

# 基于 DDS 频率微跃的晶振精密驯服方法研究

郝伊康<sup>1</sup>, 梁坤<sup>1,2,3,\*</sup>, 余油<sup>1</sup>, 赵俊良<sup>1</sup>, 韦宝盈<sup>1</sup>, 李雨峰<sup>1</sup>, 何之煜<sup>4</sup>

- (1. 北京交通大学自动化与智能学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100044; 3. 北京市轨道交通电磁兼容与卫星导航工程技术研究中心, 北京 100044; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 北京 100081)

**摘要:** 针对晶振传统压控调频方法调频精度低的缺陷, 研究基于直接数字频率合成 (direct digital synthesis, DDS) 频率微跃的恒温晶体振荡器驯服控制与时间保持方法。通过自研相位微跃计中 DDS 模块, 实现分辨率达  $0.6 \mu\text{Hz}$  的频率调整, 为改善晶振驯服性能提供了条件。驯服控制算法基于全球导航卫星系统时间传递原理以及比例-积分-微分 (proportion-integral-differential, PID) 控制算法设计, 通过分析钟差数据优化 PID 控制模型, 有效提升晶振驯服控制性能。实验结果表明, 基于 DDS 频率微跃的晶振驯服控制算法在平均时间为一天的时频率稳定度可达  $1.09 \times 10^{-13}$ , 时间稳定度可达  $9.46 \times 10^{-10} \text{s}$ , 在 99% 以上的情况与参考频率源的时间偏差保持在  $\pm 25 \text{ns}$  内, 时差标准差为  $8.49 \text{ns}$ , 证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 恒温晶体振荡器; 相位微跃计; 直接数字频率合成; 时钟驯服; 比例-积分-微分控制算法; 全球导航卫星系统时间传递

中图分类号: TB 939

文献标志码: A

DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2026.05.26

## Research on precision taming method of crystal oscillators based on DDS frequency micro-step

HAO Yikang<sup>1</sup>, LIANG Kun<sup>1,2,3,\*</sup>, YU Tian<sup>1</sup>, ZHAO Junliang<sup>1</sup>, WEI Baoying<sup>1</sup>, LI Yufeng<sup>1</sup>, HE Zhiyu<sup>4</sup>

(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Beijing Engineering Research Center for Electromagnetic Compatibility and Satellite Navigation, Beijing 100044, China;

4. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the low frequency modulation accuracy of traditional voltage controlled frequency modulation methods for crystal oscillators, the taming and controlling and time holding method of oven-controlled crystal oscillators is investigated based on direct digital synthesis (DDS) frequency micro-step. By using the DDS module in the self-developed phase micro-stepper, frequency adjustment with a resolution of  $0.6 \mu\text{Hz}$  is achieved, providing conditions for improving the taming performance of crystal oscillators. The taming and controlling algorithm is based on the time transfer principle of global navigation satellite systems and the design of proportion-integral-differential (PID) control algorithm. By analyzing clock error data, the PID control model is optimized to effectively improve the taming and controlling performance of crystal oscillators. The experimental results show that the crystal oscillator taming and controlling algorithm based on DDS frequency micro-step can achieve a frequency stability of  $1.09 \times 10^{-13}$  and a time stability of  $9.46 \times 10^{-10} \text{s}$  with an average time of one day. In more than 99% of cases, the time deviation from the reference frequency source remains within  $\pm 25 \text{ns}$ , and the standard deviation of the time difference is  $8.49 \text{ns}$ , proving the effectiveness of the proposed method.

收稿日期: 2025-02-11; 修回日期: 2025-05-07; 网络优先出版日期: 2025-11-25。

网络优先出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2422.TN.20251125.1311.022>

基金项目: 国家自然科学基金(12473072); 泰山产业领军人才(tscx202408155); 烟台市重大科技创新工程(2024ZDCX002)资助课题

\* 通讯作者。

引用格式: 郝伊康, 梁坤, 余油, 等. 基于 DDS 频率微跃的晶振精密驯服方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2026, 48(5): 1706-1714.

**Reference format:** HAO Y K, LIANG K, YU T, et al. Research on precision taming method of crystal oscillators based on DDS frequency micro-step[J]. Systems Engineering and Electronics, 2026, 48(5): 1706-1714.

**Keywords:** oven-controlled crystal oscillator (OCXO); phase micro-stepper; direct digital synthesis (DDS); clock discipline; proportion-integral-differential (PID) control algorithm; global navigation satellite system (GNSS) time transfer

## 0 引言

随着科技的发展,精密时钟源在守时授时、导航定位、工业医疗、5G 通信、军工国防、金融等领域发挥着越来越重要的作用<sup>[1-4]</sup>。恒温晶振由于其体积小、成本低、功耗低等优点,被广泛应用于工业电子设备、通信设备以及基站等系统中。然而,恒温晶振在自由振荡条件下长期稳定性较差,难以作为高精度的时钟源<sup>[5-6]</sup>。为改善其长期稳定度,可以通过相应的驯服算法进行控制,从而使其能够作为高精度时钟源被使用<sup>[7-8]</sup>。

研究现状方面,王习东等<sup>[9]</sup>基于卫星授时,结合野值剔除、卡尔曼滤波以及比例-积分-微分(proportion-integral-differential, PID)控制算法,对晶振进行了压控驯服,长期频率稳定度达到  $2.57 \times 10^{-12} @ 10\ 000\ \text{s}$ ;刘苏彦<sup>[10]</sup>通过对差分方程式模型的最小二乘参数的估计,建立了晶振差分模型进行压控驯服,长期频率稳定度可达  $1.99 \times 10^{-12} @ 10\ 000\ \text{s}$ ;常盛<sup>[11]</sup>设计了基于数模混合锁相环的晶振压控驯服方法,长期频率稳定度可达  $2.02 \times 10^{-12} @ 10\ 000\ \text{s}$ 。

