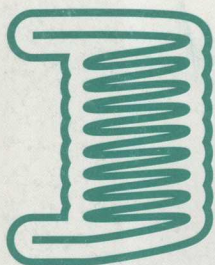


全国大学生电子设计竞赛
系列教材 第5分册

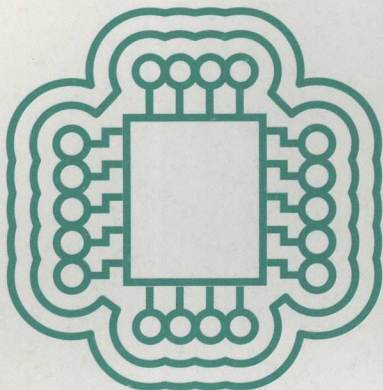
 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

电 子 仪 器 仪 表 设计 Design

主编 高吉祥 主审 傅丰林



2

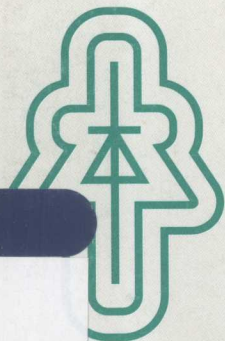
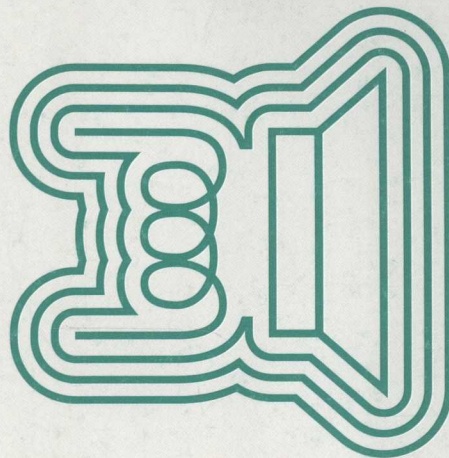
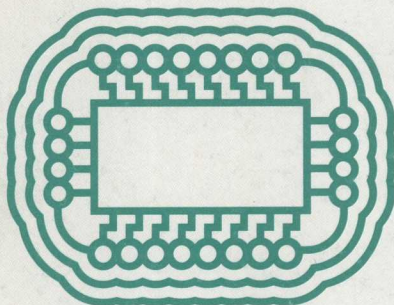


9

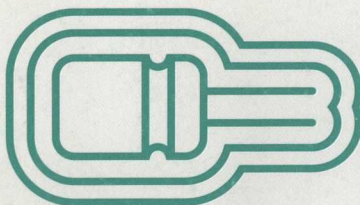
1



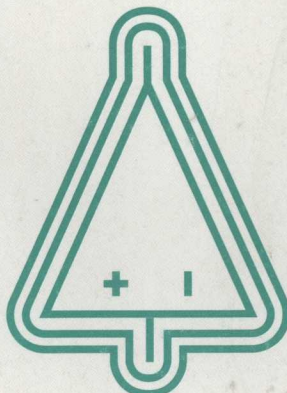
7



5



6



4



Dianzi Yiqi Yibiao Sheji

全国大学生电子设计竞赛
系列教材

第5分册

高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

013070786

电子 仪器仪表 设计 Design

主编 高吉祥 主审 傅丰林
编者 张仁民 宋庆恒 刘安芝

TM930.2
05



中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第120246号

责任编辑 张申申 封面设计 张申申
责任印制 刘 磊 设计 刘 磊
地址 北京市西城区德胜门内大街2号
邮政编码 100120
电话 010-82311118
网址 <http://www.hep.com.cn>
<http://www.hep.com.cn>
3013年8月第1次
3013年8月第1次印刷
定价 38.70元

TM 930.2
05



北航 C1678249

内容简介

本书是针对全国大学生电子设计竞赛特点和需要,为高等学校电子信息类、自动化类、电气类、计算机类专业学生编著的培训教材。全书共有6章,内容包括:时频测量仪、电气参数测量仪、时域测量仪、元器件参数测量仪、频域测量仪、数据域测试仪的工作原理、设计基础、设计方法及大量的设计举例。本书内容丰富实用,叙述条理清晰,工程性强,可以作为全国大学生电子设计竞赛的培训教材,也可以作为参加各类电子制作、课程设计、毕业设计的参考书,以及电子工程技术人员进行电子设计与制作的参考书。

