

时间频率的精确测量

黄秉英 马凤鸣
肖明耀 吴长华
编著

499.942373

499.942374

499.942375

中国计量出版社

时间频率的精确测量

黄秉英 肖明耀
马凤鸣 吴长华 编著

中国计量出版社

1986·北京

内 容 提 要

本书扼要地叙述了时间频率测量技术的演变、它的应用和国际合作,正确解释了时频精确测量中广泛使用的术语和概念,详细讨论了现在可用的各种精确测量和校准技术。

本书可供从事时频专业工作的工程技术人员以及高等院校有关专业的师生参考,也适于其他希望得到时频精确测量知识的读者阅读。

时间频率的精确测量

黄秉英 肖明耀 编著
马凤鸣 吴长华

责任编辑 陈聪尔

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

河北省三河县中赵甫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 8

字数 213 千字

印数 1—6000*

1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷

统一书号 15210·502

定价 2.00元

序

时间频率的精确测量，促进着当代科学技术的进步；当代科学技术的进步，又反过来把时间频率的精确测量提高到新的高度。两者的密切关系，使愈来愈多的人切望了解和掌握时间频率精确测量的有关技术和方法。

关于时频精确测量方面的著述，迄今多见于学术性刊物。如何能从一本书得到比较完整的实用知识，一直是从事这一专业工作的工程技术人员和关心时频精确测量的读者的愿望。在这方面，我们发现美国国家标准局（NBS）编写的《时间频率用户手册》（George Kamas, Time and Frequency Users', Manual, NBS Technical Note 695 1977），无论在选材和叙述方法上均较可取，它着重教给人们怎样做这样那样的测量和校准，而对涉及的原理和理论，讲得通俗易懂。为此，我们决定在它的基础上，吸收国内外的研究成果，结合自己多年从事实际工作的心得体会进行著述，以飨读者。

本书论述的时间频率精确测量，建立在原子钟和无线电电子学基础上，天文测时只作为历史过程提及。全书分十章。第一章阐述时频精确测量的主要概念和定义；第二章扼要叙述由天文测时过渡到原子时的历史演变；第三章介绍测量的数学处理方法，包括各种技术指标的定义、计算和误差分析，并给出了数据处理中最常用的几个计算程序；第四章概述时频精确测量中常用的设备和技术；从第五章到第八章，讨论了如何用地面台站的各种无线电信号（包括高频、甚低频、低频信号以及电视信号）进行时间频率精确校准；第九章向读者介绍当今远距离时频测量的最理想手段之一——卫星传送方法。作为另一种理想手段的搬运钟方法，鉴于它的计算难点（相对论效应）已在第九章叙述，就不另列专

DA029/02

题了。第十章概述了现阶段时频精确测量中广泛使用的频率标准。书末有二个附录，是时频校准方法的提要（附录一）和关于时频测量国际合作方面的重要资料（附录二）。上述各章由参加编著的同志分工撰写，在此基础上再由集体审订定稿。编写各章的分工如下：肖明耀（第三章），马凤鸣（第七、八章），吴长华（第十章），黄秉英（其余各章、附录兼统稿）。由马麒插图。

在写作过程中，作者曾分别向以下同志征求意见，并得到他们的热情帮助和指正：杨孝仁（第一、二、四、五章），赵良弼（第三章），费全度、章国春（第六章），柳景洲（第七章），肖翠英（第九章），沈永南（第十章）。此外，张世广和李达权同志曾予我们许多支持和鼓励，孙木乔同志为本书绘制了部分方块图，谨此向他们一并表示衷心感谢。

