

漏泄馈线 和 地下无线电通信

【比】保罗·德隆涅 著

王椿年 戴耀森

高怀珍 莫梧生

译

人



73.458
422

漏泄馈线和地下无线电通信

[比]保罗·德隆涅 著

王椿年 戴耀森 译

高怀珍 莫梧生

人民邮电出版社

10
0037/27
Leaky Feeders and Subsurface Radio

Communications

Paul Delogne

Peter Peregrinus Ltd. 1982

内 容 提 要

本书是世界上第一本系统地论述漏泄馈线和地下无线电通信的专著。它从最基本的麦克斯韦方程出发，系统而又严格地分析了漏泄馈线在隧道中激励场的问题及场的模式转换和传播问题。并以矿井移动无线电通信为例，叙述了工程设计时应考虑的问题，给出了实用公式和计算方法。

本书可供从事地下无线电通信的研究、开发、设计和管理人员阅读，也可供有关专业的大专院校师生参考。

漏泄馈线和地下无线电通信

〔比〕保罗·德隆涅 著

王椿年 戴耀森 译
高怀珍 莫梧生
责任编辑：李小曼

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32

1988年1月第一版

印张：10 12/32 页数：166

1988年1月河北第一次印刷

字数：272千字

印数：1—2 000 册

ISBN7115—03448-6/TN

定价：2.35 元

目 录

译序.....	(1)
序言.....	(2)
第一章 引论	(4)
1.1 材料特性	(5)
1.2 空隧道中的固有传播	(9)
1.2.1 简化波导模型	(9)
1.2.2 与实验结果比较	(12)
1.2.3 截止频率以上的固有传播	(15)
1.3 单线波模	(18)
1.4 长感应环线	(21)
1.5 漏泄馈线	(23)
1.5.1 原理	(23)
1.5.2 低于隧道截止频率的漏泄馈线	(25)
1.5.3 高于隧道截止频率的漏泄馈线	(27)
1.6 波模转换器	(30)
1.7 历史的回顾	(32)
第二章 地下传播的电磁理论	(37)
2.1 引论	(37)
2.2 电磁位	(39)
2.2.1 一般阐述	(39)
2.2.2 用两个标量表示	(41)
2.2.3 位的适当选择	(44)
2.3 细电缆近似	(46)
2.4 细导线的表面阻抗	(50)
2.5 漏泄馈线的传递特性	(52)

★ 2.5.1	传递阻抗概念	(52)
2.5.2	对以往工作的评述	(58)
2.5.3	漏泄同轴电缆传输线模型	(61)
2.5.4	传递阻抗的理论预测	(66)
2.5.5	传递阻抗的实验测定	(74)
2.5.6	漏泄同轴电缆的外表面阻抗	(76)
2.6	低电导率层中的固有传播	(78)
2.6.1	平面导(引)波	(79)
2.6.2	垂直电偶极子激励	(85)
2.6.3	水平磁偶极子激励	(93)
2.7	空隧道中的固有传播	(95)
2.7.1	引论: 平面大气波导	(95)
★ 2.7.2	平面大气波导的几何光学方法	(98)
2.7.3	矩形隧道	(103)
2.7.4	圆形隧道	(111)
2.7.5	弯曲隧道	(117)
2.8	圆形隧道中导线和漏泄馈线的导波波模	(119)
2.8.1	导波波模的基本理论	(119)
2.8.2	推广到多根导线或多根电缆	(124)
★ 2.8.3	单线导体的结果	(126)
★ 2.8.4	双线线路的结果	(129)
★ 2.8.5	漏泄同轴电缆的结果	(135)
2.9	矩形隧道中导线和漏泄馈线的导波波模	(138)
2.10	若干激励问题	(139)
2.10.1	单导线的间隙激励	(139)
2.10.2	隧道中的偶极子辐射	(144)
2.10.3	断续屏蔽的同轴电缆	(156)
★ 2.11	传输损耗	(173)
2.12	准静极限	(176)

