

基于时域反射原理的 电缆测长技术

宋建辉 刘砚菊 文峰 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

编号:LT2012005

辽宁省教育厅资助项目“智能检测与网络化测控”

基于时域反射原理的 电缆测长技术

宋建辉 刘砚菊 文 峰 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

时域反射电缆测长技术与传统电缆长度测量方法比较,具有无损、便携、精度高等特点。本书对基于时域反射原理的电缆测长技术进行了介绍,全书共7章,系统介绍了时域反射电缆测长模型的建立、非线性误差分析、发射波与反射波时间间隔的精确测量、波速的特性、反射波波前的识别等技术。

本书的特点在于理论与实际相结合,书中通过大量的实验对理论分析进行了验证。本书可作为通信线路故障检测、工程结构和地质灾害、无损检测等相关领域的工程技术人才的参考书。也可作为测控技术与仪器、自动化测试与控制、电气工程及其自动化等相关专业的学生的参考读物。



基于时域反射原理的电缆测长技术 / 宋建辉, 刘砚菊,
文峰著. — 北京: 国防工业出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-118-09451-0

I. ①基… II. ①宋… ②刘… ③文… III. ①时域-
反射-电缆-长度计量 IV. ①TM249.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 092128 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 7½ 字数 200 千字

2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

随着国民经济的飞速发展,各种电线电缆得到了广泛的应用,电线电缆行业得到迅速发展,生产规模逐渐壮大,市场占有率逐年提升。电缆作为重要的长度类商品,在生产和经营中要对其净含量进行计量检验,国家标准对电缆长度测量精度要求很高。然而,目前电线电缆市场上存在的计量问题日臻突出,如何准确、迅速、经济地实现对电缆长度的测量,具有重要的理论意义和研究价值。

时域反射技术在故障检测、工程结构和地质灾害等方面有广泛的应用,早期主要应用于通信方面,尤其在电话电缆的线路检测方面,常被用于电缆故障定位。电缆故障定位技术经过国内外专家学者几十年的共同努力,已取得了很多有价值的成果。但由于实际情况的复杂性,影响定位精度的因素很多,故障定位领域还有很多问题尚未完全解决,如反射波识别,波速不确定性等,测量精度不高。

与传统测量方法比较,时域反射技术可以实现对电缆长度的无损、便携、高精度检测,是电缆长度测量的理想方式。世界各国对时域反射电缆长度测量方法进行了大量的研究,已经达到了较高的精度。我国在这方面的研究落后于国外,没有专门用于电缆长度计量的时域反射电缆测长仪器,而国内众多的基于时域反射原理的通信线路故障检测仪器虽然也可以测量电缆长度,但大部分电缆故障检测仪器无法满足电缆长度计量的精度要求。

本书对基于时域反射原理的电缆测长技术进行了介绍,书中内容不但对提高我国电缆长度测量的水平具有重要的理论和实际意义,而且对时域反射技术在其他领域的应用也有很高的参考价值。

本书的特点在于理论与实际相结合,书中对时域反射电缆测长技术进行了介绍,同时通过大量的试验对理论分析进行了验证。本书分为7章,第1章介绍了时域反射电缆测长技术的研究背景、目的意义以及国内外的研究现状;第2章介绍了时域反射电缆测长技术的理论研究基础;第3章分析了时域反射电缆测长的原理误差;第4章对基于时域发射原理的电缆测长非线性误差进行了分析与补偿;第5章介绍了时域反射电缆测长的波速特性;第6章介绍了时域反

射信号的检测与处理技术;第7章介绍了时域反射原理电缆测长技术的前景和展望。

本书在编写过程中受到辽宁省教育厅“智能检测与网络化测控”(编号:LT2012005)项目的资助,同时得到了于洋、袁峰等专家的大力支持和热情帮助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,恳请读者批评指正。

