

文章编号:2095-6134(2015)04-0453-06

基于 UTCr 的原子钟频率动态预测方法^{*}

闫 敏^{1,2†}, 屈俐俐¹, 董绍武¹, 宋会杰¹

(1 中国科学院国家授时中心 中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600; 2 中国科学院大学, 北京 100049)
(2014 年 12 月 12 日收稿; 2015 年 1 月 15 日收修稿稿)

Yan M, Qu L L, Dong S W, et al. Dynamic prediction method of atomic clock frequency based on UTCr[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(4):453-458.

摘 要 传统的原子钟频率预报方法基于国际权度局 BIPM 每月公布的原子钟频率, 具有较长的滞后性, 且由于原子钟受多种噪声的影响, 无法较准确地对原子钟频率进行近实时的预报. 本文根据 BIPM 官方公布的快速协调世界时 UTCr 数据, 提出基于 UTCr 的原子钟频率动态预测方法. 采用参与国际时间比对的 3 个守时实验室, 即日本国家计量院 NICT、中国科学院国家授时中心 NTSC 和中国国家计量研究院 NIM 的钟比对数据, 应用本文提出的频率预报方法和传统的频率预报方法分别进行原子时尺度计算. 将参考原子时计算结果 $TA'(k) - UTC(k)$ 分别与 $UTC - UTC(k)$ 进行比较, 结果表明本文方法优于传统频率预报方法, 提高了原子钟频率预测的近实时性, 为频率驾驭提供了更加近实时可靠的参考, 有助于获得更稳定和更准确的 $UTC(k)$.

关键词 UTCr; 频率预测; 时间尺度
中图分类号: P24; P19 **文献标志码**: A **doi**: 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2015. 04. 005

Dynamic prediction method of atomic clock frequency based on UTCr

YAN Min^{1,2}, QU Lili¹, DONG Shaowu¹, SONG Huijie¹

(1 Key Laboratory of Time and Frequency Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The traditional method of atomic clock frequency prediction is based on the clock frequency, which is published by BIPM monthly. It has the characteristic of hysteresis. Because of the influence of different kinds of noise on the atomic clocks, it is difficult to predict accurately atomic clock frequency. A dynamic prediction model for atomic clock frequency is proposed based on a rapid Coordinated Universal Time (UTCr) published by BIPM. The new method and the traditional method are applied to calculate the atomic time scales with the real data of NICT, NTSC, and NIM. The time scales calculated by the different methods, are compared with $UTC - UTC(k)$, respectively. The results show that the new method is superior the traditional one. The new method greatly improves the quasi-real time of frequency prediction, provides more quasi-real time and

^{*} 国家自然科学基金(11473029)资助
[†] 通信作者, E-mail: yanmin_happy@126.com

reliable reference for frequency steering, and enhances stability and accuracy of $UTC(k)$.

Key words UTCr; frequency prediction; time scale

协调世界时 UTC (Coordinated Universal Time) 是各国时间服务的标准,由国际权度局 BIPM 每月 10 日左右以 $UTC - UTC(k)$ 的偏差形式发布,滞后时间为 10 到 45 天不等^①. UTC 对于近实时的时间应用并不适用,因此 BIPM 提出快速协调世界时 UTCr. BIPM 时间部从 2012 年 1 月到 2013 年 6 月底进行了为期 18 个月的 UTCr 的试算,大约有 40 个实验室参与这次试算,参与的原子钟数量为产生 UTC 时间尺度的 60% ~ 70%^[1-2]. 2013 年 7 月, BIPM 时间部向时间频率咨询委员会 (CCTF) 提交最终报告,确认 UTCr 已达到预期的质量,从此 BIPM 每周三发布上周 UTCr - $UTC(k)$ 的偏差,每天一个数据点. UTCr 并不是一个独立于 UTC 并且可能最终取代它的时间尺度,相反 UTCr 对于原子钟频率和漂移值预报以及 UTC 预测方面都可以提供参考,同时增强各守时实验室间的国际合作. UTCr 对于守时实验室直接影响主要表现在以下两方面^[3]: 第一,守时实验室通过 UTCr 每周一次评估 $UTC(k)$ 的驾驭情况,有助于获得更稳定和更准确的 $UTC(k)$, 使 $UTC(k)$ 的用户获得一个更好的“本地”的参考,间接地溯源到 UTC; 第二,通过改善的 $UTC(k)$ 预测,提高卫星导航系统用户与 UTC 的时间同步精度.

