

计量测试技术手册

第11卷 时间频率

(计量测试技术手册)编辑委员会



中国计量出版社

200620

TB9-62
X820

计量测试技术手册

第11卷 时间频率

《计量测试技术手册》编辑委员会

中国计量出版社

(京) 新登字 024 号

内 容 提 要

《计量测试技术手册》包括计量测试技术基础、几何量、温度、力学、电磁学、电子学、声学、光学、时间频率、电离辐射、化学等量的计量测试技术, 全套共 13 卷。

本卷包含了时间频率测量领域的各种计量测试原理、方法、使用设备和现代测试技术。测量范围从常用频率区间延伸到微波和光频。《手册》突出全面性、实用性和权威性。

本书是从事时间频率计量测试的工程技术人员和研究人员颇有价值的案头工具书, 亦可作为研修时间频率的产生、传播和测量的指南。

Abstract

《Handbook of Measurement Technology》consists of the basic principle of measurement and measurement technology for geometrical quantity, temperature, mechanics, electromagnetism, electronics, acoustics, optics, time and frequency, ionizing radiation and chemistry etc. The whole set contains 13 volumes.

This volume contains principles, methods, measurement apparatus, new concepts and up-to-date arts in time and frequency measurement field. The frequency measurement range not only confines in general using region, but also stretches to microwave and up to optical frequency. Emphsizing on overall ability, practicablity and authority are standing features in the volume.

To technicians, engineers and reseachers in T & F measurement field, the handbook will be a valuable desk tool-book. It will be also a very useful guide for learning the generation, dissemination and measurement of time and frequency.

图书在版编目(CIP)数据

计量测试技术手册 第 11 卷:时间频率/《计量测试技术手册》编辑委员会编著. - 北京:中国计量出版社, 1996. 10

ISBN 7-5026-0756-0/TB·471

I. 计… II. 计… III. ①计量-测试技术-手册 ②时间计量-测试技术 ③频率计量-测试技术
IV. ①TB9-62 ②TB939

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10421 号

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 27 字数 899 千字

1996 年 10 月第 1 版 1996 年 10 月第 1 次印刷

*

印数 1-1800 定价: 70.00 元

序

当人类文明的曙光照耀着历史长河的源头时,伴随着生产和社会活动的需求,计量就萌发了。我国古时秦始皇施行了度量衡制度,被看作是一项重要政绩,标志着社会的进步。本世纪欧洲各国也制定了计量单位,如英国的英尺、磅等。直至1898年,国际米制公约公布,号召各国采用统一的米制公斤计量标准,可说是顺应社会发展,时代进步的必然产物。随着科学技术和贸易的发展,大概始于本世纪与上世纪之交,计量又从传统的度量衡扩展到众多的新兴领域。各种计量要求的精确程度及实施的复杂性与日俱增,计量已成为一门独立的学科。特别是在今天高新技术迅速发展的时代,计量更是无所不在和不可缺少的科学手段。今天计量测试技术广泛应用于工农业生产、国防建设、科学研究、国内外贸易、医疗卫生,以及人民生活的各个领域。在现代社会中,人们把人、管理、原材料、工艺装备、计量测试技术列为工业生产的五大支柱。计量测试技术也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础。

在原国家计量局和现国家技术监督局的支持下,由中国计量出版社组织编写的《计量测试技术手册》即将出版。这套手册由100多位长期从事计量测试工作的专家、教授,历经7年编纂而成。该套手册总结了我国40多年来计量科学研究和实践的经验,吸取了国外先进技术,内容丰富,实用性强。并保持了从事计量工作一向遵循的科学上的严谨性,是适用于各个领域科技人员的工具书。

可以指出,编写的手册是一项组织繁杂,集体辛勤劳动的果实,是对我国计量事业做出了一个卓有贡献。为此,谨向所有付出心血的编者表示敬意。



1995年10月18日

王大珩教授为中国科学院院士、中国工程院院士、中国高科技产业化研究会理事长、何梁何利基金优秀奖获得者。

《计量测试技术手册》编辑委员会

主任委员： 陈宽基

副主任委员： 倪伟清 徐孝恩 李绍贵 房景富 王东宝

委 员： (按姓氏笔画顺序排列)

