

DOI: 10.7667/PSPC152001

大型电力变压器内绕组辐向抗短路能力评估

郑含博¹, 翟进乾², 李哲³, 陈鑫², 蒲兵舰¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450006;
3. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 随着电网容量和电压等级的提高, 大型电力变压器短路导致的恶性事故不断增加, 这种情况已直接威胁电网安全运行。通过对大型电力变压器漏磁通及短路电动力分析, 指出变压器内绕组的辐向失稳已成为绕组耐受短路的首要问题。研究了电力变压器内绕组辐向电动力计算和抗短路能力校核评估方法, 并给出了变压器绕组线饼的临界失稳强度和抗短路能力评估计算流程。最后通过具体实例并依据四种改进措施进行对比分析, 提出提高变压器抗短路能力具体的改进措施。

关键词: 电力变压器; 漏磁通; 内绕组; 辐向电动力; 抗短路能力

An assessment of ability to withstand radial short circuit of large power transformer inner windings

ZHENG Hanbo¹, ZHAI Jinqian², LI Zhe³, CHEN Xin², PU Bingjian¹

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;
2. State Grid Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450006, China;
3. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: With the increasing of power grid capacity and voltage level, the serious accidents caused by a large power transformer short-circuit are increased, and this situation has a direct threat to the safe operation of the grid. Through analysis of the large power transformer leakage flux and short-circuit electromagnetic forces, the radial mechanical instability of transformer inner winding is pointed out, then a radial electromagnetic force calculating and an assessment of ability to withstand short-circuit on inner windings are researched. Moreover, the critical destabilization strength of winding pies and assessment process of the ability to withstand short-circuit for large power transformers are given. At last, the improvement measures to increasing the ability to withstand short-circuit for transformers are proposed based on case studies and four kinds of comparative analysis.

Key words: power transformers; leakage flux; inner windings; radial electromagnetic force; ability to withstand short-circuit

0 引言

随着西电东送、南北互供、全国联网的推进, 保证电网安全稳定运行工作面临巨大挑战, 电力设备安全运行是电网安全稳定运行的基础, 尤其是作为电力系统的关键枢纽设备, 大型电力变压器的健康水平和运行状况好坏直接关系到电网运行的安全与稳定^[1]。电力变压器一旦发生故障可能会造成设备资产和大停电等巨大损失, 甚至会产生严重的社会影响^[2]。随着电网容量和电压等级的提高, 变压器短路故障导致的恶性事故不断增加, 这种情况已

直接威胁电网安全运行^[3-6]。

变压器发生突然短路故障时, 绕组内流过很大的短路电流, 可能为额定电流的几倍甚至几十倍, 从而使线圈受到很大的电动力, 最大电动力有可能迅速激增到额定负载运行时的几百倍甚至更大。在巨大短路电动力作用下, 可能会导致变压器绕组永久变形、绝缘损坏、机械强度下降, 甚至造成变压器的损坏。因此, 必须研究变压器对短路电动力的耐受能力以及对绕组等构件在短路情况下的机械强度进行评估。

短路试验为特殊试验, 受试验条件的限制^[7-8],

大容量变压器不能保证具备短路试验的条件, 因此再加上试验成本等经济原因, 往往很难对其承受短路的动稳定能力进行校验评估。

国内外研究者采用不同方法对变压器抗短路能力进行了研究。前苏联学者对变压器绕组的静态短路强度研究做了大量的工作^[9]; 日本学者在进行 400 多次模型试验的基础上, 提出了采用塑性理论的电动力强度计算模型, 并给出了模型参数的经验系数^[10]。文献[11]提出了考虑铁心各向异性计算变压器漏磁场的方法, 计算了变压器阻抗和电动力, 同时证明了考虑铁心各向异性与不考虑铁心各向异性对阻抗和动力数值影响不大。还有文献采用有限元分析(Finite-Element Analysis, FEA)的方法研究了变压器绕组所受的短路电动力^[12-14]。目前, 由于国内各变压器制造厂在抗短路能力方面的研究发展很不平衡, 尚没有统一的抗短路能力评估和校核方法可以借鉴。另外, 考虑到变压器的内绕组是抵抗短路电动力的薄弱环节^[10,15], 尤其其辐向失稳已成为绕组耐受短路的首要问题。本文在参考大量标准规程和实例计算的基础上, 给出了变压器内绕组辐向短路电动力计算和抗短路能力的校核评估方法, 并通过实例分析提出了提高电力变压器抗短路能力需要采取的进一步措施, 具有重要的理论和工程实际意义。

