

高等学校教材

牵 引 电 器

上海铁道学院 刘韵云 主编
北方交通大学 王立文 主审

中 国 铁 道 出 版 社

1992年·北京

前 言

本教材是根据1988年铁道部电力牵引与传动控制、铁道电气化专业教学指导委员会的意见，对1980年中国铁道出版社出版的试用教材《机车电器原理》进行修订，以满足教学的需要。

《机车电器原理》是以电传动内燃机车电器为主，主要讲授有触点电器和磁性元件的基本原理，内容主要介绍触头系统、灭弧系统、传动机构、典型电器和磁性元件等，是符合当时的教学需要。但是，随着科学技术的发展，电力牵引在铁道上已被广泛采用，因此，《机车电器原理》教材已不能满足需要，需要进行修订。修订后的教材，对所叙述的内容重新进行了组织，内容介绍基本上按电器基本原理、主要牵引电器的工作原理以及有关的设计计算。内容也作了较大的修改，增加了电力机车电器方面的内容，故原试用教材的书名已不确切，经部教育司同意，修订后的教材定名为《牵引电器》。

本书由上海铁道学院刘韵云主编，北方交通大学王立文主审。书中绪论、第一、二、三、五章由刘韵云编写，第四章由北方交通大学陶碧玉编写，第六章由上海铁道学院朱仙福、钟明浩和陶碧玉编写，第七章由上海铁道学院薛彭雨编写，第八章由朱仙福和长沙铁道学院周彬编写。华东交通大学郑高宽同志也参加了本书初稿的编写工作。

本书是电力牵引与传动控制专业的专业课教材，也可供从事电力、内燃牵引以及铁道电气化事业的工程技术人员参考。

在本书编写过程中得到了株洲电力机车工厂和株洲电力机车研究所等单位的大力支持，特致以衷心的感谢。

编 者

1 9 9 0 . 6 .

(京)新登字063号

内 容 简 介

本书共分八章,介绍电器的基本理论、主要牵引电器的工作原理与设计计算。基本理论部分包括:电器的热计算、电动力计算、电弧理论、电接触以及电磁机构的计算基础。

工作原理部分包括:受电弓、高压断路器、电流和电压互感器、平波电抗器、电空接触器、司机控制器 自动电磁元件的工作原理和技术参数与特性以及结构分析等。

典型电器的设计计算部分包括:触头和灭弧系统的计算、电磁铁的工程设计和互感器的设计计算。

本书是高等学校电力牵引与传动控制专业的教材,也可供有关的工程技术人员学习参考。

高等学校教材

牵引电器

上海铁道学院 刘颖云 主编

中国铁道出版社出版、发行
(北京市东单三条14号)

责任编辑:方 军
中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 15.75 字数: 394 千
1992年7月 第1版 第1次印刷
印数: 1—3000册

ISBN7-113-01225-6/U·377 定价: 4.45元

目 录

绪 论

第一章 电器的热计算基础..... 3

- 第一节 牵引电器零部件的发热温度极限..... 3
- 第二节 电器的基本损耗（热源）..... 5
- 第三节 电器的散热..... 12
- 第四节 均质载流导体的热计算..... 17
- 第五节 电器的发热工作制..... 20
- 第六节 短路时的发热..... 22
- 第七节 载流导体和线圈的稳态热计算..... 25

第二章 电器电动力计算基础..... 34

- 第一节 载流导体系统的电动力计算..... 34
- 第二节 交流电动力的计算..... 42
- 第三节 电器的电动稳定性..... 46

第三章 电弧理论及灭弧装置..... 48

- 第一节 气体放电的物理过程..... 48
- 第二节 电弧的物理基础..... 53
- 第三节 直流电弧及其熄灭..... 58
- 第四节 交流电弧及熄灭..... 61
- 第五节 灭弧装置..... 69

第四章 电接触..... 80

- 第一节 概 述..... 80
- 第二节 触头接触电阻及其影响因素..... 82
- 第三节 触头的发热..... 85
- 第四节 触头的电动力..... 87
- 第五节 触头的磨损..... 90
- 第六节 触头材料..... 93

第五章 电磁机构的计算..... 96

- 第一节 概 述..... 96
- 第二节 气隙磁导计算..... 97

第三节	直流磁路计算	102
第四节	交流磁路计算	109
第五节	电磁吸力计算与分析	114
第六节	电磁机构的动特性	122
第七节	永磁机构	132
第六章	机车电器	138
第一节	受电弓	138
第二节	主断路器	144
第三节	电流互感器和电压互感器	151
第四节	平波电抗器	156
第五节	电空接触器	160
第六节	司机控制器	168
第七章	自动电磁元件	176
第一节	概 述	176
第二节	饱和电抗器	181
第三节	自饱和磁放大器	192
第四节	直流电流互感器	201
第八章	典型牵引电器及其部件的设计计算	208
第一节	触头的设计计算	208
第二节	灭弧系统的设计计算	214
第三节	电磁铁的工程设计	221
第四节	互感器的设计与计算	229
参 考 文 献		244

绪 论

一、牵引电器的作用与分类

电传动机车车辆上所用的受流器、高压和低压断路器、熔断器、调压开关、互感器、电抗器、电阻和变阻器、牵引—制动转换开关、反向器、接触器、继电器、司机控制器、电压调节器等电气设备，统称为牵引电器。它们用以对牵引电动机、牵引发电机、电力传动装置、柴油机以及其它辅助电动机和机械等进行切换、控制、检测、调节和保护，使电传动机车车辆上的各种机组能正常和协调地工作，确保安全可靠地完成运输任务。