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 于 渤 | 王朋植 | 王晓莹 | 史元明 | 孙维民 |
| 师克宽 | 刘宝兰 | 刘瑞清 | 陈小林 | 陈艳春 |
| 何 贡 | 何伟仁 | 林宗虎 | 林鸿初 | 金士杰 |
| 施昌彦 | 席德熊 | 徐 鹤 | 黄秉英 | 窦绪昕 |
| 谢 英 | 潘君骅 | 潘秀荣 | | |

本 卷 编 辑 委 员 会

主 编： 黄秉英
编 委： 周 渭 张荫柏 李成福 沈乃澂
倪伟清 李绍贵

本卷责任编辑： 李绍贵

本卷责任编辑： 倪伟清

插图及版式设计： 孙丽英

封面设计： 齐洪海

前 言

我国的现代计量测试工作,始于本世纪 50 年代初,经过 40 多年的积累和发展,已建成具有门类较为齐全,覆盖全国的计量测试技术网络,在生产、科研和经贸中发挥着生产力的作用。计量测试队伍也从计量行业扩展到各技术领域的计量、测试人员,形成宏大的专业大军。作为这一专业领域的知识积累——编写《计量测试技术手册》,既是广大计量测试人员的要求,也为推进计量测试技术转化为生产力所需要。

《手册》旨在成为计量测试人员和技术科研、设计人员案头技术咨询的必备工具书,力求以技术科学性、数据准确性、资料实用性、查阅方便性来组织书稿内容。全书按计量测试技术各专业立卷,共 13 卷,覆盖了这一技术领域的全貌。各卷按各自专业特点,要求做到既独立完整,又相互协调统一。

《手册》是在原国家计量局和现国家技术监督局的支持和帮助下,由中国计量出版社组织编写的,并成立了各卷的编审委员会,得到了中国计量科学研究院和一些科研单位、大专院校的大力支持,有上百名计量测试技术专家、学者参与了编写工作,历经 7 个多寒暑,为此付出了艰辛的劳动。值此《手册》面世之际,我们谨向支持和参与《手册》编写、编辑出版的所有人员致以敬意!

编写如此浩大又涉及众多学科的《手册》,是一项系统而又细致的工程实践,要做到全面、完整、准确、统一是十分困难的,虽经共同努力,层层把关,也难免存在术语上的不统一,内容上有一定交叉重复,符号不太一致等问题。还会有错漏和不足,诚请广大读者批评指正,以便在《手册》再版和修订中改正。

《计量测试技术手册》编辑委员会

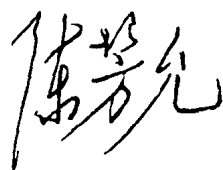
1995 年 9 月

导 言

时间和频率是我们生活和工作中最常用到的两种基本参量。现代量子频标的出现和电子技术的进步，极大地提高了时间频率计量测试的稳定度和准确度，使之遥遥领先于其他量值的计量水平。时间频率也因此成为当今物理量准确计量的基础，其他量值计量，若能转换为时间频率计量，水平均将显著提高。完成这种转换而重新定义的量值已有：长度单位——米（1983）；电压单位——伏特（1990）；电阻单位——欧姆（1990）。

时间频率在工业、交通、电信等方面的应用十分广泛。计时、工业控制、定位导航、现代数字化技术和计算机都离不开时频技术和时频测量。由于社会发展的需要，对信息传输和处理的要求愈来愈高，将需要更高准确度的时频基准和更精密的测量技术。

显然，时间频率及其计量测试在科技发展和社会进步中占有特殊重要的地位。本书作为“计量测试技术手册”中的一卷，内容丰富全面；着重从应用角度编写，又自成体系，有相当深度；作者均是长期在一线工作的专家，有良好的技术基础和丰富的工作经验。读者可以一书在手，学用两得。相信本书对于广大的计量测试和时频应用工作者会起到真正的“工具”作用，并对我国工业和科研的进步作出重要贡献。



