

# 将工作与噪声电流分离的母线型滤波器单元开发

徐晨琛 王世山

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:**基于“集肤”与“邻近”效应开发一种可将“工作”与“噪声”电流分离的电磁干扰(Electromagnetic interference, EMI)滤波器。若在所开发的单元外侧制备具有一定厚度、对噪声可实现有效衰减的导体,由于集肤效应,该单元可实现对共模高频噪声电流的有效耗散;若在单元的内侧制备相同材料的导体,由于邻近效应,该单元可实现对差模高频噪声电流的有效耗散。采用合适的电气连接方式,滤波器单元可以将“噪声”电流和“工作”电流分离,从而对高频噪声电流进行有效的抑制,而对“工作”电流几乎衰减很小。文中基于有限元法,建立了该类单元的时谐场模型,仿真了单元导体中的电流密度分布,提取了其交流电阻系数,定量描述了该类单元对噪声的耗散能力。

**关键词:**电磁干扰;反射式滤波器;吸收式滤波器;集肤效应;邻近效应

**中图分类号:** TN713      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2014)01-0109-06

## Development of Bas-Bar EMI Filter Unit with Function of Separating Working and Noise Current

*Xu Chenchen, Wang Shishan*

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** An electromagnetic interference(EMI) filter with the function of separating working and noise current is proposed based on the "skin effect" and "proximity effect". By plating a high loss conductor with a certain thickness to the outside of the unit, the common mode (CM) noise can be dissipated due to the skin effect. While by plating the conductor to the inside of the unit, the differential mode (DM) noise can be dissipated due to the proximity effect. By proper electrical connection, the "noise" current and the "working" current can be separated, thus achieving the suppressed high frequency noise current and almost lossless working current. Based on the finite element method (FEM), the harmonic field model is established, the current density distribution is simulated, the AC resistance coefficient is extracted, and the quantified analysis of the dissipation capability is included.

**Key words:** electromagnetic interference; reflective filter; absorptive filter; skin effect; proximity effect

传统的电磁干扰(Electromagnetic interference, EMI)滤波器利用无耗元件电感、电容将不需要的频率成分的噪声能量反射回信号源,利用阻抗不匹配实现的反射可衰减一定范围内的频率信号<sup>[1]</sup>,然而实际中源阻抗和负载阻抗的多变性以及

噪声频率的丰富性,反射式滤波往往存在阻抗失配的问题<sup>[2]</sup>,这一问题的存在不仅会降低反射式滤波器的性能,甚至会增加传输线上的干扰。

研究表明,一种利用有耗元件实现的吸收式滤波器可以通过有耗元件对不需要的频率能量实现

**基金项目:** 国家自然科学基金(51177071)资助项目;台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》(DREK2013004)资助项目;研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj120204)资助项目。

**收稿日期:** 2013-10-15; **修订日期:** 2013-12-19

**通信作者:** 王世山,男,副教授, E-mail: wangshishan@nuaa.edu.cn。

吸收和耗散<sup>[3-4]</sup>。吸收式与反射式滤波器的组合使用,使得滤波器在实现陡峭的频率特性的同时具有了很高的阻带衰减。

在反射式滤波器的基础上加入吸收式滤波器,其关键在于将“工作”与“噪声”电流实现分离,对其中的“噪声”电流实现反射与吸收,而让“工作”电流畅通。

将“工作”与“噪声”电流实现分离,利用的是导体对频率的选择作用,即导体的“集肤效应”与“邻近效应”原理<sup>[5]</sup>。电力电子研究中心(Center for power electronics systems, CPES)针对一个三相电机系统设计了一个直流母线型滤波器,兼具“反射”与“吸收”的功能<sup>[6-8]</sup>。

