

全国大学生电子设计竞赛培训教程第5分册

电子仪器仪表与 测量系统设计

高吉祥 熊跃军 主 编
欧阳宏志 副主编
傅丰林 主 审



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

全国大学生电子设计竞赛培训教程第5分册



电子仪器仪表与 测量系统设计

高吉祥 熊跃军 主 编◎

欧阳宏志 副主编◎

李清江 陈新喜 周 群 张耀东 编◎

傅丰林 主 审◎

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是全国大学生电子设计竞赛培训教程第5分册,是针对全国大学生电子设计竞赛的特点和需求编写的。全书共7章,内容包括:时频测量仪设计、电气参数测量仪、时域测量仪、元件参数测量仪、频域测量仪、数据域测量仪和其他测量仪的工作原理、设计基础、设计方法及大量设计举例。

本书内容丰富实用、叙述条理清晰、工程性强,可作为高等学校电子信息类、自动化类、电气类、计算机类专业的大学生参加全国及省级电子设计竞赛、课程设计与制作、毕业设计的参考书,以及电子工程各类技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

全国大学生电子设计竞赛培训教程. 第5分册, 电子仪器仪表与测量系统设计 / 高吉祥, 熊跃军主编.
北京: 电子工业出版社, 2019.4

ISBN 978-7-121-29526-3

I. ①全… II. ①高… ②熊… III. ①电子仪器—设计—高等学校—教材
②电工仪表—设计—高等学校—教材 IV. ①TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第039158号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 谭海平 特约编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 577千字

版 次: 2019年4月第1版


印 次: 2019年4月第1次印刷

定 价: 59.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254535, wyl@phei.com.cn。



前 言

全国大学生电子设计竞赛是由教育部高等教育司、工业和信息化部人事教育司共同主办的面向全国高等学校本科、专科学生的一项群众性科技活动，目的在于推动普通高等学校在教学中培养大学生的创新意识、协作精神和理论联系实际的能力，加强学生工程实践能力的训练和培养；鼓励广大学生踊跃参加课外科技活动，把主要精力吸引到学习和能力培养上来，促进高等学校形成良好的学习风气；同时，也为优秀人才脱颖而出创造条件。

全国大学生电子设计竞赛自 1994 年至今已成功举办 13 届，深受全国大学生的欢迎和喜爱，参赛学校、参赛队和参赛学生逐年增加。对参赛学生而言，电子设计竞赛和赛前系列培训，使他们获得了电子综合设计能力，巩固了所学知识，并培养了他们用所学理论指导实践，团结一致，协同作战的综合素质；通过参加竞赛，参赛学生可以发现学习过程中的不足，找到努力的方向，为毕业后从事专业技术工作打下更好的基础，为将来就业做好准备。对指导老师而言，电子设计竞赛是新、奇、特设计思路的充分展示，更是各高等学校之间电子技术教学、科研水平的检验，通过参加竞赛，可以找到教学中的不足之处。对各高等学校而言，全国大学生电子设计竞赛现已成为学校评估不可缺少的项目之一，这种全国大赛是提高学校整体教学水平、改进教学的一种好方法。

全国大学生电子设计竞赛只在单数年份举办，但近年来，许多地区、省市在双数年份也单独举办地区性或省内电子设计竞赛，许多学校甚至每年举办多次各种电子竞赛，其目的在于通过这类电子大赛，让更多的学生受益。

全国大学生电子设计竞赛组委会为了组织好这项赛事，2005 年编写了《全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编（2005）》。我们在组委会的支持下，从 2007 年开始至今，编写了“全国大学生电子设计竞赛培训教程”（共 14 册），深受参赛学生和指导教师的欢迎和喜爱。

这一系列教程出版发行后，据不完全统计，被数百所高校采用，作为全国大学生电子设计竞赛及各类电子设计竞赛培训的主要教材或参考教材。读者纷纷来信来电表示这套教材写得很成功、很实用，同时也提出了许多宝贵意见。基于这种情况，从 2017 年开始，我们对此系列教程进行整编。新编写的 5 本系列教材包括：《基本技能训练与综合测评》《模拟电子线路与电源设计》《数字系统与自动控制系统设计》《高频电子线路与通信系统设计》和《电子仪器仪表与测量系统设计》。

《电子仪器仪表与测量系统设计》是新编系列教材的第 5 分册，是在前几版的基础上撰写而成的，删去了一些陈旧的内容，增加了 2013 年、2015 年和 2017 年的竞赛内容。全书共 7 章，第 1 章介绍时频测量仪设计，第 2 章介绍电气参数测量仪设计，第 3 章介绍时域测量仪设计，第 4 章介绍元器件参数测量仪设计，第 5 章介绍频域测量仪设计，第 6 章

