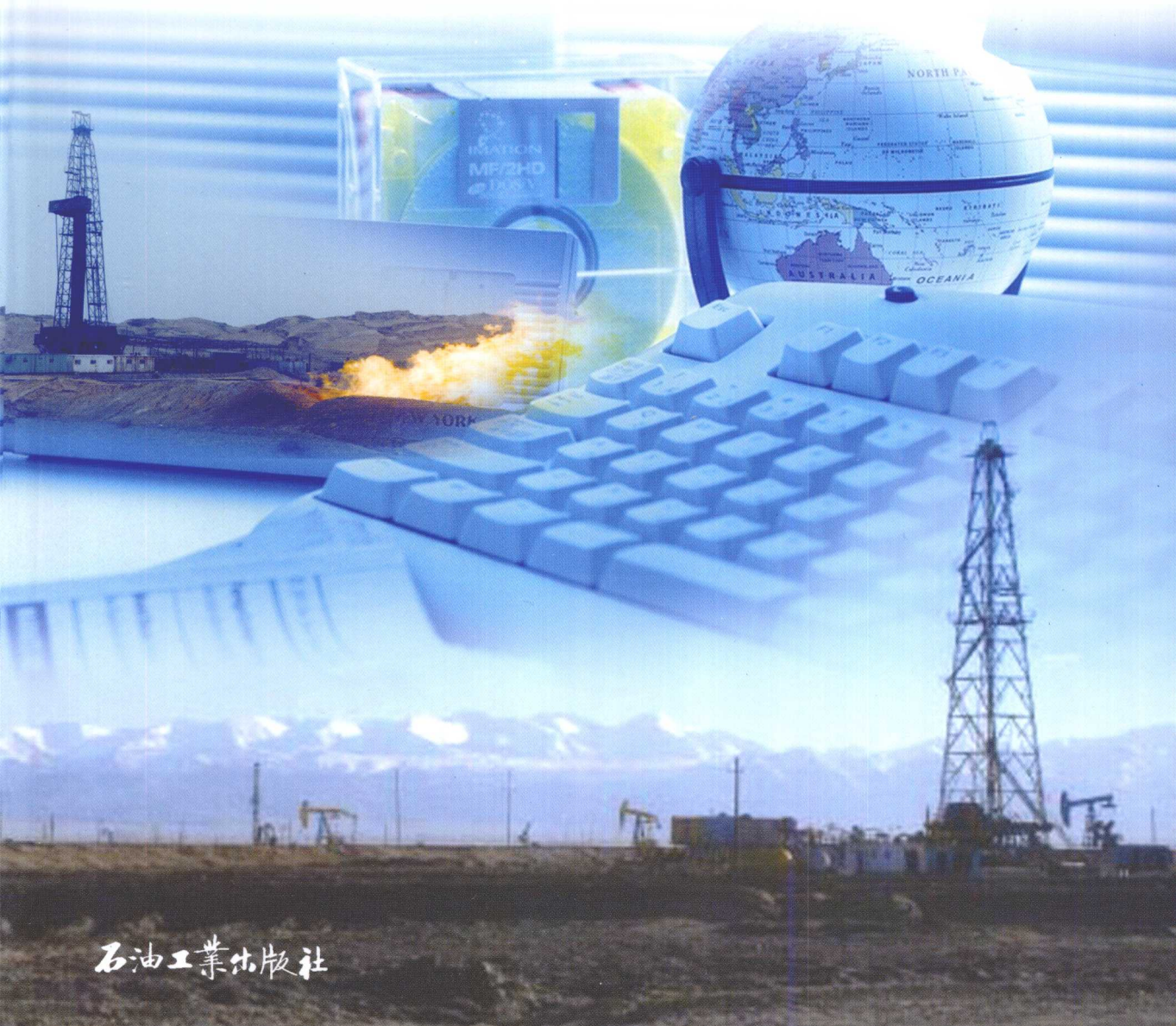


YOUTIAN JIANCE ZHIBIAO YUCE YUJING  
KAIFA DONGTAI XITONG

# 油田监测指标预测预警 开发动态系统

赵智勇 刘志斌 徐建平 蒋华 编著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书在对油田单井测试资料分析及数据处理的基础上,建立了油田区块监测指标的概念、计算及预测方法;根据区块监测指标的预测,从系统输入、输出角度阐述了利用测试数据预测预警油田开发指标的新方法;设计了用监测指标预测预警油田开发指标的软件系统。

本书为预测预警油田开发动态提供了一条新的途径,可供石油高校相关专业高年级本科生及研究生阅读,也可供油田测试与开发动态相关管理及技术人员参考。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

油田监测指标预测预警开发动态系统/赵智勇等编著.

北京:石油工业出版社,2010.5

ISBN 978-7-5021-7708-9

I. 油…

II. 赵…

III. 油田开发-研究

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 051361 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523579 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

---

2010年5月第1版 2010年5月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:11

字数:274千字

---

定价:48.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

# 前 言

国内大多数老油田目前已进入开发中后期，油藏各种矛盾逐渐显现。油层水淹程度高，稳产难度增大，区块平面动用程度不均衡，开采方式不合理，井网连通程度变差，等等，这些都严重制约了油藏开发效果的提高，阻碍了油田实现长期高产、稳产的目标。因此，认清油藏剩余油分布、地下油水渗流特征、油水井连通程度及油层压力平衡状况就变得尤为重要。目前，研究人员已将各种数学、化学、机械技术与计算机模拟技术进行结合，使得各种测试技术日新月异的发展，测试精度不断提高，测试资料逐步完整。

动态监测技术也已经过基础实验、理论研究、测井数据采集、资料处理解释走向应用阶段，并初步形成了一套动态监测技术，已成为油田高含水开发后期认识地层状况的重要手段、油田工程师的“开发医生”。在此基础上，能够利用现有的单井动态监测资料研究区块整体监测油藏开发状况，进而预测预警油田开发指标（开发形势），对油田开发过程中不合理的开发方式进行提前预警目的的研究，将使油田管理更具有主动性、科学性、预见性。

基于此种目的，笔者将石油工程、现代数学和计算机相结合，提出了一种新的思维方法，用单井的监测资料描述区块开发特征，再利用区块监测指标预测预警油田开发指标。这种将测试资料从点到面、由区块监测指标到开发指标的表征方法，为更好地把握油田开发动态提供了一种全新的方法。

