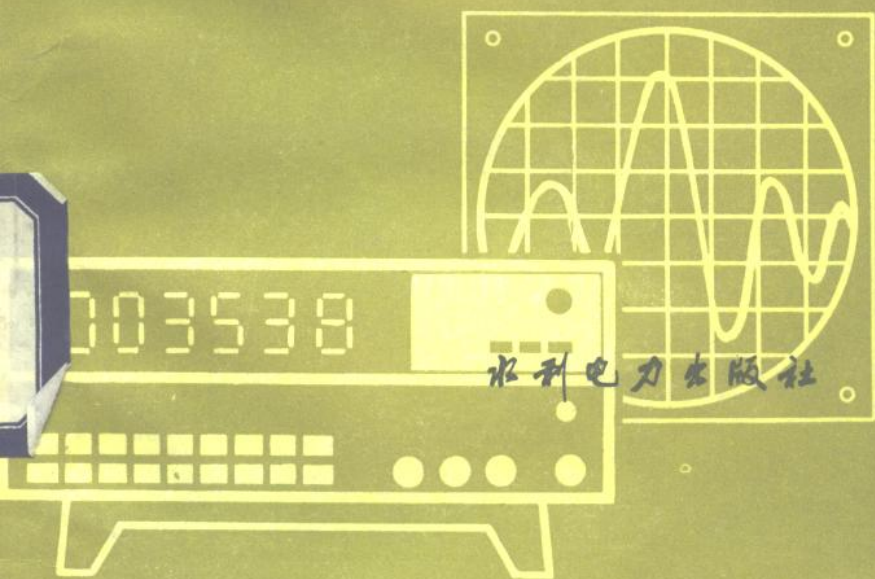


常用电子仪器丛书

# 电子仪器的干扰和抑制

张国屏 编



常用电子仪器丛书

---

# 电子仪器的干扰和抑制

---

张国屏 编

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书专门讨论电子仪器的干扰及其抑制问题，主要内容有：电子仪器中干扰的后果、特性和传播；电子仪器接地的基本概念、方式和测量；屏蔽的概念、方法和应用；常用的噪声抑制技术，包括平衡、滤波和隔离等技术；噪声源的抑制技术，如火花放电、寄生振荡、电源哼声、静电感应等的抑制技术。

本书可供从事无线电技术和电子技术的工作人员阅读，也可供有关专业的技术人员参考。

### 常用电子仪器丛书 电子仪器的干扰和抑制

张国屏 编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 3.5印张 77千字

1987年2月第一版 1987年2月北京第一次印刷

印数0001—5640册 定价0.76元

书号 15143·6200

## 前 言

《常用电子仪器丛书》是一套系统介绍我国目前大量生产和广泛应用的电子仪器原理、电路、使用、维修和校验方面的普及性丛书。它以广大电子技术工人为主要读者对象，也可供其他一般电子仪器工作人员参考。本丛书在篇幅上，着重介绍仪器的原理和电路，以便读者能融会贯通，举一反三；在仪器的选型上，尽量做到既考虑仪器的先进性，又考虑到应用的广泛性；在内容上，以论述物理概念为主。

本丛书共分九册。其中，《电子仪器基础》、《模拟式电子电压表》、《电子仪器的干扰和抑制》由张国屏编写；《交直流稳压电源》由朱康中等编写；《低频信号发生器》由刘庆雄等编写；《电子管、晶体管参数测试仪》由蔡光显编写；《电子示波器》由叶胜泉编写；《数字频率计》由吴静凡等编写；《数字电压表》由陈中洪编写。张国屏担任本丛书主编；郭永坤、刘庆雄担任副主编。

本丛书在编写过程中得到了水利电力部南京自动化研究所丁功华、山西省电力试验研究所芦士鹤、东北电业管理局技术改进局阎占元、四川省电力试验研究所电子组的大力支持和协助。初稿完后，由北京电力科学研究所许遐进行了审阅修改。在此一并表示由衷的感谢。

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1985年11月

# 目 录

前言	
第一章 干扰的传播	1
第一节 强电对弱电仪器干扰的后果	1
第二节 干扰的特性	5
第三节 干扰的传播	8
第二章 接地	18
第一节 接地的基本概念	18
第二节 接地方式	22
第三节 设备的接地	28
第四节 接地的测量	34
第三章 屏蔽	39
第一节 屏蔽的基本概念	39
第二节 导线的屏蔽	42
第三节 元件的屏蔽	47
第四节 变压器的屏蔽	51
第五节 放大器的屏蔽	54
第六节 屏蔽方法的应用	60
第七节 磁场屏蔽	68
第四章 其它噪声抑制技术	71
第一节 平衡电路	71
第二节 滤波电路	75
第三节 隔离技术	81
第五章 噪声源的抑制	92
第一节 火花放电的消除	92
第二节 寄生振荡的消除	97
第三节 电源哼声的抑制	99
第四节 静电干扰的抑制	103