介绍数据域参数测量仪设计，第7章介绍其他测量仪器设计。本书收集整理了历届关于电子仪器仪表和测量系统设计方面的竞赛试题17道，并将它们归类为了7章。每章的第一节介绍与本章相关的基本技术及关键器件，所举的每道试题均设有题目分析、方案论证与比较、理论分析与参数计算、软硬件设计、测试方法、测试结果及结果分析，内容丰富多彩。

参加本书编写工作的有高吉祥、熊跃军、欧阳宏志、李清江、陈新喜、周群、张耀东等。高吉祥、熊跃军任主编，欧阳宏志任副主编，李清江、陈新喜、周群、张耀东等参加了部分章节的编写。西安电子科技大学傅丰林教授在百忙之中对本书进行了主审。长沙学院电子信息与电气工程学院院长刘光灿、副院长刘辉为本书出版立项、编著、组织做了大量的工作。南华大学王彦教授、湖南科技大学吴新开教授为本书的编写提供了大量优秀作品和论文。长沙学院杨毅、熊思瑾等同学在文字编辑与校对方面做了大量的工作。北京理工大学罗伟雄教授、武汉大学赵茂泰教授等为本书编写出谋划策，对本书的修订提出了宝贵意见。再次表示衷心的感谢。

由于时间仓促，本书在编写过程中难免存在疏漏和不足，欢迎广大读者和同行批评指正。

编者

2019年1月



目 录

第 1 章 时频测量仪设计	1
1.1 时频测量仪设计基础	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 电子计数法测量频率	3
1.1.3 电子计数法测量时间	8
1.1.4 通用计数器	14
1.2 低频数字式相位测量仪设计	
[2003 年全国大学生电子设计竞赛 (C 题)]	19
1.2.1 题目分析	20
1.2.2 方案论证	21
1.2.3 硬件设计	27
1.2.4 软件设计	33
1.2.5 性能测试	37
1.2.6 设计改进	39
1.3 数字频率计	
[2015 年全国大学生电子设计竞赛 (F 题) (本科组)]	40
1.3.1 题目分析	41
1.3.2 方案论证	42
1.3.3 理论分析与计算	44
1.3.4 电路与程序设计	45
1.3.5 测试方案与测试结果	47
1.3.6 结论	49
1.4 简易数字信号传输性能分析仪	
[2011 年全国大学生电子设计竞赛 (E 题)]	49
1.4.1 题目分析	51
1.4.2 方案论证	52
1.4.3 系统设计与实现	54
1.4.4 测试方案及结果	61
第 2 章 电气参数测量仪设计	65
2.1 电气参数测量仪设计基础	65
2.1.1 概述	65



2.1.2	模拟式直流电压的测量	66
2.1.3	交流电压的测量	69
2.1.4	数字电压表简介	82
2.1.5	数字多用表	85
2.2	积分式直流数字电压表	
	[2007 年全国大学生电子设计竞赛 (G 题) (高职高专组)]	89
2.2.1	题目分析	90
2.2.2	方案论证	91
2.2.3	系统硬件与软件设计	92
2.2.4	系统测试	95
第 3 章	时域测量仪设计	96
3.1	时域测量仪设计基础	96
3.1.1	时域测量引论	96
3.1.2	示波管介绍	97
3.1.3	波形显示原理	101
3.2	简易数字存储示波器设计	
	[2001 年全国大学生电子设计竞赛 (B 题)]	109
3.2.1	题目分析	110
3.2.2	方案论证	111
3.2.3	硬件设计	120
3.2.4	系统测试	123
3.2.5	结论	125
3.3	数字示波器	
	[2007 年全国大学生电子设计竞赛 (C 题) (本科组)]	126
3.3.1	题目分析	127
3.3.2	系统方案	129
3.3.3	理论分析与计算	132
3.3.4	电路与程序设计	134
3.3.5	测试方案与测试结果	139
第 4 章	元器件参数测量仪设计	142
4.1	元器件参数测量仪设计基础	142
4.1.1	概述	142
4.1.2	电阻的测量	145
4.1.3	电感、电容的测量	148
4.1.4	晶体管特性图示仪	160
4.2	简易电阻、电容和电感测量仪设计	
	[1995 年全国大学生电子设计竞赛 (D 题)]	162
4.2.1	电阻、电容和电感测量原理	162
4.2.2	系统设计	165
4.2.3	测量系统误差的消除	170
4.3	集成运算放大器参数测量仪设计	
	[2005 年全国大学生电子设计竞赛 (B 题)]	172



