

通信线路的串音理论

W. 克兰恩 著 · 胡筠 译 · 人民邮电出版社出版

Dr.-Ing. Wilhelm Klein

Die Theorie des Nebensprechens auf

Leitungen

1955

內 容 提 要

本書討論的是計算通信架空綫路和对称电纜綫路中串音的問題，本書是第一次試圖用統一的理論來論述串音問題。本書包括三个主要部分，第一部分是根據綫路結構的几何尺寸計算平行导綫回路間的电磁耦合，第二部分是怎樣計算相互串音，第三部分是理論的具体应用。

为了帮助讀者更好地評价这本书和进行学习，書中补充了俄文譯本的前言和俄文譯本的“补充参考书刊”。

通信綫路的串音理論

著 者：W. 克 兰 恩

譯 者：胡 筠

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

(北京市書刊出版业营业執照出字第 048 号)

印刷者：北 京 新 华 印 刷 厂

发 行 者：新 华 書 店

开本 787×1092 1/32

1959 年 12 月北京第一版

印张 5 24/32 頁數 92

1959 年 12 月北京第一次印刷

印刷字數 134,000 字

印數 1—1,530 册

統一書号：15045·总 1120—有 240

定 价：(11) 0.91 元

目 录

俄文譯本的前言	1
序言	6
引言	7
§ 1. 課題	7
§ 2. 历史簡述	12
a) 近端串音和远端串音	12
b) 明綫串音理論	13
b) 对称电綫上的串音理論	16
第一章 从几何尺寸計算耦合	19
A. 平行导綫上的耦合	19
§ 3. 平行导綫系統	19
a) 电位系数	21
b) 导綫磁感	24
§ 4. 麦克斯威部分电容方程式	26
§ 5. 导綫綜合成回路	28
§ 6. 工作电容和相互电容	37
§ 7. 在弱耦合时的近似計算	38
§ 8. 电位系数的公式	39
§ 9. 应用	41
a) 具有四个載波回路的綫路的耦合	41
b) 电綫中四綫組内部的耦合	44
c) 电綫中邻近四綫組的耦合	47

B. 扭絞回路間的耦合	51
§ 10.* 滾式交叉綫路的耦合	52
§ 11.* 星形四綫組電纜中的耦合	56
a) 不同四綫組間的耦合	57
1. 两个四綫組在同一层时	59
2. 两个四綫組在不同层时	60
α) 实綫回路在外层, 不对称系統在中心	61
β) 实綫回路在中心, 不对称系統在外层	62
b) 实綫回路和不对称系統在同一个四綫組	63
c) 自电位系数	64
1. 实綫回路的自电位系数	64
2. 不对称系統的自电位系数	65
§ 11. 的附录	66
第二章 从耦合計算串音	68
§ 12. 基本概念	68
§ 13. 一般化的电报方程式	70
§ 14. 不交叉的平行回路	71
a) 在有二个回路时的串音	74
b) 在有三个回路时的串音	76
c) 在有四个或更多个回路时的串音	77
d) 用直观方法求結果	80
1. 单位长度上的串音	80
2. 不交叉平行回路間的近端串音	82
3. 不交叉平行回路的远端串音	83
§ 15. 当第三回路有匹配的終接阻抗时, 耦合的任意分布	83
a) 两个回路	84
b) 三个回路	86
c) 所得結論的意义	89
§ 16.* 第三回路开路或短路时, 耦合的任意分布	92
a) 当第三回路开路时的附加电压	93