编者

2014年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 电缆长度测量技术的研究现状	2
1.2.1 传统测量方法	2
1.2.2 电阻电桥法和电容法	4
1.2.3 时域反射测量	6
1.2.4 频域反射测量	11
1.2.5 时频域反射测量	12
1.3 时域反射技术的研究现状	14
1.4 存在的问题	16
第 2 章 时域反射电缆测长的理论研究	18
2.1 引言	18
2.2 电缆的等效分布参数模型	18
2.3 时域反射电缆测长原理	19
2.3.1 传输线电报方程	19
2.3.2 正弦稳态下的通解	21
2.3.3 行波在电缆上传播的电磁解释	21
2.4 传输线电报方程的数值分析	23
2.4.1 FDTD 迭代算法	23
2.4.2 FDTD 收敛性和稳定性分析	24
2.5 基于 FDTD 的时域反射电缆测长仿真实验分析	26
本章小结	28
第 3 章 时域反射电缆测长原理误差分析	29
3.1 测量精度的影响因素	29
3.2 高精度时间间隔测量模块设计	34
3.3 基于 FPGA 的时间间隔测量技术	38
本章小结	43

第4章 时域反射电缆测长非线性误差分析	44
4.1 电缆传输特性的数学模型	45
4.1.1 衰减特性	48
4.1.2 色散特性	49
4.2 脉冲信号在电缆中传播时的变化规律	50
4.3 非线性误差补偿	53
本章小结	55
第5章 时域反射电缆测长的波速特性研究	56
5.1 引言	56
5.2 电缆中行波的波速特性分析	56
5.2.1 波速的频率特性	59
5.2.2 波速的结构特性	61
5.2.3 波速的材料特性	61
5.2.4 波速的温度特性	62
5.3 电缆卷曲状态对波速的影响	68
5.4 基于遗传优化神经网络的时域反射电缆测长模型	70
本章小结	75
第6章 时域反射信号的检测与处理	76
6.1 引言	76
6.2 基于小波分析的反射波消噪技术	76
6.2.1 噪声在小波分解下的统计特性	78
6.2.2 小波阈值去噪技术	80
6.2.3 小波最优分解层数的自适应确定算法	82
6.3 反射波波前识别算法	88
6.3.1 阈值法及噪声影响分析	88
6.3.2 质心法及噪声影响分析	88
6.3.3 多项式拟合法及误差分析	90
6.3.4 基于小波的反射波波前识别算法	92
6.4 四种反射波波前识别算法试验及分析	95
本章小结	102
第7章 前景与展望	103
参考文献	105

第1章 绪 论

1.1 研究背景

电缆是传送电力、传递信息和制造各种电机、电器、仪表、实现电磁能量转换不可缺少的基础器材,被广泛地应用于国民经济的各个领域。电缆具有以下优点:①线间绝缘距离小,占地少,可沿墙或埋地敷设,不占地面空间,可避免在地面设杆塔和导线,有利市容整齐美观;②不受外界环境影响,可避免风、雷击、风筝和鸟等造成架空线的短路和接地等故障,供电可靠性高;③因有绝缘层,人不可触及导电体,对人身比较安全;④运行简单方便,维护工作量少,运行费用低;⑤电缆的电容较大,有利于提高电力系统的功率因数。因此,电缆已成为近代电力系统不可缺少的组成部分。事实上,在所有经济活动和社会生活中,凡有人群生活的地方,凡有生产、交通以及一切经济活动的场合,凡在宇宙空间、地下、海洋等一切需要探索、开发的所有活动中,以及任何一项科技开发创新项目的研制活动中,都离不开电力和电磁波的应用。一切工业生产、交通运输、建筑工程和设施、现代农业和科研、军工装备或军事设施、太空、海洋的探测以及社会生活包括每一个家庭和人们的日常生活都与电缆产品息息相关^[1,2]。

我国电缆的生产是在20世纪30年代后期开始的,短短几十年内,我国的电缆工业从无到有,突飞猛进的发展起来,无论是工艺装备水平还是产品技术水平都达到和接近世界先进水平。以总产值举例,我国电缆工业的规模处于世界前三位之内。例如,2000年我国电缆工业总产值将近1100亿元,产值规模仅次于美国,位列世界第二。工业总产值占国民生产总值的比例由80年代末的0.88%上升到1998年的1%,直至2000年的1.2%。在机电工业的135个行业中,产值规模仅次于汽车工业而名列第二。以产品规模举例,目前国内电线电缆生产企业有6000余家,电力电缆年产已达25万km左右,通用绝缘电线(塑料、橡皮)年产量超过1000万km。可见,电缆的市场占有率很高。