	2.12.1 电位和磁位.....	(176)
★	2.12.2 隧道空间中的电磁场.....	(182)
★	2.12.3 传输线方程.....	(184)
★	2.12.4 波模方程.....	(187)
★	2.12.5 准静分析的推广.....	(188)
第三章	波模和波模转换.....	(191)
3.1	波模和传输线模型	(191)
3.1.1	引论	(191)
3.1.2	应用于单线导体	(193)
3.1.3	应用于漏泄同轴电缆	(195)
3.1.4	推广到多根导线	(197)
3.2	耦合传输线理论	(198)
3.2.1	一般理论	(198)
3.2.2	应用于漏泄同轴电缆	(201)
3.2.3	漏泄馈线的间断性; 终端效应	(204)
3.2.4	应用于多导线系统	(206)
3.2.5	专用线技术	(211)
3.3	波模转换器的一般特性	(213)
3.4	环形缝隙波模转换器	(216)
3.4.1	原理	(216)
3.4.2	共振匹配	(217)
3.4.3	宽带匹配	(217)
3.5	用作定向波模转换器的漏泄段	(219)
3.6	双线传输线波模转换器	(222)
3.7	非故意波模转换	(224)
第四章	高频及更低频段上的地下无线电通信系统.....	(227)
4.1	引论	(227)
4.2	采矿技术	(229)
4.3	参考隧道	(235)

4.4	实际隧道中的电磁场	(236)
4.4.1	导波电缆的恰当配置	(236)
4.4.2	单线波模的工程模型	(236)
4.4.3	推广到连续漏泄馈线	(240)
4.5	天线和地下通信	(240)
4.5.1	天线的电路模拟	(240)
4.5.2	某些一般性考虑	(243)
4.5.3	对电偶极子的评价	(244)
4.5.4	对磁偶极子的评价	(246)
4.5.5	天线的优化准则	(248)
4.5.6	环形天线	(250)
4.5.7	铁氧体天线	(251)
4.6	设备性能	(254)
4.6.1	发射机功率	(254)
4.6.2	接收机灵敏度	(255)
4.6.3	设备设计举例	(258)
4.6.4	采矿环境中的人为噪声	(261)
4.7	矿井通信系统设计	(263)
4.7.1	一般原理	(263)
4.7.2	例一	(264)
4.7.3	例二	(267)
4.8	漏泄同轴电缆的优化	(269)
4.8.1	连续漏泄馈线	(270)
4.8.2	具有漏泄段的电缆	(271)
4.9	硐室和矿柱采矿中的中频通信	(272)
4.10	公路隧道中调幅广播的转播	(274)
第五章	甚高频和特高频地下无线电通信	(276)
5.1	引论	(276)
5.2	隧道中的固有传播	(277)

5.3 甚高频和特高频漏泄馈线	(280)
5.3.1 概述	(280)
5.3.2 辐射的统计分布	(281)
5.3.3 影响耦合损耗的参数	(283)
5.3.4 比衰减	(285)
5.3.5 有关测试的进一步资料	(286)
5.4 具有漏泄段的同轴电缆	(287)
5.4.1 概述	(287)
5.4.2 漏泄段的辐射特性	(288)
5.4.3 应用	(290)
5.5 系统结构	(292)
5.5.1 概述	(292)
5.5.2 天线与漏泄馈线的对比	(293)
5.5.3 多基地台系统	(294)
5.5.4 宽带串联中继器	(295)
5.5.5 由地上到地下的中继	(298)
5.6 现有和正在规划中系统的几个例子	(299)
5.7 进一步的研究	(305)
参考文献	(305)
附录	(314)
附录 A 在笛卡尔坐标系中用位势来计算场	(314)
附录 B 在柱面坐标系中由位势 $U=\pi_z'$ 和 $V=\pi_z''$ 来 计算场	(316)
附录 C 关于贝塞尔函数的某些有用公式	(319)
附录 D 单侧付里叶变换	(322)

