

带串补的同杆并架双回线路零序故障分量对继电保护的影响

薛明军^{1,2}, 王玉婷^{1,2}, 陈福锋^{1,2}, 邹磊^{1,2}, 张祥^{1,2}, 陈实^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 南京 210003; 2. 南京国电南自自动化有限公司, 南京 211153)

摘要:利用安装串补电容的同杆并架双回线路发生接地故障时的零序序网, 分析在串补出口处发生高阻故障且 MOV 未导通时对两侧保护安装处的零序功率方向元件及零序差动保护的影响。分析结果表明: 串补电容可能导致远离串补侧保护的零序功率方向继电器拒动作, 另外作为保护高阻接地故障的零序差动保护也可能发生灵敏度降低甚至拒动的情况。仿真试验验证了该理论分析的正确性, 并提出了主保护的配置原则。

关键词:串联电容补偿; 同杆并架双回线路; 零序功率方向; 零序差动保护; 高阻故障

中图分类号: TM 773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2017)09-0006-04

0 引言

对于远距离输电线, 其输电能力主要取决于线路的稳定极限, 功角稳定性使输送功率、输电距离受到限制, 必须采取补偿措施。串联电容器补偿可使系统稳定极限大幅度提高, 从而提高线路的输电能力。串补电容的主要作用在于: 通过控制潮流提高电力系统的输送能力; 改善电力系统的稳定性; 改善电压质量及无功功率平衡; 减少系统的线路损耗, 提高线路传输容量。它还具有提高系统暂态稳定性、优化输电线路潮流和降低系统损耗的作用。串联电容补偿是提高输电系统经济性和可靠性的有效手段。

串补装置虽然给输电线路的功率输送带来了许多优点, 但同时也给输电线路的继电保护带来了许多不利影响, 国内外学者对带串补的输电线路也做了很多深入研究。如文献[1-2]指出串补电容影响了线路保护的后备保护, 造成传统距离保护在串补线路中超越的问题, 并提出了一种判断串补线路故障时故障点相对于串联补偿电容位置的模型识别方法, 可以解决传统距离保护在串补线路中超越的问题, 使得距离 I 段可以按全线阻抗整定, 很大程度地提高了距离 I 段的灵敏度; 文献[3]分析了串补电容对差动保护的影响, 并提出了一种不受串补电容影响的基于贝瑞隆模型实现的纵联差动保护原理, 该原理在灵敏度和可靠性上都优于传统的分相电流差动保护; 文献[4]对带串补的特高压线路采用负序方向的高频保护作为主保护进行了研究, 并得出负

序方向高频保护可能在串补不对称击穿和负序 LC 谐振带来的不正确动作; 文献[5]分析了串补电容对工频故障分量继电保护的影响, 并指出了故障分量继电器可能拒动、误动的条件。由此可见, 串补电容对传统线路保护的“四性”(选择性、速动性、灵敏性、可靠性)带来了严峻考验, 因此需要深入研究串补电容带来的各方面影响, 以此来制定相应的对策。

目前, 对串补的影响分析主要集中在单回线路上^[5-7], 一般认为带串补的同杆并架双回线路的零序方向元件的动作行为与单回线路一致, 即远离串补安装侧的零序方向元件不会误判, 而串补安装侧在电压互感器(PT)安装在线路和串补电容之间时, 采用零序电压补偿的方法也能可靠判断, 而实际带串补线路的工程多为同杆并架双回线路。因此, 本文主要对带串补的同杆并架双回线路故障时的零序分量进行深入分析, 指出在串补出口处发生高阻接地且金属氧化物限压器(MOV)不导通的情况下, 远离串补侧保护安装处的零序功率方向元件可能拒动, 并对比例制动特性的零序差动保护的灵敏度带来了不利影响。

