

考虑电容电流影响的广域电流差动保护

金恩淑, 陈亚潇, 扈佃爱, 江坤

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 为避免广域电流差动保护受电容电流影响而误动的情况发生, 通过对传统电流差动保护进行改进, 提出一种不受电容电流影响的广域电流差动保护算法。利用微分方程计算出各线路上的电容电流, 采用修正的差动电流对暂态和稳态电容电流进行有效补偿, 即在传统差动电流基础上减去计算出的电容电流以使电流差动保护不再受电容电流的影响。利用 PSCAD 仿真实验将改进的广域电流差动保护与传统原理的电流差动保护进行了比较。结果表明, 该保护不受电容电流影响, 外部故障时可靠不动作, 验证了此保护算法的可行性和有效性。

关键词: 广域电流差动保护; 动作电流; 制动电流; 电容电流; 补偿精度

Wide area current differential protection considering the effects of capacitive current

JIN En-shu, CHEN Ya-xiao, HU Dian-ai, JIANG Kun

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: To avoid the circumstances that the maloperation currently occurs when the wide-area current differential protection is influenced by the capacitive current, this paper improves the traditional current differential protection and puts forward a way to calculate the wide-area current differential protection that is not affected by capacitive current. We use differential equation to calculate the capacitive current on different circuits, and by using amendatory differential current, we make efficient compensation for fault transient current and steady capacitive current. That is to guarantee current differential protection against the influence from capacitive current, we subtract the calculated capacitive current from the traditional differential current. The PSCAD simulation experiment compares this protection with the traditional current differential protection. It turns out that this protection is not affected by capacitive current, and has no maloperation through external failure, which verifies the feasibility and effectiveness of this protective calculation.

Key words: wide-area current differential protection; operating current; braking current; capacitive current; compensation precision

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0062-06

0 引言

为了弥补传统继电保护存在的不足和加强继电保护之间的配合, 自上世纪九十年代开始, 国内外学者相继开展了广域继电保护的理论研究^[1-3]。电流差动保护原理基于基尔霍夫电流定律, 具有简单可靠、动作性能优越的优势, 被广泛应用到了广域系统中, 而计算机、通信以及同步测量技术的不断发展完善, 使得广域电流差动保护完全可以满足电网广域保护系统的需要。广域电流差动保护^[4]是通过测量某个区域电流的差动值来判断故障点是在区内还是在区外。然而, 若保护区域包含有线路, 在外部故障时广域电流差动保护可能会受电容电流的影

响而误动。因此, 广域电流差动保护不得不考虑电容电流的影响。

为了消除电容电流对电流差动保护的影响, 应用较多的方法是在保护装置中采取补偿措施。文献[5]提出的稳态补偿算法是建立在计算稳态向量基础上的, 因此只能补偿稳态下的电容电流, 不能补偿暂态的电容电流, 暂态电容电流必须通过差动定值躲过, 使保护灵敏度降低, 因而不完全符合对电容电流补偿提出的要求。目前学者所广泛研究的时域补偿算法在分析参数的不对称情况下多采用模分量法。模分量法利用微分方程对电容电流进行计算之前先进行相模变换, 补偿后再进行反变换, 但此方法稍显复杂。文献[6]提出的贝瑞隆模型仅从模型

上克服了电容电流的影响,但在获取线路一端电流进行差动时仍然存在电容电流。

鉴于以上情况,本文提出了一种更加简便的考虑电容电流影响的广域电流差动保护算法。首先利用微分方程计算出各线路上的电容电流,并对每条线路的补偿精度进行了计算;然后采用修正的差动电流对暂态和稳态电容电流进行有效补偿,即在传统差动电流基础上减去计算出的电容电流以使电流差动保护不再受电容电流的影响;最后通过仿真说明此方法的可行性和有效性。

1 传统广域电流差动保护

基于基尔霍夫电流定律的常规电流差动保护原理简单可靠,灵敏度高,被广泛用作输电线路、母线和电气设备的主保护,运行效果良好。广域电流差动原理与常规保护基本一样,不同点是,常规电流差动保护的保护对象是单个电气元件,广域电流差动保护的保护对象是一个区域(包括单个电气元件)。

图1为一个典型的广域系统^[7],广域系统可以实时获取相邻变电站所需的数据信息,本文选取所能反应的最大保护范围为差动区,即选取本变电站全部出线的对端电流参与差动计算,如图A区域所示,设以流入A区域为正方向。