牵引电器的品种繁多，可按下列特征分类：

按所接入的电路分为主电路电器、辅助电路电器、控制电路电器、仪表和照明电路电器；

按用途分为通断电路的电器、控制电器、检测电器、保护电器、调节电器等；

按传动方式分为手动电器、电磁传动电器、电空传动电器、电动机传动电器等；

按电流种类分为直流电器、交流电器等；

按电压高低分为低压电器、高压电器等；

按执行机构的结构分为有触点电器、无触点电器和混合式电器等。

二、牵引电器的工作条件

牵引电器安装在电传动机车车辆上，运行于全国各地，工作条件较差，其特点是：

1. 要耐振动和冲击 例如机车车辆通过道岔或钢轨接缝时会产生振动，柴油机工作也产生振动。机车在起动和制动时（特别是紧急制动）会产生冲击。牵引电器在上述振动和冲击的条件下必须可靠工作。为此，设计牵引电器时要考虑其结构特点，例如运动部件的重心尽可能落在支点或转轴上，以免惯性力引起误动作，紧固件必须牢靠锁紧，以防松动等。

2. 温度和湿度变化范围大 为此，电器的金属表面应有可靠的保护层，以防氧化；绝缘材料及线圈等必须进行浸渍处理，以提高其绝缘性能和防腐蚀能力。

3. 要经受雨、雪、尘埃及油污的侵袭 例如安装在电力机车车顶上的受电弓和主断路器，常年受到太阳的暴晒以及雨、雪、灰尘的侵袭；安装在柴油机室的电器常受到油污的侵袭，工作环境的温度也很高（特别是在夏天），在这样恶劣的条件下应保证可靠工作。

4. 电压和电流的变化范围大 电力机车可能靠近牵引变电所附近运行，也可能在远离变电所的地方运行，牵引网压波动范围较大。内燃机车为了充分利用柴油机的功率，采用恒功率调节系统，主电路的电压和电流变化范围都较大，用于主电路的电器必须适应之。

5. 受安装地位的限制 为此，要求牵引电器体小质轻，结构紧凑，且便于安装，容易维修。

三、牵引电器发展简介

解放前我国基本上没有电器制造工业，更没有牵引电器制造业，仅在上海、大连等城市有小型的电车修理工厂，检修有轨电车上的电气设备。解放后，随着城市交通电气化、工矿电气运输以及铁道电力牵引事业的发展，牵引电器工业获得了一定的发展。50年代初期制造了工矿井下小功率电机车及蓄电池电机车，50年代末期研制了韶山₁型138t交流干线电力机车，60年代制造了露天矿山运输的80t、100t、150t直流工矿电机车，研制了韶山₂型交流干线电力机车，同时制造了城市无轨电车及地下铁道车辆。在“文革”期间我国的电气运输事业停滞不前。80年代以来电力牵引事业获得了蓬勃的发展，相继制造了韶山₃型、韶山₄型、韶山₅型、韶山₆型电力机车，并正在研制韶山₇型和韶山₈型电力机车。制造和改进东风₄型电传动内燃机车。工矿电机车、城市无轨电车、地下铁道车辆也运用直流斩波调速技术，并发展性能好、节能的新产品。

随着电力电子技术和微电子技术的发展，交流电力传动将取代直流电力传动，采用微机对电传动机车车辆进行控制、监视和故障诊断，相应地，牵引电器也将发生较大的变化和发展。

四、本课程的任务

本课程是电力牵引与传动控制专业的专业课程之一，其任务是学习牵引电器的基本理论，典型牵引电器的结构、工作原理和设计计算。通过课堂讲授、实验、实习和作业等教学环节，应达到下列要求：

1. 了解和掌握载流导体间的电动力计算和电器的热计算方法。了解电接触理论、电弧理论和熄弧方法。掌握电磁机构的磁路计算、电磁吸力计算和动特性计算方法。了解交、直流同时磁化铁心的基本原理和磁放大器的工作原理。
2. 熟悉典型牵引电器的结构、工作原理和特性参数。
3. 掌握典型牵引电器的设计计算方法。

第一章 电器的热计算基础

第一节 牵引电器零部件的发热温度极限

牵引电器在运行中会产生各种损耗，这些损耗转变为热能，其中一部分散发到周围介质中，另一部分加热电器的零部件，使其温度升高。

电器的零部件主要由导电材料，导磁材料和绝缘材料等制成。温度升高、发热持续时间过长，会使导电材料的机械强度下降。导电材料的机械强度还与温度升高速度有关。图 1—1 所示曲线 2 是冷拉铜线缓慢加热 2 h 的拉伸强度极限 σ 随温度 θ 的变化规律；曲线 1 为该铜线迅速加热 10 s 时的 $\sigma = f(\theta)$ 曲线。由两曲线可知，缓慢加热时温度在 100~300℃ 范围内铜线的拉伸强度极限 σ 迅速下降，而在迅速加热时，温度达到 200℃ 以上拉伸强度极限才迅速下降。在相同的拉伸强度极限下，例如 $\sigma = 350\text{MPa}$ 时，缓慢加热的温度为 180℃，而迅速加热的温度可达 300℃。这说明迅速加热、发热时间很短时电器零部件的发热温度极限比缓慢加热、发热持续时间很长时要高得多。因此，通常规定短路故障时电器零部件的发热温度极限比正常负载时要高得多。图 1—1 中的曲线 4 和曲线 3 分别表示铝线缓慢加热 2 h 和迅速加热 10 s 中的 $\sigma = f(\theta)$ 曲线。

