



国家科学技术学术著作
出版基金资助出版

电气测量线路屏蔽保护的基本理论

刘令湘 钱振宇 钱钟泰 著



中国计量出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

电气测量线路屏蔽保护 的基本理论

刘令湘 钱振宇 钱钟泰 著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电气测量线路屏蔽保护的基本理论/刘令湘, 钱振宇, 钱钟泰著. —北京: 中国计量出版社, 2001.12

ISBN 7-5026-1569-5

I. 电… II. ①刘… ②钱… ③钱… III. 电气测量—电磁屏蔽 IV. TM930

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 087305 号

内 容 提 要

本书通过电工学电路理论与电气测量实践相衔接的方法, 将电气测量线路屏蔽保护措施上上升成完整和行之有效的理论系统: 这是国内外其他类似书籍所没有做到的。书中全面地讨论了电气测量中干扰的有效形式, 其产生和引起测量误差的过程, 及消除其影响的方法。书中所述的内容都明确给出了其物理涵义和量化指标, 并通过量化指标进行的严格的数学推导, 使读者容易定量地掌握其内容。书中还提供了主要量化参数的测量原理, 供读者用实验方法确定这些参数的量值时参考。

本书可供所有与电气测量有关的人员, 特别是从事交流电气测量人员, 包括测量设备的研究制造人员、使用人员及校准和检验人员参考; 也可供电气测量专业本科生和研究生作为参考教材。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jilxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

850mm×1168mm 32 开本 印张 5.5 字数 133 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 15.00 元

序

20 世纪 60 年代初，我接受了负责上海电表厂研究所（现上海市电工仪器仪表研究所）XF-1 型交直流仪表检定装置国家鉴定技术工作的任务，感到该装置的原设计在屏蔽保护方面存在较大的缺陷。该装置同时存在交流、直流的电压、电流四组电源，以及正反向及交流、直流不同的换接；在屏蔽保护方面是属于最复杂的情况。为此我查阅了当时所能得到有关的文献（如文献 7），虽然学到了不少有关屏蔽保护方面宝贵的基础知识，但对确定 XF-1 型装置的原设计中屏蔽保护有哪些问题仍然是不得要领，感到有必要为屏蔽保护技术建立系统的理论。就这方面所遇到的实际问题，我提出并解决了以下的一些理论问题：

- 1) 什么是干扰，它出现的条件和如何影响测量结果；
- 2) 一个复杂的电测量线路，如何从屏蔽保护的角度分解成最简单的基本单元，这些单元中的干扰将以什么样的形式出现及如何影响测量结果；
- 3) 电测量线路各部分之间的相互干扰是如何形成的；
- 4) 各种屏蔽保护措施的种类及原理，以及其实施时可能出现的问题。

上述问题的解决，使屏蔽保护的各種措施得到了理论的提升，成为一个完整的理论系统。我应用这个理论系统研究了 XF-1 型装置屏蔽保护可能存在的问题，并和上海电工仪器研究所的丁银云总工程师、殷荣华、蒋学良高级工程师等同仁用试验确定了问题的存在，并在线路上进行了重新安排，增加了必要的屏蔽保护措施。在可能的条件下，保证了该装置的技术性能的可靠性。该装置后由上海电表厂批量生产，至 20 世纪 80 年代累计

生产近 2000 台，总产值约 1 亿 5 千万元人民币，并曾获 1964 年国家科委新产品一等奖。

在 1965 年，有关的理论曾应用于由上海电工仪器研究所高级工程师蒋学良先生负责的 XQS-3 型电容标准装置中，主要是采用了纵横平衡的技术，降低了辅助平衡支路不平衡的影响。