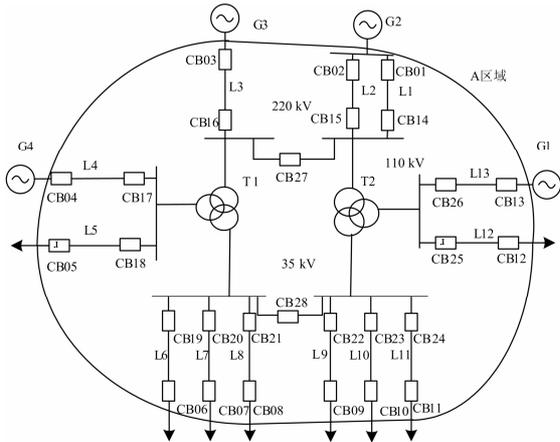


图1 典型的广域系统

Fig. 1 Typical wide-area system

传统的广域电流差动保护动作电流为

$$I_d = |i'_1 + i'_2 + i'_3| \quad (1)$$

式(1)中 i'_1 、 i'_2 、 i'_3 为变压器各侧出线折算到同一电压等级下的等效电流和。其中, i'_1 幅值最大。

制动电流为

$$I_{res} = \frac{1}{2} |i'_1 - (i'_2 + i'_3)| \quad (2)$$

动作判据为

$$\begin{aligned} I_d &> I_{d0} \\ I_d &> kI_{res} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: I_{d0} 为差动电流的启动值,可取为 $0.5I_N$; I_N 为额定电流; k 为制动系数,可取为0.5。

根据上述的动作方程,绘制比率制动特性曲线如图2所示。

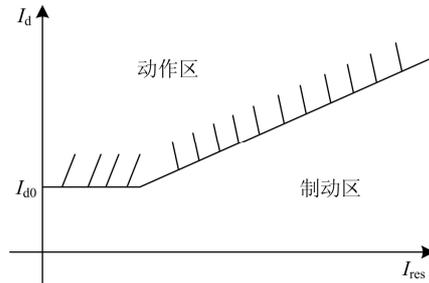


图2 电流差动保护动作特性

Fig. 2 Current differential protection action characteristic

若差动电流与制动电流对应的工作点位于折线上方的阴影区,此时差动电流动作。反之,则不动作。

2 改进的广域电流差动保护

2.1 修正的差动电流

传统的电流差动保护并没有考虑电容电流的影响,因此当电容电流足够大时,差动电流将超过门槛值而引起保护误动。改进的电流差动保护考虑了电容电流的影响,利用与传统保护相同的制动电流和动作判据,但采用了修正的差动电流,从而能够保证在外部故障时保护可靠不动作。

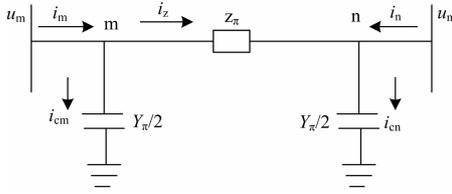
考虑电容电流影响的广域电流差动保护修正的差动电流为

$$I_d = \left| i'_1 + i'_2 + i'_3 - \sum_{j=1}^m i_{cj} \right| \quad (4)$$

式中, i_{cj} 为各引出线的电容电流折算到同一电压等级下的等效电流和。

2.2 电容电流的时域补偿计算

计算 i_{cj} 所依据的原理是在时域下根据输电线路单相等值电路列出满足基尔霍夫电流定律的微分方程,然后对每个采样数据进行逐点微分计算,实现对暂态和稳态电容电流的有效补偿^[8]。本文线路模型采用幅频特性更接近实际分布参数线路^[9]的 π 型等值电路。现以图3说明补偿 π 型等值电路的时域全补偿过程。

图3 π 型等值电路Fig. 3 π type equivalent circuit

对于长线路而言, 有

$$\begin{aligned} Z_{\pi} &= Z_{cn} \operatorname{sh} \gamma_{\pi} l \\ Y_{\pi} &= 2(\operatorname{ch} \gamma_{\pi} l - 1) / Z_{cn} \operatorname{sh} \gamma_{\pi} l \end{aligned} \quad (5)$$

式中: Z_{π} 为 π 型等值电路的等值阻抗; Y_{π} 为 π 型等值电路的等值导纳; $Z_{cn} = \sqrt{Z_{\pi} / Y_{\pi}}$ 为 π 型等值电路的线路波阻抗; $\gamma_{\pi} = \sqrt{Z_{\pi} / Y_{\pi}}$ 为 π 型等值电路的线路传输系数; l 为线路长度。