由此可见,目前晶振驯服大多采用压控的方式进行频率调节。由于压控调节难以兼顾成本与调频精度<sup>[12]</sup>,本文提出基于直接数字频率合成(direct digital synthesis, DDS)频率微跃的恒温晶振驯服控制方法——相位微跃计与恒温晶振集成于一体,恒温晶振提供给相位微跃计频率信号,相位微跃计中 DDS 模块通过频率控制字实现高分辨率的频率调节。该方式有效提升了频率调节精度,并改善恒温晶振长期频率稳定度、时间稳定度与时差标准差。

## 1 原理设计

基于相位微跃计中 DDS 模块的恒温晶振驯服控制通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)时间传递技术获取自身与参考频率源的钟差值,基于该钟差值实现恒温晶振的驯服控制。因此,最终驯服控制效果主要受到时间传递链路以及驯服控制算法性能影响,本节将对此详细介绍 GNSS 时间传递原理与驯服控制原理。

### 1.1 GNSS 时间传递

GNSS 时间传递是指以 GNSS 为媒介,获取异地双端时钟源钟差的过程,主要包括共视比对和全视比对两种方式<sup>[13]</sup>。

具体原理为时间传递双方测站利用硬件时延经校准的 GNSS 时间传递设备,在同一时刻观测可视卫星,分别解析并交互各自时钟源与 GNSS 系统时间的钟差数据,间接实现两测站间的时间传递。其中,共视比对原理为取得两测站之间同时观测到的相同卫星,将两地时钟源与基于该批卫星获得的 GNSS 系统时间之间的时间偏差——差分,取平均值即可得到时间比对结果<sup>[14]</sup>;全视比对原理为将单一测站

基于观测到的所有卫星获得的 GNSS 时间与本地时钟源之间的时间偏差进行平均,再将比对双端平均值作差即可得到时间比对结果。原理如图 1 所示。

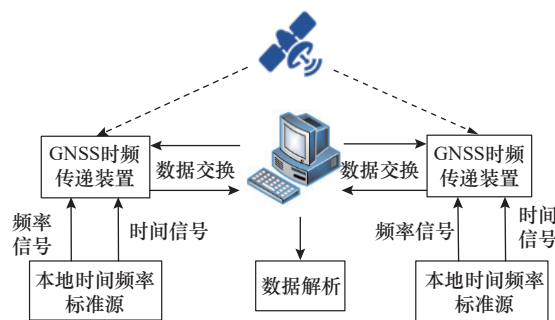


图 1 GNSS 时间传递原理

Fig. 1 GNSS time transfer principle

为实现数据的标准化传递,方便主控计算机进行实时钟差结果比对,国际时间频率咨询委员会于 1994 年定义了 GNSS 时间传递标准(Common GNSS Generic Time Transfer Standard, CCGTTS)<sup>[15]</sup>,并在 2015 年更新至最新版本 CCGTTS V2E 版。该文件中的星地钟差参数 REFSYS 表示的是本地时间频率标准源与 GNSS 时间的钟差,用于共视比对与全视比对中两测站之间的钟差值计算。

GNSS 时间传递的本质特征是利用相同的测量方法对两地时频传递设备所测得数据进行的差分后处理,以消除或近似消除卫星钟差、空间传播误差等误差源的影响,增强时频传递的精确性。本地时钟与远端参考的时钟分别作为时频传递双方测站,通过上述方法即可获得二者的钟差数据。

### 1.2 驯服控制

基于 PID 控制的驯服控制算法,其基本思路为将目标值与系统输出值之间的偏差,按照 PID 进行线性求和,最后得到控制量,作用于被控对象,使得系统输出不断趋近给定的目标值<sup>[16-17]</sup>。

当控制器的输出与输入误差信号成比例关系时,用比例系数  $K_p$  进行调控;当控制器的输出与输入误差信号的积分成比例关系时,用积分系数  $K_i$  进行调控,其目的是消除比例项造成的稳态误差;当控制器的输出与输入误差信号的微分成正比关系时,用微分系数  $K_d$  进行调控。由于比例调节中存在滞后值,导致调整值总是落后于误差的变化,因此调节过程中可能会出现振荡,而微分项可以预测误差变化趋势,进而抑制振荡<sup>[18-21]</sup>。

频差与所调频率为成正比关系,因而使用  $K_p$  对频差进行控制;时差与所调频率成积分关系,因而使用  $K_i$  对时差进行调控;频漂与所调频率成微分关系,因而使用  $K_d$  对频漂进行调控。

具体控制算法如下: 获取前一时刻  $e_{i-2}$ 、上一时刻  $e_{i-1}$  和当前时刻  $e_i$  的钟差值后, 计算出钟差  $t$ 、频差  $f_1$  与频漂  $df$ 。

$$\begin{cases} t = (e_i - e_{i-1}) \\ f_1 = \frac{e_i - e_{i-1}}{\Delta T} \\ f_2 = \frac{e_{i-1} - e_{i-2}}{\Delta T} \\ df = \frac{f_1 - f_2}{\Delta T} \end{cases} \quad (1)$$