1 对零序功率方向元件的影响

一般来说, 零序功率正方向判据如下:

$$180^\circ \leq \arg \frac{3\dot{U}_0}{3\dot{I}_0} \leq 360^\circ,$$

式中: $3\dot{U}_0$ 为保护安装处零序电压; $3\dot{I}_0$ 为保护安装处零序电流, 零序电流以母线指向线路为正方向。

带串补的同杆并架双回线路一次系统如图 1 所示, 当在系统侧 II 线出口处 K1 点发生经过渡电阻接地故障时, 假设过渡电阻较大导致故障时串补 MOV

没有导通。故障时的零序等效回路如图2所示。

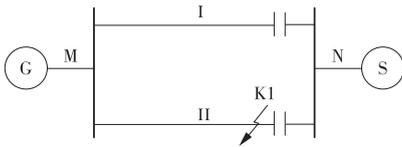


图1 带串补的同杆并架双回线路接线

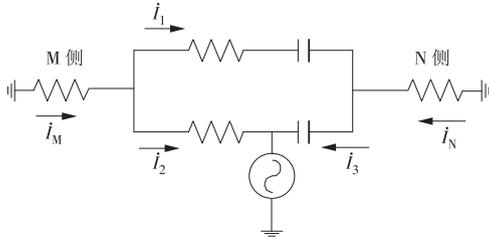


图2 零序网络等效图

为了简化分析,对于超高压、特高压线路,可以忽略线路和两侧等值阻抗的电阻部分,设定文中所有的阻抗均仅包含电抗部分。

1.2.1 远离串补侧的零序方向元件分析

由于串补安装在N侧,所以M侧的零序功率方向元件跟PT的安装位置没有关系,根据星三角变换可将图2的零序故障回路等效为图3所示的等效图。

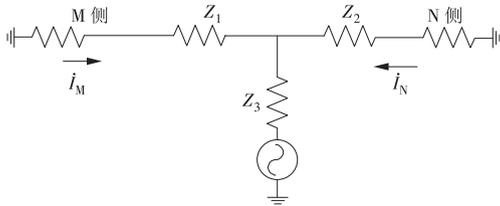


图3 星三角变换等效图

其中:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{(Z_{L0} - X_c)Z_{L0}}{2Z_{L0} - 2X_c}, \\ Z_2 &= \frac{-(Z_{L0} - X_c)X_c}{2Z_{L0} - 2X_c}, \\ Z_3 &= \frac{-Z_{L0}X_c}{2Z_{L0} - 2X_c}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Z_{L0} 为线路全长的零序阻抗; X_c 为串补电容容抗。

根据图3由戴维南等效定律可以得出 \dot{I}_N 与 \dot{I}_M 的关系:

$$\frac{\dot{I}_N}{\dot{I}_M} = \frac{Z_1 + Z_{M0}}{Z_2 + Z_{N0}}, \quad (2)$$

式中: Z_{M0} 为M侧系统等值零序阻抗; Z_{N0} 为N侧系统等值零序阻抗。将式(1)代入式(2)可得:

$$\dot{I}_N = b\dot{I}_M, \quad (3)$$

$$\text{式中: } b = \frac{\frac{(Z_{L0} - X_c)Z_{L0}}{2Z_{L0} - 2X_c} + Z_{M0}}{-\frac{(Z_{L0} - X_c)X_c}{2Z_{L0} - 2X_c} + Z_{N0}} = \frac{Z_{L0}}{2} + Z_{M0} \Big/ Z_{N0} - \frac{X_c}{2}.$$

对于图2,根据戴维南等效电路可得以下等式:

$$\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \quad (4)$$

$$\dot{I}_1(Z_{L0} - X_c) = \dot{I}_2Z_{L0} - X_c(-\dot{I}_N - \dot{I}_1).$$

将式(3)代入式(4)可得出:

$$\dot{I}_2 = \frac{Z_{L0} - 2X_c - X_cb}{2Z_{L0} - 2X_c} \dot{I}_M. \quad (5)$$

而M侧保护安装处的零序电压为:

$$\dot{U}_{M0} = -Z_{M0}\dot{I}_M. \quad (6)$$

所以故障线II线M侧的保护安装处的零序电压和零序电流的关系为:

$$\dot{U}_{M0}/\dot{I}_2 = -\frac{Z_{M0}(2Z_{L0} - 2X_c)}{Z_{L0} - 2X_c - X_cb}. \quad (7)$$

由于串补电容的补偿度不可能为线路全长,式(7)分子的方向性明确,而对于分母而言,由于 b 的方向具有不确定性,因此对 b 分如下2种情况分析。

(1)若 $Z_{N0} < X_c/2$,则 b 为负数,而线路的零序阻抗大约为正序阻抗的3倍,式(7)的分子也为正数,M侧的零序电流超前零序电压 90° ,所以零序方向元件准确地判为正方向。

