

工业抗干扰的 理论与实践

〔西德〕D. 斯托尔 主编

585840

国防工业出版社

585840

TN973/01

工业抗干扰的理论与实践

〔西德〕D. 斯托尔 主编

姜孟文 译

11606/21



C0160127

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是关于工业控制设备（也包括自动化仪表、数控数算设备等）的抗干扰问题的一本专著。它以较多的篇幅，用干扰模型深入浅出地论述了各类干扰的物理机制，将难以捉摸的干扰问题直观形象地呈现在读者面前。并详细讨论了对干扰源所采取的去干扰措施、避免干扰源与干扰对象产生耦合的措施、减少电气系统干扰灵敏度的措施等。鉴于可控硅在自动控制中应用日益广泛，本书还用一定的篇幅论述了可控硅设备的抗干扰问题。

本书条理清晰，层次分明；既注重物理概念的阐述，又有简明的数学表达；并附有较多的表格、图谱，对于实际工作甚有裨益。根据作者写作的宗旨，此书既可作入门的向导，也可作实用的参考，适于自动控制、自动化仪表、检测技术、计算机技术等领域的科技人员和高校师生阅读。

EMC—Elektromagnetische Verträglichkeit

Dieter Stoll

Elitera-Verlag, Berlin

1976

工业抗干扰的理论与实践

〔西德〕D. 斯托尔 主编

姜孟文 译

*

国防工业出版社出版

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

*

850×1168 $1/32$ 印张 $6\frac{1}{4}$ 159千字

1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷 印数：10,001—4,070册

统一书号：15034·2781 定价：1.20元

译 者 序

工业控制设备的抗干扰问题正日益为自动控制领域的科技人员所关注。但这个问题并不是一个新问题。因为电生磁、磁生电，干扰就成为不可避免，可以说干扰问题是与电的实际应用与生俱来的弊病。但是干扰问题被受到特殊的重视，却是近期内的事。这是因为：在以前（比如说四、五十年代），工业控制设备中的功率部分与控制部分无论从它们的功率水平和电平来讲，差别都不大，而且它们的工作频率都不高。这样，功率部分对于控制部分，虽然存在干扰，由于这种干扰相对来讲不那么强烈，控制部分相对来讲不那么灵敏，故这种干扰作用极少造成不应有的损害而表现出来。也因此，人们对它就缺乏深入的研究，对它的本质和规律就缺乏明确的认识。然而到了近期，工业控制设备的功率水平极大提高，高的达数十兆瓦、数百兆瓦。由于电子技术的飞跃发展，在工业控制设备中，广泛采用了大功率电子器件（大功率晶体管、可控硅等）、中功率电子器件、微功率电子器件（集成电路、特别是大中功率集成电路）及其组合装置——模拟控制设备及数控、数算设备，使强电技术和弱电技术就紧密地揉和在一起了，它们的功率、电平和工作频率均相差极大。因此，功率部分（强电）对控制部分（弱电）的干扰日益强烈；弱电部分对干扰的感受也愈益灵敏，同时弱电部分自己也产生一些干扰。这一装置产生的干扰不但影响自身的正常工作，也妨碍其他装置的正常工作，闹得“四邻不安”。

这种干扰现象，不仅在工业控制设备中有，而且在独立的检测仪表中、在数字计算设备中都不可避免地存在着。因此干扰问题已经成为自动控制、自动仪表、计算技术等各个专业的设计、研究、制造人员所面临的重要问题。干扰的本质虽然并不复杂，

但它无所不在、行踪不定、形式各异；而且由于长期缺乏对这方面的研究和系统的学习，使得许多人感到困惑：干扰是怎样产生的？是怎样传播的？是怎样作用的？作用的后果是什么？它的形态有哪些？怎样防止它的发生、消除它的作用？……一系列的问题，摆在我们面前，要求给予解答。

对于上述这些问题，本书将会给读者以很大的启发。本书原名《EMC——电磁兼容性》，因其论述的内容主要是工业控制设备的抗干扰问题，故译本更名为《工业抗干扰的理论与实践》。原著由西德D. 斯托尔主编，作者们是西德AEG公司工作多年的抗干扰专家。他们集科研成果、实践经验和集体的智慧，融铸成书。内容深入浅出，物理概念清晰。首先以物理模型直观地说明各类电磁干扰的物理本质，然后给出定量的分析，条理分明，易于接受；书中所述的各种抗干扰措施较为全面，并根据一定的理论体系加以编排阐述，更便于理解、掌握；书中并有很多公式、表格、数据，方便实用。因此本书既可作为入门的向导，也可作为实用的参考。