b) 当第三回路短路时的附加电压	94
c) 当第三回路开路 and 短路时的远端串音	95
§ 17.* 远端串音公式的直观推导	97
a) 当第三回路终接匹配负荷时的纵向串音	98
b) 在第三回路开路 and 短路, 以及在不同波速度时的纵向串音	99
c) 在不同波速度时的横向串音	102
§ 18. 用傅利叶级数表示耦合分布的概念	103
a) 直接近端串音	103
b) 远端串音	104
第三章 理論在技术問題上的应用	107
§ 19.* 加感的低頻电纜	107
a) 在加感节距中的串音	107
b) 加感节距上的串音和增音段上串音間的关系	108
§ 20.* 滾式交叉綫路	113
§ 21.* 施作点式交叉的綫路	117
a) 交叉程式	117
b) 按基本交叉程式施作交叉时的近端串音	120
c) 当按基本交叉程式和派生交叉程式施作交叉时, 近端串音公式的直观推导	122
d) 当第三回路两端开路时, 交叉回路間的远端串音	124
1. 最大交叉指数不同	124
2. 最大交叉指数相同, 最大交叉指数前面的交叉指数不同	127
e) 在一个有 4 个載波回路的綫路上的測量結果	129
§ 22. 在諧振頻率測量串音以决定耦合的頻率特性	131
a) 規則串音和不規則串音	131
b) 交換效应	132
c) 在諧振頻率时的近端串音	135
d) 在諧振頻率时的远端串音	138
§ 23. 在載波电纜中四綫組內部的远端串音	138

a) 測量結果.....	140
b) 四綫組內部串音的計算.....	140
1. 諧振区外的远端串音	142
2. 諧振区	143
c) 測量結果的应用.....	145
§ 24. 由两个耦合回路构成的定向耦合器	146
附录一 矩陣計算入門	149
附录二 公式一覽.....	155
参考书刊	174
补充参考书刊	177

* 用星符号标志的节在第一次初讀本書时可以跳过。

俄文譯本的前言

在苏联，主要是靠在電纜綫路和架空明綫綫路上开通多路載波进行长途报話通信。電纜綫路和架空明綫綫路通信制式今后的发展方向，以及增加通信容量的方法，是加寬所傳輸的頻帶。目前，对称電纜回路的傳輸頻率达250千赫，明綫回路的傳輸頻帶达150千赫。正在研究着的新制式，將傳輸更寬的頻帶。

妨碍利用更寬傳輸頻帶的主要原因是通信回路間的串音。因此，在整个长途通信技术发展期間，都需要注意通信回路間相互干扰的問題以及降低干扰的方法。当在電纜綫路和架空明綫綫路上傳輸高頻率电流时，相互干扰問題有着更加重要的意义。

在克兰恩所著的这本书中，对长途通信綫路近代技术中的上述非常迫切而又现实的相互干扰問題进行了讲解。

虽然架空明綫綫路和電纜綫路回路間的相互干扰的物理过程在原理上是相同的，但是由于历史上的形成，几十年来都是分开单独进行研究的。不过，近几年来，已有人着手寻找回路間相互干扰的通用理論，这种理論不仅适用于電纜或架空明綫回路間的相互干扰（参見补充参考书刊[5—7]，П. К. 阿庫里生；[12]，И. В. 柯普捷夫；[13, 14]，В. Н. 庫列朔夫）；而且也适用于輸電綫和通信綫路回路間的干扰（补充参考书刊[18, 19]，

M. И. 米哈伊洛夫)。这种探索在近几年来并不是沒有成績的。而且逐步开始綜合利用在电纜綫路上和架空明綫回路上所采用过的降低相互干扰的措施。例如，在架空明綫綫路上，开始采用集中平衡，而集中平衡是首先在电纜綫路上采用的；在电纜綫路上，开始采用規則交叉、安装串音抑制設備，而这一些原来只是应用在架空明綫綫路上的。

克列恩所写的这本书是第一次試圖用統一的理論来論述电纜綫路回路間和架空明綫回路間相互干扰理論的基本問題。书中概括了作者在通信綫路設備理論方面的著作，而且大部分（特别是在第二章、第三章所談到的一些問題）已經在德国各种有关期刊上发表过了。

原书包括三个主要部分，此外还有序言和附录。在序言中，除了提出課題和基本定义外，还对电纜綫路回路間和架空明綫回路間相互干扰理論的发展历史作了扼要的叙述。在上述历史叙述中，主要是談論德国作者的著作和姓名，完全忽視了苏联学者和工程師們在这方面的贡献，因此这一部分对苏联讀者的好处是不大的。

