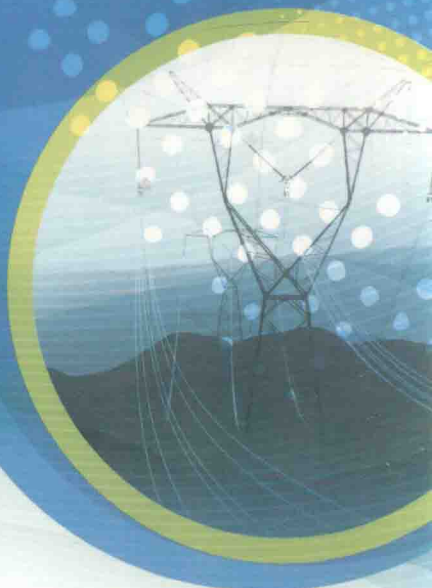


输电线路 参数测量技术

主 编 赵艳军
副主编 顾温国 陈 迅
盛 超 陈晓科



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

输电线路参数 测量技术



主 编 赵艳军
副主编 顾温国 陈 迅 盛 超 陈晓科
参 编 赵进全 尹建华 张 健 杨汾艳
安然然 刘正富 孙 闻 唐景星
付 聪 张 跃 王 钤 王 玲
曾 杰 王 奕 翁洪杰 马 明
张俊峰 张 远 李贺龙 姜良刚
袁伟明 高 岩



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

输电线路是电力系统的重要组成部分,其工频参数如正序参数、负序参数、零序参数及耦合参数是进行电力系统分析、保护整定计算等日常工作的必备参数,其重要性不言而喻。线路参数与导线材料、物理布局、大地回路、气候、周围环境等多种因素直接相关,理论计算参数具有一定的参考价值,但往往难以考虑复杂因素。因而,在线路投运之前,线路参数实测是必需的交接试验之一。本书结合国内外学者及编者的研究成果,归纳总结了输电线路参数测量技术的相关理论,希望能为电力同行提供一定的借鉴价值。

本书共有七章,主要包括国内外在输电线路参数测量方面的研究现状、同塔多回输电线路模型、输电线路对称参数测量方法、输电线路不对称参数测量方法、不同类型的输电线路测量方法、线路参数测量中消除干扰方法等,并于最后介绍了两种常见的输电线路参数测试系统。

本书属于输电线路模型及参数测量技术范畴,可供电力系统分析及输电专业相关工程人员查阅。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路参数测量技术/赵艳军主编. —北京:中国电力出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5123-6798-2

I. ①输… II. ①赵… III. ①输电线路—电路参数测量—测量技术 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 276554 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月北京第一次印刷

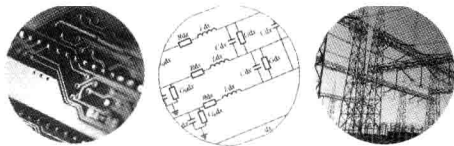
880 毫米×1230 毫米 32 开本 3.75 印张 91 千字

印数 0001—2000 册 定价 16.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

输电线路参数是进行电力系统潮流计算、短路计算、暂态稳定计算、继电保护整定计算等工作的必备参数，其准确可靠性直接决定了计算结果的可靠性。输电线路参数的获得方法主要包括理论计算法、离线实测法和在线辨识法三类。目前工程实用性最强的是离线实测法，此类试验通常在线路投运前开展，本书重点介绍了输电线路参数离线实测法。

掌握输电线路模型是系统了解输电线路测量技术的基础。国内外学者在输电线路模型方面的研究成果集中体现在均匀传输线模型、Bergeron 模型、等值 π 型集中参数模型、Carson 线路模型等。本书借鉴前人的研究成果，总结了适用于不同长度、不同使用情况的输电线路模型，成为本书的基础，部分理论和公式推导较为晦涩，读者也可以查阅与此相关的专业论文或书籍进行深入研究。

在介绍输电线路参数测量方法时，本书分别介绍了对称输电线路参数测量方法、不对称输电线路参数测量方法和特殊类型的输电线路参数测量方法。随着同塔多回输电线路越来越多，输电线路参数测量方法不再仅仅针对三相近似对称的线路，还涉及不对称的输电线路，书中给出了近年来的一些研究成果。对于特殊类型的输电线路，如长交流架空输电线路、电缆、直流输电线路等，其特性与中等长度及以下的架空输电线路有较大的差异，需有针对性的测量方法。