笔者通过采用分布式架构技术，以浏览器（Browser）/服务器（Server）方式研制成了一套适合油田监测指标数据预测预警开发指标的系统软件，该软件具有对测试数据的实时更新、处理及开发指标预测预警的功能。该软件系统规模大、功能丰富、逻辑结构清晰、实用性强。

油田监测指标数据预测预警系统软件在国内多个油田的不同区块进行了验证，实践证明，其能够准确地预测油田开发动态形势，可作为指导油田开发生产的实用方法。本书的出版必将为测试资料解释人员及油田开发人员的工作提供方便，可以大大提高测试资料的应用水平及油田开发效果，为科学合理开发、管理油田提供可靠依据。

本书在撰写过程中得到西南石油大学刘道杰博士、张平硕士，大港油田测试公司申海华高级工程师、杨玲工程师等的大力帮助。他们在资料整理、数据处理、软件测试、书稿编排等方面做了大量的工作，在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中不足之处敬请广大读者和同行批评指正。

编 者  
2010年3月

# 目 录

第一章 概述	1
第一节 背景	1
第二节 本书的主要研究工作及方法	16
第二章 单井测试理论分析与数据处理	19
第一节 单井监测技术原理	19
第二节 单井监测资料应用分析	28
第三节 单井测试数据处理技术	31
第三章 区块监测指标分析及预测	47
第一节 区块监测指标表征	47
第二节 区块监测指标相关性分析	53
第三节 区块监测指标预测	60
第四章 区块监测指标预测预警开发指标方法	68
第一节 系统预测原理	68
第二节 系统预测方法	82
第三节 区块开发指标与监测指标相关性分析	89
第四节 区块监测指标预测开发指标实例分析	91
第五节 区块监测指标预警区块开发指标方法	101
第五章 监测指标预警开发动态系统设计及应用	115
第一节 监测数据处理及预警系统构架	115
第二节 软件系统结构及功能设计	115
第三节 系统开发及运行环境	121
第四节 系统数据库结构设计	123
第五节 预测预警油田开发动态实例	139
参考文献	167

# 第一章 概述

## 第一节 背景

### 一、油田开发指标预测预警问题

随着油田注水开发的逐渐深入,油藏开发矛盾日益突出,稳产难度进一步增大,区块平面上剩余油分布零星,剖面上层位动用不均衡,注采井网不够完善,水淹程度较高等问题,严重制约了油藏开发效果,影响了油田最终采收率。

产量监控预警在油田生产环节中的应用研究并不陌生,国内外在这方面的研究已经取得了许多成果,而且部分油田已经运用计算机网络技术构建了自己的网络管理平台。同时,预测技术和预警管理模式正逐渐为国内外各大油田公司所应用,这使得监控预测技术和计算机网络技术相结合的预测预警模式成为一种必然趋势。

但是,仅根据对产量指标的监控及动态变化趋势进行预警是不够的。要分析一个油田的开发水平和评价其开发效果,需要对多项指标综合进行衡量,比如含水上升率、地层压力保持状况、油层动用程度,等等。而目前在油藏开发水平评价中,分析这些指标时,往往是孤立地进行各自评价,没有建立起这些指标之间的一种联系,立足点也只是对油田目前的开发水平进行综合评价,从预警层面对油田未来开发形势的预判研究较少;动态分析人员在开展动态分析时,一般也是在出现问题后,开始找问题、提措施、调整治理,有的井即使采取了措施,也难以恢复到以前的产量。现今,油田开发人员尝试用地质资料及开发基础数据,采用多种方法对油藏动态进行分析,但对开发指标及开发形势预判的效果并非对所有类型的油藏都令人满意。

### 二、油田动态监测技术现状

#### (一) 流动剖面监测技术现状

##### 1. 注入剖面测井技术现状

注入剖面测井技术初步实现了系列化、集成化。针对水驱注入剖面测井,重点是在完善和推广常规技术、组合测井技术、提高注入剖面资料准确性以及大孔道识别方面开展技术攻关,研制成功了新型同位素载体(密度在  $1.03 \sim 1.08 \text{g/cm}^3$  之内,粒径在  $100 \sim 900 \mu\text{m}$  之间),提高了同位素吸水剖面测井质量,目前已在各油田普遍应用;完善、发展了五参数组合测井技术,以流量计确定层段的流量,以同位素确定分层注入量,以井温确定主吸水层,以压力曲线控制测井质量,提高了资料准确性和可信度,应用规模已占注入剖面测井总井次的 40% 以上;研制并应用了中子氧活化和示踪相关测井技术,较好地解决了地层大孔道、深穿透射孔井的注入剖面测井问题,进一步提高了配注井中分层吸水量的测量精度,提高了注入剖面测井技术对水驱油

田开发的适应能力。电磁流量测井技术适用于聚合物溶液的流量测量,具有测量精度高、重复性好的优点,在笼统注入井中可以准确确定分层吸液量,在配注井中可以确定层段流量,目前电磁流量测井技术在聚驱注入剖面测量中得到广泛应用。

## 2. 产出剖面测井技术现状

### 1) 产出剖面测井技术的发展

产出剖面测井技术的发展始于20世纪30年代。最初只有温度测井,主要用于产出剖面监测;40年代又研制了压力计和流量计,当时这些仪器只能进行单参数测量;50年代研制出了可同时测量多个参数的综合产出剖面仪器,一次下井可以同时测量流量、压力、温度、持水率和密度等多个参数的信息。

20世纪60年代开始逐步形成了比较完整的测井体系,在50年代产出剖面仪器的基础上加入了磁定位仪和自然伽马仪。60年代中后期为了适应油田需要,国外测井公司研制出了不同类型的找水仪,仪器的不断发展使得产出剖面测井变得更加简便,通过这些仪器所获得的产层动态信息也变得更加丰富。

20世纪70年代,国外各种产出剖面测井仪器的研制和应用继续不断发展。各大公司分别推出了各自的生产测井仪,其中最具代表性的是吉尔哈特公司于70年代末推出的DDL-I型生产测井仪和康普乐公司的AT<sup>+</sup>数控生产测井仪,后来吉尔哈特公司在DDL-I型生产测井仪的基础上又相继推出了DDL-II、DDL-III、DDL-IV型生产测井仪。在理论方面,研究者对以前解释模型中的一些参数进行了必要的探讨和修正,并对解释模型进行了相应的改进。

20世纪80年代,随着计算机技术的应用,生产测井步入了数字记录数控测井的时代。产出剖面测井仪的研制得到了更长足的发展。不论是过环空产出剖面测井技术,还是过油管产出剖面测井技术,都日趋成熟并逐步完善。