由于处于研究阶段,针对该类滤波器的一些理论问题,例如母线滤波器中镀层材料与集肤深度之间的关系、镀层的尺寸设计的理论、邻近效应对电流分布的影响以及相关的验证都有所缺乏。为此,本文在研究母线型滤波器的原理基础之上,对不同材料集肤深度、高频损耗等做出了一系列的探究。

## 1 “集肤”与“邻近”效应对频率的选择

实现“反射”与“吸收”合一的滤波器,关键在于对不同频率电流的分离,对其中需要的工作频率的电流无衰减而对噪声频率的电流通过“吸收”与“反射”的共同作用来实现衰减。

### 1.1 “集肤效应”对“工作”与“噪声”电流的分离

交变电流通过导体时在导体磁场的作用下,电流集中于导体的表面流通,电流的频率越高,电流集中于导体表面流通的趋势越明显<sup>[9]</sup>。这种与频率有关的效应使得利用集肤效应实现对频率的选择成为可能。

集肤深度  $d$  表征了电场能量的集肤程度<sup>[9]</sup>

$$d = 1/\sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为导体的电导率;  $\mu$  为导体的磁导率。

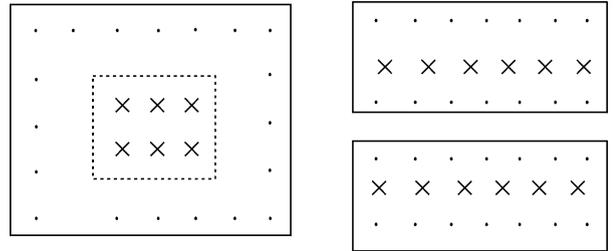
由式(1),当一段导体中通入不同频率的电流时,由于集肤深度  $d$  的不同,不同频率的电流会从导体的不同位置流通。例如,对一段导体加载工频电流以及几兆赫兹的噪声电流,两者的频率相差  $10^6$  级,其集肤深度相差了  $10^3$  级(图 1(a))。

仅仅对“工作”与“噪声”电流的分离是不能实现滤波的功能的,在分离的同时如果能够实现对噪声电流具有更小的集肤深度,增加噪声电流通路的电阻,从而可获得更高的高频损耗,其表征损耗的

交流电阻近似为<sup>[5]</sup>

$$R_{ac} = \frac{1}{2\sigma \omega d} \quad (2)$$

式中  $\omega$  为导体的宽度。对工作电流能够尽量地实现其均匀分布,以实现以最小的损耗传输到后级负载,则能够达到 EMI 滤波器所需的高频时高损、低频时低损的特性。



(a) 集肤效应

(b) 邻近效应

·—高频电流; ×—工频电流

图 1 集肤、邻近效应示意

Fig. 1 Skin effect and proximity effect

由式(1,2)可见,集肤深度和损耗与导体的电导率  $\sigma$  和导体的磁导率  $\mu$  密切相关。几种常用导体电导率和相对磁导率见表 1。

表 1 常用导体电导率与相对磁导率

Tab. 1 Conductivity and relative permeability of conductors

材料	$\sigma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	$\mu_r$	$\sigma\mu_r$
银	$6.29 \times 10^7$	1	$6.29 \times 10^7$
铜	$5.9 \times 10^7$	1	$5.9 \times 10^7$
铁	$1.03 \times 10^7$	300	$3.09 \times 10^7$
镍	$1.47 \times 10^7$	600	$8.82 \times 10^9$

由表 1 可见,由于材料的  $\sigma\mu_r$  的不同,对同一频率的电流,不同的材料呈现不同的集肤深度  $d$ 。利用这一特性,可进一步扩大不同频率电流集肤深度的相异性,加强导体对频率的选择作用,实现对不同频率电流不同的衰减。

### 1.2 “邻近效应”对不同频率电流的分离

“集肤效应”实现了单导体对频率的选择作用,系统中信号是通过二线传输的,相互靠近的导体中通有交变电流时会受到邻近导体的影响。

两根相邻的导体中通入相反的电流时,在邻近效应的作用下,电流集中于导体的内侧流通,并且频率越高邻近效应越明显,邻近效应的作用使得两根靠近的导体内侧集肤现象更明显(图 1(b))<sup>[5]</sup>。

