

基于 PSS/E 的最大负荷极限的求解方法

熊宁¹, 程浩忠¹, 胡泽春¹, 俞国勤², 祝达康²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海市电力公司, 上海 200072)

摘要: 随着电力系统规模的增大, 相关模型的日趋复杂, 电力系统分析软件已成为电力工作者不可缺少的有力工具。同时, 如何充分利用电力系计算软件提供的函数模块, 将其进行有效地组织、搭建, 满足工程上的需要已成为电力工作者亟需掌握的一项技能。文章比较系统地介绍了一种用 PSS/E 软件求解大规模电网最大负荷极限点的方法, 由于在求解过程中较为全面地考虑了影响负荷极限的各项因素, 使得计算结果更贴近实际, 所得指标也更具有指导意义。最后通过算例验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 电力系统; 静态电压稳定; 最大负荷极限; 电力系统仿真软件; PSS/E

Determination of maximal load limit based on PSS/E

XIONG Ning¹, CHENG Hao-zhong¹, HU Ze-chun¹, YU Guo-qin², ZHU Da-kang²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200072, China)

Abstract: As the scale of electric power system become more and more expanding and the model of electrical power devices become more and more complicated, electrical power system analysis software (EPSAS) has become an indispensable tool for electrical power researchers. At the same time, how to make best use of its application program interface (API) and how to arrange and construct it effectively for satisfying the demand of project become an important skill for electrical power colleagues. In this paper, a method is introduced for determining maximum loading limit for large scale power system by PSS/E simulation software. Since various factors which have impact on loading limit are taken into consideration, the program is more close to real system and makes the index more instructive. At last, a study case is simulated for testing the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: electric power system; static voltage stability; maximum loading limit; power system simulation software; PSS/E

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)20-0001-04

0 引言

随着电力系统规模的增大, 垂直管理模式的打破, 电网的功率传输常常接近其极限状态, 静态电压稳定问题越来越突出。因此, 很多新设备如 SVG、SVC、STACOM 等正在被逐步应用, 在保证系统经济、稳定运行的同时也使得系统的模型越来越复杂, 求解越来越困难。为此, 一批各有侧重点的电力计算软件被开发出来, 成为电力工作者分析问题, 解决问题不可缺少的工具^[1]。

电力系统仿真软件 PSS/E (Power System Simulator for Engineering) 是由美国电力技术公司

(Power Technologies Inc 简称 PTI) 开发的一款商业软件。功能强大, 很多学者对该软件的应用进行了深入的研究和探讨^[2-5]。

PSS/E 拥有丰富的模块模型, 能为用户提供诸如潮流计算、短路计算、动态模拟仿真(包括长过程稳定)、小干扰信号分析、优化潮流及线性网络等方面的分析功能。但它不是一款专门为电力系统静态电压稳定分析而开发的软件, 没有提供诸如连续潮流法^[6]、直接法^[7]或优化算法^[8]等电压崩溃点的精确求解算法, 而且其提供的 PV 分析模块在应用上也存在一些缺陷, 主要表现为: 1) 对负荷增长方式的设计不够灵活, 无法适用于任意负荷增长方式下的崩溃点求解。2) 无法从 PV 分析模块中获取数据做进一步的稳定性分析。因此, 一些学者提出了自己的解决方案, 主要分为两种: 1) 最大负荷法^[9]: 通

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 计划资助(课题编号: 2009CB219703)

过不断增加负荷的方法来逼近崩溃点,将常规牛一拉法所能算到的最大负荷作为极限点。虽然所求结果有一定的误差,但在工程可接受的范围内,不失为一种有效、可行的方法。2) 负荷类型转换法^[10,11]:由于在 PV 曲线的追踪过程中恒功率负荷存在极值,而恒导纳负荷没有。因此文章独辟蹊径,在潮流计算中将恒功率负荷转为恒导纳负荷,有效地解决了雅可比矩阵奇异的难题。