4.3.1	集成运算放大器参数测量原理	174
4.3.2	系统设计	176
4.3.3	电路的抗干扰措施及调试	184
第5章	频域测量仪设计	187
5.1	频域测量仪设计基础	187
5.1.1	线性系统幅频特性的测量	187
5.1.2	频谱分析仪概述	193
5.1.3	外差式频谱分析仪	196
5.2	简易频率特性测试仪	
	[2013年全国大学生电子设计竞赛试题(E题)]	201
5.2.1	题目分析	203
5.2.2	方案论证	204
5.2.3	理论分析与计算	205
5.2.4	电路与程序设计	207
5.2.5	测试方案与测试结果	210
5.3	简易频谱分析仪设计	
	[2005年全国大学生电子设计竞赛(C题)]	212
5.3.1	题目分析	214
5.3.2	方案论证	214
5.3.3	系统组成及工作原理	216
5.3.4	硬件设计	217
5.3.5	软件设计	220
5.3.6	测试结果	222
5.4	音频信号分析仪	
	[2007年全国大学生电子设计竞赛(A题)(本科组)]	223
5.4.1	题目分析	224
5.4.2	系统方案	226
5.4.3	理论分析与计算	227
5.4.4	电路与程序设计	230
5.4.5	测试方案与测试结果	232
	附录A 三角波、锯齿波及方波的傅里叶级数系数 MATLAB 仿真	234
5.5	80~100MHz 频谱分析仪	
	[2015年全国大学生电子设计竞赛(E题)(本科组)]	237
5.5.1	题目分析	239
5.5.2	系统方案	240
5.5.3	理论分析与计算	241
5.5.4	电路与程序设计	242
5.5.5	测试方案与测试结果	247
5.6	远程幅频特性测试仪	
	[2017年全国大学生电子设计竞赛(H题)]	249
5.6.1	题目分析	250
5.6.2	系统方案论证与选择	252
5.6.3	系统理论分析与硬件电路设计	253



5.6.4	软件设计	257
5.6.5	测试结果	258
5.6.6	测试结果分析	259
第 6 章	数据域测试仪设计	260
6.1	数据域测试仪设计基础	260
6.1.1	数据域测试概述	260
6.1.2	逻辑分析仪的组成原理	267
6.2	简易逻辑分析仪设计	
	[2003 年全国大学生电子设计竞赛 (D 题)]	279
6.2.1	题目分析	281
6.2.2	方案论证	281
6.2.3	系统设计与原理框图	282
6.2.4	电路设计与说明	283
6.2.5	软件设计	290
6.2.6	系统测试	291
6.2.7	结论	291
第 7 章	其他测量仪器	293
7.1	直流电动机测速装置	
	[2017 年全国大学生电子设计竞赛 (O 题) (高职高专组)]	293
7.1.1	题目分析	294
7.1.2	系统方案	295
7.1.3	系统理论分析与计算	296
7.1.4	硬件电路与程序设计	296
7.2	简易水情检测系统	
	[2017 年全国大学生电子设计竞赛 (P 题) (高职高专组)]	299
7.2.1	题目分析	301
7.2.2	系统设计方案	305
7.2.3	系统设计与论证	306
7.2.4	电路与程序设计	307
7.2.5	测试方法、结果及分析	308
7.3	单相用电器分析监测装置	
	[2017 年全国大学生电子设计竞赛 (K 题)]	310
7.3.1	题目分析	312
7.3.2	系统方案	315
7.3.3	理论分析与计算	315
7.3.4	电路设计	316
7.3.5	程序设计	318
7.3.6	测试方案与测试结果	319
	参考文献	320

第①章

时频测量仪设计

1.1 时频测量仪设计基础

1.1.1 概述

1. 时频关系

时间是国际单位制中的 7 个基本物理量之一，其基本单位是秒，用 s 表示。在电子测量中，有时因为秒的单位太大而常用毫秒 (ms, 10^{-3} s)、微秒 (μ s, 10^{-6} s)、纳秒 (ns, 10^{-9} s)、皮秒 (ps, 10^{-12} s)。

“时间”一般有两种含义：一是指“时刻”；二是指“间隔”，即两个时刻之间的间隔，表示某事件持续了多久。

“频率”是指单位时间 (1s) 内周期性事件重复的次数，单位是赫兹 (Hz)。

可见，频率和周期 (时间) 是从不同侧面来描述周期性现象的，两者在数学上互为倒数，即

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1.1)$$

2. 时频标准

时间的单位是秒。随着科学技术的发展，“秒”的定义曾做过三次重大的修改。

1) 世界时 (UT) 秒

最早的时间 (频率) 标准是由天文观测得到的。以地球自转周期为标准测定的时间称为世界时 (UT)。定义地球自转周期的 $1/86400$ 为世界时的 1 秒，这种直接通过天文观测求得的秒为零类世界时 (UT_0)，其准确度在 10^{-6} 量级。后来，人们对地球自转轴微小移动 (称为极移) 效应进行了校正，得到了第一类世界时 (UT_1)；把地球自转的季节性、年度性变化校正后的世界时称为第二类世界时 (UT_2)，其准确度在 3×10^{-8} 量级。

