

基于氢原子钟组的复合控制算法的研究

朱江淼 宋文峰

(北京工业大学电子与信息工程学院 北京 100124)

摘要: 原子钟组的控制算法对原子钟组的稳定性和准确度有着直接影响,良好的原子钟组控制算法对原子钟守时系统有着重要作用。为进一步提升原子钟的稳定性,在国内首次将钟差预测用于氢原子钟组控制中,提出了一种氢原子钟的预控制算法,并结合现行的滞后式控制算法,形成了对氢原子钟组的复合控制算法。用实际氢原子钟数据对复合控制算法进行了实验验证,验证结果表明,该复合控制算法的性能要优于现行滞后式控制算法。该复合控制算法的提出对提高我国原子时的稳定度有很好的推动作用。

关键词: 原子钟;氢原子钟组;控制算法;钟差预测

中图分类号: TP183 TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research of compound control algorithm based on hydrogen atomic clock group

Zhu Jiangmiao Song Wenfeng

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The control algorithm of atomic clock group has a direct impact on the stability of atomic clock group and accuracy, a good atomic clock group control algorithm plays an important role in the system of atomic clock time keeping. In order to further improve the stability of the atomic clock, the clock difference prediction was used for the control of atomic clock prediction for the first time, which was called a pre-control algorithm, and combined with the hysteresis control algorithm, formed the composite control algorithm for the hydrogen atomic clock group, and validated it by the actual hydrogen atomic clock data. The experimental results show that the performance of the composite control algorithm is better than the current hysteresis control algorithm.

Keywords: atomic clock; hydrogen atomic clock group; control algorithm; clock difference prediction

1 引言

原子钟组的控制是指运用一种或多种算法通过对原子钟组产生的钟差数据进行分析后,计算出对原子钟组系统参数的调整量,通过相位微跃器实现对系统参数的调节^[1-2],使原子钟组产生的原子时标准度和稳定度更高。

目前,国外在原子钟系统控制算法方面的研究主要有:UTC(USNO)主要采用UTC驾取本地原子时标和双主钟驾取本地原子时标^[3-4]。UTC(KRIS)主要采用GPS时标对本地时标进行控制,使本地时标溯源到UTC(USNO)的时标^[5]。UTC(NIST)在原子钟系统控制方面主要是采用位于Boulder的原子钟系统运用原子时算法拟合出的纸面钟,对位于Fort Collins的原子

钟系统进行控制。

国内在原子钟系统控制算法方面的研究主要有中国科学院陕西天文台的以UTC为基准对本地参考钟的频率进行控制,使本地时标向UTC靠近^[6]和GPS驾取铷原子钟^[7]中国计量科学研究院时频所主要采用UTC-UTC(NIM),对本地参考钟的频率进行控制。

目前,国内这两种控制算法都属于滞后式控制算法,其对原子钟的稳定度提升有限。

随着科技的发展,人们对原子钟的稳定度的要求越来越高,尤其是在卫星导航定位中^[8]。为进一步提高氢原子钟的稳定度,目前,主要通过改进原子时算法、钟差预测算法、原子钟控制算法以及使用性能更优的钟差采集系统^[9-10]等措施。首次将钟差预测算法用于原子钟的控制中,并与现行控制算法进行了结合,形成

收稿日期:2015-05

对氢原子钟的复合控制算法,以提高原子钟的稳定度。实际数据的验证结果证明,该复合控制算法要优于原控制算法。

2 氢原子钟组滞后式控制算法

滞后式控制算法分 UTC 控制算法和本地滞后式控制算法。

UTC 控制算法主要思想是:一般是根据 UTC-UTC(K)值的大小,在其发布周期内对原子钟系统进行匀速调节,其算法比较简单,容易实现,但对原子钟的稳定度和准确度提高有限。

本地滞后式原子钟控制算法主要思想是:根据通过原子钟组钟子钟与参考钟的历史钟差数据,拟合出纸面钟与参考钟的钟差,通过参考钟的相位微跃器对参考钟的频率进行调节,使参考钟的输出频率更加稳定。