1 电力变压器漏磁通及短路电动力分析

当变压器绕组中流过负载电流或短路电流时, 就会在绕组所占空间及其周围空间产生漏磁通, 漏磁通与绕组中的暂态电流相互作用, 在绕组内产生电磁机械力(电动力), 其大小决定于漏磁通密度与绕组线圈中电流的乘积, 可用洛伦兹力表示为

$$dF = idl \times B \quad (1)$$

式中: F 表示电动力(N); B 表示磁通密度(T)。

设 Φ 为磁通的方向矢量, J_Φ 表示 Φ 方向的短路电流密度, r 、 a 分别表示辐向和轴向上的单位矢量, 则漏磁通密度 B 可分解为轴向分量 B_a 和辐向分量 B_r 。根据左手定则, 轴向漏磁通 B_a 产生辐向力 F_r , 辐向漏磁通 B_r 产生轴向力 F_a 。因此, 绕组所受的电动力可以分解为辐向和轴向部分:

$$F = \int J_\Phi \Phi \times (B_r r + B_a a) = F_r r + F_a a \quad (2)$$

轴向电动力使绕组在轴向上被压缩, 产生轴向位移和轴向机械振动; 辐向电动力使内绕组(对于心式变压器, 一般指低压和中压绕组)被压缩, 外绕组(高压绕组)被拉伸。由于磁力线在绕组端部弯曲而产生的辐向漏磁分量与轴向漏磁分量相比, 其值较小, 故通常可以认为电流产生的轴向漏磁通是主要

的^[16]。因此, 本文主要讨论变压器内绕组在轴向漏磁通作用下所受的辐向电动力情况。

图 1 为同心式绕组轴向漏磁通分布和所受辐向电磁电动力示意图。

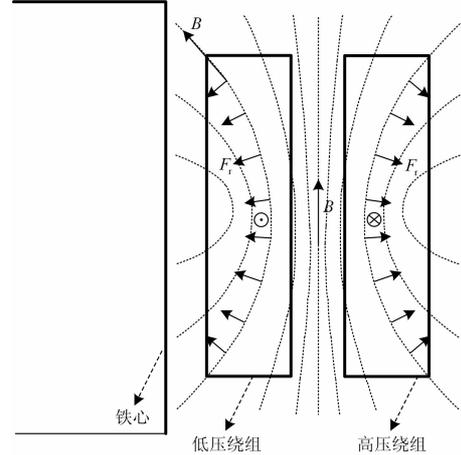


图 1 同心式绕组轴向漏磁通分布和所受电磁力

Fig. 1 Electromagnetic force and axial leakage flux distribution in concentric windings of a power transformer

从图 1 可以看出, 由于高、低压绕组的电流方向相反, 突然短路时作用于两个绕组上的辐向力将把两个绕组推开, 从而使高压绕组受到向外的张力, 低压绕组受到向内的压力。由于导线的抗弯强度远低于抗拉强度^[17-18], 内绕组机械失稳成为绕组耐受短路的主要问题。当内线圈受到压缩短路力的作用时, 线圈的导线直径将变小, 这将导致线饼向铁心方向塌陷变形或多余长度的导线从个别部位突出, 这就是内线圈的机械失稳。

2 内绕组辐向抗短路能力评估

2.1 最大短路电流峰值

考虑到电力变压器结构、磁场和短路力的分布特点, 工程中研究绕组电动力问题一般忽略不同相绕组间的相互影响。因此, 可用单相变压器等值电路来简化分析突发短路时短路电流的瞬变过程^[18-19]。

工频下, 当变压器二次侧突发短路时, 一次侧电路的微分方程为

$$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha) = L_s \frac{di}{dt} + iR_s \quad (3)$$

式中: α 为系统电压的初相角; L_s 为短路电感; R_s 为短路电阻。

求解式(3)的微分方程, 可得短路电流的通解为

$$i = \sqrt{2}I_s \left[\cos \alpha \cdot e^{-\frac{R_s}{L_s} t} - \cos(\omega t + \alpha) \right] \quad (4)$$

由式(4), 短路电流的峰值与初相角 α 有关, 当

$\alpha=0$ 时, 短路电流的瞬时值在 $\omega t=\pi$ 时达到最大值 I_m 。则最大短路电流的峰值为

$$I_m = \sqrt{2}I_s(1 + e^{-\frac{R_s}{L_s} \cdot 0.01}) = \frac{\sqrt{2}KI_k}{Z_k} \quad (5)$$

