

基于 NIMDO 时间频率计量标准的构建



丁超, 范军华, 郁黎, 韩凯

青岛市计量技术研究院, 青岛 266100

【摘要】 传统时间频率计量标准中多由铷原子频率标准或高稳晶振提供参考频率, 铷原子频率标准等需定期向上一级计量标准溯源, 溯源过程检定周期长且仪器在送检过程中易受损。提出以时间频率标准装置(NIMDO)为核心的远程时间频率溯源系统, 实现时间频率实时溯源至原子时标国家计量基准 UTC(NIM), 以 NIMDO 作为参考频率源, 构建众多时间频率领域内的计量标准, 形成从国家计量基准到工作计量器具的三级溯源体系。

【关键词】 原子时标国家计量基准; 远程时间频率; 溯源系统; 时间频率标准装置

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2020.8003

【引用本文】 丁超, 范军华, 郁黎, 等. 基于 NIMDO 时间频率计量标准的构建 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(7): 3-8.

Construction of NIMDO-Based Time and Frequency Measurement Standard

DING Chao, FAN Junhua, YU Li, HAN Kai

Qingdao Institute of Measurement Technology, Qingdao 266100, China

【Abstract】 Traditional time and frequency measurement standards are mostly provided by rubidium atomic frequency standards or high stability crystal oscillators, and rubidium atomic frequency standards need to be periodically traced to higher-level measurement standards, which has a long calibration period, and the instruments are easily damaged during the process of sending them for inspection. The proposed remote time and frequency traceability system with the time and frequency standard device (NIMDO) as the core realizes real-time time and frequency traceability to the atomic time scale national primary standard UTC (NIM) and uses NIMDO as the reference frequency source to build many measurement standards in the time and frequency field, forming a three-level traceability system from the national primary standard to the measuring instruments.

【Key words】 atomic time scale national primary standard, remote time and frequency, traceability system, time and frequency standard device

0 引言

传统时间频率计量标准多由铷原子频率标准或高稳晶振提供参考频率, 铷原子频率标准等需定期向上一级计量标准溯源, 但溯源过程存在检定周期长且仪器在送检过程中易受损。以时间频率标准装置(NIMDO)为核心的远程时间频率溯源系统, 旨在参考原子时标国家计量基准 UTC(NIM), 对远程时间频率源进行实时驯服, 以获得与 UTC(NIM) 的直接溯源及同步, 输出高性能指标的时间频率量值。

以 NIMDO 作为参考频率源, 可构建众多时间频率领域内的计量标准, 缩短时间频率相关工作计量器具到国家计量基准的溯源链, 保障时间频率相关工作计量器具的量值准确可靠。

1 NIMDO 构成及性能

1.1 NIMDO 构成

NIMDO 由 GNSS 时间频率传递系统、铷原子钟和控制系统构成, 如图 1 所示。GNSS 时间频率传递系统是 NIMDO 的重要组成部分, 主要用于时

间频率传输数据的测量;高性能可驯服的铷原子钟为 NIMDO 提供 10 MHz 和 1PPS 信号;驯服算法及工控机构成 NIMDO 的控制系统^[1]。NIMDO 内部原子钟和 UTC(NIM) 分别通过 GNSS 时间频率传递系统与 GNSS 卫星时间进行比对,两者的比对结果通过网络进行共视比对处理^[2],利用 NIMDO 与 UTC(NIM) 的共视比对结果,NIMDO 内部控制系统通过驯服算法对 NIMDO 内部的铷原子钟进行实时驯服,从而实现远程时间频率的溯源传递^[3],如图 2 所示。