本书翻译过程中，得到叶其荣副教授的热情帮助，并蒙邓聚龙副教授在百忙中作细心校阅，特此致谢。

译者学识有限，勉为其难，不乏失误之处，敬希读者批评指正。

序

考察、分析电气技术在最近二十年内的的发展，可以看到在上述两个方面取得了引人注目的进展，这就是：在强电领域内，电气设备的功率最高已经达到千兆瓦以上；在信息传输技术方面，则已使用千兆赫级的频率对信息进行处理。在过程控制技术中，强电技术和弱电技术则又紧密地揉合在一起。现代化大功率设备的控制和调节采用了高速模拟的或数字化的系统，特别是采用了控制机。此时高度灵敏的电子装置将处于强烈的电磁场之中，因而就产生了所谓“电磁兼容性”问题。只采用屏蔽已不能解决问题，其原因就在于公共的电流回路以及同强电部分的联系太多了，形式也各不相同。因此就必须研究专门的线路结构、安装形式和信息传递方法。单靠现有的书本知识是不够的，只有科学地、全面地对干扰系统加以分析，并归纳所采取的措施，才能解决问题。这样，就形成了一门新的学科——EMC，即“电磁兼容性”。这门学科所采用的思维方法不但适用于过程控制技术，而且也适用于空间电子技术、无线电技术和远距离信息交换系统。没有正确的电磁兼容性的设计，大型计算机就不可能可靠地运行；对电磁兼容性问题缺乏周密的考虑，令人叹服的宇宙航行也就难以实现。

本书写作的目的在于两个方面：首先，想要使还不熟悉本书内容的电气工程师对电磁兼容性技术的方法和途径有一个全面的认识；其次，想要为仪器设备的研制工作者提供一些解决实际问题的参考资料。

本书是集体智慧的产物。作者们都是在 AEG——无线电电讯公司工作多年的电磁兼容性工作者。在同事们中间所进行的讨论对本书的写作也有极大的帮助。

D. 斯托尔

目 录

第一章 引言 1

第二章 干扰机制和一般性去耦措施 2

2.1 概述 2

2.1.1 干扰和抗干扰措施一览表 2

2.1.2 作用示意图 3

2.2 电路性干扰 4

2.2.1 干扰模型 4

2.2.2 电路性干扰的抑制与避免10

2.2.3 耦合阻抗的限制10

2.2.4 电路去耦11

2.2.5 电位隔离12

2.3 电容性干扰13

2.3.1 干扰模型13

2.3.2 系统设计时抗电容性干扰的措施17

2.3.3 对电容性干扰的屏蔽19

2.3.4 电容性干扰的平衡措施19

2.4 电感性干扰20

2.4.1 干扰模型20

2.4.2 系统设计时抗电感性干扰的措施22

2.4.3 对电感性干扰的屏蔽23

2.4.4 静态磁屏蔽25

2.4.5 涡流屏蔽25

2.4.6 电感性干扰的平衡措施33

2.5 导线传导的波干扰34

2.5.1 干扰模型34

2.5.2 对抗传导波干扰的结构性措施35

2.5.3 对抗传导波干扰的波屏蔽36

2.5.4 传导波干扰的平衡措施38

2.6 辐射波干扰38

2.6.1 干扰模型	38
2.6.2 辐射屏蔽	39
2.6.3 屏蔽系数	40
2.6.4 吸收系数	40
2.6.5 反射系数	41
2.6.6 屏蔽计算	43
2.7 数字信号线的干扰问题	45
2.7.1 失真	45
2.7.2 过耦合	50
第三章 干扰灵敏度和抗扰度	53
3.1 概念	53
3.2 模拟系统的信噪比	53
3.3 数字系统的抗扰度	53
3.3.1 概念	53
3.3.2 静态抗扰度	54
3.3.3 动态抗扰度	56
3.3.4 商品数字开关电路的特征值	59
第四章 干扰量的测量	60
4.1 概述	60
4.2 传输干扰的测量	61
4.2.1 时域测量	61
4.2.2 频域测量	65
4.2.3 方法比较	66
4.3 辐射测量	67
4.3.1 直接测量	67
4.3.2 钳式吸收测量仪	68
4.4 抗扰度的测量	69
4.4.1 传输干扰的抗扰度	69
4.4.2 辐射干扰的抗扰度	71
第五章 干扰源的去干扰措施	74
5.1 主干扰源	74
5.2 电源干扰、电源滤波、同步变流机	74
5.2.1 电源干扰的形成	74
5.2.2 电源干扰的等值电路	75