但是,由于上述文献所考虑的因素有限,只能对一些小算例进行探讨,无法实际应用于大规模电网的求解。为精确地获得大电网的负荷极限,文章首先对负荷增长方式和发电机出力方式进行了定义,使计算结果更贴近实际情况;然后通过一些技巧加强了 PSS/E 的潮流收敛能力,并用 2 分法对最大负荷极限点进行检索,在保证收敛精度的同时减少了迭代的次数。

1 算法原理

1.1 算法模型

最大负荷极限的计算,关键在于定位电压崩溃点。假设负荷和发电出力的变化方向已知,最大负荷极限的求解模型为:

$$y_0 + \lambda_* b - \lambda_* B - f(x_*, c_*) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{g \min} < P_{g^*} < P_{g \max} \\ Q_{g \min} < Q_{g^*} < Q_{g \max} \\ c_{\min} < c_* < c_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

其中: λ_* 为最大负荷极限; y_0 为初始运行点的负荷注入功率; b 为发电机有功出力分配方式; B 是负荷增长方式,前 n 维表示有功负荷增长方向,后 n 维表示无功负荷增长方向。函数 f 为潮流表达式; x_* 为崩溃点处的状态变量; c_* 为崩溃点处的并联补偿量; P_{g^*} 为崩溃点处的发电机有功出力; Q_{g^*} 为崩溃点处的发电机无功出力; \min 和 \max 分别为相应变量对应的最小值和最大值。

1.2 负荷增长方式

不同的负荷增长方式对应着不同的负荷裕度。文章考虑以下 4 种方案来模拟负荷的增长:

1) 根据负荷预测的结果确定负荷的增长方式。

2) 对单个区域或某个节点负荷按功率因数同比例增长,此方式常用于了解单个区域或节点的电压稳定程度。

3) 对整个系统的负荷按功率因数同比例增长,此方式常用于求解全系统的电压稳定裕度。

4) 对不同区域的负荷根据功率因数按不同比例增长,此方式在求解系统电压稳定裕度的同时细化了不同区域间的负荷增长速度。

1.3 发电机有功出力方式

随着负荷的增大,发电机有功出力也需随之增长以进行功率平衡。常用的有功平衡方式有:

1) 只由平衡节点来补偿负荷的增量。

2) 系统中所有发电机根据某种设定方式来分摊负荷的增量。

3) 分区域平衡负荷的增长,即区域内的发电机首先平衡自己区域的负荷增量,如果还有多余的裕度,则对有功有缺额的区域进行支援。

根据发电机的有功裕度按比例地确定其出力大小是一种比较实用的有功分配方式。由于分摊到各发电机的出力与其剩余的裕度成正比,故无需考虑出力越限的情形。

分配方式 3 的具体实现流程如下:

1) 在初始运行点处计算各发电机有功出力裕度 $\Delta P_{gi} = P_{gi \max} - P_{gi}^0$ 和发电机总有功出力裕度

$\Delta P_{gsys} = \sum \Delta P_{gi}$ 。其中 P_{gi}^0 为初始运行点下发电机 i 的有功出力。

2) 在当前运行点 k 下,计算系统有功负荷增量

$$\Delta P_{dsys}^k = \lambda^k \sum_{i=1}^n B_i, \text{ 判断 } \Delta P_{dsys}^k > \Delta P_{gsys} \text{ ? 若是, 将系}$$

