

计量培训教材

时间频率计量

国防科工委科技与质量司组织编写

原子能出版社

计量培训教材

第1卷 几何量计量

第2卷 热学计量

第3卷 力学计量

第4卷 电磁学计量

第5卷 无线电电子学计量

第6卷 时间频率计量

第7卷 电离辐射计量

第8卷 光学计量

第9卷 声学计量

第10卷 化学计量

第11卷 计量技术基础

第12卷 计量管理基础

ISBN 7-5022-2337-1



9 787502 223373 >

ISBN 7-5022-2337-1

TB939 定价: 48.00元

计 量 培 训 教 材

时间频率计量

国防科工委科技与质量司组织编写

原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

时间频率计量 / 李宗扬主编. — 北京: 原子能出版社, 2002.6

计量培训教材

ISBN 7-5022-2337-1

I. 时… II. 李… III. ①时间计量—技术培训—教材 ②频率计量—技术培训—教材 IV. TB939

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 005665 号

内 容 简 介

《时间频率计量》是计量培训教材的第 6 卷, 共分 5 篇。针对从事频率计量、时间计量和相位噪声计量等三个计量考核专业项目的计量检定人员应知应会的基础知识, 应了解和掌握的基础技术, 以及国内外高新技术计量应用的研究成果和技术发展展望, 本卷编写了包括基本概念、计量单位、计量特性表征量、测量方法和设备、检定或校准方法、计量标准、检定规程和国军标、量值传递注意事项、不确定度或测量误差的分析与评定等学习内容。第 1 篇时间频率计量基础知识; 第 2 篇频率计量; 第 3 篇时间计量; 第 4 篇远距离时频传递与校准; 第 5 篇频率稳定度和相位噪声计量。每篇根据各自特点和内容取舍不同, 分成若干章和节, 每章之后列有思考题, 每篇之后列有参考文献, 供深入学习时参考。

本书还可供从事与时间频率有关的校准、检测、测试的科技人员参考阅读, 也可供相关领域的在校师生参阅。

原子能出版社出版 发行

责任编辑: 王裕新

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

保定市印刷厂印刷 新华书店经销

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张 19.5 字数 485 千字

2002 年 9 月北京第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000

定价: 48.00 元

《计量培训教材》总编委会

总编审委员会

顾问：栾恩杰

主任：高志强

副主任：吴伟仁 马恒儒

委员：(按姓氏笔画排列)

白忠泉 朱春元 牟安成 孙忠慧 孙家辉 杨长利
宋森尧 庞海涛 柯 松 柴芙蓉 徐炳仑 韩 俊
傅 宽

总编辑委员会

总主编：马恒儒

副总主编：岳 峰 靳书元 宋素秀

委员：(按姓氏笔画排列)

王广顺 冯永祥 达道安 朱正辉 李淑敏 吴申贤
辛光和 张 辉 张东军 张铎清 陆治平 陈开来
金慧茹 赵守林 赵志祥 胡焕性 俞德飞 贾成武
徐建良 唐亮武 常文君 梁燕熙 童本敏 曾令儒
谢静谦 熊开国 潘陆原

总编委会办公室

主任：岳 峰

成员：(按姓氏笔画排列)

孔 玥 李宗扬 张 立 武晓雪 周 欣 常文君
游志红

第6卷《时间频率计量》编委会

编审委员会

主 任：宋森尧

副 主 任：徐建良 李宗扬 高连山

委 员：(按姓氏笔画排列)

马红梅 王志田 李 晶 李成福 李泽才

李盈安 张 鸿 张德俊 姜东伟 高弘林

葛 军

编辑委员会

主 编：李宗扬

副 主 编：王志田 高连山

编 辑：(按姓氏笔画排列)

李成福 姜东伟 杨 荻 徐月青 韩 红

责任编辑：王裕新

责任校对：李建慧

版式设计：崔 彤

封面设计：李松林

总序

计量是关于测量的科学，它涉及测量理论、测量技术和测量实践等多个领域。计量是科学技术的一个重要组成部分，是与人类社会进步和科学技术发展同步发展的。现代计量是国民经济建设和国防建设中一项重要的技术基础，是一个国家、一个地区和一个行业发展的探测器。计量技术是科技创新的基础技术，又是高技术产业化发展的一个重要条件。

老一辈无产阶级革命家聂荣臻元帅曾经指出“科技要发展，计量须先行”。半个世纪以来，国防科技工业计量工作者同全国计量同行一道，自力更生、艰苦奋斗、勇于创新、拼搏进取，形成了学科门类比较齐全的计量体系，创造了辉煌业绩，积累了宝贵经验，不断丰富和发展着现代计量。进入21世纪，产品测量数据的准确性、可靠性、可追溯性及国际互认性都对计量技术水平提出了更高的要求，我们要加强计量技术研究和计量人才的建设，为加入WTO后我国国家计量体系的建立作出应有的贡献。

