



中华人民共和国国家标准

GB/T 39724—2020

铯原子钟技术要求及测试方法

Technical specifications and testing methods for cesium atomic clock

2020-12-14 发布

2021-07-01 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 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 铯原子钟的分类和组成 2

 4.1 概述 3

 4.2 铯原子钟产品的分类 3

 4.3 铯原子钟产品的组成 3

5 技术要求 3

 5.1 功能要求 3

 5.2 性能要求 4

 5.3 电气特性 5

 5.4 通信功能要求 5

 5.5 供电要求 6

 5.6 外观要求 6

 5.7 尺寸和质量要求 6

 5.8 功耗要求 7

 5.9 环境适应性 7

 5.10 电磁兼容性 7

 5.11 可靠性和维修性要求 7

6 测试方法 7

 6.1 测试环境条件 7

 6.2 测试仪器 7

 6.3 测试方法 9

7 检验规则 18

 7.1 检验规则说明 18

 7.2 鉴定检验 18

 7.3 出厂检验 18

 7.4 检验项目 18

参考文献 21

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中央军委装备发展部提出。

本文件由全国北斗卫星导航标准化技术委员会(SAC/TC 544)归口。

本文件起草单位：北京大学、中国计量科学研究院、中国卫星导航工程中心、中国航天科技集团第五研究院五一〇所、成都天奥电子股份有限公司、中国航天科工集团第二研究院二〇三所。

本文件主要起草人：王延辉、张爱敏、焦文海、刘莹、王骥、赵杏文、黄凯。



铯原子钟技术要求及测试方法

1 范围

本文件规定了铯原子钟(又称铯原子频率标准)产品的技术要求、测试方法和检验规则。
本文件适用于铯原子钟产品的研制、生产与验收。

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 1002—2008 家用和类似用途单相插头插座 型式、基本参数和尺寸
- GB 4824—2019 工业、科学和医疗设备 射频骚扰特性 限值和测量方法
- GB/T 4857.23—2012 包装 运输包装件基本试验 第 23 部分:随机振动试验方法
- GB/T 6587—2012 电子测量仪器通用规范
- GB/T 17626.3—2016 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 17626.4—2018 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
- GB/T 17626.6—2017 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度
- GB/T 17626.12—2013 电磁兼容 试验和测量技术 振铃波抗扰度试验
- GB/T 34094—2017 信息技术设备功耗测量方法
- JJG 492—2009 铯原子频率标准检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

磁场敏感度 magnetic sensitivity

设备在正常工作的磁场环境范围内,其输出特性随磁场变化的程度。

注:通常以单位高斯变化(每变化 1 Gs)引起设备信号输出特性(相对频率偏差)变化量来表示。

3.2

频率复现性 frequency repeatability

频标工作一段时间关机后,下次再开机达到稳定后,频率值与上次关机时频率值的一致程度。

注:用两次相对频差表示。

[来源:JJF 1180—2007, 3.38, 有修改]

3.3

频率调整范围 frequency setting range

通过频率调整指令所能实现的频率输出范围。

3.4

频率调整分辨力 frequency setting resolution

通过频率调整指令所能实现的频率调整的最小值。



3.5

频率稳定度 frequency stability

描述平均频率随机起伏的量。

注：平均时间称为取样时间。不同的稳定度量值对应不同的取样时间。

[来源:JJF 1180—2007,3.23,有修改]

3.6

温度敏感度 temperature sensitivity

设备在正常工作的温度范围内,其输出特性随温度变化的程度。

注：通常以单位温度变化(每变化 1 ℃)引起设备信号输出特性(相对频率偏差)变化量来表示。

3.7

相对频率偏差 relative frequency offset

频率实际值与频率标称值之差。

注：一般用相对值表示,如偏差 $y = \frac{f_x - f_0}{f_0}$, f_0 为标称值, f_x 为实际测得值。

[来源:JJF 1180—2007,3.20,有修改]

3.8

相位噪声 phase noise

单边带偏离信号载频处单位带宽(取 1 Hz)内功率与载频功率之比。

注：单位为 dBc/Hz。偏离载频的偏离值称为傅里叶频率,一般取 1 Hz~100 kHz。

[来源:JJF 1180—2007,3.31,有修改]

3.9

谐波失真 harmonic distortion

目标谐波的均方根值与信号电平均方根值的比值。

4 铯原子钟的分类和组成

4.1 概述

铯原子钟是以铯原子束为频率参考的被动原子频率标准,其工作原理是利用微波场与铯原子相互作用产生鉴频信号,利用鉴频信号将微波频率锁定在铯原子基态的超精细能级上,从而实现基准频率信号的输出,输出信号与原子跃迁频率具有同等水平的相对频率偏差和长期稳定度特性。铯原子钟主要包括铯原子谐振器、微波频率单元和电路控制单元等组成部分,如图 1。

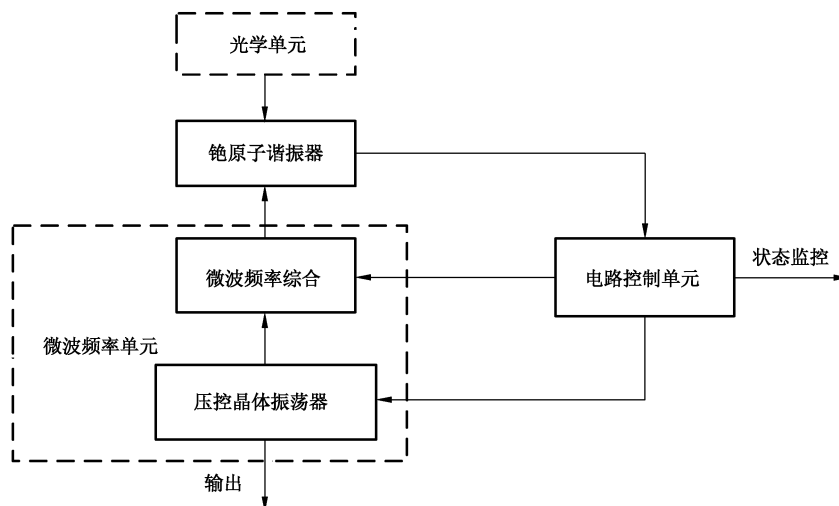


图 1 铯原子钟的基本结构

4.2 铯原子钟产品的分类

为了实现对微波作用后原子状态的检测,需要对原子束进行态制备。按原子态制备和检测方法的不同,铯原子钟可分为磁选态铯原子钟、光抽运铯原子钟和磁选态光检测铯原子钟三类。磁选态铯原子钟采用选态磁铁产生的非均匀磁场进行原子态制备,并采用热丝离化与电子倍增器放大技术检测原子态获得鉴频信号;光抽运铯原子钟采用激光抽运技术进行原子态制备、采用激光诱导荧光检测技术检测原子态;磁选态光检测铯原子钟采用选态磁铁产生的非均匀磁场进行原子态制备、采用激光诱导荧光检测技术检测原子态。