# 第一章 干扰的传播

## 第一节 强电对弱电仪器干扰的后果

在电子仪器中，经常遇到各种各样的干扰，它们使电子仪器工作不稳定，甚至使之损坏。这种使电子仪器工作不稳定、误差增大或遭到损坏的不定因素称为“干扰”。一般来说，影响最大的是强信号对弱信号的干扰，当然，也不排除弱信号对强信号的影响。一台电子仪器，不论其电路如何复杂，也不论使用了什么电子元件，各个电路中的电流，都按一定规律流动，这种电流称为工作电流，它是保证仪器正常工作所必需的。但还有一些杂散电流存在，这些杂散电流有以下几种情况：第一种，是各元件绝缘支架的绝缘性能下降，与绝缘支架相连的电路元件经该绝缘支架向电路其他各处（如地、其他带电点等）的绝缘泄漏电流；第二种，是由于相互靠近的任意两个金属电极之间存在分布电容，通过这种分布电容的电流，也是一种常见的杂散电流，又称为电容电流；第三种，是由于各种磁力线的耦合所产生的感应电流，这类感应电流多半存在于各种磁性元件，和有分布电感存在的电路中；第四种，是在电子仪器任意两点间，由于距离近、电压高而使两点之间的空气产生击穿，出现放电现象，这种由于放电所形成的电流称为放电电流。在电子仪器中，这种放电所产生的干扰最为普遍，应予以高度重视。放电现象大致可分为电晕放电、辉光放电、弧光放电和火花放电四种。关于这些放电干扰特性，将在本章第二节中予以讨论。

电的强和弱是相对的。通常，认为工业动力电流就是一种“强电”。我们所指的弱电装置，就是一般专用或通用的电子仪器设备。当然，这并不是说弱电仪器中就没有高电压了，也不是说这些仪器中没有大电流，而只是在这些仪器中一般不存在既是高电压又是大电流的回路。强电对弱电的干扰，是一个极为普遍而又极为重要的问题，在电力系统中，就更加严重，它往往被忽视，以致造成严重的后果。对于这个问题，注意得越早，就越容易做到投资少、见效大；注意得晚，就容易被动，甚至造成推翻重来的返工局面。因此，在电测仪器中，要考虑强电对弱电的干扰；在非电量测量中，更要考虑干扰问题，如在电厂化学仪表、热工自动化仪表、继电保护装置、高压试验及环保检测等仪器中，均必须设法防止和消除干扰。

强电对弱电仪器干扰的后果，归纳起来有以下几类：

### 一、强电可以损坏弱电仪器设备

这种情况在电力系统中是经常发生的。由于高压放电可以使附近的数字仪表损坏；由于动力系统突然中断而使仪器损坏的现象也很多。例如，有一台WFX-1B型原子吸收分光光度计，在有记录的14次突然停电中，就损坏了14次，这就明显地看出有的弱电仪器是不能随便突然中断电源的。有一台集成电路的FS-2A型微库仑仪，由于地线不良而导致仪器中的集成电路损坏。强电对弱电干扰而造成弱电仪器损坏的情况是逐渐严重起来的，在电子管仪器中，由于电子管电路的工作电压都比较高，“弱电”并不“弱”，因此，干扰表现不明显，由它损坏仪器的机率就少。在晶体管仪器中，晶体管电路的工作电压大大减小，强电对弱电的干扰就开始明显地显露出来了。到了集成电路，尤其是以PMOS型高阻