式中: K 为冲击系数, 根据 IEC 60076-5:2006 和 GB 1094.5-2008^[7-8], 对容量为 100 000 kVA 及其以上的变压器, 一般取 $K=1.9$; I_k 为线圈的额定电流(A); Z_k 为短路阻抗(%)。

2.2 绕组每一线饼的平均受力

由最大短路电流峰值容易得到, 最大漏磁通密度为

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_m}{H_w} = \frac{1.256N \cdot I_m}{H_w} \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中: $\mu_0=1.256 \times 10^{-6}$ 为真空(空气)的磁导率(H/m); N 为线圈匝数; H_w 为线圈几何高度(mm)。

因此, 可计算线圈每匝导线单位长度受力为

$$F_u = \frac{1}{2} B_m \cdot I_m \quad (7)$$

则整个绕组内线圈的辐向力为

$$F_r = \pi D \cdot N \cdot F_u = \frac{1.97(I_m N)^2 D}{H_w} \times 10^{-6} \quad (8)$$

式中, D 为线圈的平均直径(mm)。

可以计算绕组每一线饼所受的电动力(线饼的平均受力)为

$$F_C = \frac{F_r}{\pi D \cdot M_1} \quad (\text{N/mm}) \quad (9)$$

式中, M_1 表示绕组线饼的个数。

2.3 线饼的临界失稳强度和抗短路能力评估

对于普通导线^[17], 导线惯性矩公式为

$$I = \frac{1}{12} \times n_b^y \cdot b^3 \cdot n_t \cdot t \quad (\text{mm}^4) \quad (10)$$

式中: n_b 表示线饼中辐向导线根数; 参数 Y 表示线股间粘结状态的经验系数, 通常 $1 \leq Y \leq 3$, 对于普通导线 $Y=1$, 若导线匝绝缘的外层涂热固性胶, $Y=1.4$; b 为单根导线的辐向宽度(mm); n_t 为线饼中轴向的导线根数; t 为单根导线的轴向高度(mm)。

对于换位导线, 导线惯性矩公式为

$$I = \frac{1}{6} \times \left(\frac{x}{2}\right)^y \cdot b^3 \cdot n^{1.5} \cdot t \quad (\text{mm}^4) \quad (11)$$

式中: x 表示一根换位导线内导线的股数; 对于自粘性换位导线取 $Y=2.3 \sim 2.5$ (本文取 $Y=2.3$); n 表示每一线饼内换位导线的根数。

则可以计算每个线饼的临界失稳强度为

$$F_B = \frac{E \cdot I}{R^3} (m^2 - 1) \quad (\text{N/mm}) \quad (12)$$

式中: E 表示铜导线的弹性模量, 对于软铜线, 一般取 $E=1.25 \times 10^5$ (N/mm²); R 为线圈的平均半径(mm); m 为内线圈的有效支撑数, 一般取实际支撑数的一半。

因此, 当内线圈的辐向失稳平均临界强度 F_B 大于短路时辐向电动力 F_C 时, 内线圈就不会发生失稳, 即说明线圈机械强度可以承受短路产生的力。但由于铁心柱与内绕组间有纸筒和撑条, 不是理想化的紧密接触, 绝缘件在运行中受热收缩等因素的影响, 实际的失稳平均临界强度比计算值要小, 因此本文采用如下的安全系数, 即满足

$$Q = \frac{F_B}{F_C} > 2.0 \quad (13)$$

绕组抗短路能力评估可以总结为如图 2 所示的流程图表示。

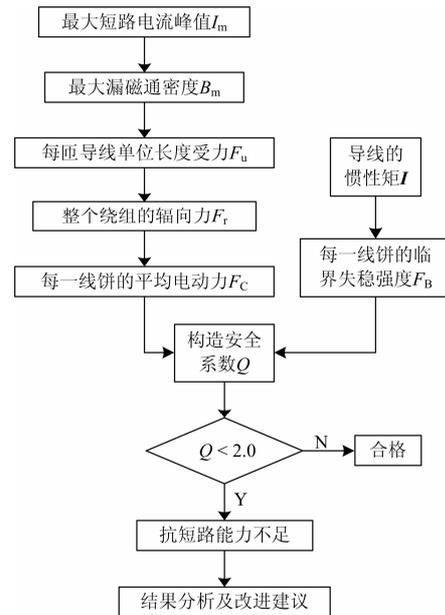


图 2 绕组抗短路能力评估流程图

Fig. 2 Flowchart of assessment of ability to withstand winding short circuit

3 实例分析及提高措施

某变电站 1 号主变型号为 SFSZ10-180000/220, 高中低压侧容量为 180/180/90 MVA, 额定电压为 $230 \pm 8 \times 1.25\% / 121 / 38.5$ kV。2012 年初该主变发生出口短路, 油色谱分析发现油中氢气、乙炔和总烃含量均超标, 直流电阻测试发现中压绕组不平衡, 不平衡系数为 10%。事后吊心检查发现 B 相中压线圈发生辐向失稳, 线圈中部严重变形, 呈不规则的多边形, 匝间发生了放电。