作者水平有限，书中一定会有叙述不当以至错误之处，欢迎批评指正。

编 者

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 时间频率的定义	(2)
1.2 什么是时间频率标准?	(3)
1.3 标准频率和标准时间是怎样传递的?	(4)
1.4 测量与校准	(6)
1.5 同步	(7)
1.6 时间编码	(7)
参考文献	(11)
第二章 守时的演变	(12)
2.1 天文时	(12)
2.2 原子时	(16)
2.3 协调世界时 (UTC)	(17)
参考文献	(19)
第三章 时间频率测量的数学处理及其惯例	(20)
3.1 频率差和时间差的表示	(20)
3.2 由时间导出频率	(22)
3.3 振荡器性能指标的计算	(25)
3.3.1 频率准确度	(25)
3.3.2 频率漂移率	(27)
3.3.3 频率稳定度	(31)
3.3.4 频率复现性	(31)
3.3.5 开机特性	(32)
3.4 频率稳定度的表征	(32)
3.4.1 谱密度与相关函数	(32)
3.4.2 阿伦 (Allan) 方差的引出	(33)
3.4.3 阿伦方差的估计	(36)
3.4.4 谱密度与阿伦方差的实际转换	(39)

3.4.5 多台钟组合比定时稳定度的求解	(41)
3.4.6 稳定度表征的进一步研究	(44)
3.5 时间预测	(45)
附: 常用数据处理的计算程序	(47)
参考文献	(58)
第四章 测量设备与技术	(60)
4.1 电子计数器	(61)
4.1.1 频率测量	(63)
4.1.2 周期测量	(68)
4.1.3 时间间隔测量	(71)
4.1.4 相位差测量	(72)
4.1.5 脉冲宽度的测量	(72)
4.1.6 提高计数器性能的新技术	(73)
4.1.7 计数器的测量准确度	(77)
4.1.8 计数器的选择, 印出和记录	(82)
4.2 示波器	(82)
4.2.1 示波器时基的校准	(84)
4.2.2 直接频率测量	(84)
4.2.3 频率比对	(85)
4.2.4 时间间隔测量	(92)
4.3 频率比对器	(93)
4.4 相位比对器	(95)
4.5 相位锁定技术	(98)
4.6 双混频时差技术	(100)
4.7 谱分析方法	(102)
4.8 辅助设备	(103)
4.8.1 频率综合器	(103)
4.8.2 相位检波器	(104)
4.8.3 分频器	(104)
4.8.4 分频比可调的分频器	(107)
4.8.5 信号平均器	(107)
参考文献	(109)
第五章 高频和甚低频时号广播	(110)

5.1 短波时号用于钟的粗同步	(111)
5.1.1 同步方法	(111)
5.1.2 时延的估计	(114)
5.2 应用甚低频信号的校准	(115)
5.2.1 频率校准	(116)
5.2.2 时刻校准	(118)
5.2.3 甚低频台站的信号特征	(119)
参考文献	(122)
第六章 应用彩色电视副载频的频率校准	(123)
6.1 什么是彩色电视副载频?	(123)
6.2 频率校准方法	(128)
6.2.1 同频比相法	(130)
6.2.2 拍频法	(133)
6.2.3 直接测量法	(135)
6.3 信号的相位和频率的不稳定性	(140)
6.4 操作与数据处理	(142)
参考文献	(144)
第七章 应用电视行同步信号的时间频率校准	(145)
7.1 电视信号的行同步	(145)
7.2 直接应用电视行同步信号的校准	(149)
7.2.1 基本原理	(149)
7.2.2 参考脉冲选择器	(151)
7.2.3 钟的预同步	(153)
7.2.4 两地电视信号总时延差的确定	(156)
7.2.5 校准准确度	(157)
7.3 应用插入的标准信息进行校准	(158)
7.3.1 怎样插入标准信息?	(158)
7.3.2 标准信息的取出	(159)
7.3.3 应用标准秒脉冲信号的校准	(160)
7.3.4 应用标频信号的校准	(162)
参考文献	(162)
第八章 罗兰C 时间频率方法	(163)
8.1 罗兰C 系统	(163)

