

钟道隆 编著

# 通信系统中的 电磁干扰 与屏蔽接地

TONGXIN XITONG ZHONG DE DIANJI GANRAO YU  
PINGBI JIEDI

国防工业出版社

409853

# 通信系统中的电磁干扰 与屏蔽接地

钟道隆 编著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

通信系统中的电磁干扰与屏蔽接地/钟道隆编著. —北京:国防工业出版社, 1997. 4

ISBN 7-118-01613-6

I. 通… II. 钟… III. ①通信系统-干扰(电信)②通信系统-屏蔽接地 IV. TN911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 06216 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 4 $\frac{1}{8}$  101 千字

1997 年 4 月第 1 版 1997 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:5.90 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 前 言

通信工程技术人员经常碰到“棘手”和“引人入胜”的电磁干扰问题。

只有书本知识而缺乏实际工作经验的人刚接触到电磁干扰问题时,往往觉得“丈二和尚摸不到头”,不知怎样用学过的理论知识去分析和解决,因而感到很“棘手”。在这种情况下,往往会摇摇这里、晃晃那里、插插拔拔某些元器件、加一根地线或去一根接地线等漫无目的地“瞎碰”。很显然,一般情况下用这样的方法是不可能彻底解决干扰问题的,有时即使碰巧干扰暂时消失了(例如某些由于接触不良引起的干扰在摇摇晃晃和插插拔拔的过程中暂时消失了),但是以后一定还会重新出现。这样的事情重复多了,往往容易产生“理论是理论,实际是实际”、“理论解释不了复杂的实际问题”等误解,因而会模模糊糊地觉得学校里所学的各种知识,只能用来解释正常信号的产生和传输,不能解释起干扰作用的电磁信号。似乎另外还有一套解释电磁干扰的电磁学知识,而且往往以没有学过此类知识而原谅自己在电磁干扰问题面前的束手无策。就其本质而言,电磁干扰信号的作用机理和正常电磁信号一样,完全遵守同样的电磁学规律。之所以会采用“瞎碰”的作法和产生各种误解,主要是由于理论不能联系实际,在复杂的电磁干扰面前没有行动自由的缘故。

理论联系实际需要一个过程。一个有一定理论知识的工程技术人员,只要在每次分析和排除电磁干扰故障的过程中注意应用学过的理论,就有可能在复杂的电磁干扰面前逐渐取得行动自由。从面就会觉得解决此类问题是非常“引人入胜”的。因为在查找和解决问题过程中,干扰源在哪里?通过什么途径进入的?从什么部

位进入的? 怎么才能解决? 哪种解决方法最有效? 哪种最现实? 等等, 都是有待解开的“谜”, 都是“未知数”, 需要在“实践——理论——实践”的不断反复过程中逐个解开这些不解之“谜”, 变“未知”为“已知”。等到问题解决了并给出理论分析以后, 再返回去看, 原来使人感到“棘手”的问题却又是那么简单, 在大多数情况下, 产生干扰的原因并不复杂, 完全可以用简单的欧姆定理解释通<sup>[1]</sup>。既然电磁干扰的作用机理和正常的电磁信号完全一样, 为什么不少工程技术人员会感到“棘手”呢? 这里有一个分析正常电磁信号与分析电磁干扰时侧重点不同的问题, 有一个长期学习正常电磁信号而形成的思维定势问题。

