

团 体 标 准

T/CASME—XXXX

一体成型电感用金属软磁粉体材料

Metal Soft Magnetic Powder Material for Integrated Inductors

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 牌号及化学成分	2
5 一般要求	2
6 技术要求	3
7 检查和测量	4
8 包装、贮存、标志和质量证明书	6
9 异议	6
10 订货内容	7
附录 A（规范性） 金属软磁合金粉末的球形度和球形率	8
附录 B（规范性） 金属软磁合金粉末的磁化强度和矫顽力的测量方法	9
附录 C（规范性） 金属软磁合金粉末环形试样（磁粉心）磁性能的测量方法	13

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国中小企业协会提出并归口。

本文件起草单位：××××、××××、××××。

本文件主要起草人：××××、××××、××××。

一体成型电感用金属软磁粉体材料

1 范围

本文件规定了用羰基法、水雾化、气雾化或水气联合雾化工艺制造的金属软磁合金粉末的术语和定义、牌号及化学成分、一般要求、技术要求、检查和测量、包装、贮存、标志和质量证明书。

本文件适用于一体成型电感器件的材料选型与检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 223.6 钢铁及合金化学分析方法 中和滴定法测定硼量
- GB/T 1479.1 金属粉末 松装密度的测定 第1部分：漏斗法
- GB/T 2900.1 电工术语 基本术语
- GB/T 2900.60 电工术语 电磁学
- GB/T 3500 粉末冶金 术语
- GB/T 3658 软磁金属材料粉末冶金材料 20 Hz~100 kHz频率范围磁性能的环形试样测量方法
- GB/T 5161 金属粉末 有效密度的测定 液体浸透法
- GB/T 5162 金属粉末 振实密度的测定
- GB/T 5314 粉末冶金用粉末 取样方法
- GB/T 9637 电工术语 磁性材料与元件
- GB/T 11261 钢铁 氧含量的测定 脉冲加热惰性气熔融-红外线吸收法
- GB/T 15013 精密合金用磁学特性和磁学量术语
- GB/T 15019 快淬金属分类和牌号
- GB/T 15445.5 粒径分析结果的表述 第5部分：用对数正态概率分布进行粒度分析的计算方法
- GB/T 16418 颗粒系统术语
- GB/T 17505 钢及钢产品交货一般技术要求
- GB/T 19077 粒度分布 激光衍射法
- GB/T 19627 粒度分析 光子相关光谱法
- GB/T 21219 磁性材料 分类
- GB/T 21649.1 粒度分析 图像分析 第1部分：静态图像分析法
- GB/T 21649.2 粒度分析 图像分析 第2部分：动态图像分析法
- GB/T 24532 微米级羰基铁粉

3 术语和定义

GB/T 2900.1、GB/T 2900.60、GB/T 3500、GB/T 9637、GB/T 15013、GB/T 15019、GB/T 16418、GB/T 21219界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

金属软磁粉末 Metal soft magnetic powder

由羰基法或高温液态金属经冷却凝固而制备成的具有软磁性的粉末材料。

4 牌号及化学成分

4.1 金属软磁合金牌号及化学成分

金属软磁合金的牌号及化学成分如表1规定。如果需方有特殊化学成分需求，其化学成分可由需方与供方商讨。

表 1 金属软磁合金牌号的化学成分

金属软磁 合金牌号	化学成分（质量分数） %
FeSiCr(铁硅铬)	Fe _{bal} , Si1.0~6.5, Cr1.0~6.5, Mn、C、S等杂质<0.05%
FeSi(铁硅)	Fe _{bal} , Si1.0~8.0, Mn、C、S等杂质<0.05%
FeSiAl(铁硅铝)	Fe _{bal} , Si9.6; Al5.4（以及在此成份上略调整 Si、Al配比的合金），Mn、C、S等杂质<0.05%
CIP(羰基铁粉)	Fe _{bal} , N、C、O、S等杂质<1.0%
AM(非晶)	建议直接引用 GB/T 44655-2024
NC(纳米晶)	建议直接引用 GB/T 44655-2024

