

Review of Effective Function of Oil Immersed Transformer of 35 kV

Yan Wang

Pingdu Electric Power Corporation of Qingdao of Shandong Electric Power Incorporation, Qingdao
Email: wangyan1243@163.com

Received: Nov. 23rd, 2012; revised: Nov. 27th, 2012; accepted: Jan. 14th, 2013

Abstract: Oil immersed transformer is used as an important part of state grid for transforming 35 kV, so as high qualities of stability, economy and energy conservation. It is widely used for fast heat dissipation, less wastage and low cost. However, because of the less effective use of the oil immersed transformer of 35 kV, the cost is high without full use before coming to the end. By the evaluation of life of transformer, we calculate the life of insulation of transformer through Markov model for including the condition of the model. We make full use of the transformer by evaluating the state, setting up stoppage mechanism and taking care attendance. The test aims at analyzing how to make the best use of the transformer for the stability and low cost.

Keywords: Oil Immersed of 35 kV; Insulation Lifetime; Division of State; Flow of Management

35 kV 油浸式变压器有效运行综述

王 燕

山东电力青岛市平度供电公司, 青岛
Email: wangyan1243@163.com

收稿日期: 2012 年 11 月 23 日; 修回日期: 2012 年 11 月 27 日; 录用日期: 2013 年 1 月 14 日

摘 要: 35 kV 油浸式变压器作为电网 35 kV 电压等级变换的重要元件, 对其可靠、经济、节能等性能具有较高要求。由于其散热快, 损耗小、成本低等特点而被广泛应用。然而 35 kV 油浸式变压器由于在工程实际中没有合理利用造成成本较高或者未充分利用便结束役期。由于变压器的绝缘老化符合马尔可夫概率模型, 引进马尔可夫概率模型可以预测变压器的绝缘剩余寿命, 对变压器进行状态评级, 对处于不同阶段的变压器实行不同的维护, 同时对经常出现的变压器故障建立长效故障机制, 使变压器在成本许可范围内尽可能的被充分利用。

关键词: 35 kV 油浸式变压器; 绝缘寿命; 状态分级; 管理流程

1. 引言

35 kV 油浸式变压器(如图 1 所示)具有散热快、损耗低、容量大和制造运行成本低等优点而被广泛应用^[1-3]。随着发电和售电环节的市场化, 供电可靠性日益成为电网公司优质服务的重要指标。35 kV 油浸式变压器作为电网的重要组成元件其高效、可靠、节能运行成为至关重要的课题。知道每一台变压器何时退出运行, 并对处于不同运行状态的变压器进行不同的保

养和维护, 对变压器高效运行具有重要意义。

油浸式变压器在正常运行过程中, 可能遭受不同程度的电气、机械和热应力影响, 使该设备遭受损耗, 逐渐或突然丧失其功能(即故障)。综合研究物理、电气、机械和热四个方面的因素对变压器使用寿命的影响, 对变压器运行状态进行分析以及依据油浸式变压器的状态评估, 对变压器的状态进行分类, 建立变压器在运行中的状态模块, 依据经常出现的故障建立故



Figure 1. Oil immersed transformer of 35 kV
图 1. 35 kV 油浸式变压器

障措施，可以提高变压器的有效使用率和供电可靠性以及降低变压器的运行成本^[4]。

2. 油浸式变压器寿命评估

2.1. 油浸式变压器的老化

油浸式变压器投运后，由于受到运行环境等各种因素的影响，它的电气、机械、物理、化学等性能逐渐发生不可逆的劣化——绝缘老化，最终导致绝缘失效，不能继续运行^[5]。为延长电力设备的使用寿命，需针对引起老化的原因，在油浸式变压器运行时采取有效的管理方法和故障应对措施，减缓绝缘老化的过程。

变压器在刚刚投运时期发生故障的概率较大，投运一段时间后会逐步降低，然后基本维持在这个故障率水平，随着运行时间变长，故障率又开始逐步上升。这个故障率曲线的形状是“浴缸形”。