学习正常电磁信号的作用过程时, 侧重于讲解正常电磁信号的产生、传输和接收。为了便于分析, 常常做一些理想化的假定, 把一些不影响正常电磁信号作用过程的因素统统“忽略不计”并“不显示在图上”。久而久之, 就会模模糊糊地形成一种思维定势: 自觉不自觉地认为那些被“忽略不计”的因素“确实”是不存在的, 认为除了显示在图上的元器件以外再没有其他元器件了。可是对于电磁干扰而言, 可能正是这些“忽略不计”的和“不显示在图上”的元件(参数)起主要作用。例如在理想的情况下, 假定地线母线的电阻值为零、“地线”上各点的电位相等(都等于零)等等。实际上, 再短、再粗的导线都有一定的阻抗, 所以“地线”上各点的电位不可能都是零电位, 地线上任意两点之间一般都有“电位差”。虽然对于正常的信号传输而言, 这个“电位差”可以忽略不计, 但是在特定的情况下, 往往正是这个被忽略不计的“电位差”, 把主干扰回路中的信号耦合到被干扰回路中并形成干扰噪声。又如电路图上只显示出对于正常信号传输起作用的各种元件, 而不显示无处不在的元器件之间的各种耦合(电的、磁的或电磁的), 而实际上正是这些图上没有显示的寄生耦合(即寄生元件或寄生参数), 把主干扰回路中的信号耦合到被干扰回路中去而形成干扰噪声。所以分析和解决干扰问题的关键就在于能把那些被“忽略不计”的和“不显示在图上”的寄生耦合(寄生元件或寄生参数)考虑进去并显示在图上。

与解决许多其他技术问题一样,问题的本身在于确定问题,只要把起干扰作用的不能“忽略不计”的寄生耦合(寄生元件或寄生参数)都逐一考虑进去并一一绘制在电路图上,干扰问题就成了一个很普通的电工习题了,没有任何特殊之处。运用一般的电磁理论即可做出分析,解决的办法也不难找到。这里的关键是熟练掌握电磁学的基本理论和善于理论联系实际。只有熟练地掌握了电磁学的基本理论,碰到问题时才能想到该用哪个原理去分析。有书本知识而无实践经验的人要注意在解决各种干扰问题的过程中找到理论与实际的结合点,总结出把那些不能“忽略不计”的寄生元件(参数)显示在图上的方法和规律。

有时即使想到有寄生耦合存在,但是分析问题时所用的方法仍然没有摆脱分析正常电磁信号所形成的固有模式,因而解决不了干扰问题。例如正常电磁信号一般都作用在两条导线之间,是横向常模信号,而不少电磁干扰信号却是作用在每一条导线与“地”之间,是纵向共模信号。用分析横向常模信号的方法去分析起干扰作用的纵向共模信号,往往得不出正确的结论。

不少人在解决各种干扰问题的过程中积累了丰富的经验,但是不善于用基本理论知识去分析、总结,把感性知识上升到理性知识。模模糊糊地认为“理论是理论,实际是实际,理论解决不了复杂的实际问题”,有时甚至还会总结出一些似是而非的所谓“经验”。“只要多接地就能解决干扰问题”就是此类“经验”中最广为流行的一个。不错,接地是解决干扰的一种方法,但又往往是引入干扰的一个途径。正确的做法应该是“该接地处接地,不该接地处不能接地”。什么部位该接地,什么部位不该接地,只有依靠理论才能解决。没有理论指导,到处乱碰,在特定的条件下,也可能碰对了,干扰解决了。但是以后可能会重现,而且随着系统作用因素的增多,可能更难分析和排除。

笔者在长期的工程实践过程中,每当碰到并解决了干扰问题以后,必将分析和解决过程以及理论分析写成专题总结文章,近年来也曾给本科生和研究生讲解通信工程中的屏蔽和接地问题。在

以往各种专题总结和讲稿的基础上,写成此书,以《通信系统中的电磁干扰与屏蔽接地》为名。本书不讨论元器件设计和制作过程中的干扰降低技术(诸如屏蔽层厚度的设计、分布参数的控制和电子线路的屏蔽接地技术等等),而把重点放在分析和解决由符合标准的设备组成的通信系统的干扰问题上,着重讨论系统中由于布线不当、接地不当、共模电压(流)等引起的干扰及其防止方法。全书分五章,第一章简略介绍有关电磁干扰的基本概念。实践表明,只有把这些基本概念搞得很清楚,很熟练,碰到各种各样的具体干扰时才能找到干扰源、耦合途径和防止的方法,才能做出理论分析;第二章论述接地问题,分别从电路、机盒、机箱、机架、机房、通信大楼等几个层次讨论如何接地;第三章论述电缆布线设计,着重讨论各种情况电缆屏蔽层的接地方式对于屏蔽效果的影响;第四章介绍分析和解决通信工程和维护中碰到的电磁干扰问题的一般方法和注意事项;第五章介绍小同轴电缆通信系统接地体制是如何确定的,同时列举了若干例电磁干扰的分析和解决过程,供通信工程建设和维护人员参考。

