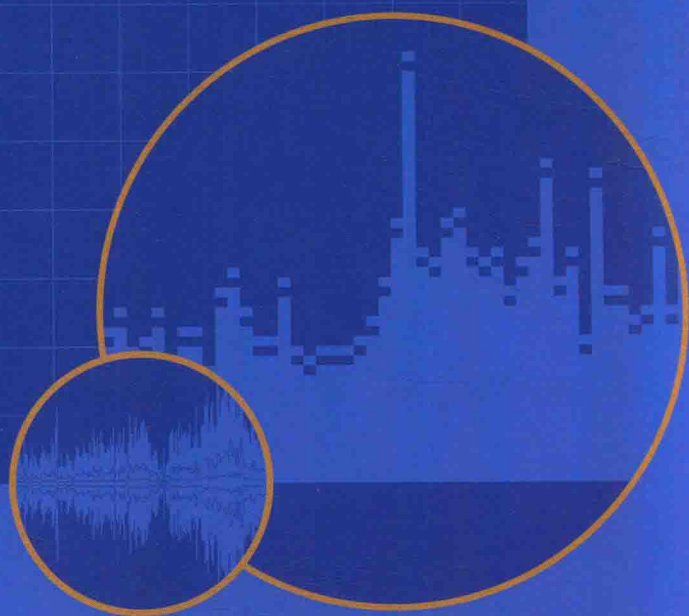


# 时频测量

## 技术及应用

梁文海 秦 爽 著



科学出版社

# 时频测量技术及应用

梁文海 秦 爽 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书内容包括时频测量基本概念、时频测量标准、频率与周期测量方法、时间间隔测量方法、相位差测量方法、基于时频测量技术的电压测量方法、基于倍频技术的失真度测量方法、测距与测向方法以及测距测向技术在室内定位中的应用。本书在对基本时频测量理论与方法研究分析的基础上,注重测量方法的实现与具体应用,先后给出了基于单片机的直接频率测量、等精度频率测量、基于FPGA的DDS信号源、基于单片集成DDS芯片信号源、基于单片机的双积分型数字电压测量以及基于数字倍频技术失真度测量6个实现与应用案例,并对测量结果进行了详细讨论与分析。

本书可作为高等院校测试计量技术及仪器、电子科学与技术、信息与通信工程的本科生、研究生参考资料,也适合从事时频技术研究、时频技术应用的学者和工程师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

时频测量技术及应用 / 梁文海, 秦爽著. — 北京: 科学出版社, 2018.1  
ISBN 978-7-03-052814-8

I. ①时… II. ①梁… ②秦… III. ①时频调制 IV. ①TN761.93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 107606 号

责任编辑: 张 展 李小锐 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年1月第一版 开本: B5 (720×1000)

2018年1月第一次印刷 印张: 12

字数: 235千字

定价: 79.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

时间是最基本的物理量之一，时间和频率是描述周期性运动现象的两个不同侧面，它们是密切相关的物理量，在数学上互为倒数，并且共用一个基准，只是在实际应用中根据不同的应用情况采用时间或频率来表示，常将它们合称为时频。在所有物理量中，时间与频率标准及其计量具有最高准确度和稳定度，时频计量的一个明显的发展趋势表现在尽可能地把不同的量值转换成频率或时间量进行测量。传统时频计量主要是以标准建立、测量比对以及量值传递为主，随着电子技术、通信技术、微电子技术、计算机技术等领域的快速发展，时频计量所涵盖的内容越来越广泛，所要求的精度越来越高，所应用的范围越来越广，与各学科和领域的联系越来越紧密。时频计量不但在计量技术中具有极其重要的作用，而且在电子信息、通信工程、导航与定位、仪器仪表及航空航天等领域中也具有举足轻重的作用。

本书在系统阐述基本时频测量理论、测量方法研究与分析的基础上，注重测量方法的实现与具体应用，在时频测量技术研究分析的基础上对基于时频技术的电压测量、数字式失真度测量以及测距与测向等应用进行深入的研究、分析，体现了时频技术在仪器仪表、信号处理以及导航定位等几个方面的应用与实践。