到了20世纪90年代,阵列技术开始应用于测井。阵列技术的使用使得持率和流速可视化。

21世纪初,各大测井仪器研发公司相继推出了自己的可视化多相持率测井仪,包括斯伦贝谢公司的PS产出剖面测井系统、Sondex公司的多相持率成像仪。

### 2) 产出剖面测井理论体系的发展

在测井技术不断发展的同时,产出剖面测井的理论体系也在不断发展。

Poettman和Carpenter在1952年首先研究了产出剖面测井的温度剖面问题。1962年Kirkpatrick提出了流动井温度梯度作为总流体速度、地层地温梯度以及油管内径三个量的函数。1960年Ros研究了铅直管中气液两相流动的相关规律。1963年Duns和Ros在研究铅直管中气液两相流动的相关规律的基础上提出了Duns-Ros流型分析图,紧接着Hagedorn和Brown,Orkiszewski,Govier和Aziz,Taitel,Hasan等人相继提出垂直圆管中气液两相流动不同的流型边界。1965年Hagedorn和Brown针对油、气、水混合物在铅直管中的流动,基于单相流体的机械能量守恒定律,提出了 $\Delta z$ 段管上得出的压力梯度表达式。1965年Zuber N和Findlay J针对均流模型、滑脱模型与实际两相流动之间存在的偏差提出了漂流模型。1969年Govier G W和Aziz K根据对油水两相流动的照相结果将流型划分为泡状流、段塞流、泡沫流和雾状流。随后,Govier和Hasan等人又提出了油水两相流动流型图。1983年Davarzani研究了大直径油管中油、水两相的流动特征。对于环空管内的气液流动,1982年Sadatomi对直径比为0.5(套管外管内径 $D=30\text{mm}$ ,内管外径 $d=15\text{mm}$ )的垂直同心环空管的流型进行了初步的研究。20

世纪 80 年代中期以后, Caetan、Kelessidis、Hasan 等学者在较大的流速范围内对环空管内的流型进行了进一步的研究。

在计算方法方面, 1979 年 Cmelik 根据实验总结提出了计算泡状流滑脱速度的经验公式。1988 年 Hasan 在实验基础上对 Cmelik 提出的滑脱速度计算公式进行了改进, 给出了泡状流到段塞流的转换边界。随后 Sadatomi、Caetano、Kelessidis 等人对环空管内两相流动的流型进行了研究, 通过研究对 Taitel 气泡上升速度的计算进行了探讨。

20 世纪 90 年代中期 Hansan 和 Kabir 综合考虑了井筒内不同流型下流体的动力学特点、斜井及井截面的几何形状影响、油套环空流体传热机理等因素, 提出了一种既适合自喷井也适合气举井的两相流动的温度剖面预测方法。

### 3) 我国产出剖面测井的发展

我国产出剖面测井起步于 20 世纪 60 年代初。经过几十年的发展, 针对我国油田产量普遍较低的实际, 研究出了以集流型为主的测井仪器, 闯出了一条具有中国特色的产出剖面测井道路。我国产出剖面测井的发展主要表现在产出剖面测井工艺、测井仪器的发展两个方面。

#### a. 产出剖面测井工艺

(1) 抽测法: 也称事先下入仪器法, 20 世纪 70 年代后期由胜利油田提出。其工艺是起出抽油机井管柱, 将仪器下到设计测点, 然后再下入管柱, 待生产稳定后, 边抽油边测井。

(2) 临时气举法: 其工艺是取出抽油机井原抽油管柱, 重新下入气举管柱, 采用气举采油, 然后用测井仪器测取分层资料。

(3) 双油管法: 在套管抽油机井中下入两套管柱, 一套为抽油管柱; 另一套为测试管柱, 作专门的仪器通道。

(4) 过环空法: 在抽油机井正常工作时, 将下井仪器通过油管 and 套管之间形成的“月牙形”空间(通常称环形空间)下至目的层位进行测试的一种工艺。

(5) 环丢法: 该工艺是 20 世纪 80 年代末针对抽油机井下机械堵水管柱无法测试而提出的。堵水管柱采用丢手封隔器。下测井仪既要通过油套环形空间, 还要经过丢手封隔器管柱。

目前较常用的是过油管法和过环空法。过油管法主要用于自喷井和气举井, 对油井的生产不产生影响, 测得的资料与实际吻合; 过环空法则主要用于抽油机, 它要求井泵挂以上小于  $20^\circ$ , 相对来说工艺较复杂, 测井时间也较长。

#### b. 产出剖面测井仪器

我国产出剖面测井仪器的发展从研究角度大致可以分为 3 个阶段。前期主要研制了适用于自喷井的测井仪; 20 世纪 70 年代后期至 80 年代初主要研究了适合抽油机井找水的各种工艺及测井仪器; 80 年代初至今主要研究和推广过环空测井仪。

第一阶段: 自喷井测井仪研究阶段。大庆油田于 20 世纪 60 年代初着手研究适合油、水两相流的两参数测井仪。最早以找水为目的研制了 69 型找水仪, 又于 1973 年推出了全国应用较广、直径为 48mm 的 73 型找水仪; 紧接着又研制了 CY-751 型油井综合测试仪。

第二阶段: 由于 20 世纪 70 年代末全国自喷转抽油井逐年增多, 解决抽油井分层测试问题已迫在眉睫, 胜利、河南、江汉和大庆等油田先后研究了气举法和抽测法来解决抽油机井找水问题。胜利油田为抽测法工艺研制了大直径的 78 型找水仪。江汉油田经 5 年努力于 1983 年研制出了直径为 23mm 的 JCF 型皮球集流式分测仪, 实现了用过环空法在正常生产情况下测试抽油机井产出剖面。

第三阶段:1986年我国抽油机井数约占生产井总数的8%,为此原石油工业部狠抓了过环空测井产出剖面研究和推广工作。大庆油田研制了直径为28mm的皮球集流式含水仪。与此同时,为引进技术及加快过环空产出剖面测井推广步伐,原石油工业部决定引进美国配有示踪流量计及电容法持水率计的多参数组合仪。1986年引进吉尔哈特公司的DDL-Ⅲ数控测井仪,1990年又引进康普乐公司的AT<sup>+</sup>数控测井仪。针对原皮球集流式含水仪测试流量上限偏小、耐温指标较低的缺陷,1987年江汉油田研制出了伞式集流的LS-φ25分测仪。