2) 历书时 (ET) 秒

1960 年，国际计量大会决定采用以地球公转为基础的历书时 (ET) 秒作为时间单位，将 1900 年 1 月 1 日 0 时整起的回归年的 $1/31556925.9747$ 作为 1 秒，按此定义复现秒的准确度提高到 1×10^{-9} 量级。

世界时秒和历书时秒都是客观计时标准，它需要精密的天文观测，设备庞大，手续繁



杂，观测量周期期长，准确度有限。

3) 原子时 (AT) 秒

为了寻求更加恒定并能迅速测定的时间标准，人们从宏观世界转向微观世界，利用原子能级跃迁频率作为计时标准。1967年10月，第13届国际计量大会正式通过了秒的定义：“秒是 C_{133} 原子基态的两个超精细结构能级 $[F=4, m_F=0]$ 和 $[F=3, m_F=0]$ 之间跃迁频率相应的射线持续9192631770个周期的时间”。以此为标准定出的时间标准称为原子时秒，并从1972年1月1日零时起，时间单位秒由天文时秒改为原子时秒。这样，时间标准改为由频率标准来定义，其准确度可达 $\pm 5 \times 10^{-14}$ ，是所有其他物理量标准远远不能及的。

4) 协调世界时 (UTC) 秒

世界时和原子时之间互有联系，可以精确运算，但不能彼此取代，各有各的用处。原子时只能提供准确的时间间隔，而世界时考虑了时刻和时间间隔。

协调世界时秒是原子时和世界时折中的产物，即用闰秒的方法来对天文时进行修正。这样，国际上就可采用协调世界时来发送时间标准，即摆脱了天文定义，又使得准确度提高4~5个数量级，其准确度优于 $\pm 2 \times 10^{-11}$ 。

至此已明确，时间标准和频率标准具有同一性，可由时间标准导出频率标准，也可由频率标准导出时间标准，故通常统称为时频标准。

3. 频率测量方法

在电子测量中，频率测量与时间测量相比显得更为重要。根据测量方法的原理，对测量频率的方法大体上可做如图1.1.1所示的分类。



图 1.1.1 频率测量方法

频响法又称利用无源网络频率特性测频法，它包括电桥法和谐振法。比较法将被测频率信号与已知频率信号进行比较，通过观、听来比较结果，进而获得被测信号的频率。属于比较法的有拍频法、差频法和示波法。

计数法有电容充放电式和电子计数式两种：前者利用电子电路控制电容器充放电的次数或时间常数，再用磁电式仪表测量充、放电电流的大小，进而指示被测信号的频率值；后者是根据频率的定义进行测量的一种方法，它用电子计数器显示单位时间内通过被测信号的周期数来实现频率的测量。由于数字电路的飞速发展和数字集成电路的普及，计数器的应用已十分广泛。利用电子计数器测量频率具有精确度高、显示直观、测量迅速及便于



实现测量过程自动化等一系列优点，因此该法是目前最好的，也是我们要重点讨论的测频方法。

1.1.2 电子计数法测量频率

1. 电子计数法测频原理

1) 基本原理

根据频率的定义，若某一信号在 T 秒时间内重复变化了 N 次，则可知该信号的频率为

$$f_x = N/T \quad (1.1.2)$$

针对上述原理，可采用数字逻辑电路中的门电路（如与门）来实现，如图 1.1.2 所示。在与门 A 端加入被测信号被整形后的脉冲序列 f_x ，在 B 端加入宽度为 T 的控制信号（常称闸门信号），取 $T = 1\text{s}$ ，则 C 端仅在 T 期间有被测脉冲出现，然后送计数器计数，设计数值为 N 。由图 1.1.2 中的与门 C 端可以直接得出