抗集成电路为主的仪器中，这个问题更为突出，以致经常因外界强电干扰或地线不良而造成损坏。

对于高输入阻抗的MOS元件，尤其是PMOS元件（如MOS型场效应管、PMOS数字集成电路等），由于它们的输入阻抗可高达 $10^{10}\Omega$ 以上，静电感应、漏电、地线电位的升高等，均可使它们受到损坏，这就是为什么在保存、取用和焊接这些元件时，必须特别注意屏蔽和接地的道理。在修理MOS电路的电子仪器中，更换MOS集成电路元件时，由于地线不良、烙铁漏电、人体感应等，非常容易损坏这些元件。当漏电严重、地线电位较高时，就是结型场效应管和晶体管也有可能遭到破坏，而电子管元件一般就没有这种情况。对于具有高放大倍数的多级集成块放大电路来说，快速冲击波可经直流电源、地线、电磁辐射等途径作用于输入端，它经多级放大后变成对后面集成元件具有破坏性的冲击干扰。例如，在一台WFX-1B原子吸收分光光度计中，就多次发现这种情况。

## 二、强电干扰使仪器设备无法稳定工作

由于强电的干扰是经常变化其幅值、相位和频率的，因此，干扰的状况经常变化，而且没有规律性。此外，干扰进入弱电仪器所经各种途径的情况也是经常变化的，因此，进入仪器的干扰信号很不稳定。这种不稳定的干扰信号，一旦进入仪器设备，即使之不能稳定工作。某厂一台DBC-2型电子皮带秤就是这个情况。由于强电对弱电干扰比较严重，致使该仪器多年来无法稳定工作。我们用X-Y函数仪记录到了该仪器静态时几个零位参考点之间电压的变化曲线，这种参考点间电压的不稳定，正好与该仪器输出端的不稳定情况完全对应。



强电对弱电的干扰引起测量误差的增加和工作严重的不稳定。在电子技术广泛应用于各个行业的情况下，常常利用电子放大技术以提高测量精度、扩展测量范围；利用非电量变换技术，以实现各种非电量测量；利用模数转换和数字技术，实现对各种被测量的数字化测量、生产过程的自动化检测和控制等等。因此，电子测量技术具有精度高、稳定性好、量程宽、各种电量和非电量都可测量等优点。但是，由于这些电子测量设备都由工业动力电源直接供电，强电干扰在所难免，如地线不良、屏蔽不完善、隔离不严、引线较长等等，均可对这些电子测量设备造成干扰，使变换器输出不稳定，引起零点漂移、A/D变换误差、共模干扰误差增大、逻辑控制电路失灵等等。最近研制的XDB-74型三相标准电度表校验台数字控制电路和DDP-78型紫外线单相电度表校验台中，由于强电、弱电共在一个试验台上，引线较长造成相互干扰而使弱电仪器无法稳定工作，经反复改进后才工作正常。电力系统中，强电干扰是热工仪表、化学仪表、环保监测仪表等非电量和各种电测仪表不稳定的一个重要原因，必须引起高度重视。

### 三、强电干扰可造成弱电控制设备的误动作

在电力系统中，大量使用了各种电子式自动化监测、调节、控制设备，各种晶体管保护装置、自动远动装置和载波通讯装置等，它们对保证电力系统的安全经济运行起着重要作用；但是，由于它们与强大动力电源（如发电厂、变电站）距离很近，或是与电网共线传输，因此，强电干扰极为突出。强电干扰可以引起这些设备误动作或使其损坏，甚至造成严重事故。此外，邻近电气设备开关的切换，日光灯的启动和停止，甚至室外汽车的发动点火，都可能造成逻辑电路

的误动作，

## 第二节 干扰的特性

### 一、干扰的分类

干扰按其频谱范围可分为直流干扰、工频干扰、高频干扰和脉动干扰。其中，直流干扰主要是由于地线电位变化、电源电压变化、负载电流变化引起的；工频干扰主要来自动力电源，如变压器分布电容耦合、滤波不良、泄漏严重等；高频干扰的主要原因是屏蔽不良、接地不当、分布参数的耦合等；脉动干扰的来源很多，动力电网上的任何突变、各种电气设备的投切、开关的开合等都可造成脉动性干扰。

按分类根据的不同，还可把干扰分成其他的种类。例如，根据干扰进入装置后与有用信号作用方式的不同可分为共模干扰（与有用信号并联）和串模干扰（与有用信号串联）。共模干扰电压只有变换成串模干扰电压后，才能作用于电子接收器的有用输入信号上，如图1-1所示。图中， $Z_1$ 为信号源的等效输出阻抗； $Z_2$ 为接收器的等效输入阻抗； $Z_3$ 、 $Z_4$ 为信号电路传输阻抗； $Z_{cm1}$ 、 $Z_{cm2}$ 为干扰源阻抗；

