

电磁场与传输线的相互作用

从经典理论到高频辐射效应

Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines
From Classical Theory to HF Radiation Effects

[瑞 士] 法哈德·拉奇迪 (Farhad Rachidi)

主编

[俄罗斯] 谢尔盖·特卡琴科 (Sergey Tkachenko)

谢彦召 译

清华大学出版社

013334124

0441.4
109

电磁场与传输线的相互作用

从经典理论到高频辐射效应

Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines
From Classical Theory to HF Radiation Effects

[瑞士] 法哈德·拉奇迪 (Farhad Rachidi) 主编
[俄罗斯] 谢尔盖·特卡琴科 (Sergey Tkachenko)

谢彦召 译



清华大学出版社



北航

C1641378

0441.4
109

151280810

Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines: From Classical Theory to HF
Radiation Effects by F. Rachidi, S. Tkachenko

ISBN 978-1-84564-063-7

© WIT Press 2008

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁场与传输线的相互作用：从经典理论到高频辐射效应 / (瑞士) 拉奇迪 (Rachidi, F.),
(俄罗斯) 特卡琴科 (Tkachenko, S.) 主编; 谢彦召译. --北京: 清华大学出版社, 2013.3

书名原文: Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines: From Classical
Theory to HF Radiation Effects

ISBN 978-7-302-30593-4

I. ①电… II. ①拉… ②特… ③谢… III. ①电磁场—相互作用—传输线—研究
IV. ①O441.4 ②TN81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 266317 号

责任编辑: 张占奎

封面设计: 张占奎

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 王静怡

出版发行: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编: 100084

邮 购: 010-62786544

印 装 者: 三河市春园印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170mm×230mm 印 张: 13.75 字 数: 258 千字

版 次: 2013 年 3 月第 1 版 印 次: 2013 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 48.00 元

产品编号: 031089-01

Preface to the Chinese Edition

“More ignorant than the ignorant is one who says ‘I know’-a true human being always seeks to learn from others.”

Ostad Elahi

Dear Chinese scientists:

We are very proud that the first translation of our book appears in Chinese and is edited by the prestigious Tsinghua University Press.

This book is the first attempt to present in a comprehensive way the consolidated knowledge of classical transmission line theory and field-to-transmission line interaction (Part I), as well as the most up-to-date efforts which have led to the development of the so-called full-wave transmission line theory (Part II).

The book can be used as a reference for graduate students, researchers and engineers interested in the transmission line theory and electromagnetic field interaction with transmission lines.

We would like to take this opportunity to express our most sincere gratitude to Dr. Yan-Zhao Xie who kindly translated the book from English to Chinese. We feel very fortunate that the translation of the book was done by an outstanding scientist with a deep knowledge of the field. Thanks to his excellent work, several typographical misprints of the original English book were corrected in the Chinese Edition.

The research in the field of high-frequency electromagnetic field coupling to transmission lines is still undergoing and more efforts are yet to be done. We do hope that the present book will help the younger generation of very talented Chinese scientists and engineers to bring their own contribution to this very interesting field of research. As the Chinese proverb says *“A journey of a thousand miles begins with a single step”*.

Farhad Rachidi (IEEE Fellow, EMP Fellow) and Sergey Tkachenko (EMP Fellow)

2012 年 9 月

中文版序

“比愚昧者更愚昧的是那些常说‘我知道’的人——真正的智者总在寻求向他人学习”

——奥斯泰德·伊拉希 (Ostad Elahi)

亲爱的中国科技工作者：

这本书首先被翻译成中文，并且由享有声望的清华大学出版社编辑发行，我们感到非常自豪。

本书首次尝试以一种全面的方式呈现给读者两方面的内容，既提供了经典传输线理论和场-线相互作用的综合知识(第一部分)，也包含了在发展全波传输线理论方面做出的最新工作(第二部分)。

对传输线理论、电磁场与传输线相互作用等方面感兴趣的研究生、研究员和工程师，均可以把这本书作为参考书。

我们要借此机会对谢彦召博士表示最真诚的感谢，是他把这本书从英文翻译成中文。非常幸运，本书的翻译工作由他这样一位在该领域有渊博知识的杰出学者完成。多亏他的出色工作，使得英文版多处排印错误能够在中文版中得到更正。