在进行线路参数测量的过程中，抗干扰技术也十分重要，它直接决定了测量方法的有效性、测量结果的准确性以及测量仪器的适用场合。抗干扰技术是线路参数测量方法及仪器研发者需要重点考虑的问题，对于线路参数测量仪器的使用者来说，了解这部分内容，可以更好地判断仪器的适用性及测量结果的可靠性。

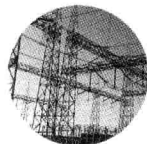
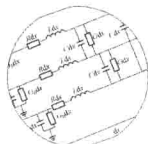
最后，本书简单介绍了针对对称输电线路的异频线路参数测试系统和针对不对称输电线路的参数测试系统，希望能为工程人员提供一定的参考。

输电线路参数测量技术涉及领域广泛，涵盖电磁场分析、自动控制技术、通信技术、数据采集及处理技术、软件开发及算法研究等，鉴于编者水平有限，无法逐一详尽，希望本书能给同行者的工作提供一定的便利。

在本书的编写过程中，编者在技术交流和资料整理方面获得了国内外专业学者和同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。限于编者学识有限、时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正，不吝赐教。

编者

2014年11月

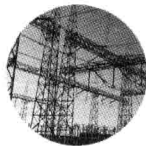
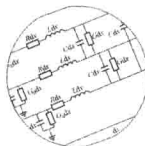


目 录

前言

● 1	绪论	1
1.1	输电线路参数实测的意义	1
1.2	国内外研究现状	1
1.3	线路参数测量的特点	5
● 2	同塔多回输电线路模型	8
2.1	概述	8
2.2	输电线路电磁耦合基本原理	9
2.3	均匀传输线模型	16
2.4	Bergeron 模型	24
2.5	等值 π 型集中参数模型	29
2.6	Carson 线路模型	31
● 3	输电线路对称参数测量方法	43
3.1	概述	43
3.2	异频法	44
3.3	工频法	52
3.4	扫频法	52
3.5	带电测量法	57
● 4	输电线路不对称参数测量方法	64
4.1	概述	64
4.2	单回不对称线路参数测量方法	65
4.3	双回线路不对称参数测量方法	70

● 5	不同类型的输电线路测量方法	75
5.1	概述	75
5.2	长线路参数测量方法	75
5.3	电缆参数测量方法	81
5.4	直流输电线路参数测量方法	83
● 6	线路参数测量中消除干扰方法	86
6.1	概述	86
6.2	提高测试电源电压法	86
6.3	电源倒相法	87
6.4	三相轮相法	89
6.5	附加工频电源补偿法	90
6.6	基于同步电源的干扰消除法	91
● 7	常见的输电线路参数测试系统介绍	94
7.1	概述	94
7.2	异频线路参数测试系统	94
7.3	不对称线路参数测试系统	99
●	参考文献	110



绪 论

1.1 输电线路参数实测的意义

输电线路是电力系统的重要组成部分，其工频参数如正序参数、负序参数、零序参数，是进行电力系统潮流计算、暂态稳定计算、继电保护整定计算等工作的必备参数，参数的准确可靠性直接决定了计算结果的可靠性。线路参数与导线材料、物理布局、大地回路、气候、周围环境等多种因素直接相关，理论计算参数具有一定的参考价值，但往往难以考虑复杂因素。因而，在线路投运之前，线路参数实测是必需的交接试验之一。

1.2 国内外研究现状

从数据来源的角度，目前输电线路参数获取方法主要分为理论计算法、离线测量法、在线测量法三类。

1.2.1 理论计算法

随着学者对输电线路模型理论研究的不断深入，输电线路参数理论计算方法不断完善。输电线路模型的复杂性表现在线路参数本身的分散性、频率相关性、大地返回通道的复杂性、趋肤效应、多股导线的处理等，理论计算法根据架空导线的结构、材料、杆塔类型、气温环境等因素，把具体的基本物理参量逐项代入计算公式或软件中得到。部分理论计算法极大地简化了输电线路的