高吉祥 主编
袁坤 副主编
刘春萍 副主编

图书在版编目(CIP)数据

电子仪器仪表设计 / 高吉祥主编. --北京:高等教育出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-04-037936-5

I. ①电… II. ①高… 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. ①TM930.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 156246 号

策划编辑 欧阳舟
插图绘制 尹莉

责任编辑 袁坤
责任校对 刘春萍

封面设计 张申申
责任印制 尤静

式设计 余杨

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京四季青印刷厂
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 26
字数 600千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013年8月第1版
印 次 2013年8月第1次印刷
定 价 38.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 37936-00

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司共同主办的面向大学生、大中专生的一项群众性科技活动,目的在于推动普通高等学校的电子信息类学科面向21世纪的课程体系和课程内容改革,引导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学风,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年至今已成功举办了十届,深受全国大学生的欢迎和喜爱,参赛学校、队和学生逐年递增。对参赛学生而言,通过电子设计竞赛和赛前系列培训,他们获得电子综合设计能力,巩固所学知识,并培养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,参赛学生可以找到学习过程中的不足,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,为提高就业做好准备。对指导老师而言,是新、奇、特设计思路的充分展示,更是各高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。对各高校而言,现已成为高校评估不可少的项目之一,这种全国大赛是提高学校整体教学水平,改进教学的好方法之一。

全国大学生电子设计竞赛仅在单数年份举办,但近几年来,许多地区、省市在双数年份单独举办地区性或省内电子竞赛,还有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年曾编写了《全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编(2005)》。我们在全国组委会的支持下,从2007年开始至今,编写了“全国大学生电子设计竞赛培训系列教程”(共9册),深受参赛学生和指导老师的欢迎和喜爱。

“全国大学生电子设计竞赛培训系列教程”(共9册)包括:①《电子技术基础实验与课程设计》;②《基本技能训练与单元电路设计》;③《模拟电子线路设计》;④《数字系统及自动控制系统设计》;⑤《高频电子线路设计》;⑥《电子仪器仪表设计》;⑦《2007年全国大学生电子设计竞赛试题剖析》;⑧《2009年全国大学生电子设计竞赛试题剖析》;⑨《2011年全国大学生电子设计竞赛试题剖析》。

这一系列教程自出版发行后,据不完全统计有数百所高校采用此套教材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。读者纷纷来信来电认为这套教材写的很成功,很实用,同时也提出了许多宝贵意见。基于这种情况,从2011年开始,对系列教程进行整编。新编著的5本系列教程包括:《基本技能训练与单元电路设计》、《模拟电子线路设计》、《数字系统及自动控制系统设计》、《高频电子线路设计》和《电子仪器仪表设计》。

《电子仪器仪表设计》是新编系列教程的第5分册,全书共六章。第1章 时频测量仪设计,主要介绍时频测量仪设计基础、简易数字频率计设计(1997年全国大学生电子设计竞赛B题)、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)、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)。第2章 电气参数测量仪,主要介绍了电气参数测量仪设计基础、数字式工频有效值测量仪设计(1999年全国大学生电子设计竞赛B题)、简易综合测试仪设计(2004年全国大学生电子设计竞赛C题)。第3章 时域测量仪设计,主要介绍时域测量仪设计基础、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)。第4章 元器件参数测量仪设计,主要介绍了元器件参数测量仪设计基础、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)、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)。第5章 频域测量仪设计,主要介绍了频域测量仪设计基础、频率特性测试仪设计(1999年全国大学生电子设计竞赛C题)、简易频谱分析仪设计(2005年全国大学生电子设计竞赛C题)、数字式频谱分析仪设计(优秀毕业设计)。第6章 数据域测试仪设计,主要介绍了数据域测试仪设计基础、简易逻辑分析仪(2003年全国大学生电子设计竞赛D题)。本书搜集整理了历届关于电子仪器仪表设计方面的设计试题,所举每个试题均设有题目分析(或题目剖析)、方案论证及比较、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,内容极其丰富精彩。

参加本书编著工作的有高吉祥、张仁民、宋庆恒、刘安芝等人。全书由高吉祥主编,张仁民、宋庆恒、刘安芝等参与部分章节的编写。西安电子科技大学教授、博导,现任全国大学生电子设计竞赛专家组副组长傅丰林在百忙中对全书进行主审,中国工程院院士凌永顺,中国微电子学专家、东南大学教授、博导王志功,北京理工大学博导、教授,现任全国大学生电子设计竞赛专家组责任专家罗伟雄,武汉大学教授、博导,全国大学生电子设计竞赛专家组责任专家赵茂泰等,为本书出谋划策,提出宝贵意见,为此,表示万分感谢。