在高频电磁场与传输线耦合领域，研究工作仍在不断深入，还有更多的工作需要开展。我们非常希望，本书能够帮助极富才干的年轻一代中国科学家和工程师，在这个非常有意义的研究领域做出他们自己的贡献。有句中国谚语说得好，“千里之行，始于足下”。

法哈德·拉奇迪 Farhad Rachidi (IEEE Fellow, EMP Fellow)

谢尔盖·特卡琴科 Sergey Tkachenko (EMP Fellow)

2012年9月

序

电磁场与传输线的耦合计算是电磁兼容领域的一个重要问题。通常,人们使用传输线(TL)近似理论来求解横向尺度满足电小条件的均匀传输线,此时传输线上的传播模式主要是横电磁(TEM)模。但这种经典的 TL 理论无法处理高频时出现的天线模式和更高阶模式。

自从 TL 理论出现和 19 世纪晚期 Oliver Heaviside 推导出电报员方程以来,在理解传输线上的波传播现象方面取得了显著进展。1965 年, Taylor, Satterwhite 和 Harrison 扩展了经典 TL 方程,把外界电磁场的影响考虑进去,他们给出的场-传输线耦合方程,以及后人陆续推导给出的等价形式,早已成功应用于求解大量有关电磁脉冲(EMP)和雷电与电力、通信线缆的相互作用问题。

目前,由于电子产品的工作频率不断提高,加之具有更高频率分量的干扰源不断出现(如高功率微波和超宽带系统),使得在很多应用场合下 TL 近似这一基本假定不再成立。在过去的十多年里,考虑高频效应的广义传输线理论成为电磁兼容领域的一个重要研究主题。这个方面的成果形成了通常称作的“广义”或“全波”TL 理论,这一理论包含了高频辐射效应,但又保持了 TL 方程相对简单的形式。

本书内容既有经典传输线理论,又包括了最近的研究进展,特别是在高频效应方面的研究结果,可供对传输线理论和电磁场与传输线相互作用感兴趣的研究生、理论工作者和工程师参考使用。本书在内容组织上包括两部分,共 7 章。

第一部分给出了经典的传输线理论知识和不同的场-传输线耦合模型。

第 1 章讨论了 TL 理论的近似条件,推导给出了场-传输线耦合方程。本章也给出了描述电磁场与传输线耦合的三种形式不同但完全等效的方法,并进行了讨论。第 2 章和第 3 章分别针对架空多导体传输线和埋地电缆这些具体情况,讨论了影响多导体传输线系统脉冲传播和串扰的各种因素,给出了计算纵向和横向导线参数的方法。

第二部分给出了几种最近发展的可以包括高频效应的广义 TL 理论方法。

第 4 章中,在细线近似条件下,推导给出了用于计算外界电磁场对良纯导体地面上架空线感应电流和电势的类似 TL 方程组。基于微扰理论,提出了求解耦合方程组的迭代方法,其零阶项由经典 TL 近似理论计算得到。第 5 章给出了一种高效的混合方法,用于高频电磁场与含集总不连续点的带负载长导线的耦合计算。



第 6 章表明基于广义全波问题的积分公式,经典 TL 理论可以包含于更通用的广义模型中。本章给出的广义模型既可以用于传统的高速微电子电路,也可以用于纳米电子学领域。第 7 章具体针对高频电磁场对埋地导线的耦合,提出并讨论了基于 Pocklington 积分方程的频域方法和使用 Hallen 积分方程的时域方法。

建议读者按照章节顺序阅读本书,不过为了方便读者,本书也尽可能地使每一章内容相互独立。因此,对某一特定主题感兴趣的读者亦可直接阅读相关章节。

本书是作者在电磁场与传输线相互作用研究领域多年努力的结果。作者得到许多人士的支持、建议和指导,在此表示感谢。并对 Michel Ianoz、Juergen Nitsch 和 Fred M. Tesche 以及各章作者的宝贵贡献表示特别感谢。