(2)若 $Z_{N0} > X_c/2$,则 b 为正数,若要不发生零序方向元件误判, $Z_{L0}2X_c - X_cb$ 需呈感性,则要满足如下条件:

$$Z_{L0} - 2X_c - X_cb > 0. \quad (8)$$

将式(8)整理得到:

$$b < \frac{Z_{L0}}{X_c} - 2 = k. \quad (9)$$

将 b 的表达式代入式(9)得到:

$$\frac{\frac{Z_{L0}}{2} + Z_{M0}}{Z_{N0} - \frac{X_c}{2}} < k. \quad (10)$$

因此需要满足:

$$Z_{N0} > \left(\frac{Z_{L0}}{2} + Z_{M0}\right)/k + \frac{X_c}{2}, \quad (11)$$

式中: $k = \frac{Z_{L0}}{X_c} - 2$ 。

综上所述,当N侧的系统阻抗满足式(12)条件时,M侧的零序功率方向元件不会发生误判。

$$Z_{N0} < \frac{X_c}{2} \text{ 或 } Z_{N0} > \left(\frac{Z_{L0}}{2} + Z_{M0}\right)/k + \frac{X_c}{2}. \quad (12)$$

而式(13)条件满足时,若在串补出口处发生高阻故障串补电容MOV未导通时,则远端M侧的零序功率方向元件会误判为反方向,从而导致M侧带方向的零序保护拒动作。

$$\frac{X_c}{2} < Z_{N0} < \left(\frac{Z_{L0}}{2} + Z_{M0} \right) / k + \frac{X_c}{2} \quad (13)$$

1.2.2 串补安装侧的零序方向元件分析

分 N 侧保护 PT 与串补电容安装的位置来分析。

(1) PT 位于串补电容与母线间。此时 N 侧保护安装处的零序电压为：

$$\dot{U}_{N0} = -Z_N \dot{I}_N \quad (14)$$

所以故障线路 N 侧保护安装处的零序电压和零序电流的相位关系为：

$$\dot{U}_{N0} / \dot{I}_3 = - \frac{Z_N \dot{I}_N}{\dot{I}_3} \quad (15)$$

(2) PT 位于串补电容与线路间。由于 PT 位于串补电容与线路间，此时零序功率方向元件会采用零序电流补偿方法，N 侧补偿后的零序电压为式(14)所示，因此故障线路 N 侧保护安装处的零序电压和零序电流的关系仍然为式(15)。

从以上分析可以看出，N 侧的零序功率方向元件主要取决于 \dot{I}_N 与 \dot{I}_3 的方向，整理得：

$$\frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_N} = \frac{b(2Z_{L0} - X_c) + Z_{L0}}{b(2Z_{L0} - 2X_c)} \quad (16)$$

设

$$Z_{L0} = aX_c \quad (17)$$

一般线路的零序阻抗为线路的 3 倍，且补偿度不会为线路全长，则有 $a > 3$ ，将式(17)代入式(16)，则有：

$$\frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_N} = \frac{b(2a - 1) + a}{b(2a - 2)} = \frac{2a - 1}{2a - 2} + \frac{a}{b(2a - 2)} \quad (18)$$

根据式(18)， \dot{I}_N 与 \dot{I}_3 的比值为 b 的反比例函数，变化曲线如图 4 所示。

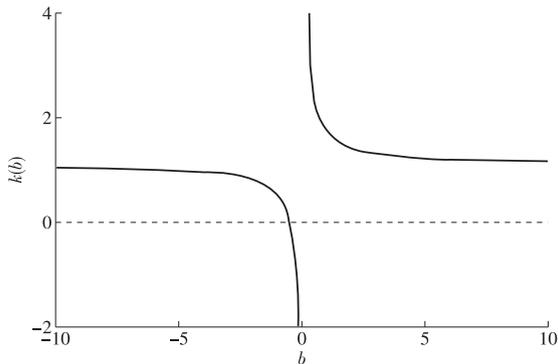


图 4 k 值随 b 值变化曲线 1

从图 4 中可以看出，当 b 取值 $\left(\frac{-a}{2a-1}, 0 \right)$ 时，为负数，但是由于 b 的取值为 $(-\infty, -a)$ ，所以式(18)始终为正数，即 \dot{I}_3 与 \dot{I}_N 同方向，所以区内故障时，N 侧不管 PT 安装位置如何，经过处理的零序功率方向不受影响，均能正确判别方向。