本书内容包括时频测量基本概念、时频测量标准、频率与周期测量方法、时间间隔测量方法、相位差测量方法、基于时频测量技术的电压测量方法、基于倍频技术的失真度测量方法、测距与测向方法以及测距测向技术在室内定位中的应用。本书注重理论与实践结合，注重新技术、新成果应用以及传统技术在新领域中的应用。给出了直接频率测量、等精度频率测量、基于FPGA的DDS信号源以及单片集成DDS芯片信号源4个时频测量与频率合成源实现方案与测试分析，同时给出了基于时频技术的双积分型数字电压测量以及基于数字倍频技术失真度测试2个应用案例，并对测量结果进行了详细讨论与分析。本书的研究成果经过了详细的理论推导、算法设计、仿真分析以及测量方案实现等多方面的验证，本书提供了具体测量方案和应用案例所有的技术资料，大部分研究成果、算法分析以及测试分析都配有MATLAB程序代码。

本书第1~8章由梁文海编写，第9~10章由秦爽编写，部分研究成果得到了四川省教育厅重点项目(13274055)和科技成果转化重大培育项目(15CZ0004)资

助，同时本书也得到了无线传感器网络四川省高校重点实验室成员的大力支持和帮助，实验室提供了良好的测试条件和测试仪器，实验室成员周文杰、高政进行了部分测试结果仿真，研究生孔琪做了部分勘误工作，在此一并表示真诚感谢。

