



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109698066 B

(45) 授权公告日 2021.01.12

(21) 申请号 201910168537.1

H01F 41/02 (2006.01)

(22) 申请日 2019.03.06

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109698066 A

US 2004/085173 A1, 2004.05.06

JP 特许第6036759号 B2, 2016.11.30

US 2006/0091989 A1, 2006.05.04

(43) 申请公布日 2019.04.30

CN 105161258 A, 2015.12.16

CN 201498321 U, 2010.06.02

CN 108962557 A, 2018.12.07

CN 105742047 A, 2016.07.06

CN 101714450 A, 2010.05.26

CN 108010701 A, 2018.05.08

CN 107992703 A, 2018.05.04

(73) 专利权人 中国科学院重庆绿色智能技术研  
究院

地址 400714 重庆市北碚区方正大道266号

专利权人 宁夏银利电气股份有限公司

(72) 发明人 陈惠 张鹏 罗彦江 冶青学  
王晓东 石明全 焦海波 徐泽宇  
李道远 张霞 赵迎 朱海鹏  
井光辉 陈昭明 邹劲松

翁斌.铁心电感器的优化设计及其可视算法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2013,(第1期),第1-75页.

朱占山等.气隙对电感磁芯内部磁场分布及电感的影响.《磁性材料及器件》.2016,第47卷(第1期),第57-60页.

(74) 专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有  
限公司 11275

代理人 杨柳岸

审查员 席英

(51) Int.Cl.

H01F 41/00 (2006.01)

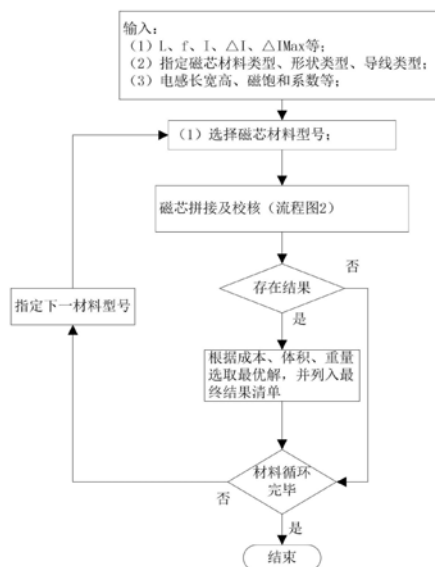
权利要求书3页 说明书10页 附图7页

(54) 发明名称

一种UI、UU型硅钢片磁芯带气隙电感非标设计方法

(57) 摘要

本发明涉及一种UI、UU型硅钢片磁芯带气隙电感非标设计方法,属于电感设计技术领域。本发明方法适用于buck、boost、buck-boost等类型的斩波电感。本发明以电感平均电流、电感纹波电流、开关频率、目标电感量、电感最大长宽高、散热参数等为输入条件,基于现有的粉末磁芯条自由拼接,无开口气隙,得到满足电感量的同时,满足磁密及温升等条件下的最小体积电感结构。本发明解决了基于无标准磁芯下的磁芯条自由拼接最优设计问题。



CN 109698066 B

1. 一种UI、UU型硅钢片磁芯带气隙电感非标设计方法,其特征在于:该方法包含如下步骤:

S1:首先根据工作磁密确定有效磁导率 $\mu_r$ ,用于计算额定电感使用:

S11:如果材料无B-H相关曲线,令有效磁导率 $\mu_r = \mu_{r0}$ ;

S12:如果材料有B-H曲线,则计算工作磁密下的相对磁导率;

S2:运行材料循环流程1;

材料循环流程1为:

S21:如果磁芯成型方式选择非标,并且有开口气隙,则进入S4;

S22:材料循环,假设循环到材料35W270;

S3:运行硅钢片磁芯拼接子流程2;

硅钢片磁芯拼接子流程2为:

S31:在特定材料下为所有硅钢片及其组合;

S32:在特定的磁芯尺寸a、b、c、h下,计算气隙分布、线圈参数并校核;

a为磁芯窗口宽度;

b为磁芯窗口高度;

c为磁芯叠厚;

h为磁芯片宽;

S33:循环完毕,则进入运行材料循环流程1;

S4:运行非标磁芯电感设计流程3;

非标磁芯电感设计流程3为:

S41:计算电感长宽高,即无气隙,进行初步空间校核;

S42:根据磁芯工作磁密及电感值确定导线匝数N;

S43:计算气隙总长度 $g_z$ ;

S44:校核气隙总长度;

S5:气隙精确分布及电感值精确计算,电感高度及气隙总长度重新校核;

根据气隙总磁阻确定气隙数量及气隙总长度、额定电感值,考虑气隙边缘效应;

S6:过载电感计算,最大磁密校核;

S61:当材料无B-H时,过载电感与额定电感相等;

S62:当材料带B-H曲线时,运行计算步骤S621-S626,得到过载电感;

S7:绕组参数计算及窗口校核,包括铜环线和铜扁线两种情况;

S72铜环线参数计算,铜环线从数据库中进行选取;

S73铜扁线参数计算,铜扁线从数据库中进行选取;

S8:根据体积最优筛选出最终的拼接结果;

步骤S3中硅钢片磁芯拼接子流程2具体为:

S311:首先指定h值从20逐渐变大到120,间隔5;

S312:特定的h值下,磁芯叠厚c从20逐渐变大到边界条件最大长度 $L_s$ ,间隔5;

S313:在特定c值下,磁芯窗口宽度a从20逐渐变大到边界条件最大宽度 $W_s$ ,间隔5;

S314:在特定a值下,磁芯窗口高度b从20逐渐变大到边界条件最大高度 $H_s$ ,间隔5;

S32:在特定的磁芯尺寸a、b、c、h下,计算气隙分布、线圈参数并校核;

S33:当磁芯尺寸a、b、c、h满足条件,计算回到材料循环流程1;

步骤S5中气隙精确分布及电感值精确计算的流程如下:

根据气隙总磁阻确定气隙数量及单个气隙长度、额定电感值,考虑气隙边缘效应;

S51:首先指定序号 $m=1$ ,气隙数量 $n=2$ ;

S52:根据气隙数量计算单个气隙长度;

S53:判定单个气隙长度 $g$ 是否小于 $g_{\max}$ :如果是,继续后续计算;如果否,增加气隙数量,返回到步骤S52;

S54:考虑边缘效应,更新气隙总磁阻;

S55:计算额定目标电感;

S56:考虑边缘磁通效应后,电感值将偏大,调整为增大单个气隙长度及数量;

S561:如果电感偏差类型输入为+,如果实际电感首次小于目标电感,则输出 $m-1$ 时的相关结果,进入非标磁芯电感设计流程3;否则 $m=m+1, g=g+0.1, g_z=g \times n$ ,  $g$ 为单个气隙长度,进入步骤S53;

S562:如果电感偏差类型输入为 $\pm$ ,如果此次电感偏差大于上次电感偏差,则输出 $m-1$ 时的相关结果,进入非标磁芯电感设计流程3;否则 $m=m+1, g=g+0.1, g_z=g \times n$ ,进入步骤S53;

步骤S62具体为:

S621:输入过载电流 $I_{ex}$ ,令 $\mu_{re}=\mu_{r0}$ ;  $\mu_{r0}$ 为硅钢片的初始磁导率;

S622:计算 $\mu_{re}$ 下的线性磁密;

S623:计算磁场强度;

S624:通过B-H曲线查找计算 $H_e$ 对应的曲线磁密 $B_{eq}$ ;