8.2 罗兰C信号中的标准时间频率信息	(165)
8.2.1 信号波形	(165)
8.2.2 组重复周期 (GRP)	(167)
8.2.3 符合秒 (TOC) 秒	(169)
8.3 利用罗兰C信号进行校频和定时	(171)
8.3.1 校准频率	(171)
8.3.2 校准时刻	(174)
8.4 我国的BPL信号	(179)
参考文献	(179)
第九章 利用卫星的时间频率精确测量	(180)
9.1 测量原理和装置	(181)
9.1.1 单向法	(181)
9.1.2 双向法	(182)
9.1.3 共视法	(184)
9.2 多普勒频移和相对论效应	(185)
9.2.1 多普勒频移	(185)
9.2.2 相对论效应	(187)
9.3 电离层和对流层折射的改正	(191)
9.3.1 对流层折射	(192)
9.3.2 电离层折射	(193)
9.4 可供使用的卫星和地面设施	(195)
参考文献	(197)
第十章 实用频率标准	(198)
10.1 谐振器	(198)
10.2 石英晶体振荡器	(201)
10.2.1 概述	(201)
10.2.2 石英晶体谐振器	(202)
10.2.3 振荡电路	(204)
10.2.4 恒温箱(槽)	(205)
10.2.5 漂移或老化效应	(206)
10.2.6 石英晶体振荡器的性能	(207)
10.3 原子频率标准概述	(210)
10.3.1 原子谐振器	(210)

10.3.2 态的选择	(212)
10.3.3 谐振的检测	(215)
10.3.4 锁频环路和锁相环路	(218)
10.3.5 影响原子谐振器谐振频率的主要因素	(222)
10.4 实用原子频率标准	(224)
10.4.1 铯束原子频率标准	(224)
10.4.2 铷气泡型原子频率标准	(230)
10.4.3 氢激射器原子频率标准	(233)
10.4.4 其他	(236)
10.5 实用频率标准的性能比较	(238)
参考文献	(238)
附录一 时间频率校准一览表	(240)
附录二 时间频率活动的国际合作	(242)

第一章 引 论

日常生活中，人们离不开计时。适应这种需要，发明了各种计时工具。今天，各种钟表为我们显示时间；打开收音机，你可以听到整点报时；你还可以从电视屏幕上看到标准时间显示。随着无线电广播的普及，频率也成为人们熟悉的物理量。收音机上的频率刻度盘帮助你寻找你所喜欢的电台；电视机上的调谐旋钮让你对准电视节目的广播频率。由于时间频率用得这样普遍，人们往往把它看作是理所当然的事，很少停下来想想，它们是从哪里来的，怎样对它进行测量。

时间频率的应用远不限于日常生活方面。当代科学技术，如导航定位、邮电通讯、大地测量、地震预报、深空探测以及科学研究，也都离不开它，只是其精密度和准确度比人们日常生活的要求高得多罢了。例如，在用电磁波对飞行体（或目标）测距测速时，时间和频率的测量精密度愈高，位置和速度的测量准确度也愈高。由于电磁波的传播速度为光速（ c ），设时间测量误差为 δt ，定位误差简单地就可表示为： $\delta S = c\delta t$ 。令 $\delta t = 1 \times 10^{-8} \text{ s}$ （ $1 \mu\text{s}$ ），则有 $\delta S = 3 \times 10^8 \times 1 \times 10^{-8} \text{ m} = 300 \text{ m}$ 。在高速数字通讯情形，发射和接收设备每秒要送出几百万个代码，为保证通讯不出错，必须将发射和接收设备同步到微秒（ 10^{-6} s ）量级。在人们能进行测量的成千上万物理量中，时间频率测量所能达到的高分辨率和高准确度，是独一无二的。

本书将向读者介绍时间频率精确测量的实用知识。它要正确解释时间频率测量中广泛使用着的各种术语、概念和方法，详细讨论各种测量和校准技术。作者力图把本书写成“深浅咸宜”的读物，使它不仅受到从事专业工作同志的欢迎，而且对那些偶而有兴趣于时间频率测量的同志有所裨益。

1.1 时间频率的定义

我们应该停下片刻来考虑一下,当我们使用“时间”这个词时,它意味着什么。日期和几时几分几秒是最常用的,扩展开来,还有星期、月和年,以及比秒小的单位,如毫秒(ms, $10^{-3}s$)、微秒(μs , $10^{-6}s$)、纳秒(ns, $10^{-9}s$)和皮秒(ps, $10^{-12}s$)。