编者

2013年3月



郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

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	15
1.2 简易数字频率计设计(1997年 全国大学生电子设计竞赛 B题)	19
1.2.1 题目分析	21
1.2.2 方案论证	28
1.2.3 硬件设计	29
1.2.4 软件设计	31
1.2.5 系统指标测试	32
1.3 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)	33
1.3.1 题目分析	34
1.3.2 方案论证	35
1.3.3 硬件设计	41
1.3.4 软件设计	49
1.3.5 性能测试	51
1.3.6 设计改进	54
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)	54
1.4.1 题目分析	57
1.4.2 方案论证	57
1.4.3 系统设计与实现	60
1.4.4 测试方案及结果	67
第2章 电气参数测量仪设计	73
2.1 电气参数测量仪设计基础	73
2.1.1 概述	73
2.1.2 模拟式直流电压的测量	74
2.1.3 交流电压的测量	77
2.1.4 数字电压表简介	90
2.1.5 数字多用表	94
2.2 数字式工频有效值测量仪设计 (1999年全国大学生电子 设计竞赛B题)	99
2.2.1 工频参数的数学表达式	100
2.2.2 工频参数测量原理	101
2.2.3 系统设计	104
2.3 简易综合测试仪设计(2004年 湖北大学生电子设计竞赛 C题)	115
2.3.1 测量原理	116
2.3.2 系统设计	123
2.4 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)]	132
2.4.1 题目分析	133
2.4.2 方案论证	133
2.4.3 系统硬件与软件设计	135
2.4.4 系统测试	139
第3章 时域测量仪设计	140
3.1 时域测量仪设计基础	140
3.1.1 时域测量引论	140
3.1.2 示波管介绍	141



3.1.3 波形显示原理	145	4.3.2 系统设计	271
3.1.4 通用示波器	152	4.3.3 电路的抗干扰措施及 调试	279
3.1.5 取样示波器	167		
3.1.6 数字示波器	171		
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)	193	第 5 章 频域测量仪设计	283
3.2.1 题目分析	194	5.1 频域测量仪设计基础	283
3.2.2 方案论证	196	5.1.1 线性系统幅频特性的 测量	283
3.2.3 硬件设计	205	5.1.2 频谱分析仪概述	288
3.2.4 系统测试	211	5.1.3 外差式频谱分析仪	292
3.2.5 结论	212	5.1.4 频谱仪的主要技术特性	297
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)]	212	5.1.5 频谱仪的应用	303
3.3.1 题目分析	214	5.2 频率特性测试仪设计(1999 年 全国大学生电子设计竞赛 C 题)	312
3.3.2 方案论证	216	5.2.1 题目分析	314
3.3.3 理论分析与计算	219	5.2.2 方案论证	314
3.3.4 电路与程序设计	221	5.2.3 硬件设计	324
3.3.5 测试方案与测试结果	230	5.2.4 软件设计	328
		5.2.5 测试结果	330
第 4 章 元器件参数测量仪设计	232	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)	330
4.1 元器件参数测量仪设计基础	232	5.3.1 题目分析	332
4.1.1 概述	232	5.3.2 方案论证	332
4.1.2 电阻的测量	236	5.3.3 系统组成及工作原理	334
4.1.3 电感、电容的测量	239	5.3.4 硬件设计	336
4.1.4 晶体管特性图示仪	252	5.3.5 软件设计	339
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)	254	5.3.6 测试结果	341
4.2.1 电阻、电容和电感测量 原理	255	5.4 数字式频谱分析仪设计(优秀 毕业论文设计)	342
4.2.2 系统设计	258	5.4.1 方案论证	342
4.2.3 测量系统误差的消除	266	5.4.2 硬件设计	345
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)	266	5.4.3 软件设计	348
4.3.1 集成运算放大器参数 测量原理	269	5.4.4 系统测试及结果分析	349
		5.5 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)]	351



5.5.1 题目分析	352	6.2 简易逻辑分析仪设计(2003年	
5.5.2 系统方案	356	全国大学生电子设计竞赛	
5.5.3 理论分析与计算	357	D题).....	390
5.5.4 电路与程序设计	360	6.2.1 题目分析	392
5.5.5 测试方案与测试结果	362	6.2.2 方案论证	392
附录 A: 三角波、锯齿波及方波的		6.2.3 系统设计与原理框图	393
傅里叶级数系数 MATLAB		6.2.4 电路设计与说明	395
仿真	365	6.2.5 软件设计	401
第 6 章 数据域测试仪设计	370	6.2.6 系统测试	402
6.1 数据域测试仪设计基础	370	6.2.7 结论	403
6.1.1 数据域测试概述	370	参考文献	405
6.1.2 逻辑分析仪的组成原理	377		



