

# 电力变压器的节能减噪优化设计

蒋雪峰, 黄文新

(江苏省新能源发电与电能变换重点实验室(南京航空航天大学), 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 本文针对当前迫切需要解决的电力变压器的节能与减噪问题, 提出了一种既能使变压器节能, 同时又能减噪的双目标优化设计。该优化设计首先对电力变压器的节能理论和减噪机理进行了分析; 其次, 在此基础上对电力变压器的节能减噪进行了初步优化, 探寻出了一种更优的初步优化方案, 并由此进行了单一的节能与减噪效益研究; 然后, 通过进一步优化, 提出了一种同时兼顾节能与减噪并考虑总成本的新型多目标优化设计, 该设计能很好地实现节能与减噪; 最后, 以 SZ10-40000/110 有载调压主电力变压器为例进行了实例优化与讨论, 验证了该优化设计的有效性与先进性。

**关键词:** 电力变压器; 节能与减噪; 双目标优化设计; 非线性加权综合法

## 0 引言

随着经济的发展和能源的大量消耗, 社会节能意识也越来越高。而当前极为广泛运用的电力变压器在我国每年总的电能损耗约为 2500 多亿kW·h, 相当于三个中等省的用电量之和, 可见对电力变压器进行节能设计有着重要意义<sup>[1-3]</sup>。另外, 目前随着我国用电负荷的较快增长且逐步集中, 要求电力变压器深入负荷中心, 以减小供电半径, 这样就使得越来越多的电力变压器出现在住宅区、商务区及公共服务区, 然而电力变压器有着普遍较高的噪声, 对变电站周边环境造成了较为严重的噪声干扰, 因此对电力变压器的减噪势在必行<sup>[4-6]</sup>。

目前, 对电力变压器的节能、减噪以及优化设计研究已有了许多成果, 文献[4-7]对电力变压器的噪声从工艺与控制的角度进行了减噪的研究, 文献[1-3,8-9]从电力变压器的节能效益、运行方式与损耗分析方面进行了研究, 文献[10]从变压器的节材和节能方面进行了最优化设计, 文献[11]从变压器重量最小方面进行了优化设计, 文献[12]从变压器的有效材料费最小方面进行了优化设计。

在上述研究中, 对电力变压器的节能与减噪的研究都尚且处于各自独立进行中, 且对于变压器的优化设计尚且处于上世纪 90 年代已趋于成熟的成果中, 还有待于进一步优化。针对这种情况, 本文

提出了一种既能使变压器节能, 同时又能减噪且考虑了总成本, 有着更好的铁心截面优化效果的多目标优化设计。

## 1 电力变压器的节能理论

### 1.1 电力变压器的铁心重量与铁心体积的确定

本文中主要针对三相心式铁心的电力变压器, 其铁心中的铁轭和心柱的截面相同, 皆为多级梯形, 如图 1 所示。

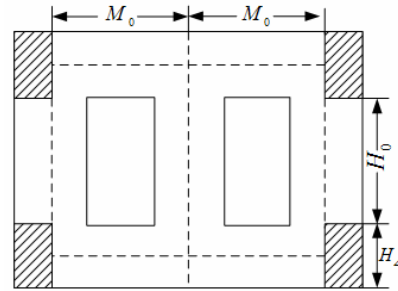


图 1 三相心式铁心图

其铁心重量<sup>[13-14]</sup>可表示为:

$$\begin{cases} G_{Fe} = G_z + G_e + G_A \\ G_z = 3SH_0\gamma \\ G_e = 4SM_0\gamma \\ G_A = 2SH_A\gamma \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $G_{Fe}$  为铁心总重量,  $G_z$  为铁心柱重量,  $G_e$  为铁轭重量,  $G_A$  为图中阴影部分的角重量,  $H_0$  为窗高,  $M_0$  为铁心柱中间距,  $H_A$  为铁轭宽,

$\gamma = 7.65 \times 10^{-4}$  为冷轧硅钢片的比重,  $S$  为铁心柱有效截面积。

其铁心有效体积为:

$$V_{Fe} = 3SH_0 + 4SM_0 + 2SH_A \quad (2)$$

## 1.2 电力变压器的空载损耗

### 1.2.1 空载损耗的第一种计算方法

电力变压器的空载损耗, 主要指铁心损耗, 它主要包括涡流损耗、磁滞损耗和附加损耗<sup>[15-16]</sup>, 可表示为:

$$\begin{cases} P_0 = P_h + P_e + P_f \\ P_h = \eta f B^{1.6} V_{Fe} \\ P_e = \varepsilon f^2 B^2 V_{Fe} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $P_0$  表示空载损耗,  $P_h$  表示磁滞损耗,  $P_e$  表示涡流损耗,  $P_f$  表示附加损耗,  $B$  表示磁密的幅值,  $f$  表示磁化频率,  $V_{Fe}$  表示铁心的体积,  $\eta$  和  $\varepsilon$  为实验常数。