在《电测与仪表》王振德编辑的大力支持下，我曾将有关内容整理成文，刊登在《电测与仪表》杂志上，题为《电气测量线路与装置的屏蔽保护》。其中的“基本理论”刊登于《电测与仪表》1969 年第 1 期和第 3 期，而其“实际应用”部分刊登在《电测与仪表》1975 年及 1977 年各期（共 20 期）。该文的刊登曾得到读者热烈的反映，《电测与仪表》杂志曾将该文汇总成册，刊印了 500 册，很快分配一空，目前几乎成了绝版。国内在电测量方面的一些学者曾仔细研究过该文的内容，并和我讨论过某些问题，如能源部电力科学研究院的张叔涵教授，哈尔滨电工学院的费正生教授，哈尔滨电工学院的陶时澍教授和中国计量科学研究院一些同仁等。特别应感谢陶时澍老师对该文的推崇，在他的著作《精密电气测量》、《电气测量线路及仪器的屏蔽保护》及《电子仪器中的工频干扰》等著作中，大量地引用了该文的内容。陶时澍老师及其同仁为该文理论系统的推广及应用做了很多卓有成效的研究和实际工作，在此谨表示谢意。

在以后的 25 年中，屏蔽保护的理論系統，始終指導着我的工作實踐。在實踐中我也不斷地檢驗該理論系統的正確性，結論是該理論系統是比較完善和行之有效的。在 1969 年至 1972 年期間，我和桂林電表廠閔象謙、葉桂濃等同仁共同試制的 XQS-5 型交流阻抗比較裝置（獲 1978 年科技大會獎），1981 至 1991 年我和童光球研究員等與上海電廠共同研究試制的“XF-12 型交流儀表檢定裝置”（先後曾獲國家計量局科技進步二等獎，國家科技進步二等獎，上海市科委進步一等獎）都應用了有關的屏蔽保護系統。特別是在 XF-12 型交流儀表檢定裝置中，充分考慮了

屏蔽保护提出的各种要求，全面研究了并较完善地解决了 XF-1 型装置遗留下的主要问题，确保它在准确度方面居世界领先地位。

在这期间，国内外出版了不少有关屏蔽保护方面的专著，其中很多的水平是很高的（如文献 6）。但我还是决定将该理论系统中的“基本理论”部分，加上刊登在原“实际应用”部分中的“等效线路原理”、“等生导纳的换算方法”及“电压和电流回路的连接误差”三部分内容重新整理，作为《电气测量线路屏蔽保护的基本理论》一书正式出版。

本书内容是该理论系统中最基础并是行之有效的部分，并且也是其他屏蔽保护有关专著缺乏的部分。正式出版这部分内容和现有屏蔽保护书籍可以相互补充，而很少相互重复。这部分理论内容非但在国内是独有的，在国际上也是独一无二的，可以说具有一定的国际意义。特别是“等效线路原理”，是这部分理论的核心方法。这一原理的应用使本书的屏蔽保护理论达到了其他有关书籍无法比拟的理论高度。

为避免重复，书中不再叙述《电测与仪表》刊登过的“实际应用”部分的其他内容。因为其后出现的其他有关书籍，都是向实际应用方面扩展的。此外，原“实际应用”的有关内容中有相当一部分是属于测量线路分析的内容。由于原“实际应用”的文中需要对形形色色的测量线路进行高度的理论集中，所以不得不叙述这部分内容。它虽然在理论上有独到之处，但更合适的发表场合是有关测量方法的专著。而删除这部分内容，可以使书的内容更为集中和紧凑。