电磁模型，可以通过查表或简单的公式计算快速获得线路参数，这可能导致计算结果与实际情况不甚吻合。由于环境因素、运行工况等复杂因素，以及需要预知的和代入计算的参量较多，理论计算并无法反映输电线路参数的真实情况。但是在线路设计阶段，理论算法可以获得较为可靠的线路参数，便于设计人员进行电气计算。

1.2.2 离线测量法

离线测量法是将待测线路停电，在该线路的一端施加测量电源，利用获取的电压、电流、功率、频率等电气量，通过数据处理和算法计算出线路参数。该方法把被测线路当成黑匣子，只分析输入、输出量就可以得到线路的参数，通常只在线路投运前或停运后才能进行，所得结果比理论算法更加贴近实际情况。但需要增加附加试验装置，且受感应电压等干扰因素的影响较为突出，对测试仪器和参数计算算法抗干扰能力有较高要求。此外，离线实测法是针对特定工况下的线路参数，难以反映不同工况、不同运行环境下的线路参数。离线实测方法主要包括仪表法和数字法，二者在原理上相同。

仪表法是最早使用的线路参数离线测量方法。即在被测线路上施加测量电源后，使用电压表、电流表、功率表和频率计等，通过人工读取各表值，代入公式计算后得出相应的线路参数。由于在实测中工频干扰电压对线路零序参数和互阻抗的测量精度影响很大，作为干扰主要成分的工频分量必须予以消除，进而在仪表法的基础上提出了一些改进措施，如电源倒相法、附加工频电源法、提高信噪比法等。仪表法所需的测量设备多而沉重，测量正序、零序参数需要不同的接线方式，操作繁琐，费时费力，且表计读数受人为因素影响，误差较大。

随着单片微机技术的日趋成熟，输电线路参数的测量有了极大地发展。基于单片微机的测量方法，也称为数字测量法，由于

该方法自动化程度较高,测量方便快捷,繁琐的仪表法逐步被数字法取代。该方法通过高精度的电压、电流互感器采集信号,并对交流采样信号进行滤波处理和模/数转换,通过专门的软件处理数字信号,计算得出线路的参数。这种测量方法避免了仪表法人工读数带来的误差,通过傅里叶变换滤除了系统中高次谐波,提高了测量的精度;它能够自动采集原始数据,计算、存储、显示、打印测量结果,方便快捷,极大地提高了参数测试的效率。但是,数字法只是将传统测试方法微机化,测量原理与仪表法相同,在干扰电压很高时,有效去除干扰信号的影响仍是难点。

1.2.3 在线测量法

在线测量法,通常也被称为在线辨识法,是指在不影响线路正常供电的情况下进行输电线路参数测量,主要包括基于 SCADA 系统和 WAMS 系统的在线辨识方法。在线测量法所得的线路参数反映了运行中的输电线路在各种因素影响下的动态参数。

基于 SCADA 系统的线路参数估计法主要包括两大类^[1],增广状态估计法和量测残差灵敏度分析法。

增广状态估计法是将待辨识参数作为状态量与原来的状态量(电压幅值及角度)一起进行状态估计,有学者提出了基于法方程的增广矩阵估计法、卡尔曼滤波法^[2~4],但这些方法的迭代过程依赖于量测方法的增广雅克比矩阵,要求量测系统必须满足状态可观测和参数可估计条件,并且可能因雅克比矩阵条件数过大导致数值稳定问题。为解决数值稳定问题,有学者又相继提出含有虚拟量测的约束加权最小二乘法^[5]、基于线性内点法及正交变换^[6]的抗差参数估计等方法。此外,采用分段适应粒子群优化算法^[7]、遗传算法^[8]、基于 Tabu 搜索^[9]等的现代优化算法也被引入到状态估计中,从而改进增广矩阵法的数值

稳定性。

量测残差灵敏度分析法^[10~12]是利用残差与错误参数之间的联系多次迭代对错误参数进行修正,该方法在一定程度上改善了状态估计的数值问题,但需要更多的迭代次数,并且需要预先确定错误参数的位置。针对这一问题,学者提出了基于可疑支路潮流补偿量取代直接使用参数本身估计的方法^[13]、基于 Karush-Kuhn-Tucker 最优条件计算可疑线路参数对状态估计残差目标函数灵敏度^[14]、基于主导参数和非主导参数的参数辨识^[15]、基于主导性评估的电网支路参数估计^[16]、利用新息图法识别网络错误参数^[17]、通过修改原有无功状态方程和最小二乘法进行线路充电电容估计^[18]等方法。