1995年5月

陈芳允，中国科学院院士，我国“863”高科技计划的倡导者之一，国防科工委科学委员会顾问，中国计量测试学会副理事长，国防计量测试技术委员会主任。

生活离不开時間頻率

它是高新技术的基础

葉叔华

九五年五月

叶叔华，上海天文台研究员，中国科学院院士，中国科协副主席，全国人大常委会委员，上海市人大常委会副主任，1994年被评为我国十大杰出女性之一。

时间表徵世界万物運動之状态
时间频率是测量及通讯之基础

苗永瑞

一九九五年四月

贺时间频率卷出版

科学技术之基础
计量事业的先锋

王义道

一九九五、五

王义道，北京大学教授，常务副校长，中国计量测试学会副理事长，兼任时间频率专业委员会主任。

编者的话

引言和题词中,精辟地概括了时间频率及其计量测试的作用和地位。

时间和频率作为基本量和普及参量所起的作用,人人都能从日常生活中体验到。式样繁多的各种钟表,大概是人们用得最多的量具了;今天,只为了满足工厂在制造手表、汽车、微型计算机之类对频率源的要求,全球每天便要生产上百万块晶体;时间频率还广泛用于电话、无线电、电视、雷达、天气预报等大量其他重要服务,这些设施和服务已成为当代人们日常生活的重要组成部分。

时间频率最重要的应用领域是导航和通讯。导航基于测定物体的位置和运动。将实际观测到的天体(或太阳)位置的时间,与地球上指定位置(如格林尼治)为参考预测的时间进行比较,属于天体导航;而通过测量发射机(位置已知)到测量点的距离,即测量所发射电磁波信号的到达时间,称为无线电导航。这时,定位误差正比于时间误差,例如,若要求定位误差在1千米内,则允许时间测量误差在3微秒内;而若要求定位误差在1米内,则时间测量误差应限制在3纳秒(3×10^{-9} s)内。物体的运动则由重复的位置测量决定,或者通过测量接收到的电磁波信号的多普勒频移决定。在通讯中,特别在远距离通讯中,划分和分配频率和频道是基本的指令法则,时间则用以信号和数据的标记,使之易于识别和检测。

自60年代中期以来,由于采用了以量子跃迁为基础的原子频率标准,时频计量技术提高之快,达到的水平之高,是其他量值计量远远不及的。今天,时间和频率的测量分辨率已分别达到皮秒(10^{-12} s)和 10^{-16} 量级,不确定度则下降至 10^{-14} 量级。由于这些原故,它对其他基本物理量的计量产生深远的影响,开创了“量子计量”的新时代;对当代科学前沿的探索,包括相对论、太阳系以及原子微观结构,也起着愈益重要的作用。

编撰本卷手册的指导方针是,适应时间频率各应用领域提出的计量测试要求,力图全面、实用、权威地把有关技术的原理、方法、设备和现状

介绍给读者。鉴于时间和频率共用一个标准源,并由频率导出时间,本书重视频率的计量测试,频率范围遍及整个电磁频谱——从无线电频段延伸到微波和光频,同时也相当关注时间计量方面的内容;对于计量测试技术方法的介绍,从专业基础知识、技术方法原理、设备应用到有关数据和检定操作,都分配一定篇幅,既重视新技术、新方法,也介绍仍在使用的一般方法,以满足不同部门、不同层次读者的需要;在各章内容和数据取舍上,我们严格以国内外名家著作和一线工作同志的真知灼见为依据。值得庆幸的是,在时间频率专业方面,已不乏权威论著,我国时频计量测试技术也有了相当水平。正是在国内外专家、学者和专业科技工作者所取得成果的基础上,本卷才得以按照上述指导方针完成编写工作。借此机会,谨向本书引用过的所有作者表示衷心感谢!

