

# 凝析气井异常产能试井资料分析新方法

郑 威<sup>1</sup> 刘曰武<sup>2</sup> 吴利华<sup>3</sup> 李淑敬<sup>3</sup> 阳 彬<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学 四川成都 610500; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100080;

3. 华北油田第三采油厂 河北河间 062552)

**摘要** 通过分析凝析气井产能测试资料异常的原因,给出了一类系统分析凝析气井异常产能测试资料的方法,包括拟压力方法、压力方法和压力平方方法三种形式。首次建立了凝析气井二项式产能方程和指数式产能方程的关系,提出了凝析气井异常产能测试资料分析的判断标准。通过凝析气井的实际产能测试资料分析,说明了该方法的正确性。

**关键词** 凝析气井 产能试井 异常测试资料 产能方程

## 引 言

气井产能试井的基本方法是首先关井取得静止地层压力,然后开井生产,在短期内多次改变气井的工作制度,测量该工作制度下的产量、井底压力及井口油、套压等,然后整理资料求取产能方程并计算出无阻流量。这对确定气井的产能、合理工作制度以及气田的开发方案有积极的意义。

产能试井的测试类型较多,包括回压试井、等时试井、一点法试井以及修正等时试井等<sup>[1]</sup>。产能试井通常包括井底测压和井口测压两种方式。由于凝析气井测试井中的流体包括凝析气和气,因此在测试过程中常常出现测试资料异常现象。目前,凝析气井产能测试存在的主要问题是有些井的产能试井资料无法进行二项式产能分析,得不到无阻流量。其原因是二项式方程的层流系数和紊流系数都小于0或其中之一小于0。针对上述问题,我们对凝析气井异常产能测试资料的分析方法进行了分析研究。

产能试井基本理论的发展已经有近80年的历史。1929年美国矿业局的Pierce和Rawlines<sup>[2]</sup>首先提出了回压试井产能试井分析方法。1936年Rawlines和Schellhardt<sup>[3]</sup>对该方法进行了完善,他们通过大量现场数据的统计分析,根据经验得到了产量和压差的指数关系,即 $q = c(p_R^2 - p_{wf}^2)^n$ 。1955年Culleder<sup>[4]</sup>等人提出了一种新的产能试井分析方法——等时产能试井方法。1959年Katz等人<sup>[5]</sup>提出

了修正等时试井方法。这些方法大多都已应用于矿场实际,而且发展较为成熟<sup>[6~9]</sup>。但是,这些方法在分析解释凝析气井的产能测试资料时,仍然遇到诸多困难,难以解决二项式方程的层流系数和紊流系数都小于0或其中之一小于0的问题。鉴于此,本文从分析凝析气井产能测试资料异常的原因入手,给出了一类系统分析凝析气井异常产能测试资料的方法,包括拟压力方法、压力方法和压力平方方法三种形式,并首次建立了凝析气井二项式产能方程和指数式产能方程的关系。通过凝析气井的实际产能测试资料分析,说明了该方法的正确性。

## 分析方法

### 异常产能试井资料特征及原因分析

异常产能试井资料曲线异常常见的原因有以下几个方面:在高温高压气藏中,由于气井产量高、气体流速快,气藏中出现了单相非达西流,增加了额外的惯性阻力;由于高温高压气井井筒中温度压力变化大,使用常规井底压力折算方法所计算井底流压不准。相应工作制度下的生产未达稳定,测得的数据不反映测试所要求的条件;新井井壁污染,随着生产流量的较大幅度的变化,污染将逐渐排除;多层合采情况下,随着生产压差增大,新层投入工作。对于高产气井,气体产量大,地层压力下降快,所使用的地层压力偏大。

由上所述,异常曲线并非一定是错误的,应根据

[作者简介] 郑威,1966年出生,高级工程师,西南石油大学在读博士研究生,主要从事油气藏工程方面的研究。

具体情况分析。若为上述第一个原因,则必须重新进行测试。但是,对于凝析气井的异常产能情况,主要是二项式产能方程的斜率为负值。通过资料分析认为,其主要原因有以下几方面:地层压力下降,使用地层静压值偏高。由于高温高压气井井筒中温度压力变化大,使用常规井底压力折算方法所计算井底流压不准所引起的。在高温高压气藏中,由于气井产量高、气体流速快,气藏中出现了单相非达西流,增加了额外的惯性阻力。因此,必须考虑其动压差对产能方程的影响。这种情况下,井底压力测试资料的解释不存在问题。但是对于井口测试,则计算井底压力比实际的井底压力要低。因此,分析解释资料时,必须十分小心。

## 2. 异常产能试井资料处理方法及步骤

对于存在启动压差的异常产能试井的分析,必须对产能方程的表达方式进行修正。

### (1) 常规的产能试井分析方程

常规的二项式产能方程

拟压力形式的二项式产能方程为

$$(p_R - p_{wf}) = A_1 q + B_1 q^2$$

当压力低于 21 MPa 时,拟压力形式可简化为压力平方的形式,即

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = Aq + Bq^2$$

当压力高于 35 MPa 时,拟压力形式可简化为压力的形式,即

$$p_R - p_{wf} = A_1 q + B_1 q^2$$

式中:  $p_R$  ——拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;