基于 SCADA 系统的线路参数估计法通常是针对全网的线路参数进行统一地辨识估计,增加了状态量的维数,需通过方程冗余来进行参数估计,因而可能导致数值不稳定性;此外,还需要充分考虑量测配置以满足可观性,以及存在不同线路的参数估计结果相互影响、主导错误参数难以预测等问题。

广域量测系统(WAMS)利用 GPS、PMU 和高速通信网络等技术,能够实现同步采集电力系统各个站点的电压、电流相量,为线路参数在线辨识提供了基础条件。部分学者结合了 WAMS 和 SCADA 系统单时段或多时段数据进行线路参数辨识^[19~23],该方法比仅采用 SCADA 系统进行参数估计的可观信息增加。也有学者开始研究仅利用 PMU 数据^[24~28],基于输电线路模型和抗差算法,将输电线路独立于电网进行单独参数辨识,所采用的 PMU 数据包括单时段或多时段数据、系统稳态运行或故障数据。值得重视的是,除了辨识算法、线路模型外,线路参数辨识结果对量测系统的误差较为敏感,因而辨识前的量测数据筛选和误差分析十分重要。

1.3 线路参数测量的特点

线路参数获得途径从最早的查表法到算法，再到实测法，已历经数十载，但仍然存在诸多疑问和难点。

(1) 大地回路的处理。

线路参数测量时，需考虑对大地回路的处理方式。电流通过电力设备的中性点流入大地，必然从大地的某点流出，构成回路，这里的大地是广义的，不仅指大地本身，还涵盖与大地连接的架空地线。系统正常运行时，大地回路对电网的运行方式影响较小；系统故障或不对称运行时，大地回路成为故障电流回路的一部分，影响较大。即，大地回路对线路正序参数的影响较小，对零序参数影响较大。

参考文献 [29] 指出直流和工频交流电流在地中的分布具有较大区别。一是在水平方向上，直流电流以大地为回路时，将沿着两个接地极间电阻最小的路线流通，而工频电流以大地回路时，由于导线中的电流和地中电流间的磁效应，地中电流将被吸向导线侧，即交流电流在地中分布并非沿着电气最短路径，而是随着输电线的路径呈现弯曲分布。二是在垂直方向上，在距离接地极一定远处，交流地中电流将完全和地面上部的导线平行，不存在和地面垂直的电流分量，大地表面和离地面无穷远处的零位面不存在电位降，且此时地中电流在水平方向的压降正好被交变磁通所感应的电势抵消，即大地表面的电位也处处近似为零，而直流地中电流具有较大的深度。

(2) 输电线路参数的频率相关性。

输电线路参数与频率呈现非线性相关性，一方面是导线本身由于集肤效应与电流频率直接相关，另一方面地中电流分布也与频率相关，因而直流、工频和冲击电流下，所对应的线路参数各

不相同。从这个角度看，要精确描述输电线路参数，需要列出其频率特性。然而，考虑工程实用性，通常实测线路参数仅考虑工频下的参数，以此来近似表征线路参数特性。

(3) 同塔多回线路之间的电磁干扰问题。

随着同塔架设输电线路越来越多，输电走廊密集分布，在进行某一回线路参数测量时，同塔或临近平行的运行线路会在待测量线路上感应出较高的电压，给测量带来一定的误差，严重时甚至会导致线路参数无法测量。在实际工程中，必要时要求同塔其他回路停电或降低潮流以配合待测线路参数测量，这可能会引起较高的电网风险，不利于电网安全稳定运行。因此，如何消除同塔线路之间的强电磁干扰对线路参数测量的影响，提高线路参数测量方法及装置的抗干扰能力是工程人员较关注的问题之一。