### 1.2.2 空载损耗的第二种计算方法

在工程实践中空载损耗<sup>[16]</sup>又常表示为:

$$P_0 = K_c B^2 G_{Fe} \quad (4)$$

式(4)中:  $P_0$  表示空载损耗,  $K_c$  为与硅钢片材质相关的系数,  $G_{Fe}$  为硅钢片质量。

## 1.3 电力变压器的负载损耗

### 1.3.1 负载损耗的第一种计算方法

电力变压器的负载损耗近似为绕组电阻损耗, 绕组直流电阻损耗又称负载损耗(铜损)的基本损耗, 其余为附加损耗, 其附加损耗占小部分<sup>[16]</sup>, 这里设占总负载损耗的  $a\%$ , 则有:

$$\begin{cases} P_k = P_j + P_f \\ P_j = K_m \delta^2 m_{cu} \\ P_f = a\% P_k \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中,  $P_k$  为负载损耗,  $P_j$  为负载损耗的基本损耗,  $P_f$  为附加损耗,  $m_{cu}$  为铜导线质量,  $\delta$  为电流密度,  $K_m$  为与电导率有关的系数。

### 1.3.2 负载损耗的第二种计算方法

在负载损耗的基本损耗计算方法上还有另一种表示方法<sup>[16]</sup>, 表示为:

$$P_j = 3I_{1N}^2 R_1 + 3I_{2N}^2 R_2 \quad (6)$$

式(6)中:  $I_{1N}$ 、 $I_{2N}$  分别为一次、二次绕组的额定电流,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为一次、二次绕组 75℃ 时的电阻。

其中, 绕组 75℃ 时的电阻为:

$$R = \frac{21}{1 \times 10^3} \cdot \frac{L}{S_0} (75^\circ\text{C}) \quad (7)$$

式(7)中:  $L$  为导线长度 (mm),  $S_0$  为导线截面积 (mm<sup>2</sup>)。

## 2 电力变压器的减噪机理

### 2.1 电力变压器噪声实测值的确定

根据对电力变压器噪声的计算值与实测值的比较, 一般认为下式计算值比较接近实测值<sup>[5,7]</sup>, 即:

$$L_{p1} = 33 + \frac{G_c}{3} + 18 \sqrt{\frac{H_0}{D}} + 20(B - 1.7) + \beta \quad (8)$$

式(8)中,  $G_c$  为铁心硅钢片的质量 (t);  $H_0$  为电力变压器铁心窗高 (cm);  $D$  为铁心直径 (cm);  $B$  为铁心柱或铁轭中的磁密 (T);  $\beta$  为修正系数, 与铁心重量有关, 可由图 2 查询。

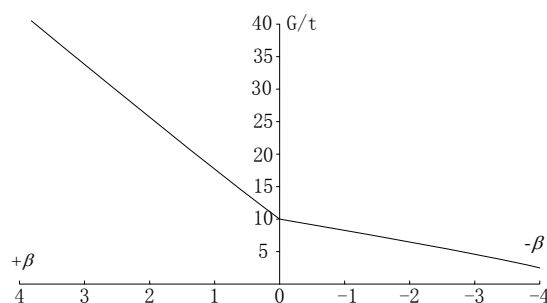


图 2 硅钢片质量与修正系数  $\beta$  关系图

### 2.2 电力变压器噪声变化量的确定

为了确定出噪声减少值, 还可用磁通密度变化引起噪声变化的计算公式<sup>[16]</sup>来进行确定:

$$\Delta L_{pA} = 10 \cdot \lg \left[ \left( \frac{B'}{B} \right)^8 \times \left( \frac{G'_{Fe}}{G_{Fe}} \right)^{1.6} \right] \text{dB} \quad (9)$$

式(9)中,  $\Delta L_{pA}$  表示噪声变化量,  $B$ 、 $B'$  分别表示变化前后的铁心工作磁通密度,  $G_{Fe}$ 、 $G'_{Fe}$  分别表示变化前后的铁心硅钢片质量。