限于作者水平，不妥之处在所难免，恳请各位专家、读者批评指正。

梁文海 秦爽

2018年1月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 时频测量概述 .....         | 1  |
| 1.1 时间频率量基本概念 .....        | 2  |
| 1.2 时间频率标准 .....           | 3  |
| 1.3 频率测量误差 .....           | 5  |
| 1.4 标准频率源性能指标 .....        | 7  |
| 第 2 章 频率测量方法 .....         | 10 |
| 2.1 直接频率测量 .....           | 10 |
| 2.1.1 直接频率测量原理 .....       | 10 |
| 2.1.2 直接频率测量误差分析 .....     | 11 |
| 2.1.3 基于单片机的直接频率测量 .....   | 13 |
| 2.2 等精度频率测量 .....          | 16 |
| 2.2.1 等精度频率测量原理 .....      | 16 |
| 2.2.2 等精度频率测量误差分析 .....    | 17 |
| 2.2.3 基于单片机的等精度频率测量 .....  | 19 |
| 2.3 全同步频率测量 .....          | 28 |
| 2.3.1 周期性信号之间相位差变化特性 ..... | 28 |
| 2.3.2 脉冲同步检测原理 .....       | 29 |
| 2.3.3 全同步频率测量原理 .....      | 30 |
| 2.3.4 全同步频率测量误差分析 .....    | 30 |
| 第 3 章 周期测量方法 .....         | 32 |
| 3.1 周期测量原理 .....           | 32 |
| 3.2 周期测量误差 .....           | 33 |
| 3.3 中界频率 .....             | 34 |
| 3.4 周期测量实现方案 .....         | 36 |
| 第 4 章 时间间隔测量方法 .....       | 38 |
| 4.1 电子计数法 .....            | 38 |
| 4.2 游标法 .....              | 40 |
| 4.3 模拟内插法 .....            | 41 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 4.4 时间幅度变换法 .....                | 43  |
| 4.5 延迟法 .....                    | 43  |
| <b>第5章 相位差测量方法</b> .....         | 45  |
| 5.1 信号相位差 .....                  | 45  |
| 5.2 相位差常用测量方法 .....              | 46  |
| 5.2.1 基于过零检测的相位测量方法 .....        | 46  |
| 5.2.2 相关法测量相位 .....              | 52  |
| 5.2.3 基于FFT相位测量 .....            | 59  |
| 5.2.4 全相位FFT相位测量方法 .....         | 65  |
| <b>第6章 合成频率源技术</b> .....         | 70  |
| 6.1 直接模拟式频率合成 .....              | 70  |
| 6.2 直接数字频率合成 .....               | 71  |
| 6.2.1 直接数字频率合成原理 .....           | 72  |
| 6.2.2 基于FPGA的DDS信号源 .....        | 74  |
| 6.2.3 基于单片集成DDS芯片信号源 .....       | 93  |
| 6.2.4 基于单片集成DDS芯片的任意倍频器 .....    | 104 |
| 6.3 锁相式频率合成 .....                | 106 |
| 6.3.1 锁相环结构与工作原理 .....           | 106 |
| 6.3.2 锁相环基本形式 .....              | 108 |
| 6.3.3 DDS与PLL组合合成信号源 .....       | 111 |
| <b>第7章 基于时频测量技术的电压测量方法</b> ..... | 112 |
| 7.1 概述 .....                     | 112 |
| 7.1.1 电压测量基本要求 .....             | 112 |
| 7.1.2 交流电压量值基本表示方法 .....         | 113 |
| 7.1.3 交流/直流电压转换 .....            | 116 |
| 7.2 电压时间转换 .....                 | 118 |
| 7.2.1 电压时间转换原理 .....             | 118 |
| 7.2.2 测量误差分析 .....               | 120 |
| 7.2.3 基于单片机的双积分型数字电压测量 .....     | 121 |
| 7.3 电压频率转换 .....                 | 129 |
| 7.3.1 电压频率转换基本工作原理 .....         | 130 |
| 7.3.2 电压频率转换电路 .....             | 130 |
| 7.3.3 电压频率转换应用 .....             | 133 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第 8 章 基于倍频技术的失真度测量方法</b>        | 135 |
| 8.1 失真度基本概念                        | 135 |
| 8.2 失真度基本测量方法                      | 137 |
| 8.2.1 基波抑制法                        | 137 |
| 8.2.2 频谱分析法                        | 137 |
| 8.3 基于数字倍频技术失真度测试                  | 141 |
| 8.3.1 系统设计方案                       | 141 |
| 8.3.2 系统硬件电路设计                     | 142 |
| 8.3.3 FPGA 系统中功能模块设计               | 146 |
| 8.3.4 CPLD 系统中功能模块设计               | 149 |
| 8.3.5 系统软件设计                       | 154 |
| 8.3.6 系统误差分析                       | 159 |
| <b>第 9 章 IEEE 802.11 协议测距与测向方法</b> | 162 |
| 9.1 回声测距方法                         | 162 |
| 9.2 基于 OFDM 的子带联合测距方法              | 165 |
| 9.3 基于 ToA 的超分辨率测距方法               | 169 |
| 9.4 基于 DoA 的测向方法                   | 171 |
| <b>第 10 章 测距测向技术在室内定位中的应用</b>      | 174 |
| 10.1 无线信号在室内环境传播的特点                | 174 |
| 10.1.1 信号传播延迟                      | 174 |
| 10.1.2 信号多径传播                      | 175 |
| 10.1.3 信号传播高带宽                     | 175 |
| 10.1.4 信号幅度衰减大                     | 176 |
| 10.2 基于 RSSI 的室内定位技术               | 176 |
| 10.2.1 基于 RSSI 的高斯加权校正算法           | 177 |
| 10.2.2 基于 RSSI 的质心定位算法             | 177 |
| 10.2.3 基于 RSSI 的多维缩放算法             | 177 |
| 10.3 单基站室内定位技术                     | 178 |
| 10.4 超天线室内测向定位技术                   | 180 |

# 第 1 章 时频测量概述

时间是最基本的物理量之一。在所有的物理量中,时间与频率标准及其计量具有最高的准确度和稳定度。时间和频率是两个密切相关的物理量,它们是用来描述周期性运动现象的两个不同侧面,在数学上互为倒数关系,所以时间和频率共用一个基准,只是在具体应用中根据情况再分别采用时间或频率来表示,常将其合称为时频<sup>[1]</sup>。时频计量的一个明显发展趋势也表现在尽可能地把不同的量值转换成为频率或者时间量进行测量<sup>[2]</sup>。