对于图3中电容支路的 $i_{cm}(t)$ 、 $i_{cn}(t)$ 有

$$i_{cm}(t) = \frac{1}{2} C d[u_m(t)] / dt \quad (6)$$

$$i_{cn}(t) = \frac{1}{2} C d[u_n(t)] / dt \quad (7)$$

式中, $C = Y_{\pi} / j\omega$ 为线路等值电容。

对 m 点应用基尔霍夫电流定律, 有

$$i_z(t) = i_m(t) - i_{cm}(t) \quad (8)$$

式中, $i_z(t)$ 为 Z_{π} 上流过的电流。

对 n 点应用基尔霍夫电流定律, 有

$$i'_n(t) = i_z(t) - i_{cn}(t) \quad (9)$$

式中, $i'_n(t)$ 为补偿 m 侧和 n 侧两条电容支路后的电流。

将式(8)与式(9)相加, 并将式(6)、式(7)代入得

$$\begin{aligned} i'_n(t) &= i_m(t) - i_{cm}(t) - i_{cn}(t) = i_m(t) - \frac{1}{2} C d[u_m(t)] / dt - \\ &\quad \frac{1}{2} C d[u_n(t)] / dt \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $i'_n(t)$ 为补偿后的电流, 方向与 $i_m(t)$ 方向相同。

将计算各条线路得到的 $i'_n(t)$ 折算到高压侧后相加即为 $i'_q(t)$, 将其代入式(4)中, 即可得到改进后的差动电流。

为说明每条线路电容电流补偿的精度, 可采用式(11)所示的误差计算公式:

$$X\% = [i'_n(t) + i_n(t)] / i_n(t) \times 100\% \quad (11)$$

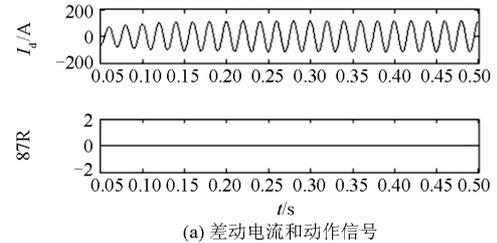
即补偿后的电流 $i'_n(t)$ 与 n 侧不含电容电流的电流 $i_n(t)$ 的差值所占 $i_n(t)$ 的百分比。

3 PSCAD 仿真验证

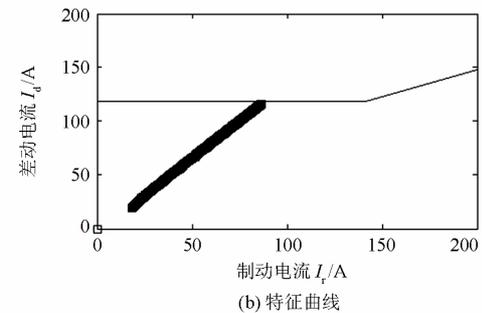
为了验证本文提出的保护算法的有效性和可行性, 以图1为例搭建 PSCAD 仿真模型。其中, L1 与 L2 为具有耦合作用的平行双回线。以 A 区域为保护区, 选取本变电站全部出线的对端电流参与差动计算, 即 CB1、CB2、CB3、CB4、CB5、CB6、CB7、CB8、CB9、CB10、CB11、CB12、CB13 处电流参与计算。以 A 相为例, 将本文方法与传统电流差动保护在各种情况下进行比较。

(1) 正常运行

图4(a)为正常运行情况下, A 区域传统电流差动保护的差动电流及动作信号; 图4(b)为传统电流差动保护的特征曲线。由图4可以看出, 传统保护的差动电流与制动电流对应的工作点并未进入到动作区, 保护正常不动作。



(a) 差动电流和动作信号



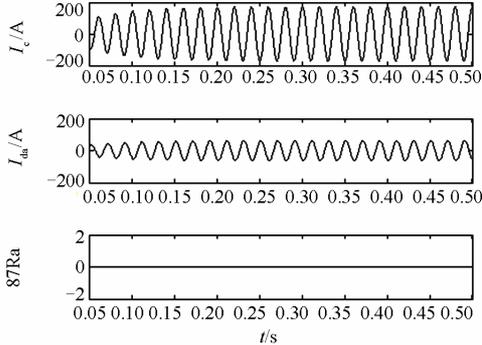
(b) 特征曲线

图4 传统电流差动保护动作情况
Fig. 4 Traditional current differential protection
movement situation

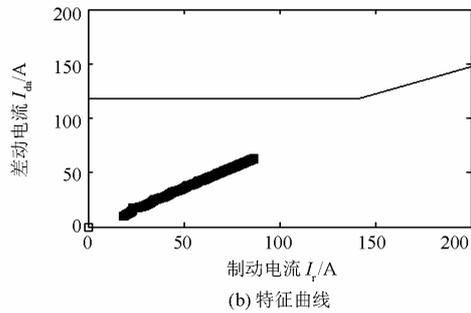
图5(a)中分别为正常运行情况下, 改进电流差动保护的 A 区域线路电容电流、修正的差动电流及动作信号; 图5(b)为改进电流差动保护的特征曲线。由图5可以看出, 修正的差动电流明显减小, 差动

