

# 金属软磁粉芯及其应用设计 (修改版)

中国武汉 陈氏磁业科技有限公司

陈一平 13808692877

**内容提要:** 文章对金属软磁粉芯及其主要特性作了简明的叙述, 并着重对金属软磁粉芯的应用及应用设计的方法、步骤进行了较为具体的描述, 并以具体的实例进行了说明。鉴于全国各地许多设计人员经常向我询问这方面的问题, 有的则干脆要我帮他们进行选材和设计计算, 故以此文章希望能对广大科技工作者有所帮助。

**关键词:** 金属软磁粉芯

## 一、金属软磁粉芯概述

在当今世界上各种科技领域中, 广泛使用的软磁材料有四大类别: 金属软磁材料、铁氧体软磁材料、非晶微晶软磁材料和金属软磁粉芯。所谓软磁材料是相对于硬磁或者永磁材料而言的, 所有的磁性材料都有一个共同的特性, 就是具有高的饱和磁感应强度。硬磁材料由于具有高的饱和磁感而具有高的磁能积; 而软磁材料由于具有高的饱和磁感因而具有高的导磁率。所不同的是硬磁材料被感应磁化了后, 由于矫顽力大磁性不能消失, 所以更确切的称之为永磁材料。软磁材料和永磁材料的区别就是其矫顽力极小, 也就是说当你给它一个磁化场时, 由于磁感应被磁化了具有磁性能。而当磁化场被去掉时, 其磁性能消失不具备有磁性, 这就是我们所说的软磁特性。所有的软磁材料的另一共同特性, 就是具有磁电转换的特殊功能。正是由于这一特性, 使得软磁材料在各个科技领域得到愈来愈广泛的应用。

金属软磁粉芯是第四代软磁材料, 它是用金属或合金软磁材料制成的粉末, 通过特殊的工艺生产出来的一种磁芯。对于金属软磁粉芯的称呼, 目前还是较为混乱不确切的: 如称为粉芯, 铁粉芯、磁粉芯、金属磁粉芯……。粉芯或磁粉芯顾名思义即为磁性粉末做的磁芯。钕铁硼是以合金粉末生产的磁芯, 但它是永磁材料。同样, 软磁铁氧体和硬磁铁氧体也都是磁性粉末生产的磁芯, 如果简单的把金属软磁粉芯看作是磁性粉末做的磁性材料的话, 这些材料都可以归作一类, 称作粉芯或磁粉芯。同样, 金属磁粉芯的称呼也是不确切的, 因为铝镍钴合金等永磁材料都可以制成粉末磁芯。所以, 我把它定义为金属软磁粉芯。这样称呼既确切、明确指明了它的软磁特性, 又不易与其他材料相混淆。

金属软磁粉芯目前主要包括铁粉芯、铁硅系磁粉芯、铁硅铝磁粉芯、高通量磁粉芯和钕坡莫磁粉芯五大系列。此外, 铁硅系的非晶磁粉芯也开始进入实用阶段。

铁粉芯 (iron cores) 是用高纯铁粉或羰基铁粉经配料、压制、涂覆生产的磁芯。由于生产工艺较其他几种简单, 原材料最便宜, 且具有较好的磁性能, 是四大系列金属



软磁粉芯中使用量最大、最为广泛的一种。从 $\mu e10$ 的-2材质铁粉芯到 $\mu e75$ 的-26、-52等各种材质的铁粉芯，适用于各种不同的使用场合。还有用铁氧体掺入适量做的复合铁粉芯，具有较高的导磁率，在某些使用场合可以弥补铁粉芯导磁率较低的缺陷。

铁硅系磁粉芯 (FS-MPC)，它主要是利用铁硅系软磁材料具有高的饱和磁感应强度 $B_s$ ，最高可达 1.5T，这在各系列金属软磁粉芯中是最高的。用于一体成型的铁硅系磁粉芯，其工艺和铁粉芯一样不用处理，较为简单。它不仅 $B_s$ 值较铁粉芯高，最主要是损耗比铁粉芯低，一般使用的铁硅系磁粉芯还是需要进行性能处理的。铁硅系磁粉芯主要为 Si 6.5%和 Si 3.5%两种合金成份。目前大量使用的铁硅系磁粉芯主要有 $\mu e60$ 和 $\mu e40$ 两性能档，一般在 100KHz 以下使用。近期，我们研发出一种高 $\mu e$ 值的铁硅系磁粉芯，具有较好的综合性能，即将推广使用。

铁硅铝磁粉芯 (sendust cores) 是用含铝 5.4%、硅 9.6%、其余为铁的合金制成的粉末生产出来的一种金属软磁粉芯。铁硅铝合金是二十世纪三十年代，由日本人增本亮和山本宏二人发明的。其发明地在日本仙台县，故又称为 Sendust 合金，它是一种较好的软磁材料。但由于其性能又硬又脆，无法加工，故作为一种金属软磁材料，它远不及各种坡莫合金那样使用广泛。铁硅铝磁粉芯开始由于其成型性能较差，使用并不多。近年由于镍价的飞涨，使得铁硅铝磁粉芯性价比优良这一特性突出出来，从而使其用量迅速超过了 MPP 磁粉芯，成为目前几种合金系列的软磁粉芯中使用量最大、最为广泛的一种。 $\mu e10 \sim \mu e147$  各种性能档的铁硅铝磁粉芯，凡是能取代 MPP 等的地方，就都可改用铁硅铝磁粉芯了。由于需求量大增，反过来又促使其生产工艺技术的改进及产品质量的提高。

高通量磁粉芯 (high flux cores) 是以 NiFe50 坡莫合金制成的粉末生产的，其最大特点是具有高的饱和磁通密度，可高达 1.3T 以上，导磁率从 $\mu e10 \sim \mu e160$ 的各种性能档磁芯都比其他两种合金系列的饱和值要高。由于这一特点，也使得在某些使用场合就非得用它不可了。