集肤效应使得高频电流从单个导体的外侧流通,邻近效应下高频电流集中于两导体内侧流通,工频电流由于频率低集肤深度大,从导体的中间部分流通,从而形成高频与低频电流的分离。

### 1.3 多层导体的集肤、邻近效应

通过集肤和邻近效应实现了不同频率的电流通过导体的不同位置流通。滤波器的理想特性是对“工作”电流实现几乎无衰减的流通而对“噪声”电流实现很高的衰减。将不同频率的电流分配到不同的位置后,再利用不同材料不同的损耗特性实现对高频电流的高衰减、对低频电流的低衰减,以达到滤波的目的。

材料的损耗特性与其电阻率以及集肤深度相关,通过对常用导体的电导率以及电阻率的综合发现,对低频电流采用铜为传输路径,对高频电流采用镍为传输路线时可以实现滤波器需要的高频时高损、低频时低损的目标。

通过研究,提出如图 2 所示的单元。该单元中通入工作电流时,电流从低阻抗的铜层中流过。铜层的集肤深度大、电阻率低,使得低频电流流通时损耗小。当高频电流通过该单元时,由于集肤和邻近效应的作用,电流会集中于该单元的表面流通即铜层外层的镍层中流过。镍层的集肤深度小、电阻率大,使得高频电流流通时损耗大,从而达到滤波器所需实现的高频时高损、低频时低损的特性。

镍层起着衰减高频噪声的作用,高频噪声电流在集肤效应的作用下从镍层中流通,本文中关注的传导干扰的频率段为 150 kHz ~ 30 MHz,集肤深度随着频率升高而降低,集肤深度的降低使得所需要的镍层的厚度也会相应降低。150 kHz 时镍的集肤深度为 43 μm,1 MHz 时镍的集肤深度为 5.36 μm,由于镀镍工艺的所限,目前陶瓷镀镍的厚度约为 10 ~ 15 μm,已能满足 1 MHz 以上噪声对集肤深度的要求。铜层厚度的选择需要满足工作电流时,铜层阻抗远小于镍层阻抗,使工作电流能够从低损的铜层中流通,高频时铜层的阻抗增大,使得高频噪声电流在集肤效应作用下进入镍层并在镍层中衰减。铜层厚度的增加可以提高滤波器对工作电流的在流能力,本文中采用的 300 μm 厚的铜层,其载流能力可以达到 15 A,可以满足实验中变换器的功率等级要求。



图 2 镀镍单元  
Fig.2 Nickel plating unit

通过建立该单元的有限元平行平面模型(图 3),验证集肤和邻近效应对频率选择的有效性。为了与后期实验保持一致性,采用与实验中相同镀镍结构的参数,其参数如表 2 所示。

