

变电站投切电容器组过电压研究

林 静, 胡 红, 郭 飞

(成都电业局龙泉驿供电局, 四川 成都 610100)

摘 要:投切补偿电容器组电力系统最常发生的内部过电压,以贵州某变电站为原型,建立了仿真计算模型。操作过电压仿真研究中,断路器模型起着关键性作用,在分析了真空断路器开断时交流电弧物理过程的基础上建立了断路器的仿真模型,大大提高了仿真精度。仿真计算结果表明:投、切电容器组过程中电容器上承受的过电压幅值较小,不会对电容器造成威胁,但会在电容器入口端产生较高的对地过电压;在切除电容器组过程中发生断路器两相重燃时,由于断路器相间电压较高,将会在重燃相产生上千安的涌流,对电容器组的通流能力要求较高。

关键词:暂态过电压;断路器模型;ATP-EMTP

Abstract: Switching compensating capacitor bank and switching transformer are two kinds of the main causes of overvoltage and failure of electrical equipment. The causes of the above-mentioned overvoltage are analyzed. The simulation model is constructed using ATP-EMTP simulation program based on a substation in Guizhou. The simulation results show that the overvoltage endured by capacitors is small during switching compensating capacitor bank, but the overvoltage to earth of the interface is much greater with 3.0 pu amplitude. It is a risk for compensating capacitor bank when two phases are re-closed.

Key words: transient overvoltage; breaker model; ATP-EMTP

中图分类号: TM864 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0011-05

0 简介

由于真空断路器的电弧重燃对投切电容器组过电压有巨大影响,而 ATP-EMTP 软件本身不具有考虑燃弧特性的断路器模块,从真空电弧的特性入手,利用 ATP-EMTP 提供的 Model 语言编写了具有燃弧特性的真空断路器模型,利用该模块,对贵州某变电站真空断路器投切电容器组时产生的过电压情况进行了研究。

1 仿真模型的建立

虽然 ATP 中提供的开关模块能够比较真实地反映出整个开合过程的暂态变化,但其均未涉及真空断路器断口在恢复过程中的特性,因此需要根据真空断路器开合过程中介质的恢复特性建立新的断路器仿真模型才能更真实仿真计算出操作断路器时的过电压的情况。该变电站在 10 kV 侧采用的是 ZN28A 型真空断路器,断路器电弧状态取决于电流过零后开关触头间介质恢复强度与恢复电压的比较。王季梅等^[1]曾对优化后的真空灭弧室模型,在不同触头开

距下,作了冲击耐压特性的测量,将实验得到的触头冲击耐压特性 U_d 拟合成触头间距 x 的函数

$$U_d = 51\ 155 \cdot x^{0.2382} = 51\ 155 \cdot (vt)^{0.2382} \quad (1)$$

其中: v 是平均分闸速度。通过比较触头冲击耐压特性 U_d 和暂态恢复电压 U_m 即可判断断路器的开合状态。采用 ATP 软件提供的 Model 语言依据上述分析建立断路器模型,其计算流程如图 1。

变电站其它仿真模块大多采用 ATP-EMTP 中原有模块,在此不再详述。变电站整体仿真模型如图 2。

2 合闸电容器组过电压分析

2.1 合闸电容器组过电压的理论分析

在实际配网系统中,无功补偿电容器常采用星形不接地方法接入 10 kV 系统,见图 3。当电容器投入时假设断路器三相同期合闸,其暂态过程可按单相电路进行分析,忽略线路电阻,单相等值电路^[2]如图 4 所示。

图中 L 为电源的等效内电感, U_{NC} 为补偿电容器 C 的残留电压,电源电势 $e(t) = E_m \cos(\omega t)$ 。不计回路损耗电阻,合闸后电容器 C 上电压 $U_C(t)$ 可表示为