按照性能指标要求的不同,铯原子钟可分为标准型铯原子钟和高性能型铯原子钟两类。

4.3 铯原子钟产品的组成

4.3.1 铯原子谐振器

铯原子谐振器是铯原子钟的核心部分,主要用于在高真空的环境下产生准直的铯原子束。在铯原子谐振器中内置微波谐振腔,当原子束经过谐振腔时,原子束与微波场相互作用发生跃迁。铯原子谐振器还包含态检测装置,用于将原子束的状态转化为电信号。在磁选态铯原子钟中,应内置离化丝、电子倍增器等态检测装置;对于光抽运铯原子钟和磁选态光检测铯原子钟,应内置荧光检测装置。

4.3.2 微波频率单元

微波频率单元主要包括压控晶体振荡器和微波频率综合部分,微波频率综合部分将压控晶体振荡器的输出信号进行倍频和调制,产生微波激励信号馈入铯原子振荡器的微波谐振腔中。

4.3.3 电路控制单元

电路控制单元对铯原子谐振器输出的误差信号进行处理,并输出到微波频率单元,从而实现对压控晶体振荡器的闭环锁定。

电路控制单元同时对铯原子钟的各部分工作状态进行监控,通过与上位机的通信输出铯原子钟的状态信息。

4.3.4 光学单元

在光抽运铯原子钟中,光学单元输出两束激光分别对原子束进行态制备和态检测。

在磁选态光检测铯原子钟中,光学单元输出一束激光对原子束进行态检测。

5 技术要求

5.1 功能要求

铯原子钟应具备以下功能:

- 信号输出,铯原子钟需能够输出 10 MHz 正弦信号及 1 PPS 脉冲信号,可输出 5 MHz 正弦信号;
- 自动闭环锁定功能,铯原子钟在开机或断电重启的情况下能自动实现闭环锁定;
- 频率调整功能,铯原子钟应可以通过控制面板或者调整指令实现输出频率调整;
- 外同步功能,铯原子钟应具备通过外部 1 PPS 信号进行频率信号同步的功能;
- 远程监控功能,铯原子钟应可以利用监控端口,通过产品对应指令实现远程监控功能;
- 故障检测功能,铯原子钟应具备故障自检、故障报警以及工作参数信息上传的功能。

5.2 性能要求

铯原子钟产品应满足如表 1 性能要求。

表 1 铯原子钟产品性能指标要求

| 序号 | 性能 | 指标要求 | |
|--|----------------------|---|-----------------------|
| 1 | 相对频率偏差 | 标准型 | 高性能型 |
| | | 优于±1E-12 ^a | 优于±5E-13 ^b |
| 2 | 频率调整范围 | 优于±1E-11 ^c | |
| 3 | 频率调整分辨力 | ≤1E-15 | |
| 4 | 频率复现性 | ≤2E-13 | |
| 5 | 10 MHz、5 MHz 正弦信号幅度 | 13 dBm±1 dBm(阻抗 50 Ω) | |
| 6 | 谐波失真(10 MHz、5 MHz) | ≤−40 dBc | |
| 7 | 非谐波失真(10 MHz、5 MHz) | ≤−80 dBc | |
| 8 | 1 PPS 信号幅度 | 高电平电压 V _h 满足 2.4 V≤V _h ≤5.0 V 低电平电压 V _l 满足 0.0 V≤V _l ≤0.7 V (阻抗 50 Ω) | |
| 9 | 1 PPS 信号宽度 | 20 μs±1 μs | |
| 10 | 1 PPS 信号上升时间 | ≤5 ns | |
| 11 | 1 PPS 信号抖动 | ≤1 ns RMS | |
| 12 | 1 PPS 信号同步误差 | 优于±50 ns | |
| 13 | 1 PPS 信号相位一致性 | ≤1 ns | |
| 14 | 温度敏感度 (18 ℃~28 ℃) | 标准型 | 高性能型 |
| | | ≤1E-13/℃ | ≤5E-14/℃ |
| 15 | 磁场敏感度(0~2 Gs) | ≤2E-13/Gs | |
| 16 | 锁定时间 | ≤60 min | |
| ^a 相对频率偏差优于±1E-12 指−1E-12 至 1E-12 范围内的相对频率偏差满足指标要求。 ^b 相对频率偏差优于±5E-13 指−5E-13 至 5E-13 范围内的相对频率偏差满足指标要求。 ^c 频率调整范围优于±1E-11 指频率正向、负向调整范围应大于 1E-11。 | | | |

输出 10 MHz 信号应满足如表 2 的频率稳定度要求和表 3 的单边带相位噪声要求。

表 2 铯原子钟产品频率稳定度指标要求

| 取样时间 | 标准型 | 高性能型 |
|---------|-----------------------|-----------------------|
| 1 s | $\leq 1.2\text{E-}11$ | $\leq 5.0\text{E-}12$ |
| 10 s | $\leq 8.5\text{E-}12$ | $\leq 3.5\text{E-}12$ |
| 100 s | $\leq 2.7\text{E-}12$ | $\leq 8.5\text{E-}13$ |
| 1 000 s | $\leq 8.5\text{E-}13$ | $\leq 2.7\text{E-}13$ |

表 2（续）

| 取样时间 | 标准型 | 高性能型 |
|-----------|-----------------------|-----------------------|
| 10 000 s | $\leq 2.7\text{E-}13$ | $\leq 8.5\text{E-}14$ |
| 100 000 s | $\leq 8.5\text{E-}14$ | $\leq 2.7\text{E-}14$ |
| 5 d | $\leq 5.0\text{E-}14$ | $\leq 1.0\text{E-}14$ |

表 3 铯原子钟产品相位噪声指标要求

| 傅里叶频率 f | $\mathcal{L}(f)$ |
|-----------|----------------------------|
| 1 Hz | $\leq -100 \text{ dBc/Hz}$ |
| 10 Hz | $\leq -130 \text{ dBc/Hz}$ |
| 100 Hz | $\leq -145 \text{ dBc/Hz}$ |
| 1 kHz | $\leq -150 \text{ dBc/Hz}$ |
| 10 kHz | $\leq -154 \text{ dBc/Hz}$ |
| 100 kHz | $\leq -154 \text{ dBc/Hz}$ |

