

频标对时间统一系统时间影响的定量分析

梁玉秋 刘博扬 金 坚

(北京航天飞行控制中心)

摘要 时间和频率是人类航天活动测量系统十分重要的参数。针对频标对时钟时间的影响进行推导和定量分析,并阐述时差的调整方法,可为航天试验时间精度的保障提供帮助。

关键词 频标 时差 频率准确度 频率漂移率

1 引言

时间和频率是人类航天活动测量系统需要的十分重要的参数。标准化时统设备在航天试验中的主要作用就是向各测控和通信等用户提供高稳定、高精度的时间和频率信号。时统设备不论采用何种频标(频率标准),由于时钟频标频率的准确度有限,以及频标频率漂移率等系统误差的影响,时统站本地时钟给出的时刻与参考(标准)时间信号间(国家授时中心长短波时间信号或 GPS 时间信号等)的时差不可能保持不变,随着时间的推移,时差会越来越大。在实际工作中,只要时刻差的绝对值不超过某个容许值 E_m ,我们可以忽略时钟给出的时间与标准时间之间的时刻差,此时时钟给出的时间可认为就是标准时间。如果时差变化太大,不仅满足不了航天试验对时间精度的要求,而且也会影响试验的成败。

由时统设备的组成和工作原理可知,时统设备所配置的频标是时间统一系统的核心。时统设备在工作过程中无论是要保持全系统时间的统一,还是提供标准频率信号都离不开频标。因此,就频标对时钟时间的影响进行定量分析讨论,并总结出时差的调整方法,对时间统一系统可靠、稳定地完成航天试验任务具有重要意义。

2 频标对时钟时间影响的重要指标

频率标准(频标)是能产生高准确和高稳定标准频率信号的振荡器。频率准确度、频率漂移率(或老化率)、频率稳定性和环境条件(频标外部特性)是衡量频率标准质量的重要指标。频率准确度、频率漂移率(或老化率)是影响时钟时间的主要指标。

2.1 频标频率准确度

频标频率准确度用频标输出频率的实际值与标

称值之间的相对误差来表示,即

$$A = \frac{f - f_0}{f_0}$$

式中, f_0 是频率标准(频标)输出频率的标称值; f 是频率标准输出频率的实际值。参考频率标准的准确度应比被测频率标准的准确度优于一个数量级以上。

2.2 频标频率漂移率(或老化率)

频标在连续运行中,由于受内部元器件的老化以及影响频率参数的规则变化,其输出频率值将随时间单调增加或减小,通常呈线性的规律,频率标准相对频率值这种随时间单调变化的线性率称为频率漂移率。对于石英晶体频率标准,由于频率漂移通常是由石英晶体随运行时间的老化所造成的,因此又把它频率漂移率称为老化率。频率漂移率是根据实测的频标输出的相对频率值随运行时间变化的数值,用最小二乘法来计算,表示为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}$$

y_i 为 t_i 时刻所测的相对频率值; \bar{y} 为所有测量数

据的平均值 $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ 。

频率漂移率的测定要有参考频率源,参考频率源的漂移率应比被测频标的漂移率优于一个数量级,并且漂移率应给出方向,即:是正值,还是负值。

2.3 频标频率准确度与频标频率漂移率的关系

时统设备频率标准的频率虽经校准,由于频率标准固有的性能,其频率值不会保持不变,而频率漂移率(老化率)是频率值随工作时间变化的主要因

素。A(t)是时钟频标频率的瞬时准确度,即

$$A(t) = \frac{f(t) - f_0}{f_0} = \frac{f_\alpha + kf_0t - f_0}{f_0} = A_\alpha + kt$$

f(t)为频标的瞬时频率。

由上式可见,频标频率准确度随工作时间越长,漂移率(老化率)越大,频率准确度就越差。

3 频标频率准确度和漂移率对时钟时间影响的定量分析

时间的概念包括时刻和时间间隔,时间坐标上的点是时刻,点间距离是时间间隔。

时差也称时刻差,即本地钟的时刻与标准时间(GPS 时间或 BPL 长波授时台时间)的时刻之间的时间差。

时统站的守时钟,一般采用原子频标或性能较好的高稳定度晶体频标。在忽略环境变化和相位随机起伏影响的情况下,频标的瞬时频率可用下面数学模型表示,即

$$f(t) = f_\alpha + kf_0t \quad (1)$$

其中 f_α 是初始频率,它是测量初始时差时的频标频率; f_0 是时钟频标的标称频率值; k 既表示晶体频标的老化率,又可表示原子频标的漂移率; t 是测初始时差后经历的时间间隔。在运用公式时,需注意 k 、 t 时间单位的统一。