本卷手册由 14 章和一个附录组成,含图五百多幅,近二百张表,引用公式达四百余条,约八十余万字,它由本卷编委会成员分工编写,集体审订定稿。具体章节的编写分工如下:

黄秉英(中国计量科学研究院): 1~4 章,附录兼统稿;

周渭(西安电子科技大学): 5~7 章;

张荫柏(航天工业总公司二院): 8~10 章;

李成福(航天工业总公司二院) 11~13 章;

沈乃澂(中国计量科学研究院): 14 章。

书末的专业名词索引,按首词拼音字母排序,将帮助读者迅速查到有关名词的释义和它的具体应用。

以这样充实的内容和篇幅,用手册形式介绍时间频率计量测试技术,国内尚属首例。在计量学和计量测试技术中,时间频率计量是带头学科,是先导,本卷手册将帮助读者树立和巩固这种意识。事实上,发达国家一直以这样的认识重视和促进时频计量事业的发展,它促成了今天时间频率空前的国际合作和交流。在我国,时频计量事业的发展曾经有过自己的辉煌,希望建立以上共识将有助于创造明日的辉煌。

本卷编辑委员会

1995 年 5 月

目 录

第 1 章 常用名词和定义

| | |
|----------------------------------|------|
| 1.1 时间单位秒、频率 | (1) |
| 1.2 世界时、原子时、协调世界时 | (3) |
| 1.3 时间编码、DUT1 | (5) |
| 1.4 区时 | (8) |
| 1.5 测量、校准、同步 | (11) |
| 1.6 相位噪声谱密度、取样方差、 频率稳定度 | (11) |
| 1.7 闪烁噪声、闪烁平台 | (14) |
| 1.8 频率漂移率、老化率、日波动 | (15) |
| 1.9 开机特性、频率复现性、频率 调节精度 | (16) |
| 1.10 频率准确度、不确定度 | (17) |
| 1.11 原子钟 | (17) |
| 1.12 激光冷却、激光囚禁 | (18) |
| 1.13 罗兰 C、奥米加、GPS | (19) |
| 1.14 甚长基线干涉测量 | (20) |
| 1.15 伪随机噪声码 | (21) |

第 2 章 设备与技术基础

| | |
|----------------------|------|
| 1 时频计量测试的特点 | (22) |
| 2 测量设备和方法类别 | (22) |
| 2.1 本地测量与远距离比对 | (22) |
| 2.2 校准方法及其选择 | (23) |
| 2.3 测量方法特性比较 | (24) |
| 2.4 主要设备与技术 | (26) |
| 3 振荡 | (26) |
| 3.1 正弦波振荡的条件 | (26) |
| 3.2 振荡的建立和稳定过程 | (27) |
| 3.3 振荡频率 | (28) |
| 4 混频(变频) | (29) |
| 4.1 晶体管混频器 | (30) |
| 4.2 场效应管混频器 | (30) |
| 4.3 二极管混频器 | (31) |
| 4.4 参量混频器 | (32) |
| 5 倍频 | (33) |

| | |
|--------------------------|------|
| 5.1 晶体管倍频器 | (33) |
| 5.2 饱和线圈倍频器 | (33) |
| 5.3 阶跃恢复二极管倍频器 | (34) |
| 5.4 锁相式倍频器 | (36) |
| 6 分频 | (36) |
| 6.1 再生式分频器 | (37) |
| 6.2 锁定振荡器分频 | (37) |
| 6.3 数字式分频 | (38) |
| 6.4 其他方法分频 | (43) |
| 7 鉴相 | (44) |
| 7.1 正弦鉴相器 | (44) |
| 7.2 取样-保持比相器 | (45) |
| 8 锁相与锁频 | (47) |
| 8.1 锁相 | (47) |
| 8.2 锁频 | (48) |
| 8.3 环路分析的基本方法 | (49) |
| 9 频率合成(综合) | (52) |
| 9.1 非相干合成 | (52) |
| 9.2 直接相干合成 | (55) |
| 9.3 间接相干合成 | (56) |
| 10 原子谐振 | (60) |
| 10.1 量子跃迁 | (60) |
| 10.2 态的选择和制备 | (61) |
| 10.3 谐振的检测 | (63) |
| 10.4 影响原子谐振频率的主要因素 | (65) |