利用钟差、频差与频漂, 即可以得出最终的调频值  $f$ :

$$f = K_p f_1 + K_i t + K_d df \quad (2)$$

上述 PID 控制算法的晶振驯服算法流程如图 2 所示。

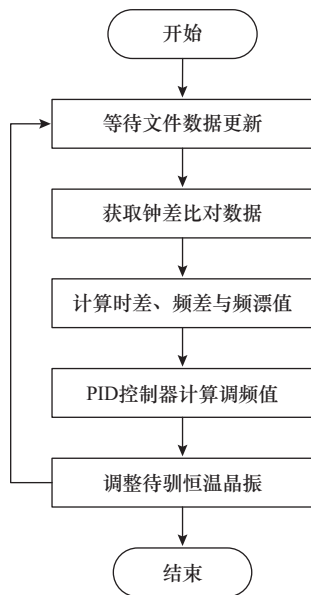


图 2 晶振驯服流程图

Fig. 2 Flowchart of crystal oscillator taming

## 2 系统实现

本系统通过基于单片机实现相位微跃计调控, 结合 PID 算法的参数优化, 实现对于恒温晶振的驯服, 同时相较于压控驯服控制方法, 提升了驯服系统性能指标。

### 2.1 总体方案

基于相位微跃计中 DDS 模块的晶振驯服保持系统流程图如图 3 所示, 通过共视比对原理由本地主机解算本地时钟与参考时钟的钟差值。钟差值基于 PID 算法转为频率调整数据, 该频率调整值通过串口指令发送至相位微跃计进行频率调整, 最终实现本地恒温晶振的频率准确度与长期频率稳定度向上级溯源参考时钟趋同。本系统主要由恒温晶振、相位微跃计、GNSS 时频传递接收机硬件部分以及 PID 算法部分构成, 如图 3 所示。

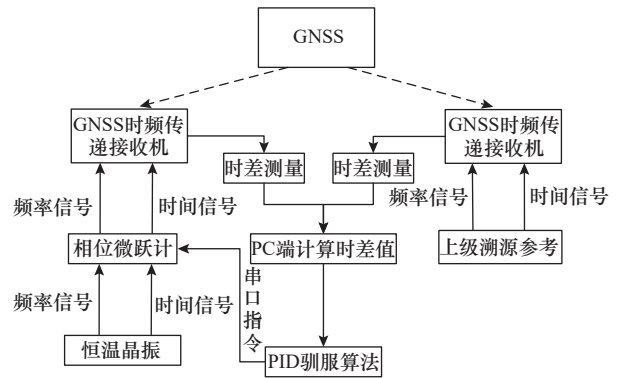
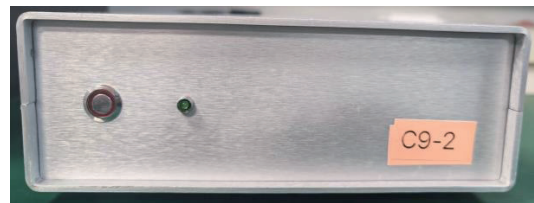


图 3 基于相位微跃计的晶振驯服整体流程图

Fig. 3 Overall flowchart of crystal oscillator taming based on phase micro-stepper

### 2.2 硬件实现

本文实现将晶振与相位微跃计集成的方式, 从而实现对输出频率的高精度调整, 模块化装置如图 4 所示。



(a) 装置正面  
(a) Front of the device



(b) 装置背面  
(b) Back of the device

图 4 相位微跃计与晶振一体化装置

Fig. 4 Integrated device of phase micro-stepper and crystal oscillator

该装置为 GNSS 时频传递接收机提供频率信号以及秒脉冲 (pulse per second, PPS) 信号, 并提供串口进行频率调节, 整体结构如图 5 所示。

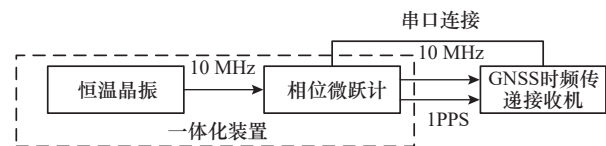


图 5 硬件结构图

Fig. 5 Hardware architecture diagram

#### 2.2.1 GNSS 时频传递接收机

GNSS 时频传递接收机使用实验室自研时间频率传递接收机 TLab-TFS-G1。该接收机支持现存所有 GNSS 的卫星

跟踪与接收机无关的交换格式(receiver independent exchange format, RINEX)、CGGTTS等标准格式数据生成,可实现基于GNSS时间传递方法的精准远程时间频率传递。

接收机内部采用嵌入式系统架构,能够实时显示本地时钟与GNSS时间的单站钟差数据,并可通过通信网络获取远端参考时钟与GNSS时间的钟差数据,与本地时差值进行对比,进而获取共视比对钟差值,以输入PID驯服控制算法。

### 2.2.2 恒温晶振

晶振在温度发生变化时,振荡频率会受到较大程度的影响,而恒温晶振可以通过对温度的补偿修正,使其成为精度高且使用最广泛的时间频率源<sup>[22]</sup>。

恒温晶振主要由恒温槽、振荡电路、温度传感器、控温电路以及金属外壳5个部分构成<sup>[23-24]</sup>。其中,石英谐振器是核心元件,在其拐点温度处有温度系数小的特性,这个拐点被称为零温度系数点。控温电路可以根据温度传感器的测量结果对恒温槽内的温度进行修正,使其始终稳定在石英谐振器的零温度系数点处<sup>[25]</sup>。

#### (1) 频率准确度

频率准确度是时频测控领域的重要指标之一,主要是指实际输出频率与标称频率之间的相对误差,通常由以下公式表示:

$$e = \frac{f_a - f_0}{f_0} \quad (3)$$

式中: $f_a$ 为实际输出频率; $f_0$ 为标称频率; $e$ 表示频率准确度。

在实际测量中,标称频率是无法获得的,因此采用铯原子钟或氢原子钟等一级频标作为参考频率源,将参考频率源的输出作为标称频率。晶振驯服时,通过GNSS时间传递的方法将上级溯源参考作为参考频率源,认为其输出的频率信号为标称频率信号。

#### (2) 频率稳定度

频率稳定度是评价频率源性能的重要参数。由于恒温晶振内部会受到噪声的影响,导致其输出信号的频率会在一定范围内随机起伏。频率稳定度使用阿伦偏差来进行计算,即通过离散程度对频率稳定度进行评判,其计算公式为