小河变电站仿真模型

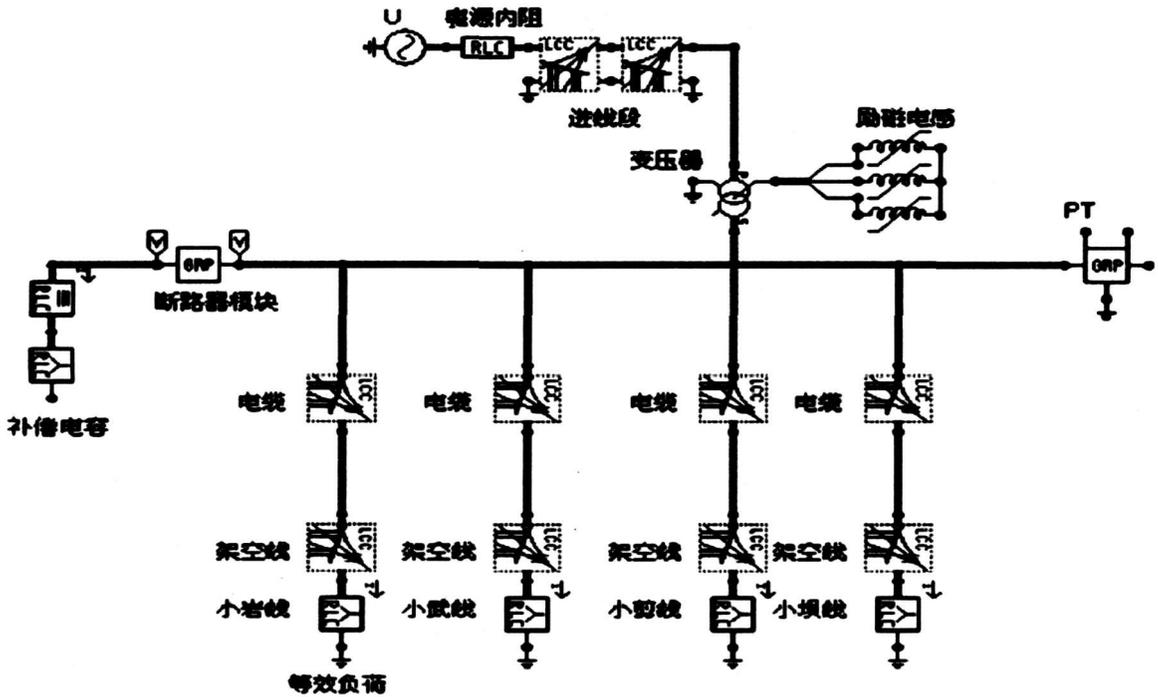


图 2 变电站仿真模型

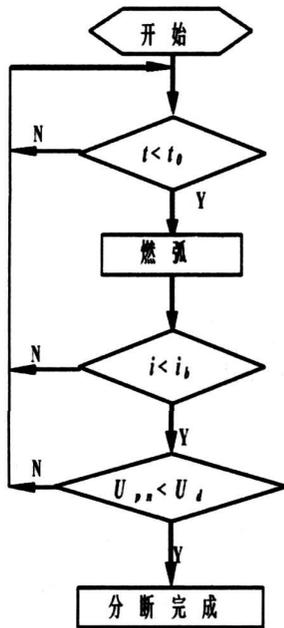


图 1 断路器模型流程图

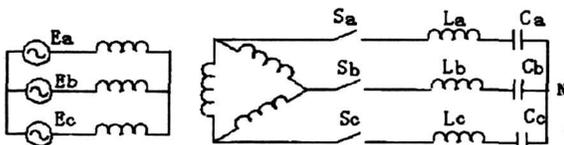


图 3 无功补偿电容器的近似投切等效电路图

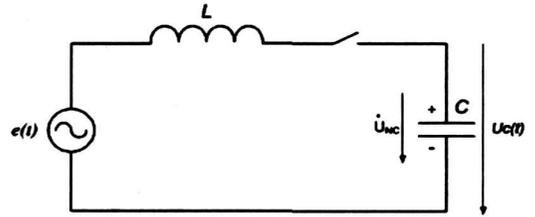


图 4 投入电容器单相等值电路

$$U_c(t) = U_{Cm} \cos(\omega t) - (U_{Cm} - U_{NC}) \cos(\omega_1 t) \quad (2)$$

其中, $U_{Cm} = \frac{E_m}{1 - (\omega/\omega_1)^2}$ 为电容器稳态电压幅值; ω

为工频角频率; $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ 为上述回路的自振角频率, 通常 ω 较 ω_1 大得多, 因此 $U_{Cm} \approx E_m$ 。

