

电子设备的屏蔽设计

—干扰的产生及其克服办法—

国际工业出版社

73.761

101

电子设备的屏蔽设计

——干扰的产生及其克服办法——

〔日〕荒木庸夫 著

赵 清 译 叶宗林 校

国防工业出版社

1106178

内 容 简 介

本书从干扰源出发，分别叙述外部干扰和内部干扰的产生、感应、传播及对电子设备的影响等问题，并介绍了克服干扰的办法及屏蔽原理。

本书可供从事电子设备的设计和制造的工作人员参考。

電子機器の遮蔽設計
——妨害の発生とその対策——
〔日〕荒木庸夫
日刊工業新聞社，1970

电子设备的屏蔽设计
——干扰的产生及其克服办法——
〔日〕荒木庸夫 著
赵 清 译 叶宗林 校

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 $1/32$ 印张 87/8 187千字

1975年6月第一版 1977年7月第二次印刷 印数：10,001—26,000册
统一书号：15034·1412 定价：0.93元

译 者 序

干扰是电子设备在工作中出现的主要问题之一。干扰有的来自设备外部，有的来自设备内部。因此，如何抑制这些干扰就成为电子设备在设计、制造时的主要课题。屏蔽是抑制干扰及防止设备自激振荡的有效手段，所以有关电子设备的屏蔽设计问题就显得非常重要。

日本荒木庸夫所著《电子设备的屏蔽设计》对这方面问题作了比较系统的阐述。此书从抑制干扰的观点出发，分析了干扰源的性质，并对于干扰的传播、感应等理论作了扼要的综述。同时结合具体实例，分别叙述了外部干扰及内部干扰的产生、感应、传播以及对干扰的克服办法。另外还以广播接收机和中波广播发射机为例，分析了放大器自激振荡现象，提供了防止自激振荡的办法。对从事电子设备的设计和制造的工作人员有一定参考价值。因此我们将此书译成中文。

对原书中的错误和不够严谨的地方，在译文中分别作了改正和加了注释。为了形成系统概念、便于设计时使用，在第四章中我们补充了两节关于金属网和金属板屏蔽效能计算的内容。

由于我们水平有限，译文可能仍有不少错误和不妥之处，希望读者批评指正。

译 者

目 录

第一章 干扰源	9
1.1 概论	9
1.2 放电噪声	9
1.2.1 概论.....	9
1.2.2 电晕放电噪声.....	12
1.2.3 火花放电噪声.....	13
1.2.4 放电管噪声.....	16
1.3 电气干扰源	19
1.3.1 工频干扰.....	19
1.3.2 射频干扰.....	20
1.3.3 电子开关.....	23
1.3.4 脉冲发生器.....	24
第二章 干扰波的感应	26
2.1 干扰波的感应	26
2.2 静电耦合感应	28
2.3 互感耦合感应	36
2.4 共阻抗感应	42
2.4.1 设备内部的感应.....	42
2.4.2 系统问题.....	44
2.5 辐射电磁场引起的干扰电压的感应	46
第三章 干扰波的传播	50
3.1 概论	50
3.2 电磁场传播	51
3.3 导线干扰	57
3.3.1 线路上的波动传播.....	57

3.3.2	线间电压和对地电压.....	60
3.3.3	配电线的感应及干扰抑制.....	63
3.3.4	信号线传播干扰波.....	65
3.4	脉冲传输线的工作原理	67
3.4.1	概论.....	67
3.4.2	理想线路上的传播.....	68
3.4.3	非对称线路上的传播.....	71
3.4.4	对称线路上的传播.....	76
3.4.5	双绞线间的感应噪声.....	84
3.4.6	有不连续点的双绞线间的感应噪声.....	89
第四章	屏蔽原理	95
4.1	屏蔽目的及种类	95
4.1.1	概论.....	95
4.1.2	静电屏蔽.....	95
4.1.3	电磁屏蔽.....	97
4.1.4	低频磁屏蔽.....	99
4.1.5	屏蔽系数.....	100
4.2	电磁屏蔽	103
4.2.1	金属板的电磁屏蔽作用.....	103
4.2.2	金属网屏蔽.....	107
4.2.3	缝隙的电磁泄漏.....	109
4.2.4	通风孔或转动装置的电磁泄漏.....	110
4.3	磁屏蔽	112
4.4	屏蔽室	114
4.5	金属网屏蔽效能计算	117
4.5.1	传输系数的适用性——金属网壳体 与小电流环的相互耦合影响.....	118
4.5.2	单层金属网屏蔽效能.....	121
4.5.3	双层金属网屏蔽效能.....	126
4.6	金属板屏蔽效能计算	136
4.6.1	无缝屏蔽壳体的传输系数.....	137
4.6.2	孔隙对屏蔽效能的影响.....	142
附录 I		146