表 1 为该变压器中压绕组参数, 由 2.3 节计算

分析, 原始内线圈(中压绕组)安全系数 Q 仅为 0.02, 远小于 2.0 的安全水平。下面分别采取四种改进措施进行对比分析。

1) 加强内线圈的有效支撑数。增加了 16 根有效撑条数, 即内线圈的有效支撑数 m 增加 1 倍。

2) 加大中压绕组导线的辐向厚度。导线的辐向厚度 b 由 1.9 mm 增大为 6.0 mm。

3) 增大绕组导线的规格同时加强内线圈的有效支撑数。即导线的辐向厚度 b 由 1.9 mm 增大为 6.0 mm, 且线圈的有效支撑数 m 增加 1 倍。

4) 采用自粘性换位导线绕制。其中, 一根换位导线内导线的股数 $x=13$, 每一线饼内换位导线的根数 $n=7$ 。

表 1 变压器绕组参数

Table 1 Parameters of the transformer inner winding

序号	相关参数	单位	数值
1	线圈匝数 N	/	311
2	线圈几何高度 H_w	mm	1 952
3	线圈的线饼数 M_1	/	102
4	内线圈的平均直径 D	mm	1 326
5	内线圈的有效支撑数 m	/	16
6	每根导线的辐向厚度 b	mm	1.9
7	每根导线的轴向厚度 t	mm	7.5
8	线饼中辐向导线的根数 n_b	/	3
9	线饼中轴向导线的根数 n_t	/	1
10	线圈额定电流 I_k	A	858.89
11	短路阻抗 Z_k	%	14.54

表 2 给出了改进前后内线圈中压绕组辐向失稳的计算结果。可以看出, 内线圈的有效支持数增大

表 2 辐向失稳计算结果

Table 2 Results of radial short-circuit forces and safety factors

序号	计算结果	单位	普通非换位导线	改进 1	改进 2	改进 3	改进 4
1	短路电流最大峰值 I_m	A	15 872.37	15 872.37	15 872.37	15 872.37	15 872.37
2	最大漏磁通密度 B_m	T	3.18	3.18	3.18	3.18	3.18
3	线圈每匝导线单位长度受力 F_u	N	25 207.15	25 207.15	25 207.15	25 207.15	25 207.15
4	整个内线圈(绕组)的辐向力 F_r	N	32 608 753.10	32 608 753.10	32 608 753.10	32 608 753.10	32 608 753.10
5	内线圈每一线饼的受力 F_c	N/mm	76.78	76.78	76.78	76.78	76.78
6	换位导线的惯性矩 I	mm ⁴	12.86	12.86	405.00	405.00	11 763.01
7	每个线饼(内线圈)的临界失稳强度 F_B	N/mm	1.41	5.64	44.30	177.71	1 286.56
8	内线圈(低压绕组)安全系数 Q	/	0.02	0.07	0.58	2.31	16.76

4 结论

本文研究了大型电力变压器内绕组的辐向抗短路能力问题。详细分析了电力变压器的漏磁通及短路电动力。在参考大量标准规程和实例计算的基础上, 给出了变压器内绕组辐向短路电动力计算和抗

1 倍, 安全系数增大为原来的 3.5 倍; 导线的辐向厚度增大为原来的 2 倍, 安全系数增大为原来的 29 倍; 增大绕组导线的规格并同时加强内线圈的有效支撑数, 安全系数增大为原来的 115 倍, 安全系数 $Q=2.31$, 绕组抗短路能力满足要求; 采用自粘性换位导线后, 内线圈中压绕组的安全系数变为原来的 838 倍, 安全系数 $Q=16.76$, 远大于安全裕度水平, 大大提高了绕组辐向抗短路耐受能力。

经过抗短路评估分析, 低压绕组原本采用自粘性换位导线绕制, 安全系数满足要求, 而中压绕组导线仅为普通铜导线。事后在现场对中压绕组进行了修复, 更换了 B 相中压线圈, 并采用自粘性换位导线绕制, 内线圈内衬硬纸筒。