触头温度升高会使其表面氧化加剧，氧化膜引起接触电阻增加，工作可靠性降低，甚至使触头熔焊而不能正常工作。特别是铜触头，氧化铜膜导电性能差，接触电阻增大，触头接触处发热加剧，导致进一步氧化的恶性循环。因此，铜触头的发热温度极限规定得很低。银触头虽然温度升高时也形成氧化银膜，但银氧化膜导电性能好，而且容易擦除。然而银触头的滑动摩擦力随温度升高而迅速增加，如图 1—2 所示。因此，银触头通常采用无滑动摩擦的结构，铜触头则需用滑动摩擦以清除触头表面的氧化铜。

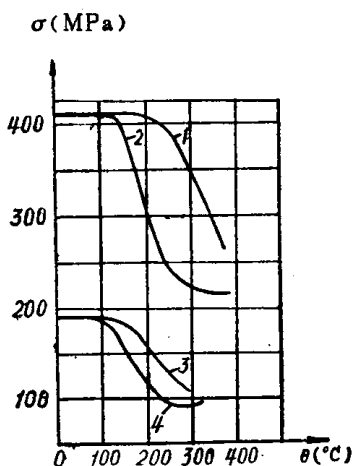


图 1—1 $\sigma = f(\theta)$ 特性曲线

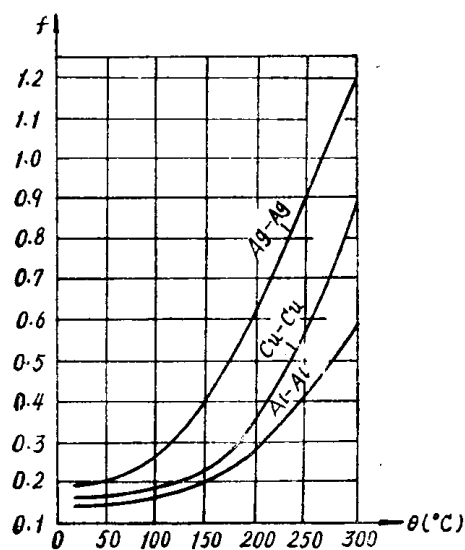


图 1—2 摩擦力与温度的关系

温度过高、发热持续时间过长会使导磁材料的机械强度下降，导磁性能变坏，特别当温

度超过其居里点时就会失去导磁性能。

绝缘材料的温度过高、发热持续时间过长会迅速老化，缩短使用寿命，甚至使介质损耗增加，发热更厉害，导致其介电强度下降，严重时引起击穿而损坏。

我国铁道部和机械电子工业部都颁发了牵引电器基本技术条件，规定了牵引电器在正常安装条件下（包括冷却条件），对电压线圈加以最大允许电压，对电流线圈、触头等导电零部件通以额定电流时，电器各零部件在最高周围空气温度下（+40℃）的发热温度极限列于表1—1。载流部件于短路状态下的发热温度极限列于表1—2。

牵引电器各零部件长期工作时的温度极限 表 1—1

项	零 部 件 名 称	材 质 和 型 式	发热温度极限 (℃)
1	发热温度不影响接触压力的触头	紫铜或铜合金触头	115
		银或银合金触头	以不损害相邻部件为限
2	发热温度影响接触压力的触头	磷青铜或弹簧钢片构成的簧片或夹形触头	75
		插接式、对接式或刷形铜质触头	75
		刀形开关铜质触头	90
3	用螺钉、铆钉紧固的导电连接	紫铜或黄铜	95
		紫铜或黄铜处镀锡	100
		铝质	80
4	单层电流线圈	铜质	145
5	软连接线	铜质镀（或搪）锡	130
6	电阻	康铜或类似的电阻带、丝	390
		铁铬铝或镍铬电阻带、丝	640
7	绝缘线圈及与绝缘材料接触的 金属零件	A级绝缘	120
		E级绝缘	135
		B级绝缘	145
		F级绝缘	170
		H级绝缘	195

注：（1）额定电压为3000V及以上的交流电器的发热温度极限按GB763-74《交流高压电器在长期工作时的发热》规定。
（2）单层电流线圈及电阻的发热温度极限以不损害相邻部件正常工作为限。

载流部件于短路故障时的温度极限 表 1—2

项	载流部件的名称和型式		发热温度极限 (℃)			
			铜	黄 铜	铝	钢
1	未绝缘的导体		300	300	200	400
2	包绝缘的导体	Y级	200	200	200	200
		A级	250	250	200	250
		B、C级	300	300	200	400

牵引电器各零 部 件 长 期正常工作时的温度不应该超过表1—1所规定的温度极限，否

则会降低工作可靠性, 缩短使用寿命, 甚至会烧损而导致严重故障。各零部件的工作温度也不应过低, 因为温度过低说明没有充分利用, 导致电器体积大、耗材多、成本高。因此, 热计算对于缩小体积、减轻重量、节省材料、降低成本以及提高工作可靠性、延长使用寿命等方面都具有重要意义。

第二节 电器的基本损耗 (热源)