钼坡莫磁粉芯 (MPP cores) 是用 Ni81Mo2 坡莫合金粉末生产的一种金属软磁粉芯。在各大系列金属软磁粉芯中，又以钼坡莫磁粉芯的综合性能为最好。其导磁率可高达 $\mu e500$  以上。它是最具优良特性的金属软磁粉芯的典型代表。因此在三种合金系列产品中，它是最早获得广泛应用的。特别是在国防、军工产品和高科技产品上，要求比较好的材料时都会选用钼坡莫磁粉芯。

金属软磁粉芯主要以环形磁芯使用，从 $\Phi 3.6 \sim 77.8\text{mm}$ 的各种常用规格，在国际上已形成通用标准化的尺寸。铁粉芯最大规格达 $\Phi 130\text{mm}$ 。为了增大容量可以数只磁芯叠绕使用。除环形磁芯外，各种 U 型和 E 型的金属软磁粉芯在国内外也形成了标准化的统一规格。此外，还有拼装使用的条形磁芯。

## 二、金属软磁粉芯的一般特性



我们说过，每种新材料的出现，它都具有一些新的独特的优良特性。在软磁材料领域中，从金属软磁到铁氧体软磁、到非晶微晶软磁，进而到金属软磁粉芯，都是在不断发展进步，性能不断改善提高。金属软磁粉芯，它既保留了金属软磁和铁氧体软磁的一些优良特性，同时又最大限度的克服了二者的一些缺陷。到目前为止，在四大类别软磁材料中，是综合性能最好的一种软磁材料。其主要特性如下：

1、具有高的饱和磁感应强度，其中铁硅系磁粉芯和铁粉芯高达 1.5T，高通量可达 1.3T，连最低的 MPP 类磁芯也在 0.8T 左右。而目前工业上大量使用的铁氧体软磁，最高仅 0.4T 左右。在这一点上，它保留了金属软磁的优点，而远比铁氧体软磁为优。在设计中，对于实现大容量和小型化是具有适用意义的。

2、具有高的有效导磁率，这也是具有重要实用意义的。其中最简单价廉、物美的铁粉芯 T-26 材质，在 10kHz 下， $\mu_e$  为 75 左右。而 MPP 类最高  $\mu_e$  可达 500 左右。我们曾将 0.01mm 厚硬坡莫合金的 FeNiNbMoAl 合金超薄带分条，经电泳涂层卷芯处理后，其  $\mu_o$  达 16 万左右；而  $\mu_m$  高达 80 万以上。可是我们在 10kHz、1V. 下测试  $\mu_e$  仅 60 左右，且使用时还得视如宝贝，非得小心翼翼才行，否则性能损失下降就很厉害。而金属软磁粉芯则摔摔碰碰就无所谓了。

3、磁性能稳定性好，这是它优于其他类软磁材料的又一大优良特性。不管是频率特性、温度稳定性、还是时间稳定性上都是比较良好的。 $\mu_e 125$  的各类金属软磁粉芯，在 100KHz 以下使用时，其磁性稳定性非常好。而  $\mu_e 90$  的适于 100—150KHz 使用， $\mu_e 75$  在 150—250KHz 下使用， $\mu_e 60$  在 300—500KHz 下使用为好，500KHz 以上则使用  $\mu_e 26$  以下各类合金软磁粉芯为宜。各类合金系列软磁粉芯的温度系数在 500PPM 以下。在某些高要求下，可通过添加温度补偿合金，可使温度系数  $< 100$ PPM。而经过特殊老化处理及一定时间自然时效处理的金属软磁粉芯，更是具有极良好的时间稳定性，一般情况下，可保证  $\mu_e$  值长期几近不变。

4、损耗低，这也是它的一大优点。这种优良特性是以其特殊的生产工艺作保证的。而低损耗这是在各种使用情况下都是非常需要的，这也是其具有重要实用意义的又一大优点。

5、直流偏场稳定性好，这也是其优于其他类软磁材料的一重大优点。这种优点是由于它具有高的  $B_s$  值和低的损耗所致。我们研究中发现，随着使用频率的提高，损耗对 DC Bias 的影响有更为明显的作用。在实际应用中，这种交直流场同时存在的情况是非常普遍的。因此，人们也把这一特性作为衡量各种产品优劣的重要特性。

6、金属软磁粉芯还有一个最重要的特性，这也是其他各类软磁材料都不具备的特性，那就是其性能的可控性。也就是说，通过控制和改变生产工艺技术条件，可以获得能满足各种特殊使用场合，具有特殊性能的金属软磁粉芯材料，从而最大限度的满足了特殊场合的特殊要求。这一特性是具有极为重要使用意义的，这对于改进各种电子产品的性能和提高产品的质量，是具有极为重要实用意义的。这一特性的应用，在高科技领



域和国防军工领域更显得尤为重要。

金属软磁粉芯由于具有上述一些重要的优良特性，所以我们说它是一种最具良好综合性能的一种新型软磁材料，是前三代软磁材料中任何一种都是不可比拟的一种优良材料，具有极为重要的实用意义。我们利用金属软磁粉芯材料的这些优良特性，对于产品性能的改善，质量的提高，也都是具有非常重要的意义的，所有这一切可以总结为一点：那就是推进了人类社会的不断向前发展。

这里我特别要提到的就是金属软磁粉芯的第六大特性，即性能可控性问题，这是任何其他一类软磁材料都不具备的一个重要特性。上面我们提到过利用这一特性，我们可以获得具有各种特殊性能的金属软磁粉芯材料，从而可以最大限度的满足各种特殊场合的特殊要求，变不可能为可能，这其中的实用意义是多么重要啊！所有这一切都说明了人类的伟大。所以我们说，金属软磁粉芯的成功发明和应用在人类科技发展史上，是一项极为重要的科技成果。