在 UTCr 发布之前,参与国际时间比对的守时实验室的原子钟频率预报基于 BIPM 每月公布的原子钟频率,具有较长的滞后期,由于原子钟受

多种噪声的影响^[4],无法较准确地对原子钟频率进行近实时的预报,导致无法通过频率驾驭获得更稳定和更准确的地方协调时 $UTC(k)$. 与 UTC 相比, UTCr 滞后时间最长缩短 35 d, 最短提高 7 d. 因此 UTCr 可以成为各个国家或地区的标准时间 $UTC(k)$ 频率驾驭的短期参考,通过频率预测方法进行建模获得原子钟的预测频率,并结合每月公布的 $UTC - UTC(k)$, 进一步校准,最终达到提高 $UTC(k)$ 的准确性和稳定性的目的.

1 频率动态预测模型

在传统的频率预报方法中,选择上一时段的频率,作为当前时段频率的预测,进行实时参考原子时 $TA'(k)$ 计算,作为 $UTC(k)$ 信号的驾驭参考. 由于原子钟的特点及 BIPM 的 T 公报发布 10 ~ 45 d 的滞后性,无法对钟频率进行实时或近实时的预报, UTCr 数据的发布有助于改善这一情况. 基于 UTCr 数据进行频率预报,进行实时 $TA'(k)$ 计算,从而获得更稳定和更准确的 $UTC(k)$, 增强 $UTC(k)$ 向 UTC 的溯源性.

如图 1 所示,横轴代表约化儒略日, (MJD) 每个小括号代表 BIPM 每周公布 7 d 的 UTCr - $UTC(k)$ 的数据, 每天一个数据点, 每周三公布. 利用前 4 周已公布的 UTCr - $UTC(k)$ 数据与实验室设备采集的钟比对数据计算每台钟 $clock(i)$ 与 UTCr 的偏差, 即:

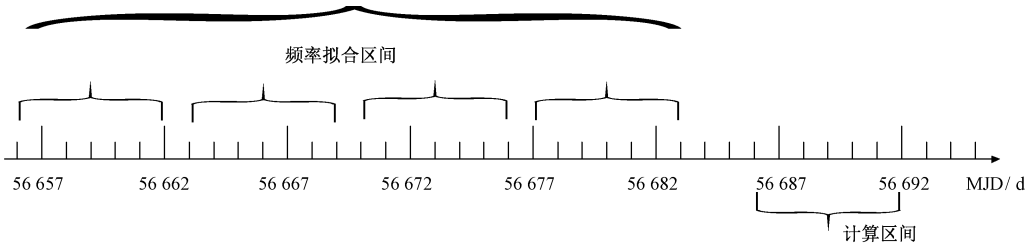


图 1 频率拟合区间与计算区间关系示意图
Fig.1 Relationship between an interval of frequency fitting and an interval of calculation

$$UTCr - clock(i) = [UTCr - UTC(k)] + [UTC(k) - clock(i)]. \tag{1}$$

根据 $UTCr - clock(i)$ 数据最小二乘线性拟

合每台钟的频率. 拟合区间时长为 4 周共 28 d, 并从 UTCr 数据发布时间开始到下一次 UTCr 数据发布时间之前, 进行原子时尺度 $TA'(k)$ 计算, 计算区间时长为 7 d.

① 数据来自 BIPM 网站: <http://www.bipm.org>.