图 2 所示的 35 kV 油浸式变压器特性曲线的下部并不为零，但在曲线表示的这一段时期，油浸式变压器的故障与其使用年限无关，而是与受偶然应力或受潮、颗粒沉积、接头过热等原因引起设备的绝缘强度下降有关。此外，变压器的运行能力也受变压器的运行环境、运行时期社会的经济水平等因素的影响。

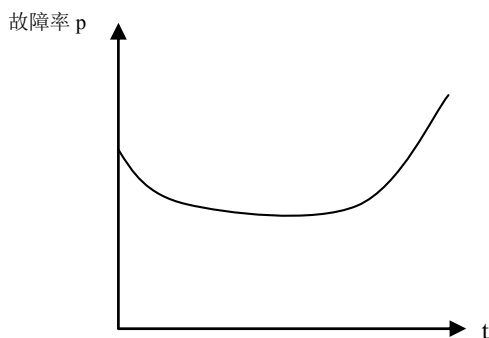


Figure 2. Characteristic curve of failure rate of oil immersed transformer of 35 kV
图 2. 35 kV 油浸式变压器故障率特性曲线

2.2. 变压器材料老化的计算

35 kV 油浸式变压器投运后，从变压器整个系统看影响变压器寿命的主要部件有：铁芯、高压绕组、低压绕组、主绝缘、绝缘油、油箱、套管等辅助设备，而其中较弱的部件是绝缘油，因此变压器的老化主要是材料的老化。因此可以用材料的老化特性和老化机理去计算变压器的老化。

油浸式变压器的绝缘材料在热应力作用下发生机械老化和化学老化。对于化学老化，假定只有一种起决定性作用的化学反应且有关的化学成份与相应的机械性能 P 之间有着相对应的关系，于是可用老化函数 $F(P)$ 表达该特性的劣变。

老化函数：

$$F(P) = Kt \quad (1)$$

式中 t ：时间；

K ：化学反应速率常数。

对于基本的化学反应：

$$K = K_0 e^{-B/T} \quad (2)$$

T ：绝对温度。

当绝缘材料特性劣变到设定的极限值即

$P = P_{E-0-L}$ 时，则绝缘材料寿命已尽。因此该材料的寿命为：

$$L = F(P_{E-0-L})/K = Ae^{B/T} \quad (3)$$

类似经验公式：

$$L = e^{-C\theta} \quad (4)$$

式中 L ：寿命；

C ：常数；

θ ：摄氏温度。

油浸式变压器的寿命公式是在一定实验条件下以材料某一特性的假定寿命标准表示该材料的寿命期限。式中，反应速率常数 P 指基本的化学反应，不过，实验表明：常数 P 和 B 均取决于变压器绝缘材料的特性，例如可以加快老化速率的温升取决于绝缘材料特性。此外，绝缘材料的各种性能的老化速率也各不相同。例如：聚合度为 20%~30% 的绝缘纸的残余抗拉强度为 40%~60%，而其残余撕裂强度为 15%~25%。

改变油浸式变压器材料机械特性的化学反应速率与发生化学反应的绝缘材料所处的环境有密切关

系, 在含氧丰富, 空气湿度较大的环境里会加快反应速率。研究表明:

当纤维素分子断链数一定时, 反应速率与湿度成正比, 富氧环境下的反应速率大约是贫氧环境下的 3 倍。

35 kV 油浸式变压器运行环境的化学条件是难以确定的, 因此寿命 - 温度关系对预测油浸式变压器绝缘材料寿命的意义不大, 然而温度因素与其它参数一样, 对油浸式变压器绝缘材料的降解起着正向作用。

2.3. 变压器的寿命

对于 35 kV 油浸式变压器, 投运几年后由于某种因素被判断不能继续担当将 35 kV 等级的电压进行变换, 则表明这台变压器的寿命结束。变压器在整个服役期间要进行总成本的估算。其中包括制造成本和运行成本。油浸式变压器与干式变压器相比虽然制造成本高, 但是运行成本低, 因此在一些不要求进行封闭的场合, 都使用油浸式变压器。影响变压器成本的因素比较复杂, 其中主要有技术因素, 经济因素和政治因素等。