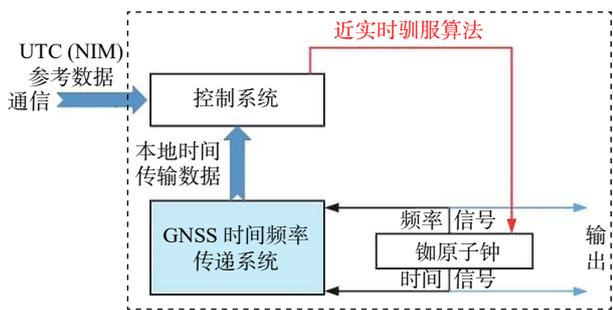


图 1 NIMDO 内部结构
Fig.1 Internal structure of NIMDO

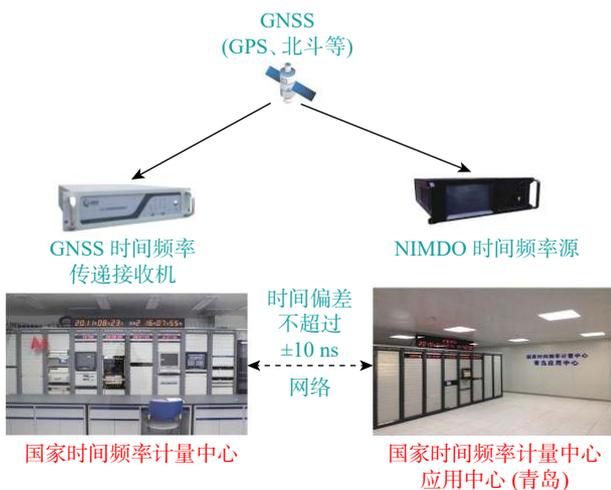


图 2 远程时间频率溯源传递
Fig.2 Remote time and frequency traceability transfer

1.2 NIMDO 性能

以国家时间频率计量中心应用中心(青岛)的 NIMDO 装置为例,通过与 UTC(NIM) 的数据比对,对其性能进行验证和评估。选取 MJD 58948 到 58979 时间段的远程时间溯源观测数据,与 UTC(NIM) 进行 GNSS 卫星数据共视比对,分析 NIMDO 与 UTC(NIM) 的时间偏差和频率偏差,以验证其时间和频率的准确性,进而验证青岛远程时间频率溯源传递

系统时间和频率的稳定性。通过与常用铷原子频率标准相关性指标进行比较,分析其性能的优越性。

MJD 58948 到 58979 时间段的远程时间溯源观测数据如图 3 所示,可得 NIMDO 与 UTC(NIM) 的时间偏差为 ± 6 ns,时间偏差均值为 2.30 ns,标准差为 1.91 ns。如图 4 所示,NIMDO 与 UTC(NIM) 的频率偏差保持在 9×10^{-14} 以内。

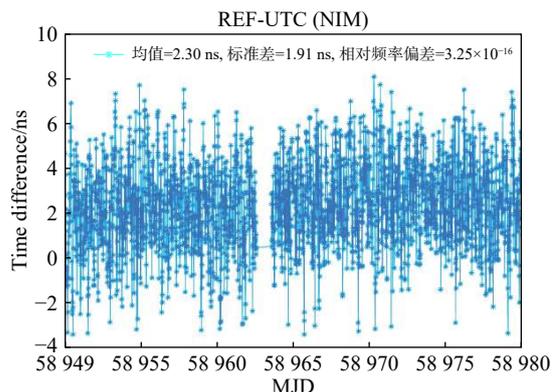


图 3 NIMDO 与 UTC(NIM) 的时间偏差
Fig.3 Time deviation between NIMDO and UTC (NIM)

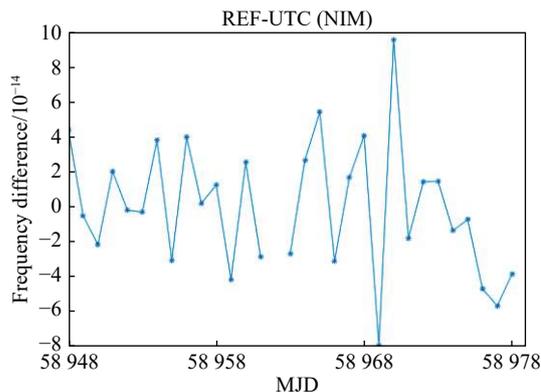


图 4 NIMDO 与 UTC(NIM) 的频率偏差
Fig.4 Frequency deviation between NIMDO and UTC (NIM)