当我们指两个事件的时间间隔时,也用时间这个词。因此,时间这个词几乎总是需要附加术语才能澄清它的含义。例如,时刻或时间间隔,象日期之类,就是时刻的表示,时刻之差,即是时间间隔。

今天,时间建立在秒定义的基础上。秒是时间间隔的基本单位,是国际单位制中七个基本单位之一,它通过铯原子(Cs^{133})的能级跃迁来定义。在1967年第十三届国际计量大会上通过的秒定义如下:

“秒是铯133原子(Cs^{133})基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期所持续的时间。”〔1〕

频率是单位时间内周期性过程重复、循环或振动的次数,可用相应周期的倒数表示,单位为 Hz (赫兹)。

按照国际规定,常用无线电频率按表 1-1 划分频段(波段):

表1-1 无线电频段的划分

频 段	频 率 范 围	波 长 范 围
4. 甚低频(VLF)	3—30kHz	10^5 — 10^4 m
5. 低 频(LF)	30—300kHz	10^4 — 10^3 m
6. 中 频(MF)	300kHz—3MHz	10^3 — 10^2 m
7. 高 频(HF)	3—30MHz	10^2 — 10^1 m
8. 甚高频(VHF)	30—300MHz	10—1m
9. 超高频(UHF)	300MHz—3GHz	1—0.1m

请读者注意,实现频率准确测量的难易,同频段并不直接相关,音频频率的精确测量常常同高频频率的精确测量一样困难。

1.2 什么是时间频率标准?

鉴于频率和周期互为倒数,而把一个个周期积累起来可以得到时间间隔,再规定好一个起点可得到时刻,因此,时间和频率可以互相导出。在实际产生时间频率的器件中,它们总是共用一个标准源。标准源可以是任一确定的周期现象,在此基础上再加上计数和读出装置,便成为一个时间频率标准。

例如,基于地球自转的日出日落现象是一个确定的周期现象,据此,太阳在天空中的视在位置随时间而变。在一块均匀分度的圆盘中心立根铁杆,则铁杆在圆盘上的投影位置便可用来计时,由此我们有“日规”计时标准。

又如,重力摆或平衡摆轮的摆动也是一个确定的周期过程,以它为标准源,加上供给能量的弹簧和调节能量补偿的擒纵机构,减速齿轮以及表面指示,人们造出各种机械钟表。机械钟表是我们日常生活中用得很多的计时标准。

再如,电磁振荡是一个确定的周期现象,以各类电振荡器为标准源,加上一套分频、计数和读出装置,便可得到各类电子时间频率标准。以晶体振荡器为标准源的石英钟,便是其中重要的一种。

称为原子钟的原子时间频率标准,也是应用电磁振荡作标准源,不过同一般电振荡器不同,它所用的电磁振荡不是来源于一般谐振器内的振荡,而是原子在某种特定状态下(如发生超精细能级间的跃迁时)辐射的电磁波。

然而,上述这样那样的标准,性能指标的差异是很大的。例如,市场上出售的一级手表,一天的走时误差为 $10-30\text{ s}$,相对误差为 $(1-3)\times 10^{-4}$,而原子钟的准确度则可达到 $10^{-11}-10^{-13}$ 量级,相当于三千年或三十万年不差 1 s 。为了用现代科学技术所达到的最高准确度,去统一时间单位量值的计量,人们采用了上节所述的铯原子秒定义。与之相应,铯束装置成为国际上公认的时间频率精确测量的最高标准——基准。我国保持和研究这种基准装置的中国计量科学研究院,它所建立的两台铯束装置,于