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{f_0} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(f_{i+1} - f_i)^2}{2n}} \quad (4)$$

式中: $n$ 为采样次数; $f_i$ 为第 $i$ 次采样时的频率值。

#### (3) 牵引范围

牵引范围为变化频率与中心频率的比值,通常在 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ 。由于牵引范围与频率稳定度成制约关系,因此为了提高频率稳定度,会导致晶振自身调频范围下降<sup>[26]</sup>。

### 2.2.3 相位微跃计

#### (1) DDS频率微跃原理与实现方法

目前,实现高精度相位微跃的方式有很多种,如基于DDS的相位微跃技术、基于单片机计数延时方技术以及基于复杂

可编程逻辑器件的脉冲信号合成技术等<sup>[27]</sup>。

文中相位微跃计调频使用DDS技术实现,其内部包含频率偏移寄存器,通过调节频率控制字来实现频率的偏移,工作原理如图6所示。其中,系统时钟模块由恒温晶振提供10 MHz频率信号作为参考,为DDS模块工作时钟频率 $f_{\text{clk}}$ 提供基准;相位累加器以系统时钟为采样间隔,根据设定的 $N$ 位字长的频率控制字(frequency tuning word, FTW)进行相位线性累加,从而实现频率的偏移<sup>[28]</sup>。

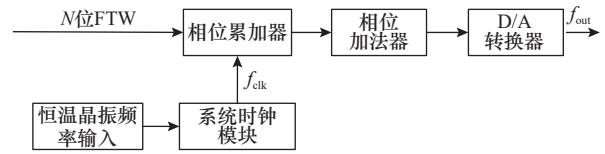


图6 DDS工作原理图

Fig. 6 Operational principle diagram of DDS

根据DDS工作原理可知,其合成的频率信号与FTW的大小有关,计算方法如下所示:

$$f_{\text{out}} = \frac{\text{FTW}}{2^N} \cdot f_{\text{clk}} \quad (5)$$

式中: $f_{\text{out}}$ 为输出频率; $N$ 为FTW位数;FTW为频率控制字,当FTW的值为1时即为调频分辨率; $f_{\text{clk}}$ 为相位微跃计工作时钟频率,由参考频率倍频得来。在实际应用中,当FTW位数和内部工作时钟一定时,驯服控制中通过所要输出的频率值倒推出FTW的大小。DDS模块的FTW位数为48位,代入式(5)可得,调频精度可达 $0.6 \mu\text{Hz}$ 。

由单片机实现对相位微跃计中DDS模块FTW的控制,当驯服控制算法调频指令发送至单片机时,通过式(5)求解出FTW大小,并通过查表找出频率偏移寄存器的对应值,发送至DDS模块,完成对频率的调整。

#### (2) 性能验证

为验证DDS模块调频的正确性,对频率调节精度进行验证。验证方法为使用比相仪对频率进行观测,参考源为可溯源至协调世界时(coordinated universal time, UTC)的时间频率源装置的频率输出,初始输出频率如图7所示,初始输出频率相对频偏均值为 $1.69 \times 10^{-12}$ 。由于频率偏差范围大于调频精度,因此采取最小调频值重复调节的方式进行验证。通过串口对相位微跃计发送1 000次调频 $0.6 \mu\text{Hz}$ 指令,即调整 $0.6 \text{ mHz}$ ,调频后频率输出如图8所示,相对频偏均值为 $6.099 \times 10^{-11}$ 。由调整前后频率输出可知,频率变化与调整量相符合,因此验证了最小调频分辨率指标。

### 2.3 驯服算法软件

#### 2.3.1 钟差数据获取间隔

PID控制器控制间隔会对晶振驯服效果有一定的影响,控制间隔越短,晶振越能快速追踪参考钟的信号变化,从而缩短同步时间,提升驯服效果<sup>[29]</sup>。

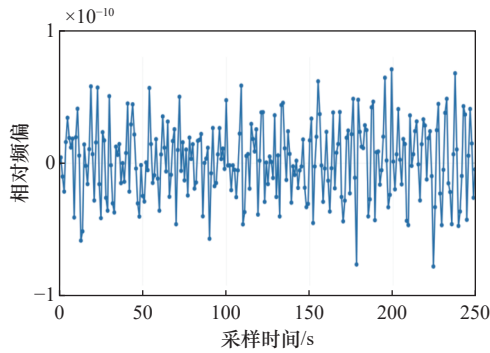


图 7 初始输出频率时相对频偏  
Fig. 7 Relative frequency offset at initial output frequency

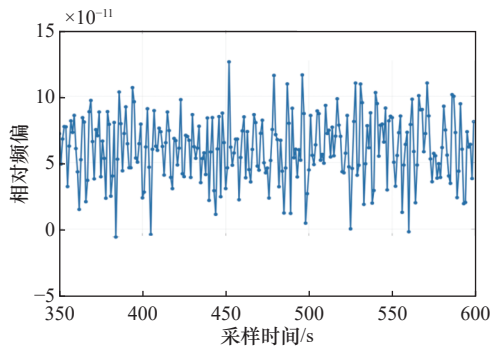


图 8 调整 0.6 mHz 后相对频偏  
Fig. 8 Relative frequency offset after adjusting by 0.6 mHz

根据国际 GNSS 服务 (international GNSS service, IGS) 产品报告可知, 目前主要通过全球定位系统 (global positioning system, GPS) 等导航星座获取高精度钟差产品, 当前的钟差产品有采样间隔为 30 s、300 s 与 900 s 的钟差数据<sup>[30]</sup>。因此, 为了提高晶振驯服精度, 选用采样间隔 30 s 的数据进行晶振驯服。