统所有发电机出力设为最大值; 否则转 3)。

3) 分区域计算有功负荷增量 $\Delta P_{darea}^k [a] = \lambda^k \cdot$

$\sum_{i \in a} B_i (a \in A)$ 和发电机有功出力裕度 $\Delta P_{garea} [a] =$

$\sum_{i \in a} \Delta P_{gi} (a \in A)$, 并计算各区域中发电机与负荷间

的增加注入平衡量 $C^k [a] = \Delta P_{garea} [a] - \Delta P_{darea}^k \cdot$

$[a] (a \in A)$ 。其中, a 为区域号; A 为区域集合。

4) 对每个区域 a 判断 $C^k [a] < 0$? 若是, 将该区域内所有发电机出力调整到最大值, 并累计有功缺

额量 $P_{defi}^k = \sum C^k [a] (a \in \{C^k [a] < 0\})$; 否则,

根据区域内各发电机有功裕度的比例分摊区域内负荷的增量, 负荷平衡后的发电机有功出力

$$P_{gi0}^k = P_{gi}^0 + \Delta P_{darea}^k [a] \Delta P_{gi} / \Delta P_{garea} [a] (i \in a, a \in A),$$

累计系统内所有发电机的可支援有功总量

$$P_{supp}^k = \sum C^k[a] \quad (a \in \{C^k[a] > 0\})$$

5) 判断 $P_{defi}^k > 0$? 若是, 根据 $P_{gi}^k = P_{gi0}^k + P_{defi}^k$.

$(P_{gi\max}^k - P_{gi0}^k) / P_{supp}^k$ ($i \in a, a \in \{C[a] > 0\}$) 进行区域间的有功支援。否则, 结束。

在潮流计算中, 若平衡节点存在 ΔP 的有功出力越限, 可在负荷增长方式 B 中乘以一个系数 γ ,

使越限量在发电机间分摊。其中 $\gamma = 1 + \Delta P / \sum_{i=1}^n B_i$ 。

1.4 自动可调并联补偿设备

并联补偿设备的投入对电压稳定裕度的求解有很大的影响。并联补偿设备可随负荷的增长逐步投入, 以提供相应的无功来维持节点电压。在崩溃点的追踪过程中, 可采用 PSS/E 潮流程序自动对并联补偿设备的投切进行调整, 也可在自编的程序中人为地预先设定, 逐步投入。由于在并联补偿设备自动可调或运行点接近崩溃时, 潮流通常很难收敛, 可用牛-拉法在允许补偿自动可调的情况下先计算一次潮流, 然后以此补偿方案作为初值, 用解耦牛-拉在补偿设备闭锁的情况下再计算一次潮流。两种潮流解法的配合能大大加强潮流的收敛性。

2 基于 PSS/E 的算法实现

2.1 数据的预处理

为操作方便, 可先对数据进行一些预处理工作。若一个节点含有多台发电机 (包括备用机组), 为避免对节点内所有发电机都进行有功出力分配, 可将其等效为一台发电机处理。方法为先累加该节点内所有发电机的有功出力及其有、无功出力的上、下限, 然后将其等效到一个发电机 ID 中, 最后删除节点内其他 ID 的发电机。在 PSS/E 中, 发电机数据的获取函数为 `macdat`; 修改函数为 `machine_data`; 发电机删除函数为 `purgmac`。其中还需用函数 `inimac` 对节点中的发电机进行初始化, 然后构造循环, 用指向下个发电机 ID 的函数 `nxtmac` 来遍历节点中所有的发电机以进行数据的操作或发电机的删除工作。

若一个节点中含有多个负荷, 为简化对负荷增长的处理, 可用同样方法进行等效。负荷修改函数为 `load_data`; 负荷删除函数为 `purgload`。其中还需用到函数 `inilod` 进行负荷初始化, 用函数 `nxtlod` 指向下个 ID 的负荷。

节点负荷和电厂数据的获取可通过节点遍历

的方法来获取。首先用函数 `inibus` 对节点初始化, 然后用函数 `nxtbus` 指向下个节点, 调用函数 `busint` 来获取节点所在的区域及其类型, 最后通过函数 `busdt2` 和 `gendat` 来获取负荷和电厂的数据。

2.2 潮流发散后初值的确定

在最大负荷极限点的逼近过程中, 若负荷的增加导致潮流解的发散, 则需减小步长, 使其能有足够的精度接近极限点。在 PSS/E 中, 潮流发散后的状态变量已不是潮流方程的有效解, 该值无法作为小步长潮流迭代的初值, 所以需对最近一次潮流收敛点的状态变量进行记录, 以备必要时的回存。