“八五”和“九五”期间是我国小直径井下仪种类增加、可靠性提高和向多参数仪发展的时期。20世纪90年代初江汉油田研制了直径为25mm和32mm的JS92多参数测井仪;大庆油田研制了直径为28mm的过环空集流型三相流测井仪和过环空非集流型多参数测井仪;中船重工杭州715研究所也研制了仿1in的DDL-Ⅲ生产测井组合仪。到90年代中期,华北油田、辽河油田、中船715所和大港油田均研制了电动机驱动的外径为25mm金属伞集流型流量含水率仪。同时,为解决低产液抽油机井的测试问题,大庆油田研制了小直径井下分离式生产测井仪,江汉油田研制了小流量分测仪。1996年9月国内推出了数控遥测生产测井系统SGX-2。

另外,为了进行生产测井资料的定性解释,在生产测井仪器不断发展的同时,各油田也编写了适用于自己区块的一些生产测井资料解释软件,最具代表性的是CNPC测井软件项目组于1998年推出的生产测井解释平台(Watch),它是我国第一套商品化程度比较高、功能比较齐全的国产生产测井解释处理软件。Watch平台综合了国内外生产测井分析评价的先进技术和解释经验,考虑了各油田生产测井情况的复杂性和评价习惯,涵盖了生产测井的注入剖面、产出剖面、工程测井、产层参数评价的各个领域,是目前我国自行研发的技术水平最高、功能最强、方法比较全面的专业化生产测井软件。

## (二) 压力监测技术现状

地层压力监测是油藏动态监测中一项十分重要的内容,对压力监测资料的分析可以为油田开发方案的制订、调整及动态分析、产能预测等提供重要的信息及动态参数。试井是压力监测应用的一种重要技术,是在油藏动态条件下进行的。它是以渗流力学理论为基础,以压力计等仪表为测试手段,对油气井和水井进行动态压力测试,来研究地层的各种物理参数的方法。利用试井资料可得到许多地层参数(完井效率、地层压力、渗透率及连通情况等),对于估算测试井控制储量、判断是否需要采取增产措施(压裂、酸化等)、制订油气田开发方案都具有重要的作用。

国外试井始于20世纪20年代,试井技术成熟的标志是80年代出现的典型曲线拟合法,90年代计算机技术的发展使试井分析从图版拟合变成自动拟合。

我国试井始于20世纪40年代玉门油田,70年代各大油田全面推广使用常规试井分析方法;80年代,引进国外试井软件和电子压力计,我国试井技术出现质的飞跃,试井解释从手工画直线分析发展到计算机辅助试井解释地质模型诊断,一些大学和油田公司合作研制了国产试井解释软件。高精度电子压力计的广泛应用,使我国的试井从机械压力计时代走向电子压力计时代,许多厂家和研究单位具有研制各种规格电子压力计的能力,测量数据精度的提高为试井理论和资料解释方法的发展提供了有力工具。国内许多专家学者从事试井理论研究工作,发表了大量研究论文,为试井软件开发和各类试井资料解释提供了理论支持。



20 世纪 30 年代, 麦斯盖特提出外推法; 50 年代, 米勒、戴斯和哈钦森提出长时间生产后关井压力分析的 MDH 法, 霍纳提出了压力恢复单对数直线段分析方法, 马休斯等人提出任意形状油藏中压力分析的 MBH 法; 60 年代, 变产量叠加法、复杂边界单对数直线段分析、常规分析方法趋于完善; 70 年代, 无量纲概念、雷米典型曲线图版、麦金利图版、阿格厄尔图版、格林戈登图版、典型曲线法诞生; 80 年代, 鲍特导数图版, 试井模型诊断技术, 双孔、复合、双渗、垂直裂缝试井模型完善, 卡玛尔—布里格姆脉冲试井典型曲线拟合、非牛顿流体试井出现; 90 年代, 自动试井拟合技术、低渗透油藏试井、多井数值试井技术完善。试井技术经过几十年的发展, 油藏和气藏单相流动的试井理论、分析方法、试井软件已非常成熟, 通过各类试井模型, 在试井软件中组合成许多试井解释方法, 提供储层模型诊断、流动期划分、曲线自动拟合和结果检验校正等功能; 可以系统地分析计算均质地层的井筒储集系数、表皮系数和地层压力; 判断边界性质, 即断层及岩性尖灭等不渗透边界、边水或底水等恒压边界; 计算边界距离; 评价地层损害程度。对于有裂缝的地层, 采用双孔隙模型, 还可以判断裂缝和基质的窜流能力, 计算窜流系数、储容比; 对于压裂井, 可以计算裂缝半长, 评价压裂效果; 对于存在储层物性或流体径向变化的情形, 可以计算不同内半径的径向渗透率; 对于注水井, 可以计算油水前缘的径向位置; 对于气井, 还可以确定气井产能方程, 核实气井单井控制储量。采用水平试井技术, 可以有效地计算水平和垂向渗透率; 采用多井干扰试井, 可以判断井间连通情况, 计算导压系数。低渗透油藏非自喷井的 DST 试井方法也很成熟。

目前, 国际上比较有代表性的试井解释软件有 SSI 公司的 Workbench 软件、KAPPA 公司的 Saphir 软件、EPS 公司的 PanMesh 软件、WT Software 公司的 Fast 软件。这些软件模型丰富, 功能强大, 商品化程度高, 并具有生产系统分析等拓展试井资料应用范围的功能。近年来, 新推出的数值试井解释版本考虑了多井生产的影响, 二维视觉效果使地质模型更接近实际, 试井分析成果更具实际意义。

### (三) 井间动态监测技术现状

自 20 世纪 60 年代中期以来, 油田井间示踪测试技术在世界上许多国家得到了长足的发展。随着技术的进步和油田开发形势需求的日益增加, 井间示踪测试已逐步成为油田一次采油和二次采油过程中一种不可或缺的、重要的油藏工程手段, 推广应用高速增长。在早期, 井间示踪测试仅用于定性描述油田注入流体地下运动的方向性和油藏非均质特性。随着新型示踪剂的产生、示踪剂检测技术的进步、测试工艺的创新、油藏模型及模拟技术的发展, 井间示踪测试技术在整体上得到了质的提高。

