

物理实验



铁磁材料的磁化曲线及磁滞回线*

邹声奇 伍家驹 陈亮亮

(南昌航空大学信息工程学院 江西南昌 330000)

(收稿日期:2020-11-17)

摘要:铁磁材料在日常生活及工业制造中应用广泛,尤其在电机、变压器和电感器的制造中,有着不可替代的作用.铁磁质的磁化特性常由磁滞回线、磁化曲线和磁导率曲线来表达,然而所用曲线横纵坐标值的含义却是不一样的,容易产生歧义,给教学、科研和工程设计带来许多困扰.对磁滞回线、磁化曲线和磁导率曲线作对比分析,并嵌入交流量的瞬时值、最大值和有效值进行量化解读,可使其物理意义更加清晰.

关键词:铁磁材料 磁化曲线 磁滞回线

1 引言

磁化率远大于零的物质称为铁磁性物质,其磁化性能会在磁化过程中体现出来^[1],通常用磁滞回线、磁化曲线和磁导率曲线来描述.利用实验和理论计算的方法可以得出样品的磁化数据^[2],对实验数据可以通过计算机软件 Origin8.5 进行处理,得到电子图表,还可利用该软件对磁滞损耗进行求解^[3].通过数值分析及其相关软件也可对所测数据进行拟合,从而得到磁化曲线、磁滞回线和磁导率曲线^[4,5].利用传感器、采集装置和计算机还可以将测量过程以图像化的形式演示出来,便于理解^[6].但是上述文献中都未将特性曲线的横纵坐标值与交流量瞬时值、最大值和有效值作嵌入分析,容易在应用中产生歧义.

通过实验测量数据和软件辅助,得到磁化曲线、磁滞回线和磁导率曲线,并在横纵坐标上阐明了瞬时值、有效值和最大值,使之得到清楚的表达,有助于理解和获取工程数据.

2 磁滞回线

将铁磁材料置于由正弦交变电流所产生的磁场反复磁化时,其磁场强度 H 和磁感应强度 B 的关系会形成一条封闭曲线,该曲线即为磁滞回线.铁磁材

料的典型磁滞回线如图 1 所示.

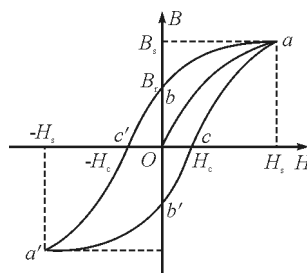


图 1 典型的磁滞回线

由图 1 可以看出, H 从零开始逐渐增大时, B 沿着 Oa 逐渐增大到饱和点 a ,此时,磁感应强度为 B_s ,称为饱和磁通密度,与之对应的磁场强度为 H_s ,即饱和磁场强度.到达 a 点后减小磁场强度,磁滞回线将以一个较高水平的路径 ab 减小.当 H 减小到零时, B 大于零,磁芯仍处于被磁化的状态,保留了部分磁通 B_r ,这部分磁通称为剩磁.继续反向施加磁场强度,并使得 B 回到零,即图中 bc' 段,此时需要施加的外部磁场强度称为矫顽力 H_c .若外加磁场强度继续增大,同样也会使铁磁质达到饱和状态. $abc'a'b'ca$ 组成的封闭曲线即为磁性材料的一条磁滞回线.

在测量铁磁材料的磁滞回线时,若给定正弦电压,则电流的波形会发生畸变,得到的为准正弦波.设电流波形从 c 点开始, c 点时, B 值为零,但 H 值不

* 国家自然科学基金:电子变压器电感器的优化设计及其可视化算法,项目编号:51967015

作者简介:邹声奇(1997-),男,在读硕士研究生,控制工程专业.