译 序

漏泄馈线在地下无线电通信系统中的应用是最近十几年内发展起来的课题，而本书是论述这个课题的第一本书。作者德隆涅教授是研究矿井和隧道无线电通信系统的专家。他的研究成绩除了许多论文以外，还有在这方面取得的三项发明专利。正因为这样，由他来撰写这个论题自然是得心应手的。

这本书篇幅不多，却从理论和实际两方面探讨了漏泄馈线技术，总结了已有的成果，指出了尚待解决的问题。叙述中条理清晰、联系实际、难点分散。因此，对于在这个领域里工作的科学家和工程师而言，无疑是一本很有参考价值的文献。

我国幅员辽阔、矿产资源丰富，近年来公路系统也发展得很快。为了增加安全和提高生产率，借鉴国外这项新技术来开发自己的无线电通信系统是紧迫的任务之一。

杭州电子工业学院王椿年、戴耀森、高怀珍翻译了本书。王椿年校对了全文。国防科工委情报所莫梧生也参与了一部分工作。在翻译过程中我们改正了原书的印刷错误多处。由于翻译是在很短时间内完成的，疏误在所难免，恳请读者批评指正。

译者

一九八五年十月

序 言

詹姆士·R·惠特教授 (James R. Wait) 于1978年8月来信询问我是否能为IEE电磁波丛书写一本论述漏泄馈线的书, 这封信即是本书的由来。

不久之前, 在赫尔辛基举行了国际无线电科联第18届大会, 与会者必定记得, 正是惠特教授由于在这个领域中的成就而荣获范·德·波尔 (Van der Pol) 金质奖。因此, 从我这方面给出的最容易的答复应当说是除了教授自己以外, 没有更合适的人选能担当这项工作。

然而, 尽管其它任务繁重, 我还是答应了他的要求。事实上, 我一直紧紧地追随惠特教授及其同事们所从事的卓越的理论工作。我自己也做了某些理论分析, 而且在同比利时国家采掘工业研究所 (INIEX) 和巴黎交通独立管理局 (RATP) 的合作中取得了许多现场经验。因此, 那时我以为撰写这本书将会是轻松而有意义的事情。现在才懂得这些形容词中的第一个纯属空想, 但是希望读者能认可第二个形容词。

假如果真如此, 那末在很大程度上应该归功于我有幸同他们在一起合作了好几年的那些人。在本领域中我的大部分工作是在担任INIEX的顾问时开展的。这种同R. Liegeois, R. De Keyser和L. Deryck的富有成果的协作得益于同美国的J. R. Wait, D. A. Hill, 英国的Q. V. Davis, D. J. R. Martin, 法国的R. Gabillard, P. Degauque和许多其他人的频繁接触。超高频段的现场经验是在和RATP的Jouan小姐、Sniter小姐及Malet夫人合作时得到的。

勒文天主教大学中我的同事和合作者们给了我经常的促进和鼓励。F. Colle小姐和H. Lobelle小姐精心打印了手稿。

最后要热诚感谢我的妻子和孩子们，因为他们贡献出了本来可以用于其他事情上的晚上和周末。

保罗 德隆涅

1982年4月22日

于新勒文

第一章 引 论

无线电波在隧道中不能很好地传播，这是许多卡车司机每天都经历的事实，不过，这对他们来说仅仅是一种不舒服的感受，而对于在地面下工作的人们来说，则变成了严重的障碍。这一点在矿井中尤为突出。现在认为，移动式无线电通信对那里增加安全和提高生产率都是至关重要的。令人惊讶的是，直到本世纪六十年代末几乎没有人去探索地下电磁波传播这个课题。从那以后，有几个国家对这个题目开展了切实的研究，因而有关传播机制方面，现在已经有充分的知识可以利用。目前，无线电话系统令人满意地应用在许多矿井、公路隧道和铁路隧道中。因此撰写第一本论述这个课题及与之有关的漏泄馈线的书的时机已经到来。