4.2 金属软磁合金粉末的牌号表示方法

金属软磁合金粉末的牌号采用英文字母与阿拉伯数字相结合的方法表示。

金属软磁合金粉末牌号由原粉主成分、各主成分重量含量及中位粒径表示，其中Fe的重量含量不标示，如：FeSi3.5Cr4.5-MD15，表示成份主成分为Si3.5wt.%，Cr4.5wt.%，其余是Fe，中位粒径为15um。

5 一般要求

5.1 生产工艺

金属软磁合金粉末的化学成分和生产工艺由供方决定。如果需方有特殊需求可由需方提出。

5.2 供货形式

5.2.1 金属软磁合金粉末烘干后避光封装，一般以真空袋装或袋装后加桶装封装的形式交货。

5.2.2 金属软磁合金粉末供货时粉末本体应无锈蚀、无氧化、无异物、无结块，包装袋或桶无损伤。

5.2.3 对金属软磁合金粉末交货形式的特殊要求可由供需双方协商确定。

5.3 交货条件

金属软磁合金粉末裸粉或钝化粉交货可由供需双方协商确定。

5.4 表面质量

5.4.1 金属软磁合金粉末表面不应有锈蚀、油脂、异物、结块以及连续可见的氧化现象。

5.4.2 金属软磁合金粉末表面允许有直径不大于需方要求的缺陷，空心粉、卫星粉、异形粉比例可由供需双方协商确定。

6 技术要求

6.1 金属软磁合金粉末化学成分

金属软磁合金粉末的化学成分以供需双方协定作为判定依据。

6.2 几何特性和偏差

6.2.1 粒径尺寸范围

金属软磁合金粉末按中位粒径 D_{50} 大小（单位为微米）判定，供需双方可依需求增加 D_{10} 及 D_{90} 要求。

6.2.2 外形

金属软磁合金粉末整体呈现出灰色、深灰色松散状颗粒群，外观质量应无明显结块，可参考GB/T 24532。

6.2.3 重量

金属软磁合金粉末按用户实际需求重量交货。

6.2.4 中位粒径和允许偏差

6.2.4.1 不同档次的金属软磁合金粉末的粒径分布和允许偏差应符合表2的规定。

6.2.4.2 金属软磁合金粉末的中位粒径和允许偏差应符合规定。特殊要求可由供需双方协商确定。

表2 金属软磁合金粉末的中位粒径和允许偏差

金属软磁合金粉末的粒径档次	中位粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$	允许偏差 μm
<MD5	$D_{50} < 5$	± 0.5
MD5~MD10	$5 \leq D_{50} < 10$	± 1.0
MD10~MD15	$10 \leq D_{50} < 15$	± 1.5
MD15~MD20	$15 \leq D_{50} < 20$	± 2
>MD20	$D_{50} \geq 20$	± 2

6.3 金属软磁合金粉末基本物理性能

以裸粉态或绝缘态交货的金属软磁合金粉末性能（形貌、粒径、松装密度、振实密度、氧含量、绝缘耐压等）与取样和制样方法、测量方法等因素有关。因此，供需方应先协商并在质量证明书中注明。

6.4 金属软磁合金粉末磁性能

金属软磁合金粉末的磁性能 (B_s , H_c , 磁导率, 损耗, 饱和等) 中 B_s 、 H_c 用供应商提供的粉末状态直接检测, 磁导率, 损耗及饱和特性与制样方法相关性很大, 供需方需先协商并确定制作参数及压制条件等。