利用最小二乘线性拟合方法^[5]对每台钟的 UTCr-clock(i) 数据进行滑动拟合. 经验方程为 $y = F(x)$, 其中, $y(i)$ 为 UTCr-clock(i) 数据; $x(i)$ 为 MJD 时间. 方程中含有一些待定系数 a , b , 给出真实值 $\{(x(i), y(i)) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$, 将这些 $x(i)$ 、 $y(i)$ 值代入方程然后作差, 可以描述误差为

$$E = (y(i) - F(x(i)))^2. \quad (2)$$

经验方程为线性方程, 形如 $y(i) = ax(i) + b$, 即线性回归. 误差函数为

$$E = \sum (y(i) - ax(i) - b)^2. \quad (3)$$

各偏导为

$$\begin{cases} \frac{dE}{da} = 2 \sum (y(i) - ax(i) - b)(-x(i)) = 0, \\ \frac{dE}{db} = -2 \sum (y(i) - ax(i) - b) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

于是得到关于 a, b 的线性方程组

$$\begin{cases} (\sum x(i)^2)a + (\sum x(i))b = \sum y(i)x(i), \\ (\sum x(i))a + nb = \sum y(i), \end{cases} \quad (5)$$

$$A = \sum x(i)^2, B = \sum x(i), C = \sum y(i)x(i), D = \sum y(i), \text{ 则方程化为}$$

$$\begin{cases} Aa + Bb = C, \\ Ba + nb = D, \end{cases} \quad (6)$$

解出 a, b 得

$$\begin{cases} a = (Cn - BD)/(An - BB), \\ b = (AD - CB)/(An - BB), \end{cases} \quad (7)$$

则 a 为所拟合钟频率.

2 原子时尺度算法

本文对 3 个守时实验室数据进行 $TA'(k)$ 计算的原子时尺度算法均为类 Algos 算法^[6-8].

假定实验室有 N 台钟: 在时刻 t , 相对于钟 H_j , 定时资料为 $(N-1)$ 次测量 $x_{ij}(t)$. 有

$$x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t) (i = 1, \dots, N, i \neq j), \quad (8)$$

式中, $x_{ij}(t)$ 的值可以经过测量得到.

TA 的定义为

$$TA(t) = \sum_{i=1}^N w_i(t) [h_i(t) - h'_i(t)], \quad (9)$$

式中, $w_i(t)$ 是原子钟 H_i 的权重, $h'_i(t)$ 是钟 H_i 在 t 时刻 H_i 钟读数上的时间修正量, 引入此值的目的是在计算时间尺度时, 当个别钟的权重发生改变, 或者参与计算的钟数目变化时, 保证时间和频率的连续性.

实际上由于不存在理想的时间, 所以实验中无法直接获得 $h_i(t)$ 的值. 设钟 H_i 的读数与 TA(t) 的差为 $x_i(t)$ ^[9-11]

$$x_i(t) = TA(t) - h_i(t), (i = 1, \dots, N). \quad (10)$$

由式(8), 式(9)和式(10)得

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N w_i(t) x_i(t) = \sum_{i=1}^N w_i(t) h'_i(t), \\ x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t), i \neq j. \end{cases} \quad (11)$$

方程组(4)中有 N 个方程, N 个未知数, 因此可以求解.

其中 t 满足

$$t = t_0 + nT/6, n = 0, 1, \dots, 6, \quad (12)$$

式中, $T = 7$ d, t_0 是上个周期的最后一个归算历元, 也是当前周期的第一个归算历元.

修正项 $h'_i(t)$ 是由线性预测得到, 其表达式为

$$h'_i(t) = x_i(t_0) + y'_i(t)(t - t_0), \quad (13)$$

式中, $x_i(t_0) = TA(t_0) - h_i(t_0)$ 为已知, $y'_i(t)$ 是由时间段 $[t_0 - T, t_0]$ 内的值预测得到的钟 H_i 相对于 TA 的频率预报值.

在实际 $TA'(k)$ 计算中, 计算周期为 7 d, 计算时长为 7 d, 频率拟合周期为 7 d, 频率拟合时长为 28 d, 测量数据每天更新一次, 频率 7 d 更新一次^[12].

钟 H_i 的权重 $w_i(t)$ ^[13] 在计算时段 $[t_0, t_0 + T]$ 中保持不变. 权值计算如下

$$w_i(t) = \frac{\frac{1}{\sigma_i^2}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_k^2}} (k = 1, \dots, N), \quad (14)$$

其中, σ_i^2 为频率稳定度.