基于氢原子钟的滞后式控制算法的基本原理如下:

1)根据式(1)计算原子钟组子钟与参考钟的钟差值输入原子钟系统的钟差数据:

$$x_{ir}(k) = x_i(k) - x_r(k) \quad (1)$$

式中: $x_i(k)$ 为第 i 台原子钟第 k 时刻读数, $x_r(k)$ 为第 i 台原子钟第 k 时刻读数, $x_{ir}(k)$ 为第 i 台原子钟与参考钟的钟差值。

2)计算子钟钟差数据的哈德玛方差 $H(i)$,并根据式(2)和(3)对原子钟进行权重 w_i 分配:

$$w_i = \frac{1/H_i}{\sum_{i=1}^{n-1} (1/H_i)} \quad (2)$$

如果 $w_i \geq w_{max}$, 则:

$$w_i = w_{max} \quad (3)$$

3)由式(1)、(2)、(3)可得纸面钟和参考钟在时刻的钟差 $x_{sr}(k)$,

$$x_{sr}(k) = \sum_{i=1}^{n-1} w_i x_{ir}(k) \quad (4)$$

4)计算出钟差值 $x_{sr}(k)$ 后,可求出调整量 $\lambda(k)$:

$$\lambda(k) = \eta x_{sr}(k) + x_u/T \quad (5)$$

式中: x_u 为 UTC-UTC(K)值, T 为 UTC-UTC(K)的发布周期, η 为调整系数。

将调整量 $\lambda(k)$ 输入到参考钟的相位微跃器,对参考钟进行调节,以达到提高时标的稳定度的目的。

基于氢原子钟组的滞后式控制算法流程如图 1 所示。

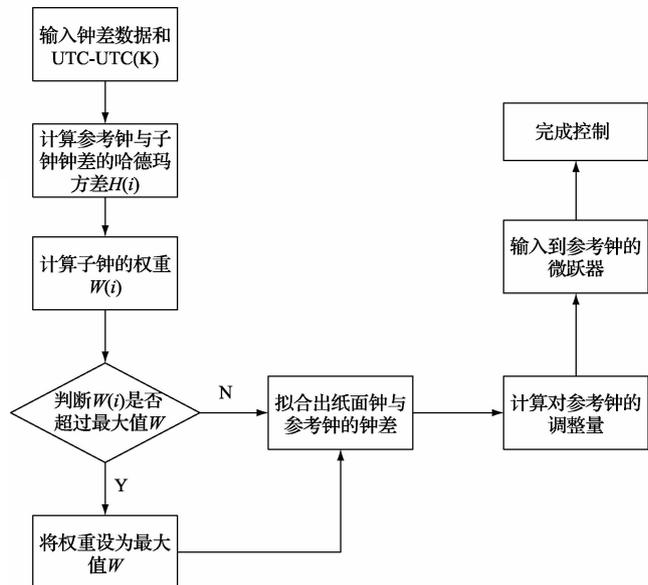


图 1 氢原子钟滞后式控制算法

3 氢原子钟组预控制算法

氢原子钟组的预控制算法是指通过对氢原子钟组内纸面钟与参考钟钟差变化速率的预测,并根据该预测值实现对参考钟频率的预控制。

预控值算法的主要思想是通过对历史钟差变化速率数据 $v(k)$ 的学习,对未来某个时刻的钟差值 $v(k+n)$ 进行一个预测,得到未来第 $k+n$ 时刻纸面钟相对于参考钟的钟差速率变化的预测值 $\hat{v}(k+n)$,通过该预测值 $\hat{v}(k+n)$ 对参考钟进行一个预调节,以达到提高参考钟的稳定度的目的。

基于氢原子钟的预控制算法的基本原理如下:

1)计算各子钟相对于参考钟的钟差数据的哈德玛方差,并根据式(2)、(3)、(4)计算出纸面钟相对于参考钟的钟差 $x_{sr}(k)$ 。

2)根据钟差 $x_{sr}(k)$ 计算出纸面钟相对于参考钟的钟差变化速率 $v(k)$:

$$v(k) = \frac{x_{sr}(k) - x_{sr}(k-1)}{T} \quad (6)$$

式中: T 表示钟差数据的采样周期。

3)对钟差变出对参考钟的调整量 $\lambda(k)$:

$$\lambda(k) = \eta(v(k) + \hat{v}(k+1)/2) \quad (7)$$

式中: η 表示对预测值的调整系数。

对调整量进行修正,当调整量 $\lambda(k) \geq \psi$ 时,最终调节幅度 $\lambda(k)$ 为:

$$\lambda(k) = \psi \quad (8)$$

否则, $\lambda(k)$ 保持不变。

将调整量 $\lambda(k)$ 输入到参考钟的微跃器,通过微跃器对参考钟进行频率调节,达到提高参考钟稳定度的目的。

基于氢原子钟组的预控制算法流程如图2所示。

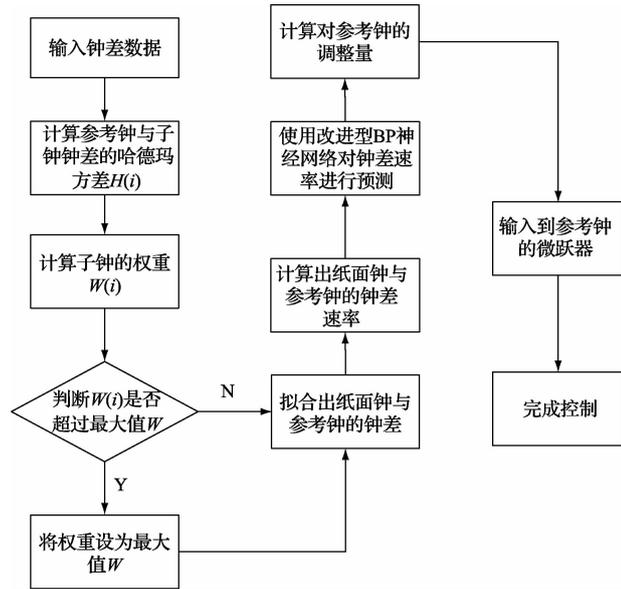


图2 基于氢原子钟组的预控制算法流程

4 氢原子钟复合控制算法

滞后式控制算法由于只是对过去参考钟的频率偏差进行了一个修正,所以其对原子时标的稳定度提升有限。为进一步提高原子时标的稳定度,将其与预控制算法相结合,共同对氢原子钟组进行控制,以达到提高原子时标的稳定度。复合控制算法的基本原理如下:

1) 根据纸面钟和参考钟的历史钟差值,求出钟差变化速率,并根据提出的改进型BP神经网络算法对纸面钟与参考钟的钟差速率值进行预测,得到下一个时刻的预测值 $\hat{v}(k)$,

$$\hat{v}(k) = f(v(k-1), v(k-2)) \quad (9)$$

式中: f 为改进型BP神经网络预测函数。

2) 计算将对参考钟的调整量 $\lambda(k)$:

$$\lambda(k) = \eta_1 x_v(k-1) + \eta_2 \hat{v}(k) + x_u/T \quad (10)$$

式中: η_i 为对应调整量的调整系数。

3) 判断调整量幅度,设最大调整幅度为 ψ :

当 $\lambda(k) \geq \psi$ 时:

$$\lambda(k) = \psi \quad (11)$$

否则, $\lambda(k)$ 保持不变。

将最终调整幅度 $\lambda(k)$ 输入到参考钟的微跃器中,完成对参考钟的控制。

基于氢钟组的复合式控制算法流程如图3所示。

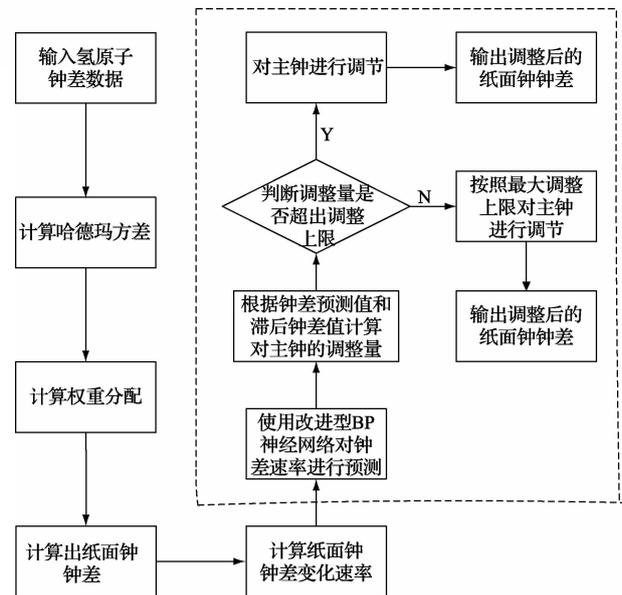


图3 基于氢钟组的复合式控制算法流程

5 实验数据验证及分析

通过网络下载了中国计量科学研究院时频守时实验室的氢钟钟差数据,对复合式控制算法进行了验证实验,并与滞后式控制算法进行了稳定度的比较。

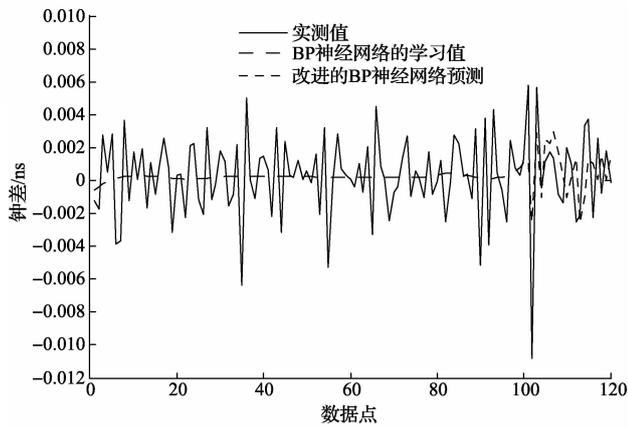
验证实验采用了两个时间段的钟差数据进行了实验验证,第1组数据为2014年4月27日8时至2014年8月15日8时共120个数据,前100个数据作为改进型BP神经网络的学习数据,后20个数据作为对比数据;第2组数据为2014年5月14日8时至2014年9月12日8时共120个数据,前100个钟差速率数据作为改进型BP神经网络的学习数据,后20个数据作为对比数据。

由于下载的数据是已经过滞后式控制算法控制的数据本文成为实测值。所以,本文只需要在原来数据基础上进行了预测控制算法,即可得到复合控制算法的控制效果。

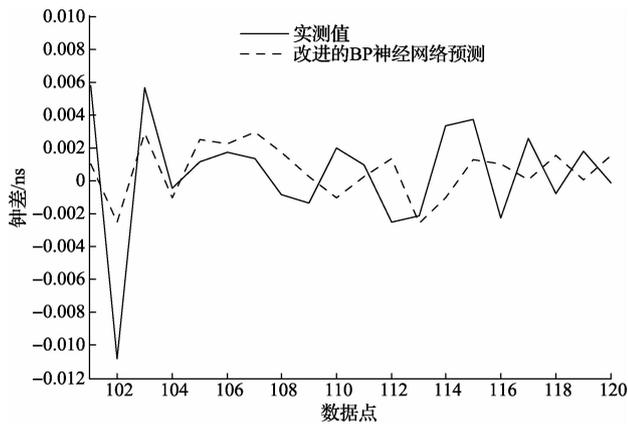
从图4中(c)图可以看出,在113点之前对氢原子钟的控制是提高稳定度方面有一定的效果,尤其是在104到109这6个点的控制效果较为明显,但对114到120这7个点的控制效果不太理想。其原因可以通过(b)图进行解释,在113数据点之前,对钟差速率的预测跟实际钟差速率较为接近,并能够很好的跟踪了钟差速率的变化趋势;但在114到120这7个点,钟差速率的预测与实际速率差距较大,尤其是连续两个点预测平均值于实测值相比,正负相反,加上调整系数的影