由上述分析可得出以下 2 点结论。

(1) 串补电容出口处发生单相经高阻接地故障 MOV 未导通时，当两侧系统阻抗与线路阻抗和补偿度满足式(13)时，则远离串补安装侧的零序功率方向元件会不正确动作，若配置的主保护为纵联距离保护则存在拒动的风险。

(2) 不论 PT 安装在何处，近串补安装侧的零序功率方向元件能够可靠动作。

2 对零序差动保护的影响

分相电流差动保护具有“天然”的选择性、选相能力和良好的网络拓扑适应能力，能很好地解决同杆并架双回线串补线路带来的特殊问题，因此，分相电流差动保护成为串补线路保护的首选。

我们知道，单回带串补线路电流反向时会对零序差动保护带来一定的影响，目前普遍的做法是采用降制动系数的方式来提高零序差动保护的灵敏度，因此，本文进一步深入分析双回带串补线路发生高阻故障，MOV 未导通情况下对零差保护的影响。

零序电流差动保护的判据如下：

$$\begin{cases} I_{op.0} > kI_{re.0} \\ I_{op.0} > I_{mk} \end{cases}$$

式中： $I_{op.0} = |I_{m0} + I_{n0}|$ ； $I_{re.0} = |I_{m0} - I_{n0}|$ ； I_{mk} 为零序差动动作定值； k 为零序差动比率制动系数。

当故障中出现 MOV 未导通导致电流反向情况时，可能导致计算的 k 变小，严重时小于目前设置的内部门槛 0.80，进而导致零序差动保护拒动，因此后续重点分析 k 在何种故障情况下可能出现最小值，利用图 2、图 3 的戴维南定律可以推导出故障后故障线路两侧的故障零序电流的比例关系：

$$\frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_2} = \frac{(1 + 2b)Z_{L0} - bX_c}{Z_{L0} - 2X_c - bX_c} \quad (19)$$

则零序差动保护的比例系数：

$$k = \left| \frac{\dot{I}_3 + \dot{I}_2}{\dot{I}_3 - \dot{I}_2} \right| = \left| \frac{(1 + b)(Z_{L0} - X_c)}{bZ_{L0} + X_c} \right| \quad (20)$$

将式(17)代入式(20)，则有：

$$k = \left| \frac{(1 + b)(a - 1)}{ba + 1} \right|$$

由于上述表达式有 2 个变量，分别为 a 和 b ，当线路补偿参数固定，即 a 为常数时，则有：

$$k = \left| \frac{a - 1}{a} + \frac{a - 2 + 1/a}{ba + 1} \right| \quad (21)$$

根据式(21)， k 值随 b 值变化的曲线如图 5 所示。

由于 b 取值的范围为 $(-\infty, -a)$ 和 $(0, +\infty)$ ，

可见当 $b = -a$ 时,即当满足 $Z_{N0} = 0, Z_{M0} = 0$ 时, k 会出现极小值点:

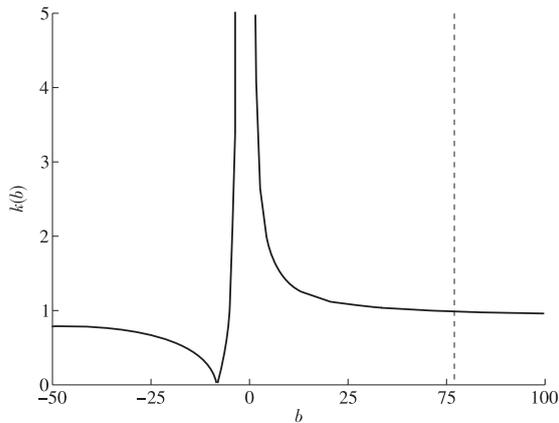


图 5 k 值随 b 值变化曲线 2

$$k_{\min} = \left| \frac{(1-a)(a-1)}{-aa+1} \right| = \frac{a-1}{a+1}。$$

由上述分析可得出以下结论。

(1) 串补电容出口处发生单相经高阻接地故障 MOV 未导通时,线路两侧系统阻抗越小,比率制动系数越可能出现最小值,对零序差动保护的灵敏度影响最大。

(2) 最小的零序差动比率制动系数与串补电容和本线路零序与正序阻抗的比值有关,不同线路、不同补偿度可能出现的最小比率制动系数不一定相同,补偿度越高对零序差动保护的灵敏度影响越大。根据计算,假设线路正序阻抗为零序阻抗的 1/3 的线路,当补偿度为 33.3% 时其可能出现的最小零序差动比率制动系数为 0.80,当补偿度为 40.0% 时的最小零序补偿差动比率制动系数为 0.76,超高压线路保护装置的零序差动比率制动系数一般取为 0.80,由此可见补偿度大于 33.3% 时零序差动保护就有可能出现拒动作。

3 仿真分析

3.1 仿真参数

为了验证上述分析结论,本文利用实时数字仿真器 (RTDS) 搭建带串补的同杆并架双回输电模型,如图 6 所示。

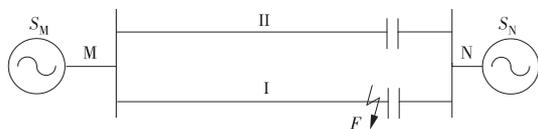


图 6 带串补双回输电线路模型

图 6 仿真系统参数如下:电压等级,500 kV;线路 MN 长度,269 km;线路正序电阻,0.024 Ω /km;正

序电抗,0.270 Ω /km;正序电容,0.0131 μ F/km;线路零序电阻,0.072 Ω /km;零序电抗,0.810 Ω /km;零序电容,0.0081 μ F/km。

以下仿真分析单相经高过渡电阻故障,MOV 未导通的情况下,串补电容对零序方向元件和零序差动保护的影响。

3.2 仿真计算结果

3.2.1 零序方向元件的仿真结果

模拟补偿度为 40% 的情况下在串补出口处经 300 Ω 的高阻接地故障,且故障期间 MOV 没有被击穿,通过调节串补安装侧的系统阻抗来查看远端 M 侧保护安装处的零序功率方向元件的动作行为,测试结果见表 1。

表 1 串补线路系统阻抗和补偿度对零序方向元件的影响

系统零序阻抗/ Ω		两侧零序方向元件行为	
M 侧	N 侧	M 侧	N 侧
7.6	10.8	正方向	正方向
7.6	12.0	正方向	正方向
7.6	16.0	反方向	正方向
7.6	20.0	反方向	正方向
7.6	20.0	反方向	正方向
7.6	25.0	反方向	正方向
7.6	30.0	反方向	正方向
7.6	36.0	正方向	正方向

从表 1 的仿真结果可以看出,当系统阻抗与线路阻抗和补偿度关系满足式 (13) 时,串补安装侧的对侧的零序功率方向会误判为反方向,而经过补偿的串补安装侧的零序功率方向均可靠动作。

3.2.2 零序差动的仿真结果

模拟在串补出口处发生经 300 Ω 的高阻接地故障,且故障期间 MOV 没有被击穿,通过调节串补的补偿度来查看零序差动的制动系数,测试结果见表 2。

表 2 串补线路系统阻抗和补偿度对零序差动保护的影响

系统零序阻抗/ Ω		补偿度/%	制动系数
M 侧	N 侧		
7.6	12.5	33.3	0.808
12.5	12.5	33.3	0.813
7.6	12.5	40.0	0.788
12.5	12.5	40.0	0.794
7.6	12.5	50.0	0.761
12.5	12.5	50.0	0.766
7.6	12.5	60.0	0.733
12.5	12.5	60.0	0.738