5.2.3 滤波器	77
5.2.4 同步变流机组	91
5.3 机械触点	94
5.3.1 干扰形成原因	94
5.3.2 机械触点的去干扰措施	96
5.4 整流器、可控硅	112
5.4.1 干扰原因	112
5.4.2 整流器对电网的干扰	112
5.4.3 抑制整流器对电网干扰的措施	116
5.4.4 整流器的射频和高频干扰	117
5.4.5 射频去干扰滤波器的参数	117
第六章 避免干扰源与干扰对象产生耦合的措施	120
6.1 基准线的结构	120
6.1.1 概念	120
6.1.2 信号的基准点	120
6.1.3 电气柜中的基准线结构	122
6.1.4 多支路设备中的基准线结构	123
6.2 基准线 and 外壳的接地	125
6.2.1 保护接地和工作接地	125
6.2.2 独立设备中的基准线	125
6.2.3 多支路设备中外壳和基准线的接地	126
6.3 信号传递时的抗干扰措施	133
6.3.1 信号线干扰的原因和影响	133
6.3.2 一般导线	133
6.3.3 同轴导线	133
6.3.4 传输线的比较	137
6.3.5 传输线驱动器	139
6.3.6 电位隔离	139
6.4 屏蔽	144
6.4.1 元件的屏蔽	144
6.4.2 外壳的屏蔽作用	147
6.4.3 印刷电路板的屏蔽	152
6.4.4 电路板间的屏蔽	156
6.4.5 屏蔽室	157
第七章 减小电气系统干扰灵敏度的措施	160

7.1 模拟线路中的信号滤波	160
7.1.1 滤波原理	160
7.1.2 采用简单 RC 滤波环节的信号滤波	160
7.1.3 采用 LC 滤波环节的信号滤波	164
7.1.4 采用选通滤波器(带阻滤波器)的信号滤波	166
7.1.5 调节回路的信号滤波	169
7.2 数字线路抗扰度的改善	169
7.2.1 系统固有的和外界的干扰	169
7.2.2 原则与措施	171
第八章 抗干扰系统的设计	177
8.1 概述	177
8.2 初步电磁兼容性设计	178
8.3 设计原则	181
8.4 结构和线路之变更	182
参考文献	182

第一章 引言

我们可以将“电磁干扰”这样一个总体明确地分为几个部分，如图 1.1 所示。其内容将在下面各章中加以阐明。

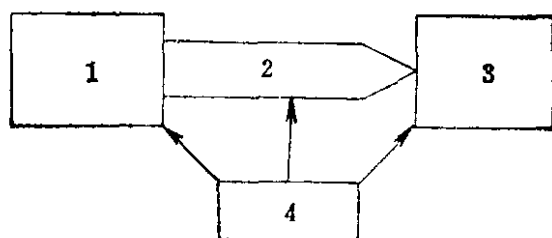


图1.1 干扰示意图

1—干扰源，干扰原因；2—耦合；3—受干扰系统，
干扰对象；4—抗干扰措施。

电磁兼容性学科的根本任务是采取各种措施以保证实现电磁兼容性。为了探讨这些措施，必须认识各种干扰的物理本质。因此应该详细研究干扰的基本模型，并根据耦合的物理本质加以分类（第二章）。在第三章将研究干扰灵敏度和抗扰度。第四章综述测量技术，用这些测量技术可以确定干扰原因、测定数字系统和模拟系统的干扰灵敏度。

以后几章讨论各种抗干扰措施。这些措施可以根据所针对的对象分为三类：第一类（第五章）是直接消除干扰原因的 措施；第二类（第六章）是消除干扰源与易受干扰的对象相互耦合的措施；而第三类措施则是提高一个系统的抗扰性能，使得干扰不会引起不良后果。