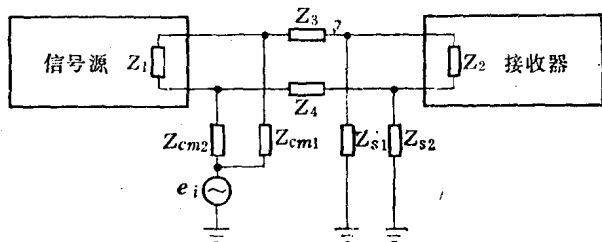


图 1-1 共模干扰的引入

$e_i$  为共模干扰源电压； $Z_{s1}$ 、 $Z_{s2}$  为信号电路到地的泄漏阻抗。由图可知： $Z_1$ 、 $Z_2$  上既通过信号电流，也通过共模干扰电流，它使两条传输线的电位同时、且相对地发生等量的变化，结果在  $Z_1$ 、 $Z_2$  上产生的干扰电压也只能说是相等的。实际上，它们不可能完全相等，因此，共模干扰经过公共阻抗转化为串模干扰而加至接收器的输入端，给后面的电子装置造成干扰。

## 二、几种典型干扰源的性质

弄清干扰源的性质，找出干扰源，是防止和克服干扰的前提。根据干扰源的位置，可分为内部干扰源和外部干扰源。所谓内部干扰源，是指干扰源存在于设备内部；所谓外部干扰源，是指干扰源存在于设备外部。内部干扰源有交流声、寄生振荡、不同信号的感应、元件的固有噪声等；外部干扰源有放电噪声、工频干扰、电磁辐射、电器开关的通断等。抑制干扰的最简单而又最有效的方法，是在干扰源方面采取措施，因此，讨论干扰源的基本特性是有益的。

### 1. 放电噪声干扰

当两个电极间加有电压  $U$ ，且慢慢升高时，开始几乎没有电流通过（暗流）；当电压升高到某一定值时，电极间产生局部放电，电流急剧增加，随着电压的升高，先后形成电晕放电、辉光放电、火花放电和弧光放电，如图 1-2 所示。当触点断开时，只要触点间电压  $U$  高于最小点火电压（一般为 300~350 V），就会在触点断开时产生火花放电。当电路具备产生弧光放电、辉光放电的条件时，放电逐步过渡到熄灭，这一过程示于图 1-3(a)。若触点间电压低于最小点火电压，触点断开时可产生高频火花放电，成为噪声干扰源，如图 1-3(b) 所示。其频率取决于电路常数及火花路径的离

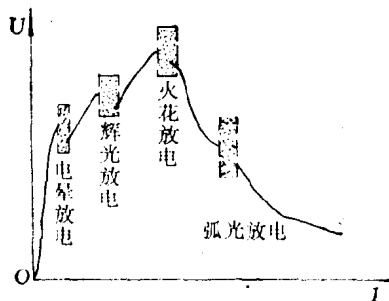


图 1-2 放电噪声图

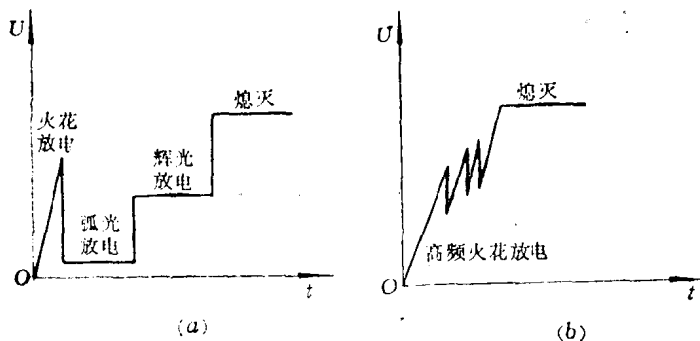


图 1-3 触点断开时的放电

(a)触点间电压高于或等于最小点火电压；(b)触点间电压低于最小点火电压

子扩散速度。

电晕放电噪声具有间歇性质，产生脉冲电流。它的主要来源是超高压静电线路，其频率范围一般在  $15 \sim 400 \text{kHz}$ 。它对电力线载波电话，高频保护，远动、遥控、遥测装置，低频航空无线电及调幅广播等产生影响，对电视和调频广播影响不大。

火花放电现象普遍存在，如雷电干扰，电气设备，汽车

发动机等的点火，电气机车的启动，开关的切换等等，均可产生火花放电，它在放电噪声中占大部分。在电力系统中，各种强电设备的投入和切换都很频繁，因此，火花放电对弱电装置的干扰，尤其值得注意。火花放电的频率范围，可以从几千赫到很高的频率，其强度有时也很高，影响距离很远。