笔者在工程实践和本书写作过程中,阅读了许多有关杂音减低技术方面的书刊,书末挂一漏万地列出一些,并在此向所有的作者表示谢意。

电磁干扰和兼容性问题涉及的知识面很广,作者理论知识有限,工程建设和维护中接触到的设备种类也有限,书中不当和片面之处在所难免,敬希读者批评指正。

钟道隆

1995年9月

# 目 录

第一章 概述.....	1
一、电磁干扰三要素 .....	1
二、干扰源 .....	2
1. 人为干扰与自然干扰 .....	2
2. 内部干扰与外部干扰 .....	2
3. 有意干扰与无意干扰 .....	2
4. 可控干扰源与不可控干扰源 .....	2
三、电磁耦合途径和电磁干扰的传播 .....	3
(一) 传导干扰和辐射干扰 .....	3
(二) 分析问题的方法 .....	3
(三) 传导型干扰 .....	4
1. 电场耦合 .....	4
2. 磁场耦合 .....	8
3. 屏蔽层对于磁耦合的影响 .....	10
4. 关于电容耦合与电感耦合的两点说明 .....	21
5. 电路间的直接电流耦合 .....	21
(四) 辐射干扰 .....	22
1. 辐射干扰的传播途径 .....	22
2. 金属屏蔽物的屏蔽效果 .....	22
3. 渗透深度 .....	23
四、各种屏蔽的实质 .....	24
五、降低电磁干扰的一般方法 .....	26
1. 屏蔽 .....	26
2. 接地 .....	27
3. 电缆布线设计 .....	27



4. 平衡 .....	27
5. 滤波 .....	28
6. 隔离与绝缘 .....	28
7. 分开 .....	28
8. 定向 .....	29
9. 阻抗控制 .....	29
10. 电平控制 .....	29
11. 抵消技术 .....	29
12. 频率协调 .....	29
13. 时间协调 .....	29
<b>六、看不见的耦合种种</b> .....	<b>30</b>
1. 电路中没有标注的参数 .....	30
2. 电路中没有标出的耦合 .....	32
<b>七、静电荷的积累和放电</b> .....	<b>34</b>
1. 人体静电参数的典型数据 .....	34
2. 静电放电 .....	36
<b>第二章 接地与共模干扰</b> .....	<b>37</b>
<b>一、为什么要接地</b> .....	<b>37</b>
<b>二、保护地</b> .....	<b>38</b>
<b>三、信号地</b> .....	<b>39</b>
<b>四、通信工程中的各种接地</b> .....	<b>40</b>
1. 电子电路的接地 .....	41
2. 机盘和机架的接地 .....	44
3. 机房的地线系统 .....	45
4. 通信大楼分散接地系统存在的问题 .....	47
5. 联合接地 .....	48
<b>五、共模干扰</b> .....	<b>50</b>
1. 常模干扰(电流、电压) .....	51
2. 共模干扰 .....	52
3. 用共模扼流圈扼制共模干扰 .....	53
4. 用差分放大器扼制共模干扰 .....	56
<b>六、地环路引入的干扰及其抑制</b> .....	<b>58</b>

七、数字电路的地杂音	60
八、引入引出线的滤波	61
九、防止从接地体引入干扰	61
<b>第三章 电缆设计</b>	62
<b>一、短电缆的工程应用</b>	62
1. 正确选用电缆	62
2. 屏蔽层接地方式不同时电缆串音特性的实测数据	63
3. 放大器输入电缆的接地方式	70
4. 多回路与多电缆时如何确定接地方式	73
5. 尾巴电缆对于屏蔽作用的影响	73
6. 其他	74
<b>二、长距离通信线路的串音特性</b>	74
1. 近端串音与远端串音	74
2. 架空明线的串音特性与交叉	75
3. 对称电缆的串音特性与平衡	75
4. 同轴电缆的串音特性	76
<b>第四章 分析与排除通信工程中电磁干扰的一般方法</b>	80
<b>一、通信工程中电磁干扰的特点</b>	80
<b>二、干扰的起因</b>	80
1. 没有按照规范做而引起干扰	81
2. 维护不当引起的干扰	82
3. 设备电磁兼容性不符合要求而引入干扰	82
<b>三、查找和解决电磁干扰的一般步骤</b>	82
1. 抓住“偶然”的干扰现象不放,摸准其出没规律	82
2. 查找干扰源	83
3. 找出规律,作出理论分析	85
4. 注意留有余地	86
5. 总结经验与收集资料	86
<b>四、引入干扰的主要途径</b>	87
1. 从线缆引入干扰	87
2. 接地不当引入干扰	87
3. 结合部处理不当引入干扰	87