### 2.3.2 PID 系数优化

驯服控制系数具体调试方法为增量式 PID 调参方法, 该方法是一种用于调整 PID 控制器参数的经验性方法, 具体实现步骤如下所示。

**步骤 1** 设置  $K_i$  和  $K_d$  为零: 将积分项  $K_i$  和微分项  $K_d$  设置为零, 只保留比例项  $K_p$ 。

**步骤 2** 逐渐增加  $K_p$ : 从零开始逐渐增加比例增益  $K_p$ , 直到系统出现持续的振荡 (周期性的输出波动)。

**步骤 3**  $K_d$  值调整: 逐渐增大  $K_d$ , 使其能抑制超调现象的同时, 避免自身值过大导致系统对于噪声过于敏感, 从而产生振荡现象。

**步骤 4**  $K_i$  值调整: 逐渐增大  $K_i$ , 以此来控制稳态误差在需要逼近的值附近。

**步骤 5** 调整  $K_p, K_i, K_d$ : 根据实际需要, 进一步优化  $K_p, K_i, K_d$  的值。

为便于查看抖动结果, 在绘图时对整体均值做相应调整, 使均值保持在 0 附近, 并将点与点间隔设置为 960 s。通过对

PID 算法系数的优化, 最终将时间偏差由  $\pm 50$  ns 提升至  $\pm 25$  ns, 优化前的驯服效果图如图 9 所示, 时差标准为 28.90 ns。

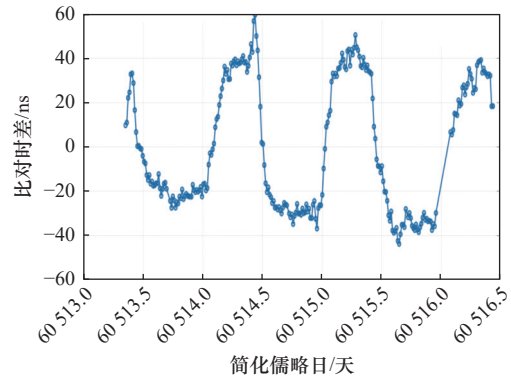


图 9 PID 参数优化前驯服控制晶振与 UTC 时间频率源比时差  
Fig. 9 Comparison time difference of taming and controlling crystal oscillator and UTC time and frequency source before PID parameter optimization

## 3 实验与分析

在晶振上电工作稳定后, 对其进行驯服控制。使用优化后的 PID 参数进行驯服, 晶振驯服控制与 UTC 时间频率源时差如图 10 所示。驯服数据时段为 2024 年 7 月 30 日 8:00 至 8 月 13 日 22:00, 共约 14 天数据。时差点数统计如表 1 所示, 其中: 时差小于  $\pm 10$  ns 的点数占比为 88.91%, 时差小于  $\pm 20$  ns 的点数占比为 97.79%, 时差小于  $\pm 25$  ns 的点数占比为 99.45%, 时差标准为 8.49 ns。

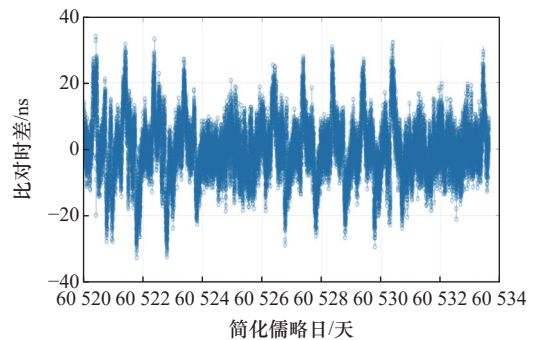


图 10 驯服控制晶振与 UTC 时间频率源比时差  
Fig. 10 Comparison time difference of taming and controlling crystal oscillator under taming and UTC time and frequency source

表 1 驯服控制晶振与 UTC 时间频率源比时差范围

Table 1 Comparison time difference range of taming and controlling crystal oscillator and UTC time and frequency source

参数	时差范围/ns		
	$ \Delta t  \leq 10$	$ \Delta t  \leq 20$	$ \Delta t  \leq 25$
点数/总点数	34 945/39 303	38 433/39 303	39 086/39 303
占比/%	88.91	97.79	99.45

### 3.1 驯服控制与自由振荡稳定度对比

实验分别测试了恒温晶振自由振荡与驯服控制的时间

稳定度以及频率稳定度数据, 分别如图 11 和图 12 所示, 具体数据如表 2 所示。

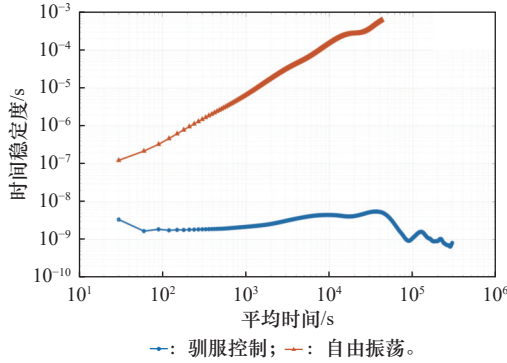


图 11 时间稳定度对比

Fig. 11 Comparison of time stability

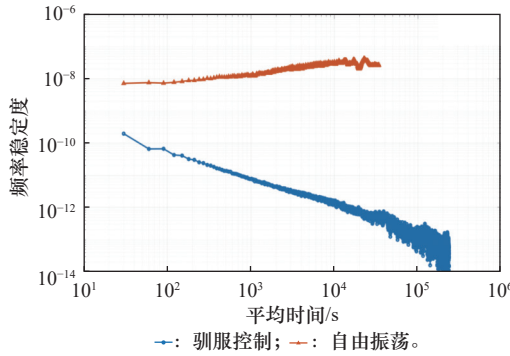


图 12 频率稳定度对比

Fig. 12 Comparison of frequency stability

表 2 驯服控制晶振时间稳定度与频率稳定度

Table 2 Time stability and frequency stability of taming and controlling crystal oscillator