电器在工作过程中, 电流通过导体产生电阻损耗, 铁磁体在交变磁场作用下产生磁滞和涡流损耗, 绝缘体在交变电场作用下产生介质损耗, 触头通断一定电流和电压的电路时产生高温电弧 (电弧电阻损耗), 电磁离合器工作时产生磨擦损耗, 各种缓冲和制动装置产生能耗等等。上述损耗变换为热能使电器发热。常见损耗是电阻损耗、磁滞和涡流损耗。对高压电器还应考虑介质损耗。

电器发热和散热的过程很复杂, 例如导体具有变截面结构时, 电流分布不均, 电阻损耗就难以准确计算。因此, 电器的热计算是近似计算, 计算结果应用实验来校核。

一、直流电流通过导体的电阻损耗

根据楞茨—焦耳定律, 直流电流通过导体的电阻损耗为:

$$W = \int_0^t I^2 R dt \quad (\text{J}) \quad (1-1)$$

式中 I ——通过导体的直流电流 (A);

R ——导体电阻 (Ω);

t ——通电时间 (s)。

对恒定电流和电阻, 则:

$$W = I^2 R t = I^2 \rho \frac{l}{S} t \quad (\text{J}) \quad (1-2)$$

式中 ρ ——导体材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$);

l ——导体长度 (m);

S ——导体截面积 (m^2)。

通常导体电阻随温度升高而增加, 即:

$$R = R_0 (1 + \alpha \theta + \beta \theta^2 + \dots) \quad (1-3)$$

式中 R_0 ——在 0°C 时的导体电阻 (Ω);

α 、 β ——电阻温度系数。

当铜导体 $\theta \leq 200^\circ\text{C}$, 铝导体 $\theta \leq 100^\circ\text{C}$, 镍铬合金电阻或铁铬铝电阻 $\theta \leq 1000^\circ\text{C}$ 时, 取式 (1-3) 的前两项, 即 $R = R_0 (1 + \alpha \theta)$, 其误差均小于 1%。

若导体为变截面, 由于电流分布不均, 计算电阻损耗就比较复杂。图 1-3 示出圆截面突变的导体, 通过理论分析可用下式计算其附加电阻 R_f :

$$R_f = \frac{\rho}{d} (1 - 1.41\xi + 0.34\xi^2 + 0.07\xi^5) \quad (1-4)$$

式中 ξ ——两直径之比, $\xi = d/D$;

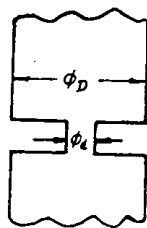


图 1-3 变截面圆导体

ρ ——导体材料的电阻率 ($\Omega \cdot m$)。

图 1—4 (a) 为矩形变截面导体, 可用图 1—4 (b) 所示经验曲线查得其附加电阻值。

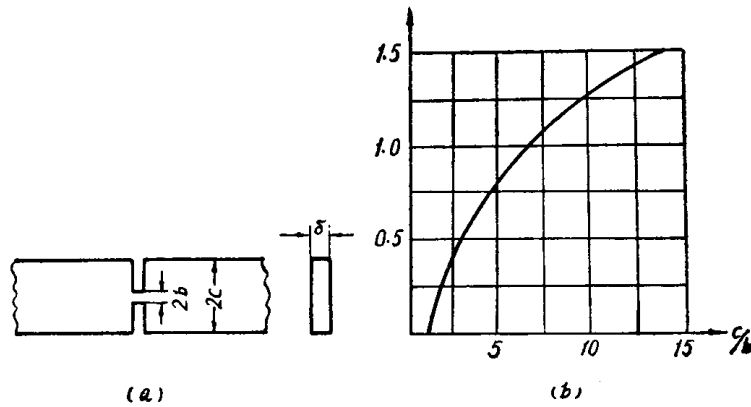


图 1—4 矩形变截面导体及其附加电阻特性
(a) 矩形变截面导体, (b) 附加电阻特性曲线。

二、交流电流通过导体的电阻损耗

交流电流通过导体建立交流磁通, 导体中心部分匝链的磁通较其表面部分多, 交变磁通感应电势和电流用以阻止原电流流通, 因而使导体中心部分电流密度减小, 导体表面部分电流密度增大, 产生所谓集肤效应。

当两导体平行且靠得较近时, 导体中的交流电流建立的交流磁通彼此耦合, 使导体截面中的电流分布不均, 产生所谓邻近效应。

1. 集肤效应

根据电磁场理论, 交流电流通过实心圆导体时, 导体外表面的电流密度为最大, 距导体表面深度为 x 处的电流密度 J 可用下式计算:

$$J = J_{\max} \frac{e^{-x/\Delta}}{\sqrt{1 - \frac{x}{r_0}}} \quad (A/m^2) \quad (1-5)$$

式中 $J_{\max}$ ——导体表面处的最大电流密度 (A/m^2);

r_0 ——导体半径 (m);

Δ ——电流等效透入深度 (m), 其物理意义是按实际电流分布与按最大电流密度 $J_{\max}$ 分布在厚 Δ 表层圆环中的热效应相同。

图 1—5 为电流密度沿深度 x 的分布曲线, 图中示出等效透入深度 Δ 。根据电磁场理论, Δ 可按下式计算:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \gamma}} \quad (m) \quad (1-6)$$

式中 f ——电流频率 (Hz);

μ_0 ——导体的磁导率 (H/m), $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$;