我认为理论应该指导实践，并为实践所检验，因此书中叙述了在理论指导下为实践提供有关测量条件信息和系统原始数据及检验屏蔽效果的实验方法原理。

在本书的整理过程中，主要工作是由刘令湘博士和钱振宇先生完成的。希望本书的出版有助于从事电测量工作的有关人员，

包括电测量装置和仪器、仪表的设计人员和使用人员，电测量专业教师和学生掌握屏蔽保护的技术；并为今后提高电测仪器仪表的技术水平作出贡献。

钱钟泰

2002 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1-1 电气测量中的干扰与屏蔽保护	(1)
1-2 本书的任务	(2)
第 2 章 等效线路原理	(5)
2-1 问题的提出	(5)
2-2 n 端网络的独立端电压和端电流,独立的外回路及 外回路方程组;外回路方程组的自变量和应变变量	(6)
2-3 自变量控制方法	(7)
2-4 各端均有一个自变量的外回路方程组及其参数; 无源网络和线性网络及互易网络	(10)
2-5 线路的等效性	(11)
2-6 一些简单而重要的等效变换	(12)
2-7 n 端有源网络的无源化	(14)
2-8 n 端无源互易网络的等效导纳网络	(15)
2-9 n 端线性网络等效参数的测量方法	(16)
2-10 对三端网络更深入的研究	(20)
2-11 等效线路原理的总结	(29)
第 3 章 电测量线路的基本单元及干扰的基本形式	(33)
3-1 电测量线路的两种基本单元	(33)
3-2 电流测量单元及其干扰的基本形式	(34)
3-3 电压测量单元及其干扰的基本形式	(36)
3-4 将电测量线路分解为两种基本单元的实例	(39)
第 4 章 干扰的产生	(43)
4-1 产生干扰的必要条件	(43)
4-2 干扰电流的产生形式	(43)
4-3 不同形式干扰电压的产生	(44)

第 5 章 等效寄生导纳的换算方法	(46)
5-1 等效寄生导纳换算的理论基础及一般原则	(46)
5-2 线路中任两节点间的寄生导纳的等效导纳 换算方法	(48)
5-3 支路中一段上并联寄生导纳的等效变换	(51)
5-4 一节点与支路中一点间寄生导纳的等效换算	(52)
5-5 两支路间寄生导纳的等效换算	(54)
5-6 分布寄生导纳的等效换算	(56)
5-7 寄生导纳等效换算的实例	(61)
第 6 章 测量线路各部件相互干扰及 测量线路外来干扰的排除	(69)
6-1 问题的提出	(69)
6-2 由 n 个独立被测电压或电流决定被测量的测量仪器 的合理引出端数目,附加干扰的形式及其引起误差的 方式	(70)
6-3 测量线路中和测量仪器相接的其他部分的组成	(79)
6-4 绝缘隔离和屏蔽隔离的基本原理	(81)
第 7 章 屏蔽保护的基本方法	(83)
7-1 为安全而采取的屏蔽保护措施	(83)
7-2 消除或降低由干扰引起误差的各种方法	(84)
7-3 消除和降低干扰的措施	(86)
7-4 减小干扰对测量结果影响的措施	(88)
7-5 干扰误差相互补偿的措施	(92)
7-6 用示值刻度校准及修正方法消除干扰所引起的 误差	(96)
7-7 屏蔽保护基本方法的总结	(97)
第 8 章 测量回路的无定向结构	(98)
8-1 无定向回路的基本结构	(98)
8-2 短路屏蔽扼流圈法	(100)
8-3 无定向性的数值指标及测定方法	(108)
第 9 章 绝缘隔离和屏蔽隔离	(111)

9-1	绝缘隔离和屏蔽隔离的应用范围	(111)
9-2	平板状绝缘层和屏蔽层的隔离效果	(114)
9-3	屏蔽不完整引起的漏导纳及其测量方法	(117)
9-4	磁屏蔽的有关问题	(120)
9-5	测量部件的合理屏蔽系统	(122)
9-6	和屏蔽效果有关的测试技术	(126)
第 10 章	等电位屏蔽保护	(129)
10-1	等电位屏蔽保护的基本措施	(129)
10-2	等电位屏蔽保护的局限性	(131)
10-3	用放大器实现辅助平衡的自动化	(134)
第 11 章	电压、电流引线的传输误差	(138)
11-1	电压、电流引线的传输误差	(138)
11-2	不同频段电压和电流测量的特点	(145)
结束语		(146)
附录	沿 x 及 y 轴正弦分布交流电磁场的传播	(148)
1	沿空间正弦分布交流电磁场的通解	(148)
2	无磁通穿过 z -平面时,电压和电流在空间的分布	(157)
3	无电流穿过 z -平面时,磁势和磁通沿空间的分布	(160)
参考文献		(164)