当今的时代是竞争的时代，而人才是竞争之本，以信息技术为代表的高新技术迅速发展，对计量人员的整体素质提出了更高的要求。因此，迫切需要培养一大批掌握高新计量技术的人才。《计量培训教材》的编撰和出版，将为培养和造就一支为国民经济和国防现代化建设服务的计量人才队伍作出应有的贡献。

《计量培训教材》是一部12卷共18册1280余万字的大型计量专业技术丛书，是我国第一部学科专业齐全的计量培训教材。前10卷涵盖现代计量学10大专业技术领域，后2卷介绍计量技术和计量管理的基础知识，不仅展现了国内外计量科研的最新成果，而且突出了我国计量工作的特色。它

的出版凝聚了国防科技工业众多专家和计量工作者多年的心血，是集体智慧的结晶。希望读者通过阅读这部丛书，能够熟悉计量基础知识，并在实践中掌握运用，在计量工作中取得更大的成绩。

社会在进步，科技在发展。我相信，随着高新技术应用研究的积极开展，新的技术和新的成果将会充实和丰富《计量培训教材》的内容；专家和读者对书中的不足提出的批评指正意见，将会补充和完善这部丛书的内容，使之成为广大计量工作者的良师益友。

A stylized handwritten signature in black ink, appearing to read '张立' (Zhang Li), with a horizontal line underneath.

2002年8月18日

前言

时间频率计量是研究周期运动或周期现象的特性和量的表征及测量的一门计量科学,时间和频率又是周期运动及其属性的不同侧面描述和表征,是密切相关不可分离的,所以又常称为时间频率或简称时频。时间频率与众多科学及工程技术密不可分,更与人们生产和日常生活密不可分,乃至哲学、经济学、社会学、历史学、人口学等也都涉及和论述与时间频率有关的理论及实践问题。时间频率是一门既古老又充满青春活力的学科,人类对时间频率的认识历史久远,起源于古人类对日月星辰的观察和感悟,时间与历法是天文学中最早发展起来的一个分支,在其发展历程中,又与自然科学中的数学、物理学、测地学以及航海、机械制造、无线电技术等的发展有着密切联系。20世纪60年代之后,时间频率无论是理论研究,还是技术实践应用,在其深度和广度上,在其发展速度和测量的准确度上,都是前所未有的,有几次诺贝尔物理奖项都是与时间频率研究有关。现代的航空、航海、航天,天文、气象、环卫,勘探、测绘、测控,电力、通信、网络等等,都有时间频率研究成果的应用。

时间频率计量测试技术涉及时频计量现状、计量标准考核、传递标准、同步与比对技术、测量与校准技术的研究与应用,内容相当广泛和丰富。国内外的时间频率研究专家和科研工作者至今已撰写出数百篇的论文或报告,每年或每两年国际或国内的相关组织都举办时间频率及其测量技术领域的学术交流活动,展示最新研究成果和应用成果。目前时间频率计量是所有物理量中计量单位复现准确度最高,测量装置和手段精密度最高,并且也是惟一可以在全球范围内实现远距离传递和校准的物理量。如此广博的研究领域,如此普及的应用范围,很难在一本著作或文集中反映,已出版的一些专著或文集多数是侧重于某个方面或兼顾其他方面。

新世纪的时间频率计量人员,特别是从事国防系统计量的时间频率人员,尤其需要一本内容比较完整、阅读理解比较容易、既有高新技术介绍,又有对从事计量工作有参考价值的学习教材。为此目的,本教材共安排了五篇学习内容。第一篇时间频率计量基础知识是从事时间频率计量检定工作应知应会的共性基础知识,重点介绍了时间频率计量的特点和发展趋势,时间频率量的法定计量单位及其使用时的注意事项,时间导出频率的关系,时

频计量检定系统表和检定规程,量值传递的基本要求和注意事项等内容。第二篇频率计量是从事频率计量检定工作应熟悉和掌握的专业知识,重点介绍了频率量的计量特性表征方法,常用的各种频率标准,各类频率比较器以及电子计数器的基本组成和工作原理,常用的各类频率测量方法的原理和测量误差,常用的各种频率计量检定方法的原理和数据处理,及其测量不确定度评定的基本方法。第三篇时间计量是从事时间计量检定工作应熟悉和掌握的专业知识,重点介绍了时间尺度及其建立、世界时和区时、原子时和协调时、时间量的计量特性表征方法、常用的各类计时器具及其检定方法、不确定度的主要来源。第四篇远距离时频传递与校准是从事时间频率计量检定工作应了解和掌握的最新校准技术知识,分章介绍了利用短波、长波、电视、卫星和GPS, GLONASS进行时频传递与校准,重点介绍了各种校准技术的基本原理、所用设备、校准方法等。第五篇频率稳定性和相位噪声计量是从事频率短稳和相位噪声计量检定工作应熟悉和掌握的专业知识,重点介绍了时域频率稳定度表征和测量方法,频域相位噪声表征和测量方法,连续波、脉冲调制波相位噪声的检定和校准,以及调幅噪声和频率捷变时间的测量方法等。