第 3 章 标准频率发生器

| | |
|------------------------|------|
| 1 概述 | (66) |
| 2 采用选频网络的正弦波振荡器 | (66) |
| 2.1 RC 振荡器 | (66) |
| 2.2 LC 振荡器 | (69) |
| 3 石英晶体振荡器 | (73) |
| 3.1 石英晶体谐振器 | (73) |
| 3.2 石英晶体振荡器 | (76) |
| 4 频率合成器 | (82) |
| 4.1 十进频率合成器 | (82) |
| 4.2 微机控制的数字频率合成器 | (85) |

| | |
|----------------------|------|
| 4.3 频率合成器的特性指标 | (87) |
| 5 标准频率信号发生器 | (88) |

第4章 原子频率标准、原子时

| | |
|---------------------------------|-------|
| 1 实用原子频率标准的性能和特点 | (91) |
| 2 铷原子频率标准 | (92) |
| 2.1 铷气泡型 | (92) |
| 2.2 铷激励器 | (97) |
| 3 氢原子频率标准 | (98) |
| 3.1 主动型氢激励器 | (98) |
| 3.2 被动型氢激励器 | (103) |
| 4 铯原子频率标准 | (104) |
| 4.1 磁选态型 | (105) |
| 4.2 光选态型 | (108) |
| 4.3 典型铯频标及其性能 | (110) |
| 5 频率基准装置 | (111) |
| 5.1 当代频率基准 | (111) |
| 5.2 铯基准装置的结构、性能和 准确度评定 | (111) |
| 5.3 新装置的研制及其前景 | (115) |
| 6 原子时 | (118) |
| 6.1 地方原子时与国际原子时 | (118) |
| 6.2 TAI的产生和性能 | (118) |
| 6.3 应用TAI进行校准 | (124) |

第5章 模拟式频率时间测量

| | |
|-------------------------|-------|
| 1 模拟式频率时间测量概要 | (125) |
| 2 谐振法 | (125) |
| 3 电桥法 | (127) |
| 4 拍频法 | (127) |
| 5 差频法及双重差拍法 | (128) |
| 5.1 差频法 | (128) |
| 5.2 双重差拍法 | (128) |
| 5.3 外差式频率计 | (129) |
| 6 示波器法 | (130) |
| 6.1 李沙育图形法 | (130) |
| 6.2 用双线示波器法测量差拍周期 | (132) |
| 6.3 外同步法 | (133) |
| 6.4 圆扫描法 | (133) |
| 7 频谱分析 | (133) |
| 7.1 频谱分析装置 | (134) |
| 7.2 频谱仪的主要特性参数 | (135) |
| 7.3 频域稳定度测量 | (136) |

| | |
|-----------------------|-------|
| 7.4 频谱分析仪产品及其性能 | (137) |
|-----------------------|-------|

第6章 用计数器测量频率、 周期和时间间隔

| | |
|---------------------------|-------|
| 1 计数器的基本结构 | (138) |
| 1.1 时间基准 | (138) |
| 1.2 控制电路 | (139) |
| 1.3 主闸门 | (141) |
| 1.4 计数器 | (141) |
| 1.5 输入电路 | (142) |
| 2 常用计数测量 | (143) |
| 2.1 频率测量 | (143) |
| 2.2 周期测量 | (143) |
| 2.3 时间间隔测量 | (145) |
| 2.4 相位测量 | (145) |
| 2.5 计算计数测量 | (147) |
| 2.6 计数测量的不确定度 | (148) |
| 3 相检宽带测频技术 | (149) |
| 3.1 最大公因子频率和“相位重合点” | (149) |
| 3.2 相检宽带测频技术 | (150) |
| 3.3 双相检宽带测频技术 | (151) |
| 4 调制域测量 | (152) |
| 4.1 时域、频域、调制域 | (152) |
| 4.2 调制域测量技术 | (152) |
| 4.3 调制域分析仪 | (153) |
| 5 计数器产品及其性能 | (154) |
| 5.1 常用计数器产品 | (154) |
| 5.2 计数器的量程扩展 | (156) |

