谐波幅度和电离泡光强参数是否相关来建立氢钟寿命竞争失效模型。

对产品 i 在时刻 $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im_i}$ 对二次谐波幅度和电离泡光强参数的退化过程 $X_1(t), X_2(t)$ 进行测量, 记 $\Delta x_{ij}^{(k)} = X_{ij}^{(k)} - X_{i(j-1)}^{(k)}$ 为产品 i 在时刻 $t_{i(j-1)}, t_{ij}$ 之间性能 PC_k 退化量 ($i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m_i, k=1, 2$), 令 $\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{i(j-1)}$, $\Delta x_{ij} = (\Delta x_{ij}^{(1)}, \Delta x_{ij}^{(2)})'$, 由二元 Wiener 过程的性质知 Δx_{ij} 相互独立且服从均值为 $\lambda \Delta t_{ij}$, 协方差为 $\Delta t_{ij} \Sigma$ 的二维正态分布, 其中 $\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho \sigma_1 \sigma_2 \\ \rho \sigma_1 \sigma_2 & \sigma_2^2 \end{pmatrix}$, ρ 为相关系数, 见公式 (8)。

$$\Delta x_{ij} \square N(\lambda \Delta t_{ij}, \Sigma \Delta t_{ij}) \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$X_1(t)$ 为二次谐波幅度在时刻 t 的测量值;

$X_2(t)$ 为电离泡光强在时刻 t 的测量值;

$\Delta x_{ij}^{(k)}$ 为产品 i 在时刻 $t_{i(j-1)}, t_{ij}$ 之间的性能退化量;

$k=1, 2$ 为性能退化量的个数;

$i=1, 2, \dots, n$ 为产品数;

$j=1, 2, \dots, m_i$ 为测量次数;

7.2.1 二元独立退化失效寿命评估方法

根据工程经验判断相关系数，若判断的相关系数 $\rho = 0$ ，即二次谐波幅度和电离泡光强参数的退化过程相互独立，产品的可靠性模型相当于两个单元构成的串联模型，产品寿命 T 的分布函数见公式 (9)：

$$F(t) = 1 - \left[\Phi\left(\frac{l_1 - \lambda_1 t}{\sigma_1 \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\lambda_1 l_1}{\sigma_1^2}\right) \Phi\left(\frac{-l_1 - \lambda_1 t}{\sigma_1 \sqrt{t}}\right) \right] \left[\Phi\left(\frac{l_2 - \lambda_2 t}{\sigma_2 \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\lambda_2 l_2}{\sigma_2^2}\right) \Phi\left(\frac{-l_2 - \lambda_2 t}{\sigma_2 \sqrt{t}}\right) \right] \dots\dots\dots(9)$$

式中：

l_1, l_2 分别为 PC_1, PC_2 （二次谐波幅度、电离泡光强）对应的失效阈值；

λ_1, λ_2 分别为 PC_1, PC_2 （二次谐波幅度、电离泡光强）的漂移系数，即二次谐波幅度、电离泡光强参数的退化率；

σ_1, σ_2 分别为 PC_1, PC_2 （二次谐波幅度、电离泡光强）的扩散系数。

其中公式 (9) 中的参数 $\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ 估计按照公式 (3) 和公式 (4) 求得，再利用公式 (9) 中的寿命分布函数 $F(t)$ 对产品进行寿命推断。

7.2.2 二元相关退化失效寿命评估方法

根据工程经验判断相关系数，若判断的相关系数 $\rho \neq 0$ ，即二次谐波幅度和电离泡光强参数的退化过程相关。因而分别利用 $\Delta x_{ij}^{(1)}$ 对 λ_1, σ_1^2 进行估计，利用 $\Delta x_{ij}^{(2)}$ 对 λ_2, σ_2^2 进行估计，见公式 (10)：

$$\lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^n X_{im_i}^{(k)}}{\sum_{i=1}^n t_{im_i}}, \quad \sigma_k^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(\Delta x_{ij}^{(k)})^2}{\Delta t_{ij}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_{im_i}^{(k)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n t_{im_i}} \right] \dots\dots\dots(10)$$

由 Δx_{ij} 得到相关系数 ρ 的估计见公式 (11)：

$$\hat{\rho} = \frac{1}{\hat{\sigma}_1 \hat{\sigma}_2 \sum_{i=1}^n m_i} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(\Delta x_{ij}^{(1)} - \hat{\lambda}_1 \Delta t_{ij})(\Delta x_{ij}^{(2)} - \hat{\lambda}_2 \Delta t_{ij})}{\Delta t_{ij}} \right] \dots\dots\dots(11)$$

利用公式 (11) 求出二元正态分布均值和协方差，根据公式 (9) 中寿命分布函数 $F(t)$ 对产品的寿命进行推断。

附 录 A
(资料性附录)
氢钟数据采集卡

氢钟数据采集卡示例见图 A.1

填表人:		日期:		审核:		批准:				
A.1 基础信息采集										
产品名称及代号										
可靠性/寿命指标要求										
构成及工作原理										
功能与性能描述										
任务剖面										
故障判据										
A.2 故障模式及历史故障情况										
序号	故障模式	故障部位	特征量	故障原因	设计保证、生产控制措施	是否发生过, 若发生过, 说明归零情况				
1										
2										
A.3 在轨数据										
型号名称	产品代号	主/备份情况	累计运行时间	故障情况	遥测数据					
					二次谐波幅度	电离泡光强	变容二极管电压	高压源电流	晶振压控电压	腔温
A.4 整钟地面长期考核试验数据										
型号名称	产品代号	累计运行时间	故障情况	遥测数据						
				二次谐波幅度	电离泡光强	变容二极管电压	高压源电流	晶振压控电压	腔温	
A.5 其它需要说明或补充的内容										

图A.1 氢钟数据采集卡示例