当并联电容器 C 的极板上留有反极性残余电压时, 如 $U_{NC} = -E_m$, 则 $U_c(t)$ 的最大值可达 $3E_m$ 。一般情况下, 并联电容器并联接有放电线圈, 因此在断路器合闸前其极板上的残余电压很小, 近似为 0, 所以根据上式可以得到, 在此情况下并联电容器合闸时可能出现的最大电压为 $2E_m$ 。

在以上建立模型的基础上, 仿真了小河变电站在带一定负荷情况下系统稳定后, $t=0.04$ s 时投入电容器组过电压情况。针对投切过程中电容器容易损坏问题, 仿真过程中特别对星形接法的电容器组投切

过程中承受的线电压进行了分析。图 5 为电容器端口 A、B 相线电压波形。

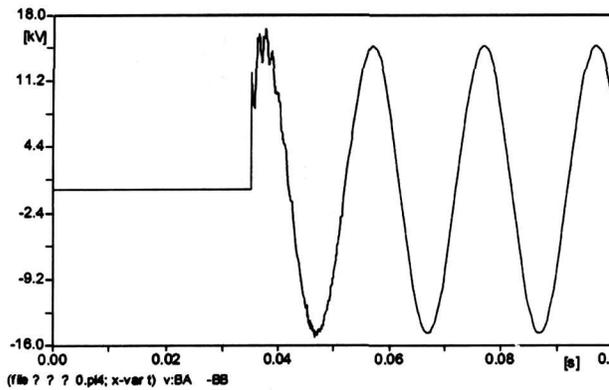


图 5 电容器端口线电压波形 (AB 相)

由图可以看出在投入电容器组时对电容器端口电压未造成剧烈的扰动,电容器组端口电压只是在投入瞬间在系统工频分量的基础上叠加了一个微小的扰动,过电压幅值不超过 1.1 p.u. 此外还对断路器不同期合闸情况进行了研究,结果表明过电压幅值都没有超过 1.3 p.u. 没有超过电容器组的允许范围。

3 分闸电容器组过电压分析

3.1 分闸电容器组过电压理论分析

补偿无功功率的并联补偿电容器是接在相间的,它们的对地电容很小,开断并联电容器组时,一组断路器的重燃会影响其他两组。按运行状态来分,开断电容器组重燃过电压可以分为单相重燃、两相等几种类型^[3]。

① 单相重燃

开断中性点绝缘的三相并联补偿电容器组并发生单相重燃现象时,过电压主要出现在并联电容器组的中性点与地之间。并联电容器极间一般没有比较高的过电压出现。重燃相过电压并不是最高的,往往是通过中性点传递至不重燃的两相中的一相,成为过电压的最高相。即使是单相重燃(在小于 1/4 周期内重燃)时,在非重燃相中的一相也会出过电压。

② 二相重燃

如 A 相电容器为首先断开相,则 C 相电容器上所产生的过电压最高。由于单相重燃时回路的振荡频率很高,因此中性点对地电压可能在很短时间内上升,结果会立即导致 C 相断口重燃,造成两相重燃。另外,若断路器分闸延迟时间过长,如 B 相电容器延

迟分闸至 A 相电容器的断路器重燃之后,虽然是 A 相单相重燃,实质上与两相重燃相同。该情况下,电容器组过电压分析如下:设 A 相断路器在电流过零时首先开断,因电容电压在相位上落后电流 90°,此时 A 相电源电压为最大值 E_m ,令 $E_m = 1$,A 相开断后 A 相电容 C_A 上留有直流电压分量为 1, B、C 相电容 C_B 、 C_C 上电压各为 0.5,如图 6 所示。