S625:比较线性磁密 $B_e$ 及曲线磁密 $B_{eq}$ ,当两者差绝对值小于0.02时,记录 $B_e$ 进行下一步计算,否则 $\mu_{re}=B_{eq}/(H_e \times \mu_0)$ ,  $\mu_0$ 为真空磁导率,返回步骤S2进行计算;

S626:计算过载电感;

步骤S7绕组参数计算及窗口校核,包括铜环线和铜扁线两种情况,分别为:

S72:铜环线参数计算,铜环线从数据库中进行选取,流程如下:

S721:列出数据库所有铜环线,按截面积从大到小排列;

S722:选取第 $m=1$ 根导线计算导线电流密度 $J$ ;

S723:对窗口利用率进行校核:

$$kus = \frac{N \times A_w}{a \times b} \leq ku$$

其中 $ku$ 为设定窗口利用率;

$kus$ 为实际窗口利用率;

$N$ 为线圈匝数;

$A_w$ 为单匝导线截面;

$a$ 为磁芯窗口宽度;

$b$ 为磁芯窗口高度;

当窗口利用率满足条件,进行后续计算,否则电流密度小于6.0时,使 $m=m+1$ ,重复进行导线电流密度计算及窗口利用率校核;

S724:如果电流密度增加到6.0时,窗口利用率都无法满足要求,则无需继续增加m值,直接进入主流程,继续磁芯拼接循环;

S73:铜扁线参数计算,铜扁线从数据库中进行选取,流程如下:

S731:列出数据库所有铜扁线,按截面积从大到小排列;

S732:选取第m=1根导线计算导线电流密度J;

S733:对窗口利用率进行校核:

$$kus = \frac{N \times A_w}{a \times b} \leq ku$$

其中ku为设定窗口利用率;

kus为实际窗口利用率;

N为线圈匝数;

Aw为单匝导线截面;

a为磁芯窗口宽度;

b为磁芯窗口高度;

当窗口利用率满足条件,进行后续计算,否则电流密度小于6.0时,使m=m+1,重复进行导线电流密度计算及窗口利用率校核;

S734:如果电流密度增加到6.0时,窗口利用率都无法满足要求,则无需继续增加m值,直接进入主流程,继续磁芯拼接循环。

## 一种UI、UU型硅钢片磁芯带气隙电感非标设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电感设计技术领域,涉及一种UI、UU型硅钢片磁芯带气隙电感非标设计方法。

### 背景技术

[0002] (1)随着电力电子技术的飞速发展,各种电力电子装置在电力系统、交通、工业等领域应用越来越广泛,因此对电流质量要求越来越高,解决谐波问题是当前最重要的问题。与其它电子元件不同,使用者很难选到合适的电感,一般情况下根据需求重新设计。具体设计时需要考虑体积、重量、成本等因素。

[0003] (2)对于比较大型的电感,一般情况下都找不到合适的标准磁芯,都是通过磁芯条自由拼接而成,因此形成一个自由拼接最优化算法显得十分重要。

### 发明内容

[0004] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种UI、UU型硅钢片磁芯带气隙电感非标设计方法,从而实现磁芯条拼接的程序化,实现大幅减少设计人员大量的尝试工作,提高工作效率,减少人工计算失误的目的。

[0005] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0006] 一种UI、UU型硅钢片磁芯带气隙电感非标设计方法,该方法包含如下步骤:

[0007] S1:首先根据工作磁密确定有效磁导率 $\mu_r$ ,用于计算额定电感使用;

[0008] S11:如果材料无B-H相关曲线,令有效磁导率 $\mu_r = \mu_{r0}$ ;

[0009] S12:如果材料有B-H曲线,则计算工作磁密下的相对磁导率;

[0010] S2:运行材料循环流程1;

[0011] S21:如果磁芯成型方式选择非标,并且有开口气隙,则运行非标磁芯电感设计流程3;

[0012] S22:材料循环,假设循环到材料35W270;

[0013] S3:运行硅钢片磁芯拼接子流程2;

[0014] S31:在特定材料下,穷举所有硅钢片及其组合;

[0015] S32:在特定的磁芯尺寸a、b、c、h下,计算气隙分布、线圈参数并校核;

[0016] S33:循环完毕,则进入运行材料循环流程1;

[0017] S4:运行非标磁芯电感设计流程3;

[0018] S41:计算电感长宽高,即无气隙,进行初步空间校核;

[0019] S42:根据磁芯工作磁密及电感值确定导线匝数N;

[0020] S43:计算气隙总长度 $g_z$ ;

[0021] S44:校核气隙长度;

[0022] S5:气隙精确分布及电感值精确计算,电感高度及气隙长度重新校核;

[0023] 根据气隙总磁阻确定气隙数量及各个气隙长度、额定电感值,考虑气隙边缘效应;

- [0024] S6:过载电感计算,最大磁密校核;
- [0025] S61:当材料无B-H或DC偏移曲线时,过载电感与额定电感相等;
- [0026] S62:当材料带B-H曲线时,运行计算子流程5,得到过载电感;
- [0027] S7:绕组参数计算及窗口校核,包括铜箔、环线、扁线三种情况;
- [0028] S71箔线参数计算;
- [0029] S72环线参数计算,铜环线从数据库中进行选取;
- [0030] S73扁线参数计算,铜扁线从数据库中进行选取;
- [0031] S8:根据体积最优筛选出最终的拼接结果。
- [0032] 进一步,步骤S3中硅钢片磁芯拼接子流程2具体为:
- [0033] S311:首先指定h值从20逐渐变大到120,间隔5;
- [0034] S312:特定的h值下,磁芯叠厚c从20逐渐变大到边界条件最大长度 $L_s$ ,间隔5;
- [0035] S313:在特定c值下,窗宽a从20逐渐变大到边界条件最大宽度 $W_s$ ,间隔5;
- [0036] S314:在特定a值下,窗高b从20逐渐变大到边界条件最大高度 $H_s$ ,间隔5;
- [0037] S32:在特定的磁芯尺寸a、b、c、h下,计算气隙分布、线圈参数并校核;
- [0038] S33:当磁芯尺寸a、b、c、h满足条件,计算回到材料循环流程1。
- [0039] 进一步,步骤S5中气隙精确分布及电感值精确计算的流程如下:
- [0040] 根据气隙总磁阻确定气隙数量及各个气隙长度、额定电感值,考虑气隙边缘效应;
- [0041] S51:首先指定序号 $m=1$ ,气隙数量 $n=2$ ;
- [0042] S52:根据气隙数量计算单个气隙长度;
- [0043] S53:判定单个气隙长度 $g$ 是否小于 $g_{max}$ :如果是,继续后续计算;如果否,增加气隙数量,返回到步骤S52;
- [0044] S54:考虑边缘效应,计算气隙磁阻;
- [0045] S55:计算额定目标电感;
- [0046] S56:由于考虑边缘磁通效应后,电感值将会偏大,因此调整方案为增大气隙长度及数量;
- [0047] S561:如果电感偏差类型输入为+,如果实际电感首次小于目标电感,则输出 $m-1$ 时的相关结果,进入非标磁芯电感设计流程3;否则 $m=m+1, g=g+0.1, g_z=g \times n$ ,进入步骤S53;
- [0048] S562:如果电感偏差类型输入为±,如果此次电感偏差大于上次电感偏差,则输出 $m-1$ 时的相关结果,进入非标磁芯电感设计流程3;否则 $m=m+1, lg=lg+0.1, g_z=g \times n$ ,进入步骤S53。
- [0049] 进一步,步骤S6具体为:
- [0050] 当材料无B-H或DC偏移曲线时,过载电感与额定电感相等;
- [0051] 当材料带B-H曲线时,流程如下:
- [0052] S61:输入过载电流 $I_{ex}$ ,令 $\mu_{re}=\mu_r$ ;
- [0053] S62:计算 $\mu_{re}$ 下的线性磁密;
- [0054] S63:计算磁场强度;
- [0055] S64:通过B-H曲线或D-C偏移曲线查找计算 $H_e$ 对应曲的线上磁密 $B_{eq}$ ;
- [0056] S65:比较线性磁密 $B_e$ 及曲线磁密 $B_{eq}$ ,当两者差绝对值小于0.02时,记录 $B_e$ 进行下