1981年通过国家鉴定，作为我国的时间频率基准使用，其准确度为 8×10^{-13} 。

值得注意的是，时间标准并不象米尺或砝码那样的标准，因为时间总是在改变着。用标准尺校准普通尺子时，你可以把它们靠在一起，作任意多次的测量，从而得到较高的测量准确度。但在测量时刻时，却不能这样。当你延长测量时间时，所要测量的时刻已经成为过去了。时间间隔也是这样，并没有象米尺那样固定的单位间隔。你在这次和下次测量中所比较的时间间隔已经是不同时刻的时间间隔了。因此，时间标准具有不同于其他物理量标准的特性，这在其测量方法和误差处理中表现得尤为明显。

1.3 标准频率和标准时间是怎样传递的？

由标准源产生的标准频率和标准时间怎样提供给用户使用？
图 1-1 形象地示出了目前可用的各种方法，它分为如下二类：

1. 本地比较法。就是用户把自己要校准的装置搬到拥有标准源的地方，或者主控室通过电缆把标准信号送到需要的地方，然后通过中间测试设备进行比对。使用这种方法时，由于环境条件可控制得很好，外界干扰可减至最小，标准的性能得以最充分利用。缺点是作用距离有限，远距离用户要将自己的装置搬来搬去，由此产生许多问题和麻烦。

2. 发送-接收标准电磁波。这里所谓标准电磁波，是指其频率受标准源控制的电磁波，或含有标准时间频率信息的电磁波。拥有标准源的地方通过发射设备将上述标准电磁波发送出去，用户用相应的接收设备便可得到标准频率和时间信号，并与自己的装置进行比对测量。现在，无线电的各频段（从甚长波到微波）都有标准电磁波广播。如甚长波中有美国海军导航台的 NWC 信号（22.3 kHz），英国的 GBR 信号（16 kHz）；长波中有美国的罗兰 C 信号（100 kHz），我国的 BPL 信号（100 kHz）；短波中有日本的 JJY 信号，我国的 BPM 信号（5, 10, 15 MHz）；微波中有电视网络等等。