电缆作为重要的定量包装长度类商品,在生产和经营中要对其净含量进行计量检验。目前,电缆长度执行标准有两个:①GB 5023没有对电线电缆的允许短缺量做出要求,根据《定量包装商品计量监督管理方法》,此时按照《定量包装商品净含量计量检验规则》执行,即当长度定量包装商品标注净含量大于5m

时,允许短缺量为2%;②根据JB 8734 执行标准对电缆允许短缺量做出的规定,长度计量误差应不超过 $\pm 0.5\%$ 。实际上,由于电缆长度计量检验必须整卷进行,不方便测量,不少厂家和商家没有按照《定量包装商品计量监督管理方法》和国家标准中规定的允许长度计量误差执行,导致市场上存在的计量问题日臻突出。做到准确、迅速、经济地对电缆长度进行测量,不但可以提高产品质量、降低消耗,还将在实施和规范电缆定量包装计量器具校准工作,监督执法,保证电缆定量包装净含量的准确可靠,维护生产企业和广大消费者的利益,增强电缆生产企业在国内和国际市场上的竞争能力等方面起到重要作用。

由于时域反射法是一种简单易用的无损检测技术,具有精度高,产品体积小,便于携带等优点,成为电缆长度测量的理想方式。世界各国对时域反射电缆长度测量方法进行了大量的研究,已经达到了较高的精度,但是价格昂贵,其中英国雷迪公司生产的脉冲反射仪 617,测量精度为 $\pm 0.24\%$ 。我国在这方面的研究落后于国外,没有专门用于电缆长度计量的时域反射电缆测长仪器,而国内众多的基于时域反射原理的通信线路故障检测仪器虽然也可以测量电缆长度,但大部分电缆故障检测仪器的测量精度仅为 $\pm 2\%$,无法满足电缆长度计量的精度要求。

时域反射法在故障检测、工程结构和地质灾害等方面有广泛的应用,如在通信线路故障检测中的应用,在农业地质、水文地质、灾害地质等研究中的应用,测量介质含水量、电导率、特征阻抗等参数,监测水位变化,监测岩石、矿井表面和边坡的变形,钢筋混凝土结构安全检测,高速公路地基沉降等工程应用。利用时域反射测量技术对电缆长度进行精确测量与利用该原理进行其他测量的相似之处在于,采用相同的工作原理,面临相同的技术难题。

综上所述,研究时域反射电缆测长具有重要的理论意义和研究价值,对其关键技术的研究不但可以实现对电缆长度迅速、准确的测量,提高我国电缆长度测量的水平,而且对时域反射技术在其他领域的应用也有很高的参考价值。

1.2 电缆长度测量技术的研究现状

1.2.1 传统测量方法

我国国家质量监督检验检疫总局规定 2006 年 1 月 1 日起施行的《定量包装商品净含量计量检验规则》,该规则的附录 E 中规定了以长度单位标注净含量商品的三种计量检验方法:仪器法即计米器法、称重法及直线法。由于电缆很长,且不便拉直,使用直线法测量电缆会造成测量不准确,因此,不适宜直接测量。

计米器是计量电线、电缆、布匹、纱线、纸张以及各种包装材料等长度的专用计量设备^[3-5]。计米器虽然品种繁多,但其核心部分都是由测量轮和光电计米器两部分组成。电缆长度的计量,是由运行中的电缆直接或间接与确定了直径的计米轮接触,两者同步运动,由计米轮带动计数器运行,来确定电缆的长度,其检验步骤如下:

(1) 将样本单位置于仪器的两滚轮中,调整两滚轮之间的间距,使样本在滚轮之间作无相对滑动运动,由样本拖动滚轮旋转(或滚轮带动样本运动)。

(2) 调整计数器使其归零。

(3) 启动仪器,计数器自动记录样本前移而带动测量滚轮转动的圈数,当样本到尽头的瞬间,迅速读取计数器记录的圈数。

实际含量 y 的计算公式为

$$y = nd\pi \quad (1-1)$$

式中 y ——被测物品所通过滚动轮的总长度;

n ——物品所绕过滚动轮的转动圈数;

d ——滚动直径;