书中还有一些例子，说明如何应用电磁干扰的基本理论来解决实际问题。在第八章中将以一个数字计算机为例简要说明进行电磁兼容性设计的方法。

第二章 干扰机制和一般性去耦措施

2.1 概 述

2.1.1 干扰和抗干扰措施一览表

我们将后面各章所要讨论的内容先以表 2.1~2.3 的形式扼要地介绍如下：

表2.1 干扰（第二章和第六章）

干扰种类	电路性的	电容性的	电感性的	传 导 波	辐 射 波
干扰对象	基准线 地	信号线 驱动线	信号线环 驱动线环	信号线	信号线环 基准线
干扰量	$i, \frac{di}{dt}$ $\underline{Z_K}$	$\frac{du}{dt}$ C_K	$\frac{di}{dt}$ M_K	$\frac{du}{dt} \quad \frac{di}{dt}$ $\underline{U_n}$	R_s
措施	星形基准线 母线基准线 平板基准线	空间隔离 屏蔽、对称和绞合 正确接地		导线匹配	屏蔽 缩小尺寸

表2.2 对干扰源可采取的专门措施（第五章）

干 扰 源	开 关 (有触点，无触点)	整 流 器	电 源
措 施	阻 尼 去 耦	阻尼、滤波 去 耦	滤 波 变 换

表2.3 对干扰对象可采取的专门措施（第七章）

系 统	数 字 电 路	模 拟 电 路
措 施	增大脉冲变化时间（开关时间） 提高信噪比	信号滤波 提高功率水平

本章将讨论干扰源与干扰对象之间的四种耦合方式以及一般去耦措施。仪器设备的抗干扰措施将于第六章介绍。

2.1.2 作用示意图

一个干扰回路对另一个被干扰回路之间的耦合情况，可简单而直观地用一个示意图（图 2.1）来加以说明。

干扰电流回路包括电压源 U_{01} 、阻抗 Z_{121} 、 Z_{122} 和导线 1、2。被干扰电流回路包括电压源 U_{02} 、 Z_{341} 、 Z_{342} 和导线 3、4。两个回路通过阻抗 Z_{13} 、 Z_{14} 、 Z_{23} 、 Z_{24} 以及电磁场相互耦合。

有下述几种形式的干扰：

——电路性干扰

电路性干扰是由于两个回路经公共阻抗相耦合而产生。干扰量是电流。

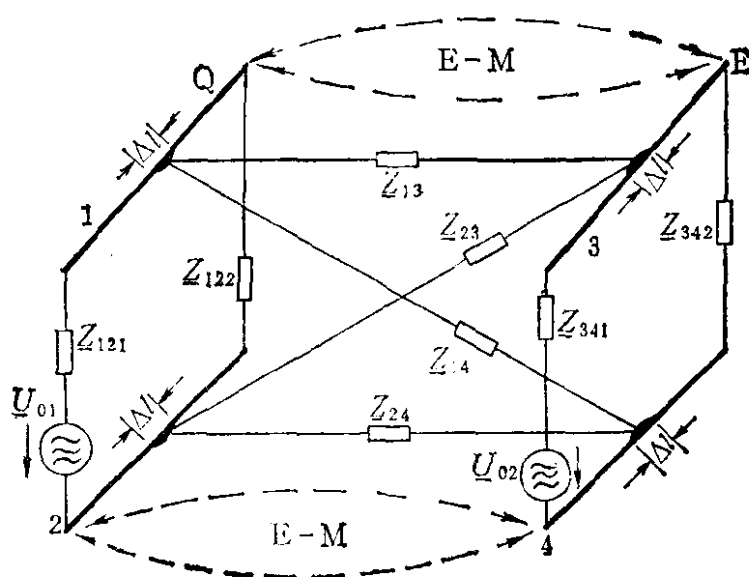


图 2.1 作用示意图

Q—干扰回路；E—被干扰回路；E-M—电磁场的作用，
1、2、3、4—导线。

——电容性干扰

电容性干扰产生的原因是由于在干扰源与干扰对象之间存在着变化的电场。干扰量是电压。

——电感性干扰

电感性干扰产生的原因是由于干扰源的交变磁场在干扰对象中产生了感应电压。而产生感应电压的原因则是由于在干扰源中存在变化着的电流。

——波干扰

波干扰是由传导电磁波或空间电磁波所引起的。空间电磁波的干扰量是电场强度和磁场强度，传导波的干扰量是传导电流和传导电压。

2.2 电路性干扰

2.2.1 干扰模型

电路性干扰的产生条件是至少存在两个互相耦合的电流回路，其电流全部或部分地在公共阻抗中流过。在每个电流回路中流过的电流是该回路本身的电流与另一相耦合的电路在其中产生