图 5 和图 6 为 NIMDO 的时间稳定性和频率稳定性,可以得出 NIMDO 的时间稳定度 TDEV(1 天)和频率稳定度 MDEV(1 天)分别为 0.3 ns 和 5×10^{-15} 。随着取样时间的增加,时间稳定度 TDEV 接近 150 ps,频率稳定度 MDEV 优于 10^{-15} 量级。

2 基于 NIMDO 计量标准的构建

2.1 NIMDO 计量标准概述

NIMDO 可实时溯源至原子时标国家计量基准 UTC(NIM),同时在时间频率性能上具有较高的准

准确度与稳定度, 可为众多时间频率计量标准提供参考频率及 1PPS 信号。在时间频率计量领域里各项计量标准检定规程及校准规范对参考频率的性能指标要求基于 NIMDO 可构建的 9 项计量标准, 如表 1 所示。

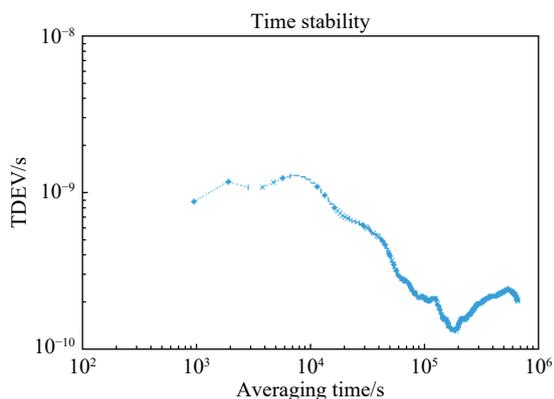


图 5 NIMDO 的时间稳定度 TDEV
Fig.5 Time stability TDEV of NIMDO

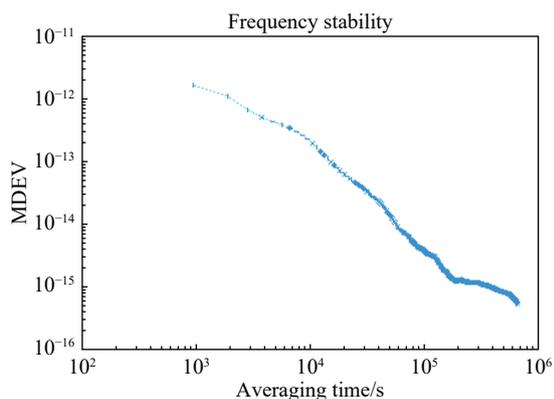


图 6 NIMDO 的频率稳定度 MDEV
Fig.6 Frequency stability MDEV of NIMDO

表 1 基于 NIMDO 可构建的计量标准所依据的规程规范

Tab.1 Regulations and specifications based on the measurement standards constructed by NIMDO

序号	检定规程或校准规范
1	JJG180-2002《电子测量仪器内石英晶体振荡器检定规程》
2	JJG238-2018《时间间隔测量仪检定规程》
3	JJG349-2014《通用计数器检定规程》
4	JJG545-2015《频标比对器检定规程》
5	JJG601-2003《时间检定仪检定规程》
6	JJG723-2008《时间间隔发生器检定规程》
7	JJF1662-2017《时钟测试仪校准规范》
8	JJG722-2018《标准数字时钟检定规程》
9	JJF1206-2018《时间与频率标准远程校准规范》

根据上述计量检定规程或校准规范, 电子测量

仪器内石英晶体振荡器、通用计数器、石英晶体频率标准、时间间隔发生器、微波频率计数器、时钟测试仪和时间与频率标准远程校准要求参考频率的稳定度应优于被检频率稳定度的 3 倍, 其它技术指标如日老化率、频率准确度等应优于被检仪器相应技术指标一个数量级。时间间隔测量仪和时间检定仪要求参考频率的稳定度和准确度均应比被检仪器的相应指标高一个数量级。频标比对器要求参考频率的稳定度小于或等于被检比对器比对不确定度的 10 倍, 且频率准确度优于 1×10^{-8} 。上述工作计量器具多以内部晶振提供基准频率, 根据上述计量检定规程或校准规范, 各个仪器的计量特性中的频率稳定度均在 $1 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-13}$ 范围内, 频率准确度在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-11}$ 范围内。NIMDO 经中国计量科学研究所校准后, 其与原子时标基准 UTC(NIM) 的平均频率偏差为 2×10^{-15} , 平均时间偏差为 0.6 ns, 其频率稳定度如表 2 所示, 由此可得, NIMDO 输出的频率完全满足短期频率稳定度在 $1 \times 10^{-8} \sim 2 \times 10^{-10}$ 的仪器在计量检定或校准中的参考频率要求。