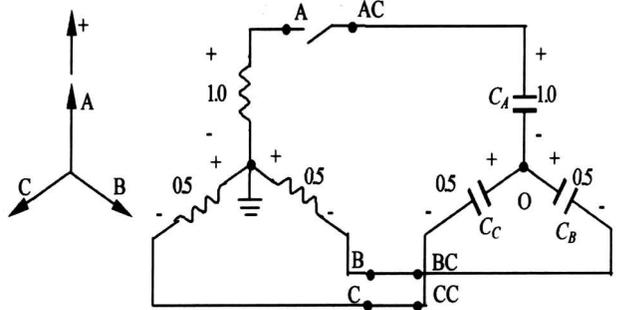


图 6 断路器 A 相在电压幅值处开断后各点电位示意图

设 A 相断路器在电流过零时首先开断,因电容电压在相位上落后电流 90°,此时 A 相电源电压为最大值 E_m ,令 $E_m = 1$,A 相开断后 A 相电容 C_A 上留有直流电压分量为 1, B、C 相电容 C_B 、 C_C 上电压各为 0.5。此后电流仅在 B、C 相间流过,中性点 O 的电位从 0 开始上升,经过半个工频周期 (0.01 s), A 相电源电压从正到负反相, AC 点处对地电压为 $(0.5 + 0.5 + 1.0)/2$ 中性点 O 对地电压恰好上升到相电压幅值 1, A 相断路器触头间隙 A-AC 的恢复电压为 $2 - (-1) = 3$,如图 7 所示。

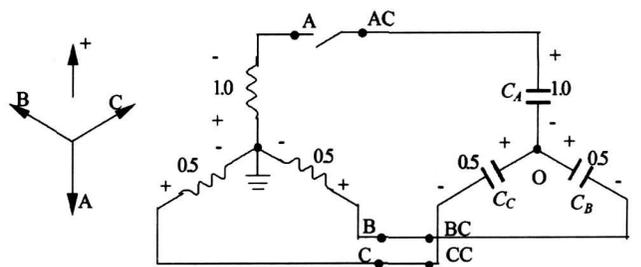


图 7 半个周期后各点电位示意图

若此时 A 相断路器重燃,三相电路恢复对称,中性点 O 的稳态电位应为零, AC 点的稳态电位应为 -1。因此 CA 上的电压将由 +1 向 -1 振荡,当其高频振荡电流第一次过零时,电弧熄灭, C_A 上留有最大电压 -3。同理, C_B 、 C_C 上将各保留有 -3/2 电压,如图 8 所示,此时 AC 对地电位最大将为 -4。

由此可见,由于真空断路器灭弧室高频熄弧特性,开断过程中的重燃及熄弧导致了特殊的运行状态,而在电容器及中性点上出现过电压。

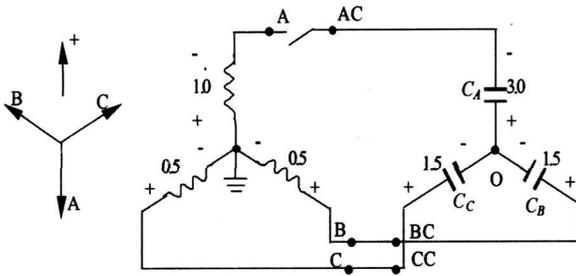


图 8 断路器 A 相高频熄弧后各点电位示意图

3.2 单相重燃分闸电容器组过电压仿真分析

系统在进入稳态后 $t=0.06$ s 时刻切断电容器组, 断路器 A 相在半个周期后 $t=0.07$ s 时刻重燃的过电压情况。

断路器开断时刻设置为 $t=0.06$ s 此时 A 相电压刚好得到幅值, 由于电容器可近似为纯容性负载, 电流电压相位相差 90° , 此时电容器 A 相电流刚好过零, 电容器开断, 未产生截流, 开断造成的电压波动不剧烈, 虽然断路器在 $t=0.07$ s 时刻产生了重燃, 但断路器在开断时, 电弧的熄灭是以电弧电流过零为基础的, 假设 A 相断路器在电流过零时首先开断, 相隔 $1/4$ 个周期后, B、C 两相电弧电流同时过零, 即 B、C 两相断路器在此时 (0.065 s) 也熄弧, 由于 B、C 两相均处于断开状态, 无法形成通路, 电容器上电压仍然被钳制了, 同时由于断路器 A 相是在开断后 0.01 s (半个周期) 发生的重燃, A 相断路器电源端电压得到相电压负幅值, 重燃后由于电容器组对 A 相电压的钳制作用, 强迫电容器组中性点 O 电压立刻发生突变, 随即引起电容器组端口对地电压突变, 如图 9。此时电容器组端口 C 相对地电压在断路器 A 相重燃时刻接近 3.0 p.u. B 相对地电压接近 1.5 p.u.