5.3 电气特性

铯原子钟产品应满足如表 4 的电气特性要求。

表 4 铯原子钟产品电气特性要求

| 序号 | 电气性能 | 路数 | 接口 |
|----|-----------------|----------|-----------------------|
| 1 | 频率信号输出 | ≥ 2 | N 型母头 (50 Ω) |
| 2 | 秒脉冲信号输出 (1 PPS) | ≥ 2 | BNC 母头 (50 Ω) |
| 3 | 1 PPS 同步信号输入 | ≥ 1 | BNC 母头 (50 Ω) |

5.4 通信功能要求

5.4.1 通信接口与功能要求

铯原子钟应具备 RS-232C 异步串口通信功能,包括编号设置、频率微调、输出频率选择、1 PPS 同步、1 PPS 输出相位调整、1 PPS 输出宽度调整及监控状态查询功能。

5.4.2 通信速率与字节帧结构

波特率采用 115 200;字节帧结构为 1 个起始位“0”,8 个数据位,1 位停止位“1”,无奇偶校验位;低位在前,高位在后。如表 5。

表 5 RS-232C 异步串口通信速度和字节帧结构

| 波特率 | 起始位 | 数据位 | 校验位 | 停止位 |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| 115200 | 1 位 | 8 位 | 无 | 1 位 |

5.4.3 数据帧格式说明

完整的一帧数据由帧头、设备编号、命令编号、数据长度、数据内容、检验和帧尾组成，具体要求见图 2。

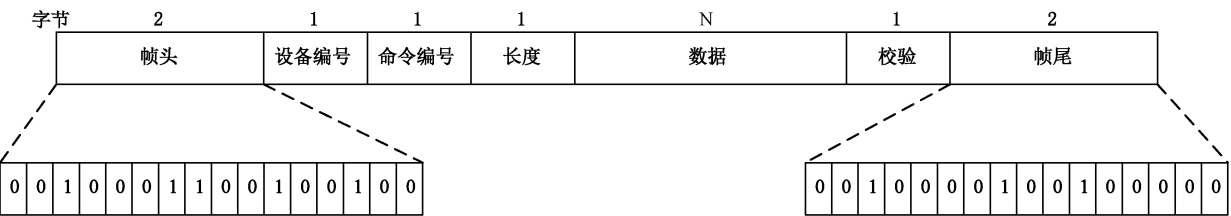


图 2 铯原子钟与上位机通信帧格式

以下对各字节内容进行具体说明：

- a) 帧头：帧头在每个数据帧的开始部分，由二个字节组成，固定为 0x23,0x24。
- b) 设备编号：由一个字节组成，范围为 0~255。铯原子钟接收到的设备编号与铯原子钟的设备编号一致时，该命令帧有效。编号为 255 时，仅更改铯原子钟的设备编号和查询铯原子钟的设备编号时有效。
- c) 命令编号：用于选取命令，长度为 1 字节。
- d) 长度：用于表征传输数据内容的长度 N ，以字节为单位；根据不同的命令编号，数据长度不同。
- e) 数据：一帧命令中需要传输的真实数据。真实数据采用大端格式进行传输，即高字节在前，低字节在后。根据不同的命令编号，数据内容不同。
- f) 校验：由一个字节组成，检验值为数据内容进行异或操作的结果。
- g) 帧尾：由二个字节组成，固定为 0x21,0x20。

5.5 供电要求

铯原子钟应满足以下供电要求：

- a) 电压额定值：220 V，允许范围：额定值 $\pm 10\%$ ；
- b) 频率额定值：50 Hz，允许范围：额定值 $\pm 2\%$ ；
- c) 电源连接器为单相两极带接地插头，符合 GB/T 1002—2008 的规定。

5.6 外观要求

前面板应标明铯原子钟的名称、型号，应配备指示灯以显示整机工作状态。后面板应具有频率信号和 1 PPS 信号输出接口、1 PPS 同步信号输入接口和接地端子等。

5.7 尺寸和质量要求

铯原子钟的尺寸和质量应满足以下要求：

- a) 尺寸：整机高度 $\leq 4U$ ；
- b) 质量： ≤ 40 kg。

注：4U 高度为 17.78 cm。

5.8 功耗要求

铯原子钟应满足以下功耗要求：

- a) 峰值功耗： ≤ 150 W；
- b) 平均功耗： ≤ 110 W。

5.9 环境适应性

铯原子钟产品应满足以下环境适应性要求：

- a) 储存温度范围，满足 -20 °C \sim 50 °C范围内储存的条件；
- b) 工作温度范围，满足 18 °C \sim 28 °C范围内正常工作；
- c) 运输，可满足航空、公路及铁路运输要求，通过按 GB/T 4857.23—2012 要求的振动试验。

5.10 电磁兼容性

产品应满足以下电磁兼容性要求：

- a) 10 kHz \sim 10 MHz 电源线传导发射特性，应满足 GB 4824—2019 的要求；
- b) 10 kHz \sim 400 MHz 电缆束注入传导敏感度，应满足 GB/T 17626.6—2017 的要求；
- c) 电缆束注入脉冲激励传导敏感度，应满足 GB/T 17626.4—2018 的要求；
- d) 10 kHz \sim 100 MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感，应满足 GB/T 17626.12—2013 的要求；
- e) 10 kHz \sim 18 GHz 电场辐射发射，应满足 GB 4824—2019 的要求；
- f) 10 kHz \sim 40 GHz 电场辐射敏感度，应满足 GB/T 17626.3—2016 的要求。

5.11 可靠性和维修性要求

铯原子钟应满足以下可靠性和维修性要求：

- a) 平均故障间隔时间(MTBF) $\geq 20\,000$ h；
- b) 寿命要求，标准型铯原子钟寿命 ≥ 8 年，高性能型铯原子钟寿命 ≥ 5 年；
- c) 平均故障修复时间(MTTR) ≤ 48 h。

6 测试方法



6.1 测试环境条件

除另有规定外，测试应在下列条件下进行：

- a) 温度： 18 °C \sim 28 °C，测试期间温度最大允许变化 ± 1 °C；
- b) 相对湿度： 10% \sim 60% ；
- c) 气压： 30 kPa \sim 300 kPa；
- d) 环境磁场： ≤ 2 Gs；
- e) 电源：电压 $220(1\pm 10\%)$ V，频率 $50(1\pm 2\%)$ Hz；
- f) 测试所用仪器、仪表、设备应经过检定或校准，满足测量要求并在有效期内。

6.2 测试仪器

6.2.1 参考频标

用于铯原子钟指标测试的参考频标应满足以下要求：

- a) 输出频率包括 5 MHz、10 MHz；
- b) 频率稳定度优于被测铯原子钟同样取样时间频率稳定度的 1/3；
- c) 相对频率偏差比被测铯原子钟优于一个量级；
- d) 相位噪声比被测铯原子钟相应频偏处的相位噪声小 10 dB。