### 三、金属软磁粉芯的应用

科学技术和社会的进步，对各个科技领域的发展提出了更高的要求。当今社会，高精度、高灵敏度和大容量、小型化是对各种电子产品提出的总要求和发展方向，这也是对广泛应用于各种电子产品中的软磁材料提出的要求和方向。金属软磁粉芯的应用和发展，也正是为了适应这种要求和发展的。

高精度和高灵敏度的要求二者是相一致的，并且是相辅相成的。如一台天平灵敏度越高其感量就越小；而感量越小，其分辨率就越高，也就是具有更高的测量精度了。为了达到高的精度和高灵敏度对软磁材料就提出了高导磁率、高磁性能稳定性和高一致性的要求。高有效导磁率和高磁性能稳定性这正是金属软磁粉芯优于其他软磁材料的特性。高的一致性对产品精度和灵敏度具有决定性的意义，如声纳的应用，离开了高精度和高灵敏度就失去了准头！而我们为了某军品延迟线圈磁芯要求，创造了 $\pm 0.125\%$ 高一致性批量供货的世界最先进水平。

同样，大容量和小型化二者也相一致和相辅相成的。它要求采用具有高的饱和磁通密度、高的导磁率和低的损耗。而这些特性也是金属软磁粉芯优于其他软磁材料的地方。

金属软磁粉芯由于具有优于其他软磁材料的一系列优良特性，从而被迅速广泛的应用于各个科技领域和工业领域。也由于金属软磁粉芯的应用，使得各种产品的性能得到改善，质量得到提高。促使社会和科学技术得到了发展和进步。

金属软磁粉芯主要以制作各种高性能电感元件用于各个科技领域的。各种高性能的电感元件用于各种控制、制导线路中，对于实现高精度、高灵敏度，大容量和小型化是多么重要！因此，在国防军工和尖端科技领域，金属软磁粉芯的应用是具有多么重大的意义。

金属软磁粉芯可以设计应用做成各种变压器，它们不仅能设计制造各种高性能的



小功率变压器，也可设计生产各种较大功率的高频功率变压器。近年，应有关单位要求，我们用铁硅铝磁粉芯设计了一种 60KW 的三相高频变压器，准备进行模拟实验成功后投入生产使用。金属软磁粉芯还可用于设计、生产制造各种高性能的电子元器件，如各种滤波器、电感器、互感器、扼流圈等等。这些性能优良的电子元器件，可以应用于各种磁电兼容系统而用于各科技领域和工业领域，也可直接用于各种电子产品上。因此，金属软磁粉芯不仅在各种电子产品上得到广泛应用，同时在飞机制造业、造船工业和汽车制造业等许多重要工业领域中都得到广泛的应用。在各种计算机、电脑、空调、彩电等家电产品及自动门控等各行业中都得到广泛的应用。

在各种电源及开关电源产品中，金属软磁粉芯广泛用作各种滤波电感、储能电感和稳流（扼流）电感。因此，在各种电源行业，金属软磁粉芯是具有重要使用意义的。各种通讯电源对于通讯产业的发展，具有决定性的意义，而作为构成各种电源模块的核心部件的金属软磁粉芯的合理选用，更是具有重要实际意义的。可以说，金属软磁粉芯在各种电源模块上的应用，促使整个通讯产业向前大大迈进了一步！武汉普天（原武汉 535 厂），原来是我国最大的通讯电源生产厂家，该厂 1993 年引进西班牙 100A 的赛特通讯电源模块技术，准备 1994 年 10 月 1 日拿出样机，11 月开订货会每台售价 1650 元，1995 年投入生产。可是其核心部件是  $\Phi 20.3\text{mm}$ 、 $\Phi 50.8\text{mm}$ 、 $\Phi 57.2\text{mm}$  三种规格的五只磁芯，若进口每付要 1300 余元。因此，要实现生产销售就必须国产化。武汉浩源磁材有限公司仅一个月时间，就为该厂解决了燃眉之急，保证了当年 10 月 1 日拿出了样机，而我们供货仅 327 元一副，只有进口产品的一个零头！

在上个世纪 90 年代以前，金属软磁粉芯在我国仅限于发射火箭、卫星等重大工程项目及少数军工产品上使用。直至上世纪末期的 90 年代，一方面是当时我国大力发展通讯产业的需要，如上面所说的武汉 535 厂等。另一方面是开关电源这一新的技术产品从 90 年代开始市场化并大量推广使用。这两个因素促使了金属软磁粉芯这一具有优良特性的软磁材料在我国开始逐步获得了大量使用。入世以后，我国逐步成为了世界上最大的电子元件的供应基地，对各种金属软磁粉芯的需求量更是大增。

进入本世纪初，金属软磁粉芯这种新一代的软磁材料才开始在我国各科技各领域和工业领域大量使用。于是，如何正确设计和合理选用各种金属软磁粉芯是摆在广大工程设计人员面前的一个急待解决的问题。此处仅就我与全国各地广大设计人员交流中的体会及所提出的问题，谈谈我的一点肤浅的看法，不当之处欢迎大家交流指正，以求共同提高。