注1: 饱和磁化强度 (B_s) 和矫顽力 (H_c) 的测量方法详见附录C。比总损耗 (P_v) 的测量方法详见附录C。

注2: H_c 可采用BH分析仪指定频率及 B_m 来确定, 饱和测试以1000e (约8000A/m) 或2000e (约16000A/m) 来判定。

6.5 技术特性

6.5.1 密度

用于计算金属软磁合金粉末磁性能的密度由供方提供。

6.5.2 形貌

金属软磁合金粉末颗粒形状无尖锐角, 颗粒表面光滑整洁, 粒度分布满足正态分布, 外观呈现出灰色、深灰色金属光泽, 无明显氧化色。

7 检查和测量

7.1 一般要求

7.1.1 金属软磁合金粉末应按批提交检查和测量。以生产商最终混料的重量为一批次。

7.1.2 根据需方要求, 并在合同中注明, 供方可通过增加取样和试验频次等方法检查金属软磁合金粉末质量一致性。

7.2 取样

7.2.1 每批金属软磁合金粉末所取份样组成的混合样应尽可能精确地代表该批次粉末, 分别在每一个容器中取出一份或多份的份样, 以组成总试样。如果在一批中包含装有不同数量粉末的容器时, 所选的容器应在该批次中有代表性, 由每一个选出的容器中所取份样的数量, 应与容器的装粉量成比例, 具体取样应符合 GB/T 5314 的规定。当一个中位粒径档次连续生产多个批次时, 应在每个批次随机取一个份样。特殊要求可由需方提出。

7.2.2 试样表面应清洁, 不应有因环境引起的氧化。

7.2.3 在每批次上取样时, 为了防止金属软磁合金粉末表面氧化或机械损伤等因素对测量结果的干扰, 取样应随机。

7.2.4 通过合理地安排测量次序, 同一试样可以用于测量多种特性。

7.3 测量方法

7.3.1 外观质量

目视检查, 观察粉末的颜色和均匀性, 是否存在团聚和结块现象。

7.3.2 颗粒形状

金属软磁合金粉末的形貌、球形度和球形率的测量方法有动态颗粒图像分析法和显微镜法, 供需双方可根据实际情况自行选择。球形度和球形率的定义详见附录A。

粉末球形度和球形率以一定数量的粉末颗粒的投影截面的圆形度测量值的平均值进行近似测量。用于测量球形度和球形率的试样制备，动态颗粒图像分析法应符合GB/T 21649.2的规定；显微镜法可参考YS/T 1297的规定进行测量。

7.3.3 化学成分

金属软磁合金粉末的检测元素数量一般按照金属软磁合金牌号规定的化学名义成分的元素数量进行检测。如有特殊要求，应按照供需双方合同执行。

7.3.4 微观结构

金属软磁合金粉末的微观结构应符合金属金属的微观结构特征，呈现金属态特征峰。其粉末试样的制备、分析步骤、测量及数据处理均参考JY/T 009的规定进行。

7.3.5 基本物理性能

金属软磁合金粉末的基本物理性能包括有效密度、氧含量、粒度及粒度分布、松装密度和振实密度等。

7.3.5.1 有效密度

用于测量有效密度的试样制备和测量方法应符合GB/T 5161的规定。

7.3.5.2 氧含量

用于测量氧含量的试样制备和测量方法应符合GB/T 11261的规定。

7.3.5.3 粒度及粒度分布

激光衍射法适用于所有金属粉末的粒度分布测量。用于金属软磁合金粉末的粒度分布测量的试样制备和测量方法应符合GB/T 19077、GB/T 15445.5、GB/T 19627的规定。

7.3.5.4 松装密度

测量松装密度时，能自由流过漏斗孔的金属软磁合金粉末的试样制备和测量方法应符合GB/T 1479.1的规定。不能通过漏斗孔的试样制备和测量松装密度测量方法应符合GB/T 1497.2的规定。

7.3.5.5 振实密度

用于测量振实密度的试样制备和测量方法应符合GB/T 5162的规定。

7.3.6 直流磁性能

7.3.6.1 饱和磁通密度

饱和磁通密度由饱和磁化强度和密度计算获得。用于测量饱和磁化强度的试样制备和测量方法应符合附录B.5的规定。

7.3.6.2 矫顽力

用于测量矫顽力的试样制备和测量方法应符合附录B.5的规定。

7.3.6.3 交流磁性能

用于测量交流磁性能的试样采用环形试样（磁粉心）进行测量。环形试样（磁粉心）是将金属软磁合金粉末压制成型，然后采用供方推荐的制度进行热处理。用于测量比总损耗的环形试样（磁粉心）的制备和测量方法应符合附录C的规定。