应当指出，即使在正文中也沒有談到苏联作者的著作。因此，除了原书中根据德国資料所列的参考书刊外，又补充了苏联作者在相互干扰方面的著作。

在第一章中，克列恩根据回路的几何尺寸，研究了如何計算平行导綫回路間的电磁耦合。計算耦合的方法是以导綫束理論作基础，运用矩陣計算。从这一方面来研究导綫束的耦合，

是值得关心的；而且在計算耦合时运用矩陣計算方法，毫無疑問，将会在理論进一步发展給出非常有价值的結果。在研究导綫束中耦合时采用矩陣計算，使得有可能找出更为深透和更为严謹的办法，来确定多四綫組電纜和架空明綫綫路回路上的相互干扰。

在这一章中，最值得注意的是关于导綫束中回路的組成問題，以及导綫束和回路的电容参数和磁感参数間的相互联系的說明。应当指出，为了簡化起見，本书对所研究的回路都是假定回路有很强的集肤效应，也就是說，是理想化了回路，这样就在一定的程度上降低了本书所求的結果的价值。但是，书中的实验数据已可以使我們认为所提出的假設，对于架設有色金屬导綫的架空綫路，在任何情况下都是可以成立的。

毫無疑問，在第一章中所提出的关于電纜中扭絞回路間的耦合以及扭絞回路的某些一次参数的計算，是值得注意的。

书中結合具体結構实例闡述計算耦合的方法是非常有用的，它可以使讀者进一步了解所讲解的关于計算耦合的資料。

在第二章中，研究了在长度单元上有相当明显的耦合，而且綫路又相当长时，如何确定相互干扰的問題。在这一章給出了两个孤立的回路在直接相互干扰情况下，計算綫路近端和远端串音的相当清楚的計算方法。同时还指出，無論是電纜綫路，还是架空明綫綫路，只要回路是均匀的，就不会有远端串音，如果两个孤立的回路間有可察的远端串音，則說明回路中有不均匀性存在。

书中的这一章，对于通过第三回路造成的两回路間的相互干扰給了很大的注意。而且令人信服地指出，远端串音正是由于存在第三回路而造成的。在研究相互干扰时，研討了第三回路在各种不同終端負荷的情况，并指出了这些情况的重要意义。所有的研討，都是以解綜合电报方程式組为基础的。

在第二章的結尾用不多的篇幅讲解了在任意耦合分布情况下，怎样估算串音。这一部分包括用傅里叶級数进行的解析計算，这也是在发展通信回路相互干扰理論中前进了一步。

这一章的缺点是只研究了理想回路，而沒有研究回路不均匀时的情况。而苏联在这一方面是取得了很大的成就的(例如，見补充参考书刊 [14])。

在第三章中是利用前两章所讲解的理論，来解决通信技术中的一些主要的具体課題。在这里也研究了在加感电纜中、架空綫路中，以及高頻干綫电纜中的相互干扰。

和苏联的书刊比較起来，这一章并没有什么新的結論。应当強調指出，关于架空綫路回路相互干扰的問題，在 П. К. 阿庫里生教授的大量著作中 [补充参考书刊 1—7] 已經有了非常完善的論述。这些著作大部分都是在本书作者所引用的著作的以前完成的。本书这一部分所研究的关于电纜綫路的回路干扰問題，大部分已經在 B. H. 庫列朔夫、B. 3. 馬雷舍夫、B. O. 施瓦爾茨曼所著的“电纜电纜的平衡” [14] 中讲解了。

本章的缺点，和在其它各章一样，原作者仅限于讲述相互干扰的理論，几乎完全沒有涉及降低干扰的措施，而这种措施

是有非常重大的实用价值的。

在第三章的结尾指出，回路相互干扰理论的应用范围还不局限于电缆线路和架空明线线路中。例如，在高频测量技术中，当设计入射波和反射波电压的测量器时，就需要应用这一理论。

克兰恩在写这本书时已假定读者具有高等技术院校的数学水平。因此，本书附录中的矩阵基础知识是非常有用的。此外，在本书末尾将正文中的主要关系式和计算公式进行了系统地整理和罗列，显然在运用本书时，这样是非常方便的。

