

文章编号:0253-9985(2006)01-0078-07

古龙-徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟 ——构造裂缝发育区带预测及对比研究

魏春光¹,雷茂盛^{1,2},万天丰¹,接维强¹(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院,北京 100083; 2. 中国石油
大庆油田公司勘探分公司,黑龙江 大庆 163000)

摘要:裂缝性油气藏是大庆油田古龙-徐家围子地区主要的油气藏类型之一,营城组是该区深层找气的主要目的层。影响本区营城组构造变形的构造事件确定在晚白垩世早期的青山口组一段沉积后。用石英晶格位错密度法测试得到了该期的构造差应力值,采用弹-塑性增量法对该期构造应力场进行数值模拟表明,该区晚白垩世早期最大主应力方向为北北东-南南西向,构造应力值在平面上整体呈近南北向带状分布。预测古龙-徐家围子地区营城组构造裂缝发育区带位于古龙地区西部及徐家围子地区的西部和北部,为有利的油气聚集区。

关键词:裂缝预测;数值模拟;弹-塑性增量法;构造应力场

中图分类号:TE111.1

文献标识码:A

Numerical simulation of palaeotectonic stress field of Yingcheng Fm in Gulong - Xujiaweizi area: prediction and comparative study of tectoclase development area

Wei Chunguang¹, Lei Maosheng^{1,2}, Wan Tianfeng¹, Jie Weiqiang¹(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Exploration Branch Company of Daqing
Oilfield Limited Company, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163000, China)

Abstract: Fractured reservoir is one of the main oil and gas reservoirs in Gulong - Xujiaweizi area of Daqing oil-field, and Yingcheng Fm is the main deep gas target in this area. The tectonic event that has influenced the tectonization of Yingcheng Fm in this area is believed to have occurred after the deposition of the 1st member of Qingshankou Fm during early Late Cretaceous. The tectonic differential stress value at this stage has been measured by using the quartz dislocation density method, and the tectonic stress field at this stage in the study area has been numerically simulated by using the elastic-plastic incremental method. The simulation shows that the maximum principal stress in the area was in NNE - SSW direction in early Late Cretaceous, and the tectonic stress values was characterized, as a whole, by nearly meridional and zonal distribution. The tectoclase development zones of Yingcheng Fm in Gulong - Xujiaweizi area are predicted to be located in the western part of Gulong area and the western and northern parts of Xujiaweizi area, and they would be the favorable oil and gas accumulation areas.

Key words: fracture prediction; numerical simulation; elastic-plastic incremental method; tectonic stress field

近年来,多种方法的裂缝预测研究得到广泛应用,其中构造应力场有限元数值模拟方法应用

收稿日期:2005-11-16

第一作者简介:魏春光(1979—),男,博士生,应用构造地质学

最为广泛^[1-6]。该方法在近30 a来发展迅速,但是国内外大多数有限元数值模拟仅限于弹性模拟,这与实际岩石的塑性变形特征是不相符的。实际的岩石变形,特别是留下构造形迹的岩石变形都是塑性变形。因此,要真实的模拟岩石变形就必须进行塑性模拟。很多人尝试修改流变方程参数来模拟岩石的流变特征^[7,8],而可靠的流变学参数是很难获得的,所谓的“粘-弹性”构造应力场模拟很难实现。中国地质大学(北京)万天丰教授和陈明佑教授共同研发的弹-塑性增量法巧妙的解决了这一难题,该方法能够近似的模拟岩石的塑性变形^[8]。它是一种比较成熟的二维构造应力场有限元数值模拟方法,其数值模拟程序和模拟方法在20多年的应用过程中不断改进和完善,在油气田及矿产构造裂缝预测研究中取得了较好的应用效果^[9,10]。

大庆油田古龙-徐家围子地区深层,砂岩和火山岩储层均为低孔低渗的致密型储层。为此,运用弹-塑性增量法模拟古龙-徐家围子地区古构造应力场,预测该地区的构造裂缝发育带,为油气田