7.4 复检与判定规则

若某一检验项目不合格时，允许取双倍数量的试样进行复验。复验结果如有一个不合格，则该批金属软磁合金粉末判为不合格。

8 包装、贮存、标志和质量证明书

8.1 包装

金属软磁合金粉末应采用真空、避光包装，保证金属软磁合金粉末在未开箱条件下6个月内不发生因增氧、锈蚀导致的质量退化。金属软磁合金粉末应装入真空袋或真空桶中且保证粉末不能窜动。包装应便于机械搬运，应保证金属软磁合金粉末在贮存和运输过程中不损坏，应符合GB/T 17505的规定。

8.2 贮存

包装后的金属软磁合金粉末应贮存在干燥通风、避光的环境中，避免在潮湿、有腐蚀性气体、光直射的环境中存放。

8.3 标志

金属软磁合金粉末的包装箱上均应标有牢固的、满足可追溯性要求的标识。

8.4 质量证明书

每批交货的金属软磁合金粉末应附有证明该批金属软磁合金粉末符合本部分规定及订货合同的质量证明书。质量证明书应包含以下内容：

- a) 供方名称；
- b) 需方名称；
- c) 合同号；
- d) 产品名称与牌号；
- e) 执行标准；
- f) 规格；
- g) 重量或数量；
- h) 生产批号；
- i) 本批次技术要求中所规定的各项指标；
- j) 供方需提供的信息(如密度、晶化温度等)；
- k) 需方要求提供的其他信息；
- l) 供方有关部门的印记；
- m) 发货日期或生产日期。

9 异议

关于金属软磁合金粉末产品的异议条款和条件应符合GB/T 17505的规定，也可由供需双方协商确定。

10 订货内容

按本标准订货的合同或订单应包括以下内容：

- a) 本批次产品牌号；
- b) 执行标准；
- c) 规格；
- d) 重量（或数量）；
- e) 性能要求；
- f) 由供需双方协商，并在合同中注明的项目或指标。

附录 A

(规范性)

金属软磁合金粉末的球形度和球形率

金属软磁合金粉末表面允许有直径不大于需方要求的缺陷,但粉末颗粒一般为球形或类球形状,其球形度和球形率的测定按 GB/T 37406 和 YS/T 1491 的规定进行,球形度高于 0.80 定义为球形和类球形。

A.1 球形度 degree of sphericity

粉末颗粒的最大截面积等效圆直径与最大截面积周长等效圆直径的比值。

注:等效圆直径符合 GB/T 21649.1-2008 的术语定义。

A.2 球形率 ratio of sphericity

球形粉末颗粒总数占测试粉末总颗粒数的比率。

A.3 粉末球形度

粉末球形度计算公式表示为:

$$Q = \frac{2\sqrt{\pi S}}{L} \quad \dots\dots\dots(A.1)$$

式中:

S ——颗粒最大截面的面积,单位为平方微米 (μm^2);

L ——颗粒最大截面的周长,单位为微米 (μm);

Π ——圆周率。

A.4 粉末球形率

粉末球形度 $Q \geq 0.80$ 的颗粒数量记为 N_Q ,粉末球形率 R 计算公式为:

$$R = \frac{N_Q}{N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(A.2)$$

式中:

N_Q ——球形粉末颗粒总数;

N ——粉末总颗粒数。

附录 B

(规范性)

金属软磁合金粉末的磁化强度和矫顽力的测量方法

B.1 测量通则

金属软磁合金粉末的饱和磁通密度 (B_s) 是在给定温度下和给定外加磁场中被磁化时所能够达到的最大磁化强度, 反应其磁性强弱程度的物理量, 应选用合适的方法和仪器进行测量, 参考 HG/T 2347.2。

B.1.1 磁化强度

磁化强度为矢量, 在准无限小体积区域内给定点上, 等于改区域内包含物质的磁矩除以体积, 应符合 GB/T 2900.60 的规定。

可表示为:

$$M = \frac{m}{V} \quad \text{.....(C.1)}$$

式中:

M ——磁化强度, 单位为安培每米 (A/m);

V ——体积, 单位为立方米 (m^3);

m ——磁矩, 单位为安培平方米 ($\text{A} \cdot \text{m}^2$)。

也可表示为:

$$M = Nm \quad \text{.....(C.2)}$$

式中:

M ——磁化强度, 单位安培每米 (A/m);

N ——单位体积内磁矩的总数, 单位 (m^{-3});

m ——磁矩, 单位安培平方米 ($\text{A} \cdot \text{m}^2$)。

在给定温度下, 材料达到的磁化强度最大值 M_s , 单位为安培每米, 符号 A/m。

B.1.2 磁通密度 (磁感应强度)

一种无散轴向矢量, 它在空间任何一点上都定义该点磁场。在实际应用中, 通常将穿过均匀磁化的磁体单位横截面积的磁通量称为磁通密度 B 。单位为特斯拉, 符号 T。

可表示为:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad \text{.....(C.3)}$$

式中:

B ——磁通密度, 单位为特斯拉 (T);

Φ ——磁通量, 单位为韦伯 (Wb);

A ——磁体的横截面积, 单位为平方米 (m^2)。

磁性材料磁化到饱和时的磁通密度为饱和磁通密度 (磁感应强度) B_s , 单位为特斯拉, 符号为 T。

B.1.3 磁场强度

是与磁场中任一点的磁通密度有关的轴矢量, 在磁化强度为 M 的磁性物体中。

可表示为：

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

磁场强度峰值表示为

$$H = nI \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中：

μ_0 ——磁常数，单位为亨利每米（H/m）， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m；

n ——单位长度的匝数，单位为匝每米（m⁻¹）；

I ——磁化电流峰值，单位为安培（A）；

H ——磁场强度，单位为安培每米（A/m）；

M ——磁化强度，单位为安培每米（A/m）；

B ——磁通密度，单位为特斯拉（T）。

B.1.4 矫顽力

对应于磁通密度（磁化强度）为零的磁场强度值 H_c ，单位为安培每米，符号为 A/m。常用 M-H 磁滞回线中的 H_c 。

B.2 测量方法

根据电磁感应，测量粉末样品内部或粉末样品周围的磁通量来确定 M_s 值。磁介质中的磁通密度 B 与磁场强度 H 及磁化强度 M 之间的普遍关系式为：

$$B = \mu_0 (H + M) \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

式中：

μ_0 ——磁常数，单位为亨利每米（H/m）， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m；

B ——磁通密度，单位为特斯拉（T）；

H ——磁场强度，单位为安培每米（A/m）；

M ——磁化强度，单位为安培每米（A/m）。

当样品磁化到饱和状态时为：

$$B_s = \mu_0 (H_m + M_s) \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中：

μ_0 ——磁常数，单位为亨利每米（H/m）， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m；

B_s ——饱和磁通密度，单位为特斯拉（T）；

H_m ——最大磁场强度，单位为安培每米（A/m）；

M_s ——饱和磁化强度，单位安培每米（A/m）。

B.3 测量仪器

金属软磁合金粉末的饱和磁化磁通强度（ B_s ）和矫顽力（ H ）采用振动样品磁强计来测量。（建议： H_c 可采用BH分析仪指定频率及 B_m 来确定）

B.4 测量条件

B.4.1 测量环境条件

测量时周围环境不得有强磁场以及其他强电干扰。
测量环境温度 15~30 ℃；测量环境相对湿度小于 75%。

B.4.2 测量磁场条件

测量磁化场应不小于 1 T 或不小于 800 kA/m。

B.5 振动样品磁强计测量方法

B.5.1 测量原理

振动样品磁强计记录的是不同磁场下的磁化强度值。外加磁场的大小由霍尔探头测量。磁化强度获得的原理是：小尺寸样品如粉末或块体被磁场磁化，并通过驱动系统使样品在外加磁场中按一定方式振动，放置在样品附近的检测线圈内就有磁通量的变化，产生正比于磁化强度或磁矩 m 的感应电动势 μ_s ，该电动势经过电路放大，计算机处理输出所需的磁化强度。

B.5.2 测量设备要求

- a) 磁场精度：仪器磁场精确性为不大于读数的 3%，或者全量程的 $\pm 0.15\%$ 。磁场分辨率不大于 5 A/m。
- b) 纯金属镍标样：纯度 99.995%，温度 23 ℃，密度 8.90 g/cm³，比饱和磁化强度 54.56 A·m²/kg。
- c) 天平：读数精度 0.1 mg，最大负荷为 200 g。