电流与制动电流对应的工作点均在制动区内, 保护可靠不动作。

在正常运行时, 传统电流差动保护与改进电流差动保护均可靠不动作。



(a) 电容电流、修正的差动电流及动作信号



(b) 特征曲线

图 5 改进的电流差动保护动作情况

Fig. 5 Improvement of the current differential protection movement situation

(2) 内部故障

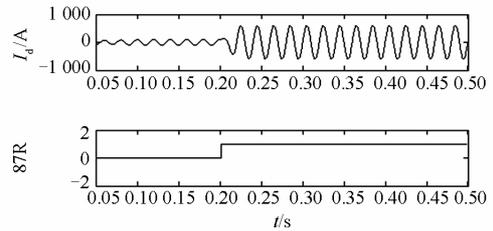
在 0.2 s 时刻, 220 kV 母线处发生经 200 Ω 高阻接地故障时, 传统电流差动保护与改进的电流差动保护动作情况分别如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可以看出, 在 0.2 s 发生高阻接地故障后, 修正的差动电流减小, 传统电流差动保护和改进电流差动保护的工作点均进入动作区, 保护均可靠动作。

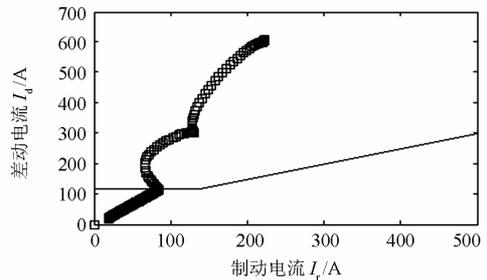
(3) 外部故障

在 0.2 s 时刻, 线路 L6 上靠近负荷侧发生单相接地故障时, 传统电流差动保护与改进电流差动保护的動作情况分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知, 在 0.2 s 时刻发生外部故障时, 由于电容电流的存在, 使得差动电流较大, 导致传统保护的差动电流与制动电流对应的工作点进入动作区, 保护误动。



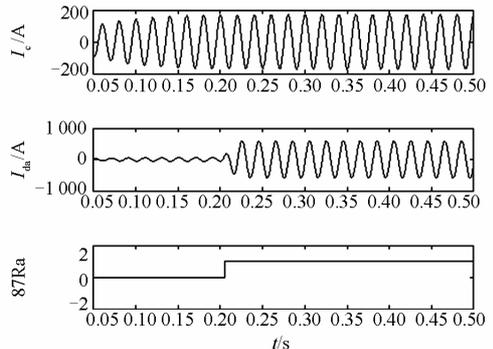
(a) 差动电流和动作信号



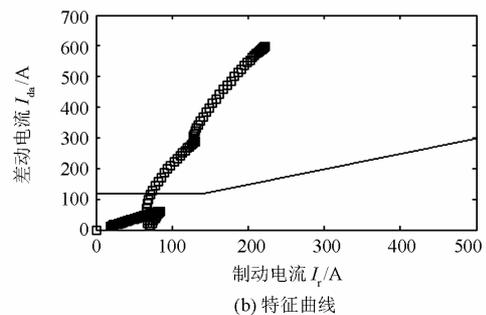
(b) 特征曲线

图 6 传统电流差动保护动作情况

Fig. 6 Traditional current differential protection movement situation



(a) 电容电流、修正的差动电流及动作信号



(b) 特征曲线

图 7 改进的电流差动保护动作情况

Fig. 7 Improvement of the current differential protection movement situation

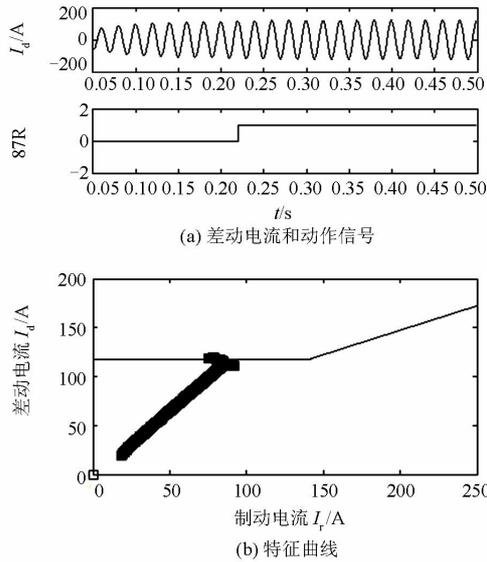


图 8 传统电流差动保护的動作情况

Fig. 8 Traditional current differential protection movement situation

由图 9 可知, 在 0.2 s 时刻发生外部故障时, 改进电流差动保护由于考虑了电容电流的影响, 使得修正的差动电流与传统保护的差动电流相比, 变得很小, 因而工作点仍在制动区, 保护可靠不动作。