表 2 NIMDO 频率稳定度校准结果
Tab.2 NIMDO frequency stability calibration results

采样间隔/s	频率稳定度
1	1.9×10^{-11}
10	4.2×10^{-12}
100	9.0×10^{-13}
1000	1.3×10^{-12}
10000	3.5×10^{-13}

2.2 构建计量标准所需设备

根据表 1 中所列计量检定规程或校准规范, 以 NIMDO 为核心提供高性能的参考频率, 各项计量标准所需的仪器设备如表 3 ~ 表 11 所示。构建电子测量仪器内石英晶体振荡器检定装置所需设备如表 3 所示。电子测量仪器内石英晶体振荡器检定装置主要针对电子测量仪器内部的石英晶体振荡器, 以 NIMDO 输出的标准频率作为参考频标, 分别向通用计数器、频标比对器、时间间隔发生器、时间间隔测量仪提供外频标输入, 通过通用计数器直接测量晶振输出频率的相对平均频率偏差; 通过频标比对器对晶振的开机特性、日频率老化率、1 s 频率稳定度、频率复现性、频率准确度等参数进行测量; 对于被检仪器为时间间隔测量仪, 通过时间间隔发生器向被测时间间隔测量仪输出标准时间间隔, 通

过计算得到被检晶振的相对平均频率偏差;对于被检仪器为时间间隔发生器,通过时间间隔测量仪测量时间间隔发生器输出的标准时间间隔,通过计算得到被检晶振的相对平均频率偏差^[4]。

构建时间间隔测量仪检定装置所需的设备如表 4 所示。以 NIMDO 输出的标准频率作为参考频标,分别向频标比对器、时间间隔发生器提供外频标输入,通过频标比对器对时间间隔测量仪内部晶振的开机特性、日频率老化率、1 s 频率稳定度、频率复现性、相对频率偏差进行测量,通过时间间隔发生器产生标准时间间隔信号,对时间间隔测量仪的脉冲宽度测量、两路脉冲时间间隔测量,机械触点动作时间间隔测量功能进行检定^[5]。

构建通用计数器检定装置所需设备如表 5 所示。以 NIMDO 输出的标准频率作为参考频标,分

别向频标比对器、时间间隔发生器、合成信号发生器提供外频标输入,通过频标比对器对时间间隔测量仪内部晶振的性能参数进行检定;通过合成信号发生器对通用计数器的频率测量范围、输入灵敏度及测量误差进行检定;通过时间间隔发生器产生标准时间间隔信号,对通用计数器的周期测量范围、输入灵敏度及测量误差和脉冲宽度、两个正/负脉冲时间间隔测量功能进行检定^[6]。

构建频标比对器检定装置所需设备如表 6 所示。以 NIMDO 输出的标准频率以及频率合成器输出频率作为参考频标,通过功分器分别连接到频标比对器的参考输入端和被测输入端,进行比对不确定度的检定;参考频标通过功分器分为两路,分别将衰减器单独连接到参考输入端和被测输入端,调节衰减值,通过功率计测量频标比对器的输入灵敏度^[7]。

表 3 电子测量仪器内石英晶体振荡器

Tab.3 Quartz crystal oscillator in electronic measuring instrument

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJG180-2002《电子测量仪器内石英晶体振荡器检定规程》	电子测量仪器内石英晶体振荡器	参考频标	输出标准频率
		通用计数器	电子测量仪器内晶振相对平均频率偏差
		频标比对器	晶振的开机特性、日频率老化率、1 s 频率稳定度、频率复现性、频率准确度等
		时间间隔测量仪	测量标准时间间隔
		时间间隔发生器	输出标准时间间隔

表 4 时间间隔测量仪检定装置所需的设备

Tab.4 Equipment required for verification device of time interval measuring instrument