B.5.3 试样制备

a) 方法一：将金属软磁合金粉末经过 $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 下干燥 2 h 后冷却至室温。称量质量 m 为 5~10 mg 的粉末，制备成直径小于 2 mm 的圆片状固定在样品杯底部。

b) 方法二：将金属软磁合金粉末经过 $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 下干燥 2 h 后冷却至室温。先称量空样品杯质量为 m_1 ；将 5~10 mg 粉末装入样品杯底部，轻轻敲打振实，再称量装有粉末样品的样品杯为 m_2 ，准确到 0.1 mg。

金属软磁合金粉末试样质量为 m ，表示为：

$$m = m_1 - m_2 \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

式中：

- m_1 ——样品杯质量，单位为克（g）；
- m_2 ——装有粉末试样的样品杯质量，单位为克（g）；
- m ——粉末试样质量，单位为克（g）。

B.5.4 测量步骤

B.5.4.1 仪器预热

测量之前应打开振动样品磁强计，预热 2 小时以上。

B.5.4.2 仪器校准

- a) 无样单点；
- b) 纯金属镍标样校准，按仪器说明方法校准；
- c) 检查校准结果。

B.5.4.3 饱和磁化强度测量

被测量粉末试样固定在样品杆上使其振动，加磁场到粉末试样饱和，测出饱和磁化强度。

B.5.4.4 矫顽力测量

被测粉末试样固定在样品杆上使其振动，调节电磁铁线圈电流，加磁场到试样饱和，单调减小磁化场至零，再加反向磁场使得磁化强度为零，读出此时磁场强度为矫顽力 H_c 的值。

附录 C

(规范性)

金属软磁合金粉末环形试样（磁粉心）磁性能的测量方法

C.1 磁性能测量通则

金属软磁合金粉末环形试样（磁粉心）磁性能的测量应符合 GB/T 3658 的规定。

C.1.1 环形试样方法原理

通过环形试样构建的闭合磁路和绕在其上的两个绕组形成一个空载的变压器进行测量。

C.1.2 试样

试样应为横截面为矩形的环形试样，可通过粉末绝缘包覆，压制成型，热处理等工序制取。

对于粉末材料，通过压制（可加热）制作成环形试样，应按照材料供应方的建议进行，以达到金属软磁合金粉末的最佳磁性能。

对于粉末压制材料，应采用合适的并经过校准的量具测量试样的尺寸，即环形试样的外径、内径以及高度，量具的准确度应为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 或更优。相关尺寸应在试样的不同位置测量并计算平均值得到。