4. 工频干扰 .....	88
5. 通信专用电源引入的干扰 .....	88
<b>五、查找电磁干扰时的注意事项 .....</b>	<b>90</b>
<b>第五章 几则工程实例 .....</b>	<b>100</b>
<b>一、小同轴电缆 300 路的接地体制 .....</b>	<b>100</b>
1. 小同轴电缆铝护套的接地方式 .....	101
2. 主干电缆铝护套接续情况对于防雷的影响 .....	101
3. 同轴管外导体一端接地体制是如何确定的 .....	102
4. 1:1 变压器对同轴管之间串音的影响 .....	104
5. 同轴管之间保持绝缘引起的其他问题 .....	105
6. 外导体接触良好与否对于串音的影响 .....	105
<b>二、远距离供电回路接地方式的确定 .....</b>	<b>106</b>
<b>三、干扰实例 .....</b>	<b>107</b>
<b>例一：24kHz 强杂音产生和其解决 .....</b>	<b>107</b>
1. 问题的发现 .....	107
2. 强杂音从何而来 .....	107
3. 解决方法 .....	109
4. 强杂音的普遍性 .....	110
<b>例二：70kHz 固有杂音电平过高的原因及解决方法 .....</b>	<b>110</b>
1. 现象 .....	110
2. 干扰源是第 70 次谐波 .....	110
<b>例三：架空明线 12 路载波系统中的无线干扰 .....</b>	<b>111</b>
1. 外线不平衡引入无线干扰 .....	111
2. 出现干扰时的解决办法 .....	111
<b>例四：小同轴电缆载波系统中的无线干扰 .....</b>	<b>112</b>
(一) 无线干扰主要是外线引入的 .....	112
1. 同轴管外导体接触不良引入的无线干扰 .....	113
2. 两盘电缆的铝护套的电气连接不良致使屏蔽效果大幅度下降 .....	114
3. 经由第三回路引入的无线干扰 .....	116
4. 直接从尾巴电缆引入的无线干扰 .....	116
(二) 直接由设备引入的无线干扰 .....	116

例五:某闭路电视系统的干扰 .....	117
1. 用户侧的插头插座的质量差引起的问题 .....	117
2. 电缆质量差引起的问题 .....	118
参考文献 .....	118

# 第一章 概 述

## 一、电磁干扰三要素

通常把通信系统中不是所需要的电磁信号称为杂音(Noise或称“噪声”)。杂音可能对某个敏感电路的正常工作产生某种电磁干扰(EMI; Electro Magnetic Interference)。

如何减少和控制各种电子设备之间的电磁干扰属于电磁兼容(EMC; Electro Magnetic Compatibility)的范畴。电磁兼容是指各种电子设备(系统)在一起时不因互相之间的电磁干扰而影响正常工作。

一般说来,通信系统中的杂音只能减少,不能完全消除,而电磁干扰却是可以消除的。只要由于电磁干扰引起的杂音减少到不影响正常工作的地步,即可认为没有电磁干扰。为了便于叙述,本书视杂音和干扰两者为同义语。