#### 四、金属软磁粉芯应用设计的方法与步骤

##### 1、设计应用时应当考虑的主要技术参数及具体分析

我们在进行选材设计时，我认为应当考虑以下三个主要参数。也就是说，我们要以满足这三个技术参数作为我们应用设计的依据。



首先考虑的是功率要求或者具体的工作电流的大小。工作电流的大小，决定了使用导线的粗细，设计时一般取安全工作电流为  $3\sim 5\text{A}/\text{mm}^2$ 。在使用频率不高，或要求不太严格的情况下，计算导线截面积时取安全工作电流为  $4\sim 5\text{A}/\text{mm}^2$ ；频率较高时，或者在一些高技术产品及一些军品上，我们就只能取安全电流为  $3\text{A}/\text{mm}^2$ 。以此为依据，计算出符合工作电流的导线粗细。因为导线粗细涉及磁芯的大小，要绕同样的匝数，工作电流大，导线粗时就要用相应大些的磁芯。也就是说我们要选择的窗口面积要合适。另一方面工作的电流大小影响磁化场的大小，涉及对磁芯饱和磁感的要求。正常工作时磁芯的饱和值  $B_s$  一定要大于工作电流下计算出的磁化场。我们就依此计算出各种材质磁芯的饱和值来确定选择何种材质的磁芯。

第二个要考虑的主要技术参数就是工作频率的高低。前面已说了，工作频率的高低影响到使用的线径即磁芯规格。其次是各磁芯的磁性能是随着频率高低变化的，也就是说，同一磁芯为保证达到同一电感值，绕线匝数就要变化了。而频率不同最主要一点就是损耗的变化。频率越高，损耗越大，也就发热更严重。发热不仅使磁芯的性能稳定性变坏，严重的是会破坏绕线绝缘而使整个器件或线路破坏而导致不能正常工作。所以根据工作频率要求，选取适合该工作频率下正常工作的磁芯是非常重要的。这就要求一方面生产磁芯的厂家要保证你的产品质量，能在要求工作频率范围内能不发热，磁性能稳定性好。而设计人员就要熟悉各种材质磁芯的正常工作频率范围，从而根据不同工作频率要求选取合适的磁芯。如铁粉芯-26 材质一般适合  $10\text{KHz}$  以下工作，-52 材质一般在  $20\sim 30\text{KHz}$ 。电感系数要求较高、或要求电感值与-26 相近匝数不变时选用。其余-18、-40 的材质也可，电感系数略低、匝数稍多点。如频率再高就选用-33、-28 或更好点的-8 材质了。-8 材质和-2 材质可使用在几千赫兹乃至兆赫兹情况下。各种合金的金属软磁粉芯来说， $\mu e125$  的可使用在  $100\sim 200\text{KHz}$  以下； $\mu e90$  一般在  $200\text{KHz}$  左右使用； $\mu e75$  使用在  $200\sim 300\text{KHz}$  较合适， $\mu e60$  适合于  $300\sim 500\text{KHz}$  使用，而使用在  $500\text{KHz}$  以上乃至数十兆赫兹下，则选用  $\mu e26$  或  $\mu e10$  的合金粉芯，低  $\mu e$  值的合金软磁粉芯最高使用频率在  $30\text{MHz}$  以下。而三种合金粉芯来说，MPP 综合性能最好，如在  $300\sim 500\text{KHz}$  范围  $\mu e60$  都可用。但如工作频率  $400\text{KHz}$  以上或接近  $500\text{KHz}$ ，要求严格时我们就尽量选用  $\mu e60$  的 MPP 磁芯，而不能用其他两种材料了。又如在  $500\text{KHz}\sim 30\text{MHz}$ ，如要求不是很严，可选用价格较低的铁硅铝磁粉芯，而对某些要求很严的军品，在各种频率下，你就尽可能选用 MPP 类磁芯。

第三点就是工作时对磁性能要求，如对  $\mu e$  值、 $A_L$  值或一定匝数下的  $L$  值要求。如在  $\mu e75$  以下能用铁粉芯就尽量不要用较贵的合金磁芯了。又如工作频率在  $300\sim 500\text{KHz}$ ，而按要求计算出的磁化场下，磁芯要不饱和。你对照该磁化场下三种合金磁芯，只有高通量磁粉芯不饱和时，就必须选用  $\mu e60$  的高通量磁粉芯。

总之，在应用设计时，我们要根据上述三条使用的技术要求进行分析、计算、设计。据此，哪种磁芯能最好的满足上述要求就选用哪种磁芯。

## 2、应用设计时主要应用公式

上述分析在我们应用设计中，只能初步确定磁芯材质类别、系列及大致的磁芯性能档及规格。正确的设计还要根据计算、分析设计及复核计算等才能完成，所以设计计算是应用设计正确与否的重要步骤。在设计计算中，我们的公式均是把磁芯看作环形来计算的。

### (1) 有效导磁率公式

$$\mu_e = \frac{(D + d) \cdot L}{4 N^2 (D - d) \cdot h} \times 10^9$$

$\mu_e$ ——磁芯有效导磁率  
 $D$ ——磁芯外径 (cm, 厘米)  
 $d$ ——磁芯内径 (cm, 厘米)  
 $h$ ——磁芯高度 (cm, 厘米)  
 $N$ ——绕线匝数  
 $L$ —— $N$ 匝时测出电感值 (H, 亨)

由式：I) 知道  $\mu_e$  及磁芯尺寸可计算磁芯  $A_L$  值，从而可按要求的  $L$  值和  $A_L$  计算出要绕线的匝数。

II) 知道磁芯  $\mu_e$  值和所要求电感值及磁芯尺寸可计算出匝数。

III) 知道磁芯尺寸、电感要求及绕线匝数算出  $\mu_e$ ，可推算磁芯大致材质。

### (2) 磁化场公式

$$H = \frac{0.4 \pi I n}{\ell}$$

$I$ ——工作电流 (A, 安)       $n$ ——线圈匝数  
 $\ell$ ——平均磁路长度，环形磁芯即为平均周长 (cm, 厘米)