π ——圆周率。

影响计米器计米误差的原因很多,各种因素对计米误差影响的大小也不同,是一个综合性的系统过程。影响计米器计米误差的因素:①电缆与计米轮端面夹角的变化;②计米轮与压紧轮轴线夹角的变化;③放线装置张力的变化;④其他因素,如电缆表面凹凸起伏,电缆表层的弹性变化,计米轮磨损,外径改变等,都会对计米误差产生影响。

计米器主要分为工作计米器和标准计米器。工作计米器主要用于线缆定量包装,示值误差为不大于 0.3%,在实际使用中误差达到 0.5%。标准计米器主要用于现场检定,误差不大于 0.18%。显然,工作计米器难以保证检验电线电缆长度计量的精度。另外,计米器携带不方便,需要对线缆进行复绕并在复绕过程中对线缆长度进行计量,每次测量都要把线缆完全复绕一次,费时费力。如果在监督检测执法过程中将每卷电线都展开进行长度测量不但烦琐,还受到场地、环境、操作人员人为误差的影响。同时,电线的绝缘外观都将受到无法弥补的破坏,给受检企业造成一定的经济损失。由中国科学院研制成功的便携式成卷电线电缆长度测量装置 DZY-C 型智能测长仪就是采用这种方法,其装置准确度为 0.3%。

称重法适用于在全长范围内质量均匀分布的商品,如电缆等^[6,7]。其测量设备为钢直尺、电子天平或电子秤等。检验步骤如下:

(1) 称重。逐个称量样本单位的质量(不含样本单位包装物)。

(2) 拉直。如用拉力方法将样本单位的头、中、尾三部分长度分段拉直(不能有拉伸现象)。

(3) 定量截断并称重。用钢直尺和剪切设备在样本单位的头、中、尾三处分别准确截取单位长度(一般取 1m),并称各段的质量,取其平均值作为样本单位单位长度的质量。

则实际含量的计算公式如下:

$$\text{实际含量(样本单位长度)} = (\text{单位长度/单位长度质量}) \times \text{样本单位质量}$$

理论上分析,称重法完全适合电缆的检测。电缆大多是认证产品,从原材料到工艺都有严格的规定。以聚氯乙烯绝缘电缆 BV2.5mm² 为例,其材质铜线线径为 1.78mm,铜的比重为 8.9,外套聚氯乙烯绝缘塑料的比重为 1.4。每 100mm 的标准质量为 (3.2±0.1)kg。但是经过多年的检测发现,市场上的电缆适合称重法检验的不超过 10%。

1.2.2 电阻电桥法和电容法

电阻电桥法基于经典的惠斯顿电桥定理^[8,9],其等效电路如图 1-1 所示。由四个电阻构成一个闭合回路,电路中电流的分支点,称为电桥的“顶点”,如图 1-1 中的 A、B、C、D,两顶点间的元件组成电桥的“支路”,共 6 个支路。接电源的支路 AB 称为电桥的电源对角线,支路 CD 称为检流表的对角线。其余电阻 R₁、R₂、R₃ 和 R₄ 所在的四个支路称为电桥臂。

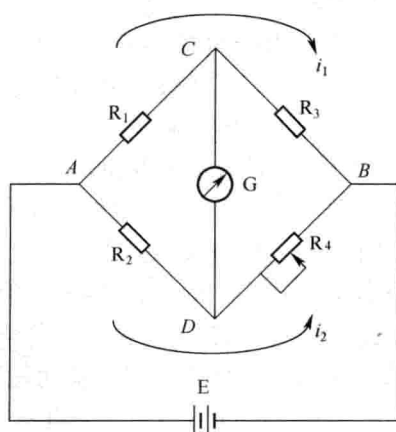


图 1-1 电桥法等效电路

适当的选择四个电桥臂的电阻,使电桥的顶点 C 和 D 的电位相等,即当检

流表对角线内没有电流通过时,这种状态称为电桥的平衡状态。 R_1 和 R_3 中的电流相等, R_2 和 R_4 中的电流相等。根据欧姆定律,可得

$$R_3 = \frac{R_1}{R_2} R_4 \quad (1-2)$$

令 R_1 和 R_2 为已知,以一个标准的可变电桥来代替已知电阻 R_4 ,习惯上以 R_0 来表示, R_3 为被测电缆的电阻,以 R_x 来表示,则式(1-2)可以表示为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 \quad (1-3)$$