根据前面的分析, 提高变压器抗短路能力的关键是解决好低压(内)线圈的辐向强度, 建议采取措施如下:

1) 首先从设计工艺上, 内绕组线圈宜采用自粘性换位导线, 材料上最好采用半硬铜导线来提高导线的自身硬度。

2) 加强辐向上的有效支撑, 应合理增加内径的有效撑条数, 并应采取铁心撑圆、内衬硬纸筒等提高辐向机械强度的措施。

3) 在保证损耗等经济性指标前提下, 应加大内绕组导线的辐向厚度、轴向厚度。

4) 改善变压器的运行条件, 采取在变压器低压侧母线桥加装热缩材料、在低压侧出线包封绝缘护套等措施减少出口或近区发生对地或相间短路的机率, 尽量避免变压器遭受短路冲击。

短路能力的评估方法, 并通过实例分析提出了提高电力变压器抗短路能力需要采取的进一步措施, 具有重要的理论和工程实际意义。通过对变压器抗短路能力的评估, 使工程师能准确掌握变压器抗短路性能, 从而有的放矢地开展变压器状态检修, 保障电网主设备安全可靠运行。

参考文献

[1] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.

[2] 尚海昆, 苑津莎, 王瑜, 等. 多核多分类相关向量机在变压器局部放电模式识别中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 222-228.
SHANG Haikun, YUAN Jinsha, WANG Yu, et al. Partial discharge pattern recognition in power transformer based on multi-kernel multi-class relevance vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 222-228.

[3] 余文辉, 王沾, 曾祥君, 等. 基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 78-85.
YU Wenhui, WANG Zhan, ZENG Xiangjun, et al. Reliability tracing analysis for multi-state power transformers using Bayesian network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 78-85.

[4] 周天春, 杨丽君, 廖瑞金, 等. 基于局部放电因子向量和 BP 神经网络的油纸绝缘老化状况诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 18-23.
ZHOU Tianchun, YANG Lijun, LIAO Ruijin, et al. Diagnosis of aging condition in oil-paper insulation based on factor vectors of partial discharge and BP neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 18-23.

[5] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.

[6] 李锦彪. 曲折形联结变压器短路阻抗计算的能量法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 424-426.
LI Jinbiao. Calculation of Zigzag transformer impedance using energy method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 424-426.

[7] GB 1094.5-2008 电力变压器-第五部分: 承受短路的能力[S].
GB 1094.5-2008 power transformers-part 5: ability to withstand short circuit[S].

[8] IEC 60076.5: 2006. power transformers-part 5: ability to withstand short-circuit[S].

[9] 李洪奎. 大型电力变压器绕组短路强度与稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
LI Hongkui. Study of short-circuit strength and stability of windings in large power transformer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.

[10] 瓦修京斯基. 变压器的理论与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[11] AUGUSTO D N, ROBERTO P. A model of anisotropic grain-oriented steel[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 1983, 19(4): 150-156.

[12] RAHIMPOUR E, CHRISTIAN J, FESER K, et al. Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2): 493-505.

[13] AHN H M, LEE J Y, KIM J K, et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1267-1271.

[14] AHN H M, OH Y H, KIM J K, et al. Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2012, 48(2): 819-822.

[15] 洛君婷, 谢德馨, 李晓峰, 等. 变压器绕组导线对抗短路能力的影响[J]. 变压器, 2010, 47(5): 16-18.
LUO Junting, XIE Dexin, LI Xiaofeng, et al. Influence of conductor in transformer winding to ability to withstand short circuit[J]. Transformer, 2010, 47(5): 16-18.

[16] 王世山, 李彦明. 电力变压器绕组电动力分析计算[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 22-25.
WANG Shishan, LI Yanming. Computation of electrodynamic force on windings of power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 22-25.

[17] 杨帆. 变压器抗短路能力现场校核方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
YANG Fan. Study on local calibration method for short circuit withstand ability of transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.

[18] 于怀金. 大型变压器漏磁场及短路电动力计算与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
YU Huajin. Calculation and analysis on leakage magnetic field and short-circuit electromagnetic force in large[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2011.

[19] 梁振光. 大型变压器场路耦合三维瞬态涡流场和绕组短路强度的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2001.
LIANG Zhenguang. Research on field-circuit coupled 3D transient eddy current field and winding short-circuit strength in large transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2001.

收稿日期: 2015-11-15; 修回日期: 2015-12-13

作者简介:

郑含博(1984-), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 主要从事电力变压器绝缘状态评估和智能诊断技术研究. E-mail: seeksky163@163.com

(编辑 魏小丽)