传统时频计量主要是以标准建立、测量比对以及量值传递为主,但随着电子技术、通信技术、微电子技术、计算机技术等领域的快速发展以及各领域基础研究的深入,时频计量所涵盖的内容越来越丰富,所要求的精度越来越高,所应用的范围越来越广,且与各学科及领域的联系越来越紧密。时频计量不但在计量技术中具有极其重要的作用,而且在电子信息、通信工程、导航与定位、仪器仪表以及航空航天等几乎所有高科技领域都具有举足轻重的作用。如美国科学家利用精密时间间隔测量技术来检测多颗低轨道小型地球卫星之间的空间距离;又如在导弹、航天测量中,由于导弹、航天试验的特殊性,其测量系统分布的地域广,甚至有天基测量系统,所以为使其中各种测量设备协调一致地工作,就必须实现全系统时间和频率的统一。目前,时频测控领域除了传统的标准建立、高精度时间比对与传递外,还涉及频率源、频率的合成与变换、时频信号的处理、授时技术及应用、GPS 及相关技术应用、传感器及其材料等。十多年来,已有多项与时频计量、测控技术相关的成果获得了诺贝尔物理学奖,1989 年 Dehmelt 等的离子阱和 Ramsey 的分离场技术、1993 年 Taylor 等的脉冲星稳定周期、1997 年朱棣文等的激光冷却和捕陷原子以及 2001 年康奈尔等的玻色-爱因斯坦凝聚<sup>[3]</sup>,均充分反映了时频计量及测控在科技领域的重要性,同时时间与频率标准及其计量精度提高与物理学等多学科技术发展密切相关。一方面,时频计量与测控所涉及的基/标准和频率源、测量比对技术、信号的传递、相关的材料等知识在科学技术领域起着至关重要的作用;另一方面,现代科学技术的许多重大成就,如量子技术、计算机技术、各种先进的信号处理技术以及材料科学和电子技术方面的知识积累都在时间频率计量技术的不断进步中发挥了作用<sup>[4]</sup>。

## 1.1 时间频率量基本概念

时间很早就被人们所认识,通常所说的时间有两种含义:一种是指事件发生的瞬间,即时刻,如某脉冲信号在  $t_1$  时刻出现上升沿,在  $t_2$  时刻出现下降沿,时刻往往与年月日时分秒相关联;另一种是指两个时刻之间的间隔,通常表示事件持续的时间,如上述脉冲信号出现上升沿和下降沿的时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

时间虽然是人们非常熟悉的概念,但要给时间作一个非常确切的定义却是非常困难的事,至今还没有一个被人们普遍接受的定义。美国哥伦比亚大学名誉教授比拉在为《时间》一书作的序中写道:“时间是什么?似乎小孩都知道,但是即使水平最高的理论物理学家也很难为它下一个令人满意的定义,然而时间是一切科学的基础,因为科学家们所能研究的仅仅是随着时间的流逝改变的是什么。”<sup>[5]</sup>正因为时间与人们生活密切相关,人们对时间的认识与计量在不断地变化、发展和提高。我国古代发明了日晷,日晷是利用太阳的位置来计量时间,但日晷依赖天气,在阴雨天气或者晚上就不能实现时刻的测量。后来有了漏壶,漏壶也叫漏刻,这是古代利用滴水量来计量时间的仪器,在古代埃及、巴比伦等文明古国也都发明了漏壶计时仪器,但日晷、漏壶计时的误差较大。公元 1088 年,北宋天文学家苏颂等人发明了水运仪象台,这是中国古代集观测天象浑仪、演示天象浑象、计量时间漏刻和报告时刻机械装置于一体的综合性观测仪器,其每天的计时误差为 100 s;1675 年,荷兰科学家惠更斯利用伽利略发现的单摆周期十分稳定的原理制成了世界上第一台摆钟,其每天的误差为 10 s 左右;1795 年,英国哈利森制成精密航海钟,其每天的误差为 0.1 s 左右;1920 年,英国肖特制作的双摆天文钟达到了机械钟精度的顶峰,每天误差为 1 ms 左右;1927 年,美国科学家马里森利用石英晶体的压电效应发明了电子式石英钟,其精度达到每天误差小于 0.1 ms<sup>[6]</sup>。人们在不断提高石英晶体稳定性的同时,也在不断寻找周期更为稳定的天体运动,目前世界上最准确的计时工具就是原子钟,它是 20 世纪 50 年代出现的,原子钟的发明进一步提高了人们对时间的认识,也迎来了时间标准的一系列变革。