虽然变压器的寿命越长越好, 但是在工程实际中油浸式变压器的寿命并不是越长越好, 因为随着变压器寿命的增加, 其寿命达到一定年限后, 变压器的故障率开始提高, 因此变压器的运行成本会升高, 而且随着时代的发展一些新的节能产品不断推进, 我们也希望能换用节能产品, 以节省电网不必要的能源损耗。

假设变压器的绝缘损坏是分阶段进行的, 直至损坏, 如果劣化状态发现, 假定经过一定的维修手段能使绝缘恢复到劣化之前的状态。

上述假定都包含在状态 - 空间(马尔可夫)模型内。取离散性随机变量模型, 通过转移概率 $P(i, j)$ 来描述, $P(i, j)$ 表示在 ΔT 时间内从状态 i 到 j 过程中一系列概率。

在图 3 中, $D_1 \dots D_k$ 代表劣化状态, D_1 为正常状态, $M_1 \dots M_k$ 代表维修状态; F_0 和 F_1 分别代表事故损坏和劣化损坏状态。希望转移时间, 即从系统的任一状态起至 F_1 所需的时间。

假定转移概率以矩阵 $P = P(i, j)$ 表示, i 和 j 代表所有状态的符号。矩阵 P 可分解为 4 个子阵。

$$P = \begin{bmatrix} Q & R \\ O & I \end{bmatrix} \quad (5)$$

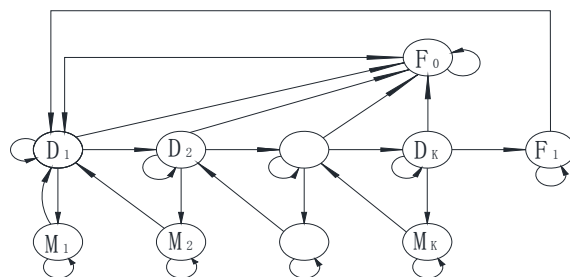


Figure 3. Insulation life of Markov model
图 3. 马尔可夫模型的绝缘寿命

式中 $I = [P(F_1, F_1)]$ (假定 F_1 为诸状态排列中的最后一个)。

Q 为 $K \times K$ 的矩阵, 表示从一个劣化状态到另一个(包括自身)劣化状态的转移概率。

R 为 $K \times 1$ 的矩阵, 表示从劣化状态到达劣化损坏状态的转移概率;

O 为 $1 \times K$ 的零矩阵, 因为从劣化损坏状态到劣化状态的概率为 0;

$$N = [I - Q]^{-1} \quad (6)$$

式中 N : 马尔可夫链的基本矩阵;

I : $K \times K$ 的单位矩阵。

$n_{i,j}$ 给出从状态 i 开始至过渡状态 j (劣化或维修状态)即在进入劣化损坏状态前的平均数。

如果我们得到变压器的劣化损坏前的状态转移数, 即可知道变压器的寿命。设 M_i 为状态 i 时所希望的绝缘剩余寿命, 则:

$$M_i = \sum_j n_{ij} T_j = \sum_j n_{ij} \Delta T_j / \sum_{K \neq j} P(j, K) \quad (7)$$

式中 ΔT_j : 处于状态 j 的平均时间。

在工程实际中选择 n 台 35 kV 的油浸式变压器, 作周期为 T 年的观察。每隔数年确定一次各自的绝缘状态。全部观察时间为 $R \cdot T$ 年, 为了求得转移率我们作 2 个劣化级并只作劣化损坏模型, 图 4 是这种情况的状态和转移概率图。

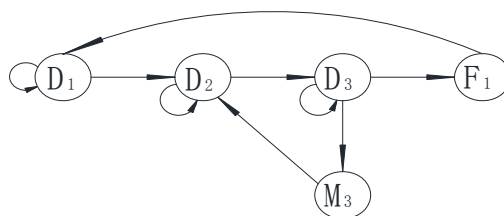


Figure 4. Five states and transition probability of Markov model
图 4. 马尔可夫模型的五种状态和转移概率