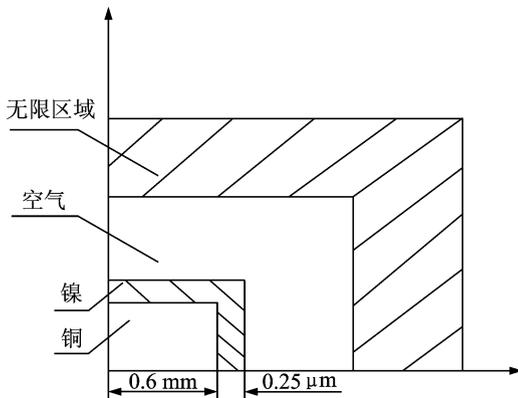


图 3 镀镍单元平行平面模型  
Fig.3 Parallel plane model of nickel plate unit

表 2 镀镍结构材料参数  
Tab.2 Parameters of nickel plating unit

材料	厚度 / μm	宽度 / mm	长度 / mm
铜	300	1.2	100
镍	25	1.2	100

采用 1/4 结构时谐磁场模型,耦合导体区域的所有节点,施加交流电流,提取镀镍导线与相同结构纯铜导体的单位长度交流电阻系数

$$K_{ac} = R_{ac} / R_{dc} \tag{3}$$

式中:  $R_{ac}$  为导体的交流电阻;  $R_{dc}$  为导体的直流电阻,交流电阻系数表征了由集肤效应引起的阻抗。镀镍导线与相同结构纯铜导体的交流电阻系数与频率的变化曲线如图 4 所示。在低频段,纯铜导线电阻与镀镍直线电阻值接近;在高频段,镀镍导线的交流电阻快速增大,而纯铜导线增长趋势相对较小,这说明低频段集肤效应不明显,电流从低阻抗铜层流过。高频段由于集肤效应,电流从外层的镍层流过,同时由于镍的集肤深度约为铜的 1/10,大大增大了镍层的电阻。在趋肤效应的作用下整个

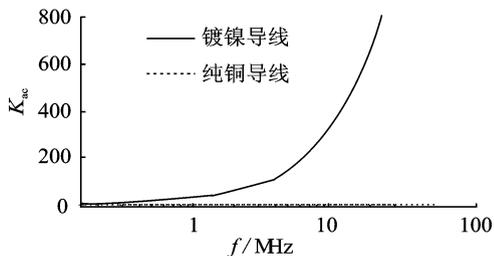


图 4 交流电阻系数  
Fig.4 Coefficient of AC resistance

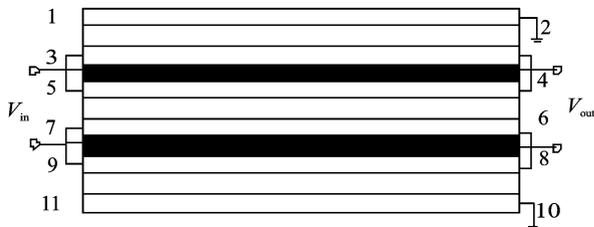
结构对低频的工作电流呈现低损耗,对高频电流呈现高损耗。

两根导体中通有相反方向的电流时,由于邻近效应,电流集中于两导体的内侧流通。邻近效应也反映为电流的集肤现象,通过此模型和交流电阻系数的提取也验证了邻近效应对频率选择的有效性。

## 2 母线型滤波器单元的构成

利用材料的集肤与邻近效应将不同频率的电流分开后,对噪声频率采用“反射”与“吸收”双重衰减,对工作频率几乎无衰减,由此诞生了母线型EMI滤波器。母线型EMI滤波器采用滤波器与传输线结合的模式,在“反射”“吸收”噪声的同时,省去了额外的大体积EMI滤波器。

与传统的EMI滤波器类似<sup>[10-11]</sup>,母线型EMI滤波器也由共模(CM)和差模(DM)部分组成,整个母线型EMI滤波器的结构如图5所示。整个结构以铜条1及其两侧的镍层和铜条2及其两侧的镍层的一端为输入,另一端作为输出。



CM 模块 1:1,2,3;CM 模块 2:9,10,11

DM 模块:5,6,7;铜条 1:4;铜条 2:8

图5 母线型EMI滤波器结构

Fig. 5 Structure of bus-bar EMI filter

### 2.1 母线型滤波器单元的共模模块

母线型EMI滤波器的CM模块由长条形陶瓷基板和喷镀在其两侧的镍层构成。当母线型滤波器中通入工作电流和高频共模电流时,由于镍层的电阻远大于铜层电阻,低频的工作电流从铜层流过,对于高频的共模噪声电流,由于其频率很高,趋肤效应明显,共模噪声电流从铜条外层的镍层中流过(图6(a))。由陶瓷和喷镀在其两侧的镍层形成共模电容,对共模噪声形成反射,同时镍层的电阻率高、集肤深度小,对高频噪声电流吸收衰减。