## 3 电力变压器节能减噪的初步优化设计

由上述电力变压器的节能理论可知降低铁心磁

通密度  $B$ ，可以减少电力变压器空载损耗；减少绕组匝数  $N$ ，即减少铜线的质量或降低导线电阻，可以降低负载损耗。又由上述电力变压器的减噪机理分析，可知降低铁心磁通密度  $B$ ，可以降低噪声。同时，根据电磁理论  $U = 4.44fNBS$  可知。当  $U$ 、 $f$  一定时， $NBS = \text{常数}$ 。当绕组匝数  $N$  不变，倘若增加铁心截面积  $S$ ，可降低铁心磁通密度  $B$ ；当铁心磁密  $B$  不变，倘若增加铁心截面积  $S$ ，可减少绕组匝数  $N$  [15-17]。由此可知要实现电力变压器的节能减噪，得先实现铁心截面积的增大，同时也尽可能不增加电力变压器的总成本。

### 3.1 节能减噪的初步优化

对于本文铁心中的铁轭和心柱的截面是相同的，则只需对其一讨论即可，这里就以铁心柱截面设计为例，对其进行研究。对于电力变压器铁心柱截面是在圆形的线圈筒里面。为了充分利用线圈内空间又便于生产管理，心式铁心柱截面常采用多级阶梯形结构，如图 3 所示。截面在圆内上下和左右都轴对称。阶梯形的每级都是由许多同种宽度的硅钢片迭起而成。同时受到制造工艺的要求，如硅钢片的宽度一般取为 5 毫米的倍数、铁心柱的级数限制等[15-17]。

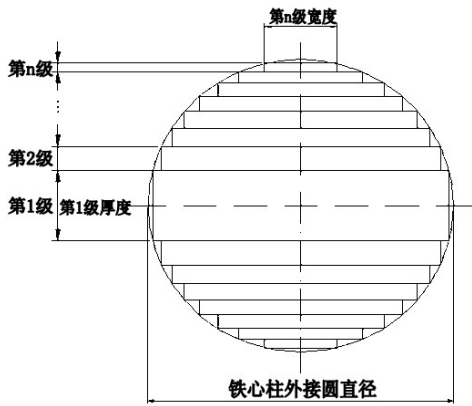


图 3 铁心柱截面示意图

要实现铁心柱有效截面尽量大，就需对其进行优化设计。本文以外接圆直径为 800mm 的铁心柱为例，给出其具体的优化设计方案，其他情况时与此类同。

设第  $i$  级硅钢片的宽度为  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，第  $i$  级硅钢片的厚度为  $y_i$ ，级数为  $n$ ，叠片系数为  $k$ ，铁心柱的有效截面积为  $S$ ，几何截面积  $S'$ ，于是可建立如下非线性混合整数规划模型：

$$\begin{aligned} \max \quad & S = k \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} x_i = 5 \times lx(i), \quad lx(i) \text{ 为整数} \\ y_1 \geq 26 \\ x_n \geq 20 \\ \left( \frac{x_i}{2} \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^i \frac{y_j}{2} \right)^2 \leq \left( \frac{800}{2} \right)^2 \\ x_1 < 800 \\ \sum_{i=1}^n y_i < 800 \\ x_i > x_{i+1} \\ 15 \leq n \leq 17 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

在模型的求解中，首先利用lingo优化软件编程求解，然后在此基础上利用邻域搜索法对其进行进一步地寻求更优解，经过数学软件Mathematica的编程求解后可得到其更优解为：铁心柱几何截面积的最大值为  $488855 \text{ mm}^2$ ，铁心柱有效截面积的最大值为  $488855 \cdot k \text{ mm}^2$ ，铁心填充系数（圆截面利用系数）为 97.2546%，而原利用系数仅为 93.48% [15-16]，提高了 3.7746%。其优化后对应的铁心柱截面的级数为 17 级，各级的宽度和厚度如表 1 所示。

表 1 铁心柱截面经优化设计后的最优解

级数	宽度 $x/\text{mm}$	厚度 $y/\text{mm}$
1	790	126
2	775	72
3	755	66
4	730	63
5	700	60
6	670	50
7	635	49
8	600	43
9	560	42
10	520	37
11	475	36
12	430	31
13	380	29
14	325	27
15	265	24
16	195	21
17	115	16