$$NT_x = T$$

因此

$$f_x = N/T$$

实现了式 (1.1.2) 的测频原理。其方法可简述为“定时计数”，其实质上属于比较法测频，比较的时间基准是闸门信号 T 。

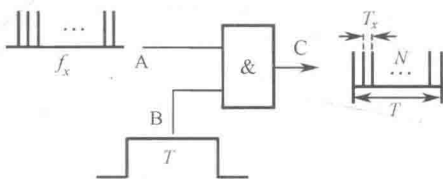


图 1.1.2 测频的原理

2) 组成框图

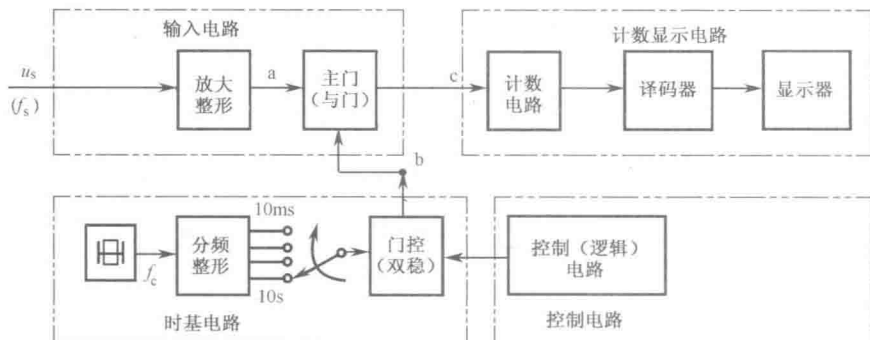
图 1.1.3 所示是计数式频率计测频的框图，它主要由以下 4 部分组成。

(1) 时基 (T) 电路。

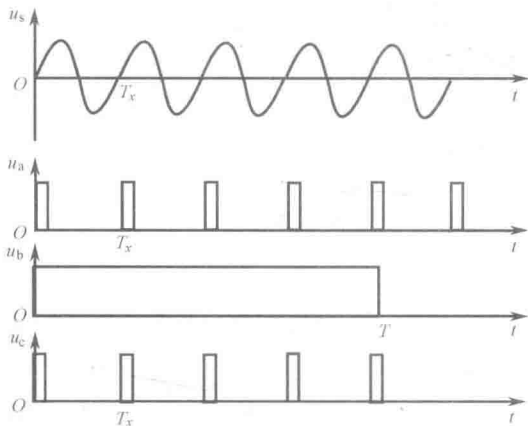
这部分的作用是提供准确的闸门时间 T 。它一般由高稳定度的石英晶体振荡器、分频整形电路与门控（双稳）电路组成。晶体振荡器输出的正弦信号（频率为 f_c ，周期为 T_c ）经 m 次分频，整形得到周期为 $T = mT_c$ 的窄脉冲，以此窄脉冲触发一个双稳（即门控）电路，从门控电路输出端即得所需的宽度为基准时间 T 的脉冲，它又称闸门时间脉冲。为了测量需要，在实际的电子计数式频率计中，时间基准选择开关分若干挡位。因此，时基电路具有以下两个特点。

① 标准性。闸门时间准确度应比被测频率高一个数量级以上，故通常晶振频率稳定度要求达 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ 。

② 多值性。闸门时间 T 不一定为 1s ，应让用户根据测频精度和速度的不同要求自由选择，如 10ms 、 0.1s 、 1s 和 10s 等。



(a) 原理框图



(b) 波形图

图 1.1.3 计数式频率计框图及波形图

(2) 输入电路。

这部分电路的作用是将被测周期信号转换为可计数的窄脉冲。它一般由放大整形电路和主门电路组成。被测输入周期信号(频率为 f_x 、周期为 T_x)经放大、整形、微分得周期为 T_x 的窄脉冲,送到主门的一个输入端,其波形变换过程如图 1.1.4 所示。主门的另一个控制端输入的是时间基准产生电路产生的闸门脉冲。在闸门脉冲开启主门期间,周期为 T_x 的窄脉冲才能经过主门,在主门的输出端产生输出。在闸门脉冲关闭主门期间,周期为 T_x 的窄脉冲不能在主门的输出端产生输出。在闸门脉冲控制下,主门输出的脉冲将输入计数器计数,因此将主门输出的脉冲称为计数脉冲,相应的这部分电路称为计数脉冲产生电路。

(3) 计数显示电路。

简单地说,计数显示电路的作用就是累计被测周期信号重复的次数,显示被测信号的频率。它一般由计数电路、译码器和显示器组成。在逻辑控制电路的控制下,计数器对主门输出的计数脉冲实施二进制计数,其输出经译码器转换为十进制数,输出到数码管或显示器件进行显示。因为时基 T 都是 10 的整数次幂倍秒,因此显示的十进制数就是被测信号的频率,其单位可能是 Hz、kHz 或 MHz。