γ ——导体材料的电导率 ($1/\Omega \cdot m$)。

由式 (1—6) 可知, 等效透入深度 Δ 与频率 f 有关, f 越高, 集肤效应越强, 等效透入深度越浅。表 1—3 列出了铜导体在 $\theta=15^{\circ}\text{C}$ 、 $\gamma=6.05\times 10^{-7}1/\Omega\cdot\text{m}$ 时, 等效透入深度 Δ 与电流频率 f 的关系。

影响导体电流分布不均 (集肤效应) 的因素有电流频率、导体几何形状、导体的电导率与磁导率等。图 1—6 分别示出导体在不同频率时, 具有不同集肤效应的电流密度分布。频率越高[图 1—6 (c)], 集肤效应越强, 导体越得不到充分利用。

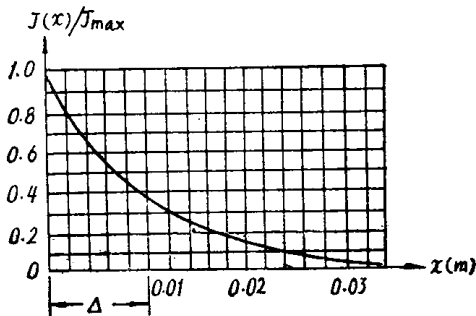


图 1—5 电流密度沿深度 x 的分布

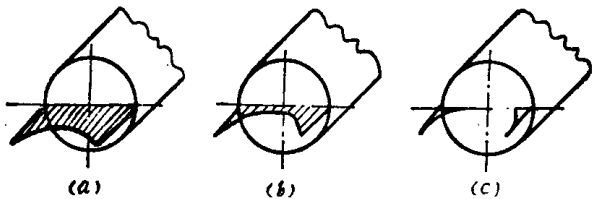


图 1—6 不同频率时, 导体中的电流分布
(a) 频率较低; (b) 频率适中; (c) 频率较高。

等效透入深度 Δ 与频率 f 的关系

表 1—3

f (Hz)	50	2×10^3	10×10^3	300×10^3
Δ (mm)	10.0	1.5	0.7	0.12

图 1—7 (a) 示出了正方形截面导体 ($76.2\times 76.2\text{mm}^2$) 的去线与回线相距 0.65m 时, 实际电流密度与平均电流密度之比的分布情况。图 1—7 (b) 为相对于总电流的相位分布情况。由图可知, 在导体截面的四个角处电流密度最大, 在导体截面的中央相位移最大。

交流电流通过导体时, 单位长度的电阻损耗功率 P_N 为:

$$P_N = \int_S j^2 \rho dS = I_N^2 R_N \text{ (W/m)} \tag{1—7}$$

式中 j —— 实际电流密度 (A/m^2);
 ρ —— 导体材料电阻率 ($\Omega\cdot\text{m}$);
 S —— 导体截面积 (m^2);
 I_N —— 交流电流有效值 (A);
 R_N —— 导体单位长度交流等效电阻 (Ω/m)。

直流电流通过导体时 (电流密度分布均匀) 单位长度的电阻损耗功率 P_s 为:

$$P_s = j_s^2 \rho S = I_s^2 R_s \text{ (W/m)} \tag{1—8}$$

式中 j_s —— 直流电流密度 (A/m^2), 它分布均匀;
 R_s —— 导体单位长度直流电阻 (Ω/m);
 I_s —— 直流电流 (A), 为便于比较, 取其值与交流电流有效值相同。

集肤效应的强弱可用集肤效应系数来衡量。集肤效应系数是指 P_N 与 P_s 之比, 即:

$$K_i = \frac{P_N}{P_s} = \frac{\int_S j_N^2 \rho dS}{j_s^2 \rho S} = \frac{I_N^2 R_N}{I_s^2 R_s} = \frac{R_N}{R_s} \tag{1—9}$$

导体集肤效应越强, 有效截面积越小, 等效电阻 R_N 越大, 集肤效应系数也越大。为了充分利用导体材料, 通常导体半径大于 25mm 时不宜采用实心线, 应采用空心线。

求集肤效应的解析法很困难，通常是在理论分析并经实践检验的基础上绘成曲线，以备查用。集肤效应与电流频率、导体形状和尺寸、导体材料等有关。图 1—8 绘出了实心铜导体的集肤效应系数 K_i 与 $\sqrt{f/R}$ 的关系曲线，其中 R 为铜导线 100m 长的电阻值。图 1—9(a) 为空心圆导体的 $K_i = F(\sqrt{f/R})$ 曲线，图 1—9(b) 为空心正方形导体的 $K_i = F(0.0081\sqrt{\frac{f}{\rho}(h-2\delta)}\delta)$ 曲线。图 1—10 为矩形母线的 $K_i = F(\sqrt{\frac{8\pi f S}{\rho}})$ 曲线。