种实测参数,尽可能真实地模拟实际应力场,并以此为依据进行裂缝发育带的预测。

2 构造应力场数值模拟

2.1 区域地质概况

古龙-徐家围子地区位于松辽盆地北部,为松花江以北、大庆长垣两侧的东、西部断陷区(图2),是大庆油田外围深部天然气勘探的重点区域之一。营城组是主要的储气层。

本区营城组断裂非常发育(图3),断裂的走向为近南北向或北北东向。断陷期(即断层活动时期)为沙河子组和营城组沉积时期,部分断裂在登楼库期也有活动,断陷期全部为正断层。该区小断裂相当密集,且活动时间比较短。断陷期最大主应力方向平行于断裂走向,而裂缝发育方向基本与区域最大主应力方向平行并且受断裂展布的控制,由此可初步判断该区裂缝(张节理)

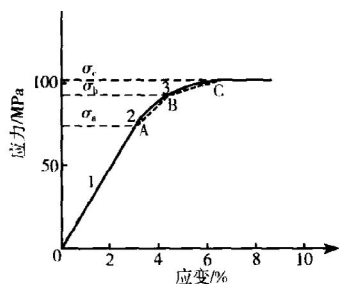


图1 岩石变形的应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain relation curve of rock deformation

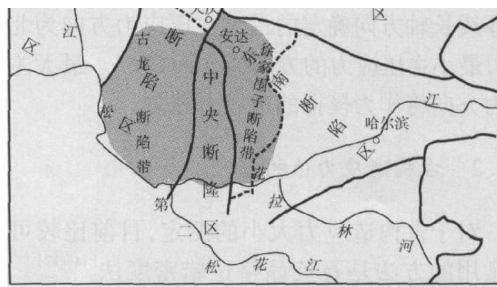


图2 古龙-徐家围子地区构造位置

Fig. 2 Structural location of Gulong-Xujiaweizi area (图中阴影部分为研究区)

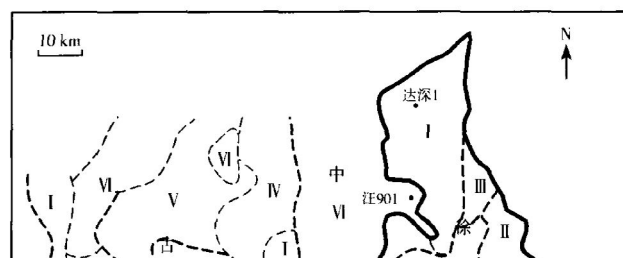


Fig. 4 Division of deformation media and geological model of Yingcheng Fm in Gulong-Xujiaweizi area

本次工作共收集了研究区 10 口井的测井地应力剖面,分别统计了各井段营城组不同岩性的岩石的弹性模量和泊松比,然后根据统计结果确定 6 种沉积相的岩石物性参数。断裂带被赋予最小的岩石强度,小断裂密集区岩石强度介于断裂带和强度最小的碎屑岩之间(表 2)。

考虑模拟塑性变形,我们按 3 次增量法来模拟抛物线的应力-应变曲线。第一次增量段,即弹性

段,采用总外荷作用力的 70%,第二次增量段采用总外荷作用力的 20%,第三次增量段采用总外荷作用力的 10%。3 次增量段所用的物性参数见表 2,即随着变形作用的延续,弹性模量值逐渐变小,而泊松比则逐渐加大,使之近似于塑性变形过程。变形方式采用“平面应变”方式,不考虑岩石的自重。

2.4 数学模型的建立

在有限单元法数学模拟中,单元划分是最基本的工作,同时也是至关重要的一步,单元划分的合理与否直接决定数值模拟的效果和成败。鉴于地质体的形态复杂,一般最适宜全部选用三角形单元。本次工作对研究区划分了 2 250 个单元,1 281 个节点,在底图的上下角各设计了一个约束点。约束点的选定不仅可预防计算模型的大漂移,还可以利用计算后,在约束点附近应力值的大小来判断整个模拟计算是否合理。对每个节点逐行排序,然后逐行对各单元按节点号逆时针编码,编码同时要求边界节点的号码位于单元编码的前部。依次录入每个节点的坐标数组,以及每个单元的物性标号。允许两个约束点在 X 和 Y 方向上分别有 0.5 cm 的位移。