第 1 章 绪 论

1-1 电气测量中的干扰与屏蔽保护

屏蔽保护是电气测量(包括无线电测量)中的特殊问题。电气测量由于其信息易于变换及远距离传输以及较高的测量准确度与速度,得到了极其广泛的应用,电气测量通常包括以下三个方面:

a) 电量:即电压、电流、电功率和电能等与传输电能有关的一些量。

b) 元件或网络的电参数:电阻或电导与其时间常数,自感与其品质系数,互感与其时间常数,电容与其损耗角,分压系数,分流系数等。

c) 信号参数:波形参数或失真度,信号的频率、相位,脉冲参数,调制度和声噪比等。

所有电气测量都具有一个共同的特点,就是**被测量值的信息是依靠线路中的电压或电流传输的**。因此,所有电测量必须存在电压或电流的条件下才能进行。用于传输被测量信息的电压或电流称之为测量线路的工作电压或电流。

但在测量线路中,除工作电压和电流外,经常还有一些与被测量信息无关的电压和电流的存在。这些电压、电流将扭曲测量结果,引起测量误差,这是我们所不希望的。遵照无线电技术的通用术语,称这些与被测量信息无关的电压和电流为**干扰**。

为了消除或降低干扰引起的测量误差,在电气测量线路中必须采取一系列附加的措施,而**屏蔽保护**就是这些附加措施的统称。因此,屏蔽保护的主要任务是降低或消除干扰所引起的测量

误差。

但除上述目的外,屏蔽保护还有另外一个极为重要的任务,就是防止高电压、大电流及强电磁辐射场对人体和测量装置的危害及环境污染,以及保护人身和设备及环境的安全。在某种意义上,屏蔽保护在安全方面的任务比保证测量准确度的任务更为重要。因为能否保证工作人员及设备的安全无疑是所有电气设备是否能正常使用的首要问题。在设计电气测量设备的屏蔽保护措施时,必须满足从安全方面提出的各种要求。

1-2 本书的任务

屏蔽保护技术的历史和电测量的历史一样古老。随着电气测量技术发展,出现了各式各样的屏蔽保护技术;在实践基础上总结出许多叙述屏蔽保护的书籍和文献。但在本书所阐述的理论系统出现以前,缺乏一套行之有效的屏蔽保护措施的完整处理方法。因此,目前大量的屏蔽保护措施通常是针对实践中发现的问题凭经验采取的,所以往往疏忽了一些特殊情况下出现的干扰。有时还采用了一些不恰当的屏蔽保护措施,反而降低了测量结果的准确度。由此使屏蔽保护技术蒙上了一层神秘的色彩,好像一般人是无从着手的。

上述情况是由于对已经大量应用的屏蔽保护技术缺乏系统的理论提升的结果,本书的任务正是将目前广泛应用的屏蔽保护技术上升为行之有效的理论系统。这样的理论系统应能解决可能遇到的千变万化而且是越来越复杂的电气测量线路中的干扰影响:指出其重要干扰可能出现的情况而不发生遗漏,确定消除或降低这样干扰有效的措施,并能定量地估计干扰的影响及屏蔽保护措施的效果。

这样的理论总结,首先遇到的困难是电气测量线路及屏蔽保护技术的多样性。电气测量线路不论从被测量的种类上,测量原理上,以及线路和结构具体组成上简直是繁如星海,不胜枚举。

屏蔽保护措施也是如此。而理论系统既要行之有效，又要短小精悍。由此不得不怀疑这样的理论提升是否可能完成。但本书基本完成了满足上述要求的理论提升。本书的基本方法是将问题化为最简单的几种典型方式，并仔细研究这些简单情况的处理方法。进一步再研究各种简单情况组合过程中可能出现的问题及处理方法。这样，就使问题简化并得到高度理论集中。在本书中，本书分析方法的理论基础是第2章所述的“等效线路”原理，这原理是由电工学电路理论衍化出来的理论方法。虽然看起来和屏蔽保护措施毫无相关之处，但事实上是本书最核心的理论方法。