20 世纪 60 年代, Brigham 和 Smith 为预测示踪剂在水驱五点井网中的突破时间和峰值浓度, 介绍了一种简单的半解析模型; 70 年代, Cooke 提出将色谱理论用于测量剩余油饱和度; 80 年代, Brigham 和 Abbasza Deh 等改进了半解析模型, 提供了流管中有径向弥散的流动方程的解析解; 80 年代末, J S Tang 等提出了分配性示踪剂的应用解释方法。近年来, 各国在该技术的矿场试验和理论研究方面进行了较深入的研究, 并取得了一定的成果。

以上动态监测技术对油田开发主要是从宏观上和定性的角度给予指导应用, 为油气田开发方案的编制和调整、井下技术状况的认识、储层评价及作业措施和效果评价等方面提供了现场依据, 对正确、合理地开发油气田起到了重要的指导作用。随着数字化油田概念的提出, 油田管理层也开始要求动态监测解释工作从宏观和定性的角度逐渐转向对油气田监测指标定量

的解释,从而可以定量掌握井的生产状况和油田地层状况,为合理、高效地开发和调整油气田提供技术依据。

### 三、油田动态监测预测预警现状

目前,油田动态监测指标的应用主要集中在单井的解释及单井措施调整等方面,而利用动态监测技术对于整个区块开发形势的预测预警研究目前还未见报道。随着测试技术的发展,应该利用现有单井监测资料从区块整体监测油藏开发状况,预测预警油田开发指标(开发形势),做到对油田开发管理更主动、更有预见性。这使得利用油藏动态监测资料对开发指标(开发形势)进行预测预警已具备了物质基础;系统理论的成熟与功能模拟原理的广泛应用又为这种预测预警方法奠定了理论基础。

#### (一) 油田开发指标预测现状

“十五”期间,国内大多数油田进入高含水阶段,动态监测技术取得了一批创新性强、实用性好、效益显著的技术成果,基本满足了油田开发的需求。

“十一五”期间,随着国内油田开发对象的复杂化,如“三低”油田、深层天然气大规模开发、开发方式的多样化(如三次采油技术、水平井开采技术及稠油热采等技术的规模化应用),油田开发新形势对动态监测技术提出了严峻的挑战,监测系统必须紧跟油田开发的发展步伐,通过强化技术创新,不断满足油田持续、有效开发对动态监测技术的需求。

油田动态监测技术的主要任务就是为油田开发方案的编制和调整、井下技术状况、储层评价、作业措施和效果评价等工作提供现场支持。经过几十年的发展,我国动态监测技术在基础实验、理论研究、测井数据采集、资料处理解释及应用等方面开展了卓有成效的工作,并初步形成了一套具有特色的成熟动态监测技术,主要包括注入剖面测试技术、产出剖面测试技术、不稳定试井技术、压力监测技术(流压、静压测试,动、静液面测试,油压、套压测试)、剩余油饱和度测井技术、工程测井技术和井间动态测井技术等。

油田开采效果评价、油田开发规划、油田开发方案设计以及井网加密调整等决策问题都是以油田开发指标变化特征作为重要依据的。油田开发指标的预测方法不下百种,有经验公式法、水动力学法、物质平衡法、油藏数值模拟法、通用预测法等。

科学预测的基本原理在于利用事物发展过程中各种因素之间相互影响的规律性。在预测的过程中,应坚持并考虑几个原则:精确性、弹性原则、适应性原则、持续性原则、简便性原则。

对油气田开发指标的精确预测是制订油气田优化开发方案的前提,因此对油气田动态开发指标的预测越来越受到人们的重视。近年来,石油系统的科研院所和生产单位在油气田开发指标预测方面做了大量的研究工作,从不同的角度提出了一些很好的预测模型,综述如下。

#### 1. 单一模型类预测方法

这类方法只考虑地质因素,即在当时的技术水平下所能达到的最大产量。当然,研究区的油品性质(稀油、稠油、高凝油等)不同、储层岩性不同、地质构造不同、开采方式不同,相应的产量预测方法也不同。

### 1) 泊松旋回法

以泊松旋回模型为基础,引入油田开发动态资料,拟合得到数学模型,进而预测油田产油量。

泊松模型为:

$$\theta = A \times t^n \times e^{-t} \quad (t \geq 0) \quad (1-1)$$

将石油产量引入泊松模型,并经数学处理得到:

$$Q = A \times (t^n \times e^{-t})^b \quad (1-2)$$

式(1-2)即为油气田产量预测中的泊松旋回。

### 2) 递减曲线法

递减曲线法建立在渗流力学基本原理之上,是利用油田产量递减规律对将来的产量变化趋势进行拟合的方法。

产量递减方程包括美国学者 Arps J J 提出的以下 3 个方程。

指数递减方程:

$$q_o(t) = q_i \exp(-D_i t) \quad (1-3)$$

调和递减方程:

$$q_o(t) = q_i / (1 + D_i t) \quad (1-4)$$

双曲递减方程:

$$q_o(t) = q_i (1 + n D_i t)^{-1/n} \quad (1-5)$$

式中  $q_i$ ——初期产油量,t;

$D_i$ ——初始递减率,%;

$n$ ——递减指数;

$t$ ——开发时间。

### 3) 增长模型法

增长模型法建立的是累计产量与时间及含水率之间的关系,共包括以下 6 个子模型。

广义模型:

$$N_p = \left( N_R^m - \frac{ma}{b} e^{-bt} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1-6)$$

维布尔模型:

$$N_p = N_R (1 - e^{-\frac{t}{\beta}}) \quad (1-7)$$

逻辑斯特模型:

$$\ln \left( \frac{f_{lim}}{f_w} - 1 \right) = \ln a - bt \quad (1-8)$$

t 模型:

$$\lg N_p = \lg N_R + \frac{1}{2.303(n+1)} \times \frac{Q_t}{N_p} \quad (1-9)$$

$\tau$  模型:

$$Q_t = Ct^{\delta-1} \times e^{\beta t} \quad (1-10)$$

新模型:

$$\frac{Q_t}{N_p} = 2.303b \lg N_R - 2.303 \lg N_p \quad (1-11)$$

式中  $m, a, b$ ——互相独立的模型函数。

#### 4) 水驱曲线法

水驱曲线法的粘度适用范围来自于统计分析:

$$\frac{L_p}{N_p} = A + BW_p \quad (1-12)$$

式中,  $N_p = \frac{1}{B} \left[ 1 - \sqrt{(A-1) - \frac{1-f_w}{f_w}} \right]$ 。式(1-12)适用于粘度大于  $30\text{mPa} \cdot \text{s}$  的层状油藏。

$$\lg L_p = A + BN_p \quad (1-13)$$

式中,  $N_p = \frac{1}{B} \left[ \lg \left( \frac{0.4343}{B} \times \frac{1}{1-f_w} \right) - A \right]$ 。式(1-13)适用于粘度小于  $30\text{mPa} \cdot \text{s}$  的层状和灰岩底水油。

$$\frac{L_p}{N_p} = A + BL_p \quad (1-14)$$

式中,  $N_p = \frac{1}{B} \left[ 1 - \sqrt{A(1-f_w)} \right]$ 。式(1-14)适用于粘度  $3 \sim 30\text{mPa} \cdot \text{s}$  的层状油藏。