该结构中的CM单元可简化为RC滤波器,该单元的电容近似为

$$C_{CM} = \epsilon_0 \epsilon_{CM} S_{CM} / h_{CM} \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{CM}$ 为共模单元中陶瓷板的介电常数; $h_{CM}$ 为共模单元中陶瓷板的厚度; $S_{CM}$ 为镍层的面积。

对CM单元提取不同频率下的电流分布如图

7所示。由图7显示,在 $f=10\text{ kHz}$ 时,电流密度最大处仍在铜层,而在 $1\text{ MHz}$ 以上时,上下镍层的电流密度变大很多,中心铜层电流密度减小很多。其原因是低频时铜层的厚度仍小于该频率下的集肤深度,随着频率越高,铜层厚度就越大于逐渐减小的集肤深度,集肤效应越明显。因此,此结构中 $1\text{ MHz}$ 以上的高频噪声信号将会从上下镍层流动,镍的高电阻率大大增加了高频损耗。

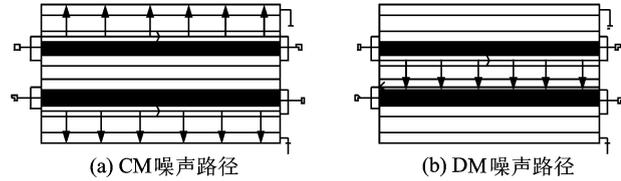


图6 噪声路径

Fig. 6 Noise path

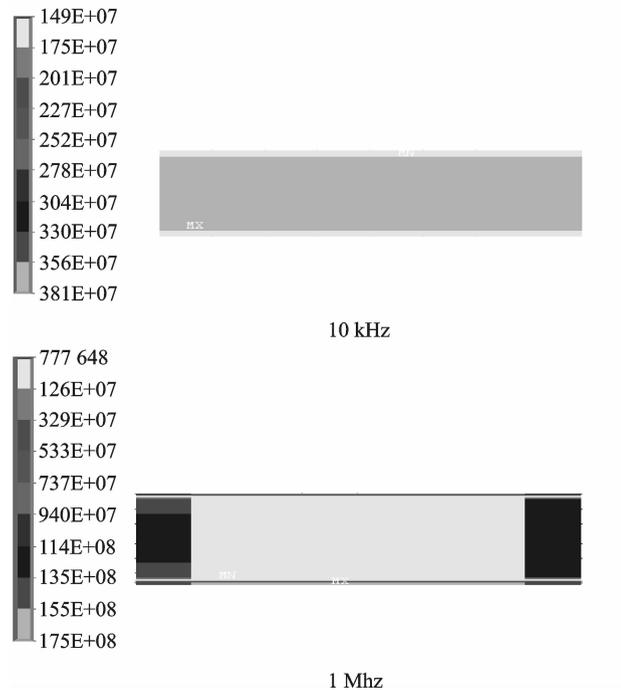


图7 共模单元电流分布

Fig. 7 Current distribution of CM unit

### 2.2 母线型滤波器单元的差模模块

与母线型滤波器中的共模单元类似,DM单元也由长条形陶瓷基板和喷镀在其两侧的镍层构成(图5)。与共模单元不同的是,由于一般所需的差模电容较大,DM单元需要采用介电常数极高的陶瓷基板。当母线型滤波器中通入工作电流和高频的差模电流时,在邻近效应的作用下,高频的差模电流从两个铜条的内层流过(图6(b))。在高损耗的内层作用下,差模噪声电流被吸收衰减,同时高介电常数陶瓷及其两侧的镍层形成大的差模电容对噪声电流反射衰减。