(4) 控制电路。

控制电路的作用是产生各种控制信号,以便控制各电路单元的工作,使整机按一定的

工作程序完成自动测量的任务。在控制电路的统一指挥下,电子计数器的工作按照“复零—测量—显示”的程序自动进行,其工作流程如图 1.1.5 所示。

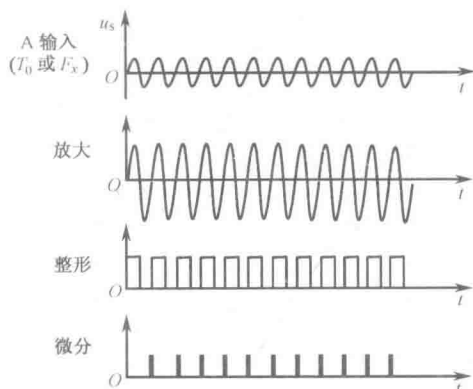


图 1.1.4 输入电路工作波形图

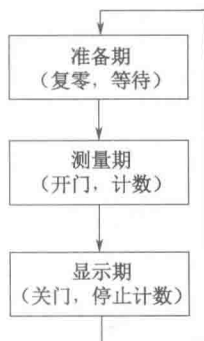


图 1.1.5 电子计数器的工作过程

测频时,电子计数器的工作过程如下。

准备期: 在开始进行一次测量之前应当做好的准备工作是,使各计数电路回到原始状态,并抹掉读数,这一过程称为“复零”。“复零”完成后,控制电路撤掉对门控双稳的闭锁信号(解锁),门控双稳处于等待状态,等待一个闸门信号(秒信号)的触发。

测量期: 通过闸门信号选择开关从时基电路选取 1Hz 的频标信号作为开门时间控制信号。门控双稳在 1Hz 频标信号的触发下产生秒脉冲,使主门准确地开启 1s。在这 1s 时间内,输入信号通过主门到计数电路计数的这段时间称为测量时间。

显示期: 在一次测量完毕后,关闭主门,把计数结果送到显示电路显示。为便于读取或记录测量结果,显示的读数应当保持一定的时间(显示时间长短通常可调,如 0.1~20s)。在这段时间内,主门应被闭锁,这段时间称为显示时间。显示时间结束后,再做下一次的准备工作。

电子计数器的测频原理实质上是以比较法为基础的,它将被测信号频率 f_x 和已知时基信号频率 f_c 相比较,并以数字形式显示相比较的结果。

2. 误差分析计算

在测量中,误差分析计算是不可少的。理论上讲,不管测量什么物理量,不管采用什么测量方法,只要进行测量,就可能存在误差。误差分析的目的就是要找出引起测量误差的主要原因,从而有针对性地采取有效措施,减小测量误差,提高测量的精确度。虽然电子计数式测量频率的方法有许多优点,但这种测量方法也存在测量误差。下面来分析电子计数测频的测量误差。

由式 (1.1.2) 可求得

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta N}{N} - \frac{\Delta T}{T} \quad (1.1.3)$$

从式 (1.1.3) 可以看出,电子计数测量频率方法引起的频率测量相对误差,由计数器计数脉冲相对误差和标准时间相对误差两部分组成。因此,对这两种相对误差可以分别加以讨论,然后相加得到总的频率测量相对误差。



1) 量化误差——±1 误差

在测频时，主门的开启时刻与计数脉冲之间的时间关系是不相关的，即它们在时间轴上的相对位置是随机的。这样，即使是在相同的主门开启时间 T 内（先假定标准时间相对误差为零），计数器所计得的数也不一定相同。如图 1.1.6 (a) 所示，第一种情况进入 8 个脉冲，第二种情况只进入 7 个脉冲，即导致了多 1 个或少 1 个的 ±1 误差，这是频率量化时带来的误差，故称量化误差，又称脉冲计数误差或 ±1 误差。

上述 ±1 误差还可通过图 1.1.6 (b) 进行进一步的分析。图中， T 为计数器的主门开启时间， T_x 为被测信号周期， Δt_1 为主门开启时刻至第一个计数脉冲前沿的时间（假设计数脉冲前沿使计数器翻转计数）， Δt_2 为闸门关闭时刻至下一个计数脉冲前沿的时间。设计数值为 N （处在 T 区间内的窄脉冲个数，图中 $N=6$ ），由图可得

$$T = NT_x + \Delta t_1 - \Delta t_2 = \left(N + \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_x} \right) T_x$$

$$\Delta N = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_x} \quad (1.1.4)$$