步计算,否则 $\mu_{re} = B_{eq} / (H_e \times \mu_0)$ ,返回步骤S2进行计算;

[0057] S66:计算过载电感。

[0058] 进一步,步骤S7绕组参数计算及窗口校核,包括铜箔、环线、扁线三种情况,其中环线和扁线流程为:

[0059] S72:环线参数计算,铜环线从数据库中进行选取,流程如下:

[0060] S721:列出数据库所有铜环线,按截面积从大到小排列;

[0061] S722:选取第 $m=1$ 根导线计算导线电流密度 $J$ ;

[0062] S723:对窗口利用率进行校核  $kus = \frac{N \times A_w}{a \times b} \leq ku$ ,其中 $ku$ 为设定窗口利用率;

[0063] 当窗口利用率满足条件,进行后续计算,否则电流密度小于6.0时,使 $m=m+1$ ,重复进行导线电流密度计算及窗口利用率校核;

[0064] S724:如果电流密度增加到6.0时,窗口利用率都无法满足要求,则无需继续增加 $m$ 值,直接进入主流程,继续磁芯拼接循环;

[0065] S73:扁线参数计算,铜扁线从数据库中进行选取,流程如下:

[0066] S731:列出数据库所有铜扁线,按截面积从大到小排列;

[0067] S732:选取第 $m=1$ 根导线计算导线电流密度 $J$ ;

[0068] S733:对窗口利用率进行校核  $kus = \frac{N \times A_w}{a \times b} \leq ku$ ,其中 $ku$ 为设定窗口利用率;

[0069] 当窗口利用率满足条件,进行后续计算,否则电流密度小于6.0时,使 $m=m+1$ ,重复进行导线电流密度计算及窗口利用率校核;

[0070] S734:如果电流密度增加到6.0时,窗口利用率都无法满足要求,则无需继续增加 $m$ 值,直接进入主流程,继续磁芯拼接循环。

[0071] 本发明的有益效果在于:本发明提出的方法形成了一套基于无限自由拼接的标准化电感设计方法,并获得了体积最优电感结果。本方法考虑了所有可能的拼接情况,还可以根据重量、铜铁比、成本等其它要求选择最优结果。程序化后可大幅减少设计人员大量的尝试工作,提高工作效率,减少人工计算失误。

## 附图说明

[0072] 为了使本发明的目的、技术方案和有益效果更加清楚,本发明提供如下附图进行说明:

[0073] 图1为本发明硅钢片磁芯带气隙非标设计流程图;

[0074] 图2为本发明硅钢片磁芯拼接子流程图;

[0075] 图3为本发明气隙分布,线圈计算子流程图;

[0076] 图4为本发明气隙精确分布及电感值精确计算子流程图;

[0077] 图5为本发明过载电感计算子流程图;

[0078] 图6为本发明箔线、环线、扁线参数计算子流程图;图6(a)为本发明箔线绕组参数计算子流程图;图6(b)为本发明环线绕组参数计算子流程图;图6(c)为本发明扁线绕组参数计算子流程图;

[0079] 图7为本发明拼接后的磁芯尺寸图。

## 具体实施方式

[0080] 下面将结合附图,对本发明的优选实施例进行详细的描述。

[0081] 本发明为一种UI、UU型粉末磁芯斩波电感非标设计方法,该方法包含如下步骤:

[0082] 1. 材料参数准备及计算,进入主流程前,首先需要准备好计算需要的磁芯材料参数:

[0083] (1) 初始相对磁导率 $\mu_{r0}$ 、饱和磁感应强度 $B_{sat}$ ;

[0084] (2) B-H曲线或D-C偏移曲线、B-P曲线;

[0085] (3) 指定磁芯材料类型,形状类型,导线类型;

[0086] 2. 非标气隙磁芯流程

[0087] 首先根据工作磁密1.2T确定有效磁导率 $\mu_r$ ,用于计算额定电感使用:

[0088] (1) 如果材料无B-H相关曲线,令 $\mu_r = \mu_{r0}$ ;

[0089] (2) 如果材料有B-H曲线,则计算1.2T下的相对磁导率 $\mu_r$ ;

[0090] 3. 非标气隙磁芯电感设计流程图1

[0091] (1) 首先进行D+D2(正负占空比之和)判断:

[0092] ①如果D+D2=1,则继续进行计算;

[0093] ②如果D+D2<1,则终止计算。

[0094] (2) 如果磁芯成型方式选择非标,并且有开口气隙,则运行此非标磁芯电感设计流程

[0095] (3) 材料循环,假设循环到材料35W270;

[0096] (4) 进入磁芯拼接及校核流程2

[0097] 4. 非标气隙磁芯电感设计流程图2

[0098] 硅钢片磁芯拼接子流程2基本思路为穷举所有硅钢片及其组合,特定材料流程如下:

[0099] (1) 首先指定h值从20逐渐变大到120,间隔5;

[0100] (2) 特定的h值下,磁芯叠厚c从20逐渐变大到边界条件最大长度 $L_s$ ,间隔5;

[0101] (3) 在特定c值下,窗宽a从20逐渐变大到边界条件最大宽度 $W_s$ ,间隔5;

[0102] (4) 在特定a值下,窗高b从20逐渐变大到边界条件最大高度 $H_s$ ,间隔5;

[0103] (5) 在特定的磁芯尺寸(a、b、c、h)下,计算气隙分布、线圈参数并校核(如图3所示);

[0104] (6) 磁芯条拼接终止条件,见主流程,其中 $L_s$ 、 $W_s$ 、 $H_s$ 为允许的最大长宽高:

[0105] (1) 当 $b \gg H_s$ 或 $b/a > 20$ 时,b值不再继续增大;

[0106] (2) 当 $a > W_s/2$ 或 $a/b > 20$ 时,a值不再继续增大;

[0107] (3) 当 $c \gg L_s$ 或 $c/h > 20$ 时,c值不再继续增大;

[0108] (4) 当 $h > 120$ 或 $h > W_s/2$ 时,h值不再继续增大;

[0109] (7) 循环完毕,根据体积最优筛选结果,则进入图1;

[0110] 5. 非标磁芯电感设计流程图3

[0111] (1) 计算电感长宽高(无气隙),初步空间校核;