该结构中的 DM 单元同样可简化为 RC 滤波器,其电容值与上述的 CM 单元中的电容值算法类似。

建立镀镍结构的双导体模型,两个导体加载方向相反的电流,提取不同频率下电流分布如图 8 所示。

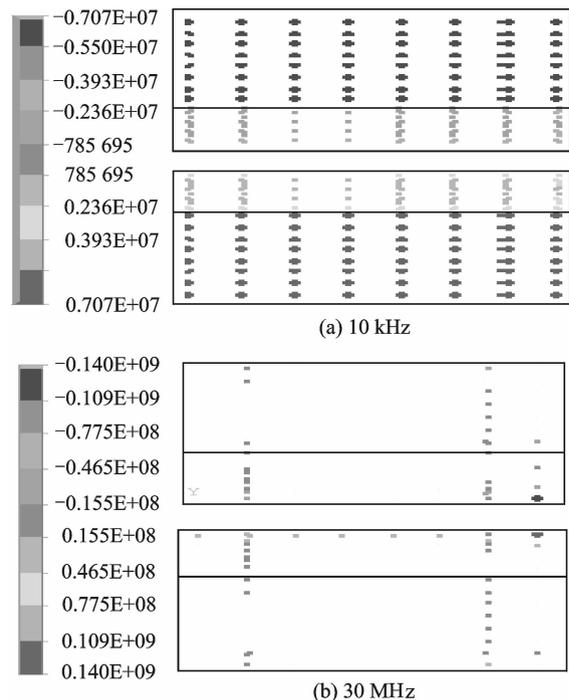


图 8 差模单元电流分布

Fig. 8 Current distribution of DM unit

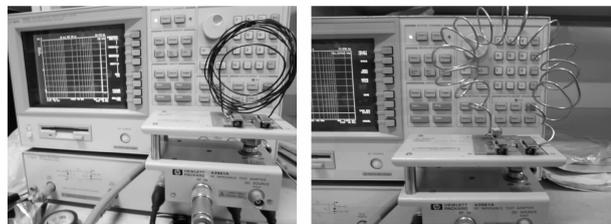
分析原因,低频时两导体间的邻近效应不明显,电流基本上根据导体的电阻均匀分布,高频时,两导体间的邻近效应明显,电流开始从两铜导体的内侧流动。母线型滤波器采用铜条作为工作电流的传输路径,由于铜条的载流能力较强,能够承受较高的电压等级,相比于传统的滤波器该结构的滤波器在大功率场合的应用更有优势。同时,铜条可以作为负载与电源之间的传输线,实现了传输线与滤波器的一体化,省去了额外的大体积的滤波器,有效地减小整个电力电子系统的体积。

### 3 镀镍导体集肤效应验证

为了验证镀镍结构的高频损耗性,利用铜线进行镀镍处理,利用阻抗分析仪进行交流电阻的测量。实验中的导线线径为 1.5 mm,长度为 2 m,纯铜导线的测试如图 9(a)所示,镀镍导线的测试如图 9(b)所示,由于采用电镀镍,镍的厚度达到 20  $\mu\text{m}$ 。

为了验证实验测量的精度,将测量的纯铜导线的交流电阻值与解析的值相比较。若结果相近,则

为镀镍的导线交流电阻的测量的精度提供了一定的依据。结合镀镍和无镍两种情况下,利用阻抗分析仪提取的交流电阻如图 10 所示。同时理论计算了纯铜导线与镀镍导线的交流电阻值(图 11),通过图 10 镀镍导线交流电阻的实测值与图 11 中镀镍导线交流电阻理论计算值发现,低频时镀镍导线的电阻值增长较慢,1 MHz 以后电阻值增长较快,这是因为集肤效应作用明显,使得电流流经高阻抗镍层,增大了交流电阻值。