用标准电磁波传送标准时间和频率，是时间频率量值传递与

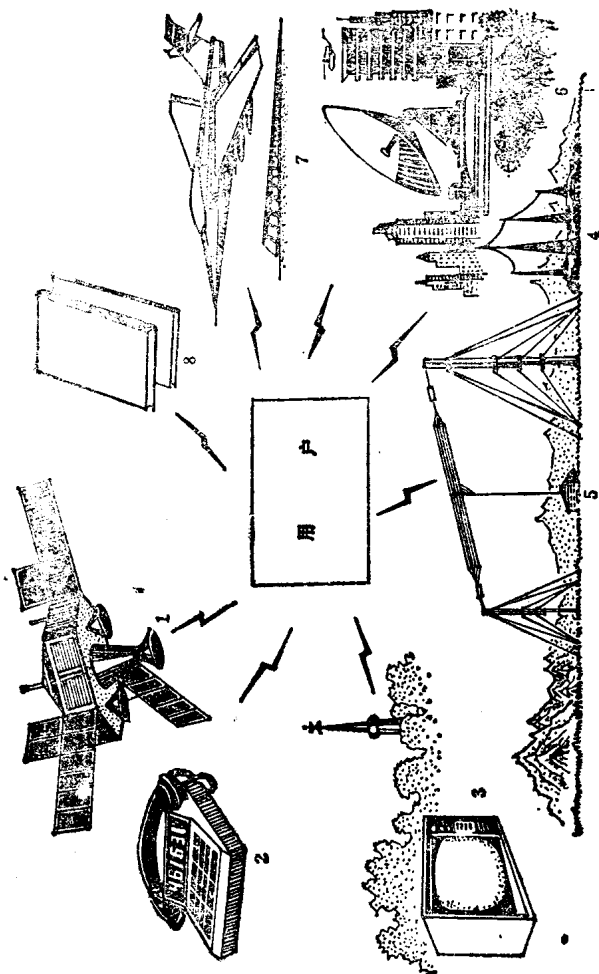


图 1-1 标准时间频率的传递

1. 卫星; 2. 电话; 3. 电视; 4. 短波; 5. 长波;
6. 微波; 7. 搬运; 8. 学习班或数据交换

其他物理量传递方法显著不同的地方。它极大地扩大了时间频率精确测量的范围，例如，通过罗兰 C，已可以在北美、欧洲和亚洲部分地区，实现准确到 10^{-11} — 10^{-12} （频率）和微秒量级（时刻）的时间频率测量。由于对标准电磁波的利用主要取决于用户，只要用户愿意那样做，买得起相应的接收设备，它就可以得到标准时间频率信号。这样，适用于其他基本量值的分级传递方法，对时间频率校准就不那么必要了。因为人们可以通过标准电磁波，利用世界上性能指标最高的标准进行时间频率的精确测量。通过这样的校准，往往可以得到同国家标准相当的准确度。

使用标准电磁波传递方法，为用户提供了极大的方便，大大提高了远距离时间频率的精确测量水平，也进一步促进了时频测量方面的国际合作。

1.4 测量与校准

以普通的钟表为例。人们可以用手拨动表针调整时刻，也可以通过调整摆轮改变或调节它的走时速率。但这样做是校准吗？这要看上述调整用的是什么参考标准。

如果所用参考标准，其准确度可以溯源到定义的基准（频率——铯原子秒，见 1.1 节；时标——协调世界时 UTC，见第二章），那么可以说做了一次校准，否则只能说是一次测量。这里，十分重要的是，每次校准相当于一次准确度测量。

让我们解释一下可溯源性概念。假设用收音机的报时信号调整钟表。跟踪这个信号去追溯它的源，首先可以找到中央人民广播电台，无线电广播正是从它那里发送出去的。进而发现，报时信号是由北京天文台的守时钟提供的，而北京天文台的守时钟保持着国际上定义的时标——世界协调时 UTC，并能说出它的准确度。考虑到所有这些因素，用来调整钟表的报时信号，也就以一定的准确度（尽管它可能很低），溯源到它的定义基准上去了。因而，所做的调整是一次校准，而不只是一次测量。

当你做一次时间频率校准时，可以得到多高的准确度呢？这取决于所选择的校准技术及其测量误差。一般情况下，频率校准

的准确度由几乘 10^{-6} （用高频广播信号）到 10^{-12} 量级（用罗兰C信号或直接比对），时刻校准的准确度由毫秒（高频广播信号）到微秒（罗兰C信号或搬运钟）。想要得到的准确度愈高，需要付出的努力就愈大。

1.5 同 步

在时间频率的精确测量中，人们常常使用“同步”这一术语。所谓同步，指的是信号在时间上或相位上保持某种严格的特定关系。体育竞赛中的赛跑，就是一个最能说明同步特征的通俗例子：参加比赛的运动员都以指令员的指令作为起跑时刻。这里，要紧的不是指令时刻准不准，而是比赛者的动作（起跑）时刻要统一到同一指令上。就是说，时间频率同步只要求被同步的信号在时间上或相位上与同步信号保持某种严格的特定关系（上例中是同时性），而对于用来同步的时频信号的准确度不提什么要求，该准确度或高或低，对实现同步都没有妨碍。

不过，如果把时间同步到准确的时标上，把频率同步到标准频率上，它将具有更强的适应性，并给人们带来更多的方便。好比一个火车司机，如果他的钟表只同某站的时钟同步，而某站的时钟并不同步到准确的时标上，那么，当列车进入别的车站时，司机要再用他的钟表去执行列车运行时刻表就困难了。因此，现在鼓励人们用标准时间频率进行同步。

1.6 时 间 编 码

甲地要用乙地数字钟产生的时刻信号时，常常应用时间编码的方法，通过电缆线，电话线或无线电将之从乙地传送到甲地。

把文字转化为一串数字，叫做编码。现在的时间编码，一般采用二进制编码，其中，一组脉冲代表一个数字，送出数字后，再用一特殊的编码示出它的含义，即它是小时呢，分钟呢，还是秒。随应用的不同，可用改变信号直流电平的方法或对载波进行脉冲调制的方法，送出编码。也可应用频率不同的声调，其中，一种频率的声调代表二进制的“1”，而用另一种声调代表二进制的“0”。