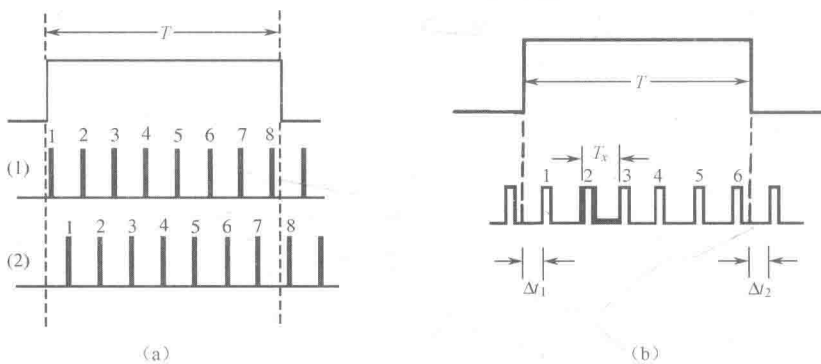


图 1.1.6 量化误差

考虑 Δt_1 和 Δt_2 都是不大于 T_x 的正时间量，由式 (1.1.4) 可以看出： $\Delta t_1 - \Delta t_2$ 虽然可能为正或为负，但它的绝对值不会大于 T_x ， ΔN 的绝对值也不会大于 1，即 $|\Delta N| \leq 1$ 。再联系 ΔN 为计数增量，它只能为实整数，可对照图 1.1.6 进行分析，在 T 、 T_x 为定值的情况下，可以令 $\Delta t_1 \rightarrow 0$ 或 $\Delta t_1 \rightarrow T_x$ ，也可令 $\Delta t_2 \rightarrow 0$ 或 $\Delta t_2 \rightarrow T_x$ 。经如上讨论可得 ΔN 的取值只有 3 个可能的值，即 $\Delta N = 0$ 、 $\Delta N = 1$ 或 $\Delta N = -1$ 。所以，脉冲计数最大绝对误差即 ±1 误差为

$$\Delta N = \pm 1 \quad (1.1.5)$$

联系式 (1.1.5) 和式 (1.1.2)，可写出脉冲计数最大相对误差为

$$\frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N} = \pm \frac{1}{f_x T} \quad (1.1.6)$$

式中， f_x 为被测信号频率； T 为闸门时间。由式 (1.1.6) 不难得出结论：脉冲计数相对误差与被测信号频率和闸门时间成反比。也就是说，被测信号频率越高、闸门时间越宽，脉冲计数相对误差越小。

2) 闸门时间误差（标准时间误差）

如果闸门时间不准，造成主门启闭时间或长或短，那么显然会产生测频误差。闸门信号 T 是由晶振信号分频得到的。设晶振频率为 f_c （周期为 T_c ），分频系数为 m ，因此有

$$T = mT_c = m \frac{1}{f_c} \quad (1.1.7)$$

由误差合成定理, 对式 (1.1.7) 微分, 得

$$\frac{dT}{T} = -\frac{df_c}{f_c}$$

考虑到相对误差定义中使用的是增量符号 Δ , 用增量符号代替上式中的微分符号, 由此上式改写为

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\Delta f_c}{f_c} \quad (1.1.8)$$

式 (1.1.8) 表明, 闸门时间相对误差在数值上等于晶振频率的相对误差。由于它是测量频率的比较标准, 所以也称标准频率误差或时基误差。通常, 对标准频率准确度 $\Delta f_c / f_c$ 的要求是根据所要求的测频准确度提出的, 例如, 测量方案的最小计数单位为 1Hz, $f_x = 10^6 \text{Hz}$, 在 $T = 1 \text{s}$ 时的测量准确度为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ (只考虑 ± 1 误差), 为了使标准频率误差不对测量结果产生影响, 石英晶体振荡器的输出频率准确度 $\Delta f_c / f_c$ 应优于 1×10^{-7} , 即比 ± 1 误差引起的测频误差小一个数量级。

3. 结论

综上所述, 可得如下结论。

(1) 计数器直接测频的误差主要有两项, 即 ± 1 误差和标准频率误差。一般总误差可采用分项误差绝对值合成, 即

$$\frac{\Delta f_c}{f_c} = \pm \left(\frac{1}{f_x T} + \left| \frac{\Delta f_c}{f_c} \right| \right) \quad (1.1.9)$$

式 (1.1.9) 可绘成图 1.1.7 所示的误差曲线, 即 $\Delta f_x / f_x$ 与 T 、 f_x 及 $\Delta f_c / f_c$ 的关系曲线。由图可见, f_x 一定时, 闸门时间 T 选得越长, 测量准确度越高。而当 T 选定后, f_x 越高, 则由 ± 1 误差对测量结果的影响越小, 测量准确度越高。但是, 随着 ± 1 误差影响的减小, 标准频率误差 $\Delta f_c / f_c$ 将对测量结果产生影响, 并以 $|\Delta f_c / f_c|$ (图中以 5×10^{-9} 为例) 为极限, 即测量准确度不可能优于 5×10^{-9} 。