(4) 不同回路之间的互感。

对于越来越多的同塔架设多回线路，导线之间的空间距离较小，不同回路的相与相之间的互感参数和单回线路的相与相之间的互感参数可比，因而不能忽略。现有的线路参数测量方法多基于三相对称的基本前提，即假设单回线路三相对称，不同回路之间的相与相的互感相等。在这一假设前提下， n 回路的 $n \times n$ 阶阻抗矩阵经过序变换之后，每回输电线路参数解耦为正序、负序、零序阻抗，回路间的互感阻抗解耦为零序与零序之间的互感参数，其他序别的耦合阻抗（包括正序与正序的耦合阻抗、正序与负序的耦合阻抗、正序与零序的耦合阻抗、负序与零序的耦合阻抗）为零。不同回路之间的零序互感参数所表达的物理意义是，一回路的零序电流，会在同塔的其他回路中产生较大的零序感应电流，这与实际运行情况相符。因而，不同回路之间的零序互感参数的测量也是目前同塔多回线路参数测量的难点之一。

(5) 线路参数的对称性。

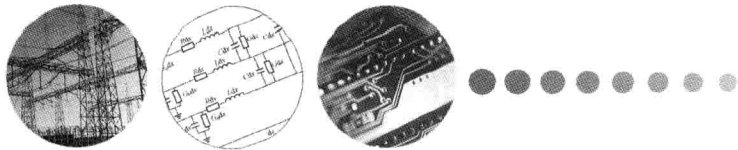
如上面所述,现有的测量方法多基于三相对称的前提。对于短线路和换位长线路,该假设与实际情况较接近。但实际上,越来越多的线路参数不对称性越来越高,基于三相参数对称前提的线路参数测量方法的准确性值得商榷,进行不对称参数测量也是该领域的一个研究难点。

(6) 停电测量。

目前工程实用化的线路参数测量方法均需要待测线路停电,对于存在强电磁干扰的同塔线路,当待测线路上的干扰电压超过测量仪器耐受电压、耐受电流极限,必要时也需要同塔架设的其他线路停电。此外,测量回路间的互感参数时,一些测量方法要求待测的两回线路均需要停电,也有部分学者研究了带电测量法。对于已投运的同塔多回线路,由于安排停电较困难,因而目前通常仅在线路投运前进行线路参数测量。针对停电测量的这一局限性,有学者开始研究线路参数在线测量方法。

(7) 不同类型的线路参数测量方法的差别。

对于交流架空输电线路、电缆、直流输电线路,由于其特性不同,有针对性地研究不同类型的线路参数测量方法也是该领域的难点之一。电缆零序阻抗参数与金属护套接地方式、互联和换位、回流线和回路数有关,正序阻抗参数受外界因素影响较小,正序电容参数和零序电容参数基本相同^[30]。直流输电线路集中参数模型依然可以表示为电阻、电感和电容,但正常运行时线路通过电流为直流,动态或暂态过程中可能存在其他频率的电流,这与交流输电线路有明显的区别。目前工程上,直流输电线路实测量主要包括测量直流电阻、工频电感、工频电容,也有测量输电线路参数的频率特性。



同塔多回输电线路模型

2.1 概 述

电力系统分析中针对不同的研究问题、不同长度的线路，所选的线路模型也不同。线路模型主要分为分布参数模型和集中参数模型两大类。

分布参数模型更接近线路实际情况，基于均匀传输线理论，通过微分方程求解，所得电压、电流为空间波。常见的分布参数模型包括 Bergeron 模型、Smelyen 模型、J. Marti 模型、L. Marti 模型、Noda 模型等。线路参数通常是频率的函数，尤其是电阻和电感参数，它们的频率相关性最显著。Bergeron 模型只能模拟某一特定频率的线路参数，采用 LC 分布参数及集中的 R 参数，即带集中电阻的恒定参数无损线路模型。Smelyen 模型、J. Marti 模型、L. Marti 模型、Noda 模型均为频率相关模型，采用 RLC 分布参数，可以给出一个较宽的频率范围内的所有参数，这几种模型的主要区别包括采用模量或相量表示、转换矩阵是否考虑频率相关特性（采用准确转换矩阵或近似转换矩阵）。

集中参数模型主要针对短线路和中长线路，一般采用等值 π 型原始集中参数模型，或直接采用序变换后的正序、负序、零序参数（通常假设单回线路参数三相平衡，各序参数完全解耦）、回路之间的零序耦合参数。

此外，关于“大地”的处理，在进行雷电过电压等计算时，需要保留架空线路的避雷线或者电缆的护套；在暂态计算时，通常消除地线和大地等值导线，将其影响折算到线路参数中。对于不同的接地方式，如两端接地、逐塔接地或者分段单端接地，“大地”的影响也会略有偏差。