则被测电缆长度的计算公式为

$$l_x = \frac{R_x}{R_s} l_s \quad (1-4)$$

式中 l_x ——被测电缆长度;

l_s ——电缆试样长度;

R_x ——被测电缆直流电阻;

R_s ——电缆试样直流电阻。

电阻电桥法的优点是原理简单、方便、测量准确度高,但是电阻电桥法本身存在以下一些缺点。

(1) 利用电阻电桥法测量电缆长度,无论采用何种方法和设备,必须准确接入电缆的两端接头。可是在实际应用中,有时只能找到电缆的一端,当以电缆为载体计量其他长度,如测量建筑物高度、井深等时,很难找到被测电缆另一端。

(2) 对电缆线芯的均匀性要求很高,同一条线路上由不同导体材料或不同截面积的电缆连接在一起时,需要按其电阻值将长度换算到同一导体材料、同一截面积的等值长度。

(3) 电缆导体的电阻率很小,导致电缆的电阻值很小,难以精确测量。如在 20°C 时,铜的电阻率为 $1.72 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$,对于横截面积为 2.5mm^2 ,长为 50m 的铜芯电缆,其电阻值仅为 0.34Ω 。

(4) 不同材质的电缆线芯都有其特定的温度系数,温度会影响到电缆的阻值,均匀电缆单位长度的线芯直流电阻公式为

$$R_{\text{DC}} = \rho_{20} [1 + \alpha(\theta - 20)] k/S \quad (1-5)$$

式中 R_{DC} ——单位长度电缆在 θ 温度下的直流电阻;

θ ——温度;

ρ_{20} ——线芯材料在 20°C 时的电阻率;

α ——导体电阻的温度系数;

k ——线芯导体在制造工程中引入的修正系数;

S ——导体横截面积。

由式(1-5)可知,当环境温度变化较大时,直流电阻的变化比较大,是影响电阻变化的主要因素之一,而电阻电桥法没有考虑到温度的变化对测量结果带来的影响。

德国贝汉公司生产的 2002 电线电缆长度测量仪就是基于电桥法,该仪器连接电缆两端即可测出电缆的长度,当测量长度为 0~2000m 时,分辨率为 0.1m;当测量长度为 0~20000m 时,分辨率为 1m。测距精度为 $\pm(0.6\% \text{读数} + 1 \text{位})$ 。

根据平板电容器的理论知识,平板电容器的容量计算公式为

$$C = \frac{\epsilon D l}{d} \quad (1-6)$$

式中 D ——极板的宽度;

l ——极板的长度;

d ——电容器两极板之间的距离;

ϵ ——电容器的介电常数(或称介质的电容量),由介质的性质决定。

因为电缆内部的绞合线对间的间距是完全相等的,两线间的分布电容沿线缆是均匀分布的,电容法电缆长度测量将一条开路的电缆看成一个电容器,把任意两根芯线看成是平板电容器的两个极板,则电缆芯线的有效宽度可近似理解为式(1-6)中的 D (它可近似理解为线径);电缆芯线的长度可理解为式(1-6)中的 l ;电缆芯线间的距离可理解为式(1-6)中的 d 。对于电缆内部结构固定的两根芯线, ϵ 、 D 及 d 均为常数,则两根芯线间的电容量与电缆长度 l 成正比关系^[10],即电缆芯线越长,两根芯线间的电容也就越大,因而得出结论性公式为