[0112] 输入:h、a、b、c及其它参数

[0113] 长度校核: $L_z = a + c - 2L_{tw} - L_{tx} + 2L_{tc} \leq L_s$ ,满足



- [0114] 宽度校核： $W_z = 2a + 2h \leq W_s$ ，满足
- [0115] 高度校核： $H_z = b + 2h \leq H_s$ ，满足
- [0116] (2) 根据磁芯工作磁密(例如1.2T)及电感值确定导线匝数N；
- [0117] 截面积 $A_c = c \times h$
- [0118] 导线匝数 $N = \frac{L_0 I_L}{B A_c}$  (元整)
- [0119] (3) 计算气隙总长度 $g_z$ ；
- [0120] 总磁阻： $R = \frac{N^2}{L_0}$
- [0121] 磁芯磁路长度： $l_c = 2a + 2b + \pi h$
- [0122] 铁芯磁阻： $R_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c}$
- [0123] 气隙总磁阻： $R_{gz} = R - R_c$
- [0124] 气隙初始总长度(不考虑边缘效应)： $g_z = R_{gz} \times \mu_0 \times A_c$
- [0125] (4) 气隙长度校核；
- [0126] 气隙长度与窗高窗宽之间的关系。初定规则如下：
- [0127] 单柱气隙长度小于窗高(纯铁芯高度)及窗宽，即： $g_z/2 < a$ 且 $g_z/2 < b$ 。
- [0128] (5) 气隙精确分布及电感值精确计算，进入图4；
- [0129] (6) 电感高度及气隙长度重新校核、过载电感计算(B-H)、最大磁密校核；
- [0130] (6.1) 电感高度校核：
- [0131] 窗高更新： $b = b + g \times n/2$
- [0132] 电感高度满足条件： $H_z = b + 2h \leq H_s$
- [0133] (6.2) 气隙长度重新校核：与第(4)步相同；
- [0134] (6.3) 过载电感计算及校核，计算第7节，过载电感条件： $L_{ex} \geq L_e$
- [0135] (6.4) 最大磁密校核，计算与第7节类似，对应电流为最大纹波下的峰值电流，最大磁密条件： $B_{max} \geq B_{sat} \times R_b$
- [0136] (7) 绕组参数计算及窗口校核，包括铜箔、环线、扁线三种情况，进入图5；
- [0137] (8) 损耗及温升计算(与无气隙相同，此处不进行重复介绍)；
- [0138] (9) 计算体积、重量、成本等指标，录入临时结果库。
- [0139] (10) 进入流程2
- [0140] 6. 气隙精确分布及电感值精确计算
- [0141] 根据气隙总磁阻确定气隙数量及各个气隙长度、额定电感值(考虑气隙边缘效应)；根据经验，两边立柱气隙数量相同，因此总气隙数量为偶数；
- [0142] 单个气隙大小有两个限制条件：不能超过铁芯线圈间距的一半(此处为 $6/2 = 3\text{mm}$ )；并且不能超过用户设置的最大值(5mm)；因此单个气隙最大长度 $g_{max} = 3\text{mm}$
- [0143] (1) 首先指定序号 $m = 1$ ，气隙数量 $n = 2$ ；
- [0144] (2) 根据气隙数量计算单个气隙长度(保留一位有效数字)；
- [0145] (3) 判定单个气隙长度 $g$ 是否小于 $g_{max}$ ：如果是，继续后续计算；如果否，增加气隙数

量,返回到第2步;此案例气隙初始数量 $n=2$ ,单个气隙初始长度 $g=g_z/n$

[0146] (4) 考虑边缘效应,计算气隙磁阻:

[0147] 单个气隙修正前磁阻:  $R_g = \frac{g}{\mu_0 A_c}$

[0148] 边缘磁通系数:  $F = 1 + \frac{g}{\sqrt{A_c}} \times \ln \frac{2G}{g_z}$ , 其中 $G$ 为绕组长度,对于UU型磁芯有,

[0149]  $G = b + g_z / 2$ ;

[0150] 单个气隙修正后磁阻:  $R_g = \frac{R_g}{F}$

[0151] 气隙总磁阻更新:  $R_{gz} = R_g \times n$

[0152] (5) 额定目标电感计算

[0153]  $L = \frac{N^2}{R_{gz} + R_c}$

[0154] (6) 由于考虑边缘磁通效应后,电感值将会偏大,因此调整方案为增大气隙长度及数量。

[0155] (6.1) 如果电感偏差类型输入为+,如果实际电感首次小于目标电感,则输出 $m-1$ 时的相关结果,进入图3;否则 $m=m+1, g=g+0.1, g_z=g \times n$ ,进入第(3)步;

[0156] (6.2) 如果电感偏差类型输入为±,如果此次电感偏差大于上次电感偏差,则输出 $m-1$ 时的相关结果,进入图3;否则 $m=m+1, lg=lg+0.1, g_z=g \times n$ ,进入第(3)步;

[0157] 7. 过载电感计算

[0158] 当材料无B-H或DC偏移曲线时,过载电感与额定电感相等;

[0159] 当材料带B-H曲线时,流程如下:

[0160] (1) 过载电流  $I_{ex} = I_{dc} \times (1 + RI)$ , 令  $\mu_{re} = \mu_r$

[0161] (2) 计算 $\mu_{re}$ 下的线性磁密:

[0162]  $R_{ce} = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_{re} A_c}$

[0163]  $B_e = \frac{N \times I_{ex}}{(R_{gz} + R_{ce}) \times A_c}$

[0164] (3) 计算磁场强度:  $H_e = B_e / (\mu_{re} \times \mu_0)$

[0165] (4) 通过B-H曲线或D-C偏移曲线查找计算 $H_e$ 对应曲的线上磁密 $B_{eq}$

[0166] (5) 比较线性磁密 $B_e$ 及曲线磁密 $B_{eq}$ ,当两者差绝对值小于0.02时,记录 $B_e$ 进行下步计算,否则 $\mu_{re} = B_{eq} / (H_e \times \mu_0)$ ,返回第(2)步进行计算;

[0167] (6) 过载电感:  $L_{ex} = \frac{N \times B_e \times A_c}{I_{ex}}$

[0168] 8. 绕组参数计算

[0169] 8.1 箔线参数计算

[0170] 由于铜箔导线宽度比较自由,没有从数据库调取规格。

[0171] 进行铜箔导线参数计算及窗宽校核,此处假设每层就只有一匝铜箔导线:

[0172] (1) 首先假设导线电流密度 $J_0=2.0$ ;

[0173] (2) 根据电流密度确定导线尺寸:

[0174] 三角波斩波电感电流有效值:  $I_{rms} = \sqrt{I_L^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}}$

[0175] 导线截面积:  $A_{w0} = \frac{I_{rms}}{J}$

[0176] 导线宽度:  $w=b-2L_d$ , 其中 $b$ 为磁芯窗口高度, $L_d$ 为端空距离;

[0177] 导线厚度:  $h_{line} = A_{w0}/w$

[0178] (3) 窗宽校核:

[0179] 当需要窗宽满足如下条件时:

[0180]  $a_x = [N \times h_{line} + (N-1) \times h_{ins}] \leq a$

[0181] 其中 $a$ 为磁芯窗口宽度,则满足要求,无需继续增加电流密度,进行后续计算,否则继续增加电流密度,重复进行导线尺寸计算及窗宽校核;

[0182] (4) 如果电流密度增加到6.0时,窗宽都无法满足要求,则无需继续增加电流密度,直接进入主流程,继续磁芯拼接循环;

[0183] 8.2环线参数计算

[0184] 铜环线从数据库中进行选取,流程如下:

[0185] (1) 列出数据库所有铜环线,按截面积从大到小排列;

[0186] (2) 选取第 $m=1$ 根导线计算导线电流密度 $J$ ;

[0187] (3) 对窗口利用率进行校核  $kus = \frac{N \times A_w}{a \times b} \leq ku$ , 其中 $ku$ 为设定窗口利用率。