(a) 裸铜线样品

(b) 镀镍导线

图 9 测试导线

Fig. 9 Test wire

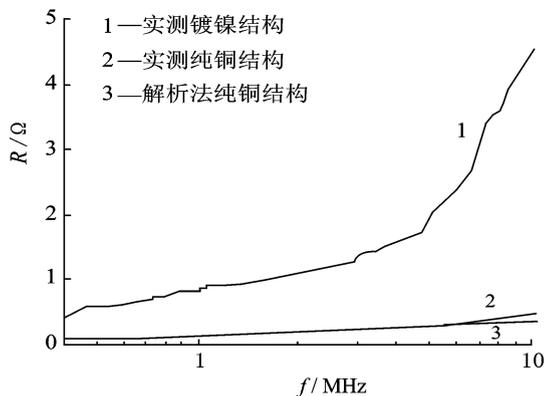


图 10 交流电阻提取

Fig. 10 Extraction of AC resistance

## 4 结 论

本文以母线型滤波器中的 CM 单元和 DM 单元为研究对象,分析了 CM 和 DM 单元的结构、趋肤和邻近效应在其中的应用,通过 ANSYS 分析了 CM 和 DM 单元的高频损耗特性,对导线进行了镀镍特性分析,提取了纯铜导线与镀镍导线的功率损耗,得到以下结论:

(1) 采用铜导体与镍导体的结合单元可有效地分离高频噪声电流和低频的工作电流,并实现对噪声电流的高损耗对工作电流的低损耗。

(2) 以铜和镍为材料的 CM 和 DM 单元在实现大功率的同时可以提高滤波器的性能,为大功率母线型滤波的研究打下了基础。

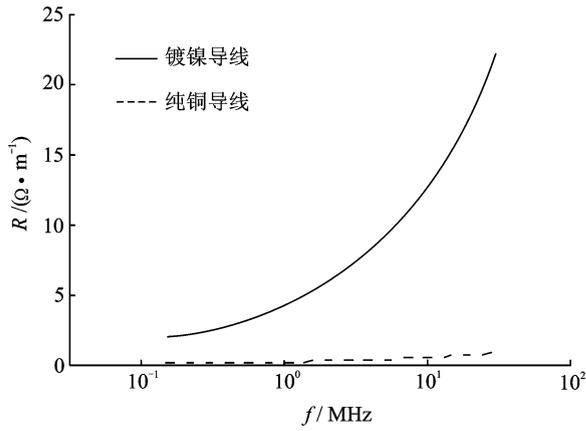


图 11 交流电阻解析计算

Fig. 11 Analytical calculation of AC resistance

## 参考文献:

- [1] 路宏敏. 工程电磁兼容 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [2] 钱照明, 程肇基. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术 [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2000.
- [3] 罗昉. 三相电机驱动系统中电磁干扰及其高功率密度滤波方案研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [4] Baisden A C, Boroyevich D, Van Wyk J D. High frequency modeling of a converter with an RE-EMI filter [C]// Industry Applications Conference (IAS). Tampa, USA: IEEE, 2006, 5: 2290-2295.
- [5] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [6] Luo F, Baisden A C, Boroyevich D, et al. Design of a hybrid busbar filter combining a transmission-line busbar filter and a one-turn inductor for DC-fed three phase motor drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5588-5602.
- [7] Wolmarans P J, Van Wyk J D, Jr Campbell C K. Technology for integrated RF-EMI transmission line filters for integrated power electronic modules [C]// 37th Industry Applications Conference (IAS). Pennsylvania, USA: IEEE, 2002: 1774-1780.
- [8] Van Wyk J D, Jr Cronje W A, Campbell C K, et al. Power electronic interconnects; Skin-and proximity effect-based frequency selective multipath propagation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(3): 600-610.
- [9] Clayton R P. 电磁兼容导论 [M]. 闻映红, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] Wang Shuo. Characterization and cancellation of high-frequency parasitics for EMI filters and noise separators in power electronics [D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [11] Shih F, Chen D, Wu Y, et al. A procedure for designing EMI filters for AC line applications [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(1): 170-181.