表 2 变形介质物性参数

Table 2 Physical parameters of deformation media

变形 介质	标号	增量次数 1		增量次数 2		增量次数 3	
		弹性模 量/MPa	泊松比	弹性模 量/MPa	泊松比	弹性模 量/MPa	泊松比
火山岩	1	50 000	0.260	47 000	0.290	39 000	0.340
河流相	2	46 000	0.210	43 700	0.230	38 020	0.277
剥蚀区	3	60 000	0.150	58 800	0.165	55 300	0.198
辫状河 平原相	4	42 000	0.220	40 700	0.242	38 300	0.290
辫状河 三角洲相	5	40 000	0.230	38 400	0.253	35 700	0.280
湖相	6	35 000	0.255	33 300	0.280	28 600	0.308
断裂带	7	25 000	0.400	22 000	0.420	17 600	0.440
小断裂 密集区	8	30 000	0.350	26 700	0.371	22 200	0.400

2.5 数值模拟及模拟结果

在数学模拟过程中,根据预判的最大主应力方向(NE15°)施加边界力。按静力学的法则,模型所受外力的合力必须等于零,外力的合力矩也必须等于零,即必须做到外荷作用力系平衡,以保证计算的模型不发生整体移动和转动,为此必须满足下列3个方程: $\sum F_x = 0$; $\sum F_y = 0$; $\sum M = 0$; 式中 F_x 为边界上某一节点上外荷作用力 X 方向的分量,向右为正,向左为负; F_y 为边界上某一节点上外荷作用力 Y 方向的分量,向上为正,向下为负; M 为某一个外荷作用力对坐标原点的力矩,此处规定顺时针为正,逆时针为负。在模拟中合力矩小于单向力矩的10万分之一即可认为力系达到基本平衡。

本次工作进行了数十次的调试和模拟计算,最终得到了比较满意的结果。模拟计算结果的验证见表3。计算输出的主要成果包括最大、最小主

显差异。

在徐家围子地区,由于断裂延伸长度较大,造成构造弱化带连接性较好,使得变形介质在平面上的非均质性非常明显;加之断裂走向在平面上变化较大,使得剪应力值在平面上的分布较复杂,应力释放区与应力集中区互相穿插排列,在平面上形成一系列应力变化梯度带。这些具有较大梯度带的应力释放区,特别是被应力集中区所围限的应力释放区是极易造成裂缝发育的区带。综合分析,在徐家围子地区共存在11个应力释放核心区:

1) 安达地区:存在3个应力释放核心区,分别位于达深1井西北、西南及东部地区,剪应力值由40 MPa降至28 MPa。

2) 徐北地区:存在5个应力释放核心区,分别为芳深801-卫深501井地区、芳深7-芳深701井地区、汪9-12井地区、宋深3井东地区、以及升深7井地区,剪应力值由40 MPa快速降至

测

3.1 构造应力场平面分布特征

古龙-徐家围子地区在青一段末的构造应力场表现为近南北向挤压、近东西向拉张,最大主应力方向为北北东-南南西向,最小应力方向为北西-南东东向。除模拟区边缘因边界条件影响造成的构造应力场扰动外,构造应力场方向整体较协调,构造应力场方向变化不大。古龙-徐家围子地区构造应力场构造应力值整体呈近南北向带状分布,剪应力值为20~50 MPa(图5)。在平面上,古龙地区与徐家围子地区的剪应力值分布具有明

显差异,剪应力值由40 MPa快速降至26 MPa。

3) 中央隆起区西边缘存在2个应力释放核心区,剪应力值由38 MPa快速降至26 MPa。

3.2 构造裂缝发育区预测

构造裂缝形成于构造应力的集中与释放过程中,裂缝的形成不仅决定于构造应力的大小,而且还明显受释放节奏因素的影响。在同等应力值变化区间,应力变化梯度较大的地区,产生裂缝的几率也较大。因此,构造裂缝的研究与预测工作应综合构造应力数值大小和变化梯度进行分析。