任何一个电磁干扰都由干扰源、耦合途径和被干扰回路三要素组成,如图 1-1 所示。

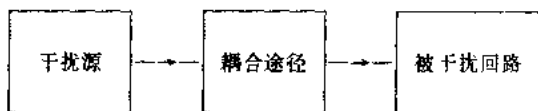


图 1-1 电磁干扰三要素

与干扰三要素相对应,出现干扰时,首先要分析干扰源是什

么？在哪里？通过什么途径耦合到被干扰回路？被干扰回路的哪一部分对干扰最敏感？等等。

与干扰三要素相对应，解决干扰时可以采用在干扰源处抑制干扰、切断干扰源与被干扰回路之间的耦合或降低被干扰回路对干杂音干扰的敏感程度等三种方法（或三种方法同时并举）。

## 二、干扰源

按照不同的区分标准，干扰源有不同的分类方法。从通信工程的角度，可把干扰分成以下几类。

### 1. 人为干扰与自然干扰

无线发射机、电气开关等产生的干扰属于人为干扰，雷电和太阳黑子活动引起的干扰称为自然干扰。本书原则上不讨论自然干扰。

### 2. 内部干扰与外部干扰

干扰源既可能在系统的内部，也可能在系统的外部。本书主要讨论来自通信系统内部的干扰和来自无线电广播和电视的外部干扰，不讨论其他干扰源引入的干扰。

### 3. 有意干扰与无意干扰

除了为特殊目的而有意设计的干扰源以外，一般电子设备设计时都不希望成为干扰别的设备的干扰源，但是由于种种原因，成了无意干扰源。本书只讨论此种无意干扰源引起的干扰。

### 4. 可控干扰源与不可控干扰源

有的干扰源是可控的，例如电源整流器产生的波纹电压，可以通过加强滤波的方法加以抑制，也即是可控的。有的干扰源（例如雷电）是不可控的。

有的干扰源从技术上看是可控的，例如无线电广播对于通信系统的干扰，只要停止广播或降低功率就可解决或减轻对系统的干扰，但在具体条件下不一定是可行的。

本书只讨论如何抑制可控干扰源。

### 三、电磁耦合途径和电磁干扰的传播

#### (一) 传导干扰和辐射干扰

电磁干扰按其传播方式可分为传导干扰和辐射干扰两种。沿着导线传播的电磁干扰称为传导干扰,其传播的形式有电场耦合(电容耦合)、磁场耦合(电感耦合)、电磁场耦合和直接电路间耦合四种。通过空间以电磁波形式传播的电磁干扰称为辐射干扰。

#### (二) 分析问题的方法

与分析其他电磁学问题一样,对于电磁干扰问题的分析有“场”与“路”两种方法。一般情况下,在定性思考问题的时候(尤其是高频),应该用“场”的概念,但是在分析问题时,为了使问题尽量简明扼要,抓住要点,可以采用“路”的概念。因为用“场”的概念分析问题,准确的解答有赖于解 Maxwell 方程。Maxwell 方程是三个空间变量( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )和一个时间变量( $t$ )的函数。除了最简单的理想情况以外,其解答都是非常复杂的。而采用“路”的概念和分析方法,则可免除三个空间变量,只剩下一个时间变量,从而使分析大大地简化。为了使电路分析法进一步简化,假定<sup>[2]</sup>:

- (1) 所有电场都限制在电容器内部。
- (2) 所有磁场都限制在电感器的内部。
- (3) 电路的尺寸比所讨论的波长短得多。通常情况下,此假定是成立的,例如 1MHz 的波长为 300m,300MHz 的波长为 1m,对于大部分电路而言,其尺寸比 1m 要小多了。
- (4) 在分析某一个系统时,忽略其对外界的影响。例如一个 100W 的功率放大器可能辐射出 100mW 的功率,在讨论 100W 功率放大器本身的问题时,辐射出去的 100mW 是完全可以忽略的。但是如果某一个敏感的放大器接收到了这个 100mW 功率的一小部分而形成干扰时,就不能忽略不计了。
- (5) 只要有可能,尽量把分布参数组成的杂音耦合通路用集总

参数表示出来。例如两条导线之间的电场感应用一个电容器表示，磁场感应用一个电感表示。虽然这个假定不是非常严格，这些集总参数的准确数值一般也很难确定，因而往往得不出准确的数值解答，但是只要概念是正确的，就能得出清晰的定性解答。