响,没能起到良好的控制作用。

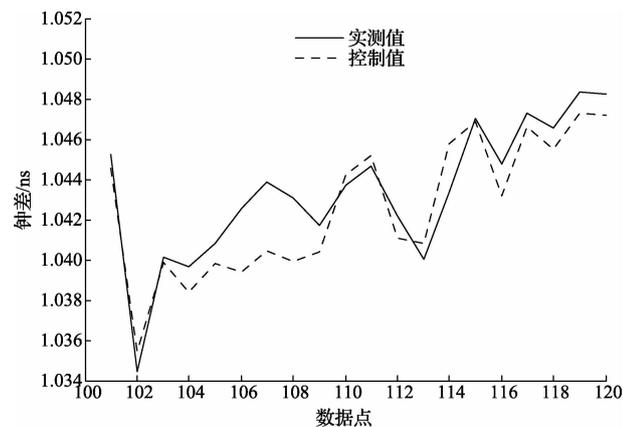
第1组数据验证曲线:



(a)改进型BP神经网络钟差速率预测曲线



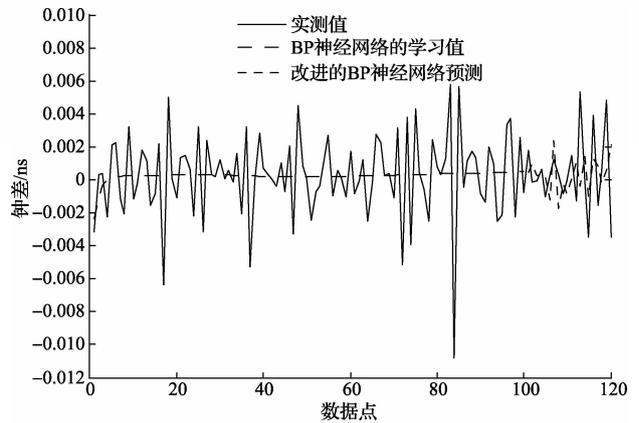
(b)改进型BP神经网络钟差速率预测曲线放大



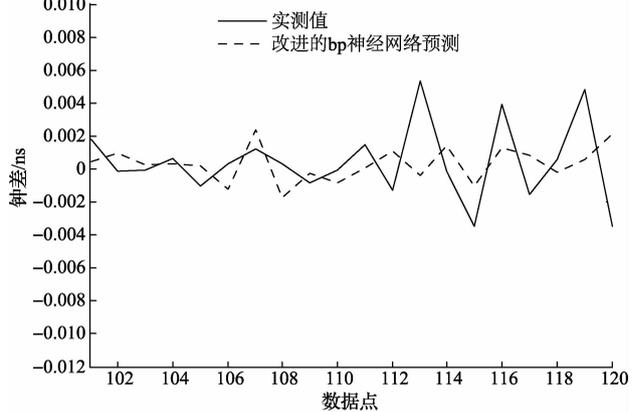
(c)控制算法控制结果曲线

图4 第1组数据验证曲线

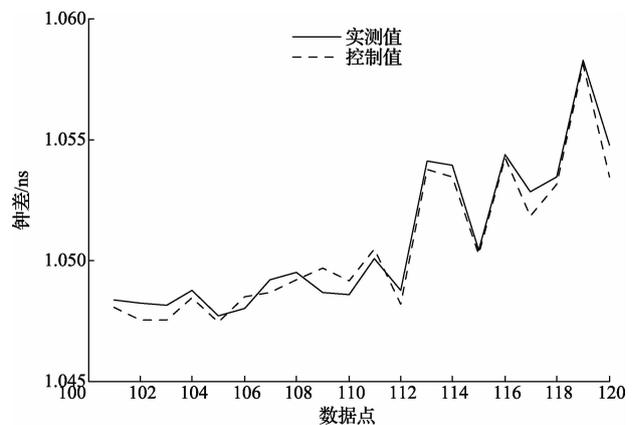
第2组数据验证曲线:



(a)改进型BP神经网络钟差速率预测曲线



(b)改进型BP神经网络钟差速率预测曲线放大



(c)复合式控制算法控制结果

图5 第2组数据验证曲线

从图5中(c)图可以看出,复合控制算法对改组数据

的控制效果提升一般,在 112 点前,复合控制算法对氢原子钟的控制有一定效果,但在 112 数据点之后控制效果较差。其原因为:本组数据在 112 点之前,数据本身稳定性较好,因此,复合控制算法对数据的稳定度提升有限;在 112 点之后,通过(b)图可以看出,钟差速率预测值与实测值之差较大,影响了控制效果。

为对复合式控制算法后与原来控制算法的整体性能有一个直观的比较,本文对使用复合控制算法前后的数据进行了哈德玛方差的计算。控制前后钟差数据的哈德玛方差如表 1 所示。

表 1 基于控制算法的钟差的哈德玛方差

数据	哈德玛方差	
	复合控制算法	滞后式控制算法
第 1 组数据	1.499 0E-10	2.105 3E-10
第 2 组数据	1.828 6E-10	2.063 1E-10

从表 1 可以看出,复合式控制算法的性能要优于原来单纯采用的滞后式控制算法,表明了复合式控制算法对原子钟系统进行控制的可行性。通过对验证结果的分析,钟差预测算法的性能直接影响到控制算法的控制效果。

6 结 论

综上所述,本文提出的基于氢原子钟组的复合控制算法性能要优于现行滞后式控制算法,能进一步提高氢原子钟的稳定度,这表明该算法在提高氢原子钟的稳定度具有一定的可行性。但是,本文提出的复合控制算法和预控制算法在铯原子钟及其他原子钟的适用性还有待进一步的验证。由于本文对原子钟控制理论的研究还不够深入,后续可以在原子钟的预控制理论进行进一步研究,对提高原子钟控制算法的性能有着重要作用。

参 考 文 献

- [1] 张莉莉,高源,朱江森,等. AT1 原子时算法的研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(11):20-24.
- [2] 高小珣. 美国 NIST 的原子时标[J]. 现代计量测试, 2000, 20(1):59-62.
- [3] KOPPANG P A, HUTSELL S T. USNO alternate

master clock steering [M]. Naval Observatory Alternate Master Clock Schriever AFB CO. 2000.

- [4] KOPPANG P A, LELAND R. Linear quadratic stochastic control of atomic hydrogen masers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1999, 46(3): 517-22.
- [5] SEUNG WOO L, CHANG BOK L, SUNG HOON Y. A new approach for steering UTC(KRIS) [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1247-51.
- [6] HAIBO Y, WEI G. Frequency steering and the control of UTC (K) [C]. 2012 IEEE International Proceedings of the Frequency Control Symposium (FCS), 2012:1-4.
- [7] 樊多盛,施韶华,李孝辉. 基于 GPS 接收机的铷原子钟原子钟驾驭方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10):980-985.
- [8] 怀洋,邵琼玲,路振民. 北斗/GPS 混合定位模块 UM220 应用研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3):76-79.
- [9] 辜新宇,郭际,施韶华,等. 多通道精密时间间隔测量系统的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 69-75.
- [10] 赵科佳,张爱敏,徐清华,等. 数字式双混频时差测量系统的试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2858-2865.

作 者 简 介

朱江森, 1997 年于华北工学院获得硕士学位, 2005 年于北京工业大学, 获得博士学位。副教授、硕士生导师。主要研究方向为测量信号的数字化分析处理, 原子钟信号处理等。

E-mail: zhujiangmiao@bjut.edu.cn

宋文峰, 硕士研究生。主要研究方向为原子钟信号处理。

E-mail: songwenfeng0008@163.com