1.1 时频测量仪设计基础

1.1.1 概述

一、时频关系

时间是国际单位制中7个基本物理量之一,它的基本单位是秒,用s表示。在电子测量中,有时又因为秒的单位太大,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”,在一般概念中有两种含义:第一,是指“时刻”;第二,是指“间隔”,指两个时刻之间的间隔,表示该事件持续了多久。

“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

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

二、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而测定的时间称为世界时(UT)。定义地球自转周期的1/86 400作为世界时的1秒,这种直接通过天文观察求得的时间秒为零类世界时(UT_0),其准确度在 10^{-6} 量级。后来,对地球自转轴微小移动(称极移)效应进行了校正,得到第一类世界时(UT_1)。再把地球自转的季节性、年度性的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。

1960年,国际计量大会决定采用以地球公转运动为基础的历书时(ET)秒作为时间单位,将1900年1月1日0时整起的回归年的1/31 556 925.974 7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,观察周期长,准确度有限。



2. 原子时(AT)秒

为了寻求更加恒定,又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来持续9 192 631 770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,时间单位秒由天文秒改为原子秒。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不能及的。

3. 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,国际上则可采用协调世界时来发送时间标准,即摆脱了天文定义,又使准确度可提高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。

三、频率测量方法

在电子测量中,频率测量比时间测量显得更为重要。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。比较法是将被测频率信号与已知频率信号相比较,通过观、听比较结果,获得被测信号的频率。属比较法的有: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。前者是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,从而指示出被测信号的频率值。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个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,显示醒目直观,测量迅速,以及便于实现测量过程自动化等一系列突出优点,所以该法是目前最好的,也是我们将要重点详细讨论的测频方法。

1.1.2 电子计数法测量频率

一、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

$$f_x = \frac{N}{T} \quad (1.1.2)$$

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 端仅能在 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 中与门 C 端可以直接得出

$$NT_x = T$$

因此

$$f_x = \frac{N}{T}$$

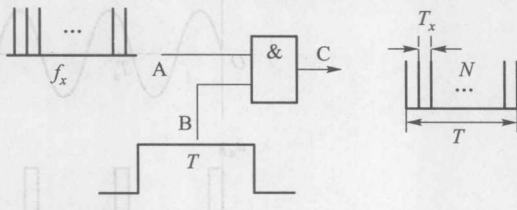


图 1.1.2 测频的原理

实现了式(1.1.2)的测频原理。其方法可简

述为“定时计数”,其实质属比较法测频,比较的时间基准是闸门信号 T 。

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

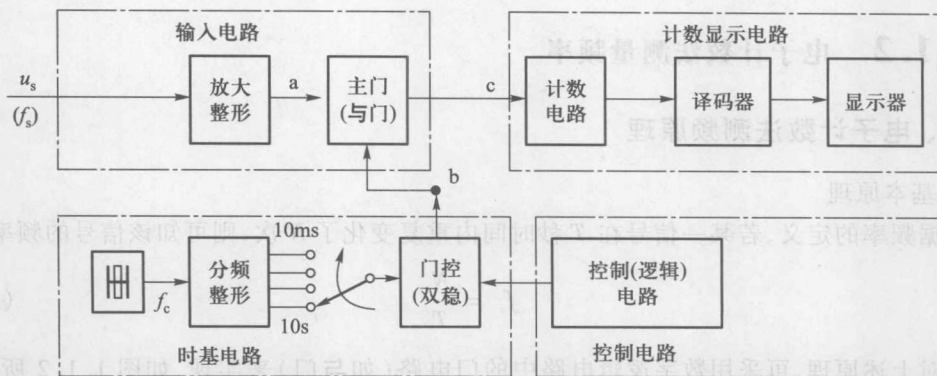
这部分的作用就是提供准确的闸门时间 T 。它一般由高稳定度的石英晶体振荡器、分频整形电路与门控(双稳)电路组成。晶体振荡器输出的正弦信号(频率为 f_c ,周期为 T_c),经 m 次分频,整形得到周期为 $T = mT_c$ 的窄脉冲,以此窄脉冲触发一个双稳(即门控)电路,从门控电路输出端即得所需要的宽度为基准时间 T 的脉冲,它又称为闸门时间脉冲。为了测量需要,在实际的电子计数式频率计中,时间基准选择开关分若干挡位。因此时基电路具有以下两个特点。