在分析电磁干扰问题时，经常以线缆为讨论对象，分析线缆在场中的作用和线缆之间的作用时，假定<sup>12</sup>：

(1) 线缆的屏蔽层由非导磁物质组成，其厚度小于所讨论频率的穿透深度。

(2) 被干扰回路与干扰回路之间的耦合比较松。

(3) 被干扰回路中感应电流足够小，它产生的磁场不会影响原来的磁场。

(4) 线缆的长度比波长短，所以回路之间的耦合可以用集总参数(电感和电容)表示。

### (三) 传导型干扰

#### 1. 电场耦合

任何电子元器件之间都存在分布电容，通过这些分布电容，干扰源和被干扰设备之间就会发生耦合，形成传导型干扰的电容耦合，下面以图 1—2 所示的两条导线间的电容耦合为例说明。

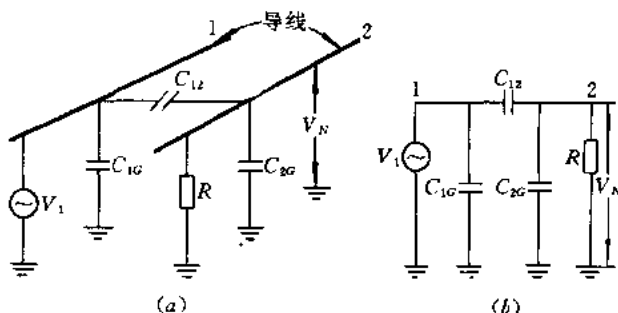


图 1—2 两导线间的电容耦合

(a) 示意图；(b) 等效图。

图中  $C_{12}$  为导线间分布电容， $C_{1G}$  为导线 1 对“地”的分布电容， $C_{2G}$  为导线 2 对“地”的全部电容，它包括分布电容和接在导线 2 上



的电路的输入电容； $R$ 为导线2对“地”的电阻。这个电阻是真正接在导线2上的电路的输入电阻，而不是分布参数。

假定导线1为主干扰回路，导线2为被干扰回路。因为直接并接在主干扰回路上的阻抗对于干扰不起作用，所以 $C_{1G}$ 可以忽略不计。假定1对地电位为 $V_1$ ，通过1与2之间的分布电容，会在导线2与“地”之间上产生杂音电位 $V_N$ ，其值如式(1-1)所示。

$$V_N = \frac{j\omega[C_{12}/C_{12} + C_{2G}]}{j\omega + 1/R(C_{12} + C_{2G})} V_1 \quad (1-1)$$

从式(1-1)难以直接看出各种参数对于干扰电压的影响。在大多数情况下， $R$ 比分布电容 $C_{12}$ 和 $C_{2G}$ 之和的阻抗小得多，即：

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$

故式(1-1)可以简化为式(1-2)：

$$V_N = j\omega RC_{12} V_1 \quad (1-2)$$

式(1-2)表明，干扰电压与频率、被干扰回路对“地”的电阻、电容 $C_{12}$ 以及主干扰电压的幅度成正比。根据式(1-2)，可以把电容耦合表示为一个接在被干扰回路与“地”之间的电流源，其幅度为 $j\omega C_{12} V_1$ 。这个结论的物理意义是显而易见的，由于 $R$ 比分布电容 $C_{12}$ 和 $C_{2G}$ 之和的阻抗小得多，所以对于负载 $R$ 而言，可以把等压源 $V_1$ 与分布电容等合在一起，看成为一个定流源。

如果主干扰电压与频率是不可控的，只有通过降低被干扰回路对“地”的阻抗(一般情况即被干扰回路的输入阻抗)与降低耦合电容 $C_{12}$ 来减少干扰。加大两个导体间的距离、调整两导体间的相对位置以及加屏蔽层等均可降低耦合电容 $C_{12}$ 。

如果在干扰与被干扰导体之间加上屏蔽体，电容耦合的情况会发生变化，现以图1-3所示两种情况讨论如下。

假定被干扰导体2对“地”的电阻为无穷大，而且全部被屏蔽层所包围时，屏蔽体上的感应电压为：

$$V_S = \left( \frac{C_{2S}}{C_{1S} + C_{SG}} \right) V_1 \quad (1-3)$$