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJG238-2018《时间间隔测量仪检定规程》	时间间隔测量仪	参考频标	内置晶体振荡器的检定
		频标比对器	
		时间间隔发生器	时间间隔测量范围及测量误差

表 5 通用计数器检定装置所需设备

Tab.5 Equipment required for verification device of universal counter

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJG349-2014《通用计数器检定规程》	通用计数器或数字频率计	参考频标	内置晶体振荡器的检定
		频标比对器	
		时间间隔发生器	周期测量范围、输入灵敏度及测量误差和脉冲宽度、两个正/负脉冲时间间隔
		合成信号发生器	频率测量范围、输入灵敏度及测量误差

构建时间检定仪检定装置所需设备如表 7 所示。以 NIMDO 输出的标准频率作为参考频标,通过频标比对器对时间检定仪内部晶振的性能参数进行检定;通过时间间隔测量仪对时间检定仪输出时

间间隔进行检定,对于秒表检定仪需通过光/电转换器将夹具的动作信号转换成脉冲信号再进行测量^[8]。

构建时间间隔发生器检定装置所需设备如表 8 所示。以 NIMDO 输出的标准频率作为参考频标,

通过频标比对器对时间检定仪内部晶振的性能参数进行检定;通过时间间隔测量仪对时间间隔发生器

输出时间间隔进行检定,采用示波器测量时间间隔发生器输出脉冲的上升、下降时间及脉冲幅度^[9]。

表 6 频标比对器检定装置所需设备

Tab.6 Equipment required for verification device of frequency standard comparator

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJG545-2015《频标比对器检定规程》	频标比对器	参考频标	输出标准频率、比对不确定度
		频率合成器	
		功率计	输入灵敏度
		衰减器	
		功分器	

表 7 时间检定仪检定装置所需设备

Tab.7 Equipment required for verification device of time calibrator

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJG601-2003《时间检定仪检定规程》	时间检定仪(电子毫秒计检定仪,秒表检定仪,电秒表检定仪)	参考频标	内部晶体振荡器
		频标比对器	
		时间间隔测量仪	输入灵敏度
		光/电转换器	

表 8 时间间隔发生器检定装置所需设备

Tab.8 Equipment required for verification device of time interval generator

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJG723-2008《时间间隔发生器检定规程》	时间间隔发生器	参考频标	内部晶体振荡器
		频标比对器	
		时间间隔测量仪	连续脉冲周期、连续脉冲宽度、正脉冲宽度、负脉冲宽度、单脉冲宽度、延迟时间、两个单脉冲间的时间间隔
		示波器	

构建时钟测试仪校准装置所需设备如表 9 所示。以 NIMDO 输出的标准频率作为通用计数器和函数信号发生器的参考频标,通过通用计数器测量时钟测试仪的开机特性、相对平均频率偏差;通过函数信号发生器校准时钟测试仪的日计时误差、频率测量的功能;以 NIMDO 系统作为参考时钟,与时钟测试仪显示时间进行比对,测得时钟时刻误差^[10]。

构建标准数字时钟检定装置所需设备如表 10 所示。以 NIMDO 输出的标准频率作为时间间隔

测量仪的参考频标,以 NIMDO 作为参考时钟输出 1PPS 信号,通过时间间隔测量仪测量被检时钟与参考时钟的同步偏差、延时量和被检时钟的钟速;通过频标比对器测量被检时钟主振器的频率长期参数^[11]。

构建时间与频率标准远程校准装置所需设备如表 11 所示。以 NIMDO 作为参考时间与频率标准,通过 GNSS 时间频率传递接收机对时间与频率标准进行远程校准^[12]。

表 9 时钟测试仪校准装置所需设备

Tab.9 Equipment required for calibration device of clock tester

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJF1662-2017《时钟测试仪校准规范》	时钟测试仪(用于测量电能表日计时误差等计量性能的)	参考频标	开机特性、相对平均频率偏差
		通用计数器	
		函数信号发生器	日计时误差、频率测量
		参考时钟	