I) 计算  $H$  是为了选用何种磁芯在该磁化场下不饱和，可通过计算出的  $H$ ，查各种材质的磁芯的饱和磁化曲线即知，即将计算出的  $H$  与曲线  $B_s$  对应的  $H$  值，如果计算小于它即未饱和。如果超出就得重新设计。

II) 在材质定了的情况下，也可通过提高  $\mu_e$  减少  $N$ ，又或者增加磁芯尺寸来解决。

### (3) 电阻公式

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$$

$\rho$ ——导线电阻率 ( $\mu \Omega \cdot \text{cm}$ )       $\ell$ ——绕线总长 (cm, 厘米)  
 $S$ ——导线截面积 ( $\text{cm}^2$ )

在某些设计场合，对绕线阻值提出了要求。如果你的设计按此计算若阻值超出的话，就要重新计算设计了。在磁芯窗口面积足够的情况下，可直接增大绕线线径。否则就要增大磁芯尺寸，也可提高  $\mu_e$  减少匝数来解决。

### (4) 电感系数公式

$$A_L = \frac{L}{N^2}$$

$L$ ——电感值 (nH, 纳亨)       $N$ ——绕线匝数



I) 此式也是用来计算绕线匝数, 即当我们设计好磁芯尺寸及  $\mu_e$  值或  $A_L$  值, 当我们设定一匝数即可按此式计算出该  $N$  匝时的电感值是否符合要求, 否则要改变匝数。

II) 如果窗口面积不够绕下此匝数, 就须重新设计改变尺寸或提高  $\mu_e$  值。

(5) 在变压器设计中, 初级匝数的计算还要用到变压器公式。

$$V_{初}/N_{初}=V_{次}/N_{次}$$

$V$ ——电压, 初、次表示初级、次级

$N$ ——匝数, 初、次意思同上

(6) 变压器初级匝数粗略计算公式

$$N_{初} = \frac{V_{初} \cdot 10^8}{4f B_s S_c}$$

$V_{初}$ ——初级电压 (伏)

$f$ ——工作频率 (Hz)

$B_s$ ——磁芯饱和磁感 (Gs)

$S_c$ ——导磁截面积 (cm<sup>2</sup>)

设计时, 初级匝数只要大于按此式计算的匝数即可初步确定。

### 3、设计方法和步骤

前面在主要技术参数分析及主要公式运用中, 对这一问题已谈了很多了, 以下谈几个具体问题。

#### (1) 松绕系数及其应用

所谓松绕系数, 就是计算绕组每层匝数或窗口面积时, 是按导线真实粗细计算的。但实际绕制过程中是不可能绕得很紧的, 特别是粗的绕线更是如此。所以在设计计算时, 常常要引入松绕系数加以修正, 使计算更符合实际。松绕系数一般取 1.2 倍, 对于细而软的可取 1.1 倍, 而粗且硬的可取 1.3 倍。当你计算窗口面积时, 按计算还要乘以松绕系数的倍数即为实际所需。而当你计算每层能绕的匝数时, 计算的匝数必需除以松绕系数才是每层实际能绕下的匝数。

#### (2) 在计算每层可绕匝数及需绕层数和窗口面积复核时应考虑的问题:

I) 当环形磁芯时, 我们主要以内径来考虑, 每层绕线的每根绕线中心就组成了一个圆心圆, 这个圆心圆的直径为磁芯内径减去线径即是。用此直径即可求出其周长, 用此周长除以线径, 即为第一层可绕匝数。根据不同情况, 再除以松绕系数即为实际可绕匝数了。而第二层无需计算, 只比第一层少一匝。故可根据总的需绕匝数, 计算出绕线层数, 从而可判断是否可以绕得下了。

II) 环形磁芯我们可以如此进行设计计算, 其他磁芯如 EE、EI、UU、UI 等磁芯, 我们也都是把它们当作环形磁芯来计算的。

如 EE 和 EI 磁芯, 我们是可把它们看作是二个完全相等的方形磁芯叠绕使用。这时它们内、外周长可求出来了。进而把方形磁芯看作与其等周长的环形磁芯, 利用方形磁芯内、外周长就可求出该拟似环形磁芯的内外径了, 其高度与方形磁芯相等。于是我们



就可把 EE 和 EI 型磁芯按环形磁芯计算了。

同样 UU 和 UI 磁芯就更简单的可用环形磁芯的方法来进行设计计算了。

(3) 设计是否正确, 在设计计算完成后还要进行各种复核, 以验证设计正确与否, 如不行还要重新设计。

I) 窗口面积大小的复核, 绕线匝数面积是否能绕下, 绕线层数及是否好绕等等。

II) 计算磁化场, 以核定磁芯是否饱和。从而可以核定你选的材质与设计磁芯尺寸是否正确。如果饱和了, 你可以重新选择其他较高  $B_s$  值的磁芯。也可将磁芯增大使 AL 值提高以减少匝数。还可以选择相同体积的高  $\mu_e$  值的磁芯, 以达到减少匝数的目的。

III) 如果复核后绕组的阻值超过要求阻值大小时, 一是增粗线径, 这时有可能绕不下, 这就需要复核窗口面积是否够。如果不够其一是重新选择高的  $\mu_e$  值材质磁芯, 减少绕线匝数来解决。另一选择就是重新设计较大的磁芯了。

## 五、设计计算应用实例

例 1. 工作电流为 5A, 要求电感值  $41 \pm 10\% \mu H$ , 并且线圈阻值不超过  $1 \Omega$

(1) 根据工作电流选定  $\Phi 1.2\text{mm}$  的线径

(2) 根据电感值比较大的要求, 导磁率不能太低选定  $\mu_e 125$  的磁芯。

(3) 根据导磁率为  $\mu_e 125$  的要求只能从 CS、CM、CH 三种系列磁芯来考虑。由于无频率要求, 损耗又差别不太大可以不考虑。从价格考虑我们可推荐用铁硅铝磁粉芯。