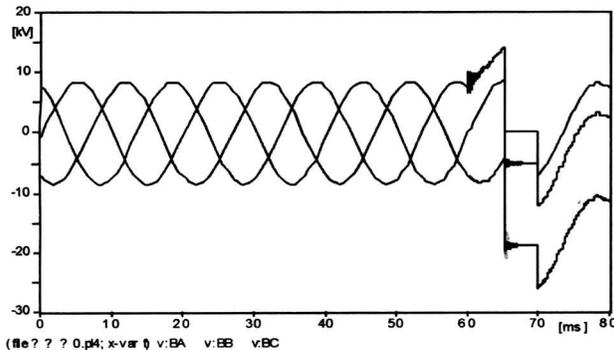


图 9 电容器三相对地电压波形

对于断路器断口恢复电压分析。以 A 相为例子以说明, 在 $t=0.06$ s A 相断路器断开后由于断口靠近电容器组一侧电压被钳制, 靠电源侧电压随时间往

负电压峰值发展, 在此期间恢复电压呈上升趋势。在经过 0.05 s 后 $t=0.065$ s 时, 由于 B、C 两相电流过零断路器开断导致恢复电压出现了第一次截波。在 $t=0.07$ s 时由于断路器 A 相重燃强性将恢复电压制零, 出现了第二次截波。具体变化情况见图 10, 可以看出断路器 A 相重燃后将引起断路器 C 相恢复电压快速上升, 极容易造成 C 相断路器的重燃。

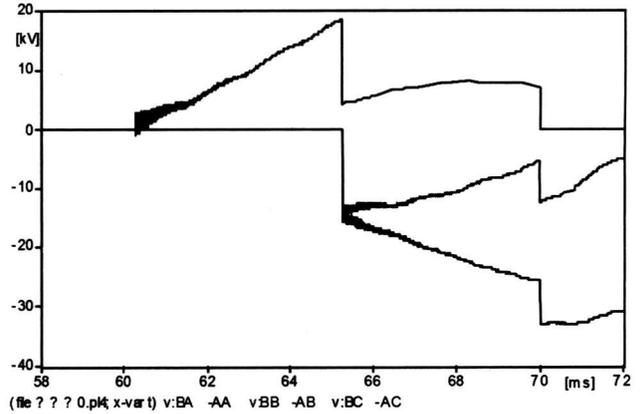


图 10 断路器断口恢复电压波形

3.3 两相重燃分闸电容器组过电压仿真分析

断路器 A 相重燃导致断路器 C 相上恢复电压飙升, 引起断路器 C 相断口间电弧重燃时的过电压仿真研究情况如下。

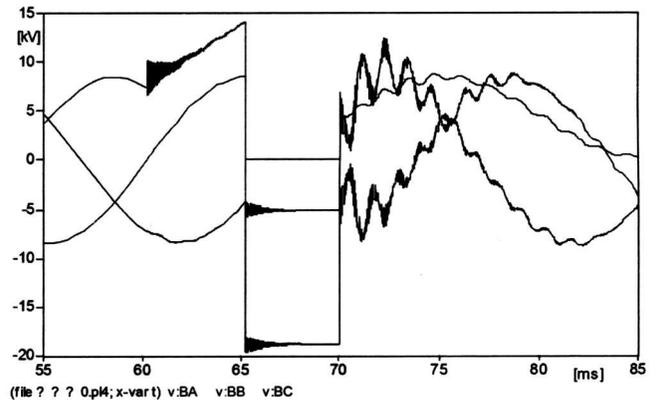


图 11 电容器三相对地电压波形

在 C 相断路器重燃后电容器 A 相上电压不再钳定不变, 而是出现了剧烈振荡, 在 $t=0.072$ s 时刻出现了 1.3 p.u. 的过电压峰值。此时 A、C 两相电流剧增, 幅值达到上千安培, 较容易损坏通流能力较差的电容器组。同样由于电容器组 A、C 两相构成了电流通路, 出现涌流如图 13, 断口产生的对地过电压, 电压幅值较单相重燃是有所下降, C 相过电压仍然为三相中最大 2.5 p.u. 同样由于电容器组 A、C 两相构成了电流通路, 电容器组对电压的钳制作用不再明显,

