

水平井随钻探边技术在构造成图精细校正中的应用

魏晓晗, 鞠 颢, 程 超

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要:随钻测井技术可提供地质实时导向,保持砂体产层高钻遇率。在缺少探井资料的井区,基于水平井随钻探边工具,利用方位等信息以及电阻率反演模型准确定位井眼轨迹,刻画砂泥岩性边界、油气水流体边界,再对包含了界面信息的轨迹抽稀成点,弥补稀疏井网背景下约束井点不足的缺陷,实现高精度构造成图。该方法扩展了随钻测井技术在油气藏精细描述、储层建模中的应用,在东海某气田中的应用验证了方法的可行性。

关键词:水平井 稀疏井网 随钻探边工具 构造校正 低渗气藏开发

中图分类号:TE53 **文献标志码:**A

Application of fine correction of structural mapping using LWD bed boundary detection tool in horizontal wells

WEI Xiaohan, JU Hao, CHENG Chao

(CNOOC China limited Shanghai Branch, Shanghai 200335, China)

Abstract: LWD technology can provide real-time geo-guide and maintain high penetration rate of sand bodies. This paper introduces an application of high-precision structural mapping using bed boundary detection technology in fields lacking of exploration wells. Based on boundary detection tool, wellbore trajectory can be located accurately using information containing of azimuth etc., as well as resistivity inversion model. Thus, we can depict lithology boundaries and fluid boundaries. Through the trajectory line, we can dilute it into series of points, containing the details of interface, which can make up for the deficits of sparse wellbore network. The method extends the application of LWD technology in other aspects, such as fine reservoir description and reservoir modeling. Application in a gas field in the East China Sea verifies the feasibility and reliability of this method.

Key words: horizontal well; sparse well network; LWD tool; structural mapping correction; low-permeability gas reservoir development

随着数据传输系统的不断进步,随钻(WD, While Drilling)技术作为一种技术的革新,在越来越多的领域逐渐发挥着不可替代的作用。随钻测井技术(LWD)在探井中随钻测量数据基本不受泥浆侵入的影响,可反映地层真实信息,且具有极大的时效性,在地层快速评价中发挥重要作用;在水平井、多分支井水平段,随钻测井技术可提供地质实时导向进而保持砂体产层高钻遇率。前人的研究主要集中在设备应用介绍、优化,以及随钻探边工具在地质导向中的应用等^[1-9],在构造成图校正方面,通常的做法为以单个深度点校正。本文介绍一种侧重于发挥随钻测井技术优势的构造成图深度校正方法,并扩展随钻技术在钻后构造成图精细校正方面的应用。

1 随钻探边技术原理

1.1 随钻探边工具优势

随钻探边工具是一种基于高频电磁波电阻率测量的随钻地质导向工具,主要包括电子短节、探边工具和旋转导向工具,探边工具由伽马和电阻率组成,旋转导向则由近钻头伽马,连续斜度、井斜、方位角等构成(见图1)。常用的随钻探边工具有斯伦贝谢的Periscope,贝克休斯的AziTrak,哈里伯顿的ADR。