### 3.2 初步优化后的节能减噪效益

经初步优化后铁心填充系数得到了提高，实现了铁心截面积的增加，初步实现了对电力变压器的节能与减噪。由上述电磁理论分析与优化设计，可知优化后的有效截面积  $S'$  与原来的有效截面积  $S$  的关系、当绕组匝数  $N$  不变时优化后的磁密  $B'$  与原

来的磁密  $B$  的关系以及当磁密  $B$  不变时优化后的绕组匝数  $N'$  与原来的绕组匝数  $N$  的关系分别为:

$$\begin{cases} S' = 1.0404S \\ B' = 0.961B \\ N' = 0.961N \end{cases} \quad (11)$$

由此可知经优化后铁心截面将增加 4.04%。当绕组匝数  $N$  不变时, 经优化后磁通密度将减少 3.9%; 当铁心磁密  $B$  不变时, 经优化后绕组匝数将减少 3.9%。

则根据电力变压器的节能理论, 可知当绕组匝数不变而磁通密度减少 3.9% 时, 对于其铁心重量将增加 4.04%, 而对于空载损耗的第一种计算方法, 由于附加损耗只占空载损耗的小部分(这里取 5%), 又知磁滞损耗与涡流损耗各占剩余的 50%<sup>[15-16]</sup>, 于是能求出空载损耗减少 3.15%; 对于空载损耗的第二种计算方法, 可直接得出空载损耗将减少 3.92%; 对这两种方法进行期望值求解, 便可得到优化后的空载损耗比原来的空载损耗减少了 3.535%。

而当铁心磁密  $B$  不变而绕组匝数减少 3.9% 时, 对于其铜导线质量将减少 3.9%, 对于其负载损耗, 按第一种计算方法和第二种计算方法, 计算出的结果都是降低负载损耗 3.9%, 于是可知优化后的负载损耗比原来的负载损耗减少了 3.9%。

根据电力变压器的减噪机理分析, 可得出优化后噪声将降低 1.107dB。在此基础上, 加上对当前已有的传统减噪方案<sup>[4-7]</sup>进行综合, 如在声源上, 尽量降低铁心窗高与直径的比值; 采用全斜交错接缝的铁心结构; 改善铁心夹紧力和绑扎力等。在传播过程中, 在铁心垫脚与箱底、箱底与地基之间分别加上减振橡胶板; 设置隔音措施等。将这些传统减噪方案进行综合, 一般能将电力变压器的噪声减少 15~30dB<sup>[15-16]</sup>, 这里取其期望值, 即 22.5dB, 这样再结合本文的优化方法, 则最终将能减噪 23.607dB, 因优化而进一步减噪 4.92%。

#### 4 节能减噪的进一步优化设计

通过对电力变压器的节能减噪进行初步优化后, 可很好地使铁心截面得到增加, 初步实现对其节能与减噪。但在对其节能减噪的具体设计时, 只考虑了当绕组匝数或铁心磁密不变时的情况, 没有同时兼顾节能与减噪, 且没引入对总成本的考虑。对此, 本文还需对电力变压器节能减噪做进一步优

化, 在进一步优化过程中, 需同时兼顾节能与减噪, 且考虑绕组匝数与铁心磁密的同时变化以及总成本的问题。

##### 4.1 设计变量的选择

由于根据电磁理论  $U = 4.44fNBS$  与初步优化分析可知, 当  $U$ 、 $f$  一定时,  $NBS = \text{常数}$ 。经初步优化铁心截面积  $S$  增加后, 绕组匝数  $N$  与铁心磁密  $B$  并不是其中一个一定不变, 还有可能同时减小。对此假设经进一步优化后铁心磁通密度将减少  $\alpha\%$ , 绕组匝数将减少  $\beta\%$ , 噪声进一步减少量为  $Z$  dB, 经济总成本将节省  $Y$  元, 电力变压器原来的空载损耗为  $P_0$  kW, 负载损耗为  $P_k$  kW, 原来的铁心

质量为  $m_{Fe}$  t, 原来的铜线质量为  $m_{Cu}$  t。

##### 4.2 多目标函数的建立

由于希望减小噪声越多越好, 同时希望节省能量损耗越多越好且经济成本越节省越好, 即考虑能量损耗下的总成本节省越多越好, 对此建立以下双目标函数:

(1) 噪声减小最大

$$\max Z = \frac{\alpha\%}{3.9\%} \cdot |\Delta L_{PA}| \quad (12)$$

(2) 考虑能量损耗下经济总成本节省最多

由于当铁心磁通密度减少 3.9% 时, 将减少空载损耗 3.535%, 增加铁心重量 4.04%; 而减少绕组匝数 3.9% 时, 能降低负载损耗 3.9%, 减少铜导线质量 3.9%。对此将其近似处理为线性关系, 则有当铁心磁通密度减少  $\alpha\%$  时, 将减少空载损耗  $0.906\alpha\%$ , 增加铁心重量  $1.036\alpha\%$ ; 而减少绕组匝数  $\beta\%$  时, 将降低负载损耗  $\beta\%$ , 减少铜导线质量  $\beta\%$ 。

按照电力变压器实用技术大全的一个普遍的国际规定<sup>[18]</sup>, 以电力变压器预期寿命为 25 年以上为准, 规定 1kW 空载损耗的成本值为 45000 元/kW, 规定电力变压器运行寿命期间 1kW 负载损耗的成本值为 9750 元/kW, 且已知现在的铜导线的价格为 70000 元/t 左右, 硅钢片价格为 20000 元/t 左右, 这里取 70000 元/t 和 20000 元/t, 则有考虑能量损耗下的经济总成本节省最多为:

$$\max Y = P_0 \cdot 0.906\alpha\% \times 45000 + P_k \cdot \beta\% \cdot 9750 + m_{Cu} \cdot \beta\% \cdot 70000 - m_{Fe} \cdot 1.036\alpha\% \cdot 20000 \quad (13)$$

#### 4.3 多目标非线性数学模型的建立

基于目标函数的建立和前面的分析，则可建立如下多目标非线性数学模型。

$$\begin{aligned} \max Z &= \frac{\alpha\%}{3.9\%} \cdot |\Delta L_{PA}| \\ \max Y &= P_0 \cdot 0.906\alpha\% \times 45000 + P_K \cdot \beta\% \cdot 9750 + \\ &\quad m_{Cu} \cdot \beta\% \cdot 70000 - m_{Fe} \cdot 1.036\alpha\% \cdot 20000 \quad (14) \\ s.t. \begin{cases} \Delta L_{PA} = 10 \cdot \lg[(\frac{0.961B}{B})^8 \times (\frac{1.0404G_{Fe}}{G_{Fe}})^{1.6}] \\ 4.44 fNBS = 4.44 fN'B'S' \\ S' = 1.0404S \\ B' = (1-\alpha\%)B \\ N' = (1-\beta\%)N \\ 0 \leq \alpha\% \leq 3.9\%, 0 \leq \beta\% \leq 3.9\% \end{cases} \end{aligned}$$

#### 4.4 多目标数学模型的化简

对于一个多目标决策问题，首先应将多目标规划模型转化为单目标规划模型来求解。由于这两个目标函数的量纲存在不同，且两个函数间有着相互影响，存在非线性关系，不能采用一般的线性加权法处理，对此本文考虑双方满意度最佳，采用非线性加权综合法对双目标函数进行处理，转化为单一目标，简化后的非线性数学模型为：

$$\begin{aligned} \max W &= \sqrt{Z \cdot Y} \\ s.t. \begin{cases} Z = \frac{\alpha\%}{3.9\%} \cdot |\Delta L_{PA}| \\ Y = P_0 \cdot 0.906\alpha\% \times 45000 + P_K \cdot \beta\% \cdot 9750 + \\ \quad m_{Cu} \cdot \beta\% \cdot 70000 - m_{Fe} \cdot 1.036\alpha\% \cdot 20000 \\ \Delta L_{PA} = 10 \cdot \lg[(\frac{0.961B}{B})^8 \times (\frac{1.0404G_{Fe}}{G_{Fe}})^{1.6}] \\ 4.44 fNBS = 4.44 fN'B'S' \\ S' = 1.0404S \\ B' = (1-\alpha\%)B \\ N' = (1-\beta\%)N \\ 0 \leq \alpha\% \leq 3.9\% \\ 0 \leq \beta\% \leq 3.9\% \end{cases} \quad (15) \end{aligned}$$

#### 5 优化设计实例及讨论

利用上述最优设计方案，以SZ10-40000/110 有载调压主电力变压器为例<sup>[16]</sup>，已知其额定容量为 40000kVA，高压绕组额定电压为 110kV，空载损耗为 25.4kW，负载损耗为 148.8kW，铜导线质量 8628kg，硅钢片质量为 19402kg，铁心工作磁密为 1.7T。对此将已知参数代入数学模型，利用Lingo优化软件编程求解，然后再对其进行对比计算，可得到SZ10-40000/110 电力变压器原方案与优化设计方案经比较后的优化效果，如表 2 所示。通过比较发现，达到了既减噪又节能且节省经济成本的多重期望，优化效果比较显著。