第7章 用比相器、频标比对器 测量时间差和频率差

| | |
|-------------------------------|-------|
| 1 比相器、频标比对器的测量量 和导出量 | (157) |
| 2 比相测量与比相器 | (157) |
| 2.1 比相法测量 | (157) |
| 2.2 高线性比相器 | (159) |
| 3 频差倍增测量 | (163) |
| 3.1 频差倍增器 | (163) |
| 3.2 具有频差倍增功能的其它设备 | (164) |
| 4 双混频时差测量仪 | (166) |
| 4.1 测量装置 | (166) |
| 4.2 测量误差 | (167) |
| 5 频率稳定度测量仪 | (168) |
| 6 常用比相器、频标比对器及其 | |

性能 (168)

第8章 应用高频时号广播和低频、甚低频导航及授时信号校频定时

- 1 高频(短波)时号广播应用技术..... (170)
 - 1.1 高频(短波)时号广播..... (170)
 - 1.2 高频(短波)定时校频技术..... (175)
 - 1.3 高频定时校频设备..... (182)
- 2 低频(长波)导航、授时信号应用技术..... (186)
 - 2.1 低频导航/授时系统..... (186)
 - 2.2 低频定时校频技术..... (196)
 - 2.3 低频定时校频设备..... (201)
- 3 甚低频导航、授时信号应用技术..... (204)
 - 3.1 甚低频导航系统..... (204)
 - 3.2 甚低频校频定时技术..... (207)
 - 3.3 甚低频校频定时接收机..... (208)

第9章 应用电视信号的时频比对和测量

- 1 彩色电视副载频校频技术..... (210)
 - 1.1 彩色电视副载频..... (210)
 - 1.2 应用副载频校频的方法..... (210)
 - 1.3 应用副载频信号校频应注意的问题..... (213)
- 2 应用电视行同步信号的时频比对和测量..... (215)
 - 2.1 电视信号的行同步脉冲..... (215)
 - 2.2 应用电视行同步脉冲的时频比对和测量..... (216)
 - 2.3 应用电视行频信号校频..... (218)
- 3 应用插入在电视信号中的标准时频信息定时校频..... (219)
 - 3.1 在电视信号中插入标准时频信息..... (219)
 - 3.2 电视信号中标准时频信息的取出与应用..... (219)
- 4 应用卫星电视信号进行时频比对..... (220)
 - 4.1 卫星电视信号的特点..... (220)
 - 4.2 应用“荧光屏”卫星进行时频比对..... (220)
- 5 电视法时频比对设备..... (221)

第10章 利用卫星和其他方法的时频精确测量

- 1 可用卫星和测量方法..... (222)

- 1.1 可用卫星及其性能..... (222)
- 1.2 测量方法..... (222)
- 1.3 主要测量误差..... (225)
- 2 GPS时间测量..... (230)
 - 2.1 GPS的组成和信息..... (230)
 - 2.2 GPS时间测量的原理与技术..... (233)
 - 2.3 GPS定时校频接收机..... (245)
- 3 GLONASS时间测量..... (248)
 - 3.1 GLONASS的组成和特点..... (248)
 - 3.2 GLONASS时间测量..... (249)
 - 3.3 GLONASS/GPS组合接收机..... (252)
- 4 其他远距离时频精确测量方法..... (252)
 - 4.1 搬运钟法..... (252)
 - 4.2 甚长基线干涉测量法(VLBI)..... (253)