频率与时间密切相关,是用来描述周期性运动事物变化快慢的物理量,通常用  $f$  表示,可将其定义为:单位时间内事物周期性变化的次数,是描述周期运动频繁程度的物理量,即

$$f = \frac{N}{T_s} \quad (1-1)$$

式中,  $T_s$  表示时间;  $N$  表示时间  $T_s$  内事物周期性运动变化的次数。频率的基本单位是赫兹(Hz)。

周期和频率密切相关,是指周期性运动的事物重复出现的最小时间间隔,通

常用  $T$  表示, 是用来描述事件重复出现时间长短的物理量。周期与频率互为倒数关系, 即

$$T = \frac{1}{f} \quad (1-2)$$

周期的基本单位是秒(s)。

周期性现象, 在数学上可以使用周期函数来表示, 即

$$f(t) = f(t + nT) \quad (1-3)$$

式中,  $n$  为正整数;  $T$  为事物运动变化的周期。

## 1.2 时间频率标准

由周期与频率的关系可知, 标准时间和标准频率共用一个基准, 即有了时间标准也就有了频率标准。一般情况下, 不用区分时间标准和频率标准, 可统一称之为时频标准(time and frequency standard)。目前时间标准有世界时(universal time, UT)、历书时(ephemeris time, ET)、原子时(atomic time, AT)和协调世界时(coordinated universal time, CUT)。

### 1. 世界时(UT)

世界时 UT 是以地球自转物理现象为基础的时间计量系统, 太阳等天体东升西落的现象是地球自转造成的, 地球自转自然成为最早用作计量时间的标准。天文学界以英国伦敦格林尼治天文台所在地观测到的, 由平子夜作为 0 时开始的平太阳时称为世界时, 记为 UT, 又叫格林尼治平时(GMT)。地球的周期性自转运动过去被认为是一种均匀的时间系统, 但随着科学技术的发展, 人们发现地球的自转速度并不均匀, 其均匀性只能达到大约  $10^{-8}$  量级<sup>[7]</sup>。由于地极移动和地球自转的不均匀性, 最初得到的世界时是不均匀的, 人们将这种未经过修正的世界时记为 UT0。

天文学家在世界不同地方观测到的世界时并不相等, 这主要是地轴存在摆动而引起的, 为此在 UT0 的基础上加入极移修正  $\Delta\lambda$ , 从而修正地轴摆动的影响, 将得到的修正结果记为 UT1, 即<sup>[6]</sup>

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda \quad (1-4)$$

$$\Delta\lambda = (x \sin\lambda - y \cos\lambda) \tan\varphi \quad (1-5)$$

式中,  $(x, y)$  为地极坐标;  $\lambda, \varphi$  分别为观测者所在的经度与纬度。

在极移修正后, 天文学家又发现由于地球自转的季节性变化, 导致 UT1 具有周期变化的特点。为此再进一步对地球自转速率季节性变化进行修正后, 得到一种更加均匀的时标, 称之为 UT2, 即

$$UT2 = UT0 + \Delta\lambda + \Delta T_s \quad (1-6)$$

式中,  $\Delta T_s$  为地球自转速率季节性变化的修正参数。

## 2. 历书时(ET)

虽然世界时经过极移修正和地球自转速率季节性变化修正得到了更加均匀的时标 UT2, 但仍然存在地球自转速率不规则变化等因素的影响, 因此这还不是很理想的时间计量系统, 不能满足科学技术发展对时间精确性的要求。1958 年国际天文学联合会决议, 自 1960 年开始, 基本的时间计量系统用历书时代替世界时。历书时是以地球绕太阳运转一周(一回归年)所需时间的 365.24219879 分之一定义为一历书时日, 而将一历书时日的  $1/86400$  定义为一历书时秒<sup>[8]</sup>。历书时的实际精度可达到  $10^{-9}$  量级, 其稳定性优于世界时, 但历书时的精确测量需要大量的时间, 其实时性不及世界时, 所以难以在航空航天以及频率计量等实时性要求较高的系统中应用。