收稿日期:2019-04-23;改回日期:2019-08-02。

第一作者简介:魏晓晗(1994—),女,助理工程师,主要从事测井解释等工作。E-mail:weixh5@cnooc.com.cn。

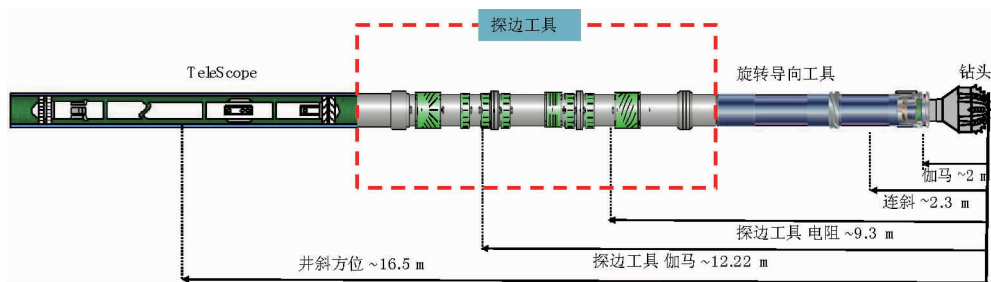


图1 Periscope 探边工具

在水平井钻井过程中,通过发射特定频率电磁波随钻测量地层相位电阻率、衰减电阻率、井斜、方位数据。如 AziTrak 采用 2 MHz 和 400 kHz 的电磁波发射频率,其中井斜、方位角信息可通过横向电磁场分量接收,电阻率相位差和幅度衰减可通过轴向电磁场分量接收,以此综合作为地质导向信号,如 Periscope 仪器,幅度比作为地质导向信号时,探测信号的阈值为 0.25 dB,相位差作为地质导向信号时,测量阈值为 1.5° 。水平段井斜角由于接近 90° ,且如果地层中泥岩和砂岩电阻率对比度明显,在可探测范围内(最大探测距离可达 4.57 m)就可以有效区分井斜和各向异性参数^[10]。

本研究区块所用的是斯伦贝谢公司的 Periscope 深探测方位电阻率测井仪(见图2),其核心是一个多频多源距电流环天线线圈系:一对放置在仪器两端与仪器轴成 45° 夹角的接收天线 R_3 和 R_4 ,另一对接收天线 R_1 和 R_2 放置在 R_3 和 R_4 之间,其磁矩方向与仪器轴一致。 R_3 和 R_4 之间有 5 个发射天线(T_1-T_5),其磁矩方向与仪器轴一致,还有一个发射天线 T_6 的磁矩方向与仪器轴垂直。 R_4 的井斜角为 45° ,方位角为 90° , T_6 的井斜角为 90° ,方位角为 45° ,其余为 0° 。发射天线 T_1-T_5 与接收天线 R_1 、 R_2 共同构成标准 ARC 电磁波电阻率仪器,在 100 kHz、400 kHz、2 MHz 三个频率进行定向电磁波测量,方位信号线圈距包括 2 490 mm、2 134 mm、864 mm、560 mm。

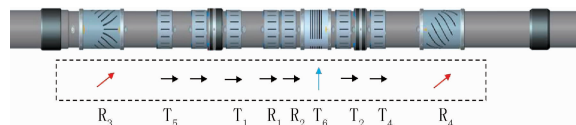


图2 Periscope 探边工具电阻率模块

1.2 电阻率反演

探边工具挂接的近钻头伽马、连斜、旋转导向工具,主要提供边界层的方向走势及距离、环空压力、自然伽马和电阻率测量等信息。当地层电阻率发生

变化的时候,工具产生的电磁场发生电磁场响应,而地层中的电阻率变化越大,边界响应越强烈^[10]。根据这种地层边界的响应,结合探井得到的目的层水平段及上下围岩的电阻率,以及水平段测量得到的电阻率,可以反算出地层电阻边界和工具之间的距离^[10-11]。

在实钻过程中,探边工具像雷达一样扫描着周围地层,当地层边界进入有效探测范围(4.57 m)后就有边界反应(图3),这种边界反应可以清楚地显示在 Periscope 测井反演数据中,推算地层的方位以及距离,从而可及时对水平井轨迹进行优化调整,避免钻出储层。

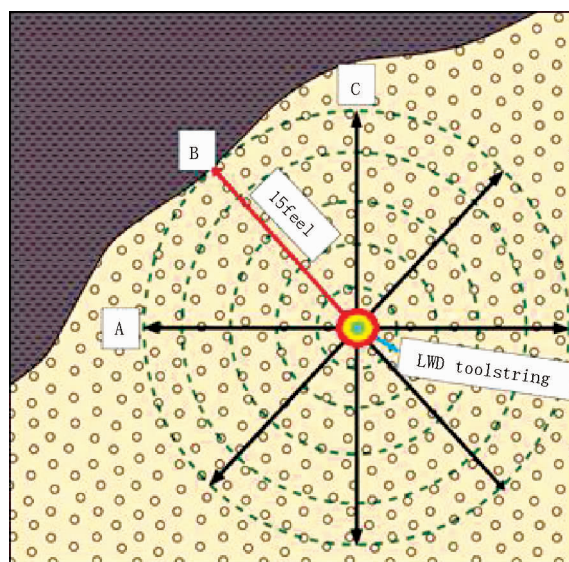


图3 Periscope 随钻测井技术探测示意图

依据探边工具的探边距离,结合水平井实钻的轨迹与边界地层的夹角,可以计算钻头沿当前轨迹方向与边界的距离,而这个预知距离,能为地质决策提供更充裕的时间,提前做出调整,避免钻头钻入边界地层,给水平井的轨迹控制带来极大的便利。如图4所示,当探边工具探测到的边界距离为 4.57 m,井轨迹与地层边界的夹角为 3° 时,探边工具距离