若 $w_i(t) \geq w_{\max}$, 则

$$w_i(t) = w_{\max}, \quad (15)$$

其中, $w_{\max} = A/N$ 为最大权, N 为参与计算钟的数目, A 是经验常数, 本文方法取 1.5,

$$\sum_{i=1}^N w_i(t) = 1. \quad (16)$$

3 实验结果

以参与国际时间比对的 3 个守时实验室 NICT、NTSC、NIM 的钟比对数据,分别利用本文提出的钟频率预测方法与传统的频率预测方法进行计算,将 2 种方法所得的计算结果 $TA'(k) - UTC(k)$ 与 BIPM 每月公布的 $UTC - UTC(k)$ 进行比较,从而比较本文钟频率预测方法与传统的频率预测方法的优劣.

3.1 NICT

图 2 为 $UTC - UTC(NICT)$ 与 $UTC_r - UTC(NICT)$ 相位偏差的比较(时间段 2014 年 1 月 2 日—2014 年 3 月 14 日).

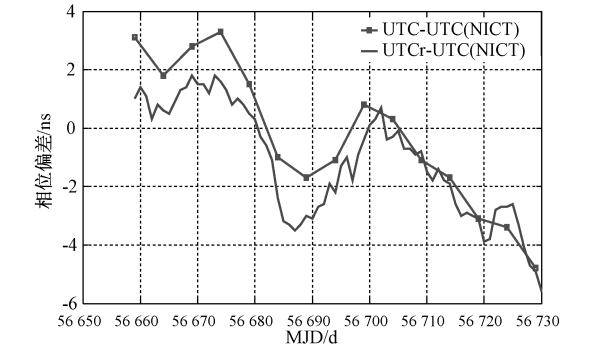


图 2 $UTC - UTC(NICT)$ 与 $UTC_r - UTC(NICT)$ 相位偏差比较图

Fig. 2 Comparison of the time difference between $UTC - UTC(NICT)$ and $UTC_r - UTC(NICT)$

应用本文的频率预测方法与传统频率预测方法分别计算 $TA'(NICT) - UTC(NICT)$, 并与 $UTC - UTC(NICT)$ 进行比较(时间段 2014 年 1 月 2 日—2014 年 3 月 14 日),如图 3.

表 1 比较 2 种方法下的 $TA'(NICT) - UTC(NICT)$ 与 $UTC - UTC(NICT)$ 曲线偏差值,利用本文频率预测方法计算所得的 RMS 偏差值比传统方法减小 22.75%.

表 1 2 种方法下的 $TA'(NICT) - UTC(NICT)$ 与 $UTC - UTC(NICT)$ 曲线偏差值比较

Table 1 Deviation values between $TA'(NICT) - UTC(NICT)$ and $UTC - UTC(NICT)$ of the two methods

不同方法	本文频率预测方法	传统频率预测方法
RMS/ns	1.244 2	1.610 6

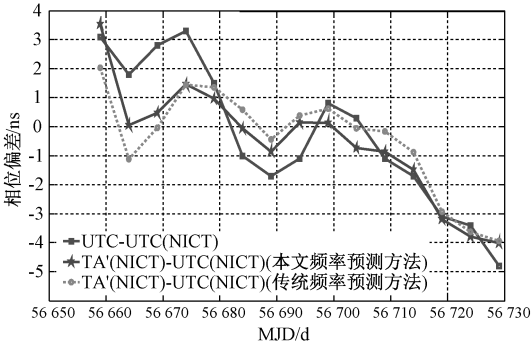


图 3 $TA'(NICT) - UTC(NICT)$ 与 $UTC - UTC(NICT)$ 相位偏差对比图

Fig. 3 Comparison of the time difference between $TA'(NICT) - UTC(NICT)$ and $UTC - UTC(NICT)$

3.2 NTSC

图 4 为 $UTC - UTC(NTSC)$ 与 $UTC_r - UTC(NTSC)$ 相位偏差的比较(时间段 2014 年 1 月 2 日—2014 年 3 月 14 日).