## 3. 原子时(AT)

通过前面的分析可知, 世界时的准确度为  $10^{-8}$  量级, 历书时的准确度为  $10^{-9}$  量级, 但世界时和历书时均不能满足现代科学技术发展与应用对时间频率准确度的要求。1967 年的第 13 届国际度量衡会议通过决议, 利用原子内部电子运动的周期作为标准时间秒, 即以铯-133 原子基态两个超精细能级间跃迁辐射 9,192,631,770 周所持续的时间为一秒。该计量系统是一种均匀的时间计量, 所以自 1967 年起, 原子时取代历书时作为基本时间计量系统。原子时由 1958 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒起, 其秒、分、时、日、月、年的换算关系与世界时相同。国际计量局通过对各国各实验室原子钟比对数据进行加权平均等综合处理, 建立了国际原子时。目前全世界有 30 多个国家和地区的 50 个实验室约 200 多台原子钟参加了国际原子时的国际合作, 国际原子时的准确度和稳定度都进入了  $10^{-15}$  量级, 是所有标准中最高的<sup>[6]</sup>。中国计量科学院、上海天文台和陕西天文台都建立了地方原子时, 并参加了国际原子时的原子钟联网加权平均修正, 作为我国时间标准。

## 4. 协调世界时(UTC)

为避免原子时与天文时因秒长定义不一致而可能产生的“昼夜颠倒”不协调现象, 原子时通过闰秒(快或慢 1 s)以产生接近 UT1 的特殊原子时标, 这就是协调世界时<sup>[9]</sup>。协调世界时基于国际原子时, 为抵消地球自转变慢的影响, 通过不规则加上正或负闰秒。UTC 必要时会插入闰秒, 以保证协调世界时 UTC 与世界时 UT1 相差不超过 0.9 秒, 即

$$|\text{UTC} - \text{UT1}| < 0.9 \text{ s} \quad (1-7)$$

所以协调世界时是对原子时和世界时折中后得到的时间标准, 即用闰秒的方法来

对天文时进行修正。现在各国标准时间、标准频率发播台所发送的时间标准就是世界协调时,其准确度优于 $\pm 2 \times 10^{-11}$ 。这套时间系统被广泛应用于各领域,如互联网中时间同步标准互联网协议 NTP(network time protocol)采用的时间标准就是协调世界时 UTC。

## 1.3 频率测量误差

在时间频率测量中,由于存在系统误差、随机误差等因素,测量值与实际值始终存在一定的偏差,即测量误差,时间频率测量误差也可以用绝对误差和相对误差表示。

### 1. 绝对误差

频率测量的绝对误差  $\Delta f$  等于被测周期信号频率示值  $f_x$  与其真值  $f_0$  之差,即

$$\Delta f = f_x - f_0 \quad (1-8)$$

由式(1-8)可知,频率测量绝对误差的单位与测量值的单位相同,而且绝对误差是可正、可负的数值,其大小和正负分别表示测量值偏离被测量真值的程度和方向。当绝对误差为正值时,测量值偏大;反之,则测量值偏小。

由于被测周期信号频率的真值是一个客观存在的确定数值,在一定时间和环境下的真实量值是一个理想值,一般情况下难以确定,只能通过测量或测量处理后得到接近真值的值。通常可以采用高一级标准测量仪器的测量值或用多次测量求得的平均值  $f$  代替真值  $f_0$ ,故绝对误差可表示为

$$\Delta f = f_x - f \quad (1-9)$$

与绝对误差的大小相等但符号相反的值称为修正值,用  $C_f$  表示,即

$$C_f = -\Delta f = f - f_x \quad (1-10)$$

修正值是通过检定,由上一级标准以表格、曲线、公式或数字等形式提供。在实际测量中,利用修正值可算出被测量的实际值  $f$ ,即

$$f = f_x + C_f \quad (1-11)$$

### 2. 相对误差

现测量甲乙两正弦信号频率值,实际测得甲信号的频率  $f_1$  为 100 Hz,测量绝对误差  $\Delta f_1$  为 1 Hz;测得乙信号频率  $f_2$  为  $10^6$  Hz,测量绝对误差  $\Delta f_2$  也为 1 Hz,两次测量的绝对误差相等。所以绝对误差可以表示测量值偏离被测量实际值的程度,但不能反映测量的准确度。在实验或工程中常采用相对误差来反映测量结果的精确程度,相对误差通常用百分数表示,即用频率测量的绝对误差  $\Delta f$  与其测量值  $f_x$  的百分比值来表示相对误差( $\gamma_f$ ):

$$\gamma_f = \frac{\Delta f}{f_x} \times 100\% \quad (1-12)$$

由式(1-12)可计算出周期信号甲测量的相对误差  $\gamma_1$  为 1%，周期信号乙测量的相对误差  $\gamma_2$  为 0.0001%。可以看出，甲、乙两正弦信号频率测量的绝对误差相等，但相对误差不等，乙信号的相对误差远远小于甲信号的相对误差，即对乙信号的测量准确度远高于甲信号。