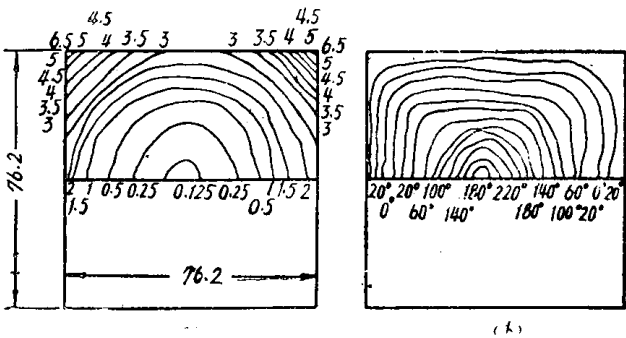


图 1—7 正方形截面导体电流密度及其相位分布
(a) 电流密度分布；(b) 相位分布。

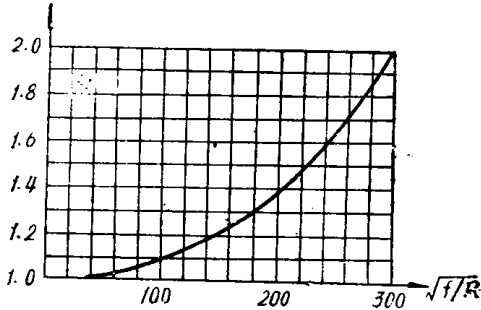


图 1—8 实心铜导线 $K_i = F(\sqrt{f/R})$ 曲线

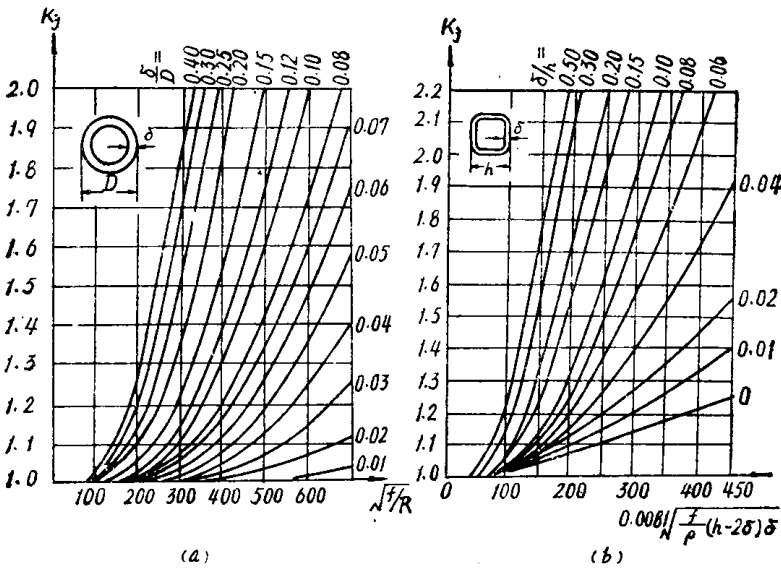


图 1—9 空心圆形和正方形导体的集肤效应系数

(a) 空心圆导体 $K_i = (F\sqrt{f/R})$ 曲线；

(b) 空心正方形导体 $K_i = F(0.0081\sqrt{\frac{f}{\rho}(h-2\delta)}\delta)$ 曲线。

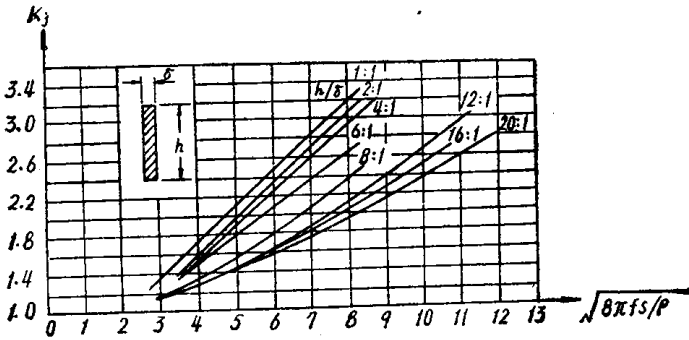


图 1—10 矩形母线 $K_i = F(\sqrt{\frac{8\pi f S}{\rho}})$ 曲线

2. 铁磁物质载流导体的集肤效应

铁磁性载流导体的导磁率是磁场强度的非线性函数, 如图 1—11 所示。由电磁场理论可知, 等效透入深度 Δ 与铁磁导体中的磁场强度有关。

当为强磁场时 ($H > H_{\mu_{max}}$):

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\omega \mu \gamma}} \text{ (cm)} \quad (1-10)$$

式中 ω —— 电流角频率;

μ —— 铁磁导体的磁导率 (H/m);

γ —— 铁磁导体的电导率 ($1/\Omega \cdot \text{m}$)。

当为弱磁场时 ($H \leq H_{\mu_{max}}$):

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \text{ (cm)} \quad (1-11)$$

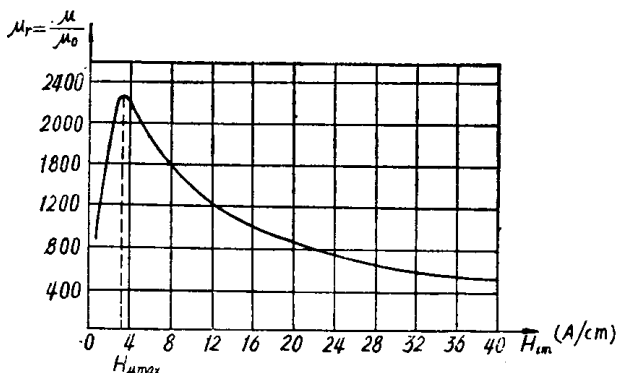


图 1—11 铁磁物质的 $\mu_r = f(H)$ 曲线

为了对透入深度有数量级的概念, 对工频 $f = 50 \text{ Hz}$, 铁磁导体的电阻率 $\rho = 14 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 取 $\mu = \mu_0 \mu_r = 1000 \mu_0$ 时, 透入深度 Δ 为:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\omega \mu \gamma}} = \frac{1}{\sqrt{2 \times 3.1416 \times 50 \times 1000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{1}{14 \times 10^{-8}}}} = 0.06 \text{ cm}$$