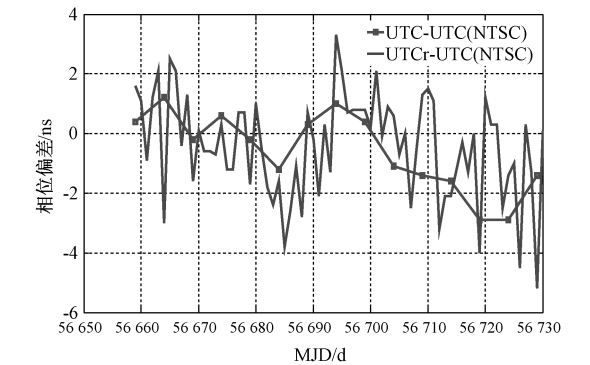


图 4 $UTC - UTC(NTSC)$ 与 $UTC_r - UTC(NTSC)$ 相位偏差比较图

Fig. 4 Comparison of the time difference between $UTC - UTC(NTSC)$ and $UTC_r - UTC(NTSC)$

应用本文的频率预测方法与传统频率预测方法分别计算 $TA'(NTSC) - UTC(NTSC)$, 并与 $UTC - UTC(NTSC)$ 进行比较(时间段 2014 年 1 月 2 日—2014 年 3 月 14 日),如图 5.

表 2 比较 2 种方法下的 $TA'(NTSC) - UTC(NTSC)$ 与 $UTC - UTC(NTSC)$ 曲线偏差值,利用本文频率预测方法计算所得的 RMS 偏差值比传统方法减小 42.73%.

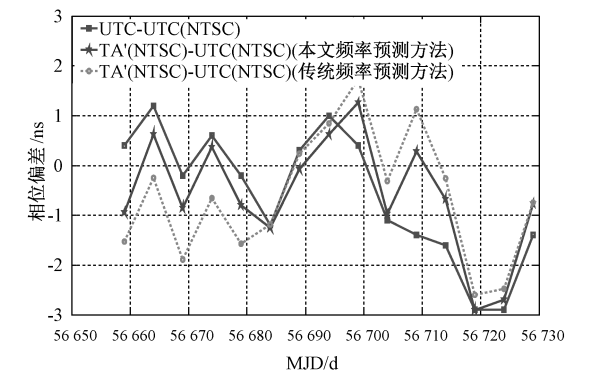


图5 TA'(NTSC) - UTC(NTSC)与 UTC - UTC(NTSC) 相位偏差对比图

Fig. 5 Comparison of the time difference between TA'(NTSC) - UTC(NTSC) and UTC - UTC(NTSC)

表2 2种方法下的 TA'(NTSC) - UTC(NTSC) 与 UTC - UTC(NTSC) 曲线偏差值比较

Table 2 Deviation values between TA'(NTSC) - UTC(NTSC) and UTC - UTC(NTSC) of the two methods

不同方法	本文频率预测方法	传统频率预测方法
RMS/ns	0.789 7	1.378 8

3.3 NIM

图6为 UTC - UTC(NIM)与 UTCr - UTC(NIM)相位偏差的比较(时间段2014年1月2日—2014年3月14日)。

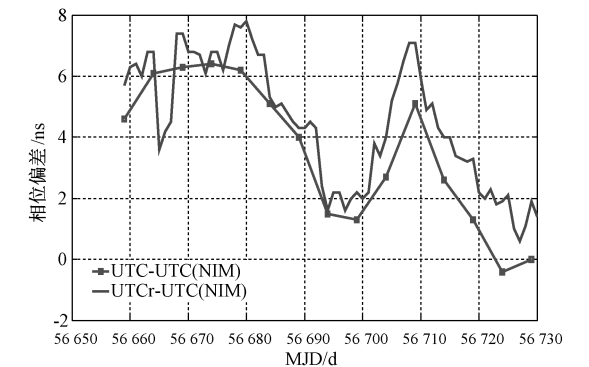


图6 UTC - UTC(NIM)与 UTCr - UTC(NIM) 相位偏差比较图

Fig. 6 Comparison of the time difference between UTC - UTC(NIM) and UTCr - UTC(NIM)