法哈德·拉奇迪
谢尔盖·特卡琴科

> CONTENTS

目录

第一部分 经典传输线理论

第 1 章 电报员方程和场-传输线耦合作用方程的推导	3
1.1 传输线(TL)近似	3
1.2 良纯导体地面上的单根导线	4
1.2.1 Taylor, Satterwhite & Harrison 模型	5
1.2.2 Agrawal, Price & Gurbaxani 模型	8
1.2.3 Rachidi 模型	9
1.3 不同电磁场分量的贡献	10
1.4 包含损耗	10
1.5 多导体传输线的情形	12
1.6 耦合方程的时域表征	13
1.7 频域解	14
1.7.1 格林函数	14
1.7.2 BLT 方程	15
1.8 时域解	16
1.9 小结	16
参考文献	17
第 2 章 架空多导体传输线的浪涌传播和串扰	19
2.1 引言	19
2.2 MTL 系统的电报员或传输线方程	20
2.2.1 导线内部阻抗的表示	22
2.2.2 有限电导率地面上的导线外部阻抗和导纳	22
2.2.3 单位长传输线的完整表述和每个传输线参数的灵敏度	30

2.2.4	架空导线的时域传输线方程	32
2.3	传输线方程的时域数值解	35
2.3.1	时域有限差分方法	35
2.3.2	MTL 系统的频域解	39
2.3.3	直接频域解和 FDTD 方法的比较	40
2.4	系统中的串扰	42
2.4.1	弱耦合条件下电小尺寸导线的串扰	42
2.4.2	强耦合条件下的串扰	52
2.5	小结	56
	致谢	56
	参考文献	57
第 3 章	地下多导体传输线的浪涌传播	61
3.1	引言	61
3.2	埋地导线的电报员或传输线方程	62
3.2.1	埋地导线的地阻抗	64
3.2.2	埋地导线的地导纳	67
3.3	埋地导线传输线近似的限制条件	70
3.4	通过电缆屏蔽层对电缆芯线的耦合	72
3.4.1	一般性的双屏蔽三芯电缆	73
3.4.2	RG-58 电缆的例子	78
3.4.3	耦合现象中屏蔽层厚度的影响	80
3.4.4	求取电缆内导体电感和电容矩阵元素的 一种简便测量方法	82
3.5	其他一些导线几何位置的地阻抗例子	84
3.5.1	地表导线的阻抗	84
3.5.2	架空导线和地下导线之间的互阻抗	85
3.6	一些例子	85
3.6.1	裸导线和绝缘导线上脉冲传播的时域仿真	85
3.6.2	一个实际的串扰问题	87
3.7	小结	91
	致谢	91
	参考文献	91

第二部分 改进的传输线理论

第 4 章 对传输线的高频电磁耦合：传输线近似的电动力学修正	97
4.1 引言	97
4.2 高频电磁场对良导体地面上架空直导线的耦合	98
4.2.1 对有限长细导线的类 TL 形式的电场积分 方程(EFIE)推导	98
4.2.2 频域耦合方程的迭代解	102
4.2.3 平面波对无限长导线的耦合：确定解和迭代解	103
4.2.4 对半无限长开路导线反射系数的修正	106
4.2.5 有限长直导线耦合方程的时域迭代解	109
4.2.6 有限长导线求解步骤收敛性讨论	111
4.3 高频电流波在导线弯曲段的传播	115
4.3.1 问题描述	115
4.3.2 导线弯曲段的描述：电场积分方程的推导	115
4.3.3 电场积分方程的迭代解	119
4.3.4 所提出方法的验证	120
4.3.5 辐射功率	122
4.4 小结	124
参考文献	124
第 5 章 高频电磁场对带负载的非均匀长导线的耦合：渐近方法	127
5.1 简介	127
5.2 高频电磁场对带负载长导线的耦合	128
5.2.1 渐近方法	128
5.2.2 本章提出的导线渐近区感应电流三项表达式 计算方法的精确度	134
5.2.3 应用：带负载的长导线对外界平面波的响应	135
5.3 非均匀传输线的渐近方法	139
5.4 小结	143
附录 A 用系数 I_1 和 I_2 来计算系数 R_+, R_-, C_+, C_-	143
附录 B 用第 4 章给出的迭代方法推导半无限长开路导线的 系数 C_+ 和 C_- 的解析表达式	144
附录 C 含有集总阻抗导线的渐近区域里感应电流的解析表达式	147
参考文献	148