参考频标可以选用一个或多个。

6.2.2 频标比对器

用于铯原子钟指标测试的频标比对器应满足以下要求：

- a) 输入频率，支持 5 MHz 和 10 MHz；
- b) 比对不确定度优于被测铯原子钟相同取样时间频率稳定度的 1/3。

6.2.3 相位噪声测量装置

用于铯原子钟指标测试的相位噪声测量装置应满足以下要求：

- a) 输入频率，支持 5 MHz 和 10 MHz；
- b) 傅里叶频率范围，可达 1 Hz~100 kHz；
- c) 相位噪声本底，比被测铯原子钟在相应傅里叶频率点的相位噪声小 10 dB。

6.2.4 频谱分析仪

用于铯原子钟指标测试的频谱分析仪应满足以下要求：

- a) 频率范围覆盖 1 MHz~50 MHz；
- b) 动态范围： ≥ 100 dB。

6.2.5 示波器

用于铯原子钟指标测试的示波器应满足以下要求：

- a) 带宽： ≥ 1 GHz；
- b) 采样率： ≥ 3 GHz。

6.2.6 时间间隔计数器

用于铯原子钟指标测试的时间间隔计数器应满足以下要求：

- a) 时间间隔范围在 1 ns~1 s；
- b) 最大允许误差为 ± 1 ns；
- c) 触发电平在 (0~5) V 范围内连续可调，并能指示电平值；
- d) 具备外接频标功能。

6.2.7 秒脉冲(1 PPS)发生器

用于铯原子钟指标测试的秒脉冲发生器应满足以下要求：

- a) 脉冲幅度 ≥ 2.4 V，满足 TTL 电平要求(阻抗 50 Ω)；
- b) 脉冲宽度： ≥ 100 ns；
- c) 脉冲上升时间： < 5 ns；
- d) 具备外接频标功能。

6.2.8 高低温试验箱

用于测试铯原子钟的温度敏感度、储运温度范围、工作温度范围等指标或特性的高低温试验箱应满

足以下要求：

- a) 高低温试验箱的设定温度范围覆盖 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度偏差 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 高低温试验箱内部温度梯度 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- c) 高低温试验箱的温度波动度 $\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- d) 升降温速率低于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

6.2.9 三维亥姆霍兹线圈

用于测试铯原子钟的磁场敏感度指标的三维亥姆霍兹线圈应满足以下要求：

- a) 有效工作区域不小于 0.8 m ；
- b) 每个方向磁场强度不小于 2 Gs 。

6.3 测试方法

6.3.1 功能测试

6.3.1.1 信号输出



图3 信号输出测试示意图

信号输出测试方法示意图见图3。被测铯原子钟的输出信号接入示波器，示波器的输入阻抗选为 $50\text{ }\Omega$ ，直接测量铯原子钟的频率信号和秒脉冲信号，示波器上检测到的信号应为设定的 10 MHz 或 5 MHz 和 1 PPS 信号。

6.3.1.2 自动闭环锁定

被测铯原子钟开机后 60 min 内闭环锁定，通过面板或产品对应指令读取闭环锁定状态信息。

6.3.1.3 频率调整

利用调试接口通过指令进行频率调整，并按JJG 492—2009中6.2.2.7规定的方法对频率调整功能进行验证。

6.3.1.4 外同步

按JJG 492—2009中6.2.2.10规定的方法进行测试。

6.3.1.5 远程监控

被测铯原子钟通过RS-232C异步串口与上位机连接，发送产品对应指令，观察产品运行状态，实现远程监控功能。

6.3.1.6 故障检测

被测铯原子钟可通过面板或者产品对应指令，读取故障自检信息、故障报警信息以及工作参数上传的功能。

6.3.2 性能测试

6.3.2.1 相对频率偏差

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.6 规定的方法进行测试。

6.3.2.2 频率调整范围

将铯原子钟的相对输出频率调整量设置为 $+1\text{E-}11$, 按 JJG 492—2009 中 6.2.2.7 规定的方法进行测试; 再设置为 $-1\text{E-}11$, 按 JJG 492—2009 中 6.2.2.7 规定的方法进行测试。

6.3.2.3 频率调整分辨力

被测铯原子钟标定的频率调整分辨力记为 δ_y , 将被测铯原子钟的相对输出频率调整量设置为频率调整分辨力的 c 倍, 使得相对输出频率设置为 $c \cdot \delta_y \geq 1\text{E-}13$, 按 JJG 492—2009 中 6.2.2.7 规定的方法进行测试。

6.3.2.4 频率复现性

铯原子钟开机锁定后, 运行 0.5 h (或按说明书给定运行时间), 按直接测频法 (见 JJG 492—2009) 测量相对频率偏差, 测试时间为 24 h, 测得相对频率偏差 $y_1(\tau)$; 关机 24 h, 再次开机锁定后, 运行 0.5 h (或按说明书给定运行时间), 测量相对频率偏差, 测试时间为 24 h, 测得相对频率偏差 $y_2(\tau)$, 按式 (1) 计算频率复现性 R :

$$R = |y_2(\tau) - y_1(\tau)| \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

R ——频率复现性;

$y_1(\tau)$ 、 $y_2(\tau)$ ——关机前后的相对频率偏差值;

τ ——取样时间。

6.3.2.5 频率稳定度

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.4 规定的方法, 测试取样时间 1 s ~ 100 000 s 频率稳定度; 取样时间为 5 d 的频率稳定度可以采用至少 10 个数据点计算 (对应连续测量时间不少于 50 d)。

6.3.2.6 相位噪声

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.5 规定的方法进行测试。

6.3.2.7 频率输出信号幅度

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.2 规定的方法进行测试。

6.3.2.8 谐波失真

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.3 规定的方法进行测试。

6.3.2.9 非谐波失真

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.3 规定的方法进行测试。

6.3.2.10 1 PPS 信号幅度

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.8 规定的方法进行测试。

6.3.2.11 1 PPS 信号宽度

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.8 规定的方法进行测试。

6.3.2.12 1 PPS 信号上升时间

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.9 规定的方法进行测试。

6.3.2.13 1 PPS 信号抖动

1 PPS 信号抖动测试示意图如图 4。被测铯原子钟的秒脉冲信号接入时间间隔计数器,时间间隔计数器接外参考频标,设置为周期测量模式,触发电平为两脉冲幅度的 1/2,测量 100 个数据,计算其标准偏差作为秒脉冲抖动测试值。

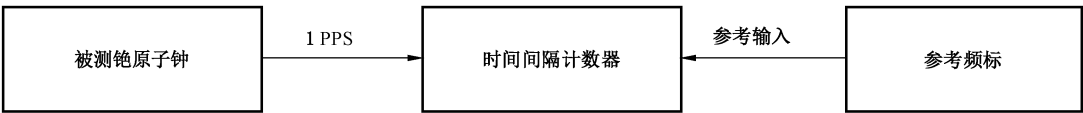


图 4 1 PPS 信号抖动测试示意图

6.3.2.14 1 PPS 信号同步误差

按 JJG 492—2009 中 6.2.2.10 规定的方法进行测试。

6.3.2.15 1 PPS 信号相位一致性

1 PPS 信号相位一致性测试示意图如图 5。被测铯原子钟的两路 1 PPS 信号接入示波器。调节示波器输入阻抗为 50 Ω,其中一路作为触发信号,使屏幕上显示稳定的脉冲波形,取两路秒脉冲信号的上升沿幅度的 1/2 处作为秒脉冲触发的时刻,测出两路秒脉冲的时间间隔,连续测试 100 次,取时间间隔最大值作为两路秒脉冲相位差。