平均时间/s	时间稳定度/s	频率稳定度
1 000	$2.172 \times 10^{-9}$	$7.641 \times 10^{-11}$
10 000	$4.470 \times 10^{-9}$	$1.253 \times 10^{-12}$
86 400	$9.46 \times 10^{-10}$	$1.09 \times 10^{-13}$
100 000	$1.114 \times 10^{-9}$	$2.22 \times 10^{-13}$

取平均时间为 10 000 s 的时间稳定度及频率稳定度, 分别由  $1.557 3 \times 10^{-4}$  s 和  $3.323 8 \times 10^{-8}$  优化至  $1.114 \times 10^{-9}$  s 和  $1.253 \times 10^{-12}$ , 改善近 4 个数量级, 验证了 PID 驯服控制方法对晶振稳定性的改善。

### 3.2 本文方法与压控调频方法稳定度对比

对于当前基于晶振压控驯服文献中公开数据, 分别对比了自由振荡下的频率稳定度与驯服控制下的频率稳定度, 数据如表 3 和表 4 所示, 对比图如图 13 和图 14 所示。文献[10-11]频率稳定度数据均在使用铷原子钟作为标准频率源条件下测得, 驯服方法均采用 GNSS 单向授时的方式进行驯服, 通过 GNSS 接收机接收 GNSS 卫星信号, 获取本地与

卫星钟差, 以此对本地晶振进行驯服控制。

表 3 晶振自由振荡频率稳定度

Table 3 Frequency stability of crystal oscillators free oscillation

平均时间/s	本文使用晶振	文献[10]使用晶振	文献[11]使用晶振
100	$7.300 4 \times 10^{-9}$	$3.81 \times 10^{-12}$	$4.49 \times 10^{-12}$
1 000	$1.240 9 \times 10^{-8}$	$5.96 \times 10^{-12}$	$1.33 \times 10^{-11}$
10 000	$3.323 8 \times 10^{-8}$	$1.31 \times 10^{-11}$	$6.89 \times 10^{-11}$

表 4 不同驯服控制方法下的频率稳定度

Table 4 Frequency stability with different taming and controlling methods

平均时间/s	本文控制方式	文献[10]压控控制	文献[11]压控控制
100	$6.638 6 \times 10^{-11}$	$7.41 \times 10^{-11}$	$5.88 \times 10^{-12}$
1 000	$7.641 \times 10^{-12}$	$9.71 \times 10^{-12}$	$4.89 \times 10^{-12}$
10 000	$1.253 \times 10^{-12}$	$1.99 \times 10^{-12}$	$2.02 \times 10^{-12}$

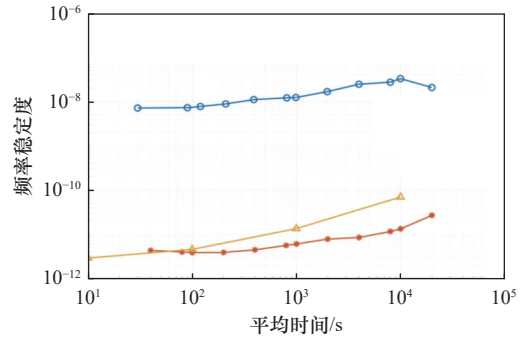


图 13 不同晶振自由振荡频率稳定度对比

Fig. 13 Comparison of frequency stability free oscillation of different crystal oscillators

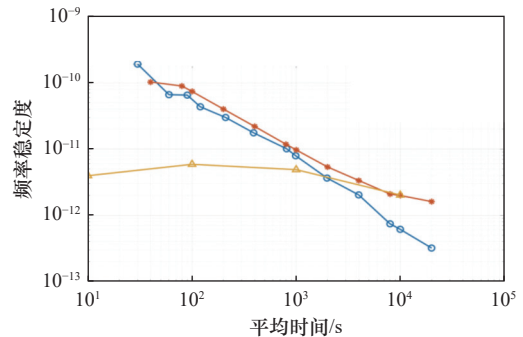


图 14 基于 DDS 频率微跃驯服方法与压控驯服方法频率稳定度对比

Fig. 14 Comparison of frequency stability based on DDS frequency micro-step taming method and voltage-controlled taming method

通过三者在自由振荡条件下以及驯服控制下的频率稳定度数据对比可知,在自由振荡条件下,本文使用晶振频率稳定度最差,而在驯服后显著提升了频率稳定度,并优于基于压控方法下的频率稳定度。因此,使用相位微跃计可有效提高晶振驯服的长期频率稳定度,验证了基于 DDS 频率微跃的晶振驯服控制方法的有效性。

### 3.3 本文方法与 GPS 锁定铷原子钟方法稳定度对比

GPS 约束振荡器(GPS disciplined oscillator, GPSDO)驯服原理为通过获取本地与 GPS 卫星的钟差,校正补偿振荡器的频率偏移,以此完成对振荡器的驯服。

将本文方法与 GPSDO 方法下的频率稳定度进行比较,其中 GPSDO 使用振荡器为铷原子钟。对比结果如图 15 所示,对比数据如表 5 所示。由于 GPS 锁定铷原子钟使用到的铷原子钟在自由振荡条件下无直接测量结果,因而本文采用与其性能相近的 PRS10 铷原子钟进行自由振荡下频率稳定度对比,对比结果如图 16 所示,对比数据如表 6 所示。由此可知,文中使用晶振在自由振荡条件下频率稳定度劣于铷原子钟。在驯服控制下对比可知,GPS 锁定铷原子钟的短期稳定度虽优于恒温晶振的频率稳定度,但在 1 000 s 处频率稳定度相较于 1 s 处仅提升一个数量级。而本文方法能够快速提高频率稳定度,在 1 000 s 处可以提升约两个数量级,并与 GPS 锁定铷原子钟频率稳定度达到同一数量级。此外,本文控制方法的长期频率稳定度可以与 GPS 锁定铷原子钟的频率稳定度基本一致,并达到  $10^{-15}$  量级,以此验证了基于 DDS 频率微跃的晶振控制方法的有效性。