虽然在最后三章中，有几段是以未发表的私人笔记为基础的，但这本专著主要是将散见于公开、难得的文献中的许多结果搜集在一起，而不是介绍新的材料。地下无线电通信涉及到的电磁波传播问题极为复杂。作者在开始编写本书时，考虑到某些未来的读者所关心的是地下无线电系统设计，而不是它们的理论，因而决定将所有较难的理论探讨集中在第二章内。这样做，便于那些对理论不感兴趣的读者能跳过这一章。然而我建议还是阅读一下标有星号的那几节。某些理论工作者反过来对系统设计不感兴趣，但他们仍将在比较实际的第三和第五章内发现有意思的数据和事实以及开展新探索的源泉。本书的这么安排不可避免地造成了某些重复。第一章包含两类读者通用的引论。第三章着重于波模、波模转换过程和转换技术的分析。人所共知，它们在地下传播中起着十分重要的作用。这些方法的基础是传输线理论，后者的正确性在第二章中得到证

明，它仍然是理论，但即使并不擅长电磁理论的人们也容易读懂，而且也清楚地理解比较实际的第四和第五章所必须。

1.1 材料特性

天然岩石材料的电参数是个相当复杂的问题，它可以成为另一本书的题目。有许多天然岩石具有晶体状的细微结构，这些晶体的尺寸远远小于地下无线电通信系统选用的工作波长，所以，只要它们没有优先的取向，我们总可以将材料的整体电特性看作是各向同性的。事实上地质分层使岩石具有优先取向，因而引起了某种程度的各向异性，但我们这里并不加以考虑，因为电特性参数取的数值范围很宽而且有剧烈的变化，与之相比起来，各向异性效应小得可以忽略不计。这里所说的电参数有介电常数 κ ，磁导率 μ 和电导率 σ 。

除了那些铁磁族元素即铁、镍、钴金属它们含量特别丰富的岩石以外，天然材料的磁导率和真空的磁导率值 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨·米⁻¹非常接近。在本书内除非特别说明，所有计算都用上面这个数值。

另一方面，岩石的介电常数和电导率的变化很大。介电常数变化范围是从2~70，但比较经常的是从4~10。电导率变化范围从 $10^{-8} \sim 1$ 西门子·米⁻¹，对于指定的岩石类型和固定的频率它可能散布于两个数量级以上的范围。一般地说， κ 和 σ 都随着水份含量而增大。由于色散效应，通常当频率增大时，电导率增加而介电常数减小。但这些变化并不是独立的，它们由Kramers—Kronig关系式（Landau and Lifshitz, 1960）联系在一起，这个关系式可用来校验实验数据的有效性。此外，电导率和介电常数可能与压力有关（Onsager效应）。在地下深处本来有极强的压力，挖掘隧道之后其周围岩石出现减压现象，因而岩石的压力效应可以略去。

在实验室里，可以相当精确地测出样品的电导率和介电常数。对于这类测定值的有效性应持十分谨慎的态度，其原因在于，很难

做到将样品取出并带到实验室里而又不改变其电参数。进一步说，假如大地是不均匀的，那末按上述方式得到的值仅仅和小样品相联系，而未必有代表性。原地测量特别是仔细地比较传播数据和适当的模型计算无疑是可取的，但它们同样是很难求得的。