[0188] 当窗口利用率满足条件,进行后续计算,否则电流密度小于6.0时,使 $m=m+1$ ,重复进行导线电流密度计算及窗口利用率校核;

[0189] (4) 如果电流密度增加到6.0时,窗口利用率都无法满足要求,则无需继续增加 $m$ 值,直接进入主流程,继续磁芯拼接循环;

[0190] 8.3扁线参数计算

[0191] 铜扁线从数据库中进行选取,流程如下:

[0192] (1) 列出数据库所有铜扁线,按截面积从大到小排列;

[0193] (2) 选取第 $m=1$ 根导线计算导线电流密度 $J$ ;

[0194] (3) 对窗口利用率进行校核,其中 $ku$ 为设定窗口利用率。

[0195] 当窗口利用率满足条件,进行后续计算,否则电流密度小于6.0时,使 $m=m+1$ ,重复进行导线电流密度计算及窗口利用率校核;

[0196] (4) 如果电流密度增加到6.0时,窗口利用率都无法满足要求,则无需继续增加 $m$ 值,直接进入主流程,继续磁芯拼接循环;

[0197] 9损耗计算

[0198] 如图2所示,当电感的磁芯尺寸及导线参数确定之后,进行损耗及温升校核,首先进行损耗计算:

[0199] 9.1磁芯损耗计算

[0200] (1) 额定纹波下  $\Delta B$ 值计算

[0201] 额定纹波下的最大电流及最小电流:

$$[0202] \quad I_{Lmax} = I_{Ldc} + \frac{\Delta I_L}{2}; I_{Lmin} = I_{Ldc} - \frac{\Delta I_L}{2}$$

[0203] 额定纹波下的最大H及最小H:

$$[0204] \quad H_{cmax} = \frac{NI_{max}}{l_c}; H_{cmin} = \frac{NI_{min}}{l_c}$$

[0205] 额定纹波下的最大B及最小B:

$$[0206] \quad B_{cmax} = f(H_{cmax}); B_{cmin} = f(H_{cmin})$$

[0207] 其中f为根据H求B的函数;

[0208] 额定纹波下  $\Delta B$ 值计算:

$$[0209] \quad \Delta B = B_{cmax} - B_{cmin}$$

[0210] (2) 磁芯损耗计算

[0211] 磁芯体积:

$$[0212] \quad V_c = A_c \times (2a + 2b + 4h)$$

$$[0213] \quad k_i = \frac{K_c}{2^{\beta-1} \pi^{\alpha-1} \left( 1.1044 + \frac{6.8244}{\alpha + 1.354} \right)}$$

[0214] 单位体积磁芯损耗如下:

$$[0215] \quad P_v = k_i |\Delta B|^{\beta} f^{\alpha} [D^{1-a} + (1-D)^{1-a}]$$

[0216] 其中,D为占空比;

[0217] 磁芯损耗:

$$[0218] \quad P_{fe} = P_v \times V_c$$

[0219] 9.2绕组直流损耗

[0220] (1) 导线直流电阻计算

$$[0221] \quad \text{平均匝长: } MLT = 2h + 2c + 0.5\pi a$$

$$[0222] \quad \text{导线总长度: } l_{cu} = MLT \times N$$

$$[0223] \quad \text{直流电阻: } R_{dc} = \frac{\rho_w l_{cu}}{A_{w0}}$$

[0224] (2) 直流损耗计算

$$[0225] \quad P_{dc} = R_{dc} \times I_L^2$$

[0226] 9.3集肤效应损耗计算

[0227] (1) 纹波电流傅里叶分解(弧度制),其中  $\Delta I_L$ 为纹波电流峰峰值:

$$[0228] \quad I_n = \frac{\Delta I_L \times \sin(n\pi D)}{\pi^2 n^2 D(1-D)} \quad (n=1, 2, 3, \dots, 10)$$

[0229] (2) 各个谐波频率下集肤深度:  $\delta_n = \frac{1}{\sqrt{\pi n f \mu_0 / \rho_w}}$  (n=1、2、3.....10)

[0230] (3) 对于铜箔导线,各阶谐波频率下对应的集肤效应交流电阻如下(弧度制):

$$[0231] \quad R_{jnf} = \frac{1}{2} R_{dc} \left( \frac{h_{line}}{\delta_n} \right) \frac{\sinh \left( \frac{h_{line}}{\delta_n} \right) + \sin \left( \frac{h_{line}}{\delta_n} \right)}{\cosh \left( \frac{h_{line}}{\delta_n} \right) - \cos \left( \frac{h_{line}}{\delta_n} \right)}$$

[0232] (4) 集肤效应损耗为:

$$[0233] \quad P_{jac} = \sum_{n=1}^{10} 0.5 \times R_{jnf} \times I_n^2$$

[0234] 9.4 临近效应损耗

[0235] (1) 基波频率集肤深度:  $\delta_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 / \rho_w}}$

[0236] (2) 电感交流成分电流有效值:  $I_{\Delta rms} = \frac{\Delta I_L}{2} \times \sqrt{\frac{1}{3}}$

[0237] (3) 电感交流成分电流导数有效值:  $I'_{\Delta rms} = \frac{\Delta I_L \times f}{\sqrt{D(1-D)}}$

[0238] (4) 临近效应交流电阻:

$$[0239] \quad R_{lac} = R_{dc} \times \left[ 1 + \frac{\psi}{3} \Delta^4 \left( \frac{I'_{\Delta rms}}{2\pi f I_{\Delta rms}} \right)^2 \right]$$

[0240] 其中  $\psi = \frac{5(N/2)^2 - 1}{15}$ ;  $\Delta = \frac{h_{line}}{\delta_0}$ 。

[0241] (5) 临近效应损耗:

$$[0242] \quad P_{lac} = R_{lac} \times I_{\Delta rms}^2$$

[0243] 9.5 电感总损耗

[0244] 绕组总损耗:

$$[0245] \quad P_{cu} = P_{dc} + P_{jac} + P_{lac}$$

[0246] 电感总损耗

$$[0247] \quad P_{sum} = P_{fe} + P_{cu}$$

[0248] 10 温升计算及校核

[0249] 电感温升依据已知的换热系数  $h_c$  及电感表面积进行计算:

[0250] (1) 电感表面积,即电感实际长宽高包络起来的立方体面积:

$$[0251] \quad A_i = 2(L_z \times W_z + W_z \times H_z + L_z \times H_z)$$

[0252] (2) 温升:  $\Delta T = \frac{P_{sum}}{h_c A_i}$ , 其中  $h_c$  为换热系数;

[0253] (3) 工作温度： $T_{\text{work}} = T_0 + \Delta T$ ，其中 $T_0$ 为环境温度；

[0254] (4) 温度校核：

[0255] 当 $T_{\text{work}} \leq T_{\text{max}}$ 时，电感结果满足温升要求，写入临时结果清单，回到主流程，继续磁芯拼接循环；否则，电感不满足温升要求，放弃此次结果，回到主流程，继续磁芯拼接循环。

[0256] 11结果选优

[0257] 结果选优根据电感体积指标进行最优化选择。图4为本发明拼接成型后的电感示意图，根据主流程，磁芯循环完毕后，临时结果清单可能存在1个以上的结果，如果材料选择不合适，也可能没有结果，因此选择电感体积最小的结果作为最终结果。

[0258] 图6为本发明箔线、环线、扁线参数计算子流程图；图6(a)为本发明箔线绕组参数计算子流程图；图6(b)为本发明环线绕组参数计算子流程图；图6(c)为本发明扁线绕组参数计算子流程图；