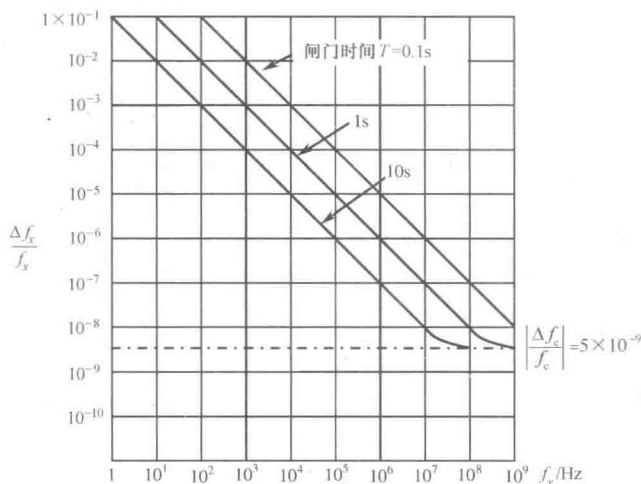


图 1.1.7 计数器测频时的误差曲线



(2) 测量低频时, ± 1 误差产生的测频误差大得惊人, 例如 $f_x = 10\text{Hz}$, $T = 1\text{s}$ 时, 由 ± 1 误差引起的测频误差可达 10%, 因此测量低频时不宜采用直接测频方法。

1.1.3 电子计数法测量时间

本节介绍的时间量的测量主要是指与频率对应的周期、相位及时间间隔等时间参数, 且重点讨论周期的测量。周期是频率的倒数, 既然电子计数器能测量信号的频率, 我们自然会联想到电子计数器也能测量信号的周期, 二者在原理上有相似之处, 但又不等同。下面进行具体的讨论。

1. 电子计数法测量周期的原理

图 1.1.8 所示是应用计数器测量信号周期的原理框图, 将它与图 1.1.3 对照, 可以看出, 它是将图 1.1.3 中的晶振标准频率信号与输入被测信号的位置对调构成的。

当输入信号为正弦波时, 图中各点的波形如图 1.1.9 所示。可以看出, 被测信号经放大整形后, 形成控制闸门脉冲信号, 其宽度等于被测信号的周期 T_x 。晶体振荡器的输出或经倍频后得到频率为 f_c 的标准信号, 其周期为 T_c , 加于主门输入端, 在闸门时间 T_x 内, 标准频率脉冲信号通过闸门形成计数脉冲, 送至计数器计数, 经译码显示计数值 N 。

由图 1.1.9 所示的波形图可得

$$T_x = NT_c = \frac{N}{f_c} \quad (1.1.10)$$

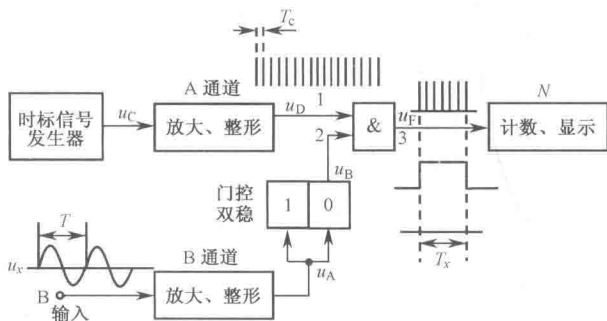


图 1.1.8 测量信号周期的原理框图

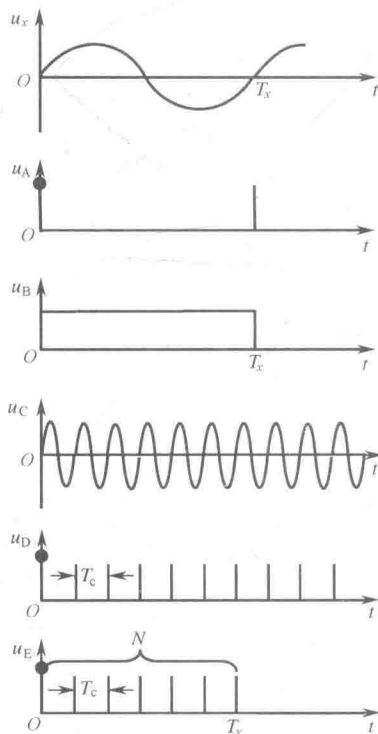


图 1.1.9 图 1.1.8 中各点的波形