#### 5) 注水与产油关系曲线法

这种方法的表达式为:

$$\ln W_i = A + BN_p \quad (1-15)$$

式中  $W_i$ ——油田累计注水量,  $10^4\text{t}$ 。

#### 6) 注采平衡法

注采平衡法的模型为:

$$\frac{Q_i}{Q_0 \frac{B_0}{\rho_0} + Q_w} = 1 \quad (1-16)$$

注采平衡法只是注水开发理论上的平衡状态。在实际生产中,注采远未达到平衡,因此,该方法只是对将来注水量的理论预测。

#### 7) 注采特征曲线法

这种方法的数学表达式为:

$$\lg N_s = a + bN_p \quad (1-17)$$

#### 8) 气油比曲线法

这种方法的数学表达式为:

$$\begin{cases} \lg N_s = a + bOSR \\ Q_s = \frac{bQ_0}{\lg R - a} \end{cases} \quad (1-18)$$

式中  $OSR$ ——年气油比,量纲为 1;

$R$ ——采出程度, %;

$Q_s$ ——年注气量,  $\text{m}^3$ 。

油气田开发指标预测是油气藏工程的一项重要内容。油气田开发指标预测的准确性和可靠性,对编制中长期开发规划具有重要作用。

## 2. 现代数学模型预测方法

### 1) 人工神经网络方法

对于油田生产来说,要保证一个好的经济效益,就必须要有高的、稳定的产量,确保油田高产、稳产是油田开发生生产的中心任务。因此,对油田产量的准确预测一直是油田开发工作者的重要研究任务之一。影响油田产量的因素大体分为地质因素和人为因素两大类。地质因素,从某种程度上说,是不可改变的或者说改变是微小的;而人为因素的变化范围却要宽得多,从开采方式、井网、井距、注采强度、打调整(加密)井、老井的关停报废或转注转采等,到各项人工措施(包括压裂、酸化、补孔、补层、换层、调参、大修等),每一项人为因素的改变都会影响到油田产量的变化。因此,预测油田产量的方法也都是基于地质因素、人为因素或者是两者的结合。只考虑地质因素的单一模型类预测方法的主要缺陷有二:一是不能直接考虑储层的非均质性对油田产量的影响;二是无法考虑各项人为因素的改变对油田产量的影响。这也就是说太“粗”。从理论上说,油气藏数值模拟法能够全面、直接地考虑储层的地质因素和各项人为因素的改变对油田产量的影响。但是,这种方法对地质资料的依赖性过大,往往因为对储层地质情况的认识存在误差使得油气藏数值模拟的预测结果无使用价值。虽然通过对油田开发历史的精细拟合可修正对储层地质的认识,但拟合结果存在多解性。对油田开发历史的精确拟合往往要求研究人员同时具有扎实的地质知识、油藏知识、采油工艺知识、数学计算知识和计算机知识,而且工作量大。第二类方法是孤立地研究各项人为因素对油田产量的影响,这违背油田开发是一个大系统的事实。油田的开发是一个复杂的非线性动力系统。油田产量的预测是一个多因素非线性预测问题。人工神经网络技术是解决复杂的非线性映射问题的有效方法,已广泛应用于各个学科和行业。人工神经网络技术在油田开发方面的应用也有了一些探索。利用神经网络预测油田产量,仅考虑了时变因素,未考虑各项措施的影响。本书主要考虑了各种人为因素对油产量的综合影响,同时通过对油田开发历史资料的学习,隐性地全面考虑了储层的地质因素对油田产量的影响;实现了油田产量的多因素非线性时变预测;使用的资料皆为一手现场生产资料,力求实现对油田产量的准确预测。

人工神经网络技术本质上是一信息非线性变换系统,具有自组织、自学习能力。通过对数据样本的学习,神经网络会自动地逼近样本数据的规律函数,在使用时不需要建立任何的数学物理模型和人工干预,就能自动地建立预测模型和较精确地映射任意高度非线性的输入输出关系,并且具有容错性和自适应性。理论上已经证明,人工神经网络能够逼近所有的多元连续函数。BP网络作为特殊的ANN网络,Kolmogorov定理保证了任意连续函数或映射可由一个3层ANN实现,从而在数学上保证了BP网络具有很强的模式识别能力和在任意精度内逼近任意连续映射的能力,因而可以取BP网络作为预测模型的核心结构。

油气产量的准确预测是油气田优化配产的前提。同时实践证明,油气藏动态系统属于耗散结构,所以针对油气田开发的高度动态性和复杂性,不少人提出了利用神经网络来预测油气田的产量,并取得了一些较好的结果。目前,石油系统用到的神经网络模型绝大多数属于BP神经网络预测模型,其中以西南石油大学刘志斌所采用的BP神经网络模型为代表,其主要原因是:

(1)BP神经网络实质上实现了一个从输入到输出的映射功能,而数学理论已证明它具有实现任何复杂非线性映射的功能,这使得它特别适合于求解内部机制复杂的问题;

(2)BP神经网络能通过学习带正确答案的实例集自动提取“合理的”求解规则,即具有自学习能力;

(3)BP神经网络具有一定的推广、概括能力。

马永弛通过对传统的 BP 神经网络引入反馈回路来对其进行一定程度的改进。带反馈的主要目的是使 BP 神经网络具有一个局部的记忆单元,使得某时刻的输出值与前一时刻的状态进行关联,而并不仅仅只决定于当前的输入值。

改进的 BP 神经网络主要由输入层、隐层、关联层、输出层组成。每一个隐层节点都有一个与之对应的关联层节点连接。输入层节点与隐层节点、隐层节点与输出层节点、关联层节点与隐层节点之间都有可调权值相连接。在关联层神经元中,有一固定增益的自反馈连接。