(4) 选  $A_L = 127 \text{ nH/N}^2$  经计算绕 18 匝即可。有两种规格, 一是  $33 \times 20 \times 10.7$ , 另一种是  $18 \times 9 \times 8$ , 据要求先选  $18 \times 9 \times 8$  计算, 绕线线径为  $\Phi 1.2\text{mm}$ , 18 匝占绕圆周长为  $1 \times 18 \times 1.2 \approx 26\text{mm}$ , 其中后一个 1.2 为松绕系数。绕线层圆心圆直径为: 磁芯内径减线径, 减涂层厚  $9 - 1.2 - 0.8 = 7\text{mm}$ , 根据计算绕线层圆心圆的周长为  $22\text{mm}$ , 小于线 18 匝占的圆周长  $26\text{mm}$ , 需要绕两层: 第一层绕 13 匝、第二层绕余下的 5 匝, 说明可以绕下。

(5) 最后确定选择  $\mu_{cs} 180125$  磁芯, 用  $\Phi 1\text{mm}$  线绕 18 匝。

(6) 绕线阻值计算

每圈线长  $L_1$  按 1.2 的松绕系数和选定磁芯尺寸来计算:

$$L_1 = \left( \frac{D - d}{2} \times 2 + 0.8 \times 2 \right) \times 1.2 = (0.9 + 1.6) \times 1.2 = 3 \text{ cm}$$

绕线总长  $L_{\Sigma} = \text{绕 18 匝长} + \text{两线头总长} = 3 \times 18 + 2 \times 1 \approx 56\text{cm}$ , ( $2 \times 1$ ) 为绕线脚长。

绕圈  $\rho = 1.613 \mu \Omega \cdot \text{cm}$   $\Phi 1.2$  线面积为  $0.000113\text{cm}^2$

$$\text{计算 } R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 1.613 \times 10^{-6} \frac{56}{0.000113} = 0.8 \text{ 欧姆}$$

计算结果线圈阻值  $< 1 \Omega$  也符合要求。

至此, 选择设计完毕, 可以推荐使用了。

例 2. 做开关电源储能电感  $L = 13.5 \mu H$  工作电流 11A, 工作频率  $f = 150\text{KH}$ , 要求选用尽可



能价廉的磁芯。

(1) 根据工作电流在 11A 比较大, 工作频率  $f=150\text{KHz}$ , 也比较高这两项要求, 又要较便宜, 所以在三种合金系列的磁芯中我们选用了铁硅铝材质的  $\mu e60$  或  $\mu e75$  的磁芯。

(2) 按工作电流值为 11A, 根据导线安全电流负荷值  $1\text{mm}^2$  的线径约为 4A, 需  $3\text{mm}^2$  的导线, 为便于好绕选用  $0.25\text{mm}^2 \times 12$  的多股线, 其总截面积为  $3\text{mm}^2$  相当于  $\phi 2\text{mm}$  线径之截面积。

(3) 以要求电感值  $L=13.5 \mu\text{H}$  作为其下限值, 按产品说明如预选一种磁芯如我们选 cs236075, 表上可查出  $A_1=63\text{nH/N}^2$ , 尺寸为  $23.6 \times 14.5 \times 8.9$ , 由此我们可计算绕线匝数:

根据产品一致性为  $\pm 8\%$ , 电感中间值为  $13.5 \times 1.08 = 14.58 \mu\text{H}$ , 若绕 16 匝,

$$\text{电感 } l_{16 \text{ 匝下限}} = \frac{63 \times 16^2 \times 0.92}{1000} \approx 14.84 \mu\text{H} > 13.5 \mu\text{H}$$

可以。

(4) 复核是否绕得下:

我们把  $0.25\text{mm}^2 \times 12$  多股线看作  $\phi 2\text{mm}$  导线来计算: 圆心圆直径为  $14.5 - 0.8$  (漆层)  $- 2 = 11.7\text{mm}$ , 其周长为  $\pi d = \pi \times 11.7 \approx 36.7\text{mm}$ , 可绕匝数:  $36.7 \div 2 \div 1.2 \approx 15$  匝, 余一匝绕第二层, 可以绕下。

(5) 计算磁化场并对照饱和磁化曲线 (P11 图 24) 看是否饱和。

$$H = \frac{0.4 \pi I n}{\ell} = \frac{0.4 \pi I n}{\pi \left( \frac{D+d}{2} \right)} = \frac{0.4 \times 11 \times 16}{\frac{2.36 + 1.45}{2}} = \frac{70.4}{1.905} \approx 37 \text{ O}.$$

由产品目录磁化曲线图可知远未饱和。

例 3. 要求按下列技术条件设计一变压器:

W	60KW	f	40KHz
V <sub>初</sub>	500V	I <sub>初</sub>	120A
V <sub>次</sub>	70000V	I <sub>次</sub>	857mA

(一) 选定磁芯形状与材质

- 1、根据要求做变压器变压比较高  $\frac{70000}{500} = 140$  倍, 即根据变压器公式初次级匝数比为 1: 140, 总匝数较多;
  - 2、初级电流大为 120A, 要求线径较粗;
  - 3、根据以上两点: 匝数多、线径粗, 要求窗口面积大些且较好绕线, 所以初步确定用大的 UU 形磁芯。
  - 4、根据工作频率为 40KHz
- ① 适合此工作频率工作的铁粉芯如 -2、-8、-28、-33 等导磁率较低, 相对体积较