对于一般性的问题，苏联读者，毫无疑问，可以采用本国的数学和电工图书，而没有必要去参阅原作者所提出的德文书。

总的说来，这本书显然对苏联读者是有意义的，而且是对我国关于通信线路设备理论方面图书的一个很好的补充。

莫斯科，1958年1月

Э. Ф. 烏克斯金

В. О. 施瓦尔茨曼

序 言

近些年来，导綫束中的高频串音理論已經相当完善。計算的方法相当准确，已有可能在一系列的的实际工作中进行运用；而且已經通过相应的測量，从数字上証实了这些計算方法。但是，另一方面，例如关于高频干綫电纜中相邻四綫組間的串音还有待研究。

因此，看来把期刊上已发表过的有关文章，以及某些尚未发表过的材料，进行补充整理是需要的。同时，也应当指出，即使不考虑它在实用中的意义，导綫束理論在电工理論中也已成为一个独立的部門，仅根据这一个理由也值得詳細地叙述。

本书所需要的数学不超出高等工科学校电工专业教学大綱的要求。除非掌握矩陣的运算，否則閱讀本书会有困难的。今天还不能假定一般工程师都能掌握矩陣，因此在附录中，将本书所需要用的矩陣运算进行了簡明地讲解。

书中的計算都推导到能够进行数字計算的公式。对于那些可以由构造和运用載波干綫电纜的推导公式得出的結論，这里只作簡短的說明，因为这些实际問題的深入分析，我已經在另一本书“載頻技术”中讲解了。

我的同事林克 (Franz Rinck) 工程师提供了很多宝贵意見。战争期間，我們曾在柏林邮电部一同研究关于載波明綫綫路的串音問題。后来，在柏林工科大学振蕩研究所研究电纜綫路串音时，由于和他时常討論，得到很大的帮助。作者謹致謝意。

克兰恩

柏林 1954年10月

引 言

§1. 課 題

回路間的相互干扰，或者叫做串音，在今天是研究对称綫路傳輸技术的主要課題。当電纜中或明綫上的若干回路在較長一段距离內相互平行时，总有能量从其中一个回路串越到其它回路，于是使傳輸质量受到影响。为了保証一定的傳輸质量，在綫路上規定了串音电压和有用电压間要有一定的最高比值。增加通路数目，也就是說，展寬傳輸总頻帶，将使得串音电压超过容許值。于是，只有在采取措施减少綫路串音影响后，例如，在綫路建筑上采取可能的措施后，才有可能增加通路数目。

从下面的事实中可以看出，研究串音問題有着重大的經濟意义。在确定某一載波通信制式增音段长度的时候，除了要考慮增益值以外，还应当考慮最高傳輸頻率的綫路衰耗。如果在每个增音段的中点增加一个增音点，把增音段长度減半，那么就可以补偿加倍的綫路衰耗。这样就可以把最高傳輸頻率提高到四倍，也就是說，在電纜上通話的数目相当于原来的四倍^①。这样作，对提高銅和鉛的利用率是非常有利的。但遺憾的是，当沒有采取特殊措施就把傳輸頻率提高到四倍时，串音将大大超过容許值。所以在載波技术的发展过程中，例如从1939年十二路制 V12 到 1950 年六十路 V60 和 1953 年一百二十路 V120，在電纜技术方面，主要是解决串音問題。傳輸本身的

① 在几百千赫的頻率範圍內，綫路衰耗和頻率的平方根近似地成正比例。

困难（例如，每公里衰耗变大），对比起来就不占什么分量了。

此外，在长距离有线传输中，最大的费用是花费在线路上，而不是花费在局站设备上，所以从这个事实里我们也可以看到解决串音问题有着多么重大的经济意义。

对串音理论最有意义的线路结构见图 1、图 2、图 3、图 4。在同一电杆上架挂两对明线回路（进行滚式交叉，图 1）；或架挂三对或更多对明线回路（图 2），工作频率最高可以达到 150