图1.1所示是J.C.Cook (1975) 在实验室里测定的各种岩石材

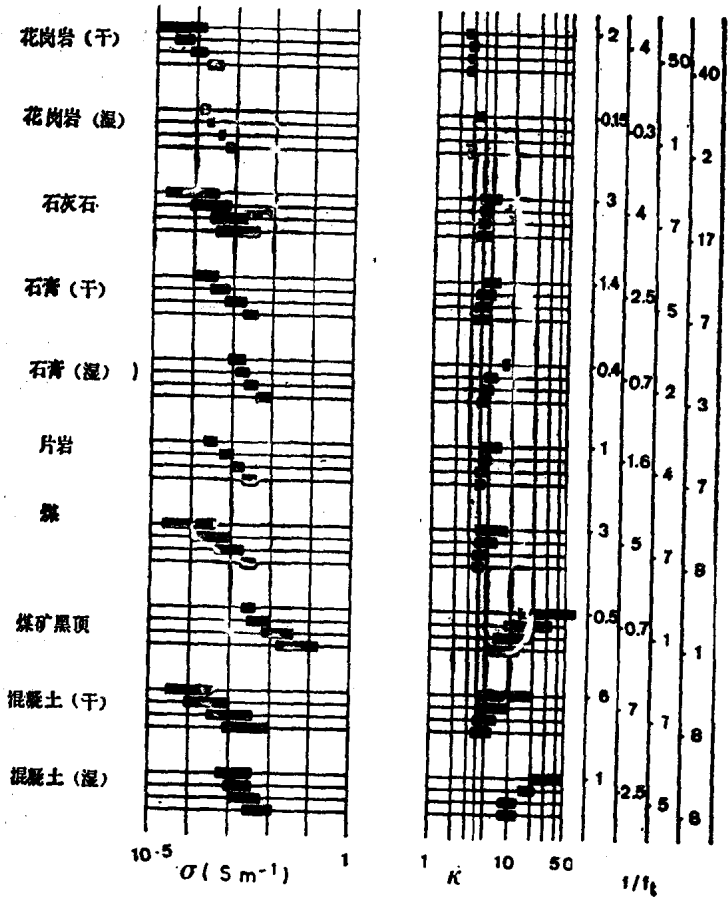


图 1.1 某些材料的电参数。每种材料从上到下的粗线对应于频率 1, 5, 25 和 100 兆赫

料和几种典型混凝土的数值范围，一共用了四个频率。我们在这里指出的是每种岩石测定值覆盖的总范围，对细节感兴趣的读者可以参看原始文献。仅仅当由干湿所引起的差值比同类岩石样品的离差更大的时候，我们才将材料的干湿加以区分。

尽管图中展示的数值来自一系列深入细致的测定，但依然只能将它们看作是象征性的。实际遇到的数值有可能超过上述范围。我们这里特别感兴趣的是煤及其周围岩石的电特性。如图所示，煤的电导率比较低。在一项已规划的无线电通信系统中，用到一个值得注意的性质是，煤矿顶层电导率远大于煤层电导率。据Emslie和Lagace (1978)报导，在美国煤矿里，用中频频率求得煤的电导率为 $3 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-3}$ 西门子·米⁻¹，而顶层电导率为 $7.7 \times 10^{-3} \sim 1.09$ 西门子·米⁻¹。在各种场合下，两者的比值介于75~5400之间。Balanis等(1978)用直到100兆赫为止的频率对烟煤所作的测定与上述结果相一致。不同的是，煤的介电常数在低频率上取值较大，在500千赫上是16~41，在1兆赫上是10~34。这些作者观测到电导率和介电常数随方向的变化可达到4倍，但对于直到370°C的温度变化，则这些参数几乎不受影响。他们还报导了在9吉赫上对烟煤测出的值是 $\kappa = 3.4 \sim 3.9$ ， $\sigma = 0.12 \sim 0.73$ 西门子·米⁻¹。

对于给定的媒质，由等式 $2\pi f_c \epsilon = \sigma$ 定义的过渡频率 f_c 是一个特征频率。低于这个频率，媒质中的传导电流比位移电流更重要，这时可以将材料看作是导体。高于这个频率，则出现相反的情形，这时材料的性质同电介质比较接近。图1.1的最后一列给出了与四个频率各自对应的比式 f/f_c 的平均值，其中 f_c 是对每个频率上 σ 和 κ 的平均值计算出来的。

为了便于查考，图1.2展示出 $\kappa = 10$ 和各种电导率值之下均匀媒质中均匀平面波传播常数 Γ 的实部和虚部，

$$\Gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(j\omega\epsilon_0\kappa + \sigma)j\omega\mu_0} \quad (1.1)$$