### 2) 灰色系统方法

灰色系统理论是我国学者邓聚龙于 1982 年创立的。灰色系统理论研究本征性灰色系统的量化问题,是研究系统的建模、预测、分析决策和控制的理论。

灰色预测是指采用 GM(1,1) 模型对系统行为特征值的发展变化进行的预测。GM 即 Grey Model 的缩写,GM(1,1) 模型是最常用的一种灰色模型,它是由一个只包含单变量的一阶微分方程构成的模型。

由灰色模块  $x^{(1)}$  构成的一阶微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (1-19)$$

解微分方程得:

$$x^{(1)}(t) = \left[ x^{(1)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (1-20)$$

若写成离散型,则为:

$$x^{(1)}(k+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (1-21)$$

由于灰色系统理论研究的是信息不完全的对象,在建立 GM(1,1) 模型前应先对原始数据进行累加处理,以消除原始数据序列的随机性,使之呈现一定的规律性。它的主要特点有:(1) 系统要求数据量不多,并且不需要从数据中找出规律;(2) 系统适用于非线性、非指数或者非对数分布;(3) 系统通过原始数据的处理将灰色量变换成生成数,从生成数进而得到规律性较强的生成函数,即系统的处理对象是生成数而不是原始数据。这是灰色模型与其他模型的最大区别。

### 3) 多项式拟合法

在建立油气田开发规划模型时,常常需要得到产油量与井数、增油量与措施井次等之间的非线性关系,该非线性关系的拟合可以采取最小二乘法多项式拟合。令要拟合的多项式为:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_t x^t \quad (1-22)$$

假设有  $k$  组样本点  $(x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k)$ , 可得到关系式:

$$Y = Ha \quad (1-23)$$

$$\text{其中, } H = \begin{bmatrix} 1 & x^1 & \dots & x_1^t \\ 1 & x^2 & \dots & x_1^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x^k & \dots & x_1^t \end{bmatrix}, a = [a_0 \dots a_0 \dots a_1]^t。$$

利用最小二乘法可求得  $\hat{a}$ 。

### 4) 多元线性回归方法

多元线性回归是随机变量  $y$  对其  $m$  个自变量的  $n$  组观测值进行线性回归分析的方法,多

元线性混合回归则是随机变量  $y$  也作为自变量参与回归分析的方法。以下根据反映回归效果的偏差平方和( $q$ )、平均标准偏差( $s$ )、复相关系数( $r$ )、偏相关系数( $v_j$ )和回归平方和( $u$ ),筛选出影响产量的显著因数。

记产量为  $y$ ,  $m$  个自变量因数的  $n$  组观测值为  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 则多元线性回归表达式为:

$$y = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + \dots + a_{m+1}x_m \quad (1-24)$$

考察回归效果的 5 项参数的计算公式为:

$$q = \sum_{i=1}^n \left[ y_i - (a_1 + a_2x_{1i} + a_3x_{2i} + \dots + a_{m+1}x_{mi}) \right]^2$$

$$s = \sqrt{q/n}$$

$$r = \sqrt{1 - q/dyy}$$

$$v_i = \sqrt{1 - q/q_i}$$

$$u = \sum_{i=1}^n \left[ \bar{y} - (a_1 + a_2x_{1i} + a_3x_{2i} + \dots + a_{m+1}x_{mi}) \right]^2$$

其中,  $dyy = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ,  $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ ,  $q_j = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_1 + \sum_{k=1}^m a_{k+1}x_{ki})]^2$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $k \neq j$ )。

首先将影响油气田产量的诸因数作为自变量,应用多元线性混合回归模型进行回归,然后求出  $q, s, r, v_j$  和  $u$ 。当  $r$  接近 1 时,说明相对误差  $q/dyy$  接近于 0,线性回归效果好;否则,回归效果差。在回归效果差的情况下,根据  $v_j$  大小剔除自变量,  $v_j$  值越小,对应的因数  $x_j$  对于  $y$  的作用越不显著,此时可将其剔除。然后,用保留的因数再次回归,再次考虑、再次剔除对油田产量影响不显著的变量。如此反复,直至筛选出影响产量变化的重要因数。用这些因数进行最后一次回归,将回归结果作为预测油气田产量的模型。李宇峰等研制了油田产量预测系统。该预测系统集成 20 多种常规的和新型的预测方法,对油田产量的预测及管理都能够给出有价值的信息;在充分、准确采集油田各单位产量信息及建立切合实际的数据模型的基础上,将油田产量信息采集与处理、预测与管理等环节有机地结合成为一个整体;采用较为实用的、科学的、先进的数学方法和实验方法,根据油区不同油藏类型、不同开采方式、不同开采规律,建立相应的数学预测模型,研制一系列适合中国油区特点的产量预测方法,为一些油田分公司实现可持续发展和提高开发管理水平提供科学依据。

油田产量预测的研究是在勘探开发数据库的基础上,运用常规产量预测方法和先进适用的数学方法、预报方法(包括递减系列、增长曲线系列、灰色系统预测法、神经网络法等),进行适用于油田油区各类油藏和采油单元的产量预测的研究;根据油田开发方式不同所产生的规律各异的情况,针对注水和热采油田按照油藏工程方法编制相适应的水驱特征曲线系列和热采开发系列;同时,根据油田历年生产数据,运用先进的数学方法进行数据拟合,总结历年来的生产规律,建立与油田生产实际相适应的数学预测模型,包括多元回归法、产量组合法、产量构成法和周期跳跃法、移动平均法等。

### 3. 多模型组合预测方法

优化组合预测方法是当前预测科学研究最热门的课题之一。组合预测理论认为:对同一预测问题而言,多个不同预测模型的线性组合在一定条件下能够有效地改善模型的拟合能力

和提高预测的精度。自 Bates 和 Granger 首次提出组合预测方法以来,因它能有效地提高预测精度,故而受到国内外预测工作者重视。组合预测就是综合利用各种预测方法所提供的信息,以适当的加权平均形式得出组合预测模型。组合预测最关心的问题就是如何求出加权平均系数,使得组合预测模型更加有效地提高预测精度。