[0259] 图7为本发明拼接后的磁芯尺寸图。

[0260] 最后说明的是，以上优选实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制，尽管通过上述优选实施例已经对本发明进行了详细的描述，但本领域技术人员应当理解，可以在形式上和细节上对其作出各种各样的改变，而不偏离本发明权利要求书所限定的范围。

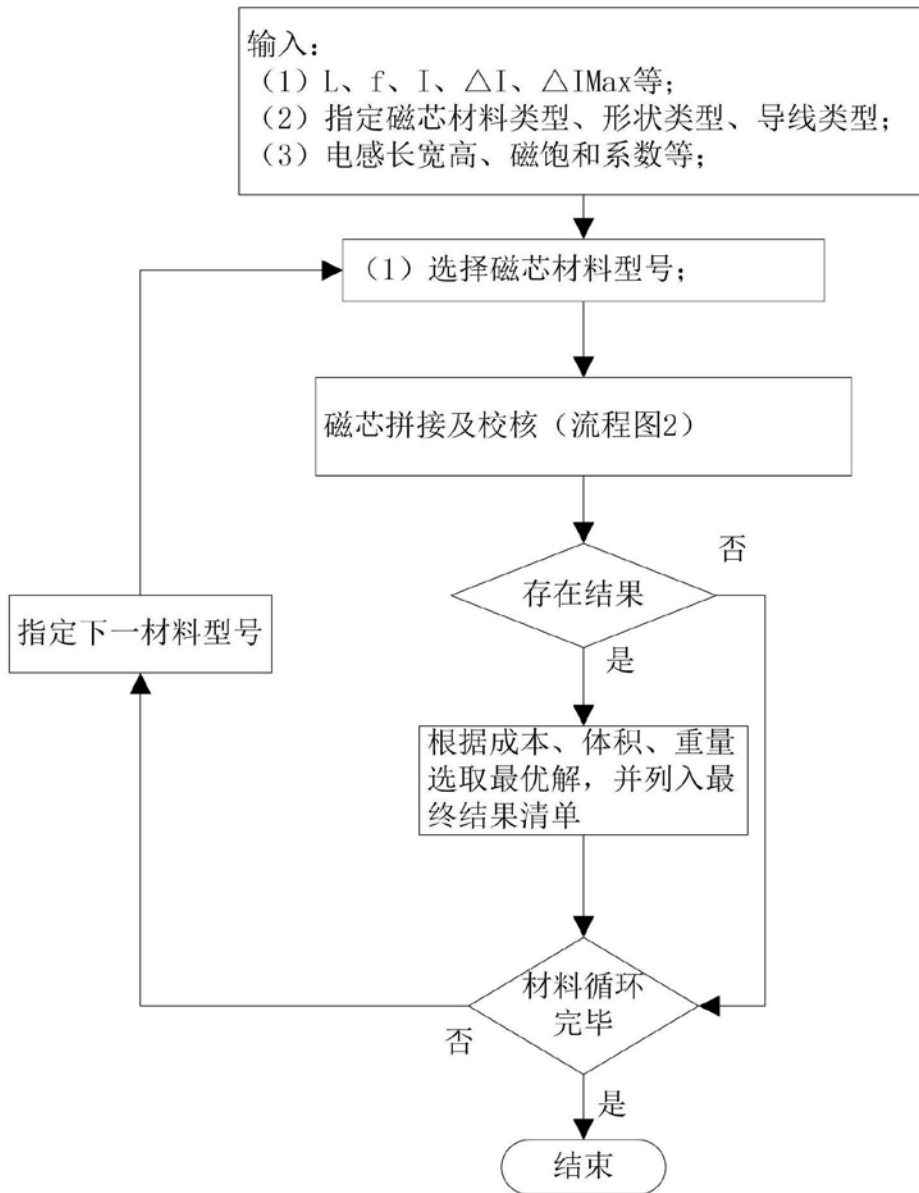