本书采用的一些理论及术语，尽量沿用目前已经通用的内容和形式。但为了适应系统严密性的要求，对其涵义不得不作适当的相应修改。相应修改之处，本书将作专门的明文交待。

为了不使讨论的内容过于分散，本书不得不对讨论的前提再作一些限制。首先，电气测量线路按其工作电压或电流传输被测量信息方式的不同，可分为两种类型：

a) **模拟测量线路**。这类线路中被测量的信息是通过工作电流或电压幅值大小传递的。

b) **数字测量线路**。这类线路中被测量的信息是通过工作电流或电压的频率和相位或脉冲所代表的数字传输的。

对于模拟线路来说，在干扰和工作电压或电流混合后，干扰的影响很难再排除，并直接引起测量误差。而在干扰较小时，数字测量线路则受干扰影响很小，并能用对工作电压或电流的波形进行整形得到基本消除。因此，屏蔽保护措施对模拟测量线路显得更为重要。本书特以模拟测量线路作为主要研究对象。

在屏蔽保护的任务方面，由安全提出的要求虽然重要，但其处理方法比较简单。因此在本书中，将主要研究如何降低干扰所引起的误差。

干扰影响的消除，可以通过特殊的测量方法和数据处理相结合的方法实现。本书将不深入研究类似的方法，而主要研究降低

干扰影响的线路措施和结构措施。

本书理论系统的应用，有着极为丰富的内容，并有很多实际和理论问题有待解决。因此可以扩展成很多专著。在书中仅仅为了帮助理解本书所述的理论而保留少数例子，更深入的研究可参考已有的或未来的专著，以保证本书在理论上的高度集中。

第 2 章 等效线路原理

2-1 问题的提出

在我们处理复杂的电测量线路时，时常遇到这样的问题，我们需要确定一些元器件或部件的性能。这些部件和其他线路是通过 n 个引出端连接的，我们对它内部线路所知甚少。我们关心的也仅是它的使用特性。于是就面临着这样的一个问题：如何用最简单的线路表示其使用特性。这样的线路将和部件的实际线路有所不同，但在所研究的使用特性恰和实际线路完全一致。如果我们能掌握确定这样线路的方法，用以研究我们关心的使用特性，而这些性能事实上就是待确定实际线路的性能。这样的方法对总结广泛的实践经验使之上升为系统的理论更为重要和有效，因为如果一类测量线路就其某些用途来说能用相同的线路等效，则对其中一种线路有效的措施往往很容易推广到整个这一类线路。在分析时往往同样可找出易于分析的等效线路。还可以根据等效线路将所有待研究线路分为很少几类，而对每类都仅需作典型的研究。这样就使问题简单化，而易于解决；但同时保持理论的系统性和严格性。

为了正确使用等效线路原理，就必须研究各种线路的一些共同特点，建立起在那些参数相同时，线路就可以认为等效的概念。最后还应确定用实验方法测定这些参数的原理，这情况下等效线路不只是有理论上的意义，而且是能定量确定的。研究这些问题是本章的任务。

2-2 n 端网络的独立端电压和端电流, 独立的外回路及外回路方程组; 外回路方程组的自变量和应变变量

电气线路的任一部分都可以从整个线路中割裂出来, 作为独立的线路处理。这部分线路和线路其他部分相连的节点就是这部分线路的引出端。一般不妨假设它有 n 个引出端, 这样的线路叫 n 端网络。可将其引出端编号为“ $i = 0 \sim (n-1)$ ”。这部分线路和线路其它部分之间联系将通过引出端上的端电流和端电位差相互作用实现的。可以令“0”端的电位为零, 则“ i ”端的电位将为 $\dot{U}_i$, 可独立变化的电压或电位为 $(n-1)$ 个。将“ i ”端流入线路的电流表示 $\dot{I}_i$; 由于克希荷夫第一定律有:

$$\sum_{i=0}^{n-1} \dot{I}_i = 0 \quad (2-2.1)$$

因此能独立控制的电流仅 $(n-1)$ 个, 一般选择为 $\dot{I}_i (i = 1 \sim n-1)$, 而根据(2-2.1)式将有

$$\dot{I}_0 = - \sum_{i=1}^{n-1} \dot{I}_i \quad (2-2.2)$$

这样 n 端网络内外的联系是通过 $(n-1)$ 个独立的电压 $\dot{U}_i (i = 1 \sim n-1)$ 和 $(n-1)$ 个独立的电流 $\dot{I}_i (i = 1 \sim n-1)$ 实现的。

n 端网络将有 $(n-1)$ 个独立的外回路, 每一个独立的外回路必须有一个其他回路所没有的引出端。规定电压 $\dot{U}_i (i = 1 \sim n-1)$ 和电流 $\dot{I}_i (i = 1 \sim n-1)$ 为独立变量, 事实上是选择“ i ”($1 \sim n-1$)端和“0”端间的回路作为独立的外回路。 n 端网络的内部状态给各个独立回路确定一个外回路方程, 即约束 n 端网络独立电量 $\dot{U}_i (i = 1 \sim n-1)$ 和 $\dot{I}_i (i = 1 \sim n-1)$ 的方程。这样 n 端网络的 $2(n-1)$ 电量受到 $(n-1)$ 个约束方程的制约, 其中仅有的 $(n-1)$ 电量可以由外部控制, 这些电量就是外回路方程的自变量。而留下的 $(n-1)$ 个网络的独立电量将在自变量的作用下, 由外回

路方程决定,它们是回路方程的应变量。在 $2(n-1)$ 个独立变量间选择哪些量作为自变量,事实上是 n 端网络外部的实际控制状态及分析过程的方便决定的。

2-3 自变量控制方法

n 端网络的 $i=1\sim(n-1)$ 的各端上都有和仅有一个独立变量时,不妨将引出端重新编号,使得在 $i=1\sim m$ 各端的自变量为电流 $\dot{I}_i (i=1\sim m)$, 而 $i=(m+1)\sim(n-1)$ 端的自变量为电压 $\dot{U}_i (i=m+1\sim n-1)$ 。当自变量为电流 $\dot{I}_i (i=1\sim m)$ 时可用并接在 0 端和 i 端电流源控制。当自变量为电压 $\dot{U}_i (i=m+1\sim n-1)$ 时可用并接在 0 端和 i 端电压源控制。

理想的电压源 $\dot{U}_i$ 不论其负载电流 $\dot{I}_i$ 值为多少,其端电压 $\dot{U}_i$ 都为其电势 $\dot{E}_i$, 这样电压源的内阻抗为零。而理想电流源 $\dot{I}_i$ 不论其端电压 $\dot{U}_i$ 值多少,其负载电流 $\dot{I}_i$ 将恒为其短路电流值 $\dot{J}_i$, 这样电流源的内导纳为零。而实际的电压和电流源内阻和内导纳都不可能为零,但应是足够的小。在采用的理想的电压源或电流源原控制网络自变量时,其负载电流或负载电压就是网络的网络应变量,这样自变量的控制方法可见图 2-1。

但也有一些情况的某些端的电压和电流同时被选为自变量,由于自变量和应变量的数目同为 $(n-1)$ 个,因此有一个电压和电流都选为自变量的引出端就必然相应有一个电压和电流都选为应变量的引出端;这两种引出端的数目各不会超过 $(n-1)/2$ 个。在每个引出端上可以直接用电压源或电流源控制的端电压或端电流仅能是一个,可以像图 2-1 一样,规定用理想电压源直接控制 $k=(m+1)\sim(n-1)$ 各端的端电压 $\dot{U}_k$, 用理想电流源控制 $k=1\sim m$ 各端的电流 $\dot{I}_k$ 。而端电压和端电流均为自变量引出端的未被电压源或电流源控制的端电压或端电流必须用调节连接在端电压和端电流均为应变量引出端的理想电压源或理想电流源方法使它达到预定的值。不妨将电压、电流均为应变量的各端编号为