表 10 标准数字时钟检定装置所需设备

Tab.10 Equipment required for verification device of standard digital clock

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJG722-2018《标准数字时钟》	标准数字时钟(包括GNSS授时型标准数字时钟)	参考时钟 时间间隔测量仪 频标比对器	同步偏差、延时量、钟速 频率长期参数

表 11 时间与频率标准远程校准装置所需设备

Tab.11 Equipment required for remote calibration device of time and frequency standard

检定规程/校准规范	适用于的检校设备	标准器	检校参数
JJF1206-2018《时间与频率标准远程校准规范》	时间标准、频率标准	参考频率标准 参考时间标准 GNSS时间频率传递装置	时间偏差、时间稳定度 频率偏差、频率日漂移率、 频率稳定度

3 结论

本文通过对以时间频率标准装置 (NIMDO) 为核心的远程时间频率溯源系统性能指标的论述, 根据时间频率计量领域内的计量检定规程和校准规范, 构建 9 项计量标准, 并对构建这些计量标准所需设备进行了论述, 为基于 NIMDO 的时间频率计量标准的构建提供了参考。

参考文献

[1] Liang Kun, Yang Hang, Zuo Fei, *et al.* Disciplined oscillator system by UTC(NIM) for remote time and frequency traceability[C]. European Frequency & Time Forum. Neuchatel: Switzerland IEEE, 2015.

[2] Liang Kun, Zuo Fei, Pei Chao, *et al.* Real-Time Remote Calibration (RTRC) System for Time and Frequency[C]. Proceedings of IFCS-EFTF2013. Prague: Czech, 2013.

[3] Liang Kun, Chen Qingyi, Han Kai, *et al.* Replicating UTC(NIM) remotely for time and frequency traceability[J]. International

Journal of Electrical Engineering, 2019, 26(4): 147-156.

[4] 国家质量监督检验检疫总局. 电子测量仪器内石英晶体振荡器检定规程: JJG180-2002[S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.

[5] 国家质量监督检验检疫总局. 时间间隔测量仪检定规程: JJG238-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[6] 国家质量监督检验检疫总局. 通用计数器检定规程: JJG349-2014[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.

[7] 国家质量监督检验检疫总局. 频标比对器检定规程: JJG545-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.

[8] 国家质量监督检验检疫总局. 时间检定仪检定规程: JJG601-2003[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.

[9] 国家质量监督检验检疫总局. 时间间隔发生器检定规程: JJG723-2008[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.

[10] 国家质量监督检验检疫总局. 时钟测试仪校准规范: JJF1662-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[11] 国家质量监督检验检疫总局. 标准数字时钟检定规程: JJG722-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[12] 国家市场监督管理总局. 时间与频率标准远程校准规范: JJF1206-2018[S]. 北京: 中国质检出版社, 2019.

本文编辑: 霍炜炜

(上接第 27 页)

[2] 龙波, 尤捷雯, 张宇, 等. 基于 NIMDO 的远程时间频率溯源[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(8): 9-11.

[3] A. Zhang, Y. Gao, Y. Wang, *et al.* GENERATION AND PERFORMANCE OF ATOMIC TIME SCALE UTC(NIM)[J]. 电机工程学报, 2020, 27(4): 131-135.

[4] Kun L, Qingyi C, Kai H, *et al.* REPLICATING UTC(NIM) REMOTELY FOR TIME AND FREQUENCY TRACEABILITY[J]. International Journal of Electrical Engineering, 2019, 26(4): 147-155.

[5] 张爱敏. 时间频率计量器具检定系统表: JJG2007-2007[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.

[6] 马凤鸣. 时间频率计量名词术语及定义: JJG1180-2007[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.

[7] 梁坤. 时间与频率标准远程校准规范: JJF1206-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[8] 梁坤. 全球导航卫星系统 (GNSS) 接收机 (时间测量型) 校准规范: JJF1403-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[9] 李军. 标准数字时钟检定规程: JJG722-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[10] 王磊. 电动汽车交流充电桩检定规程: JJG1148-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[11] 张秀增. 电动汽车交流充电桩检定规程: JJG1148-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[12] 陈倩. 全球定位系统 (GPS) 术语及定义: GB/T19391-2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

本文编辑: 霍炜炜