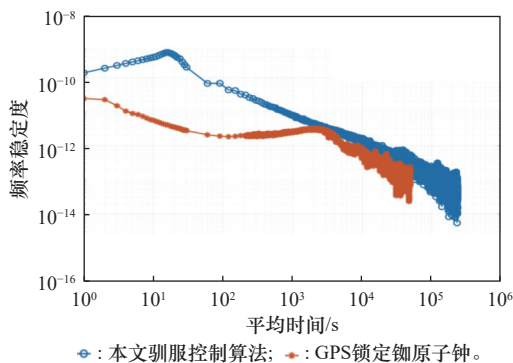


图 15 基于 DDS 频率微跃驯服方法与 GPS 锁定铷原子钟驯服方法频率稳定度对比

Fig. 15 Comparison of frequency stability based on DDS frequency micro-step taming method and GPS locking rubidium atomic clock taming method

表 5 基于 DDS 频率微跃驯服方法与 GPSDO 驯服方法稳定度

Table 5 Frequency stability based on DDS frequency micro-step taming method and GPSDO taming method

平均时间/s	本文驯服控制方法	GPSDO
1	$1.354\ 3\times 10^{-10}$	$2.376\ 6\times 10^{-11}$
10	$3.858\ 6\times 10^{-11}$	$5.468\times 10^{-12}$
100	$6.638\ 6\times 10^{-11}$	$1.875\times 10^{-12}$
1 000	$7.461\times 10^{-12}$	$2.431\times 10^{-12}$
10 000	$1.253\times 10^{-12}$	$8.02\times 10^{-13}$

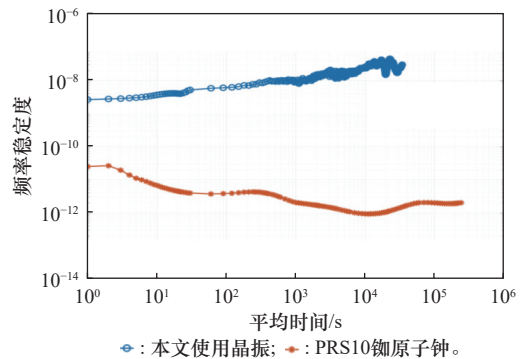


图 16 本文使用晶振与 PRS10 自由振荡下频率稳定度对比  
Fig. 16 Comparison of frequency stability for the proposed crystal oscillator and PRS10 under freeoscillation

表 6 本文使用晶振与 PRS10 自由振荡下频率稳定度

Table 6 Frequency stability between the proposed crystal oscillator and PRS10 under freeoscillation

平均时间/s	文中使用晶振	PRS10
1	$2.669\ 8\times 10^{-9}$	$2.510\ 0\times 10^{-11}$
10	$3.679\ 6\times 10^{-9}$	$6.722\times 10^{-12}$
100	$7.300\ 4\times 10^{-9}$	$3.800\times 10^{-12}$
1 000	$1.240\ 9\times 10^{-8}$	$2.503\times 10^{-12}$
10 000	$3.323\ 8\times 10^{-8}$	$9.32\times 10^{-13}$

## 4 结 论

本文设计并实现了基于 DDS 频率微跃的晶振驯服算法,通过将相位微跃计与晶振一体化的方式,使用相位微跃计 DDS 模块频率控制字的方法进行频率调节,该方法区别于传统晶振压控调频方法,提高了对于频率的调整精度。通过对相位微跃计调频指标的测试,验证了设计方案的正确性。

对于 PID 驯服算法部分,通过对 PID 控制算法中比例项与微分项参数的调试优化,驯服状态下,晶振与参考时频源时间偏差范围从  $\pm 50$  ns 提高到  $\pm 25$  ns,并由此提高了晶振驯服的长期频率稳定度与时间稳定度。

最终,将本文实验结果与其他文献晶振压控驯服方法对比以及与 GPS 锁定铷原子钟对比结果表明,基于 DDS 频率微跃的晶振驯服方式可以有效提高晶振驯服的频率稳定度,并能够在短期内快速提高频率稳定度。驯服下恒温晶振时间偏差在  $\pm 25$  ns 以内的点数占比 99.45%,时差标准差为 8.49 ns;在平均时间为一天时的频率稳定度可达  $1.09\times 10^{-13}$ ,时间稳定度可达  $9.46\times 10^{-10}$  s。

## 参考文献

[1]BUI T, ELANGO A, LANDRY R J. FPGA-based autonomous GPS-disciplined oscillators for wireless sensor network nodes[J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3135.  
[2]GOODWIN A J, EYTAN D, DIXON W, et al. Timing errors and