放电管噪声主要来自荧光灯、霓虹灯等辉光放电或弧光放电管。通常，放电管的电压、电流关系是负特性的，所以与外电路连接时，就容易产生振荡。其振荡频率在几千赫到几十兆赫之间；其振荡波形一般接近于正弦脉冲波，也可产生断续的张弛振荡波形。

## 2. 工频干扰

大功率输电线路是工业频率（简称“工频”）干扰的来源。如果低电平信号线有一段靠近或平行于输电线，即使输电线的功率不大，也会对信号产生干扰。在电子设备内部，工频感应也会产生交流响声。如果工频波形失真大，它所包含的高次谐波分量也就多，产生的干扰也会越严重。工频干扰往往是最严重而又难以消除的一类干扰。

## 3. 信号发生器干扰

有很多电气或电子式的信号发生器，如高频加热设备、发射机、电器开关、各种频率和波形的振荡器等等，都是独立的信号源，它们对于附近的弱电装置也是一类干扰源。

# 第三节 干扰的传播

弄清干扰进入弱电仪器的途径，也是克服干扰的一个重要环节。

## 一、由分布电容传播的干扰

各种导线之间、元件之间、管子电极之间、线圈之间以及它们与地之间，都存在不同大小的分布电容。例如：两根一米长的平行导线之间的分布电容约为 $30\text{pF}$ ；一米长屏蔽线的内外层之间的分布电容约为 $40\text{pF}$ ；一台电源变压器与该仪器底板之间的分布电容约为 $1000\text{pF}$ 。而且这些分布电容还要随走线方式、仪器放置角度、空气湿度等情况而发生复杂的、很大范围的变化。以上这些数值仅是在某一特定条件下测得的，因此，只能作为分析这类问题的参考。

通常，干扰电压正比于干扰的频率。频率越高，越容易通过分布电容产生干扰。同时，还与输入阻抗成正比。因此，要求低电平前级放大器的输入阻抗要尽可能的小，一般希望在几百欧以下。

对于线性电路，当有几个干扰源存在时，可以用叠加原理分别对各干扰源进行考虑；但在计算感应电压时，要考虑到输入阻抗的非线性。

下面列举几个最常见的由分布电容引入干扰电压的情况。

**【例 1-1】** 电源变压器初次级线圈间分布电容引入干扰的情况。由图1-4可知：当 $220\text{V}$ 电网中有一脉动干扰时，它将由 $C_1$ 、 $C_2$ 耦合到次级，这种耦合不能按变压器的变比来计算，而要按 $C_1$ 、 $C_3$ 和 $C_2$ 、 $C_4$ 的分压系数进行计算，有可能基本上就是1:1地由变压器初级绕组传入变压器次级绕组，再经电源电路进入放大器或传感器，给设备造成严重影响。这就是在 $220\text{V}$ 动力电源中当有其他电气设备突然投切而造成对附近同相动力电源供电设备干扰的原因。

**【例1-2】** 导线间分布电容引入干扰。输入电子设备的

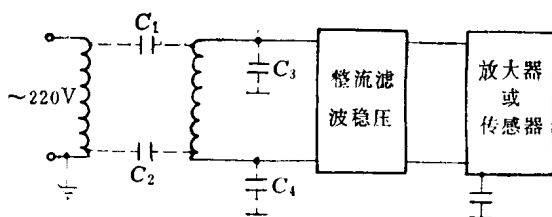


图 1-4 电源变压器初次级间的感应

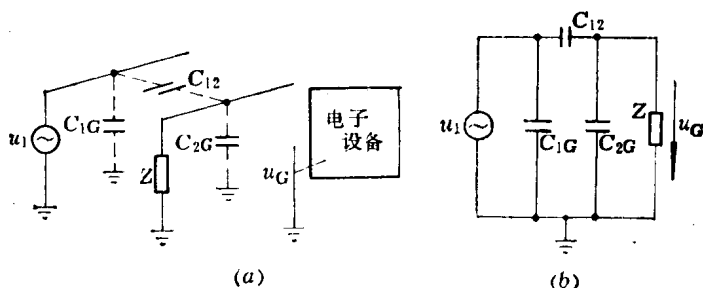


图 1-5 导线间分布电容引入的干扰  
(a)电路；(b)等效电路

各种电量都由导线送入，它们与邻近干扰源的引线间存在分布电容，这种分布电容可将干扰信号引至电子设备的输入端，如图1-5所示。图中， $U_1$ 为邻近干扰源的电压， $Z$ 为电子设备输入阻抗， $C_{1G}$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{2G}$ 为分布电容。当输入有效信号为零，其等效电路如图1-5(b)所示。令 $U_G$ 为附近干扰电源 $U_1$ 通过分布电容在电子设备输入端造成的干扰电压，则可作下列简单计算，即