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 $10^{-6} \sim 10^{-10}$ 。

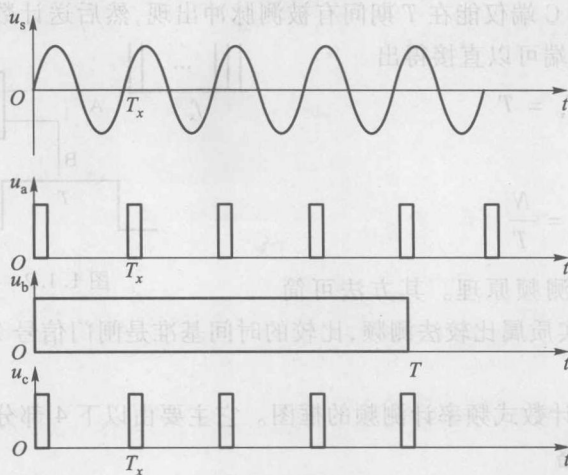
② 多值性。闸门时间 T 不一定为 1 s ,应让用户根据测频精度和速度的不同要求自由选择,如 10 ms , 0.1 s , 1 s 和 10 s 等。

(2) 输入电路

这部分电路的作用是将被测的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 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



(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

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,所以将主门输出的脉冲称为计数脉冲。相应的这部分电路也称为计数脉冲产生电路。

(3) 计数显示电路

这部分电路的作用,简单地说,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,所以显示出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,去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”的程序自动地进行,其工作流程如图 1.1.5 所示。

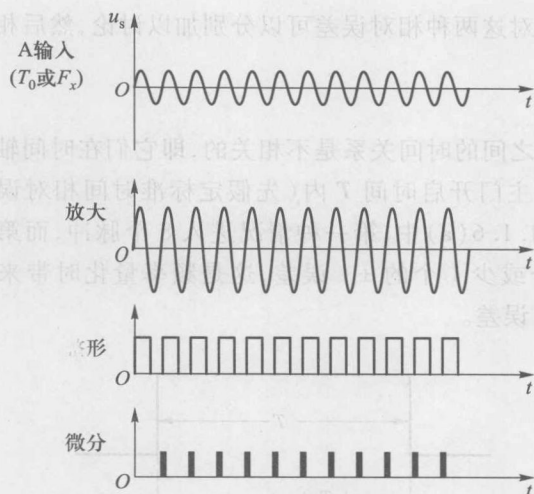


图 1.1.4 输入电路工作波形图



图 1.1.5 电子计数器的工作过程

在测频时,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”。在“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 1 Hz 的频标信号作为开门时间控制信号。门控双稳在 1 Hz 频标信号的触发下产生秒脉冲,使主门准确地开启 1 s。在这 1 s 时间内,输入信号通过主门到计数电路计数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去显示。为了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(显示时间长短通常是可调的,如在 0.1 ~ 20 s)。在这段时间内,主门应当被闭锁,这段时间称为显示时间。显示时间完结后,再做下一次测量的准备工作。

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 和已知的时基信号频率 f 相比,将相比的结果以数字的形式显示出来。

二、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,不管对什么物理量的测量,不管采用什么样的测量方法,只要进行测量,就可能有误差存在。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着测量误差。下面来分析电子计数测频的测量误差。

由式(1.1.2)可求得

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

从上式可以看出,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),计数器所计得的数却不一定相同。图 1.1.6(a)中,第一种情况进入 8 个脉冲,而第二种情况却只进入 7 个脉冲,即引起可能多 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。