第 6 章 常规高速互连线和金属碳纳米管互连线的传输线模型	151
6.1 引言及历史背景	151
6.2 广义积分公式和传输线模型的推导	154
6.2.1 积分公式	154
6.2.2 传输线方程	155
6.3 常规导线的传输线模型	158
6.3.1 圆柱形对线	158
6.3.2 耦合微带线	159
6.4 CNT 互连线的传输线模型	162
6.4.1 CNT 流体模型	162
6.4.2 地平面之上 SWCNT 的传输线模型	164
6.5 例子及应用	165
6.5.1 有限长度和临近效应	165
6.5.2 高频损耗	168
6.5.3 高频串扰和模式转换	171
6.5.4 CNT 和铜互连线在纳米电子学应用中的比较	172
6.6 小结	176
致谢	176
参考文献	177
第 7 章 电磁场对埋地导线的耦合：频域和时域分析	180
7.1 引言	180
7.2 频域方法	181
7.2.1 频域公式方法	182
7.2.2 微积分方程的数值解	184
7.2.3 瞬态响应的计算	186
7.2.4 数值结果	187
7.3 时域方法	188
7.3.1 时域公式	189
7.3.2 时域能量量度(Time domain energy measures)	194
7.3.3 时域数值解步骤	195
7.3.4 利用简化反射/传输系数的另一种时域求解公式	197
7.3.5 算例	198
参考文献	206
译者后记	209

第一部分

经典传输线理论



电报员方程和场-传输线 耦合作用方程的推导

C. A. Nucci¹, F. Rachidi², M. Rubinstein³

1 University of Bologna, Italy

2 Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland

3 Western University of Applied Sciences, Yverdon, Switzerland

本章我们讨论传输线(TL)理论及其应用于外部电磁场对传输线的耦合作用问题。首先简要讨论了传输线理论的基本假定,然后针对良纯导体地面上的单根导线推导给出了场对传输线(场-线)耦合方程;同时,给出了三种描述场-线耦合作用的方法,它们在形式上不同但却完全等效;进而,把这些推导的方程扩展到了可处理有损和多个导体的情况;场-线耦合方程的时域表述形式可以对非线性负载和线缆的拓扑结构变化进行直接处理,因此也在本章叙述;最后,给出了频域和时域的求解方法。

1.1 传输线(TL)近似

外部电磁场对架空线的耦合问题有多种途径可以求解。其中一种途径是利用一般性的基于 Maxwell 方程的天线理论^[1]。基于这个途径的不同方法通常假定导线的截面比最小有意义波长要小很多(细线近似)。但是,当线缆的电学尺寸相对较长时,天线理论方法需要非常长的计算时间和很高的计算资源。另一方面,当待研线路最大尺寸比入射电磁场的最小波长更小的时候,可以采用对资源要求较少的准静态近似的技术途径^[1],这个方法忽略了传播因素,利用集总元件来表示耦合作用。但是,对于许多实际应用场合,这个条件并不满足。举例来说,考虑电力线缆受到闪电电磁脉冲(LEMP)辐照的情况,电力线网络通常可以延

伸到几公里之外,而这个距离比 LEMP 相应的最小波长大很多。事实上,LEMP 频谱的很多分量一直覆盖到几 MHz 甚至更高,这相当于最小波长约为 100 m 或更小^[2]。

第三种技术途径是传输线(TL)理论,其主要假定如下:

(1) 波的传播沿着线缆的轴向;

(2) 在线缆上任何位置处截面的线电流之和为零,也就是说,地(或参考导体)是其他 n 个线缆内电流的回流通道路;