时统站时钟时差在 t_α 时刻的变化量为 $\frac{f(t_\alpha) - f_0}{f_0} dt_\alpha$ 。

在经过 t 时间间隔后的时差变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta E(t) &= \int_0^t \frac{f(t_\alpha) - f_0}{f_0} dt_\alpha \\ &= A_\alpha t + \frac{1}{2} kt^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $f(t_\alpha)$ 是时刻的瞬时频率;

$A_\alpha = \frac{f_\alpha - f_0}{f_0}$ 是初始频率的准确度。时钟在测初始时

差后的时刻的时差为:

$$\begin{aligned} E(t) &= \Delta E(t) + E_\alpha \\ &= \frac{1}{2} kt^2 + A_\alpha t + E_\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

其中, E_α 为初始时差。

$E(t)$ 为正,说明本地时钟时刻滞后参考时间;为负,说明超前参考时间。(3)式为时差方程,它表明频

率准确度、漂移率对时钟时差的影响。根据式时差方程可以画出时差变化曲线,如图 2 所示。

如果漂移率 K 很小,可以认为 $K=0$ (理想状态),频率不随时间变化,时差随时间的变化呈线性规律,时差方程可以简化为:

$$E(t) = A_\alpha t + E_\alpha \quad (5)$$

时差曲线变为直线,如图 2 中的(1),(2)所示。

由(5)式可得到:

$$A_\alpha = \frac{E(t) - E_\alpha}{t} = \frac{\Delta E(t)}{t} \quad (6)$$

从(6)式可以看出, A_α 反映了时差在单位时间里的变化量。也就是说,频率准确度确定时钟的运行速度和方向。

分析实例一:以时统站石英晶体频标为例,该频标频率准确度 $A_\alpha = -2 \times 10^{-9}$ 、日老化率 $K = 1 \times 10^{-11}/\text{日}$,时统本地时钟的初始时差为 $E_\alpha = 12 \mu\text{s}$ 。当时间同步精度 E_m 要求为 $50 \mu\text{s}$,时统站本地时钟运行 10 小时后,本地时钟的时差是多少?能否满足任务要求?本地时钟运行多少时间(最长同步持续时间 t_s)不会超出时间同步范围?

当准确度 $A_\alpha < 0$,漂移率 > 0 时,时刻差呈抛物线变化,抛物线顶点的纵坐标为 $-A_\alpha^2/2k$, $E_\alpha = 12 \mu\text{s}$ 处于 $\pm E_m$ 之间,时刻差 $E(t)$ 将从负方向超过同步范围。

根据(3)式时差方程可以计算出 10 小时后本地时钟的时差为:

$$E(10 \text{ 小时}) = -2 \times 10^{-9} \times \frac{1}{86400} \times (10 \times 3600)^2 - 2 \times 10^{-11} \times 10 \times 3600 + 12 \times 10^{-6} = -59.25 \mu\text{s}$$

时统站本地时钟运行 10 小时后相对标准时间(GPS 时间或长波 BPL 时间)时差为 $59.25 \mu\text{s}$,"-"号说明该石英钟走得比参考时间快,该时钟的时差变化量超出了时间同步精度($50 \mu\text{s}$)的要求范围,因此需要对时统本地时钟时间进行调整。