第11章 相位噪声测量

- 1 频率源的相位噪声特性..... (255)
 - 1.1 噪声类型..... (255)
 - 1.2 相位噪声表征..... (256)
 - 1.3 谱密度的幂律谱模型..... (257)
 - 1.4 振荡器的相位噪声..... (258)
 - 1.5 射频放大器和倍频器的相位噪声..... (260)
- 2 相位噪声测量方法..... (261)
 - 2.1 概述..... (261)
 - 2.2 频谱仪测量法..... (261)
 - 2.3 差拍法..... (263)
 - 2.4 检相法..... (265)
 - 2.5 鉴频法..... (269)
 - 2.6 毫米波相位噪声测量..... (271)
 - 2.7 剩余噪声测量..... (273)
 - 2.8 剩余调频噪声测量..... (275)
 - 2.9 脉冲调制波的相位噪声测量..... (275)
- 3 相位噪声测量装置..... (278)
 - 3.1 HP3048A相位噪声测试系统..... (278)
 - 3.2 相位噪声测量的常用设备与特性..... (280)
- 4 相位噪声谱密度与采样方差之间的转换..... (281)
 - 4.1 $S_y(f)$ 与 $\sigma_y^2(2, \tau)$ 的对应关系..... (281)
 - 4.2 由实测值 $S_\varphi(f)$ 换算 $\sigma_y^2(2, \tau)$ (282)
 - 4.3 由实测值 $\sigma_y^2(2, \tau)$ 换算成 $\mathcal{L}(f)$ (283)
 - 4.4 采样方差之间的换算..... (283)

第12章 微波频率源及微波频率测量

- 1 微波信号的特点..... (302)

| | | |
|-----|-----------|-------|
| 2 | 微波振荡器 | (304) |
| 2.1 | 灯塔管振荡器 | (304) |
| 2.2 | 速调管振荡器 | (305) |
| 2.3 | 返波管振荡器 | (306) |
| 2.4 | 体效应管振荡器 | (307) |
| 2.5 | 微波晶体管振荡器 | (308) |
| 2.6 | 微波场效应管振荡器 | (310) |
| 2.7 | 微波倍频链振荡器 | (310) |
| 3 | 微波信号发生器 | (312) |
| 3.1 | 一般信号发生器 | (312) |
| 3.2 | 微波扫频信号发生器 | (313) |
| 3.3 | 微波频率合成器 | (316) |
| 4 | 微波频率测量 | (319) |
| 4.1 | 概述 | (319) |
| 4.2 | 置换法 | (319) |
| 4.3 | 变频法 | (320) |
| 4.4 | 置换变频法 | (321) |
| 4.5 | 取样法 | (322) |
| 4.6 | 常用微波频率计 | (322) |
| 5 | 微波波长测量 | (324) |
| 5.1 | 概述 | (324) |
| 5.2 | 用测量线测量波长 | (325) |
| 5.3 | 谐振式波长计 | (325) |
| 5.4 | 毫米波波长测量 | (329) |

第13章 常用时频计量仪器的检定

| | | |
|-----|------------|-------|
| 1 | 常用计时仪器的检定 | (332) |
| 1.1 | 概述 | (332) |
| 1.2 | 指针式精密时钟 | (333) |
| 1.3 | 校表仪 | (335) |
| 1.4 | 秒表 | (336) |
| 1.5 | 数字式毫秒仪 | (336) |
| 1.6 | 标准数字时钟 | (339) |
| 1.7 | 时间间隔发生器 | (341) |
| 1.8 | 时间合成器 | (342) |
| 2 | 常用测量仪器的检定 | (346) |
| 2.1 | 比相仪 | (346) |
| 2.2 | 彩色电视副载频校频仪 | (348) |
| 2.3 | 频标比对器 | (349) |
| 2.4 | 指针式频率表 | (351) |
| 2.5 | 外差式频率计 | (352) |

| | | |
|-----|--|-------|
| 2.6 | 射频频谱分析仪 | (353) |
| 2.7 | 宽频带频率稳定度时域测量装置 | (358) |
| 2.8 | 鉴相式相位噪声测量装置 | (360) |
| 2.9 | 微波频率计数器 | (362) |
| 3 | 常用频率标准的检定 | (365) |
| 3.1 | 十进频率仪 | (365) |
| 3.2 | 高稳定晶体振荡器 | (367) |
| 3.3 | 汽泡式铷原子频率标准 | (370) |
| 3.4 | 商品型铯束原子频率标准 | (372) |
| 3.5 | 频率合成器 | (376) |
| 4 | 测量数据的简易归算程序(BASIC 算法程序) | (379) |
| 4.1 | 计算相对频率 y 的线性漂移率 K | (379) |
| 4.2 | 计算线性漂移率 K 以及扣除漂移后 的方差 | (380) |
| 4.3 | 计算双取样方差 $\sigma_y(2, T, \tau)(S_2)$ 随取样时间 τ 的变化($S_2 \sim \tau$) | (380) |
| 5 | 已公布的国家计量检定规程 | (382) |