(3) 线缆对耦合电磁场的响应具有准横向电磁(quasi-TEM)特征,也就是说,线缆上的电荷和电流产生的电磁场被限定在横向平面且垂直于线缆轴向方向。

如果线缆的截面尺寸很小,波的传播可认为仅存在于沿着线缆轴向的方向。第一个假定条件可以给出很好的近似结果。

满足第二个假定的条件是地平面为无穷大导体,线电流和电压可以通过镜像原理获得,大地中的镜像电流具有等幅反向特征。

满足第三个假定的条件是适用频率不能高于某一阈值频率,因为高于这一频率时,高次模开始出现^[1]。有许多场合,譬如无限大平行板或同轴线,可以导出截止频率的确定解,低于这一频率时,只有 TEM 模式存在^[3]。对于其他的线缆结构(如放置于地面的多导体线缆),只要线缆截面满足电小条件,通常即认为是 TEM 模式响应^[3]。

在这些假定条件下,线缆可以用沿着轴向的分布式参数结构来表征。

对于具有电小截面尺寸(不超过激励电磁场最小波长的十分之一)的均匀传输线,已经有很多理论和实验研究结果证实,采用传输线近似得到的结果与基于天线理论和实验结果得到的结果吻合非常好(参见文献[4])。需要指出的是,由于假定所有线电流之和为零,这种途径仅考虑了传输线模式电流而忽略了天线模式电流^[1]。如果需要计算线缆负载端的响应,这个假定条件是充足的,因为天线模式电流在靠近线缆末端的地方非常小。但是,若要计算沿线电流分布,即便对于满足电小截面条件的线缆,天线模式电流的存在也使得线电流总和并不一定为零^[1,3]。然而,对于近地线缆,由于地平面而具有的准对称性,使得天线模式电流的贡献非常小,此时线上电流主要是传输线模式电流^[1]。

1.2 良纯导体地面上的单根导线

本节首先考虑良纯导体地面上的无耗单根导线,通过这个简单例子来引入各种传输线耦合模型,并讨论有助于理解电磁场耦合的一些概念。然后在 1.4 节和

1.5 节, 扩展到有耗和多导体传输线的情况。图 1-1 给出的传输线示意图中, 几何参数为线缆半径 a 、距离地面高度 h , 两端负载分别为 Z_A 和 Z_B , 传输线受到外界电磁场的辐照, 待求量是沿线和负载端的感应电压及感应电流。

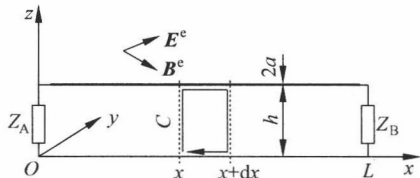


图 1-1 无耗单根导线的几何结构

外界激励电磁场 E^e 和 B^e 定义为入射场 E^i 和 B^i 与地面反射场 E^r 和 B^r (传输线存在时) 的叠加。空间给定位置处的总场

E 和 B 是激励场和传输线散射场 (记为 E^s 和 B^s) 的叠加。散射场是由传输线上的电流和电荷以及相应地面上的感应电流和电荷产生。

为了描述电磁场对传输线的耦合, 有三种形式上不同但完全等效的模型。下面将依次给出这三种模型。首先给出 Taylor 等人提出的场-线耦合方程 (有时也称为广义电报员方程)^[5]。

1.2.1 Taylor, Satterwhite & Harrison 模型

1. 场-线耦合 (广义电报员) 方程第一个方程的推导

考虑架高 h 的单根导体传输线, 如图 1-1 所示。在闭合轮廓曲线 C 构成的面积内对 Maxwell 方程 $\nabla E = -j\omega B$ 应用 Stokes 定理, 可得到

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -j\omega \iint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{e}_y dS \quad (1-1)$$

图中轮廓线的宽度为 Δx , 式 (1-1) 可写为

$$\begin{aligned} & - \int_0^h [E_z(x+\Delta x, z) - E_z(x, z)] dz + \int_x^{x+\Delta x} [E_x(x, h) - E_x(x, 0)] dx \\ & = -j\omega \int_0^h \int_x^{x+\Delta x} B_y(x, z) dx dz \end{aligned} \quad (1-2)$$