附录 I	147
附录 II	150
附录 IV	153
第五章 外部干扰源引起感应的抑制方法	156
5.1 概论	156
5.2 隔离	156
5.3 对称电路(平衡电路)	159
5.4 接地和搭接	160
5.4.1 接地.....	160
5.4.2 搭接.....	164
5.4.3 连接设备的屏蔽导线和导线管的搭接.....	164
5.4.4 设备的接地.....	167
5.5 屏蔽举例	168
5.5.1 导线的屏蔽.....	168
5.5.2 设备的屏蔽.....	170
5.6 滤波器	172
补遗 接地电阻与土质的关系	176
第六章 高频噪声源的干扰抑制法	182
6.1 消除继电器触点的火花	182
6.1.1 概论.....	182
6.1.2 单式灭火花电路.....	184
6.1.3 非线性电阻的利用.....	186
6.1.4 复式灭火花电路.....	187
6.1.5 用于灭火花电路的电阻和电容的额定值.....	188
6.2 使用小型整流子电动机的设备噪声	189
6.3 荧光灯噪声	191
6.4 汽车噪声	193
6.5 其它干扰源	197
第七章 设备内部产生的干扰电压及其抑制方法	200
7.1 概论	200

7.2 非线性元件产生的干扰电压	201
7.2.1 概论	201
7.2.2 交扰调制	204
7.2.3 调制干扰	207
7.3 电源哼声	210
7.3.1 电源整流电路的脉动电压产生的哼声	210
7.3.2 感应哼声	213
7.3.3 接地电路上的杂散交流电压引起的交流声	217
7.3.4 热阴极电子管的交流声	218
7.4 调变交流声	222
7.4.1 由放大元件的非线性产生的调变交流声	222
7.4.2 电源整流电路的调变交流声	224
7.4.3 由外部原因产生的调变交流声	226
7.5 脉冲电路的噪声抑制	227
7.5.1 积分电路	227
7.5.2 噪声抑制电路	229
7.6 由元件不良产生的噪声	229
7.7 机械噪声	234
第八章 接收机的异常振荡及抑制方法	235
8.1 放大器的振荡现象	235
8.2 超外差接收机的振荡现象	236
8.2.1 概论	236
8.2.2 按振荡频率分类	237
8.2.3 按振荡的稳定性分类	239
8.3 中频振荡	240
8.3.1 由静电反馈引起的振荡	240
8.3.2 由电磁反馈引起的振荡	246
8.3.3 由共阻抗引起的振荡	248
8.3.4 低频放大器和检波器的中频输出	250
8.4 高频放大电路的振荡	251
8.5 音频放大电路的振荡	252
8.5.1 高端振荡(哨声)	253

8.5.2 低端振荡 (汽船声)	253
8.5.3 负反馈放大器的高端振荡和低端振荡	254
8.6 调制振荡	255
8.6.1 高频汽船声	255
8.6.2 高频哨声	256
8.7 寄生振荡	264
8.8 防止振荡的检查方法	265
8.9 接收机外来噪声的减轻法	268
第九章 发射机的异常现象	271
9.1 概论	271
9.2 近似频率振荡	272
9.3 由机壳电流引起的异常现象	273
9.3.1 机壳电流	273
9.3.2 屏蔽线外皮导体的处理	274
9.4 由高频扼流圈产生的异常现象	275
9.4.1 在发射频率上的谐振	275
9.4.2 在超声频范围内的谐振	276
9.5 短波振荡	278
9.6 超高频振荡	281
9.7 负阻振荡	283
9.8 音频放大器的低频振荡	284

第一章 干 扰 源

1.1 概 论

电子设备工作时，往往在有用的信号电压之外还有一些令人头痛的干扰电压。如何克服这些干扰是电子设备在设计、制造时的主要问题之一。干扰产生于干扰源。干扰源有的在设备外部，也有的在设备内部。外部干扰源可分为：1) 放电噪声，2) 由于电开关的通断产生的噪声，3) 由大功率输电线产生的工频干扰，4) 无线电设备辐射的电磁波等。设备内部产生的干扰可分为：1) 交流声，2) 不同信号的感应，3) 寄生振荡等。本章简要地说明外部干扰源的概况[●]。