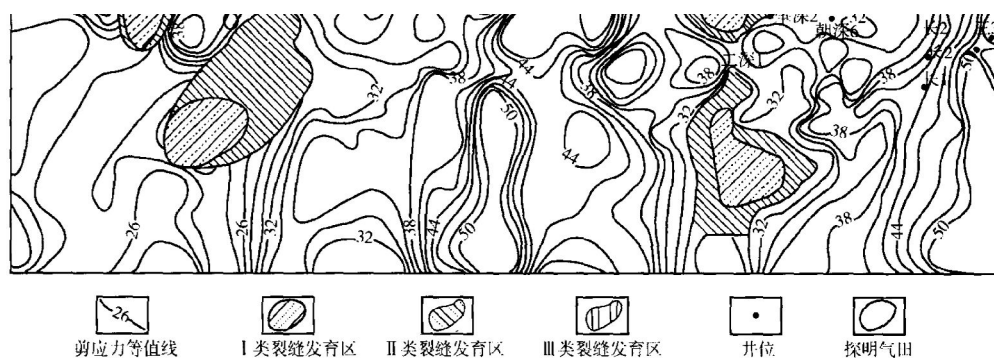


图5 古龙-徐家围子地区青山口组沉积时期剪应力分布及裂缝发育区带预测

Fig. 5 Diagram showing the distribution of shear stresses and predicted fractured zones during the deposition of Qingshankou Fm in Gulong - Xujiaweizi area

一般来说,对于油气田构造裂缝研究,有利于油气运移聚集的裂缝带往往位于剪应力值中等的区域。因为在塑性变形过程中,剪应力值最大的区域,构造位移量最小,构造应力还没有得到释放,尚属于弹性变形阶段的应力集中区,不利于形成裂缝;剪应力值最小的区域,构造位移量最大,构造应力得到较大程度释放,裂缝和断裂最发育,这与弹性模拟预测裂缝发育带的判据正好相反,但断裂过于发育往往会造成油气的严重漏失。因此,在油气田裂缝预测中,往往选择剪应力值处于较小、但不是最小的区域。然而松辽盆地是一个

长期继承性沉降的大型盆地,与其沉降量的规模相比,褶皱改造作用就显得十分微弱。在这一背景下,与此相关的节理构造的发育程度比较微弱,节理构造多为初始张节理,在变形强度比较大的构造带,最多可见派生张节理,远未达到追踪张节理构造发育阶段,而且松辽盆地发育有良好的登楼库组二段和泉头组一、二段泥岩区域盖层,深层断裂很少有直接断达泉头组及其上覆地层(图6)。另外,从探明气田和剪应力分布的对比情况来看(图5),虽然没有明显的规律可循,但这些气田大部分为浅层产气,对深层特别是营城组气藏