边界的距离为 87 m,扣除工具与钻头间的距离,预知距离可以达到 77 m,可以为迅速调整井轨迹赢取充足的时间。

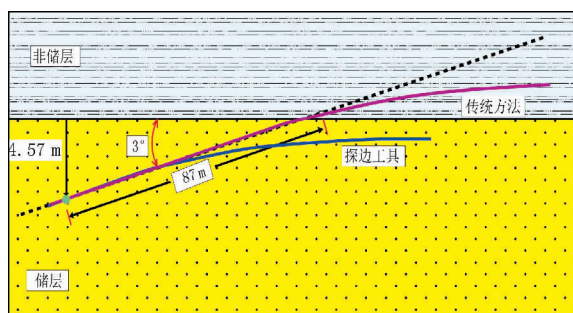


图4 应用 Periscope 探边工具调整井轨迹

2 高精度构造成图校正

2.1 可行性分析

常规的构造校正方法是单纯依靠定向井或直井约束的构造成图,以平面上多个分散井点的钻遇深度校正构造成图,在陆上密集井网情况下,常规构造校正方法能显示其优势,且校正后的构造能精准成图^[12]。然而由于海上钻井成本很高,稀疏井网开发条件下井点较少,特别是目的层段往往井点更少,校正后的构造图存在不确定性,进而影响后期开发调整井布井位。因此提出一种能够充分利用水平井信息,尤其是目的层信息的构造图校正方法具有重要的实际意义。

在大量水平井开发低渗气藏的背景下,常规构造校正方法忽略水平井水平段的构造点信息,目前其他校正方法也仅仅利用水平井出入靶深度点校正构造成图,如图5中黑点位置,但这种方法仍然无法达到精细刻画地层的要求,其精度不能满足油气藏构造精细描述的标准。设想如果能够得到多个约束地层界面信息的点^[12],就可以弥补稀疏井网背景下构造成图精度不够的缺陷。根据这一思路,基于电阻率反演模型^[10]发展出水平井水平段砂体顶面恢复技术,通过水平井已知海拔深度与电阻率反演模型中地层界面的深度之差,反算出构造深度,并将这条包含了构造信息的轨迹线抽稀提取点信息用于构造校正,即图5中的红点,以每一个密集的边界响应点作为构造校正点多点校正构造成图。

常规的构造校正为单点校正,水平井沿着水平方向穿越储层,水平方向上可抽稀获得多点数据,用多点校正的构造成图效果优于单点校正,适用于少井区域。对于地层变化较为平缓的区域,这种充分

利用水平井构造点信息进行构造校正的方法能够刻画高精度的构造图。

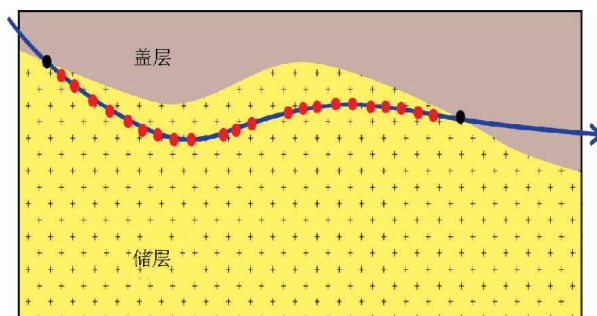


图5 水平井砂体顶面恢复技术示意图

随钻探边工具可以探测上边界和下边界,对于储层中的隔夹层或流体界面,如果电阻率差异明显且在探测深度范围内(4.57 m),在电阻率反演模型中也会有明显的显示,用同样的方法原理可以校正隔夹层顶底面深度图。

2.2 构造校正应用

以东海某三角洲前缘河流相沉积的气田为例。研究区构造为北东展布的长轴状低幅反转背斜构造,构造形态相对完整,气田主体构造范围内断层发育较少。主要目的层为古近系渐新统气层,储层主要为三角洲前缘水下分流河道和河口坝沉积,总体属低孔低渗储层,层内隔夹层不发育。