一般说来，为了抑制干扰，在干扰源方面采取措施是方便的。而且当干扰很严重时，不仅要对所设计的电子设备进行检查，同时也还要对干扰源进行检查。

1.2 放 电 噪 声⁽¹⁾

1.2.1 概论^(1,2)

在干扰各种通信设备或电子设备的噪声中，其产生原因多属于放电现象。在放电现象中属于持续放电的有：1) 电晕放电，2) 辉光放电，3) 弧光放电；属于过渡现象的有：4) 火花放电。在一个大气压的空气中，在曲率半径比较小的两电极间加电压，当慢慢地升高电压时，最初几乎是无电

● 对于接收机的交叉干扰、假信号干扰是接收机的性能设计问题，故省略。

流通过(暗流),但是当电极的尖端引起局部破坏时,则电流急剧增加,形成电晕放电,最后经过火花放电过渡到弧光放电。放电情况随两电极中曲率半径小的电极之正负极性而有所不同。图 1.1 给出了此种关系⁽³⁾。

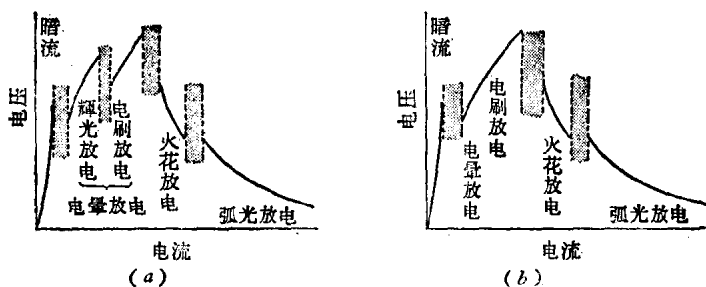


图1.1 一个大气压的空气中的放电特性⁽³⁾

(a)正放电; (b)负放电。

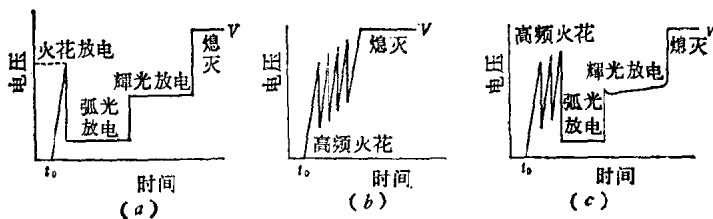


图1.2 触点断开时的电压(t_0 为断开时刻)⁽²⁾

当触点断开时,触点间电压若在最小点 火电压 ($V_0 = 300 \sim 350$ 伏) 以上时,就产生火花放电。当电路具有产生弧光放电、辉光放电的条件时,其变化如图 1.2(a)所示,放电逐步过渡到熄灭。在不具备此条件时,如同图1.2(b)所示,产生

了高频明暗交替的火花放电(高频火花放电), 从而成为噪声干扰的原因。此噪声的频率取决于电路常数以及火花路径的离子扩散速度。如果处于产生弧光放电的临界状态时, 则如图1.2(c)所示, 在经过高频火花状态后产生弧光或辉光放电。

触点刚刚断开时, 电极距离非常小。这种极小间隙的火花特性是一个研究课题。关于此问题 Pearson⁽⁴⁾和 Atalla⁽⁵⁾二人都有所研究。图 1.3 是 Atalla 对钨(Pd)静触点进行实验所获得的结果。由此图可以看出, 若触点表面沾有少量污物, 并附着有机物蒸气, 则在小间隙间的起始放电电压就显著下降。

弧光放电的电压电流特性是负特性, 如图 1.4 所示。随着弧光长度变短, 电压逐渐下降, 特性趋近于水平⁽⁶⁾。电弧长度接近于零时的电弧特性称为最短电弧特性。对此, Fink 给出如下实验公式:

$$(V - V_{\min})(I - I_{\min}) = C \quad (1.1)$$

也就是说, 以 $V_{\min}$ 、 $I_{\min}$ 为渐近线的双曲线表示了最短电弧存在范围的下限。所以当切断 $I_{\min}$ 以下的电流时, 不管这时所加的电压多大, 也不会产生电弧。根据 Fink 的结果, 将 $V_{\min}$ 、 $I_{\min}$ 及 C 值列于表 1.1。C 值的大小大致正比于电极材料的沸点。