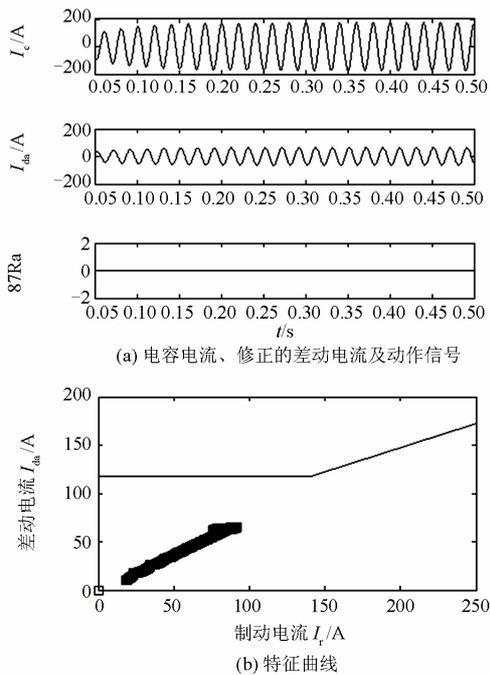


图 9 改进的电流差动保护動作情况

Fig. 9 Improvement of the current differential protection movement situation

由公式(11)可对 PSCAD 仿真系统中的各条线路计算补偿精度。限于篇幅, 仅给出 L1、L3、L4、L13 线路的补偿误差数据, 如表 1 所示。由表 1 可知, 采用 2.2 节的补偿计算方法可以较好地补偿线路电容电流, 并且对暂态电容电流同样具有较好的补偿效果。

表 1 线路补偿误差

Table 1 Circuit error compensation

状态/线路	L1	L3	L4	L13
正常	1.21%	1.68%	0.79%	0.79%
内部	0.56%	1.65%	0.48%	0.48%
外部	1.13%	1.71%	0.69%	0.69%

4 结语

本文在分析了当前传统广域电流差动保护不足的基础上, 提出了一种考虑电容电流影响的广域电流差动保护。首先根据微分方程计算出保护区内各线路的电容电流, 并对补偿精度进行了计算。然后在原有差动量基础上减去电容电流, 从而能够有效补偿暂态和稳态电容电流以使差动电流不受电容电流的影响而误动。

由 PSCAD 仿真实验表明, 改进的广域电流差动保护不受电容电流影响, 既可以保证外部故障时保护可靠不动作, 同时也可以保证内部故障时仍保持足够的灵敏度, 具有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 丁伟, 和奔腾, 王慧芳, 等. 广域继电保护系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 145-155.

DING Wei, HE Ben-teng, WANG Hui-fang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.

[2] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.

LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.

[3] 王昉, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广

- 域继电保护[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 174-179.
- WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [4] 高厚磊, 刘益青, 苏建军, 等. 智能变电站新型站域后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 33-38.
- GAO Hou-lei, LIU Yi-qing, SU Jian-jun, et al. New type of substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 33-38.
- [5] 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案[J]. 继电器, 1997, 25(7): 4-9.
- WU Ye-kai, ZOU Dong-xia. Influence of capacitance current of the differential protection and compensation scheme[J]. Relay, 1997, 25(7): 4-9.
- [6] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. π 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.
- SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on π -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.
- [7] 杨春生, 周步祥, 林楠, 等. 广域保护研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 147-150.
- YANG Chun-sheng, ZHOU Bu-xiang, LIN Nan, et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 147-150.
- [8] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. 基于时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(2): 1370-1376.
- SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Current differential protection based on time-domain algorithm of capacitive current compensating[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(2): 1370-1376.
- [9] 梁立凯, 韩学山, 王艳玲, 等. 输电线路载荷能力在线定值[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 279-284.
- LIANG Li-kai, HAN Xue-shan, WANG Yan-ling, et al. Online evaluation of transmission line loadability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 279-284.

收稿日期: 2014-04-25; 修回日期: 2014-08-06

作者简介:

金恩淑(1972-), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: jes222@aliyun.com

陈亚潇(1989-), 女, 通信作者, 在读硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究。