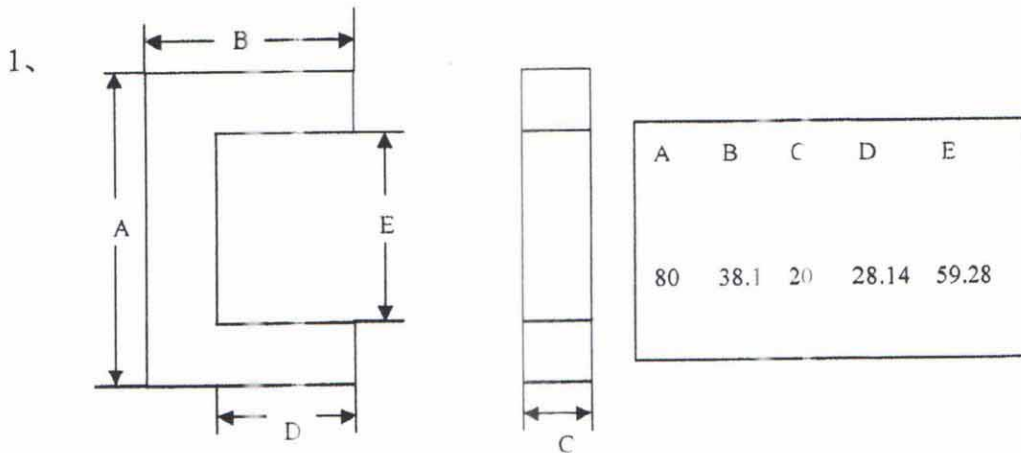


大不适合;

② 三种合金系列均可, 用CS系列最便宜;

③  $\mu_e$  确定为 60。虽然工作频率不是很高, 但功率较大, 初级工作电流达 120A, 故选  $\mu_e 60$ 。

(二) 根据以上分析, 我们设定用 CSUU800/20-060 磁芯



2、磁芯窗口面积:  $28.14 \times 2 \times 59.28 = 3336.3 \text{ mm}^2$

(三) 主次绕组导线截面积

1、初级匝数计算

初级匝数不宜太少, 但由于变压器比较大也不宜太多。

$$N_{\text{初}} = \frac{V_{\text{初}} \cdot 10^8}{4f B_s S_e}$$

其中:  $f=40000\text{Hz}$   $B_s \approx 8000\text{Gs}$  (由磁化曲线查出)

$S_e$  按设计磁心拟似环形磁心计算:

$$\Phi_{\text{外}} = \frac{2 \times 8 + 2 \times 2 \times 3.81}{\pi} \approx 9.95 \text{ cm}$$

$$\Phi_{\text{内}} = \frac{2 \times 5.928 + 2 \times 2 \times 2.814}{\pi} \approx 7.359 \text{ cm}$$

$$S_e = \frac{9.95 - 7.359}{2} \times 2 = 2.591 \text{ cm}^2$$

$$N_{\text{初}} = \frac{500 \times 10^8}{4 \times 40000 \times 8000 \times 2.591} \approx 16 \text{ 匝}$$

$N_{\text{初}} 16$  匝较少, 适当增加为  $N_{\text{初}}$  为 25 匝

2、初级绕组导线截面积:

① 工作电流 120A 安全电流按  $3\text{A}/\text{mm}^2$



初级总截面积  $120 \div 3 \times 25 = 1000 \text{ mm}^2$

② 选用  $\Phi 0.25\text{mm}$  多股护套线，护套厚  $1\text{mm}$ ，线径计算：

$$120 / 3 = 40 \text{ mm}^2 \text{ 每股 } \Phi 0.25\text{mm} \text{ 线截面积: } \frac{\pi \times 0.25^2}{4} \approx 0.05\text{mm}^2$$

i 股数： $40 / 0.05 = 800$  股，即用  $\Phi 0.25\text{mm}$  每 40 根绞成一股再将 20 根这种绞好线绞成一根并套上护套。

ii 多股护套线线径计算：

由于用多股线两次绞绕，每股截面积要乘以 1.2 倍松绕系数，所以线径为：

$$40 \times 1.2 = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad d = \sqrt{61.15} \approx 7.8\text{mm}$$

护套层在直径方向为  $2\text{mm}$ ，加上护套层与线间空隙，故护套线径取为  $\Phi 10\text{mm}$ 。

③ 实际初级绕组总面积：松绕系数为 1.2 倍， $\frac{\pi \times 10^2 \times 1.2}{4} \times 25 \approx 2356.2\text{mm}^2$

3、次级绕组总面积计算：

① 次级匝数  $T_s = 25 \times 140 = 3500$

② 线径：次级电流为  $0.857\text{A}$ ，取安全电流  $3\text{A}/\text{mm}^2$  则导线截面积为：

$$\frac{0.857}{3} \approx 0.286\text{mm}^2 \quad 0.286 = \frac{\pi d^2}{4} \quad d = \sqrt{\frac{0.286 \times 4}{\pi}} \approx \sqrt{0.364} \approx 0.6\text{mm}$$