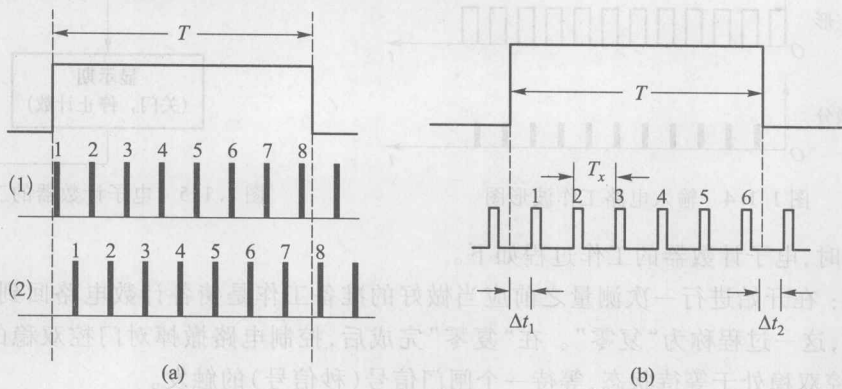


图 1.1.6 量化误差

上述 ± 1 误差还可由图 1.1.6(b) 进行进一步严密分析。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 区间之内的窄脉冲个数, 图中 $N=6$), 由图可得

$$\begin{aligned}
 T &= NT_x + \Delta t_1 - \Delta t_2 \\
 &= \left[N + \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_x} \right] T_x \\
 \Delta N &= \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T_x} \quad (1.1.4)
 \end{aligned}$$

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

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

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。即被测信号频率越高、闸门时间越宽, 此项相对误差越小。

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, 显然要产生测频误差。闸门信号 T 是由晶振信号分频而得的。设晶振频率为 f_c (周期为 T_c), 分频系数为 m , 所以有

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

由误差合成定理, 对式(1.1.7)微分, 得

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

考虑相对误差定义中使用的是增量符号 Δ , 所以用增量符号代替上式中微分符号, 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, 故也称标准频率误差或时基误差。通常, 对标准频率准确度 $\frac{\Delta f_c}{f_c}$ 的要求是根据所要求的测频准确度提出来的, 如当测量方案的最小计数单位为 1 Hz, 而 $f_x = 10^6$ Hz, 在 $T = 1$ 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 $\frac{\Delta f_c}{f_c}$ 应优于 1×10^{-7} , 即比 ± 1 误差引起的测频误差小一个数量级。

三、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

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

可把式(1.1.9)画成图 1.1.7 所示的误差曲线, 即 $\frac{\Delta f_x}{f_x}$ 与 $T f_x$ 及 $\frac{\Delta f_c}{f_c}$ 的关系曲线。由图可见, 在 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 $\frac{\Delta f_c}{f_c}$ 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} 。

(2) 测量低频时, 由于 ± 1 误差产生的测频误差大得惊人。例如, $f_x = 10$ Hz, $T = 1$ s 时, 则

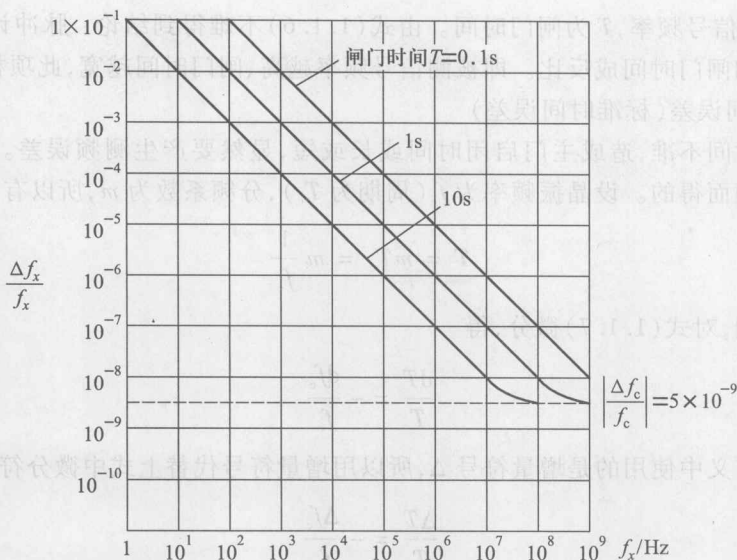


图 1.1.7 计数器测频时的误差曲线

由 ± 1 误差引起的测频误差可达 10%。所以,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,我们会自然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。

一、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 中晶振标准频率信号和输入被测信号的位置对调而构成的。当输入信号为正弦波时,图中各点波形如图 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

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

当 T_c 一定时,计数结果可直接表示为 T_x 值。例如, $T_c = 1 \mu\text{s}$, $N = 852$ 时,则 $T_x = 852 \mu\text{s}$; $T_c = 0.1 \mu\text{s}$, $N = 12\,345$ 时, $T_x = 1\,234.5 \mu\text{s}$ 。在实际电子计数器中,根据需要, T_c 可以有几种数值,用有若干挡位的开关实施转换,显示器能自动显示时间单位和小数点,使用起来非常方便。