图中还画出了趋肤深度 δ 和波长 λ 的标尺：

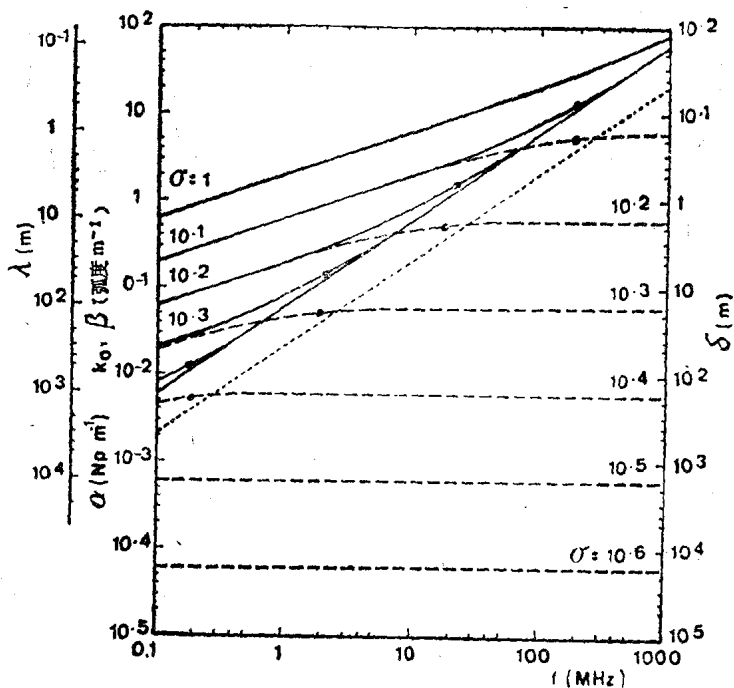


图 1.2 介电常数 $\kappa=10$ 的媒质的传播参数。实线表示 β 和 λ 。破折线是 α 和 δ 。点线代表自由空间波数 k_0 。 α 和 β 曲线上的点子表示过渡频率。

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (1.2)$$

$$\lambda = 2\pi/\beta \quad (1.3)$$

在曲线上用点子标记的过渡频率处 Γ 的宗量值等于 $3\pi/8$ 。值得注意的是，包括过渡频率在内的材料特性是随频率而改变的，这张图还可用来求复折射指数 n ，这个量定义为

$$n = \Gamma/(jk_0) \quad (1.4)$$

其中 $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 也展示于图中。

1.2 空隧道中的固有传播

我们从考虑一条笔直隧道入手来作地下传播分析。假定隧道内没有任何别的物体，特别是没有任何轴向导体。这是一种非常罕见的情形，因为大多数隧道内含有导体，例如沿着侧壁或悬挂在顶棚下的电力电缆，还有路轨、水管等等。在以后的章节中明显可见，这些导体使整个结构的电磁特性发生剧烈改变。尽管有时隧道壁的电导率很低，但通过与高电导壁的空心波导管相比，我们已能得到隧道传播现象的良好图景。

1.2.1 简化波导模型

有好多著作，例如Marcuvitz(1951)论述了理想导电壁波导理论，在这里我们准备对比展开讨论，而仅仅是回忆一下那些与隧道中电磁波传播问题有关的主要结果。所作的分析取简谐时间变化 $\exp(j\omega t)$ 。按照理论，电磁场分解成一些称为波模的解式之和。一个波模是这样的一个解，它随纵坐标 z 的变化关系是 $\exp(-\Gamma z)$ 。复常数

$$\Gamma = \alpha + j\beta \quad (1.5)$$

是波模的传播常数，其实部 α 称为衰减率，单位为奈培·米⁻¹；虚部 β 称为相移率或相位常数，单位为弧度·米⁻¹。显然，各种各样的波模具有不同的传播常数和不同的场分布。

在理想导电壁的空心波导管中，某特定波模的传播常数随频率变化的关系非常简单。每个波模有一个临界频率 f_c 作为表征，这个频率值依赖于隧道的形状和尺寸。当波频低于这个值时波模是迅衰的，也就是说它只有衰减而没有相移，其衰减率由下式给出：

$$\alpha = 2\pi f_c / C(1 - (f/f_c)^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

其中， $c = 3 \times 10^8$ 米·秒⁻¹是真空光速。波频高于这个临界值时，波模没有衰减而只有由下式给出的相移