该油气田构造区内仅有1口探井,基于该油气田实施的三维地震采集资料,认为北东部有构造高点,由于地震资料分辨率限制,认为目的层较为平缓,无起伏,因此在构造区北东部拟钻一口开发井A井,根据北东部单口探井控制的构造图设计水平段开发目的层,钻前目的层顶界面构造层位及设计井轨迹如图6所示。

基于随钻探边工具的电阻率以及方位信号等信息,A井的电阻率反演结果如图7所示。下部图中红色的实线代表井眼轨迹,暗色部分为电阻率低值($2 \sim 4 \Omega \cdot m$),结合研究区地质岩性分析为泥岩,亮色部分为电阻率高值($12 \sim 40 \Omega \cdot m$),为气层电阻率,是含气砂岩的电性响应特征。从A井的随钻电阻率反演剖面上可以清晰看到泥岩的顶边界,在随钻过程中,测深3840~3920 m处水平段的井轨迹距离顶部泥岩1~2 m,沿着气层顶部稳斜钻进,而后随着构造下倾,泥顶与随钻轨迹距离逐渐变小,沿着设计的井轨迹在测深3980 m处钻遇泥岩,于是对井轨迹进行增斜调整,考虑到气水界面距离较近,且通过电阻率反演清晰反映未钻遇或存在泥质隔夹

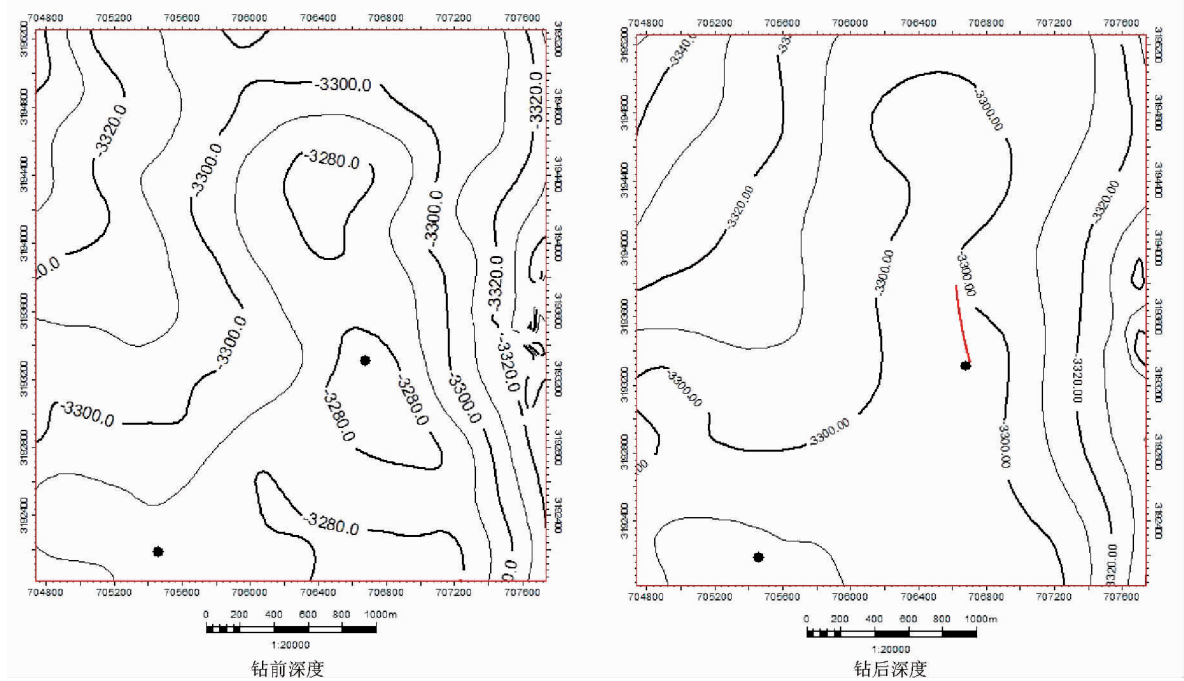


图 8 探边技术多点校正前后构造对比

2.3 应用效果验证

电阻率反演结果认为研究区 A 井在测深 3 960 m 之后开始钻遇泥岩,根据实钻结果及录井显示,该井水平段范围 3 840m ~ 4 260m(测深),水平段长度 420 m,其中气层段范围 3 840 ~ 3 970 m(测深),气层段长度 130 m,泥顶界面真实存在,且位置与随钻探边工具电阻率反演结果吻合,如图 9 所示。