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad (1-7)$$

通过测量电缆电容,并且知道电缆单位长度的电容值,就可以推导出电缆长度。

该方法的优点是简单,缺点是电容值受电缆状态影响严重,卷曲和拉直状态时电缆电容值变化较大,测量误差较大。

1.2.3 时域反射测量

时域反射测量技术(Time - Domain Reflectometry, TDR)是在高速脉冲技术迅速发展的基础上出现的一种很有用的测量技术^[11,12]。近代的 TDR 仅仅有

十余年的历史,但是由于它具有非常引人注目的特点,已成为测量系统中用途十分广泛的测量方法。随着我国脉冲技术的发展,TDR 技术已逐渐普及,并已生产出国产的时域反射计。TDR 实际上是一个小型的一维雷达,只需要一个高速脉冲信号发生器作为信号源和一台取样示波器作为接收装置和显示器。其电缆长度测量工作原理非常简单,测试时向电缆一端注入低压脉冲,该脉冲沿电缆传播,当脉冲遇到阻抗不匹配点时会发生部分或全部反射。TDR 接收反射波形,在假定波速恒定的情况下,用发射脉冲和电缆终点反射脉冲的时间间隔与电缆长度成正比的原理确定电缆的长度^[13-16],测长公式为

$$l = \frac{v\Delta t}{2} \quad (1-8)$$

式中 l ——测试点到电缆终点间的距离;

v ——信号在电缆中的传播速度,其值取决于电缆结构;

Δt ——入射波与反射波之间的时间间隔。

时域反射电缆测长原理简单,对电缆不会造成损坏,不受电缆芯数和长度的限制;对电缆线路技术资料的依赖性小,测长精度高,体积可以做到很小,易于携带,成本低,特别适于工程布线及半成品的检测,得到了广泛的重视。时域反射电缆测长存在以下尚未完善解决的问题。

(1) 发射波与反射波之间的时间间隔的精确测量,是决定电缆长度测量精度的关键^[17-20]。直接计数法是高分辨率时最简单、有效的方法,这种方法具有测量范围大、线性好的优点;但测时分辨率较低,只能达到纳秒量级。其他时间间隔测量方法大多是以直接计数法为基础发展起来的,包括模拟内插法^[21,22]、游标法^[23-25]、延迟线内插法^[26-28]以及时间幅度转换方法,其测量对象针对脉冲计数法中的非整数部分,即完成非整数部分的二次测量。模拟内插法使用 RC 等模拟电路,利用电容的充放电实现将微小时间间隔成倍数扩展之后,采用时钟再次进行计数。但由于电容充放电过程中,充放电时间之间的关系不是绝对线性的,存在非线性现象。另外,电容充放电性能受温度的影响非常大,对测量系统的温度特性要求很高。而且测量过程耗时较长,且易受系统噪声影响。游标法基于游标卡尺工作原理,在游标测时的方法中使用两个频率相差很小的时钟:一个作为主时钟;另一个作为游标时间。主时钟和游标时钟的周期差就是游标测时能够达到的分辨率,并且通过调整两个时钟的周期可以调整测量分辨率。但此方法设计复杂,成本高,并且内插过程所需时间较长,另外很难实现冲击振荡器的零相位起振。延迟线内插法可以实现对微小时间间隔的测量,测量过程耗时相对较短,适用于连续测量。缺点是随着测量分辨率的提高,要求延迟线长度越来越短,当测量较大时间间隔时,延迟线数量将大大增加。时

间—幅度转换(Time to Amplitude Convert, TAC)技术(简称时幅转换技术),是一种将被测时间间隔(脉冲宽度)转换为电信号幅度(一般为电压幅度)的模拟处理方法。该方法利用电容的充放电特性,将被测微小时间间隔和电压变量建立映射关系,通过 A/D 转换器(ADC)对电压精确测量可以间接实现对微小时间间隔的测量。这种测量思路突破了传统脉冲计数法的束缚,将时间测量问题转换为其他物理量的测量,如电压,使得问题的解决方法获得了突破。该方法的误差主要来源于 A/D 转换器本身的问题,这里面包括:元器件的时域抖动、内部开关性能(速度、通断特性)不够理想、恒流源在时幅转换过程中和转换器状态转换时输出不稳定、输出级跟随器的输入阻抗不够高所导致的对时幅转换结构的影响、本身的非线性以及电路中的噪声和串扰,这些都会对转化结果产生不良影响。以上时间间隔测量方法都可以达到皮秒量级的测量分辨率,但明显的电路设计复杂度和昂贵的造价限制了其应用。