③ 次级总面积：

仍取松绕系数为 1.2 倍

$$0.286 \times 1.2 \times 3500 = 1201.2\text{mm}^2$$

(四) 主次绕组总面积

$$2356.2 + 1201.2 = 3557.4 \text{ mm}^2$$

(五) 初级和次级绕组为便于绕线需窗口面积再增加 1.2 倍（一般 1.2~1.5 倍）

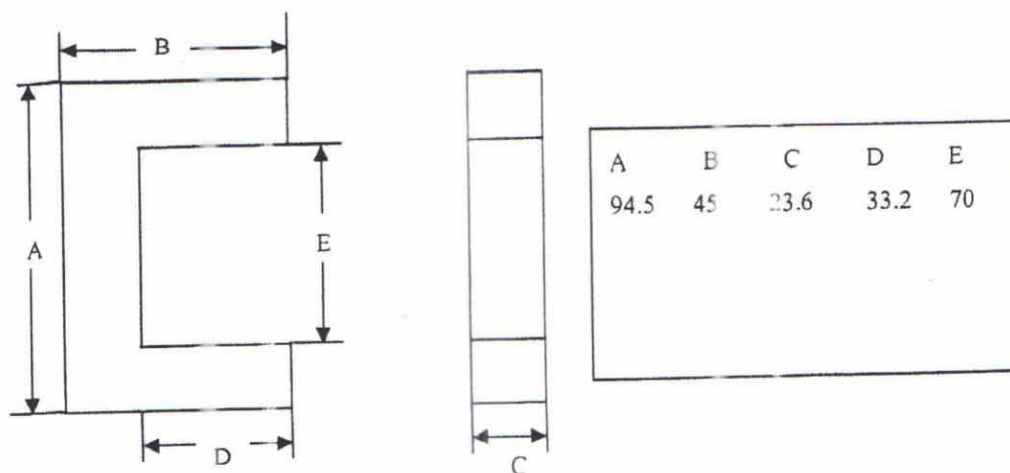
$$3557.4 \times 1.2 = 4269 \text{ mm}^2$$

(六) 根据计算原设计磁芯窗口面积不够需适当增大窗口面积重新设计磁芯

设： $E_1 = 70\text{mm}$  按原磁芯比例计算各部尺寸：

$$A_1 = \frac{80}{59.28} \times 70 \approx 94.5\text{mm} \quad B_1 = \frac{94.5}{80} \times 38.1 \approx 45\text{mm}$$

$$C_1 = \frac{70}{59.28} \times 20 = 23.6\text{mm} \quad D_1 = \frac{70}{59.28} \times 28.14 \approx 33.2\text{mm}$$



磁芯窗口面积:

$$2 \times 33.2 \times 70 = 4648 \text{ mm}^2$$

根据计算重新设计后磁芯窗口面积大于所要求的窗口面积, 即设计尺寸合理。

### (七) 是否饱和检定

$$H_1 = \frac{0.4\pi \times I \times n}{l}$$

$$l = \frac{(2 \times 94.5 + 2 \times 2 \times 45) + (2 \times 70 + 2 \times 2 \times 33.2)}{2}$$

$$= \frac{(189 + 180) + (140 + 132.8)}{2}$$

$$= \frac{641.8}{2}$$

$$= 320.9 \text{ mm}$$

$$= 32.09 \text{ cm}$$

$$H_1 = \frac{0.4\pi \times I \times n}{l} = \frac{0.4 \times \pi \times 120 \times 25}{32.09} \approx \frac{3770}{32.09} \approx 114 \text{ Oe}$$

$$H_2 = \frac{0.4\pi \times 0.857 \times 3000}{32.1} \approx \frac{3231}{32.1} \approx 120 \text{ Oe}$$

根据产品说明书铁硅铝磁芯饱和磁化曲线,  $\mu 60$  按曲线②, 其饱和磁化场接近 10000e, 现只 114~1200e, 所以由此知远未饱和。

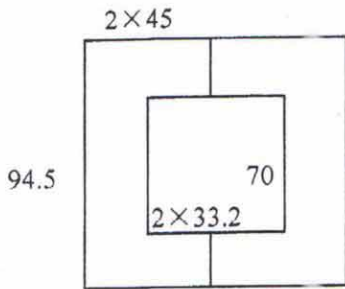
### (八) 磁芯表示方法及电感系数计算

1、型号标记方法: CSUU945/23.6-060

或 XCSUU945 × 450/23.6-60



## 2、拟似环形磁芯



①外圆周长及直径计算:

$$l_{\text{外}} = 2 \times 9.45 + 2 \times 2 \times 4.5 = 36.9 \text{ cm}$$

$$D = \frac{36.9}{\pi} \approx 11.75 \text{ cm}$$

② 内圆周长及直径计算:

$$l_{\text{内}} = 2 \times 7 + 2 \times 2 \times 3.32 = 27.28 \text{ cm}$$

$$d = \frac{27.28}{\pi} \approx 8.69 \text{ cm}$$

③高度: 2cm

④拟似圆形磁芯 117.5×86.8×20 XCS1175060

3、电感系数计算:根据计算的 AL 设计时可提出电感要求范围,生产者也可按此范围进行生产。

① 根据产品目录磁芯计算出  $\mu_e$  的具体数字 (按 50Ts)

如 CS640060 D=6.4cm d=4.0cm h=1.8cm  $A_L=99$

$$\begin{aligned} \text{如 } \mu_e &= \frac{(D+d)L}{(D-d)h} \times 10^5 = \frac{(6.4+4) \times 99 \times 50^2 \times 10^{-9}}{(6.4-4) \times 1.8} \times 10^5 \\ &= \frac{10.4 \times 99 \times 25}{2.4 \times 1.8} \times 10^{-2} \approx 59.6 \end{aligned}$$

② 根据计算出的  $\mu_e$  值 59.6 计算出 CSUU945/23.6-060 拟似圆形磁芯 CS1175060 117.5×86.8×20 的  $A_L$  值即是:

$$\begin{aligned} \mu_e &= \frac{(D+d)L}{(D-d)h} \times 10^5 \\ L &= \frac{(D-d) \times h \times \mu_e}{(D+d)} \times 10^{-5} = \frac{(11.75-8.69) \times 2.36 \times 59.6}{(11.75+8.69)} \times 10^{-5} \\ &= \frac{3.06 \times 2.36 \times 59.6}{20.44} \times 10^{-5} = \frac{420.4}{20.44} \times 10^{-5} \approx 21.0968 \times 10^{-5} \text{ H} \\ &= 210568 \text{ nH} \\ A_L &= 210568 \div 50^2 \approx 84.23 \text{ nH}/N^2 \end{aligned}$$