为零,这是由于克服负半周期的磁滞,所需要的矫顽力.随着电流的增大, B 逐渐增大,在 a 点处达到最大. ab 段电流逐渐减小, B 以一个较大的路径减小,在 b 点处,电流降低到零,但铁芯仍保留部分磁滞, B 值不为零.之后电流往负半周期增大,使得这部分磁滞逐渐减小,到 c' 处,回到零.此时,电流继续往负半周期增大,在 a' 到达最大值,同时, B 值也在此时达到负方向的最大值. $a'b'$ 段电流逐渐减小, B 值也随之减小.在 b' 处,电流归零,铁芯留有剩磁,再往正方向上施加逐渐增大的电流,可使得这部分剩磁减小,回到 B 值为零的状态. $abc'a'b'ca$ 即为一个完整的交流磁化周期.

在一个周期内,得到一条磁滞回线,若不改变外加条件, B 和 H 的值将一直沿回线运动,由于电流为非恒定值,而是一个随时间变化的函数,所以每一个时刻都有一个对应的 H 值,假设所测样品上的 H 值处处相等,则 H 值的计算公式为

$$H(t) = \frac{Ni(t)}{l} \quad (1)$$

式中 N 为匝数, l 为磁路长度.在 H 值不断改变的同时, B 值也在不断的发生变化,其计算公式为

$$B(t) = \frac{\Phi(t)}{NS} \quad (2)$$

式中 S 为磁路截面积.

改变产生外磁场的交变电流的大小,使得外磁场强度在 H_s 和 $-H_s$ 之间变化,可以得到一簇磁滞回线(图2),其中所围面积最大的为极限磁滞回线.

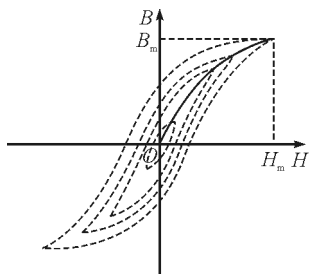


图2 一簇磁滞回线

磁滞回线所描述的 B 和 H 的值是随着时间在不断发生变化的,因此,在磁滞回线的坐标图上,横纵坐标采用的是瞬时值,图上的每一个点表示的是某一时刻下的 B 跟 H 值的关系.

3 磁化曲线

磁化曲线是表示物质中的磁场强度 H 与所感

应的磁感应强度 B 之间的关系.用图形来表示某种铁磁材料在磁化过程中磁感强度 B 与磁场强度 H 之间关系的一种曲线,又叫 $B-H$ 曲线.这种曲线可以通过实验方法测得. B 与 H 之间存在着非线性关系.对一铁磁材料从磁中性开始,施加一个外加磁场强度,并使得该磁场强度从零开始慢慢增大,基于图2可得到 $B-H$ 曲线如图3所示.

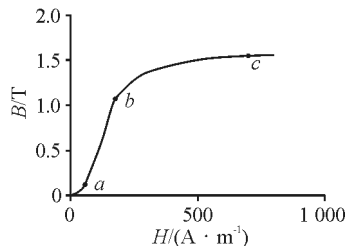


图3 典型的磁化曲线

开始时, H 逐渐增大, B 也增加,缓慢上升到 a 点,这一段为起始段,是很小的一部分;当 H 继续增大时, B 急剧增加,几乎成直线上升, ab 段为线性段;当 H 进一步增大时, B 的增加又变得缓慢,达到 c 点以后, H 值即使再增加, B 却几乎不再增加,即达到了饱和, bc 段为饱和段.不同的铁磁材料有着不同的磁化曲线,其磁感应强度饱和值也不相同.但同一种材料,饱和值是一定的.

在通入交流电之后,在一个周期内, H 会在 $\pm H_s$ 之间来回的变动,该值的大小与所通的电流大小有关,当电流达到最大值时,会得到一条极限磁滞回线,改变电流大小时,可以得到一簇磁滞回线,连接各回线的顶点,即得到了基本磁化曲线.为了便于描述 H 这个变化量,基本磁化曲线的横坐标通常采用的是 H 的有效值.

在基本磁化曲线中,纵坐标采用的是最大值,这是因为在工程上,常常需要用的是某一铁磁材料的饱和磁感应强度,所以当基本磁化曲线达到比较平坦的一个状态时,可以认为达到了饱和状态,这时,用最大值可以直观得到材料的饱和点 B_s .