绝缘状态共有 20 个记录结果, 如表 1 所示。

观察状态 D_1 有 8 次, 紧跟仍未 D_1 者 5 次,

$$P(D_1, D_1) = 5/8, \text{ 则 } P(D_1, D_2) = 3/8.$$

$$P(D_2, D_2) = 1/2; \quad P(D_2, D_3) = 1/2;$$

$$P(D_3, D_3) = 2/5; \quad P(D_3, M_3) = 1/5;$$

$$P(D_3, F_1) = 2/5$$

转移概率矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} 5/8 & 3/8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2/5 & 1/5 & 2/5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 5/8 & 3/8 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 2/5 & 1/5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$N = \begin{bmatrix} 8/3 & 3 & 5/2 & 1/2 \\ 0 & 3 & 5/2 & 1/2 \\ 0 & 1 & 5/2 & 1/2 \\ 0 & 3 & 5/2 & 3/2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

假设 $\Delta T = 1$ 年, 对劣化状态 D_2 而言绝缘寿命为:
 $3/0.5 + 2.5/(0.2 + 0.4) + 0.5/1 = 10.67$ 年。

3. 油浸式变压器的运行状态

根据设备劣化的趋势来确定设备的状态, 即不局限于以一个阈值作为设备“合格”与“不合格”的分水岭, 而是根据劣化的趋势来识别设备的状态^[6]。在工程实践中, 我们对同类油浸式变压器的运行数据库以及变压器自投运以来的运行记录和当前变压器的

Table 1. Observation schedule

表 1. 观察记录表

观察	状态	观察	状态	观察	状态
1	D_1	7	D_1	13	D_2
2	D_1	8	D_1	14	D_3
3	D_1	9	D_2	15	D_3
4	D_2	10	D_2	16	D_3
5	D_2	11	D_2	17	F_1
6	D_2	12	D_3	18	D_1
	F_1		M_3	19	D_1
				20	D_1

试验(在线监测、预防性试验、交接试验)的数据进行分析, 将变压器设备状态划分为四类, 即正常状态、可靠性下降状态、可疑状态和危险状态, 并兼顾设备在网络中的重要性, 对维修周期及维修方案进行灵活的调整。进而针对处于不同状态的设备采用不同的维修策略。

3.1. 变压器的正常运行状态

正常状态: 指运行正常、试验数据正常或其中个别试验参数可疑, 但数据稳定的变压器。处于正常状态下的变压器, 应坚持正常在线监测、离线的周期性试验以及值班员和专业维修人员定期的巡视检查。

3.2. 变压器的可疑运行状态

可疑状态: 指在试验周期内, 发现某些参数反映变压器内部可能有异常现象, 但仍有很多不确定因素的变压器。可疑状态下, 变压器可继续运行, 但应缩短试验周期并跟踪监测, 在线监测期间没有进一步劣化趋势并稳定在某一合格范围内, 变压器可不进行维修。凡属此类变压器, 应做出诊断报告, 缩短跟踪监测周期, 以及制订出检查试验项目。

3.3. 变压器的可靠性下降状态

可靠性下降状态: 指历次周期性试验或跟踪测试结果分析存在故障, 且基本确定故障部位及故障原因, 分析判断这种故障在短期内不会发生事故的变压器, 但变压器绝缘状态及安全可靠性下降, 变压器必须通过维修才能恢复到正常状态, 但估计在短期内不会有危险。凡属此类变压器, 应做出诊断报告, 抓紧安排停电, 进行有针对性的维修。

3.4. 变压器的危险状态

危险状态: 指试验数据或运行参数表明, 变压器内部故障已不能运行或运行中随时有可能发生事故的变压器。此时变压器已处于危险状态, 应立即停止运行, 进行恢复性维修, 并考虑吊罩(吊芯)维修。

4. 油浸式变压器的管理

4.1. 建立变压器状态应对模块

根据变压器的实际运行情况, 对区域内正在使用

的油浸式变压器运行状态进行评估。在状态评估时主要参照的数据有以下几个方面^[7]:

1) 热方面: 这个方面需要检测的有绝缘(绝缘油)的老化, 老化纸的脆度, 铁芯扎带的受热。

2) 电气方面: 变压器运行环境的电气特性, 变压器运行设计, 与变压器相关的电气连接。

3) 机械方面: 变压器因投运年限较长或运行环境的原因导致的轴向变形和径向变形。

4) 负荷能力: 变压器短时间承受过负荷的能力或者变压器较长时间超负荷运行的能力。

对变压器运行状态评估完成后, 根据已建立的变压器处于某种状态的维护方案, 对变压器进行相应的维护。

处于正常状态的油浸式变压器, 运行时, 需要运行人员应按照油浸式变压器运行规程制定的周期和巡视项目进行检查, 及时掌握变压器的运行状况。检查油枕和充油套管的油位、油色是否正常, 器身及套管有无渗油、漏油现象。若在正常负荷的情况下, 出现对应环境温度下油面过高, 应检查变压器的冷却装置。变压器油色应是透明微黄色, 如是红棕色, 可能是油位计本身脏污造成的, 也可能是由于变压器油运行时间过长, 运行油温高, 使油变质引起的; 根据温度指示表检查变压器上层油温; 检查变压器音响是否正常; 检查瓷套管, 应清洁, 无破损、裂纹和打火放电现象。

对于处于可疑运行状态的变压器除了例行正常状态变压器的检查项目外, 还要检查变压器声音是否正常。如发现响声特大, 不均匀或有放电声, 应认为内部有故障; 油位变化若正常, 应随温度的增加略有上升, 如发现假油面应及时查明原因; 用手触摸每一组冷却器, 温度应正常, 以证实冷却器的有关阀门已打开; 油温变化若正常, 变压器带负荷后, 油温应缓慢上升。

对于可靠性下降的变压器不单单要例行处于可疑运行状态的变压器的检查项目, 还应对变压器加强在线监测, 缩短检查周期和试验周期。

对于处于危险状态的变压器, 要停止运行, 对变压器进行诊断性大修。

4.2. 建立变压器的故障应对措施

实际运行中变压器的可能性故障有以下几方面^[8]:

1) 雷击过电压: 一种情况是因为避雷器接地电阻过高, 雷电流引发变压器外壳电位增高到一定的数值, 会击穿变压器绝缘, 导致其损坏。另一种情况则为避雷器接地引下线长度太长, 此时, 若陡度电流通过, 避雷器的残压与接地引下线上的压降相叠加, 作用变压器绕组, 从而破坏变压器绝缘。

2) 绝缘老化: 绝缘是变压器正常运行的基本条件之一并决定变压器的使用寿命。变压器在运行过程中, 绝缘材料也在不断的损耗, 当运行使用达到一定的年限时, 绝缘材料就会严重老化, 出现发黑、枯焦等情况。此时在外界的作用力下, 如震动等, 就可能出现破损, 从而造成绕组相间或匝间的短路以及绕组接地故障。

3) 绝缘油劣化: 绝缘油是绕组和铁芯的冷却装置以及绕组之间、绕组与铁芯和箱体之间起的绝缘介质。变压器运行时绝缘油在较高温度下运行, 可能与空气中的氧气作用生成各种酸性氧化物进而腐蚀绝缘, 增加绝缘油的介质损耗, 降低绝缘油的品质, 引发变压器内闪络, 导致击穿事故。绝缘油也可能吸收空气中所含的水分发生电离, 增加了绝缘油的导电性能, 不利于变压器的安全运行。

4) 分接开关故障: 无载分接开关绝缘受潮, 容易发生短路引起变压器的损坏, 分接开关的触头部分会发生磨损或污染, 增大了触头之间的接触电阻, 容易引发触头处的发热或烧坏事故; 有载分接开关在频繁的切换操作过程中, 因会产生电弧, 导致乙炔等可燃性气体的生成, 威胁变压器的可靠运行。

5) 磁路故障: 正常运行时, 绕组四周会存在交变的磁场, 在电磁感应作用下, 外壳与铁芯之间、铁芯与低压绕组之间以及低压绕组与高压绕组之间会存在寄生电容, 带电绕组正是通过其耦合作用, 使得铁芯对地产生悬浮电位。因铁芯等各个金属构件距离绕组的空间不等, 金属构件之间有电位差的存在, 当这种电位差达到一定限度时, 就会击穿其间的绝缘, 产生火花放电现象, 影响变压器内绝缘等的性能。因此, 为了消除这种现象, 保障变压器正常运行, 应当避免铁芯多点接地, 实践中将铁芯与外壳进行可靠地连接, 以保证铁芯与外壳的等电位。