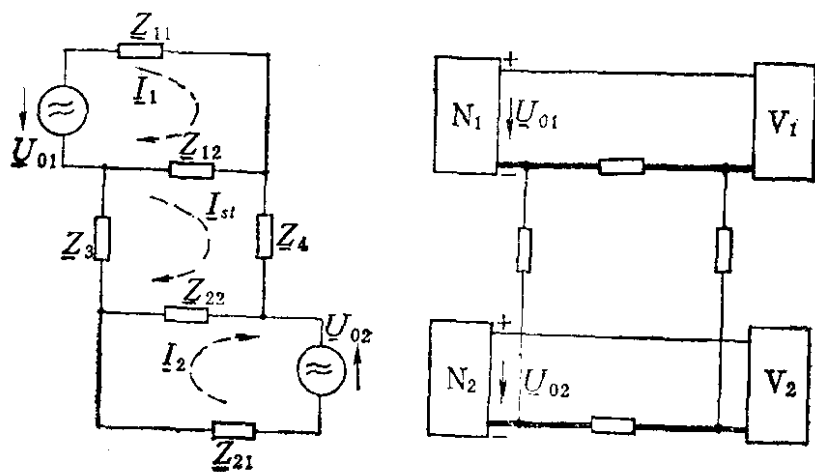


图2.2 等值电路图

N—电源，V—用户。

的电流之总和。由等值电路图（图2.2）可见，当 $U_{02} = 0$ 时，由 U_{01} 产生的有效电流 I_1 为：

$$I_1 = \frac{U_{01}}{Z_{11} + \frac{Z_{12} \left(Z_3 + Z_4 + \frac{Z_{21} \cdot Z_{22}}{Z_{21} + Z_{22}} \right)}{Z_{12} + Z_3 + Z_4 + \frac{Z_{21} \cdot Z_{22}}{Z_{21} + Z_{22}}}} \quad (2.1)$$

$\underline{U}_{02}$ 经阻抗 $\underline{Z}_3$ 、 $\underline{Z}_4$ 在回路 1 中产生的电流 $\underline{I}_{st}$ 为:

$$\underline{I}_{st} = \underline{U}_{02} \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21} \cdot \underline{Z}_{22} + \left[(\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{22}) \left(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \frac{\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}} \right) \right]} \quad (2.2)$$

当电压、电流的方向如图所示时,在阻抗 $\underline{Z}_{11}$ 上 $\underline{I}_{st}$ 的一部分与 $\underline{I}_1$ 同向,在 $\underline{Z}_{12}$ 上则与 $\underline{I}_1$ 反向。

通过 $\underline{Z}_{11}$ 的电流为:

$$\underline{I}_{11} = \underline{I}_1 + \underline{I}_{st} \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}} \quad (2.3)$$

它是有效电流 $\underline{I}_1$ 与部分干扰电流的总和。

通过 $\underline{Z}_{12}$ 的电流为:

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \frac{\underline{Z}_{21} \cdot \underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{22}}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \frac{\underline{Z}_{21} \cdot \underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21} + \underline{Z}_{22}}} - \underline{I}_{st} \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}} \quad (2.4)$$

式中,被减数是有效电流的一部分,减数是干扰电流的一部分。干扰电流的一部分在被干扰回路的阻抗 $\underline{Z}_{11}$ 和 $\underline{Z}_{12}$ 上产生的干扰电压为:

$$\underline{U}_{11st} = \underline{Z}_{11} \underline{I}_{st} \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}} \quad (2.5)$$

$$\underline{U}_{12st} = \underline{Z}_{12} \underline{I}_{st} \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{12}} \quad (2.6)$$

如果干扰电流或干扰电压足够大,以至于超过了干扰对象在工作频率范围内的不灵敏区,就将引起不良后果。工作频率范围是指由干扰对象工作的上下限频率限定的一个区间。

特例:

在图 2.2 所示情况中,如果 $\underline{Z}_3$ 、 $\underline{Z}_4$ 为零,就形成了一种特殊情况。这种情形甚多,因此十分重要(图 2.3)。当多个电流回路共用一根导线时就会出现这种情形。