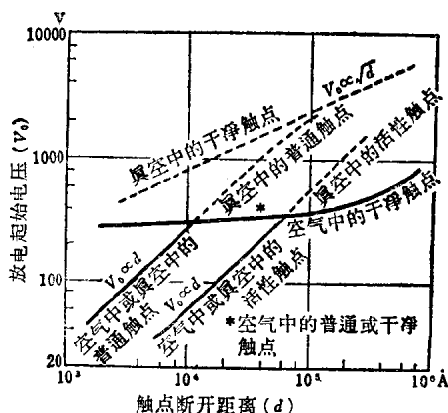


图1.3 静触点间的放电起始电压 (Atalla)

表1.1 最短电弧的
电压和电流

金属	$V_{\min}$ (伏)	$I_{\min}$ (安)	C (瓦)
锌	9.0	0.36	0.25
银	8.0	0.7	0.57
铜	8.5	1.15	0.68
钨	10.0	1.27	1.47

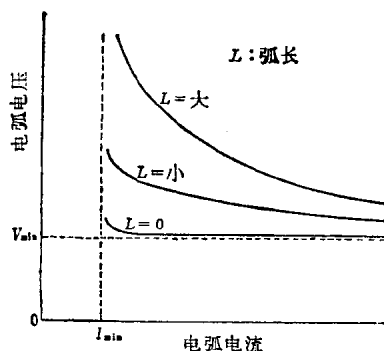


图1.4 弧光放电的电流电压特性⁽²⁾

1.2.2 电晕放电噪声^(8~10)

电晕放电具有间歇性质，并产生脉冲电流，从而成为各种噪声干扰的原因，而且随着电晕放电过程产生的高频振荡也是一种干扰。电晕噪声的危害主要是来自输电线。随着超高压输电线的建设，它将对电力线载波电话以及无线电广播接收等造成干扰。

当导体是新的而且在干燥的情况下，电晕噪声是由导体电压的负半周产生；当导体经过风吹雨打后，则由正、负半周共同产生。当导体一旦潮湿后，电晕噪声主要是由正半周产生，此时噪声电平为干燥时的若干倍^{(8)⊙}；即使是在电晕

⊙ 原文为〔5〕。

气候条件（温度、湿度、气压）对输电线的电晕噪声电平有影响，其中以下雨为最显著。根据有关资料，晴天时，相对湿度与电晕噪声电平的关系近于直线，而且约按4~5分贝/10%增加。下雨时，当雨量在1毫米/小时以下，随着雨量的增加电晕噪声电平急剧上升；当雨量大于1毫米/小时，电晕噪声电平与雨量的关系趋近于饱和。电晕噪声电平在下雨时比晴天约大4~25倍（准峰值）或3~6倍（平均值）。

能量损耗可以忽略的较低电压，其数值也是相当大的。此外，噪声的产生电压等于可见的电晕起始电压。在输电线垂直方向上电晕噪声的衰减特性大致是和距离的平方成反比，在15千赫~400兆赫的频率范围内，其衰减特性是和频率成反比^①。对于导线的配置以及单线、复线等情况，电晕噪声则无明显差异。

电晕放电噪声主要是对于电力线载波电话、低频航空无线电以及调幅广播等产生影响。对于电视（54~216兆赫^②）和调频广播（88~108兆赫^③）则影响不大^{〔8〕}。

1.2.3 火花放电噪声^{〔11〕}

火花放电产生的噪声干扰，首先是大自然现象的天电干扰，同时还有电气设备、电气铁道、汽车发动机的点火装置等许多类型。这些火花放电噪声占据了放电噪声的大部分。如点火装置那样，以火花放电作为设计目的的许多设备，其不良影响也正是火花放电。也就是说，不管在构造上是属于哪种类型的触点，只要在那里电流是断续的，则此时在触点间隙所引起的火花放电就成为噪声干扰的原因。

（1）天电

这是在大气层中由于自然现象引起的火花放电所产生的噪声，并以雷电为其典型代表。它可以在低频（几千赫左右）至甚高频或更高频率范围内造成干扰，而且还可以传播到很远的距离。但是在大气层中电荷电离并积蓄到满足一定条件

① 电晕噪声电平随频率增加而降低。但当频率低于1兆赫时，其降低是很微弱的；当频率高于1兆赫时，其下降急剧。在1~10兆赫时，其下降约为20分贝。——校者

② 美国数据。

后所产生的干扰决不限于打雷；随之产生的还有不连续线●、低气压、台风、寒带飞雪、火山喷烟以及黄沙等等。因此，随着接收地点和季节的不同，其干扰噪声强度和干扰频谱也是不同的。这种噪声对通过热带圈的短波通信的干扰尤为严重。

(2) 电气设备类^[12]