对于含有 3 绕组变压器的电力网络, 变压器星点的电压幅值和相角也需要记录, 否则潮流同样难以收敛。PSS/E 不能通过对节点的访问来获取 3 绕组变压器星点的电压和幅值, 因为在 PSS/E 中, 变压器星节点为虚拟节点, 没有节点号。因此需要预先将变压器 3 个绕组的节点号、变压器 ID 号等信息存储到自定义的列表中, 然后根据列表中存储的信息来访问工作空间中变压器的数据, 获取其星节点的电压和幅值。

2.3 算法实现

1) 初始化。将所有 3 绕组变压器信息和区域号信息存储到列表中; 根据 2.1 节中的内容进行数据的预处理和初始化; 根据 1.2 节中内容选定负荷增长方向 B ; 迭代次数 $k=0$; $\lambda^k=0$; 确定负荷增长步长 S 和收敛精度 ε 。

2) 迭代次数 $k=k+1$ 。

3) 判断步长 $S > \varepsilon$? 若是, 转 4); 否则, 结束。

4) 通过 $\lambda^k = \lambda^{k-1} + S$, $y^k = y^0 + \lambda^k \times B$ 增加负荷, 同时调用函数 `load_data` 更新工作空间中的负荷值。若发电机有功采用共同分摊负荷的出力方式, 还需用函数 `machine_data` 根据 1.3 节中介绍的内容对发电机有功出力进行调整。

5) 依次调用函数 `fns1` 和 `nsol` 对系统进行牛-拉法和解耦牛-拉法计算, 并通过 `solved` 函数判断潮流是否收敛? 若是, 记录当前的负荷变化因子 λ^k , 并调用 `busdat` 函数获取当前运行点的电压幅值与相角等状态变量并记录, 转 2); 否则, 继续。

6) 调用函数 `notona` 返回节点名, 并通过函数 `bus_data` 将记录的状态变量作为初值回存到工作空间中, $S=S/2$, 返回 3)。

3 算例分析

以某大型电网为例验证所提方法的有效性, 该电网有 2622 个节点, 4677 条支路, 143 台 3 绕组变压器。

取步长 $S=0.01$, 精度 $\epsilon=0.0001$, 系数 $\gamma=1.04$, 以 1.2 节中的方式 3 作为负荷增长方式, 分别计算 3 种有功出力分配下的负荷裕度, 结果见表 1。

表 1 三种有功出力分配方式下的负荷裕度
Tab.1 Load margin under three kinds of active power output pattern

	方式 1	方式 2	方式 3
禁止并联补偿设备调整(情形 1)	0.0194	0.0750	0.0816
允许并联补偿设备调整(情形 2)	0.0202	0.0840	0.0916

由表 1 可见, 在情形 1 下, 若负荷有功增量单独由平衡节点补偿, 负荷裕度仅为 1.94%; 而当有功负荷增量由整个系统的发电机共同分摊时, 负荷裕度增加到了 7.5%; 若再考虑负荷的分区平衡, 负荷裕度则达到了 8.16%。在情形 2 下, 方式 2 和 3 的负荷裕度在情形 1 的基础上提高了近 10%, 而方式 1 仅提高了 4%。这是由于在方式 1 下, 有功出力存在大功率远距离输送, 通过无功补偿已无法显著提高其传输极限。可见, 在不同的运行方式下, 裕度指标相差很大, 为使所求指标具有指导意义, 求解条件应尽量符合实际系统的运行情况。