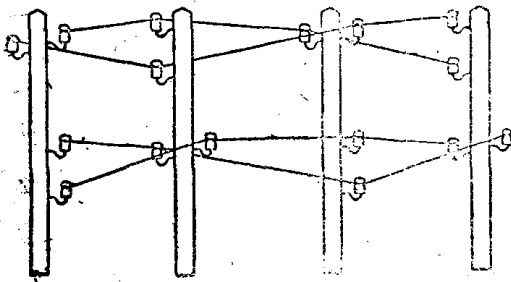


图 1. 滚式交叉线路

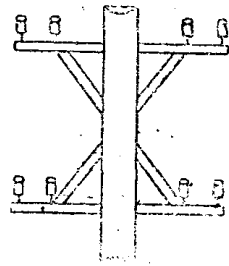


图 2. 具有四个高频回路的架空线路

千赫。在施行滚式交叉的回路上，靠图 1 所示的方法，变换线条位置来降低串音影响。具有四个平行的高频回路的架空线路，靠两平行回路依一定的交叉方式进行点式交叉来降低串音影响。图 3 是前面提到过的高频干线对称电缆，由 $9+3=12$ 个星形四线组构成，可通 $24 \times 60=1440$ 路电话，最近已可通到 $24 \times 120=2880$ 个电话^①，但在相反的传输方向需要敷设第二根同样的电缆，这两条电缆敷设在同一条地沟内。这两根相邻电缆间的相互串音影响和电缆内部回路间的串音影响比较起来，是可以忽略的。另外一种情形是两根同轴电缆，因为在这里每根电缆都是由单一线对组成，所以只需要注意两根电缆间

① 常用的电缆还有 3、4 和 7 个星形四线组的，以及同轴线对（图 4）和星形四线组混合的电缆。

的串音。两根这样的同轴电缆（每一通话方向一根），现在可以在从 60 千赫到 4092 千赫频带内通 960 路电话。

明线、对称电缆和同轴电缆在串音上存在着根本的区别。产生串音的原因，一般是由于在主串回路的周围产生电场和磁场，由这两种场把能量传到别的回路。在明线和对称电缆中，这种串音能量，随频率增高而增加。在同轴电缆中就不同了，这里，在低频时电场和磁场透入外导体成为产生串音的因素，

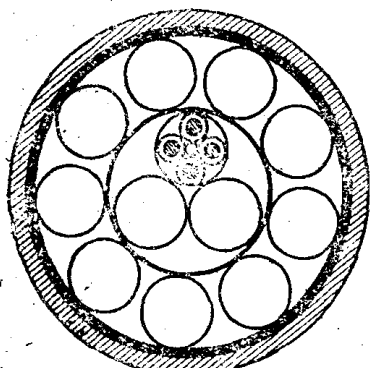


图 3. 24 对载频电缆

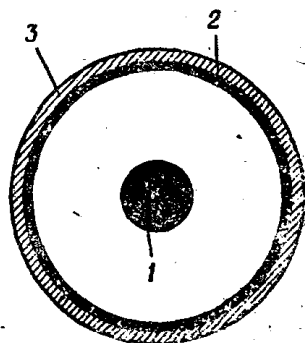


图 4. 同轴电缆

当频率增高时，由于电流的集肤效应，透入的电场、磁场，以及串音愈来愈减少，所以在同轴电缆中最低传输频率是最危险的。因为利用提高传输频率来增加通话路数不会加重串音影响，于是串音影响就不再有前面所谈的那样重大的意义了。由于这个原因，我们不再继续讨论在同轴电缆中的串音问题^①，应当指出，本书所用的方法也不适宜用于同轴电缆。像前面谈过的那样，在同轴电缆中是假定外导体中的电流不完全集肤，而在明线和对称电缆的串音理论中，则假定电流完全集肤。完全的电集肤意味着是理想的屏蔽，因而在这种情形下，同轴电