重燃后过电压波形基本恢复到零点附近波动如图 12。

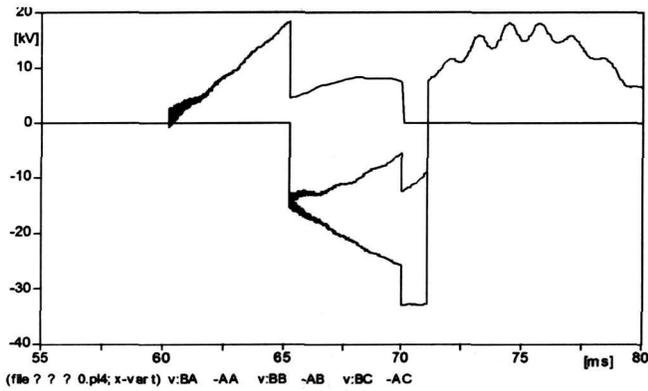


图 12 断路器断口恢复电压波形

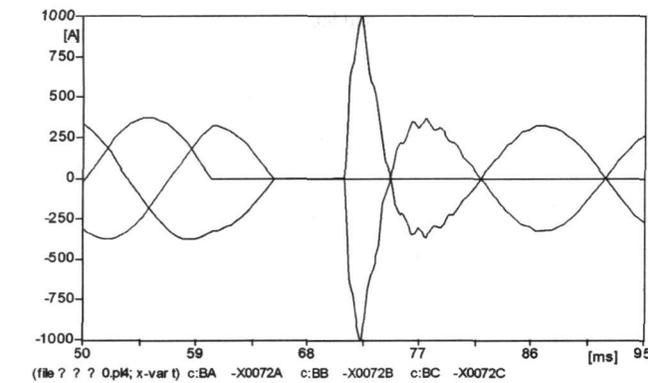


图 13 流经电容器组三相电流

5 结 论

借助 ATP-EMTP 仿真平台,建立了贵州某变电站仿真模型,对投切电容器组过电压情况进行了仿真分析,得到以下结论。

1) 在分析真空断路器开断交流电弧物理过程的基础上建立了真空断路器的仿真模型。

2) 投切补偿电容器组过程中电容器上承受的过电压幅值均未超过 $2.0 p.u$ 不会对电容器造成威胁,但在电容器入口端会产生较高的对地过电压,达 $3.0 p.u$ 。

3) 在切除电容器组过程中发生断路器两相重燃时,由于断路器相间电压较高,将会在重燃相产生上千安的涌流,对电容器组的通流能力要求较高。

参考文献

- [1] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1993.
- [2] 沈黎明. 变电站补偿电容器投切过电压的仿真与测试 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2006.
- [3] Dawn M. Dunsmore, Edgar R. Taylor, Bernard F. Wirtz et al. Magnifica Lion of Transient Voltages in Multi-voltage-level Shunt-capacitor-compensated circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992 (7): 664-673.

(收稿日期: 2010-06-09)

(上接第 10 页)

认证技术要求》,而且,其节能率高,制造产品需要的贵金属材料又较少,因此,产品无论在符合国家的产业发展政策方面还是在性能价格比方面都具有十分明显的优势。下一步,在把 U 型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈等全部改用新型铸钢奥氏体合金材料制造后,将进一步提高产品的节能率和性能价格比。

虽然本次试验的样品仅为一种节能型悬垂线夹,但其试验结果,从原理上是普遍适用于各型悬垂线夹、耐张线夹和防振锤等电力金具的。今后,将对各型电力节能金具进行全面的试验研究,以期得到更加完善的结果。

参考文献

- [1] 余虹云. 电力金具能耗与节能的探讨 [J]. 浙江电力,

1999, 18(4): 58-59.

- [2] 秦曾煌主编. 电工学 (第四版) [M]. 北京:高等教育出版社, 1990.
- [3] 吴国宏. 节能金具的研制 [J]. 吉林电力, 2002(4): 14-16, 19.
- [4] 徐乃管. 论节能金具的开发与应用 [J]. 输配电设备网, 2007.
- [5] 中标认证中心. 《电力金具节能产品技术认证要求》 [S]. 2006.

作者简介:

袁 刚,男,助理工程师,从事电力勘测设计工作。

(收稿日期: 2010-06-30)