图 1 为情形 2 下, 391 号节点 3 种有功出力方式下的 PV 曲线, 其中星点表示记录到的收敛解。

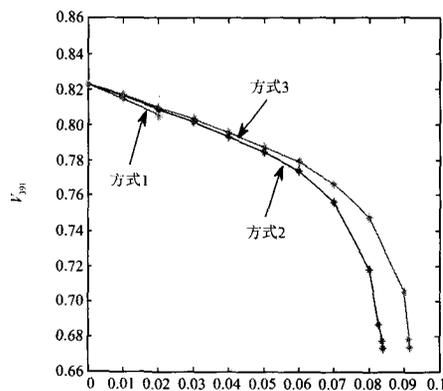


图 1 三种有功出力分配方式下节点 391 的 PV 曲线
Fig.1 PV curves of 391st bus under 3 kinds of active power dispatch pattern

4 结论

文章介绍了一种用 PSS/E 仿真软件求解大规模电网最大负荷极限点的方法。该法充分利用软件提供的函数模块, 将其进行有效地组织、搭建以满足实际求解的需要。该法主要具有以下优点: 1) 较为全面地考虑了对负荷极限求解有影响的因素, 使得所求结果贴近实际, 裕度指标更具有指导意义。2) 采用了 2 种不同的潮流算法, 加强了潮流在并联补

偿自动可调或接近电压崩溃点时的收敛性。3) 对状态变量, 特别是 3 绕组变压器星点电压的幅值与相角进行了记录, 以备潮流发散时作为初值回存; 加强了算法的收敛性。4) 采用 2 分法对负荷极限点进行搜索, 在保证收敛精度的同时减少了迭代的次数。

参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
TANG Yong. Present Situation and Development of Power System Simulation Technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [2] 张扬, 杜振东. 电力系统仿真软件 PSS/E 简介[J]. 华东电力, 1997, (1): 6-9.
- [3] 祝瑞金, 傅业盛. 电力系统高级仿真软件 PSS/E 的消化与应用[J]. 华东电力, 2001, (2): 8-11.
- [4] Koo Kah Leong. Modeling and Co-simulation of AC Generator Excitation and Governor Systems Using Simulink Interfaced to PSS/E[J]. Power Systems Conference and Exposition, 2004, 2: 1095-1100.
- [5] GAO Hu-min, WANG Chao, PAN Wu-lue. A Detailed Nuclear Power Plant Model for Power System Analysis Based on PSS/E[J]. Power Systems Conference and Exposition, 2006: 1582-1586.
- [6] 戴伟华, 熊宁, 李倡洪. 静态电压崩溃点的实用解法[J]. 继电器, 2007, 35(5): 25-28.
DAI Wei-hua, XIONG Ning, LI Chang-hong. A Practical Method of Tracing Static Voltage Point[J]. Relay, 2007, 35(5): 25-28.
- [7] 李宏仲, 程浩忠, 等. 以简化直接法求解电力系统动态电压稳定 Hopf 分岔点[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 28-32.
LI Hong-zhong, CHENG Hao-zhong, et al. A Direct Method for Computing Hopf Bifurcation Point in Power System Dynamic Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 28-32.
- [8] 刘方, 颜伟, 徐国禹. 计及发电机调节能力的电压稳定约束最优潮流[J]. 继电器, 2006, 34(15): 29-34.
LIU Fang, YAN Wei, XU Guo-yu. Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow Considering Generator Ramp-rate Limits[J]. Relay, 2006, 34(15): 29-34.
- [9] 段建民, 张焰, 等. 基于 PSS/E 的电力系统电压稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 34-37.
DUAN Jian-min, ZHANG Yan, et al. Power System Voltage Stability Analysis Based on PSS/E[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 34-37.
- [10] 蔡晔, 徐政. 基于 PSS/E 的节点静态电压稳定极限计算[J]. 华东电力, 2002, (9): 27-29.
- [11] 王冰, 游振华, 韩学军, 等. 考虑负荷静态电压特性的重负荷节点静态电压稳定分析[J]. 继电器, 2007, 35(11): 21-25.

(下转第 24 页 continued on page 24)

方案的综合决策具有很好的参考作用,是值得在电网规划领域推广应用的。

参考文献

[1] 张文泉. 电力技术经济评价理论、方法与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHANG Wen-quan. Power Technical & Economic Evaluation Theory, Method and Application[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2004.