① 有关这方面的理论在 H. 卡登 (H. Kaden) [34] 书中可以找到。

纜中就完全沒有串音了。

为了能够估計降低串音影响的困难，需要談一談从串音影响方面对綫路提出的要求。如图 3 所示常見的載波電纜，它的外皮由約 30 毫米內徑的鉛管制成，在鉛管中有 48 根導綫被包裹在相当松的紙絕緣中，各導綫間的距离不过几毫米。在綫路上，電纜中兩回路以这样小的距离相互靠近而延伸 18 公里，經中間增益后，再延伸 18 公里，依此延伸下去。在 2500 公里^① 長的綫路上，一回路从直接邻近一回路串过来的雜音功率和有用信号功率的比不应当大于 $1/400,000$ ^②。而且这个条件应当在 V60 机件中，当傳輸頻率高达 250 千赫时，即相当傳送一个长波广播节目的頻率时；或者在 V120 机件中，当傳輸頻率高达 552 千赫时，即已达中波广播波段时，仍能滿足。每一个曉得广播頻率特性的行家，如果不曉得这样的綫路已在很大範圍实际运用的話，很可能把这种要求斥为幻想。另一方面，显然，在今天的技術条件下，要想进一步降低串音影响，只有在彻底搞清串音的原因后才有可能。不过这也只有在根据綫路的几何尺寸，从理論上算出来的串音影响結果和实际測出来的結果令人滿意地互相吻合时，才有可能进一步降低串音影响。这一目标，在有实用价值的串音問題中，已經有相当大的一部分被达到了。由此看来，本书把散見各期刊上的結論，系統地綜合起来是有益的。

我們所談的課題，就是根据几何尺寸計算明綫和对称電纜

① 相当于柏林 (Berlin) — 諾得卡普 (Nordkap) 間的距离。

② 干扰雜音由热雜音，电子管雜音，非綫性雜音和串音合并构成，在对称電纜中，这三部分（热雜音和电子管雜音合起来算一部分）的每部分在相对零电平时作 1 微微瓦/公里計。在 2500 公里長的綫路上，于是得到在相对电平等零的地方，也就是在可給出 1 毫瓦有效功率的地方，容許的串音雜音功率是 2500 微微瓦。这两个功率的比值是 $1/400000$ 。

的串音，并分成两部分来讲。首先在一个长度单元綫路上把由电场和磁场产生的串音找出，这单元在电气上是短的，就是说和所考虑的波长比较起来是短的（见第一部分：从几何尺寸计算耦合）。当算出每一长度单元的串音影响后，再把这些部分在总长度上加起来（见第二部分：从耦合计算串音）。最后，第三部分是应用理论于实际的重要情形。

本书提出了一些在阐述理论上有着重要意义的观点。第一个是这样，由 z 根綫和地（或铅皮）组成的綫束构成 z 个回路 (§5)。这些回路是实綫回路，幻綫回路，和不对称系统①。

当 z 值很大时，由这些导綫构成回路的可能情形很多，但是我們限制在讨论下述情况：首先应当是包括主串回路和被串回路；其次，为了正常通信，所有回路间的耦合应当弱。应用本书理论的一个重要前提，是假定由綫束构成的回路间的耦合相当弱，以致由被串回路对主串回路的反干扰可以忽略不计。在这种情形下，课题大大地简化，因而得到解决。

如果主串回路用 1 标志，被串回路用 2 标志，其余回路用 3, 4, 5, …… 标志，则在忽略反干扰的前提下，可以把回路 2 中的串音分解为若干分量，这些分量可简单地用 $1 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 5 \rightarrow 2$ …… 等表示。直接串音分量 $1 \rightarrow 2$ ，和 $z-2$ 个經由 3, 4, 5 等回路的間接分量，将互不相关的独立导出，然后

① 我們在这本書里用下列术语：

綫束由“导綫”組成，也就是說，由“导体”和“絕緣”构成。两根导綫构成一个回路，每一回路包括一根去綫和一根回綫。回路可以是对称的（实綫回路和幻綫回路）或不对称的（单綫回路和不对称系统）。在綫束中有一个主串回路和一个被串回路，其余的是第三回路。发讯机放在主串回路的始端。在被串回路近端的电压是近端串音电压，在远端的电压是远端串音电压，在載波技术中一般可以使近端串音不起干扰作用。

所有这些概念还将在有关地方給以更詳細的定义。