### 1) 对油气田进行产量组合预测的必要性

各大油田对原油生产区产油量的精确预测是科学管理和科学配产的基础。目前,我国大多数油田正处于中、高含水期,直接面临着降低采油成本的问题,油田动态指标预测精度越来越引起人们重视;加之近些年来,石油系统科研院所和生产单位对原油产量的预测做了大量的研究工作,从不同角度提出了一些很好的预测模型,如水驱特征曲线法、物质平衡法、油藏数值模拟法、水动力学概算法、递减曲线法、t 模型法、Weng 氏模型法、神经网络法、微分模拟法等,但目前的预测方法大都是基于单个模型的预测方法。由于油气系统的复杂性,有的单个模型在一些递减规律明显的油气田取得了较好的拟合精度,但在面对一些复杂的油气藏时精度往往要下降许多。目前还没有任何一种模型在任何条件下都能获得满意的预测精度。而在大多油田预测的具体工作中,往往是建立两个模型进行预测,只要结果相差不大就行了,而且预测工作往往到此也就结束了,有的也只是进行一些简单的处理(比如求平均值),并没有在此基础上充分利用各个预测模型的有用信息,进一步提高预测精度。可以说,组合预测在油气田动态开发指标预测上的应用几乎还是一片空白。在此之前,有文献曾提到了在油气田开发中应用组合预测,但其对于油气田动态开发指标的预测还仅仅停留在固定权重的优化组合预测上,这对于复杂的油气开发动态系统而言是远远不够的。

### 2) 组合预测的原理

设对应某一预测对象 $f$ ,利用 $k$ 种预测方法得到 $k$ 个模型的预测值 $f_i(i=1,2,\dots,k)$ ,相应各预测模型的误差和方差各 $e_i=f-f_i$ 和 $\sigma_{ii}(i=1,2,\dots,k)$ ,如果各种预测方法的权重为 $W=(w_1,w_2,\dots,w_k)^T$ 且满足 $\sum_{i=1}^k w_i=1$ ,得到组合预测值 $f_c$ ,则优化组合预测模型为:

$$f_c = \sum_{i=1}^k w_i f_i \quad (i=1,2,\dots,k) \quad (1-25)$$

优化组合预测方法的关键在于组合权系数的求解,而组合权系数的求解可采用求极小值的方法。

在优化组合预测方面,闵令元等人选取对数正态分布为产量预测模型、Compertz 模型为含水预测模型、注采关系曲线为气油比模型,联立求解,进行开发指标预测。矿场实例计算结果表明,该方法可对稠油油藏注蒸汽开发所有指标和全过程进行预测,通过实际应用,证明这个新的预测模型是非常有效的,为开发规划及油藏工程设计提供依据。

### 3) 组合预测的国内外发展现状

组合预测方法可以从不同角度进行不同分类。根据组合预测值与各单项预测值之间的函数关系,组合预测方法可分为非线性组合预测方法和线性组合预测方法;根据组合预测权系数确定的方法,可分为最优组合方法和非最优组合方法两类;根据加权系数是否随时间变化,可分为静态的常系数预测方法以及动态的时变参数预测方法两类;根据组合预测模型建立的某个准则的优劣程度,可以分为劣性组合预测方法、非劣性组合预测方法、优性组合预测方法三类。其中,线性组合预测方法是目前研究最多且应用最为广泛的。

组合预测权系数确定的方法现已取得了不少研究成果,但在变权重组合预测方面进展缓



慢。显然,变权重的方法比不变权重的方法更为科学。因为对每一种单项预测方法而言,它总是表现出“时好时坏”。但是,由于变权重的组合预测方法比较复杂,所以目前关于变权重的组合预测方法并不多见。

## (二) 油田监测预警研究现状

### 1. 监测预警系统的建立与发展

监测预警理论与技术的产生与发展都来源于经济领域。经济监测预警系统最早可以追溯到19世纪末。针对19世纪频繁发生的经济危机,西方一些经济与统计学家开始探讨经济波动的内在规律性,以便对经济发展状况做出量的判断。随着经济的发展以及经济学家、统计学家对经济现象认识的不断深化,基于经济波动原理的宏观经济监测与预警方法的研究取得迅速发展。目前,各国均在根据其经济发展特点研究适合本国的经济监测预警方法,从而为本国政府观察经济方向及预测未来发展趋势提供依据,经济监测预警系统的发展大致可分为3个阶段,即初创阶段、发展阶段及国际化阶段。

#### 1) 初创阶段

1909年,美国巴布森统计所编制的第一个景气状态指示器——“巴布森经济活动指数”拉开了对宏观经济监测预警方法进行系统研究的序幕。这种指数虽然构造方法简单,但却形成了景气指数的雏形。

1917年,哈佛大学建立了从事景气监测的经济研究会,由帕森斯教授主持编制了“美国一般商情指数”,即哈佛指数。由此,景气指数正式诞生。哈佛指数最初选择了50个与景气密切相关的统计指标,并且收集了这些指标从1903年到1914年的月度时间序列,用最小二乘法原理确定了50个指标的趋势曲线。经过一定的筛选与合成,最终选择了17项指标作为景气监测指标。哈佛经济研究会从这17项指标的曲线变化中找出了规律性,成功地预测了1919年的经济景气和1920年的经济急剧下降,并在1920年经济危机时期正确地预测到经济将于1922年4月间复苏,由此引起世人注目。西方各工业化国家纷纷效仿成立各自的景气监测研究机构,以编制本国的景气指数。1920年,英国伦敦大学和剑桥大学联合创办了“伦敦剑桥经济所”,采用哈佛指数方法编制了指示英国景气状况的“英国商业循环指数”。1925年,德国也建立了景气研究所,发布了德国一般商情指数。其他国家如意大利、日本、法国、加拿大等国也都相继出现景气监测研究机构,编制了类似于哈佛指数的本国景气指数。

但是,由于哈佛指数编制原理过于简单,未能对1929年的世界经济大危机做出正确的预测,由此结束了自己的历史。以哈佛指数为代表的景气指数的失败,标志着经济监测预警系统研究早期初创阶段的结束。然而,哈佛指数利用经济变量时差关系指示景气动向思想的提出,为以后的进一步研究提供了有益的启示。

#### 2) 发展阶段

真正对今天各国经济监测预警系统有重大影响的研究是从20世纪30年代后期开始的。

1937年,美国全国经济研究局应美国财政部要求,利用经济指标对当时正在发生的经济衰退进行判别研究,预测经济衰退走出低谷的日期。在著名经济学家米契尔的主持下,美国全国经济研究局对景气循环进行了系统研究。

美国全国经济研究局从近百项指标中选择了21个指标对景气循环进行研究,编制了以往景气循环的峰顶与谷底的日期,进而确认了个别重要指标的循环对整个景气循环具有特殊意义。这种把个别指标现在的动向与其过去的特殊循环加以比较从而预测其未来动向的思想由