第14章 光频标准和光频测量

| | | |
|-----|------------------|-------|
| 1 | 光频信号的特点 | (384) |
| 2 | 激光频率标准 | (385) |
| 2.1 | 激光器及其稳频 | (385) |
| 2.2 | 兰姆凹陷稳频激光器 | (389) |
| 2.3 | 饱和吸收稳频激光器 | (391) |
| 2.4 | 应用其他参考谱线稳频 | (395) |
| 3 | 激光频率测量 | (395) |
| 3.1 | 激光频率的相对测量 | (395) |
| 3.2 | 激光频率的绝对测量 | (397) |
| 3.3 | 激光频率测量的关键——非线性元件 | (404) |
| 3.4 | 非线性光学晶体 | (405) |
| 4 | 光频测量的发展与前景 | (406) |

附录

| | | |
|---|-------------|-------|
| 1 | 专业书籍、期刊和出版物 | (408) |
| 2 | 专业会议 | (409) |
| 3 | 国际合作机构 | (409) |
| | 参考文献 | (411) |
| | 术语索引 | (414) |

第 1 章 常用名词和定义

1.1 时间单位秒、频率

1.1.1 原子秒 atomic second

秒是时间间隔的基本单位，是国际单位制（SI 单位制）的七个基本单位之一，记为（s）。现在采用的秒长，1967 年第 13 届国际计量大会定义如下：

“秒是铯 133 原子 (^{133}Cs) 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。”

1967 年以前，秒定义均建立在天体周期运动的基础上（地球自转和公转）。新的秒定义则以原子内部能级之间的量子跃迁现象为基础。为区别新旧秒定义，人们常称旧秒定义为“天文秒”，而称新秒定义为“原子秒”或“铯原子秒”。

1.1.2 频率 frequency

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）。

依照上述定义，标准时间和标准频率不仅溯源于同一标准，而且将由同一标准源产生——铯原子 (^{133}Cs) 在特定能级之间跃迁辐射的频率为 9 192 631 770 Hz，而该跃迁辐射的 9 192 631 770 个周期所持续的时间为 1 s。鉴于原子、分子内部的能级是分立的，能级结构受外界条件影响极小，能级之间发生量子跃迁的辐射频率（按照量子力学定律， $h\nu = E_n - E_m$ ，式中， ν 为在能级 E_m 和 E_n 之间发生量子跃迁的辐射频率， h 为普朗克常数）相当准确而稳定，加之微观粒子具有全同性，以微观粒子的物理现象为基础的计量标准具有良好的复制性，原子秒定义使时间单位秒的测量准确度得到极大的提高，成为 SI 单位制中复现不确定度最小的一个基本单位，时间频率计量也因此成为其他量值计量朝量子基准转化的先导。如今，任何量值计量，只要能转换为时间频率计量，均将极大地提高其准确度。

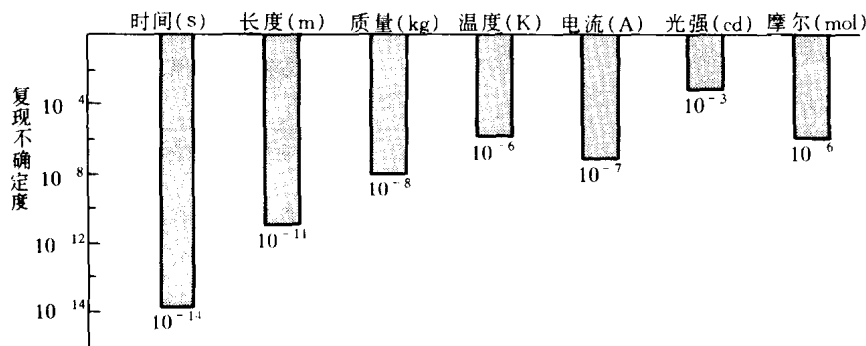


图 1-1 国际单位制七个基本单位复现的不确定度 (1993)