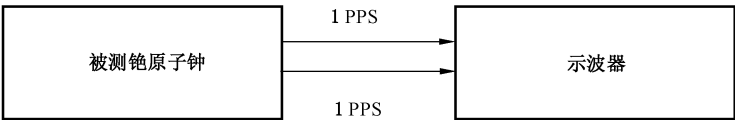


图 5 1 PPS 信号相位一致性测试示意图

6.3.2.16 温度敏感度

温度敏感度测试示意图见图 6。

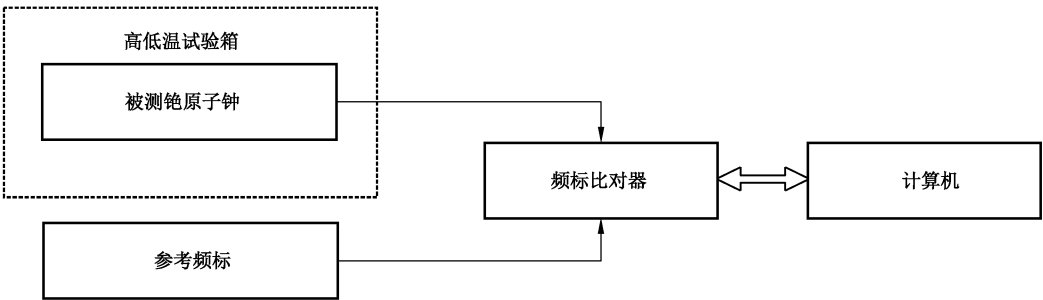


图 6 温度敏感度测试示意图

测试步骤如下：

- 调节高低温试验箱的温度,设定初始温度值为 18 ℃;
- 使铯原子钟充分预热;
- 设置高低温试验箱的温度,使其内部温度按图 7 的时序变化,温度变化速率 $\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,每个固定温度点持续时间 $\Delta t_1 \geq 12\text{ h}$;
- 连续测量一个温度周期内相对频率偏差,去除每个温度点下前 4 h 数据,计算 $(\Delta t_1 - 4\text{ h})$ 的铯原子钟相对频率偏差平均值 $\overline{y_{T_i}}(\tau)$, i 为不同温度点序号,按式(2)计算温度敏感度 S_{T_i} ;
- 取 S_{T_i} 最大值作为铯原子钟温度敏感度,最大值应符合 5.2 的规定。

$$S_{T_i} = \left| \frac{\overline{y_{T_{i+1}}}(\tau) - \overline{y_{T_i}}(\tau)}{5} \right| \dots\dots\dots (2)$$

式中：

S_{T_i} ——温度敏感度,单位为每摄氏度($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

$\overline{y_{T_i}}(\tau)$ ——在 T_i 时序内的相对频率偏差平均值;

τ ——取样时间,取 $(\Delta t_1 - 4\text{ h})$ 。

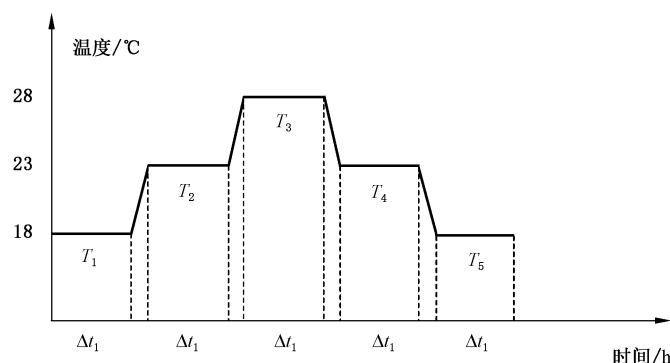


图 7 温度敏感度测试时序图

6.3.2.17 磁场敏感度

磁场敏感度测试示意图如图 8。

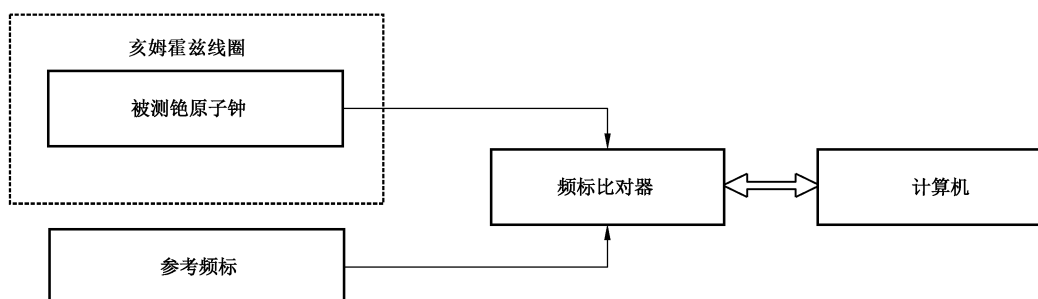


图 8 磁场敏感度测试示意图

测试步骤如下：

- 标定三维亥姆霍兹线圈:即调整三维亥姆霍兹线圈供电电流,同时用磁场强度计测量铯原子钟被测位置的磁场强度,记录三个方向磁场强度均为 0 时的电流值;再分别使磁场强度中一个方向为 2 Gs、其余两个方向为 0,记录三组对应的电流值;

- b) 按图 8 连接测试设备和被测铯原子钟,并使铯原子钟充分预热;
- c) 分别设置三维亥姆霍兹线圈供电电流,使其内部磁场强度按图 9 的时序变化,每个时间段的磁场值记为 H_i ,每次持续测试时间 $\Delta t_2 \geq 11\text{ h}$;
- d) 完成一个方向的测试后,去除第 1 个小时数据,计算 $(\Delta t_2 - 1\text{ h})$ 时间内铯原子钟相对频率偏差平均值 $\overline{y}_{H_i}(\tau)$, i 为不同磁场强度值序号,按式(3)计算 S_{H_i} ;
- e) 取 S_{H_i} 最大值作为该方向的磁场敏感度;
- f) 重复 c)~e),完成三个方向的磁场敏感度测试,最大值应符合 5.2 的规定。

$$S_{H_i} = \left| \frac{\overline{y}_{H_{i+1}}(\tau) - \overline{y}_{H_i}(\tau)}{2} \right| \dots\dots\dots (3)$$