由此可知, 透入深度很浅, 集肤效应很强, 电流几乎在表面层通过。

当铁磁导体通过交流电流 (有效值为 I_N) 时, 根据电磁场理论可得每米长的电阻损耗功率 P_N :

$$P_N = H^2 l_c \sqrt{\omega \mu \rho} \text{ (W/m)} \quad (1-12)$$

式中 H —— 磁场强度的有效值 (A/m), 由全电流定律求得: $H = \frac{I_N}{l_c}$;

l_c —— 铁磁载导体周长 (m);

ω —— 交流电流角频率;

I_N —— 交流电流有效值 (A);

ρ —— 铁磁导体材料电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)。

每米铁磁导体的交流电阻 R_N 为:

$$R_N = \frac{1}{l_c} \sqrt{\omega \mu \rho} \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (1-13)$$

每米铁磁导体直流电阻 R_s 为:

$$R_s = \rho \frac{1}{S} \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (1-14)$$

式中 S —— 铁磁导体的截面积 (m^2)。

铁磁导体通过直流电流 I_s (其值与 I_N 相等) 时, 每米长的电阻损耗功率 P_s 为:

$$P_s = I_s^2 R_s = I_s^2 \rho \frac{1}{S} \text{ (W/m)} \quad (1-15)$$

集肤效应系数 K_i 为:

$$K_i = \frac{P_N}{P_s} = \frac{I_N^2 R_N}{I_s^2 R_s} = \frac{\frac{1}{l_c} \sqrt{\omega \mu \rho}}{\rho \frac{1}{S}} = \frac{S}{l_c} \sqrt{\omega \mu \gamma} \quad (1-16)$$

式中 γ ——铁磁导体电导率($1/\Omega \cdot m$), $\gamma = \frac{1}{\rho}$ 。

式(1—16)说明集肤效应系数与电流频率、铁磁导体的形状和尺寸、电导率和磁导率等有关。由于磁导率与电流有非线性关系,所以集肤效应系数也与电流有非线性关系。图1—12示出了交流损耗功率 P_N 、电流频率 f 、有效值 I_N 以及铁磁导体形状和尺寸等关系曲线 $\frac{P_N}{S\sqrt{f}} = F\left(\frac{I_N}{I_c}\right)$ 。这是两条上、下限试验曲线,试验条件为 $H > H_{\mu_{max}}$ 且铁磁导体截面壁厚大于两倍透入深度。

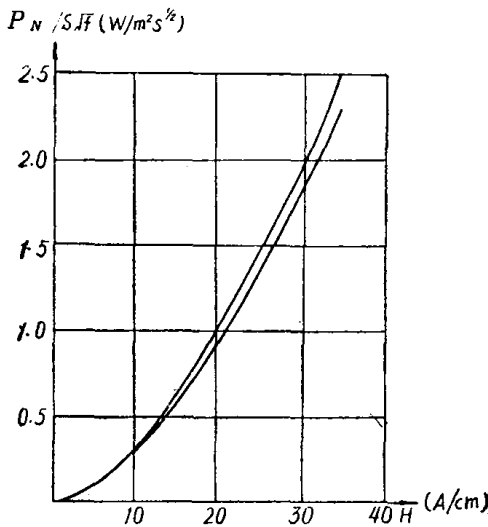


图1—12 铁磁导体的 $\frac{P_N}{S\sqrt{f}} = F\left(\frac{I_N}{I_c}\right)$ 曲线

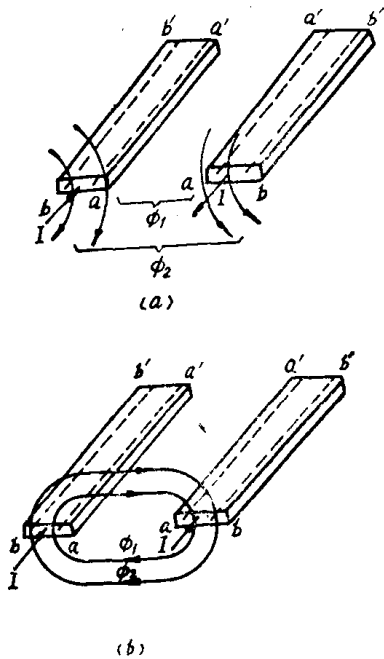


图1—13 两平行载流导体相互匝链磁通的情况
(a) 两导体电流方向相反;
(b) 两导体电流方向相同。

应当指出,采用铁磁圆导体时,为了减少集肤效应系数,可在圆导体纵向割槽。

3. 邻近效应

图1—13示出了两根相邻载流导体所建立的磁通相互作用的情况。其中图1—13(a)为两电流方向相反,图1—13(b)为两电流方向相同。任取导体中两条电流线 aa' 和 bb' 来观察,图1—13(a)中电流线 aa' 所匝链的磁通较 bb' 线少,产生的感应电势和电流小,在 aa' 处的电流密度大, bb' 处的电流密度小。图1—13(b)正好相反, aa' 线匝链磁通较 bb' 线多,感应电势和电流大, aa' 处电流密度小, bb' 处电流密度大。图1—14为两相邻载流导体考虑邻近效应时电流分布不均的情况。图中虚线为仅考虑集肤效应时的电流分布。