需要指出的是本卷教材的主要对象是从事时间频率计量的人员,对所介绍的技术内容注意到侧重于基本概念、基本方法和基本技术,也适当涉及国内外最新的研究和应用成果,但不可能全面、深入的阐述。若需要更进一步了解某个方面的知识,应查阅有关专著或文献。

本书是由本卷编辑委员会成员分工编撰的,在编撰过程中,除参考了时间与频率有关专著和文献外,还得到了马凤鸣、张荫柏、张爱敏、孙传娥、刘洪琴、李巍、郭鹏翔、黄杭军等同志的帮助和支持,在此表示感谢。由于编撰人员的水平有限,在内容取舍和阐述上难免不妥或有差错,敬请专家和读者批评指正。

第6卷《时间频率计量》编委会
2002年6月

目 录

第一篇 时间频率计量基础知识

第一章 时间频率量的名称和单位	3
第一节 人类对时间频率的认识历史	3
第二节 时间频率量的基本概念	5
第三节 时间频率量的计量单位	6
第四节 时间频率量计量单位使用要求	8
思考题	10
第二章 时间与频率的关系	10
第一节 由时间导出频率	10
第二节 由频率确定单位时间	12
第三节 时间是频率测量的基础	13
第四节 频率是周期测量的依据	13
第五节 时间差与频率差的标注	14
思考题	16
第三章 时间频率量值传递	17
第一节 时间频率计量检定系统表	17
第二节 国家计量局颁布的检定规程	19
第三节 国家技术监督局颁布的检定规程	21
第四节 国家军用标准	22
第五节 时间频率量值传递的基本要求	23
第六节 时间频率计量检定的注意事项	24
思考题	27
第四章 时间频率计量标准	27
第一节 时间频率国家计量标准	27
第二节 时间频率行业计量标准	28
第三节 时间频率参照计量标准	30
第四节 频率计量标准的建立	32
思考题	34
第五章 时间频率计量技术的发展	34

目 录

第一节 时间频率计量的特点	35
第二节 时间频率标准的发展	38
第三节 时间频率比较测量仪器的发展	39
第四节 远距离时频比对技术的发展	39
思考题	40
参考文献	40

第二篇 频率计量

第一章 频率量的计量特性表征	43
第一节 频率准确度的表征	43
第二节 频率稳定度的时域表征	46
第三节 频率漂移特性的表征	49
第四节 频率复现特性的表征	55
思考题	56
第二章 频率标准	57
第一节 频率标准简介	57
第二节 晶体振荡器频标	59
第三节 原子频标	62
第四节 铷原子频标	63
第五节 氢原子频标	66
第六节 铯原子频标	67
思考题	70
第三章 频率比较器	70
第一节 频率比较器简介	70
第二节 频差倍增器	72
第三节 相位比对器	76
第四节 频率差拍器	78
第五节 接收比对校频仪	80
思考题	83
第四章 电子计数器	83
第一节 电子计数器简介	83
第二节 计数器基本功能	84
第三节 计数器基本构架	87

目 录

第四节	计数器工作原理	88
第五节	计数器测量误差	91
第六节	提高计数器测量分辨力的方法	95
思考题	.....	98
第五章	频率测量方法	98
第一节	利用电路频率响应特性测频	98
第二节	拍频法测频	101
第三节	示波器法测频	102
第四节	差频法测频	104
第五节	计数法测频	106
第六节	微波频率测量	108
思考题	.....	110
第六章	频率检定方法	111
第一节	倍增测频法	111
第二节	倍增测周法	112
第三节	相位比较法	113
第四节	时刻比对法	114
第五节	频标互比法	115
第六节	频率标准检定项目	117
第七节	频率比较器和计数器检定项目	119
思考题	.....	120
第七章	频率计量的测量不确定度评定	121
第一节	频率计量的不确定度评定基本程序	121
第二节	频率标准装置的测量不确定度	124
第三节	数字频率计的测量不确定度	125
第四节	时间间隔计数器的测量不确定度	127
第五节	频率源检定的测量不确定度	129
第六节	频率比对器检定的测量不确定度	132
思考题	.....	133
参考文献	.....	134