式中:
 S_{H_i} ——磁场敏感度,单位为每高斯(Gs^{-1});
 $\overline{y}_{H_i}(\tau)$ ——在 H_i 时序内的相对频率偏差平均值;
 τ ——取样时间,取 $(\Delta t_2 - 1\text{ h})$ 。

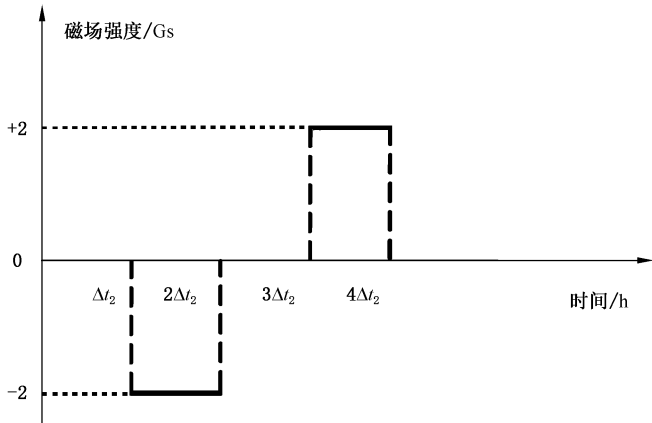


图 9 磁场敏感度测试时序图

6.3.2.18 锁定时间

测量铯原子钟从接通外部电源到其达到稳定锁定状态经过的时间,应符合 5.2 的规定。

6.3.3 电气特性测试



6.3.3.1 频率信号输出

检查铯原子钟频率输出信号与接口类型,按测试方法 6.3.1.1 测试各路频率信号输出,路数和接口应满足 5.3 的要求。

6.3.3.2 秒脉冲(1 PPS)信号输出

检查铯原子钟频率输出信号与接口类型,按测试方法 6.3.1.1 测试各路秒脉冲信号输出,路数和接口应满足 5.3 的要求。

6.3.4 通信功能测试

6.3.4.1 通信接口与协议测试

目视检查铯原子钟的通信接口是否为 RS-232C 标准 9 针通用接口。按照 5.4.2 和 5.4.3 规定的通

信协议用上位机与铯原子钟进行通信,各通信功能测试方法见 6.3.4.2~6.3.4.8。

6.3.4.2 编号设置测试

采用铯原子钟状态监控上位机,更改设备编号、查询设备编号。设备编号可查询,查询结果与更改的设备编号一致,应满足 5.4 的要求。

6.3.4.3 频率微调测试

采用铯原子钟状态监控上位机,更改铯原子钟的输出频率正向微调 $100\ \mu\text{Hz}$,采用 6.3.2.1 的测试方法,测试微调输出频率前,后微调输出频率后的频率相对偏差,偏差值等于 $100\ \mu\text{Hz}$ 。

查询频率微调参数,应与设置值一致。

6.3.4.4 输出频率选择测试

采用铯原子钟状态监控上位机,更改铯原子钟的输出频率,选择 5 MHz 输出,或者 10 MHz 输出,采用 6.3.1.1 的测试方法,铯原子钟频率输出的 5 MHz/10 MHz 信号与设置值一致。

查询频率选择参数,应与设置值一致。

6.3.4.5 1 PPS 同步测试

采用 6.3.1.4 的测试方法,通过铯原子钟状态监控上位机,下发 1 PPS 同步命令,能实现同步功能并应满足同步指标。

6.3.4.6 1 PPS 输出相位调整测试

采用铯原子钟状态监控上位机,更改铯原子钟的输出 1 PPS 的相位,采用 6.3.2.14 的测试方法,测试同步误差,多次更改并多测试测试,记录相对同步误差,相对同步误差满足 1 PPS 相位更改参数。

查询 1 PPS 输出相位调整参数,应与设置值一致。

6.3.4.7 1 PPS 输出宽度测试

采用铯原子钟状态监控上位机,更改铯原子钟的输出 1 PPS 的脉冲宽度,采用 6.3.2.11 的测试方法,测量 1 PPS 输出宽度,应与更改参数一致。

查询 1 PPS 输出宽度,应与设置值一致。

6.3.4.8 监控状态查询

采用铯原子钟状态监控上位机,查询铯原子钟状态,铯原子钟应能正常返回状态参数,并且锁定。

6.3.5 电源适应性测试

按 GB/T 6587—2012 中 5.12 的规定进行。

6.3.6 外观测试

按 GB/T 6587—2012 中 5.3 的规定进行。

6.3.7 尺寸和重量

按 GB/T 6587—2012 中 5.4 的规定进行。

6.3.8 功耗

按 GB/T 34094—2017 中 4.5 的规定进行。

6.3.9 环境适应性测试

6.3.9.1 储存温度范围

检验铯原子钟在完成高低温储运后,能否正常工作。温度特性试验示意图见图 10。

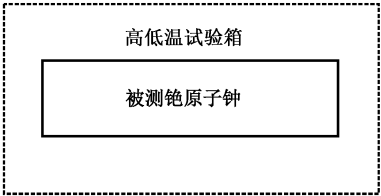


图 10 温度特性试验示意图

测试步骤如下。

- a) 将被测铯原子钟置于高低温试验箱内,将高低温试验箱温度设置为 23 ℃。被测铯原子钟开机,待闭环锁定后,按照被测铯原子钟关机流程进行关机和断电。
- b) 开始低温储存试验。将高低温试验箱温度设置为 -20 ℃,保温 24 h。保温时间结束后,将高低温试验箱温度设置为 23 ℃,保温至少 8 h 后,被测铯原子钟开机,锁定时间内闭环锁定指示应正常。低温储运试验完成,按照被测铯原子钟关机流程进行关机和断电。
- c) 开始高温储存试验。将高低温试验箱温度设置为 50 ℃,保温 24 h。保温时间结束后,将高低温试验箱温度设置为 23 ℃,保温至少 8 h 后,被测铯原子钟开机,锁定时间内闭环锁定正常,高温储运试验完成,按照被测铯原子钟关机流程进行关机和断电。