若 $|E(t)| \leq E_m = 50 \mu\text{s}$,设同步持续时间为 t_s ,

$$\frac{1}{2} kt_s^2 + A_\alpha t_s + E_\alpha = -E_m,$$

$$\begin{aligned} t_s &= \frac{-A_\alpha - \sqrt{A_\alpha^2 - 2K(E_\alpha + E_m)}}{K} \\ &= \frac{-(-2 \times 10^{-9}) - \sqrt{(-2 \times 10^{-9})^2 - 2 \times 10^{-11} \times \frac{1}{86400} \times (62 \times 10^{-6})}}{10^{-11} \times \frac{1}{86400}} \end{aligned}$$

$$= 8.64 \text{ (小时)}$$

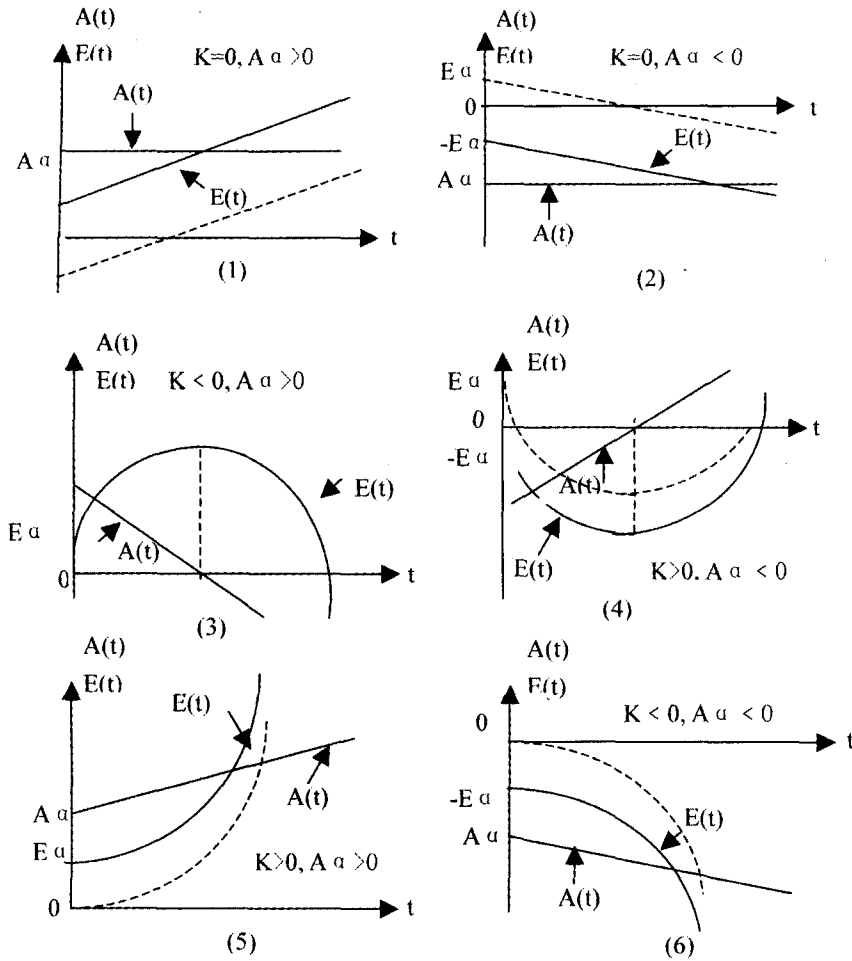


图 2 频率准确度 $A\alpha$ 和漂移率 k 各种条件下的时差变化曲线

即本地时钟运行时间小于 8.64 小时 $E(t) < 50\mu s$, 不会超出时间同步范围。

分析实例二：“在航天试验”中，某时统站铷钟准确度 $A\alpha = 1.00 \times 10^{-10}$ 、日漂移率 $K = 2 \times 10^{-11}/日$ ，时统本地时钟的初始时差为 $E_0 = 1\mu s$ 。若时间同步精度 E_m 要求为 $500\mu s$ ，时统站本地时钟运行 10 天后，本地时钟的时差是多少？能否满足任务要求？

当准确度 $A\alpha > 0$ ，漂移率 $k > 0$ 时， $|E(t)| \leq E_m, E_0 = 1\mu s$ 处于 $\pm E_m$ 之间，时刻差 $E(t)$ 只能从正方向超过同步范围，则 $\frac{1}{2}kt_s^2 + A\alpha t_s + E_0 = E_m$

$$t_s = \frac{-A\alpha - \sqrt{A\alpha^2 - 2K(E_0 + E_m)}}{K}$$

$$= \frac{-(-1 \times 10^{-10}) - \sqrt{(-1 \times 10^{-10})^2 - 2 \times 10^{-11} \times \frac{1}{86400} \times (1 - 500) \times 10^{-6}}}{2 \times 10^{-11} \times \frac{1}{86400}}$$