旋转电机因其火花放电而成为噪声源。在有整流子的旋转电机中，如图 1.5 所示，由电刷将相邻的整流片（有电位差）短路，于是与整流片相连接的电机转子绕组流过短路电流，紧接着电刷又很快地转入断开状态，在这一瞬间产生了火花。由于此过程是反复进行的，因此在很宽的频率范围内引起了噪声干扰。没有整流子的设备，由于从其转子引出电流是采用滑环和电刷，在旋转中其接触状态要发生变化，所以在两者之间也会产生火花。

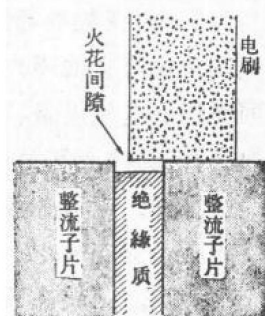


图 1.5 旋转电机整流子片的火花放电

象火花式高频焊机等就是利用其所产生的火花来进行工作的设备。这类设备因火花的能量很大，所以噪声干扰也很强。而且从电源电路传到配电线所引起的干扰影响比其直接辐射到空间的影响要大。

(3) 开关设备类

由于开关的通断使电流导通与截止也是形成干扰的原

● 这里指天气图上的不连续线。——译者

因。当开关断开时，开关两极间的距离由“零”过渡到“断开”状态。在很小距离的瞬间，两极间产生了火花放电，成为噪声源。当切断流经电感的电流时，由于电感的惰性在触点间产生很大的感应电压，因此很容易产生火花放电。若电流很大，则产生弧光放电。

(4) 电气铁道^(11,13,14)

电力机车在行驶中能产生噪声的地方有：1) 馈电线和集电弓之间，2) 车轮和铁轨之间，3) 电动机的整流子片和电刷之间。关于电动机产生噪声的情况与前述的旋转电机相同。至于其他二种，其接触点多半是边震动边移动的，而且就连接触压力的变化也都能产生干扰电压，因此引起火花放电的情况是很多的，甚至过渡到弧光放电，把机车馈电线作为辐射体造成干扰。

关于市、郊区地面电气铁道（电车）对广播接收的干扰，众所周知，小电流比大电流时的干扰要大。也就是说，尽管它对广播接收的干扰产生时间是在夜间或早晨，即在车内有照明时，但这时电车若在滑行情况下，即电车的负载几乎仅为照明负载而且电流在1安以下，其干扰还是很大的。这是因为电车电流大时容易形成弧光放电，而弧光放电比火花放电的噪声强度要小得多。图1.6为电车电流和噪声强度关系之一例。

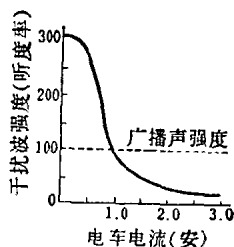


图1.6 电车电流和噪声强度的关系

(5) 汽车发动机点火装置

汽车或摩托车等的汽油发动机使用点火塞作为点火装

置。这种点火塞产生非常陡峭的冲击电流，从而激励了其附属电路的振荡，并由点火导线等辐射出去。这种干扰波具有非常高的频率分量，而且包含有任意类型的极化波状态，因此对电视广播以及其它甚高频通信是一种极其有害的噪声源。

1.2.4 放电管噪声

(1) 概论

放电管放电属于辉光放电或弧光放电。由于最近大量地使用荧光灯和霓虹灯，因此成为一种噪声干扰原因。因为通常放电管的电压电流关系是负特性的，所以与外接电路连接时就容易引起振荡。荧光灯的这种振荡可达到甚高频波段。

等离子区振荡也是一种造成干扰的原因。这是在放电等离子区内出现的离子或电子的固有振荡，它与外部电路没有关系，其振荡频率与离子密度的平方根成正比。电子引起的振荡可达到甚高频波段。等离子区振荡并不造成很大干扰，但却是一个很有趣的问题，譬如太阳噪声就可以认为是具有等离子区的性质。

(2) 荧光灯噪声^[15,16]

荧光灯是充汞、氩混合气体的放电管。它在放电的同时产生了高频振荡，从而成为噪声干扰的原因。这种高频振荡是由于阴极部分引起的，即所谓阴极振荡。但若按产生噪声的机构来进行分类，则有如表 1.2 所示的种类。

再点火振荡是当荧光灯作为交流照明灯时在每半周开始时产生的振荡，而且多半在半周终了时随之产生了灭火振荡。由于这些振荡构成了不规则的脉冲串，所以再点火振荡主要是对无线电中波段的接收进行干扰。