以上的讨论所涉及到的时间—数字变换芯片(Time - Digital Conversion, TDC)都是所谓的特殊专用集成电路(Application Specific IC, ASIC)设计。ASIC 设计的费用大、设计周期长、灵活性差。因此近年来一些 TDC 设计开始围绕现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)芯片进行。由于 FPGA 具有集成度高、高速、高可靠性、成本低廉、易于大规模推广应用等特点,利用 FPGA 来实现高精度时间间隔测量是时间间隔测量方法的重要研究方向^[29]。

(2) 波速的完整、精确定义,是决定电缆长度测量精度的重要因素。时域反射法在获得反射波波前到达时间之后,必须结合波速才能得到电缆长度。现在的时域反射电缆测长方法都假设波速为一常数,计算中采用某一参考波速。实际上,波速是一个受多种因素影响的复杂变量,影响波速的因素包括电导线芯的材料、绝缘层的材料、电导线芯直径、绝缘层直径、环境温度、频率、电导芯数等,根据各影响因素确定波速非常复杂^[30,31]。另外,有损传输线上不同频率成分的信号其传播速度不同,以一个波速去近似含有多种频率成分的脉冲信号的波速,成为误差的主要来源之一^[32,33]。目前,国内外尚没有文献对时域反射电缆测长中的波速特性进行专门研究。

(3) 时域反射法电缆测长的精度依赖于对反射波波前到达时刻的识别。电缆是有损传输线,脉冲信号在传播过程中会发生衰减,因为脉冲波形中含有多种频率成分,不同的频率其传播速度及衰减情况不同,频率越高,其传播速度越快,衰减也越严重,其结果是使波形畸变,难以为测量时间确定一个时间参考点^[34,35]。以哪一点作为反射波到达的时刻,将直接影响到电缆测长的精度。目前应用的反射波波前的识别方法仍然不完善,为提高对反射波波前的识别能力,需借助数学方法对反射波进行信号处理。常见的提取反射波波前到达时刻

的方法有阈值法、多项式拟合法、质心法、相关法、求导数法、匹配滤波器法和小波变换等,下面对这几种方法分别进行介绍。

① 阈值法是预先设置幅值 x_{thres} ,当发射脉冲通过 x_{thres} 时,启动计时器,当反射脉冲通过同样的阈值时,停止计时,然后将时间差转换成电缆长度。阈值法存在估计到达时间与实际波前到达时间的偏差,由于波形未知,该偏差无法纠正,精度难以保证。

② 多项式拟合法采用一定的拟合函数,在某种拟合准则(如最小二乘原理)下,对离散采样所得的样本数据进行拟合,重建连续信号,得到反射波波前到达的时刻。对于一个采样率已经确定的系统,采用内插细分的方法,可以提高测量中由采样示波器采样率限制的精度极限,获得更高的测量精度。

③ 质心法以波形的质心作为位置特征点。由于质心法是对信号求面积的质心,然后再在区域内做面积平均,因此,可显著降低每个测量数据对整个信号的影响,有利于消除系统误差,减小随机误差,其测量精度不受采样示波器采样率的限制,可以提高测量值的稳定性和重复精度。

④ 相关法是利用互相关函数求出时间差,进而求出电缆长度^[36]。相关法是检测反射波起始点的常用方法,电磁波反射测长中反射脉冲是电缆入射脉冲的响应,在均匀无损传输线的条件下两者之间只是存在时间延时,而其他特性完全相同,即两者是完全相关的,利用这一特性可以在采集的波形中找出反射脉冲的起始点。但是,由于有损线路中波速与频率相关造成反射波相对于入射波来说波形发生了明显畸变,由于高频分量的衰减导致反射脉冲上升沿变缓、宽度变大,入射波和反射波的相关性大大降低,因此采用相关法势必会产生较大误差。