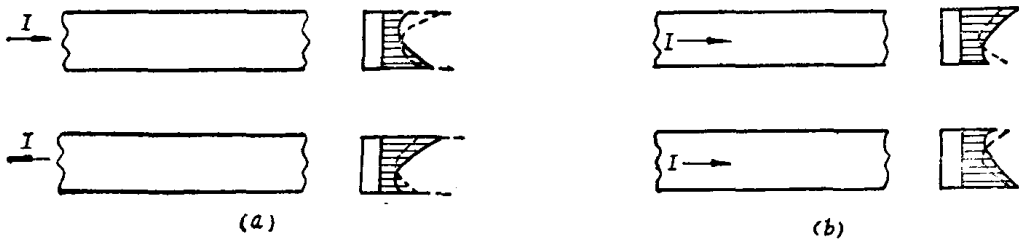


图1—14 两平行载流导体电流分布图
(a) 两导体电流方向相反, (b) 两导体电流方向相同。

邻近效应的强弱也可用邻近效应系数 K_l 来衡量。邻近效应系数也是 P_N 与 P_s 之比。 P_N 为仅考虑邻近效应时,交流电流通过单位长度的导体电阻损耗功率; P_s 为直流电流通过导

体时，单位长度的导体电阻损耗功率。

交流附加损耗系数 K_i 是集肤效应系数 K_s 与邻近效应系数 K_n 的乘积，即：

$$K_i = K_s \cdot K_n \quad (1-17)$$

集肤效应和邻近效应使电流分布不均，导体有效截面积减小，有效电阻增大。因此，附加损耗系数 K_i 总是大于1。单独考虑集肤效应时 K_s 也大于1。但邻近效应系数 K_n 可能小于1，例如两根长边平行，相距很近的矩形导体，由于邻近效应的作用补偿了集肤效应，改善了电流的分布，从而使 K_i 小于1。

邻近效应与电流频率、两导体间的距离、布置方式、导体形状和尺寸以及导体材料性质等有关。图1—15示出了短边平行的矩形母线邻近效应系数 K_n 与 $\sqrt{f/R}$ 的关系曲线族。图1—16示出了长边平行的矩形母线 K_n 系数与 $\sqrt{f/R}$ 间的关系曲线族，由图可知，邻近效应系数 K_n 小于1，说明邻近效应对集肤效应起补偿作用。

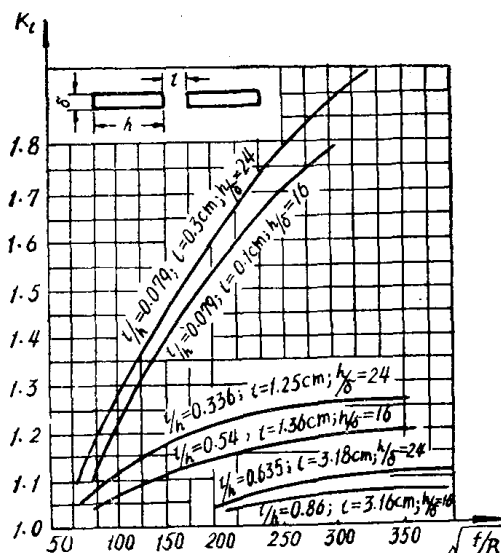


图1—15 K_n 与 $\sqrt{f/R}$ 的关系曲线族

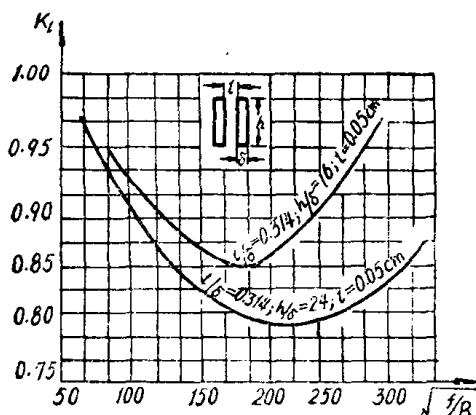


图1—16 K_n 与 $\sqrt{f/R}$ 的关系曲线族

三、磁滞、涡流损耗

载流导体穿过法兰、螺母等铁质零部件时，在铁质零部件中产生交变磁场，引起磁滞、涡流损耗，使其温度升高。准确计算铁损是非常复杂的，通常进行近似估算。首先近似计算铁质零部件的磁场强度 H ，由 H 查图1—12曲线1得 $P_N/S\sqrt{f}$ 值，其次计算铁质零部件的表面面积 S 及 $\sqrt{f}$ 值（ f 为电流频率），从而可求得铁损 P_N 的近似值。

交流电器中常采用硅钢片叠成导磁铁芯。铁芯中的磁滞、涡流损耗与电源频率、铁芯磁感应强度的幅值 B_m 等有关。通常是根据试验曲线近似计算铁芯中的铁损。图1—17为在工频50Hz供电频率下，每千克重硅钢片叠成的铁芯铁损与磁感应强度的关系曲线（试验曲线）。

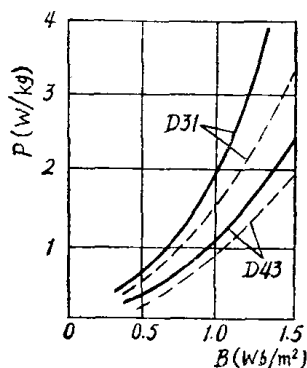


图1—17 硅钢片铁损与磁感应强度的关系
实线——硅钢片厚0.5mm，虚线——硅钢片厚0.35mm。