4.3. 变压器管理流程图

由于 35 kV 油浸式变压器成本在几十万元^[9], 因

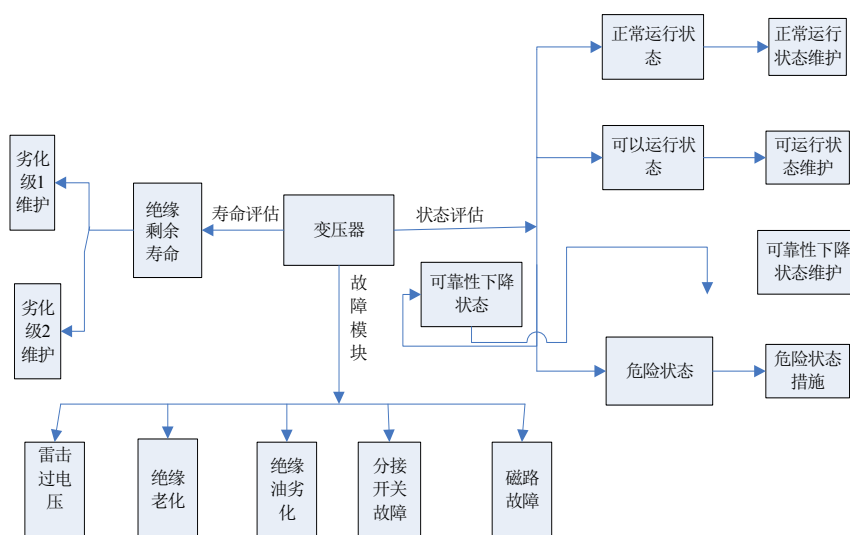


Figure 5. Flow chart of management of transformer
图 5. 变压器管理流程图

此为了有效利用变压器，节约成本，采用全方位立体式管理，使变压器的效能发挥接近最大状态^[10]，其管理流程图见图 5。

5. 结论

结合 35 kV 油浸式变压器的结构特点，分析影响其寿命的主要因素是绝缘老化，根据马尔可夫概率模型的包含条件，应用该随机过程原理做剩余绝缘寿命的计算，而且计算结果与工程实际相吻合。由于油浸式变压器在工农业配电中具有重要的作用，要求其可靠性高，而 35 kV 油浸式变压器的成本较高，从节能、经济、可靠等因素出发，提出了全方位的覆盖式维护管理流程，可以在变压器有效役龄期间可靠运行，同时也减少了不必要的变压器电能损耗，使变压器运行在最优状态。

参考文献 (References)

[1] 杨启平, 薛五德, 蓝之达. 变压器绝缘老化的诊断与寿命评估[J]. 变压器, 2004, 41(2): 13-17.

- [2] 李维宪. 变压器寿命评估[J]. 电力建设, 1996, 5: 55-58.
- [3] 黄华, 傅晨钊. 大型电力变压器状态分析综述[J]. 华东电力, 2004, 3(32): 342-348.
- [4] 郭永基. 中下容量变压器寿命评估新方法[D]. 清华大学, 2001.
- [5] C. K. Mechefske. Correlating power transformer tank vibration characteristics to winding looseness. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 1995, 37(8): 599-604.
- [6] M. A. Sanz-Bobi, A. Garcia-Cerrada, R. Palacios, et al. Experiences learned from the online internal monitoring of the behavior of a Transformer. *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, Milwaukee, 18-21 May 1997: TC3/11.1-TC3/11.3*.
- [7] B. Gare, J. C. Burgos and A. Alonso. Winding deformations detection in power transformers by tank vibrations monitoring. *Electric Power Systems Research*, 2005, 74(1): 129-138.
- [8] 汲胜昌, 刘味果, 单平等. 小波包分析在振动法监测变压器铁芯及绕组状况中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 24-27.
- [9] 杨启平, 薛五德, 蓝之达. 变压器故障诊断技术的研究[J]. 变压器, 2002, 39(10): 38-42.
- [10] J. L. Rogers, J. C. Hartman. Equipment replacement under continuous and discontinuous technological change. *IMA Journal of Management Mathematics*, 2005, 16(1): 23-26.