充分地了解线路模型，对线路参数准确测量非常重要。目前，几乎所有的线路参数测量方法都是针对集中参数模型，少数学者提出了基于传输线方程的线路分布参数测量方法，但工程上使用较少。

2.2 输电线路电磁耦合基本原理

2.2.1 平行导体之间电磁耦合的基本原理^[32]

对于平行的不同导体，一根导体电流不为零时，会在其他导体中感应出电势。这是因为，平行的相邻回路的交链磁链不为零。根据电磁场的基本原理，可写出回路 1 中电流产生的磁场与回路 2 的交链磁链 λ_{21} ，如式 (2-1) 所示

$$\lambda_{21} = \oint_{c_2} \vec{A} \cdot d\vec{s}_2 > 0 \quad (2-1)$$

式中 \vec{A} ——矢量磁位， $\vec{A} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{c_1} \frac{1}{\vec{r}} d\vec{s}_1$ ，Wb/m；

$d\vec{s}_1$ 、 $d\vec{s}_2$ ——沿回路 1、2 的长度元。

显然，只要矢量磁位 \vec{A} 大于零，两回路之间存在电磁耦合，设两回路之间的互感为 M ，此处有

$$M = \lambda_{21} / I_1 \quad (2-2)$$

如图 2-1 所示，假定选取 a、b 两个平行回路，分别具有自阻抗 Z_{aa} 、 Z_{bb} 和互阻抗 Z_{ab} 。两个回路的两端分别为 a、a' 和 b、b'，线路电流分别为 I_a 和 I_b ，且假定大地回路为一个完全导电的无限

大平面。在回路两端标明对地电压，根据电路理论可得

$$\begin{bmatrix} U_{aa'} \\ U_{bb'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{a'} \\ U_{b'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

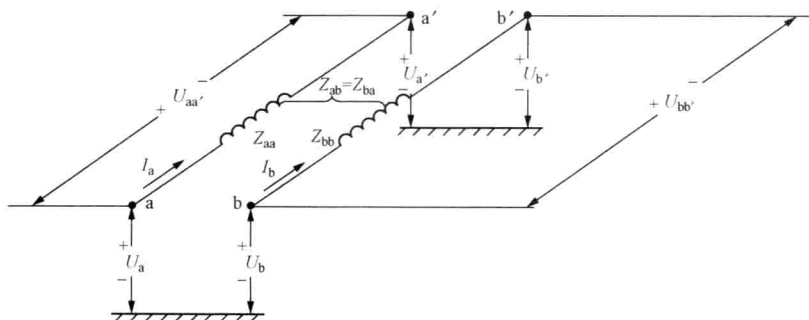


图 2-1 相互耦合的 a、b 回路

在线性无源的两端口网络中，有 $Z_{ba} = Z_{ab}$ 。如图 2-2 所示为一匝变压器的等值图，通过此图式 (2-3) 可得到进一步理解与证明。这里，导线 a-a' 与 b-b' 可看成一匝空芯变压器的线圈。

若在 a、a' 之间施加电压 $U_{aa'}$ ，回路 a 产生电流 I_a ，并产生磁通 Φ_{ba} （由 I_a 产生并交链线圈 b 的磁通）。根据 Lenz 定律，若回路 b 闭合，则将建立一个磁通 Φ_{ab} 以反抗 Φ_{ba} ，此时回路 b 将流过一个感应电流 I_b ， I_b 为磁通 Φ_{ba} 产生的感应电流。此时在回路 b-b' 上的电压降落，加上该回路自阻抗上的电压降 $I_b Z_{bb}$ ，即为式 (2-3) 中的方程 U_b 。类似可论证式 (2-3) 中的 U_a 。

2.2.2 平行的圆柱形导线的自感与互感

自感定义为给定回路的磁链除以该回路的电流，即

$$L = \lambda_{11} / I_1 \quad (2-4)$$

式中 λ_{11} 为由电流 I_1 产生的回路 1 的磁链（韦匝）。

类似地，互感的定义已由式 (2-2) 给出。

在一些参考文献中，给出了有限长的圆柱导体自感的计算公