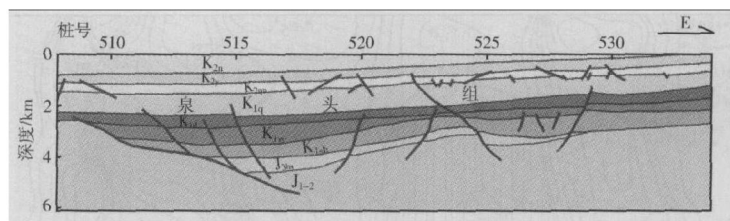


图6 古龙-徐家围子地区地震106测线构造剖面

Fig. 6 Structural section of line 106 in Gulong - Xujiaweizi area

分布预测借鉴意义不大。因此,笔者认为研究区剪应力值最小或较小的地区,有利于油气聚集的构造裂缝比较发育,并应用如下原则确定了不同程度的构造裂缝发育区带(图5)。

1) I类构造裂缝发育区:应力释放区的核心区域、具有较大的应力梯度带,是构造裂缝最发育的地区。

2) II类构造裂缝发育区:应力释放区的非中心地带,以及具有较小应力梯度带的应力释放区,构造裂缝比较发育。

3) III类构造裂缝发育区:应力释放区的非中心地带,以及具有极小应力梯度带的应力释放区,构造裂缝较不发育。

4) 构造裂缝不发育区:除上述3类以外的区域,构造裂缝不发育。

从图5中可以看出古龙-徐家围子地区共存在4个近南北向分布的有利油气聚集区带,即I类构造裂缝发育区,其分别位于古龙地区西部以及紧靠中央隆起区的东部边缘、徐家围子地区的西部和北部。另外,图中的II类构造裂缝发育区也可能是有利的油气聚集区,也应当受到足够的重视。

4 讨论与结论

需要指出的是,在本次构造应力场模拟过程中,样品的采集受到钻井数量及工程进度的限制,采样数量不够;再加上古应力值测试难度较大,以至于我们只得到了5个点的古应力实测值,模拟结果的约束程度还不够高。此外,由于用弹-塑性增量法模拟如此大范围的区域应力场,建立地质模型所使用的沉积相资料比较粗,远没有达到理想要求的沉积微相程度。同时,大庆油田外围深层天然气的勘探程度还比较低,已探明的气田数量很少,因此在利用已有勘探成果标定有利油气聚集区带时

尚缺乏足够依据。鉴于上述原因,模拟结果及裂缝发育区带预测还有待进行进一步的研究。

致谢:北京雪桦石油公司的贾庆军高工、张守仁高工、林梁高工对论文工作做了资料准备和技术指导工作。在此表示诚挚的感谢。

参考文献

- 1 张厚福,张万选.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1989.247~248
Zhang Houfu, Zhang Wanxuan. Petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. 247~248
- 2 张景和,孙宗顺.地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M].北京:石油工业出版社,2001.3~25
Zhang Jinghe, Sun Zongshun. Stress, testing technology of fissile and their application in oil exploration and exploitation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. 3~25
- 3 孙庆和,陈发景,李长禄,等.大庆头台地区扶余油层无效缝的形成与分布[J].地学前缘,2000,7(4):391~402
Sun Qinghe, Chen Fajing, Li Changlu, et al. Formation and distribution of invalid fractures in Fuyu reservoir of Toutai area of the Daqing [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 391~402
- 4 李淑恩,张绍辉,岳奎,等.构造应力场数值模拟分析技术及其应用[J].油气地质与采收率,2001,8(6):38~40
Li Shu'en, Zhang Shaohui, Yue Kui, et al. Tectonic stress field numerical simulation analysis and its application [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(6): 38~40
- 5 王双喜,宋惠珍,刘洁.塔里木盆地构造应力场的数值模拟及其对油气聚集的意义[J].地震地质,1999,21(3):268~273
Wang Shuangxi, Song Huizhen, Liu Jie. Numerical simulation of tectonic stress field in Tarim Basin and its significance in oil and gas concentration [J]. Seismology and Geology, 1999, 21(3): 268~273
- 6 曾联波.构造应力场与低渗透油田开发[J].石油勘探与开发,1998,25(3):91~93
Zeng Lianbo. Tectonic stress field and development of low permeability oil field [J]. Oil Exploration and Development, 1998, 25(3): 91~93
- 7 万天丰.古构造应力场[M].北京:地质出版社,1988.82~87,124~144

(下转第105页)