对于对象(用户)的干扰一般有两种形式:

——信号量是电流时,如果干扰电流通过 $\underline{Z}_{11}$ 的一部分超过

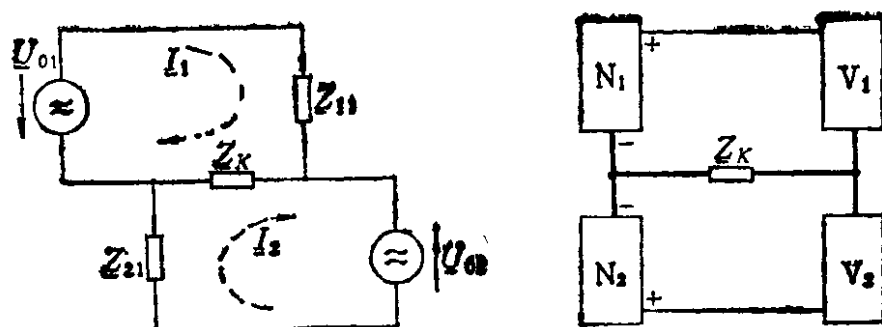


图2.3 “特例”的等值电路图

了对象的不灵敏区，则将产生干扰作用。 Z_{11} 上的电流是有效电流和部分干扰电流的总和：

$$I_{11} = \frac{U_{01}}{Z_{11} + \frac{Z_K Z_{21}}{Z_K + Z_{21}}} + \frac{U_{02} \cdot Z_K}{Z_K Z_{21} + Z_{11} Z_{21} + Z_K Z_{11}} \quad (2.7)$$

——信号量是电压时，如果在 Z_K 上的干扰电压（与有效电压叠加）超过了对象的不灵敏区，则也将出现干扰作用。

在阻抗 Z_K 上的干扰电压降 U_{JK} 为：

$$U_{JK} = I_2 \frac{Z_K Z_{11}}{Z_K + Z_{11}} \quad (2.8)$$

如果使耦合阻抗 Z_K 趋近于零，则通过 Z_{11} 的干扰电流和在 Z_K 上的干扰电压 U_{JK} 均将消失。此时，在有效电流回路与干扰电流回路间即使存在电气连接（在一点上），它们彼此也不再互相干扰。这种情形称为电路去耦（第 2.2.4 节）。

定量分析：

为了确定干扰的影响，必须考虑在系统工作的整个工作频率范围内（下限频率至上限频率）电流回路的阻抗，其中特别是耦合阻抗的特性。耦合阻抗可能包含电阻、感抗和容抗。

——电阻

在低频时（千周范围以下），假定导线电阻与通过的电流频率无关。

在高频时，实际电阻因集肤效应而增大。导线的感抗也增大。这种变化必须加以考虑^[2-1]。

实际电阻相对值为:

低频时 ($X < 1$):

$$\frac{R}{R_0} = 1 + \frac{X^2}{3} \quad (2.9)$$

高频时 ($X > 1$):

$$\frac{R}{R_0} = X + \frac{1}{4} + \frac{3}{64X} \quad (2.9a)$$

$$X = 0.5 r \sqrt{\pi f \kappa \mu} \quad (2.10)$$

式中 R ——与频率有关的电阻;

R_0 ——直流电阻;

r ——导线半径;

f ——频率;

κ ——导线导电率;

$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ ——导线导磁率;

μ_0 ——真空导磁率;

μ_r ——相对导磁率。

近似计算时可认为实际电阻与频率的 $\frac{1}{2}$ 次方成正比:

$$R \approx R_0 \cdot K \cdot \sqrt{f} \quad (2.11)$$

图 2.4 表示铜的实际电阻 R (直流电阻 R_0 作为基准值) 与频率的关系。参变量是导线半径。

——感抗

电感 L 的感抗 X_L 与频率 f 成正比:

$$jX_L = j\omega L = j2\pi fL \quad (2.12)$$

导线的感抗:

系统的上限频率增高时就必须考虑导线的电感。导线的电感通常以耦合阻抗的形式出现, 同别的电流回路发生电路耦合并产生干扰。导线及其回线的电感包括导线的内自感及导线的外自感。一根导线的内自感在直流时约为 0.05 毫亨/千米, 它与导线直径无关, 但随频率降低而减小, 因此其影响常可忽略。外自感则与导线的排列形式有关, 要精确计算所需工作量很大。