一般来说,磁化曲线所描述的 B 和 H 的值,在横坐标上表示的 H 是有效值,纵坐标表示的 B 是最大值.

4 磁导率曲线

磁导率的定义是磁通密度 B 对磁感应强度 H

的比值,制造厂商给出的磁导率单位一般是高斯每奥斯特^[7].

我们常说的磁导率,是指磁介质的相对磁导率 μ_r ,它是磁导率 μ 和真空磁导率 μ_0 的比值,即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

在CGS单位制中真空磁导率 $\mu_0 = 1$,是一个无量纲的纯数;在MKS单位制中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.磁化曲线上任意给定点的斜率给出了该点的磁导率,如图4所示.

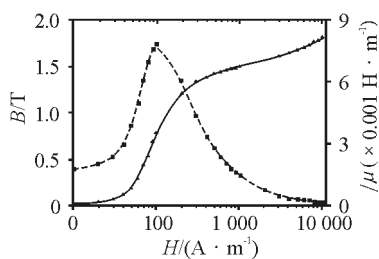


图4 半对数坐标下的磁导率曲线

该图描述的某材料是在MKS单位制下的 $B-H$ 曲线,由磁导率的定义为

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

可得其磁导率曲线,如图中虚线所示, μ 与 H 的关系曲线称为磁导率曲线.图中可以看出,随着 B 和 H 值的增大,磁导率先上升到某一最大值后再减小,该顶点对应的磁导率为最大磁导率,用 μ_m 表示.此时,磁导率 μ 的单位是H/m,如果需要得到常说的相对磁导率,还需与真空磁导率作商.

Magnetization Curve and Hysteresis Loop of Ferromagnetic Materials

Zou Shengqi Wu Jiaju Cheng Liangliang

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330000)

Abstract: Ferromagnetic materials are widely used in daily life and industrial manufacture, especially in the manufacture of motors, transformers and inductors. The magnetization characteristics of ferromagnetic materials are usually expressed by hysteresis loop, magnetization curve and permeability curve. However, the meaning of the values of the transverse and longitudinal coordinates of the curves used is different, and it is easy to produce ambiguity, it brings many perplexities to teaching, scientific research and engineering design. The physical meaning of hysteresis loop, magnetization curve and permeability curve can be made clearer by comparing and analyzing the hysteresis loop, magnetization curve and permeability curve, and inserting the instantaneous value, maximum value and effective value of AC.

Key words: ferromagnetic material; magnetization curve; hysteresis loop

在磁导率曲线中横坐标 H 的值为有效值,纵坐标因情况而异;在MKS单位制下其单位是H/m,在CGS单位制中,其单位是Gs/Oe,用相对磁导率表示时,为无量纲的纯数.

5 结论

在磁滞回线图上,横坐标和纵坐标采用的都是瞬时值;在磁化曲线中,横坐标上表示的 H 是有效值,纵坐标表示的 B 是最大值;在磁导率曲线中,横坐标 H 的值为有效值,纵坐标的单位可以是亨每米、高斯每奥斯特或无量纲的纯数.

参考文献

- 1 叶朝锋,徐云,迟忠君,等.磁测量原理与技术[M].北京:清华大学出版社,2018.16~27
- 2 张俊武,王红理,黄丽清.铁磁材料交流磁化曲线及磁滞回线的观测[J].物理实验,2017,37(8):17~21
- 3 李育洁,何伟岩.利用Origin8.5软件简化磁滞回线数据处理[J].物理通报,2017,36(7):73~75
- 4 陈修芳.基于样条曲线的磁滞回线拟合[J].武汉工业学院学报,2014,33(1):65~67
- 5 鲁晓东.基于Matlab的约束最小二乘法拟合磁滞回线[J].大学物理实验,2017,30(2):89~92
- 6 李明达,朱云霞,高建平,等.结合传感器的磁滞回线实验可视化演示[J].大学物理实验,2019,32(3):103~106
- 7 Colonel Wm. T. Mclyman. Transformer and inductor design handbook 3rd edition[M]. New York:Marcel Dekker, Inc., 2004. 21~48