- temporal uncertainty in clinical databases-a narrative review[J]. *Front Digit Health*, 2022, 4: 932599.
- [3] MAJORAL M, ARRIBAS J, PRADES F C. Implementation of a high-sensitivity global navigation satellite system receiver on a system-on-chip field-programmable gate array platform[J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1416.
- [4] NASIR A A, DURRANI S, MEHRPOUYAN H, et al. Timing and carrier synchronization in wireless communication systems: a survey and classification of research in the last 5 years[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016: 180.
- [5] YANG C Z, WANG Y L, HUA Y, et al. Investigation and design of disciplined clock system based on BDS[C]//Proc. of the IEEE 12th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2015: 753-756.
- [6] ACHENBACH R, FEUERSTACK-RAIBLE M, HILLER F, et al. A digitally temperature-compensated crystal oscillator[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2000, 35(10): 1502-1506.
- [7] LI H, ZHANG X J, LI Z H, et al. A novel high-precision method based on sequence weighted adaptive unscented Kalman filter for GPS disciplined crystal oscillator[C]//Proc. of the IEEE 12th PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2020.
- [8] SONG W, YAN D Y, SHI C, et al. BDS/GPS tens of picoseconds time synchronization method with application to communication network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(11): 17244-17262.
- [9] 王习东, 杨业泉, 冯文杰, 等. 基于卫星授时和晶振驯服的高精度频率源系统设计[J]. *电子设计工程*, 2025, 33(9): 31-37.
- WANG X D, YANG Y Q, FENG W J, et al. Design of high precision frequency source system based on satellite-time and tamed OCXO[J]. *Electronic Design Engineering*, 2025, 33(9): 31-37.
- [10] 刘苏彦. 基于北斗的OCXO自适应保持技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- LIU S Y. Study on adaptive retention technology of OCXO based on Beidou[D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [11] 常盛. 基于1PPS信号驯服与保持的10MHz低相噪频率标准设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- CHANG S. Design and Implementation of 10 MHz low phase noise frequency standard based on 1PPS signal disciplined oscillator and hold-over technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [12] 王红建. 恒温晶体振荡器高精度时间维持的自适应修正算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- WANG H J. Adaptive correction algorithm for high precision time maintenance of oven controlled crystal oscillator[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [13] TSENG W H. Comparison of GNSS all-in-view (AV) and upsampled common-view (UCV) time transfers[C]//Proc. of the Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, 2021.
- [14] WU J, ZHENG X N, XU J, Research on common view time frequency transfer based on RINEX format observation data[C]//Proc. of the International Seminar on Computer Science and Engineering Technology, 2022: 318-322.
- [15] DEFRAIGNE P, PEITI G. CGGTTS-version 2E: an extended standard for GNSS time transfer[J]. *International Journal of Scientific Metrology*, 2015, 52(6): G1.
- [16] MIAO X, HU C J, QIAO Y J. A novel two variables PID control algorithm in precision clock disciplining system[J]. *Electronics*, 2024, 13(19): 3820.
- [17] CUI B J, HOU X B, ZHOU D H. Methodological approach to GPS disciplined OCXO based on PID PLL[C]//Proc. of the 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009.
- [18] COELHO L D S, GREBOGI R B. Chaotic synchronization using PID control combined with population based incremental learning algorithm[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37: 5347-5352.
- [19] ANG K H, CHONG G, LI Y. PID control system analysis, design, and technology[J]. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 2005, 13(4): 559-576.
- [20] LIN J N, ZHENG R J, ZHANG Y R, et al. CFHBA-PID algorithm dual-loop PID balancing robot attitude control algorithm based on complementary factor and honey badger algorithm[J]. *Sensors*, 2022, 22(12): 4492.
- [21] PRITESH S, SUDHIR A. Review of fractional PID controller[J]. *Mechanics*, 2016, 38: 29-41.
- [22] JIANG S T, WANG X. The design of a novel low phase noise anti-vibration OCXO[C]//Proc. of the Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, 2017: 227-230.
- [23] 张永光. GPS驯服的高稳恒温晶振设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- ZHANG Y G. Design and realization one kind of GPS disciplined high stability oven controlled crystal oscillator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [24] 贾永刚. 金属洛氏硬度计示值误差评定[J]. *轻工标准与质量*, 2017(1): 34-36.
- JIA Y G. Uncertainty evaluation of indication error for metal rock-well hardness testers[J]. *Standard & Quality of Light Industry*, 2017(1): 34-36.
- [25] 左朝阳. 基于北斗授时的时钟驯服与保持系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- ZUO Z Y. Research on a clock disciplining and holding system based on Beidou time service[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [26] 韩艳菊, 杨科, 郑鸿耀. 改善高频电压控晶振频率温度稳定性方法[J]. *宇航计测技术*, 2014, 34(6): 45-48.
- HAN Y J, YANG K, ZHENG H Y. Improved frequency temperature stability method for high frequency wide voltage controlled crystal oscillator[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2014, 34(6): 45-48.
- [27] 李辉. 高精度时钟同步微步移相器的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- LI H. Design and realization of high precision clock synchronous micro-step phase-shifter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [28] 肖波, 樊多盛, 王文利, 等. 一种高精度相位微跃1PPS信号发生器的研制[J]. *时间频率学报*, 2019, 42(4): 275-283.
- XIAO B, FAN D S, WANG W L, et al. Development of a high-precision phase micro stepper 1PPS signal generator[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2019, 42(4): 275-283.
- [29] 赵婧妍. 基于卫星共视系统的铷钟驯服技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- ZHAO J Y. Research on rubidium clock taming technology based on satellite common view system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and

Telecommunications, 2021.

[30]王宁, 吕志平, 王宇谱, 等. 不同采样间隔卫星钟差数据对钟差预报精度的影响与分析[C]//第 6 届中国卫星导航学术年会, 2015.

WANG N, LV Z P, WANG Y P, et al. Precision analysis of satellite clock for different sampling interval satellite clock bias data[C]//Proc. of the 6th China Satellite Navigation Conference, 2015.

## 作者简介

郝伊康(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 时间频率传递及晶振、铷钟驯服控制算法。

梁 坤(1980—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为精密测量/计量、时

间和频率、卫星导航。

余 涸(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 时间频率传递与晶振、铷钟驯服控制算法。

赵俊良(1980—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为精密测量/计量、时间和频率、卫星导航。

韦宝盈(2000—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为 GNSS 时频传递与同步、原子时标算法。

李雨峰(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 时间频率传递、GNSS 接收机硬件时延校准。

何之煜(1992—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为列车运行优化、铁路信号。