第三篇 时间计量

第一章	时间尺度	137
-----	------------	-----

目 录

第一节	建立时间尺度的周期现象	137
第二节	时间尺度的建立	138
第三节	时间同步	139
第四节	时间编码	140
思考题	.....	142
第二章	世界时和区时	142
第一节	太阳时	142
第二节	世界时	143
第三节	地方时	145
第四节	时区	146
第五节	区时	147
思考题	.....	148
第三章	原子时和协调时	148
第一节	原子时	148
第二节	国际原子时	149
第三节	协调世界时	150
第四节	原子时算法	152
第五节	我国时间协调现状	153
思考题	.....	154
第四章	时间量的计量特性表征	155
第一节	时间准确特性表征量	155
第二节	钟速率	156
第三节	钟加速率	157
第四节	钟时间方程	158
第五节	时间方程应用实例	159
思考题	.....	161
第五章	计时器具的检定	162
第一节	计时器具	162
第二节	计时装置的演进	164
第三节	钟表的检定	165
第四节	校表仪的检定	166
第五节	检定仪的检定	167
第六节	数字钟的检定	168

目 录

第七节 时间间隔产生器的检定	169
第八节 数字式时间间隔测量仪的检定	170
思考题	171
参考文献	171

第四篇 远距离时频传递与校准

第一章 短波时频传递与校准	175
第一节 短波时频传递基本方法	175
第二节 短波时号发播程序	176
第三节 短波接收机	176
第四节 短波时频校准方法	178
第五节 短波时频校准的测量不确定度	178
思考题	179
第二章 长波时频传递校准	179
第一节 长波时频传递基本方法	180
第二节 长波时号发播程序	180
第三节 长波接收机	182
第四节 长波时频校准方法	183
第五节 传播路线时延的估算	184
第六节 长波时频校准的测量不确定度	185
思考题	187
第三章 电视时频传递与校准	187
第一节 电视时频传递基本方法	187
第二节 电视时频信号发播程序	188
第三节 电视定时校频仪器	189
第四节 电视时频校准方法	191
第五节 电视时频校准的测量不确定度	192
思考题	193
第四章 卫星时频传递与校准	193
第一节 卫星时频传递基本方法	193
第二节 共视法时间比对	195
第三节 国际共视时间比对	197

目 录

第四节	卫星双向时间比对	197
第五节	卫星时间传递的测量不确定度	200
思考题	.....	202
第五章	导航星全球定位系统(GPS)	202
第一节	GPS 系统组成	203
第二节	GPS 信号传递	203
第三节	GPS 导航电文	204
第四节	GPS 接收机	205
第五节	GPS 时频校准应用	206
思考题	.....	208
第六章	全球导航卫星系统(GLONASS)	209
第一节	GLONASS 系统组成	209
第二节	GLONASS 导航电文	210
第三节	GLONASS 坐标转换	211
第四节	GLONASS 与 GPS 比较	213
思考题	.....	214
参考文献	.....	215

第五篇 频率稳定度和相位噪声计量

第一章	频率稳定度和相位噪声计量基础知识	219
第一节	噪声与噪声类型	219
第二节	频率稳定度的表征	221
第三节	相位噪声的表征	225
第四节	两种表征的比较与转换	227
思考题	.....	229
第二章	频率稳定度检定	230
第一节	短期频率稳定度测量方法	230
第二节	短期频率稳定度检定	234
第三节	系统自身不稳定度的测量	237
第四节	测量结果的分析处理	238
第五节	测量不确定度分析评定	239
思考题	.....	240
第三章	连续波相位噪声计量	241

目录

第一节	直接频谱仪法	241
第二节	相位检波器法	243
第三节	鉴频器法	249
第四节	差拍计数器法	253
第五节	测量技术的选择与测量示例	254
思考题		257
第四章	附加相位噪声的测量	258
第一节	附加相位噪声的测量原理	258
第二节	附加相位噪声测量系统	259
第三节	附加相位噪声测量系统的定标	260
思考题		264
第五章	脉冲调制波相位噪声测量	264
第一节	脉冲调制波测量基础知识	264
第二节	脉冲调制波相位噪声测量系统	267
思考题		272
第六章	调幅噪声测量	272
第一节	调幅噪声的表征	273
第二节	双检波器法	274
第三节	单检波器法	275
思考题		278
第七章	频率捷变时间测量	278
第一节	频率捷变时间的表征	278
第二节	相位检波器法	279
第三节	延迟线鉴频器法	284
第四节	调制域分析仪法	285
第五节	数字解调法	286
第六节	频率捷变时间测量不确定度	287
思考题		288
第八章	频率稳定度和相位噪声量值传递	288
第一节	短期频率稳定度计量标准	288
第二节	频率校准源直接检定	291
第三节	相位噪声测量系统的间接比对校准	292
第四节	量传关系及检定规程	294
思考题		295
参考文献		295
附录		296