表 2 SZ10-40000/110 电力变压器原方案与优化设计方案经比较后的优化效果

优化指标	优化效果
铁心截面	增加 4.04%
磁通密度	减少 2.8%
绕组匝数	减少 1.1%
空载损耗	减小 2.54%
空载损耗成本/元	减少 28995.62
负载损耗	减小 1.1%
负载损耗成本/元	减少 15958.8
铁心重量	增加 2.9%
铁心成本/元	增加 11256.26
铜导线重量	减少 1.1%
铜线成本/元	减少 6643.56
进一步减噪/dB	减少 0.795 (3.5%)
变压器总噪声/dB	减少 23.295
变压器总成本/元	节省 40341.72

#### 6 结束语

本文提出了一种既能使电力变压器节能，同时又能减噪的双目标优化设计。该优化设计首先分析了电力变压器的节能理论与减噪机理，在节能理论中主要包含空载损耗和负载损耗的理论计算知识，在减噪机理中主要介绍了噪声实测值与噪声变化量的确定理论；其次在此基础上做了对电力变压器节能减噪的初步优化设计，探寻出了一种新型初始优化方案，并以外接圆直径为 800mm 的铁心柱为例，给出了其具体的初步优化设计方案；然后，结合了电力变压器的节能理论和减噪机理，研究了初步优化后的节能效益与减噪效果；最后，对节能减噪进行了进一步优化，提出了一种同时兼顾节能与减噪并考虑总成本的新型多目标优化设计，使其能很好地实现节能与减噪，并以 SZ10-40000/110 有载调压主电力变压器为例进行了实例优化与讨论，验证了该优化设计的有效性和先进性。

#### 参考文献：

- [1] 胡景生.变压器能效与节电技术[M].北京：机械工业出版社,2007.
- [2] Zhang Zhigang, Liu Lianxiao. Analysis of the economic benefits to new energy-saving distribution transformer[C]. China International Conference on Electricity Distribution, 2008.
- [3] Sun Yupiny. Energy-saving unit in the wind-cooling system of the transformer[C].2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007.

- [4] 谭闻,张小武.电力变压器噪声研究与控制[J].高压电器,2009. 45(2): 70-72,76.
- [5] 张贤国,康宏彪, 陈宇鹏.降低大型电力变压器铁心噪声的工艺措施[J].电气制造,2010(12): 32-33,42.
- [6] Girgis R.S, Bernesjo M.S. Development of Ultra-Low-Noise Transformer Technology[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2011
- [7] 王和忠.浅谈低噪声变压器的设计与工艺[J].变压器,2007,44(6): 4-6.
- [8] 单晓红,曾令通,王亚忠.节能型变压器节能运行方式的探讨[J].电力系统保护与控制,2009(8).
- [9] Bin Zhang, Yong Liu, Kuo Zhao. Transformer loss calculation and analysis driven by load harmonic[C]. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011.
- [10] 姚宏.中小型电力变压器及干式变压器的双目标最优设计[J].中国电机工程学报,1993,13(3).
- [11] 郭卉.改进遗传算法在牵引变压器优化设计中的应用[J].中国电机工程学报,2005,25(4): 119-123.
- [12] 胡蓉芳,蔡宣三.应用离散规划算法的电力变压器优化设计[J].中国电机工程学报,1991,11(5):48-53.
- [13] 朱燕春.变压器铁心重量计算方法[J].变压器,2008(10):9-10.
- [14] 何此昂.变压器与电感器设计方法及应用实例[M].人民邮电出版社,2011.
- [15] 赵静月.变压器制造工艺[M].北京:中国电力出版社,2009
- [16] 姚志松,姚 磊.变压器节能方法与技术改造应用实例[M].北京:中国电力出版社,2009
- [17] 蒋雪峰,李洁.对电力变压器铁心柱截面的新型优化设计[J].高压电器,2011,47(02):80-83.
- [18] Martin J.Heathcote, The J & P Transformer Book, 13thEdition[M]. ButlerworthsPress, 2007.
- 
- 作者简介:**
- 蒋雪峰(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力电子与电力传动、电机与电器、变压器优化, E-mail: jxf3428@163.com;
- 黄文新(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电机与电器、电力电子与电力传动、新型风力发电技术、现代调速技术、电能变换、航空电源等。