### 3. 频率测量误差传递公式

若使用频率测量系统对某周期性信号进行频率测量，其测量值  $f_x$  与两个变量  $x_1$ 、 $x_2$  有关，且可表示为

$$f_x = f(x_1, x_2) \quad (1-13)$$

设  $f_x$  在  $(x_{10}, x_{20})$  点具有任意阶导数，则  $f_x$  展开的泰勒级数为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} f_x &= f(x_1, x_2) \\ &= f(x_{10}, x_{20}) + \left[ \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1 - x_{10}) + \frac{\partial f}{\partial x_2}(x_2 - x_{20}) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}(x_1 - x_{10})^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}(x_1 - x_{10})(x_2 - x_{20}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2}(x_2 - x_{20})^2 \right] + \dots \end{aligned} \quad (1-14)$$

设  $x_1$ 、 $x_2$  的分项误差分别为  $\Delta x_1 = x_1 - x_{10}$ 、 $\Delta x_2 = x_2 - x_{20}$ ，则

$$\begin{aligned} f_x &= f(x_1, x_2) \\ &= f(x_{10}, x_{20}) + \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right) \\ &\quad + \frac{1}{2!} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} \Delta x_1^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \Delta x_1 \Delta x_2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} \Delta x_2^2 \right) + \dots \end{aligned} \quad (1-15)$$

若  $\Delta x_1 \ll x_1$ 、 $\Delta x_2 \ll x_2$ ，式(1-15)中的高阶小量可忽略，则频率测量误差公式可变为

$$\begin{aligned} \Delta f_x &= f_x - f_0 = f(x_1, x_2) - f(x_{10}, x_{20}) \\ &= \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \end{aligned} \quad (1-16)$$

进一步推导，当  $f_x$  由  $n$  个分项  $x_1, x_2, \dots, x_n$  合成时，可得

$$\Delta f_x = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial^n f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (1-17)$$

式(1-17)即为频率测量误差传递公式，可用于各种频率、周期、时间间隔以及相位差测量等测量误差分析。

## 1.4 标准频率源性能指标

标准频率源(frequency standard source)用作时间统一系统的守时设备,其指标直接影响雷达、导航、通信、空间电子设备及仪器、仪表等装置的性能。标准频率源也是时频测量中非常重要的组成部分,其性能指标直接影响时频测量的准确度和测量系统的稳定性。因此,标准频率源不仅要求其频率是高度准确的,而且要求其频率能保持高度稳定。表征频率标准源性能的主要指标有频率准确度、频率稳定度和频率漂移率。

### 1. 频率准确度

频率准确度( $\gamma_s$ )是指标准频率源实际频率值  $f_x$  与其标称值  $f_s$  之间的相对偏差,即

$$\gamma_s = \frac{f_x - f_s}{f_s} \times 100\% \quad (1-18)$$

### 2. 频率稳定度

频率稳定度是指标准频率源频率准确度在一定时间间隔内受随机噪声影响而产生的随机变化特性,主要表征其维持恒定频率输出的能力。由于采样时间间隔不同,频率稳定度值往往存在差异。通常将秒或毫秒内频率稳定度称为瞬间频率稳定度,将日或小时内的频率稳定度称为短期频率稳定度,将年或月的频率稳定度称为长期稳定度。

### 3. 频率漂移率

频率漂移率是指频率标准源的频率受元器件老化等因素影响后,其输出频率随时间线性增加或减小的现象,通常有日漂移率、月漂移率和年漂移率。如某标准频率源的标称值为  $f_s$ , 相隔 24 h 输出的两个频率值分别为  $f_1$ 、 $f_2$ , 则其日漂移率  $k_s$  可表示为

$$k_s = \frac{f_2 - f_1}{f_s} \times 100\% \quad (1-19)$$

标准频率的准确度与稳定度随着科学技术的发展得到不断提升,先后采用 LC 振荡器、石英晶体振荡器以及原子频标,它们的准确度与稳定度如下:

(1) LC 振荡电路准确度与稳定度为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  量级。

(2) 石英晶体振荡器准确度与稳定度为  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  量级。

(3) 原子频标,如铯原子频标、铷原子频标以及氢原子频标等,其准确度与稳定度为  $10^{-10} \sim 10^{-14}$  量级。其中商用铯原子频率标准准确度可达  $10^{-11} \sim 10^{-12}$  量级。

级, 实验室铯原子频率标准准确度可达  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  量级。

美国 FEI 公司生产的铷原子振荡器 FE-5650A 准确度为  $5 \times 10^{-11}$  量级, 频率稳定度  $\leq 1.4 \times 10^{-12}/100$  s。国内一般铷原子频率标准源频率准确度也可达到  $5 \times 10^{-11}$  量级, 频率稳定度  $\leq 3 \times 10^{-12}/100$  s。如果采用 GPS 驯服铷原子频率标准, 使铷振荡器输出频率与 GPS 卫星铯原子钟信号同步, 可进一步提高频率信号长期稳定性和准确度, 能够提供铯钟量级的高精度时间频率标准, 如西安同步电子科技有限公司的 SYN3204 型频率标准源。随着频率合成技术的发展, 目前合成频率源得到迅速发展, 合成频率源具有如下特点<sup>[11]</sup>:

- (1) 输出频率为步进式而不是连续的, 目前最小频率步进能做到  $\mu\text{Hz}$ 。
- (2) 输出频率稳定度高, 尤其短稳, 可达  $10^{-12}$  量级。
- (3) 自动化、智能化水平高, 使用灵活方便。

中国计量院(NIM)开发并维护着中国国家频率基准。2003 年年底, 中国计量院完成了第一台铯冷原子喷泉频率标准, 最终评估得到的整体频率不确定度为  $8.5 \times 10^{-15}$ , 其主要误差为因磁场不均匀而产生的 Majorana 效应和原子的碰撞效应所引起的误差<sup>[12]</sup>。

随着信息技术的发展与应用, 高精度时间频率已经成为各领域非常重要的参量, 其应用范围涉及基础研究领域、工程技术领域。以时间频率测量为技术基础的无线电测距与测向、定位导航、激光测距以及激光成像等技术业务的迅速发展, 使精确定位导航、精准武器制导等技术成为现代化战争的重要方面。此外, 高精度时间频率测量技术在现代通信(包括移动通信)、计算机网络、广播电视、电力自动化、交通运输、自动控制、地震监测、航空航天、深空跟踪、科学探测以及人们生产、生活的方方面面, 都有广泛的应用需求。因此, 不断发展和提高时间频率测量技术和设备, 并将其推广应用, 是提高综合国力的重要战略措施<sup>[13]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] 王海. 精密时频测量和控制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [2] 梁文海, 麦文, 张健, 等. 一种高精度频率测量的研究与实现[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2008, 31(3): 376-378.
- [3] Zhou W, Wang H, Zhou H, et al. The technique development of crystals and oscillators in China and their market situation[J]. IEEE Transactions on UFFC, 2006, 53(1): 30.
- [4] 周渭. 测试与计量技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [5] 赵建强. 分布式系统高精度时间同步技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [6] 童宝润. 时间统一系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [7] 胡友健. 全球定位系统(GPS)原理与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003.
- [8] 胡永辉, 张道农, 李延, 等. 现代授时技术[M]//成都: 2013 年中国电机工程学会年会论文集, 2013.
- [9] 郑辛, 杨林. 导航、定位与授时技术综述[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(1): 1-6.
- [10] 蒋焕文, 孙续. 电子测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1994.

- [11] 高树廷, 刘洪升. 频率源综述[J]. 火控雷达技术, 2004, 33: 43-46.
- [12] 王义道. 频率标准在中国的发展[J]. 宇航计测技术, 2007(S1): 1-5.
- [13] 陈洪卿. 时间频率测量技术的发展与应用[M]. 21 世纪中国电子仪器发展战略研讨会, 2004: 17-22.