6.3.9.2 工作温度范围

检验铯原子钟是否可以在工作温度范围内正常工作,温度特性试验示意图如图 10,测试步骤如下。

- a) 将被测铯原子钟置于高低温试验箱内,将高低温试验箱温度设置为 18 ℃。被测铯原子钟开机。
- b) 待闭环锁定后,按照 6.3.1 进行铯原子钟的功能测试,按 6.3.2 进行铯原子钟的性能测试,按 6.3.3 测试铯原子钟的电气特性。
- c) 将高低温试验箱温度设置为 28 ℃,待温度稳定后,重复 b)。

6.3.9.3 运输振动环境测试

模拟被测铯原子钟在送样过程中,在公路→铁路/空运→公路环境下的振动适应性。见 GB/T 4857.23—2012 的内容,运输振动试验测试示意图如图 11。

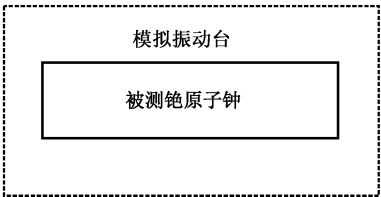


图 11 运输振动试验测试示意图

测试步骤如下。

- a) 试验前测试:对被测铯原子钟进行外观、多余物测试。轻轻晃动,没有多余物。外观正常,无磨损。被测铯原子钟开机,待闭环锁定后,按 JJG 492—2009 中 6.2.2.4 规定的方法,测试取样时

间分别为 1 s、10 s、100 s 的频率稳定度,测试完成后按照被测铯原子钟关机流程进行关机和断电。

- b) 试验过程:将被检测的铯原子钟装入专用包装箱。将装有被测铯原子钟的包装箱固定在振动台上,其质心质量尽量在振动台的中心线上。按照振动试验条件(表 6、表 7 和表 8)进行公路运输振动试验→铁路运输振动试验→公路振动试验。
- c) 试验后测试:进行多余物及外观检查:轻轻摇晃,内部没有响声,外观没有磨损的痕迹。被测铯原子钟开机,锁定时间内闭环锁定应正常,再次按 JJG 492—2009 中 6.2.2.4 规定的方法,测试取样时间分别为 1 s、10 s、100 s 的频率稳定度,按照被测铯原子钟关机流程进行关机和断电,铁路运输振动试验完成。
- d) 重复 b),按照振动试验条件(表 6、表 7 和表 8)进行公路运输振动试验→空运振动试验→公路振动试验,之后重复 c),完成空运振动试验。

表 6 公路运输振动试验条件

| 垂向 | | 横向 | | 纵向 | |
|--|--------------------------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
| 频率 Hz | 功率谱密度 g^2/Hz | 转折点频率 Hz | 转折点功率谱密度值 g^2/Hz | 转折点频率 Hz | 转折点功率谱密度值 g^2/Hz |
| 10 | 0.015 | 10 | 0.000 13 | 10 | 0.006 5 |
| 40 | 0.015 | 20 | 0.000 65 | 20 | 0.006 5 |
| 500 | 0.000 15 | 30 | 0.000 65 | 120 | 0.000 2 |
| <div>均方根:1.04 g</div> <div></div> | | 78 | 0.000 02 | 121 | 0.003 |
| | | 79 | 0.000 19 | 200 | 0.003 |
| | | 120 | 0.000 19 | 240 | 0.001 5 |
| | | 500 | 0.000 01 | 340 | 0.000 03 |
| | | 均方根:0.204 g | | 500 | 0.000 15 |
| | | | | 均方根:0.74 g | |
| 注 1: 试验时间:X、Y、Z 三轴方向各振动 20 min。 | | | | | |
| 注 2: X、Y、Z 三轴的定义如图 12。 | | | | | |

表 7 铁路运输振动试验条件

| 垂向 | | 横向 | | 纵向 | |
|---------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
| 频率 Hz | 功率谱密度 g^2/Hz | 转折点频率 Hz | 转折点功率谱密度值 g^2/Hz | 转折点频率 Hz | 转折点功率谱密度值 g^2/Hz |
| 3 | 0.002 | 3 | 0.002 | 3 | 0.002 |
| 80 | 0.002 | 80 | 0.002 | 80 | 0.002 |
| 350 | 0.000 03 | 350 | 0.000 03 | 350 | 0.000 03 |
| 注 1: 试验时间:X、Y、Z 三轴方向各振动 20 min。 | | | | | |
| 注 2: X、Y、Z 三轴的定义如图 12。 | | | | | |

表 8 空运振动试验条件

| 垂向 | | 横向 | | 纵向 | |
|--------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
| 频率 Hz | 功率谱密度 g^2/Hz | 转折点频率 Hz | 转折点功率谱密度值 g^2/Hz | 转折点频率 Hz | 转折点功率谱密度值 g^2/Hz |
| 2 | 0.002 | 2 | 0.002 | 2 | 0.002 |
| 12 | 0.01 | 12 | 0.01 | 12 | 0.01 |
| 100 | 0.01 | 100 | 0.01 | 100 | 0.01 |
| 300 | 0.000 01 | 300 | 0.000 01 | 300 | 0.000 01 |
| 注 1：试验时间：X、Y、Z 三轴方向各振动 20 min。 | | | | | |
| 注 2：X、Y、Z 三轴的定义如图 12。 | | | | | |