= 469.12 小时 = 19.55 天

则 $t_s < 19.55$ 天， $E(t) < 500\mu s$ ，即本地时钟运行时间小于 19.55 天不会超出时间同步范围。该时钟运行 10 天后，时差不会大于 $500\mu s$ ，能满足任务要求。

$$E(10 \text{ 天}) = \frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-11} \times \frac{1}{86400} \times (240 \times 3600)^2 + 1.00 \times 10^{-10} \times 240 \times 3600 + 1 \times 10^{-6} = 173.8\mu s$$

时统站本地时钟运行 10 天后相对标准时间 (GPS 时间或长波 BPL 时间) 时差为 $173.8\mu s$ (即时统站本地时钟时间同步精度)，说明该铷原子钟走得比参考时间慢，该时钟的时差变化量没有超出时间同步精度 ($500\mu s$) 的要求范围，因此不需要对时统站本地时钟时间进行调整。

从实例一、二定量分析中也可以得出时钟频标输出频率的准确度和漂移率使时钟的时差发生变化，使时钟给出的时刻离标准时间的时刻越来越远 (越不准)，频率准确度为正，时钟就运行得慢，频率准确度为负，时钟就运行得快。

同样频标频率漂移率确定着时钟运行的加速

度。频率漂移率的正、负决定加速度的正、负。

4 时差调整

综上所述,时统站本地时钟给出的时刻与参考(标准)时间信号间的时差不可能保持不变,随着时间的推移,时差会越来越来大。当时差超过要求的同步范围时,需要对本地钟的时差进行调整,调整方法如下:

一种是频率阶跃,也就是对时钟频标的振荡频率进行调整。如果频标的漂移率较大,以实施频率阶跃较为合适。

另一种是时刻阶跃,也就是对时钟给出的时刻进行调整。如果频标的漂移率较小以实施频率时刻阶跃较为合适。

一般来说,对石英钟宜采用频率阶跃,而对原子钟采用时刻阶跃。

如果时统站在第一次定时操作持续一段时间后再进行一次定时操作,则可消除由于准确度、漂移率(老化率)等在两次定时操作之间累积的时差。

为了减少频标频率准确度对时差的影响,时统站应经常对频标频率准确度进行测量和调整,使其尽量接近标称值。◇

参考文献

- [1]童宝润.时间统一技术.国防工业出版社.2003.9.
- [2]《计量测试技术手册》编委会.《计量测试技术手册》时间频率.中国计量出版社.1996.10.

(上接第 18 页)

- [2]祁大勇.一种基于单片机控制的导弹舵机伺服系统的建模与仿真[J].测试技术学报,1996(10):282-286
- [3]黄忠霖.控制系统 MATLAB 计算及仿真[M].北京:国防工业出版社,

2004:159-162.

- [4]朱中惠.推力矢量控制伺服系统[M].北京:宇航出版社,1995:457-475
- [5]刘 胜.PWM BDCM 高精度伺服系统设计与实现[J].哈尔滨工程大

(上接第 35 页)

部件的设计、实现,只需要简单地复用这种显示模式即可。这样,不仅能提高开发工作效率,节省大量时间和资源,而且该部分软件代码的可靠性得到保障,不再需要进行更多显示部件的测试工作。该技术已

在卫星工程 C³I 系统中得到了成功应用。◇

参考文献

- [1]Jeff Prosize.MFC Windows 程序设计,清华大学出版社,2001
- [2]载人航天发射场,中国酒泉卫星发射中心,2003

(上接第 46 页)

计算,而且提高了数据处理精度,为后续的任务提供了有效的数据处理途径。此方法不仅可运用在外弹道事后数据处理中,同样可以用到准实时的外弹道参数的优化估计计算。◇

参考文献

- [1]唐 纪等.组合预测方法评述.预测,1999.2
- [2]王正明等.弹道跟踪数据的校准与评估.长沙:国防科技大学出版社,1999.3