图1

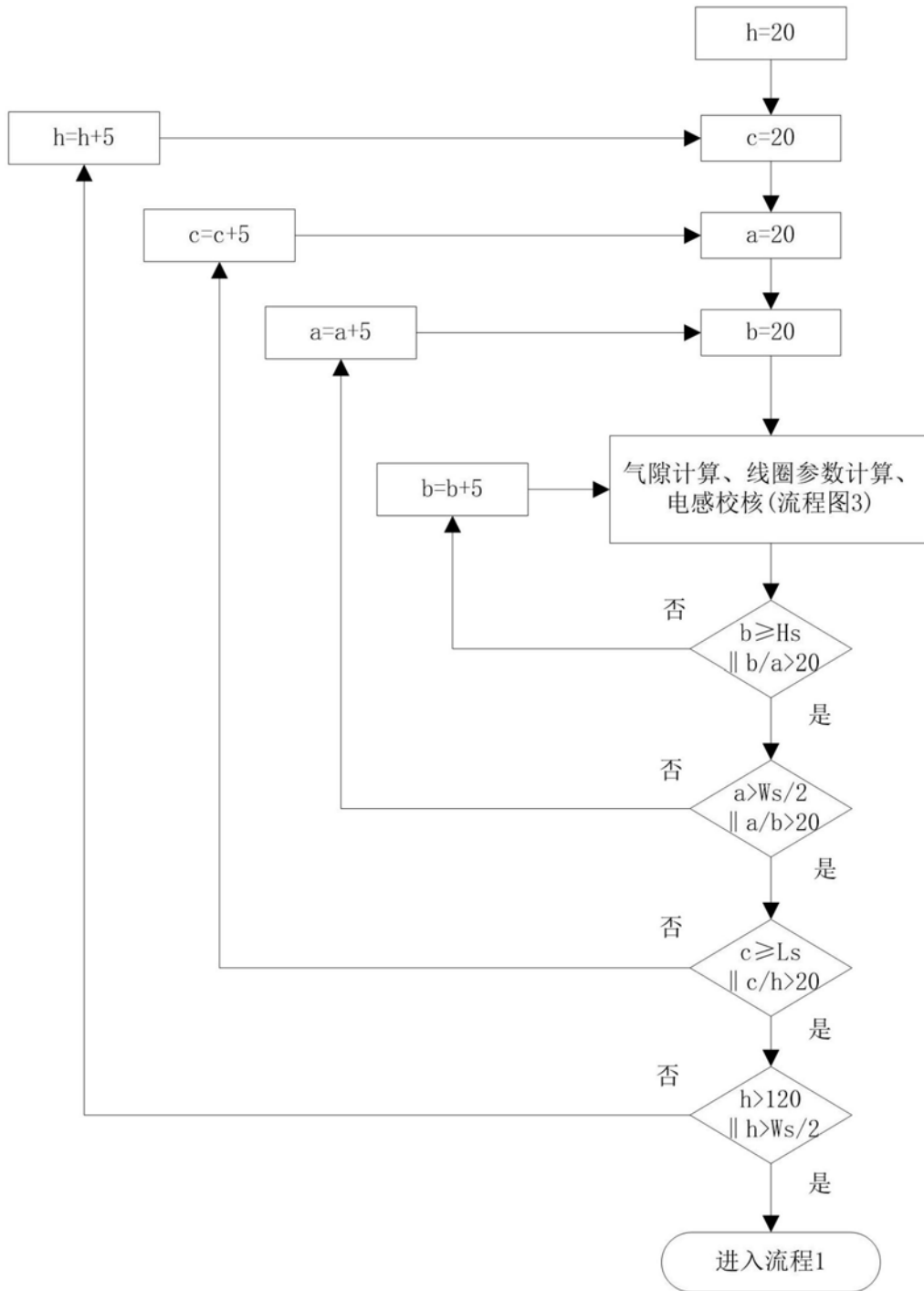


图2



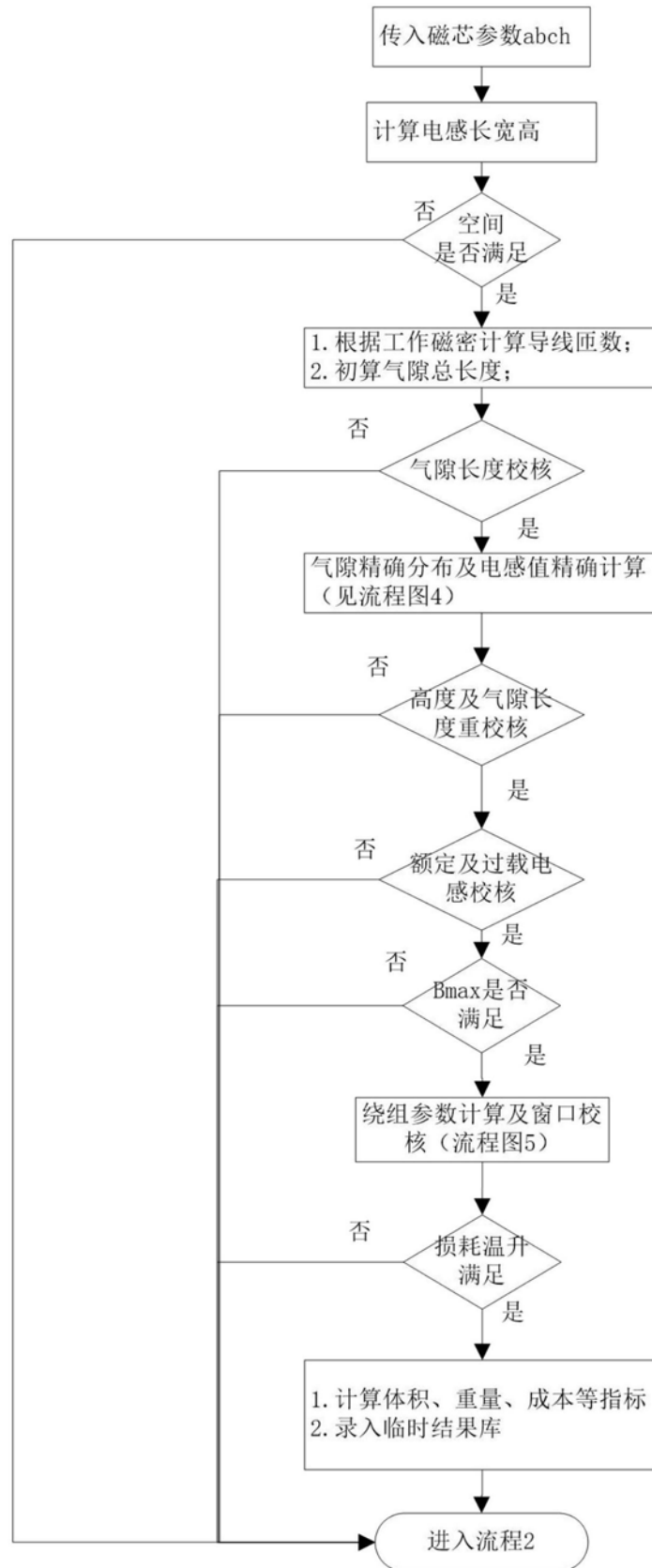


图3

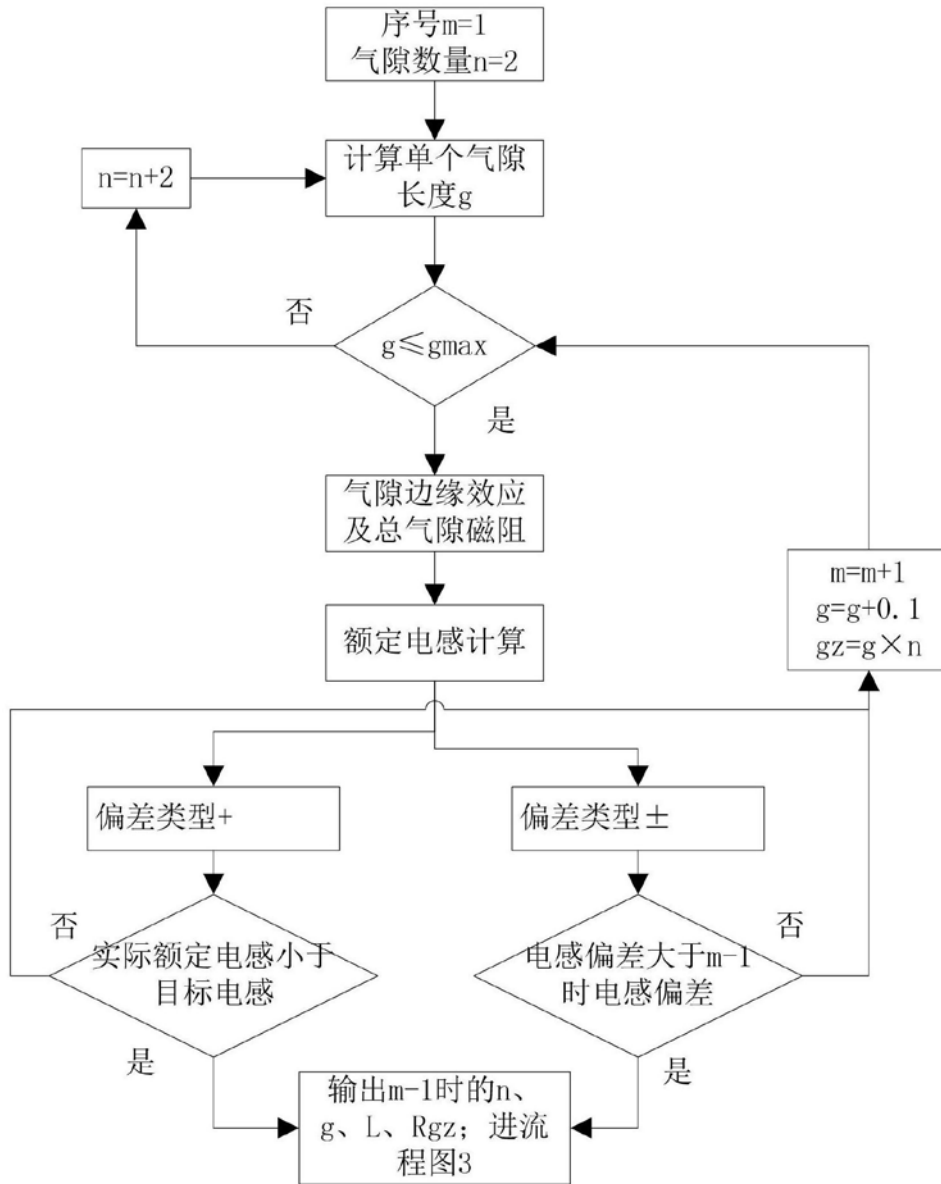


图4

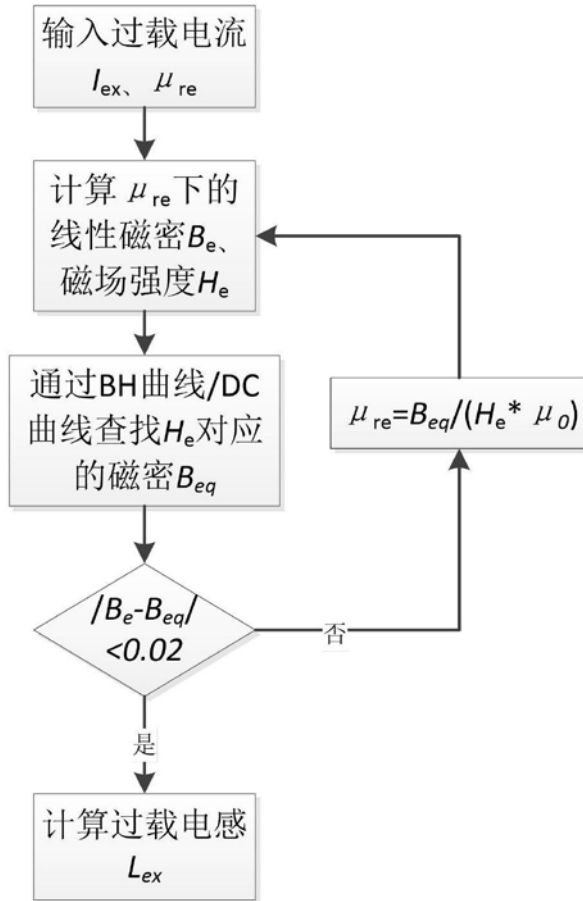