[2] 陈大字, 肖峻. 基于模糊层次分析法的城市电网规划综合评判[J]. 东北电力技术, 2003, (9):5-14.
CHEN Da-yu, XIAO Jun. Comprehensive Judgment of Policy Making for Urban Power Network Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Northeast Electric Power Technology, 2003,(9):5-14.

[3] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4):50-57.
XIAO Jun, WANG Cheng-shan, ZHOU Min. An IAHP-based MADM Method in Urban Power System Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57.

[4] 周任军, 徐志生, 杨洪明. 模糊优选在电网规划综合决策中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(2):23-26.
ZHOU Ren-jun, XU Zhi-sheng, YANG Hong-ming. An Application of Multi-attribute Fuzzy Optimal Selection to the Evaluation of Grid Planning[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2005, 26(2):23-26.

[5] 黄武忠, 孔德明, 钟丹红, 等. 模糊综合评判在电网远期规划中的应用[J]. 供用电, 2001, 18(5):7-9.
HUANG Wu-zhong, KONG De-ming, ZHONG Dan-hong, et al. Application of Fuzzy Comprehensive Judgment in Long-term Network Planning[J]. Distribution & Utilization, 2001, 18(5):7-9.

[6] 魏权龄, 岳明. DEA 概论与 C2R 模型-数据包络分析(一)[J]. 系统工程理论与实践, 1989, (1):58-69.
WEI Quan-ling, YUE Ming. Introduction of DEA and the CCR model-Data Envelopment Analysis(1)[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1989,(1):58-69.

[7] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

社, 2003.
QIN Shou-kang. Theory and Application of Comprehensive Evaluation[M]. Beijing: China Machine Press, 20003.

[8] 卢宗华. DEA 有效决策单元的排序方法[J]. 复杂巨系统理论·方法·应用, 1994:334-338.
LU Zong-hua. DEA Effective Decision-making Unit Sorting Method[J]. Complex Giant System Theory, Method and Application, 1994: 334-338.

[9] 罗道平, 肖笛. 数据包络分析(DEA)在电力工业的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1996, (4):60-66.
LUO Dao-ping, XIAO Di. The Application of Date Envelopment Analysis(DEA) in Electric Power Industry[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1996(4):60-66.

[10] Pahwa A, FENG Xiao-ming, Lubkeman D. Performance Evaluation of Electric Distribution Utilities Based on Data Envelopment Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1):400-405.

[11] Seiford L M. Data Envelopment Analysis: the Evolution of State of the Art (1978~ 1995)[J]. Journal of Production Analysis, 1996,(7): 99-137.

[12] Andersen P, Petersen N C. A Procedure for Ranking Efficient Untits in Data Envelopment Analysis[J]. Management Science, 1993, 39(10):1261-1264.

[13] 龙海明, 李花. 德尔非法及其在社科成果评奖中的应用[J]. 中国高校师资研究, 2006, (3):27-32.
LONG Hai-ming, LI Hua. Delphi Method and Its Application of Evaluation Results in the Social Sciences[J]. Chinese Colleges and Universities Teachers Research,2006, (3):27-32.

收稿日期: 2008-01-03

作者简介:

刘佳(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划, 电力系统运行分析; E-mail: diana630372@163.com

韦钢(1958-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行分析、配电系统规划、电力系统继电保护;

吴伟力(1980-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划, 电力系统经济技术分析等。

(上接第 4 页 continued from page 4)

WANG Bing, YOU Zhen-hua, HAN Xue-jun, et al. Steady-state Voltage Stability Analysis of Heavy Load Node Considering the Steady-state Load Characteristics[J]. Relay, 2007, 35(11): 21-25.

作者简介:

熊宁(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向是电网可靠性;

程浩忠(1962-), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事电压稳定、电网规划、电能质量、电力市场等方面的教学科研工作。E-mail:chenghz@online.sh.cn

收稿日期: 2008-06-24