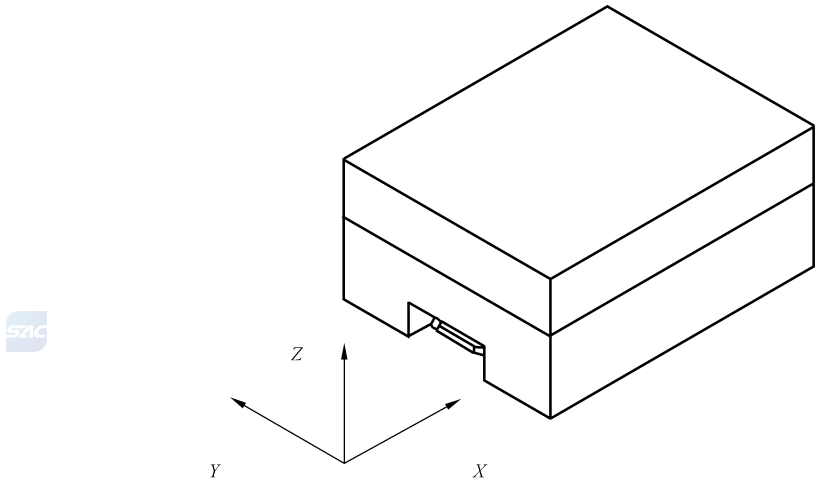


图 12 运输振动试验 X、Y、Z 轴向的定义

6.3.10 电磁兼容性测试

6.3.10.1 10 kHz~10 MHz 电源线传导发射特性

按照 GB 4824—2019 规定的测试方法或等价的同类指标测试方法进行测试。

6.3.10.2 10 kHz~400 MHz 电缆束注入传导敏感度

按照 GB/T 17626.6—2017 规定的测试方法或等价的同类指标测试方法进行测试。

6.3.10.3 电缆束注入脉冲激励传导敏感度

按照 GB/T 17626.4—2018 规定的测试方法或等价的同类指标测试方法进行测试。

6.3.10.4 10 kHz~100 MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感

按照 GB/T 17626.12—2013 规定的测试方法或等价的同类指标测试方法进行测试。

6.3.10.5 10 kHz~18 GHz 电场辐射发射

按照 GB 4824—2019 规定的测试方法或等价的同类指标测试方法进行测试。

6.3.10.6 10 kHz~40 GHz 电场辐射敏感度

按照 GB/T 17626.3—2016 规定的测试方法或等价的同类指标测试方法进行测试。

6.3.11 可靠性和维修性测试

6.3.11.1 MTBF

提供被测铯原子钟的 MTBF 分析报告。

6.3.11.2 寿命

提供被测铯原子钟的寿命分析报告。

6.3.11.3 MTTR

提供被测铯原子钟的 MTTR 分析报告。

7 检验规则

7.1 检验规则说明

本规则规定的检验分为鉴定检验、出厂检验两种。

7.2 鉴定检验

下列情况之一,应进行鉴定检验:

- a) 新产品定型鉴定前;
- b) 产品转厂生产定型鉴定前;
- c) 正式投产后,如设计、工艺材料、元器件有较大改变,可能影响产品性能时;
- d) 产品停产一年以上又重新恢复生产时;
- e) 国家技术监督机构或受其委托的技术检验部门提出鉴定检验要求时;
- f) 出厂检验结果与上批产品检验有较大差异时;
- g) 合同规定时。

7.3 出厂检验

每台铯原子钟产品出厂前应由制造单位的检验部门进行出厂检验,检验项目见表 9。

7.4 检验项目

检验项目见表 9。根据具体情况,使用方和生产方可协商裁减部分检验项目或改变检验顺序。

表 9 检验项目

| 序号 | 检验项目 | | 鉴定检验 | 出厂检验 | 技术要求的 章条号 | 测试方法的 章条号 |
|----|------|--------------------------|------|------|--------------|--------------|
| 1 | 功能测试 | 信号输出 | ○ | ○ | 5.1 | 6.3.1.1 |
| 2 | | 自动闭环锁定 | ○ | ○ | 5.1 | 6.3.1.2 |
| 3 | | 频率调整 | ○ | ○ | 5.1 | 6.3.1.3 |
| 4 | | 外同步 | ○ | ○ | 5.1 | 6.3.1.4 |
| 5 | | 远程监控 | ○ | ○ | 5.1 | 6.3.1.5 |
| 6 | | 故障检测 | ○ | ○ | 5.1 | 6.3.1.6 |
| 7 | 性能测试 | 相对频率偏差 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.1 |
| 8 | | 频率调整范围 | ○ | △ | 5.2 | 6.3.2.2 |
| 9 | | 频率调整分辨力 | ○ | △ | 5.2 | 6.3.2.3 |
| 10 | | 频率复现性 | ○ | △ | 5.2 | 6.3.2.4 |
| 11 | | 频率稳定度 (1 s~100 000 s) | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.5 |
| 12 | | 频率稳定度(5 d) | ○ | — | 5.2 | 6.3.2.5 |
| 13 | | 单边带相位噪声 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.6 |
| 14 | | 10 MHz、5 MHz 信号幅度 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.7 |
| 15 | | 谐波失真 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.8 |
| 16 | | 非谐波失真 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.9 |
| 17 | | 1 PPS 信号幅度 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.10 |
| 18 | | 1 PPS 信号宽度 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.11 |
| 19 | | 1 PPS 信号上升时间 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.12 |
| 20 | | 1 PPS 信号抖动 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.13 |
| 21 | | 1 PPS 信号同步误差 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.14 |
| 22 | | 1 PPS 信号相位一致性 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.15 |
| 23 | | 温度敏感度 | ○ | △ | 5.2 | 6.3.2.16 |
| 24 | | 磁场敏感度 | ○ | △ | 5.2 | 6.3.2.17 |
| 25 | | 锁定时间 | ○ | ○ | 5.2 | 6.3.2.18 |
| 26 | 电气特性 | 频率信号输出 | ○ | ○ | 5.3 | 6.3.3.1 |
| 27 | 电气特性 | 秒脉冲信号输出 | ○ | ○ | 5.3 | 6.3.3.2 |
| 28 | 通信功能 | 通信接口与协议 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.1 |
| 29 | | 编号设置 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.2 |
| 30 | | 频率微调 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.3 |
| 31 | | 输出频率选择 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.4 |
| 32 | | 1 PPS 同步 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.5 |

表 9 (续)

| 序号 | 检验项目 | | 鉴定检验 | 出厂检验 | 技术要求的 章条号 | 测试方法的 章条号 |
|---|---------------|--------------|------|------|--------------|--------------|
| 33 | 通信功能 | 1 PPS 输出相位调整 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.6 |
| 34 | | 1PPS 输出宽度调整 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.7 |
| 35 | | 监控状态查询 | ○ | ○ | 5.4 | 6.3.4.8 |
| 36 | 电源适应性 | | ○ | — | 5.5 | 6.3.5 |
| 37 | 外观要求 | | ○ | ○ | 5.6 | 6.3.6 |
| 38 | 尺寸和 | 尺寸 | ○ | ○ | 5.7 | 6.3.7 |
| 39 | 重量要求 | 重量 | ○ | ○ | 5.7 | 6.3.7 |
| 40 | 功耗要求 | 峰值功耗 | ○ | △ | 5.8 | 6.3.8 |
| 41 | | 平均功耗 | ○ | △ | 5.8 | 6.3.8 |
| 42 | 环境适应性 | 储存温度范围 | ○ | — | 5.9 | 6.3.9.1 |
| 43 | | 工作温度范围 | ○ | △ | 5.9 | 6.3.9.2 |
| 44 | | 运输要求 | ○ | — | 5.9 | 6.3.9.3 |
| 45 | 电磁兼容性 | | ○ | — | 5.10 | 6.3.10 |
| 46 | 可靠性与 维修性要求 | 平均故障间隔时间 | ○ | — | 5.11 | 6.3.11.1 |
| 47 | | 寿命 | ○ | — | 5.11 | 6.3.11.2 |
| 48 | | 平均故障修复时间 | ○ | — | 5.11 | 6.3.11.3 |
| 注：“○”表示“要求的”项目；“△”表示“选作”项目；“—”表示“不要求的”项目。 | | | | | | |

参 考 文 献

- [1] JJF 1180—2007 时间频率计量名词术语及定义
-