(注: 坐标 y 隐含假定为 0, 为明晰起见, 式中略去 y 参数坐标, 除非另有讨论需要明确写出) 上式除以 Δx , 令 Δx 趋近于零并取极限, 得到

$$-\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h E_z(x, z) dz + E_x(x, h) - E_x(x, 0) = -j\omega \int_0^h B_y(x, z) dz \quad (1-3)$$

因为导线和地面均为良纯导体, 它们表面处的切向电场 $E_x(x, h)$ 和 $E_x(x, 0)$ 也均为零。在准静态条件下 ($h \ll \lambda$), 总的横向电压 $V(x)$ 可以定义为

$$V(x) = - \int_0^h E_z(x, z) dz \quad (1-4)$$

于是式 (1-3) 变为

$$\frac{dV(x)}{dx} = -j\omega \int_0^h B_y(x, z) dz = -j\omega \int_0^h B_y^e(x, z) dz - j\omega \int_0^h B_y^s(x, z) dz \quad (1-5)$$

式中,磁场已经分解成激励和散射分量。

式(1-5)中的最后一个积分表示由于电流 $I(x)$ 的流动而在导体和地面之间产生的磁通量。

积分形式的 Ampère-Maxwell 方程为

$$\oint_C \mathbf{B}^s \cdot d\mathbf{l} = I + j\omega \iint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-6)$$

如果在某一常值 x 处,定义路径 C' 位于横向平面内且导线穿过它,则方程(1-6)可重写为

$$\oint_{C'} \mathbf{B}_T^s(x, y, z) \cdot d\mathbf{l} = I(x) + j\omega \iint \mathbf{D}_x(x, y, z) \cdot \mathbf{a}_x ds \quad (1-7)$$

其中,下标“T”指示这个为横向场; $\mathbf{a}_x$ 是 x 方向的单位矢量。显然这些场量在 Cartesian 坐标的三维方向都有分量。

如果导线的响应是 TEM 模式, x 方向的电通量密度 D 为零,则方程(1-7)可重写为

$$\oint_{C'} \mathbf{B}_T^s(x, y, z) \cdot d\mathbf{l} = I(x) \quad (1-8)$$

很显然, $I(x)$ 是 $\mathbf{B}_T^s(x, y, z)$ 的唯一来源。此外,从方程(1-8)可知, $\mathbf{B}_T^s(x, y, z)$ 与 $I(x)$ 成正比。事实上, $I(x)$ 被一个常数倍乘因子(可以为复数)相乘,则 $\mathbf{B}_T^s(x)$ 也会被这个因子相乘。而且,对于等截面的传输线来说,这个比例因子一定与位置 x 无关。

现在我们来关注 $y=0$ 平面内各点 $\mathbf{B}_T^s(x, y, z)$ 的 y 分量。上面已经得到 $I(x)$ 和 $\mathbf{B}_T^s(x)$ 成正比关系,且比例因子与位置 x 无关,于是我们可以写出

$$B_y^s(x, y=0, z) = k(y=0, z)I(x) \quad (1-9)$$

其中, $k(y, z)$ 为比例常数。

有了这个结果,我们再回到方程(1-5)的最后一个积分:

$$\int_0^h B_y^s(x, z) dz$$

注意到,虽然上式中 y 值并没有明确给定,但实际上 $y=0$ 。这个积分表示传输线下面的单位长磁通量。将式(1-9)代入上式,可以得到

$$\int_0^h B_y^s(x, z) dz = \int_0^h k(y=0, z) I(x) dz \quad (1-10)$$

我们可以重写式(1-10),得到

$$\int_0^h B_y^s(x, z) dz = I(x) \int_0^h k(y=0, z) dz \quad (1-11)$$

方程(1-11)意味着传输线任意点处,其下方的单位长散射磁通量与在该点的电流成正比。由 $\int_0^h k(y=0, z) dz$ 确定的比例因子是传输线的单位长电感 L' 。