$$U_G = \frac{Z \times \frac{C_{12}}{C_{2G} + C_{12}}}{Z + \frac{1}{j\omega(C_{2G} + C_{12})}} U_1$$

$$\omega = 2\pi f$$

式中  $f$ ——干扰信号频率。

$$\text{当 } Z \ll \frac{1}{j\omega(C_{2\sigma} + C_{12})} \text{ 时}$$

$$U_{\sigma} \approx j\omega Z C_{12} U_1$$

当  $C_{12} = 1.0 \text{ pF}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $U_1 = 220 \text{ V}$ ,  $Z = 1 \text{ M}\Omega$  时,

$$U_{\sigma} \approx 0.6 \text{ V}$$

这个由附近动力电源通过分布电容给电子设备输入端造成的干扰对于大部分电子设备来说, 已经达到足够大的程度了。

$$\text{当 } Z \gg \frac{1}{j\omega(C_{2\sigma} + C_{12})} \text{ 时}$$

$$\text{则 } U_{\sigma} = \frac{C_{12}}{C_{2\sigma} + C_{12}} U_1$$

当  $C_{12} = 1.0 \text{ pF}$ ,  $C_{2\sigma} = 100 \text{ pF}$ ,  $U_1 = 220 \text{ V}$  时

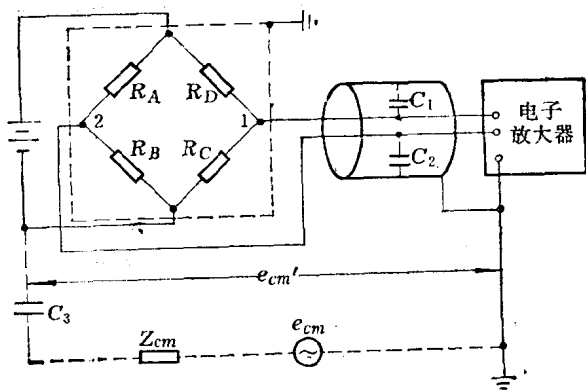
$$U_{\sigma} = \frac{1.0 \times 10^{-12} \times 220}{(100 + 1.0) \times 10^{-12}} = 2.0 \text{ V}$$

这就达到了有的电子设备所不允许的程度。

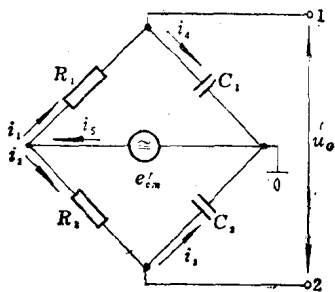
可见, 分布电容造成的干扰, 在很多情况下是很严重的。不仅如此, 而且当干扰源传输线是一根扰动线时, 则  $C_{12}$ 、 $C_{1\sigma}$  均跟着发生变化, 因此,  $U_{\sigma}$  的大小也是经常变化的, 这使信号电压受到更加复杂的干扰。

**【例1-3】** 一传感器桥路外壳接地, 考虑到当它输出至电子放大器输入端的双芯屏蔽引线分布电容为  $C_1$ 、 $C_2$ , 传感器电源引线对地存在分布电容  $C_3$  时, 传感器外壳接地点与电子放大器 (一般二者距离较远为数十公尺, 甚至更大) 接地点之间存在着工频干扰电压  $e_{cm}$ , 其阻抗为  $Z_{cm}$ , 则  $e_{cm}$  经过分布电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  使传感器有不平衡输出, 如图 1-6(a) 所示。其等效电路如图 1-6(b) 所示。





(a)



(b)

图 1-6 传感器桥路中分布电容引起的干扰

(a)电路; (b)等效电路

$$\text{其中, } R_1 = \frac{R_C + R_D}{R_C + R_D}; R_2 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}.$$

对直流而言, 完全可以做到  $\frac{R_A}{R_A + R_B} = \frac{R_D}{R_C + R_D}$ .

因此, 传感器完全平衡, 即传感器输出电压为零。但对工频交流而言, 由于干扰电压  $e_{cm}$  由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  组成的