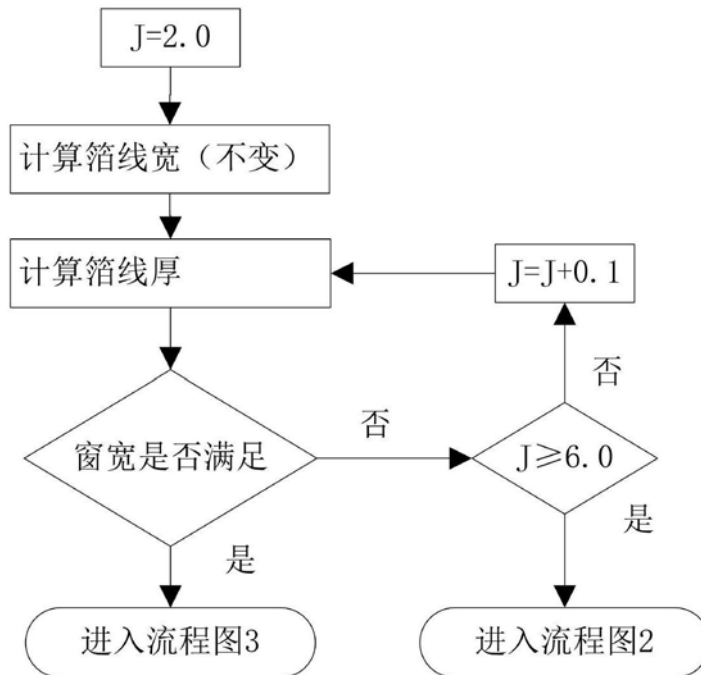
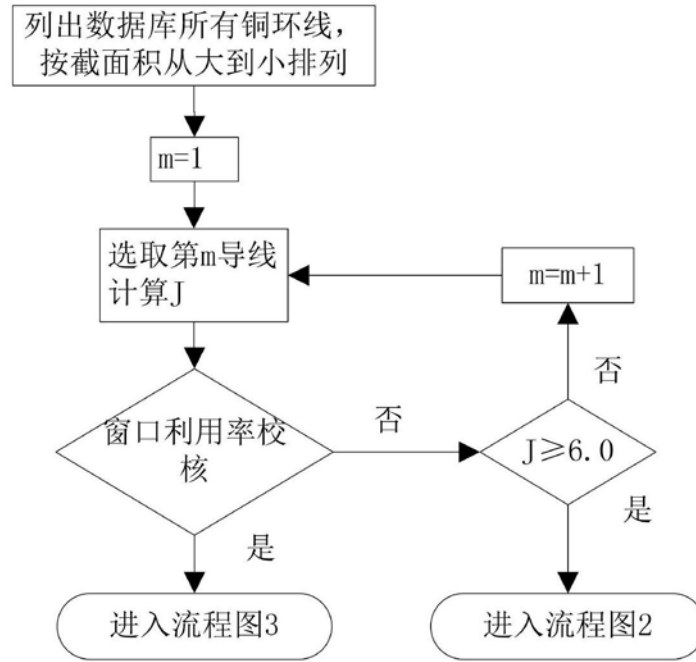


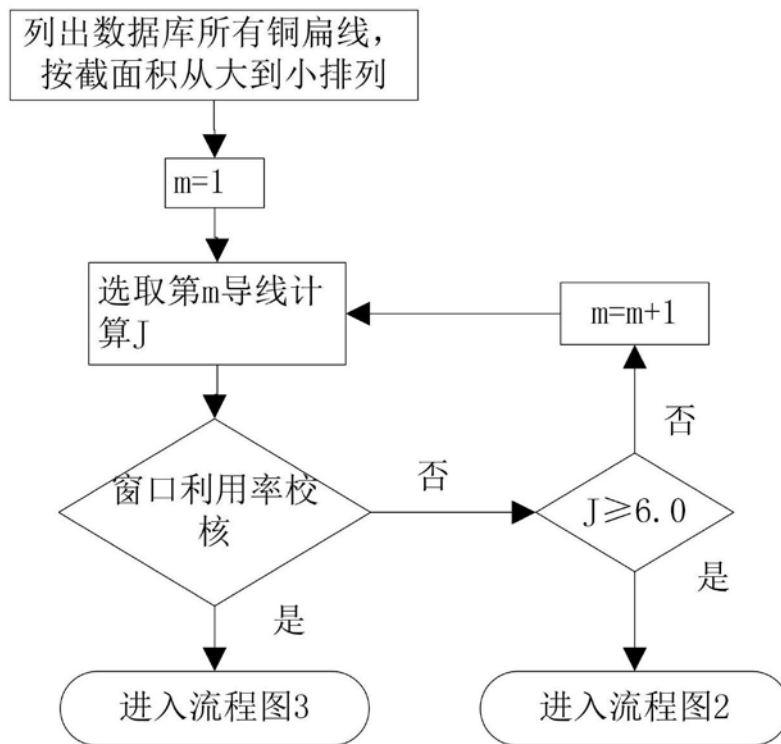
图5



(a)



(b)



(c)

图6

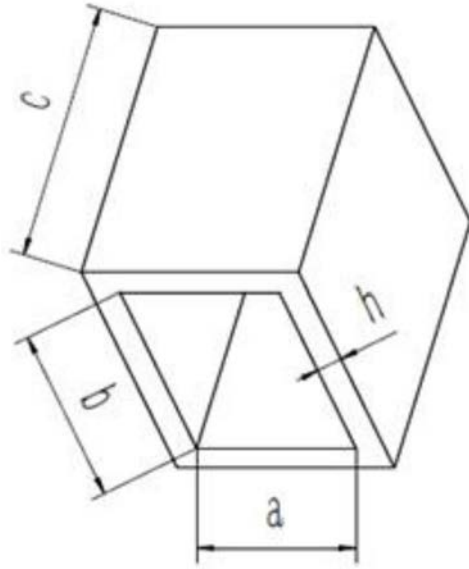


图7