试样的横截面积应按式 (D.1) 计算：

$$A_e = \frac{(D-d)}{2} h \quad \text{.....(D.1)}$$

式中：

A_e ——试样的横截面积，单位为平方米 (m^2)；

D ——试样的外径，单位为米 (m)；

d ——试样的内径，单位为米 (m)；

h ——试样的高度，单位为米 (m)。

对于磁场强度计算所需的试样有效磁路长度按式 (D.2) 确定：

$$l_m = \pi \frac{(D+d)}{2} \quad \text{.....(D.2)}$$

式中：

l_m ——试样的有效磁路长度，单位为米 (m)。

C.1.3 绕组

试样上绕有一初级绕组和一次级绕组。

绕组的匝数取决于所使用的测量设备和方法。次级绕组应紧密地绕在试样上，以减小绕组下空气间隙的影响。所有绕组应均匀地绕在试样的整个周长上。

对于频率高于工频的测量，应注意避免电容和其他效应相关的影响。

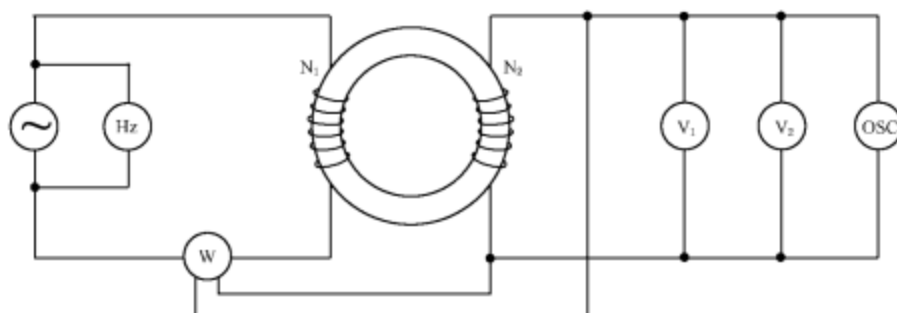
应注意确保在绕线过程中不要损坏电线的绝缘，避免绕线与试样短路。应采用合适的绝缘电阻测量仪进行电气检查，确保绕组与试样之间绝缘性能良好。

C.2 用功率表法测量比总损耗

C.2.1 测量原理

除了用环样代替爱泼斯坦方圈，测量原理与 GB/T 3655 描述的内容相似，使用的仪器应能在需要的频率下进行测量。比总损耗的测量应在正弦磁通密度的条件下进行。对某些试样，可通过模拟或数字技术的方法控制次级感应电压的波形，以确保维持磁通密度的正弦波形。

装置与试样上的绕组应按图 D.1 的电路进行连接。



标引符号说明：

~ ——电源；

Hz ——频率计；

N_1 ——初级绕组；

N_2 ——次级绕组；

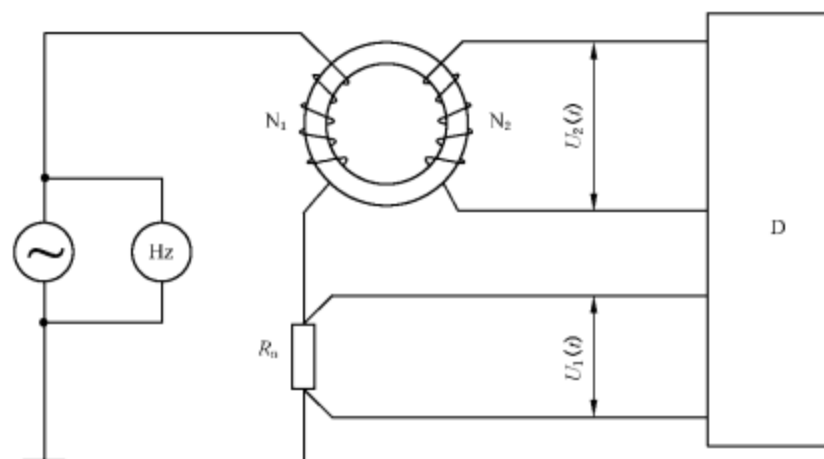
OSC——示波器；

V_1 ——平均值电压表；

V_2 ——有效值电压表；

W ——功率表。

图 D.1 功率表法的电路示意图



标引符号说明：

~——电源；

H_z ——频率计；

N_1 ——初级绕组；

N_2 ——次级绕组；

R_e ——测定磁化电流与磁化绕组串联的无感精密电阻；

D ——数字采样器（通常为数字功率分析器或数字采样系统和计算机）。

图 D.2 采用数字采样技术的功率表法的电路示意图

G.2.2 比总损耗的测定

试样的总损耗（ P ）应按式（D.3）计算：

$$P = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{U_2^2}{R_i} \quad \text{.....(D.3)}$$

式中：

P ——计算得到的试样总损耗，单位为瓦特（W）；

P_m ——功率表测得的功率，单位为瓦特（W）；

N_1 ——初级绕组的匝数；

N_2 ——次级绕组的匝数；

U_2 ——次级感应电压的有效值，单位为瓦特（W）；

R_i ——与次级绕组连接的仪表总等效电阻，单位为欧姆（ Ω ）。

比总损耗 P_v 由 P 除以试样质量得到，见式（D.4）：

$$P_v = \frac{P}{m} \quad \text{.....(D.4)}$$

式中：

P_v ——试样的比总损耗，单位为瓦特每千克（W/kg）；

m ——试样的质量，单位为千克（kg）。