应用本文的频率预测方法与传统频率预测方法分别计算 TA'(NIM) - UTC(NIM),并与 UTC - UTC(NIM)进行比较(时间段2014年1月2日—

2014年3月14日),如图7。

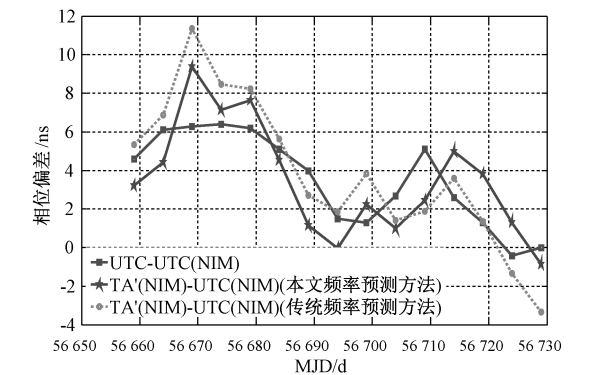


图7 TA'(NIM) - UTC(NIM)与 UTC - UTC(NIM) 相位偏差对比图

Fig. 7 Comparison of the time difference between TA'(NIM) - UTC(NIM) and UTC - UTC(NIM)

表3比较2种方法下的 TA'(NIM) - UTC(NIM)与 UTC - UTC(NIM)曲线偏差值,利用本文频率预测方法计算所得的 RMS 偏差值比传统方法减小 15.11%。

表3 2种方法下的 TA'(NIM) - UTC(NIM)与 UTC - UTC(NIM) 曲线偏差值比较

Table 3 The TA'(NIM) - UTC(NIM) and UTC - UTC(NIM) deviation values for the two methods

不同方法	本文频率预测方法	传统频率预测方法
RMS/ns	1.808 6	2.130 6

4 结语

本文提出基于 UTCr 的原子钟频率动态预测方法,以参与国际时间比对的3个守时实验室 NICT、NTSC、NIM 的钟比对数据,应用本文提出的频率预报方法和传统的频率预报方法分别进行 TA'(k)计算,将计算结果分别与 UTC 进行比较,分别求出2条 TA'(k) - UTC(k)曲线相对于 UTC - UTC(k)曲线的 RMS 值.利用本文方法所求得的 RMS 值比传统方法分别下降 22.75%、42.73%、15.11%.结果表明,本文的频率预报方法优于传统的频率预报方法,提高了原子钟频率预测的近实时性,为频率驾驭提供更加近实时可靠的参考,从而有助于获得更稳定和更准确的 UTC(k)^[14-15].

参考文献

[1] Arias E F, Jiang Z H, Lewandowski W, et al. BIPM annual report on time activities for 2012[M]. Paris;BIPM,2013.

[2] Arias E F, Jiang Z H, Lewandowski W, et al. BIPM annual report on time activities for 2013[M]. Paris;BIPM,2014.

[3] Petit G, Arias F, Harmegnies A, et al. UTCr: a rapid realization of UTC[J]. Metrologia, 2014, 51: 33-39.

[4] Yuan H B. Dynamic grey-autoregressive model of an atomic clock[J]. Metrologia, 2008, 45: S1 – S5.

[5] 丁克良,沈云中,欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2010,29(1):44-47.

[6] Panfilo G, Arias E F. Algorithms for TAI[J]. Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency, 2010,57:140-150.

[7] Panfilo G. The new prediction algorithm for UTC: application and results [J]. European Frequency and Time Forum (EFTF), 2012:242-246.

[8] Panfilo G, Harmegnies A, Tisserand L. A new prediction algorithm for the generation of international atomic time[J]. Metrologia,2012, 49(1): 49-56.

[9] 漆贯荣. 时间科学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[10] 吴守贤,漆贯荣,边玉敬. 时间测量[M]. 北京:科学出版社,1983.

[11] 胡永辉,漆贯荣. 时间测量原理[M]. 香港:香港亚太科学出版社,2000.

[12] 贺瑞珍. 守时信息自动分析方法与软件实现[D]. 西安:中国科学院国家授时中心,2014.

[13] Azoubib J. A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation[C] //Proc 32nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. 2000:195-210.

[14] 刘金铭,翟造成. 现代计时学概述:原子频标及其应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980.

[15] 童宝润. 时间统一系统[M]. 北京:国防工业出版社,2003.