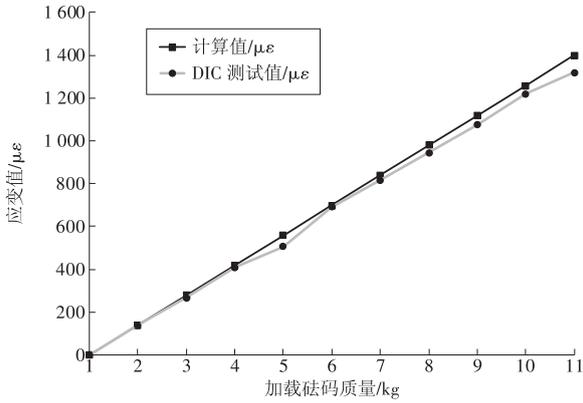


图 4 应变测试结果、计算值与砝码质量关系

从表 1 可以看出,加载不同质量的砝码,等强梁应变测试数值和理论计算值的偏差均为负值,测试数据和理论计算数据吻合良好。应变测试值与计算值最大绝对偏差为 -80×10^{-6} ,平均值为 -31×10^{-6} ;最大相对偏差为 -9.48% ,平均值为 -3.70% 。对等强梁使用的材料 SUMITON780 来说,绝对偏差平均值换算应力值为 -6.4 MPa ,可满足实际工程测试的要求。

另外,从拍摄的散斑图可以看出,加载过程中虽然总体上应变的变化是一致的,但材料分析区域中各处发生的变形并不均匀。因此,在分析材料的过程中要注意首先发生屈服或破坏的薄弱环节,全场的应变分析会提供更多的材料变形信息。

(上接第 9 页)

从表 2 的仿真结果可以看出,随着补偿度增大,零序差动的制动系数会逐渐减小,甚至可能低于常规线路保护的零序差动制动系数的门槛。

4 结束语

本文分析了带串补的同杆并架双回线路发生高阻故障且 MOV 未导通对零序功率方向元件和零序差动保护的影响,分析得出如果主保护配置为纵联距离保护,则区内高阻故障可能会拒动作,而主保护配置为纵联差动保护,则零序差动的灵敏度可能存在不足而不能快速切除故障的问题。

为改善继电保护在用于同杆并架双回串补线路的“四性”要求,提出了以下建议:带串补的同杆并架双回线路主保护尽量配置差动保护,且纵联零序差动保护需要通过合理降低电流差动保护的比率制动系数等方法来提高灵敏度。

参考文献:

[1]陈福锋,钱国明,薛明军.适用于串联补偿线路的距离保

4 结论

对比试验结果表明,试验方案可行,达到了对比分析的目的,制作的等强梁满足测试要求。

采用 DIC 测试方法对等强梁在不同载荷条件下进行的测试表明,测试数据和理论计算数据吻合良好,平均偏差为 -3.7% ,充分验证了 DIC 测试方法进行应变测试的准确性。由此可以认定,该非接触应变测试系统在一定条件下进行应变测试准确、可靠。

DIC 测试结果提供了丰富的材料应变信息,可为研究材料的力学行为提供有力的数据支撑。

参考文献:

[1]SCHREIER H,ORTEU J J,SUTTON M A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements [M]. New York:Springer-Verlag,2009:2-3.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

靳红泽(1970—),男,河南镇平人,高级工程师,从事水工金属结构焊接及残余应力测试分析方面的研究工作(E-mail:jinhongze@chinatesting.org)。

护新原理[J].电力系统自动化,2010,34(12):61-66.

[2]陈福锋,钱国明,魏曜.基于故障点位置识别的串补线路距离保护方案[J].电力系统自动化,2009,33(21):66-71.

[3]陈福锋,钱国明,宋国兵.串联电容补偿线路行波差动保护的研究[J].中国电机工程学报,2009,29(28):89-94.

[4]苏斌,董新洲,孙元章,等.特高压串补线路负序方向高频保护行为分析[J].电力系统自动化,2004,28(14):9-13.

[5]李园园,郑玉平,沈国荣.串补电容对工频变化量距离保护的影响[J].电力系统自动化,2001,25(10):37-40.

[6]朱声石.高压电网继电保护原理与技术[M].北京:中国电力出版社,2005.

[7]王向平.串联电容补偿线路的继电保护设计研究[J].电力系统自动化,1999,23(13):41-44.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

薛明军(1983—),男,湖北荆州人,工程师,工学硕士,从事电力系统继电保护控制技术方面的研究及开发工作(E-mail:mingjun-xue@sac-china.com)。