- 6 徐言岗,贺自爱,曾凡刚. 川东北天然气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 274 ~ 278
Xu Yangang, He Ziai, Zeng Fangang. Characteristics of gas accumulation in northeastern Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 274 ~ 278
- 7 陈洪德,覃建雄,田景春,等. 中国南方古生界层序地层格架中的生储盖组合类型及特征[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 62 ~ 69
Chen Hongde, Qin Jianxiong, Tian Jingchun, et al. Types and features of source-reservoir-cap rock combinations in Paleozoic sequence in southern China[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 62 ~ 69
- 8 魏国齐,陈更生,杨威,等. 川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 254 ~ 260
Wei Guoqi, Chen Gensheng, Yang Wei, et al. Sedimentary system of platform trough in Feixianguan Formation of Lower Triassic in northern Sichuan basin and its evolution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 254 ~ 260
- 9 吴世祥,汤良杰,郭彤楼,等. 米仓山与大巴山交汇区构造分区与油气分布[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 361 ~ 365
Wu Shixiang, Tang Liangjie, Guo Tonglou, et al. Structural zonation and oil/gas distribution in intersecting area of Micang and Daba mountains[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 361 ~ 365
- 10 魏国齐,杨威,张林,等. 川东北飞仙关组鲕滩储层白云石成因模式[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 162 ~ 166
Wei Guoqi, Yang Wei, Zhang Lin, et al. Dolomitization genetic model of Feixianguan oolitic beach reservoirs in northeast Sichuan basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(2): 162 ~ 166

(编辑 李 军)

(上接第84页)

- Wan Tianfeng. Paleo-tectonic stress field[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. 82 ~ 87, 124 ~ 144
- 8 万天丰. 构造应力场研究的新进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(1 ~ 2): 226 ~ 235
Wan Tianfeng. The progress of researches on tectonic stress field[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(1 ~ 2): 226 ~ 235
- 9 陈志德,蒙启安,万天丰,等. 松辽盆地古龙凹陷构造应力场弹-塑性增量法数值模拟[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 483 ~ 492
Chen Zhide, Meng Qi'an, Wan Tianfeng, et al. Numerical simulation of tectonic stress field in Gulong depression in Songliao basin using elastic-plastic increment method[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 483 ~ 492
- 10 张守仁,万天丰,陈建平. 川西坳陷孝泉-新场地区须家河组二-四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 70 ~ 80
Zhang Shouren, Wan Tianfeng, Chen Jianping. Tectonic stress field modeling and fracture prediction in T_3x^{2-4} strata in Xiaoquan-Xinchang area, western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 70 ~ 80
- 11 王庭斌. 新近纪以来的构造运动是中国气藏形成的重要因素[J]. 地质论评, 2004, 50(1): 33 ~ 42
Wang Tingbin. Tectonic movement since the Neogene—a significant factor of the formation of the gas reservoirs in China[J]. Geological Review, 2004, 25(1): 70 ~ 80
- 12 王庭斌. 中国气藏主要形成、定型于新近纪以来的构造运动[J]. 石油天然气地质, 2004, 25(2): 126 ~ 132
Wang Tingbin. Gas pools in China have mainly been formed and finalized during tectonic movements since Neogene[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 126 ~ 132
- 13 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用[M]. 北京:地质出版社, 1993. 30 ~ 31
Wan Tianfeng. Meso-Cenozoic intraplate deformation tectonic stress field in eastern China and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 30 ~ 31
- 14 Ross J V, Lallement H A, Carter N. Stress dependence of recrystallized-grain and subgrain size in olivine[J]. Tectonophysics, 1980, 70(1 ~ 2): 39 ~ 61
- 15 White S. Difficulties associated with paleo-stress estimates[J]. Bull Mineral, 1979, 102: 210 ~ 215
- 16 Nuttal J, Nutting J. Structure and properties of heavily coldworked for metals and alloys[J]. Metal Science, 1978, 12: 430 ~ 437
- 17 郭铁鹰,万天丰. 青藏高原西部日土-普兰一带古构造应力值的估算[J]. 现代地质, 1988, 2(1): 57 ~ 66
Guo Tieying, Wan Tianfeng. Estimation of paleo-tectonic stress magnitude in Rutog-Burang area, western Xizang-Qinghai plateau, China[J]. Geoscience, 1988, 2(1): 57 ~ 66
- 18 McCormick J W. Transmission electron microscopy of experimentally deformed synthetic quartz[D]. Ph. D. dissertation, University of California. Los Angeles, 1977

(编辑 李树森)