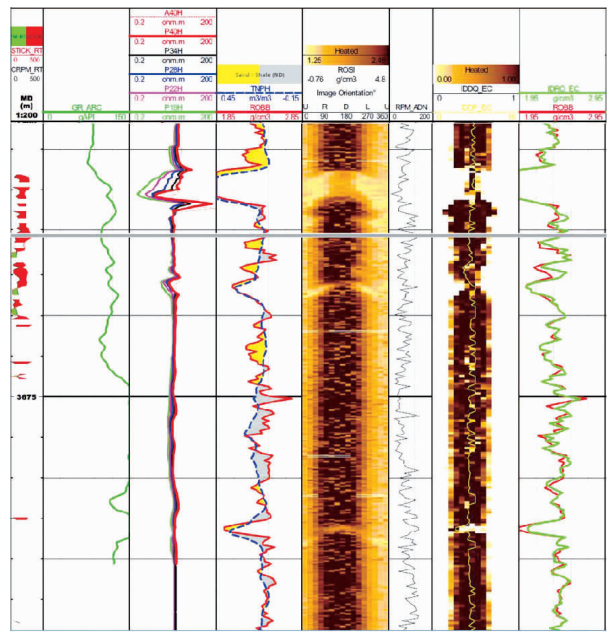


图 9 领眼段目的层 ADN 密度成像图

在该研究区,为了进一步验证基于 Periscope 随钻探边工具电阻率反演得到的目的层构造产状,基

于在领眼段进行的 ADN(Azimuthal Density – Neutron Tool)方位补偿密度 – 中子随钻测井进行分析^[13],如图 9 为领眼段的密度成像图,分析认为在目的层北部构造地层倾角较陡,在 20 ~ 30°左右,倾向 NE。从比例放大后的钻后校正过的深度构造图(图 10)看,领眼位置为构造小高点,水平段位于小高点与鞍部之间,地层倾角存在由陡变缓由大变小的可能性,验证了这种方法的可靠性。