⑤ 求导数法是根据被测信号到达检测点所呈现的突变性质对其进行求导运算,根据其一阶或二阶导数是否超过设定的阈值来判断行波是否到达的一种时域方法^[37]。其优点是简单,易于实现,但该方法对噪声信号比较敏感,测量精度不高。

⑥ 匹配滤波技术是建立在相关法基础上的方法,将接收信号与预期模版波形相关联,产生一个脉冲到达时间的估计值^[38]。该算法要求被测信号干净和不失真,为了防止信号波形在传播过程中发生形态上的变化,需要保存多个模版波形。在找到匹配之前,必须尝试几种模版,这导致计算时间的增加。

⑦ 小波变换具有在时域、频域表征信号局部特征等特点^[39]。对于受到噪声干扰的反射波信号,不管是白噪声还是具有突发性质的噪声干扰,其小波变换的模极大值随着尺度的增大而迅速衰减,而行波信号的小波变换模极大值并不随着尺度的变化而改变,据此可以很容易的把噪声区分开来。由于每一尺度

下的小波变换相当于对已知中心频率的某一频带范围内的信号进行处理,随着尺度的变化,其中心频率和频带范围也发生变化,这样反射波到达时间和传播速度就统一起来,即利用频率相近的高频信号到达检测点的时间和波速来测长,这样就使波速不确定性对电缆长度测量精度的影响大为减少。另外,由于模极大值点对应着采样数据的奇异点,因此可以减小由于衰减和色散导致信号幅值差异而引起的非线性。

由于实际电压信号的测量过程中总会引入噪声,即检测到的电压扰动信号是由原始扰动信号和噪声线性组合而成。小波变换是线性变换,因此检测到的信号的小波变换值也是由原始反射信号的小波变换值和噪声的小波变换值叠加而成。这样,小波变换模极大值也就有可能是由检测噪声所产生。因此,对实际测量信号,当背景噪声信号较强时,仅利用小波变换模极大值点检测其奇异点,从而判断反射波波前到达时刻,有可能会产生较大的误差,需要对时域反射信号进行消噪预处理^[40]。一般来说,不同噪声具有不同的性质,而不同性质的噪声应该使用不同的去噪方法。在信号处理领域中,传统的傅里叶变换是滤除噪声、提高信噪比(SNR)的常用方法。然而,用传统的傅里叶变换方法不能满足非平稳信号滤波预处理的要求。因为它不能区分哪些是表现突出部分的有用的高频量,哪些是属于噪声的无用的高频量,它不能给出在某个局部时间段或时间点上的信号频域变换表现。对于采用傅里叶分析方法处理的低通滤波,当低通频率范围较窄时,滤波后的信号突变部分变得平滑了,因为反映突变部分的高频量被当作噪声滤掉了;当低通频率范围较宽时,信号突变部分虽然得到体现,但信号中仍存在着大量的噪声。并且实际中常遇到的非平稳信号的谱特性沿时间轴无限扩展,利用傅里叶变换(FT)的基函数很难与其匹配,所以,傅里叶变换不是高精度分析的有效方法。

对于在信号检测中为获得最大信噪比而普遍采用的匹配滤波器,其设计和效果与输入信号的形式息息相关。如果信号的形式发生了变化,那么匹配滤波器的输出将不是最佳的,因为它对于时变信号的检测缺乏有效性。而在实际应用中,由于各种因素的影响,检测信号的形式常常不好确定。维纳滤波参数是固定的,也只适于平稳随机信号,其滤波器的设计与信号的统计特性有关。可实时处理的卡尔曼滤波参数是时变的,适于非平稳随机信号,但它要求信号和噪声的统计特性也是先验已知的。有时无法得到这些统计特性的先验知识,或者这些统计特性随时间变化规律不能确定,为此提出了自适应滤波。基于这种自适应算法而形成的自适应干扰对消,是去噪的一种相对优越的手段,在大多数情况下,都能完成减小噪声的功能,很少会产生信号的畸变。

在对被噪声污染的信号进行滤波时,希望在滤除噪声的同时不过多平滑信