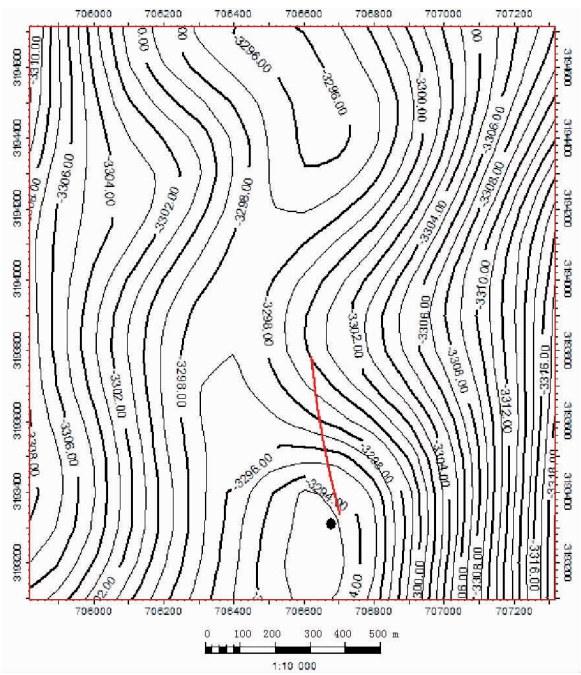


图 10 比例尺放大的钻后深度构造图

3 结论

随钻探边工具基于电阻率反演方法,是能够深探测地层边界的随钻测井前沿技术,能大幅度提高产层钻遇率,准确定位油气层的井眼轨迹。通过将其应用于精确评价地层构造特征、钻后评价储量复算,扩展随钻探边技术的应用范畴,在东海稀疏井网背景下的低渗气藏中取得较好的效果,为处理构造解释成图、油气藏精细描述、精细储层建模提供帮助,具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 吴键,胡向阳,李红东,等. 随钻测井探边技术在水平井地质导向中的应用[J]. 钻采工艺,2014,37(03):26-30.
- [2] 张炳军,冯春珍,杨大千,等. 地层评价随钻测井系统在长庆油田的应用[J]. 测井技术,2014,38(02):221-227.
- [3] 王谦,苏波,李震,等. 随钻地质导向在 S7-59H 井中的应用[J]. 断块油气田,2016,23(02):252-257.
- [4] 吴意明,熊书权,李楚吟,等. 探边工具 AziTrak 在开发井地质导向中的应用[J]. 测井技术,2013,37(05):547-551.
- [5] 黄伟,杜林徽. 直罗油田水平井地质导向技术研究及应用[J].

. 化工设计通讯,2018,44(10):57-58.

- [6] 王松坡,刘云阳. Periscope 随钻测井技术在 H844 井的应用[J]. 内蒙古石油化工,2017,43(08):69-71.
- [7] 宋建虎,高晓飞,孙言啟. AziTrak 深方位电阻率边界探测工具在水平井中的应用[J]. 录井工程,2013,24(01):37-41+87.
- [8] 吴意明,郝以岭,熊书权. 边界探测技术在水平井随钻地质导向中的应用[J]. 海洋石油,2013,33(02):89-93+118.
- [9] GRAHAM RAEPER. Optimized well placement increases reserves, case studies from UK and Norway[R]. Bergen: SPE,2007.
- [10] 胡旭飞,范宜仁,吴非,等. 随钻方位电磁波测井多参数快速反演[J]. 地球物理学报,2018,61(11):4690-4701.
- [11] 刘欢,徐锦绣,高文博,等. 基于解释单元的水淹层原始电阻率反演及应用[J]. 地球物理学进展,2019,34(01):144-150.
- [12] 张婷婷,张胜,夏竹,等. 水平井层面构造恢复技术在构造成图校正中的应用[C]//SPG/SEG 北京 2016 国际地球物理会议电子文集. 北京:中国石油学会石油物探专业委员会(SPG)、国际勘探地球物理学家学会(SEG),2016:94-97.
- [13] 刘书强,周海燕,商明,等. 方位密度中子(ADN)成像测井技术及应用[J]. 新疆石油地质,2007(06):775-776.

(编辑 韩 枫)

(上接第 80 页)

5 结论

(1)多级压裂裂缝引起的诱导应力不能看作各裂缝所引起诱导应力的简单叠加,应该考虑裂缝之间的相互影响。裂缝净压力引起的诱导应力会改变地应力,从而又会影响裂缝的净压力。据此,可以对各条裂缝的净压力进行修正。得到每条裂缝的净压力之后根据叠加原理可以求得诱导应力分布。

(2)修正模型的计算结果与 COMSOL 有限元软件模拟结果吻合较好,精度较未修正模型有明显提高。

(3)以 P1 井为例使用修正模型计算出的结果与微地震监测结果吻合较好。

(4)多级压裂裂缝诱导应力修正模型的建立为今后多级压裂的设计与优化以及评价压裂裂缝形态提供了理论依据。

参考文献:

- [1] RUTLEDGE J T, PHILLIPS W S. Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton

Valley gas field, east Texas[J]. GEOPHYSICS, 2003, 68(2):441-452.

- [2] 唐述凯,李明忠,蔡民辉,等. 重复压裂前诱导应力影响新裂缝转向规律[J]. 断块油气藏,2017,24(4):557-560.
- [3] 倪小明,李阳,赵永超,等. 不同压裂方式诱导应力特征及对缝网改造的影响[J]. 煤炭科学技术,2018,46(6):29-33.
- [4] 邓燕. 重复压裂压新缝力学机理研究[D]. 成都:西南石油大学,2005.
- [5] 尹建. 水平井分段压裂诱导应力场研究与应用[D]. 成都:西南石油大学,2014.
- [6] 刘雨. 多级压裂诱导应力对天然裂缝开启影响研究[D]. 大庆:东北石油大学,2014.
- [7] 陈惠发,AF 萨里普. 弹性与塑性力学[M]. 北京:中文建筑工业出版社,2004:22-35.
- [8] 刘鸿文. 材料力学[M]. 第五版. 上海:高等教育出版社,2011:63-82.

(编辑 韩 枫)