$q$  ——地面标准条件产气量,  $10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ;

$p_R$  ——气藏地层压力, MPa;

$p_{wf}$  ——井底流动压力, MPa;

$A_1$  和  $A$ 、 $B_1$  和  $B$  ——描述达西流动(或层流)及非达西流动(或紊流)的系数。

常规的指数式产能方程

产能试井的指数式方程的拟压力形式为

$$q = c[(p_R) - (p_{wf})]^n$$

拟压力形式在压力小于 21 MPa 时,可简化为压力平方的形式,即

$$q = c(p_R^2 - p_{wf}^2)^n$$

拟压力形式在压力大于 35 MPa 时,可简化为压力的形式,即

$$q = c(p_R - p_{wf})^n$$

式中: $c$  是产能方程的系数,是气藏和气体性质的函数; $n$  为产能方程的指数(称渗流指数),是表征流动

特性的常数。当只存在层流时, $n = 1$ ;当只存在紊流时, $n = 0.5$ ;当流动从层流向紊流过渡时, $0.5 < n < 1$ 。

### (2) 修正后的凝析气井产能方程

凝析气井的二项式产能方程

凝析气井拟压力形式的二项式产能试井方程为

$$(p_R - p_{st}) - (p_{wf}) = A_1 q + B_1 q^2$$

当压力低于 21 MPa 时,凝析气井压力平方形式二项式产能试井方程为

$$(p_R - p_{st})^2 - p_{wf}^2 = Aq + Bq^2$$

当压力高于 35 MPa 时,凝析气井压力形式二项式产能试井方程为

$$(p_R - p_{st}) - p_{wf} = A_1 q + B_1 q^2$$

式中: $p_{st}$  ——启动压差, MPa。

在直角坐标图上,画出  $[(p_R - p_{st}) - (p_{wf})]/q$  或  $[(p_R - p_{st})^2 - p_{wf}^2]/q$  或  $[(p_R - p_{st}) - p_{wf}]/q$  与  $q$  的关系曲线,将得到一条斜率为  $B_1$  或  $B$ 、截距为  $A_1$  或  $A$  的直线,称为二项式产能曲线。

凝析气井的指数式产能方程

对于存在启动压差的异常产能试井分析,必须对产能方程的表达方式进行修正,相应的指数式产能方程变化为

凝析气井指数式产能方程的拟压力形式如下:

$$q = c[(p_R - p_{st}) - (p_{wf})]^n$$

在压力小于 21 MPa 的条件下,拟压力的指数式产能方程可简化为压力平方的形式,即

$$q = c[(p_R - p_{st})^2 - p_{wf}^2]^n$$

在压力大于 35 MPa 的条件下,拟压力的指数式产能方程可简化为压力的形式,即

$$q = c[(p_R - p_{st}) - p_{wf}]^n$$

将上述方程两边取对数后,凝析气井的拟压力形式指数式产能试井方程变为

$$\lg[(p_R - p_{st}) - (p_{wf})] = A_1 + B_1 q$$

压力平方形式的指数式产能试井方程变为

$$\lg[(p_R - p_{st})^2 - p_{wf}^2] = A_1 + B_1 q$$

压力形式的指数式产能试井方程为

$$\lg[(p_R - p_{st}) - p_{wf}] = A_1 + B_1 q$$

在半对数坐标图上,画出  $\lg[(p_R - p_{st}) - (p_{wf})]$  或  $\lg[(p_R - p_{st})^2 - p_{wf}^2]$  或  $\lg[(p_R - p_{st}) - p_{wf}]$  与  $q$  的关系曲线,将得到一条斜率为  $B_1$ 、截距为  $A_1$  的直线,称为指数式产能曲线。由此可以确定

产能方程的系数  $c$  及其指数  $n$ 。其中  $n = 1/B_1$ ,  $c = 10^{-A_1 n}$ 。

(3) 二项式产能方程与指数式产能方程的关系

由于拟压力具有通用性,且为了节省篇幅,这里只给出拟压力形式的二项式产能方程与指数式产能方程系数之间的关系。

凝析气井拟压力形式的二项式产能试井方程为

$$(p_R - p_{st}) - (p_{wf}) = Aq + Bq^2 \quad (1)$$

凝析气井的指数式产能方程的拟压力形式为

$$q = c[(p_R - p_{st}) - (p_{wf})]^n \quad (2)$$

对(1)、(2)式关于  $q$  求导,则有

$$\frac{d[(p_R - p_{st}) - (p_{wf})]}{dq} = A + 2Bq \quad (3)$$

$$1 = cn \frac{d[(p_R - p_{st}) - (p_{wf})]}{dq} \times [ (p_R - p_{st}) - (p_{wf}) ]^{n-1} \quad (4)$$

利用稳定点产量相同的原则,设稳定点的产量为  $q_{st}$ ,则整理得

$$n = \frac{A + Bq_{st}}{A + 2Bq_{st}} \quad c = \frac{1}{A + Bq_{sc}}$$

或转换为

$$A = \left( \frac{q}{c} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{q} \left( 2 - \frac{1}{n} \right)$$

$$B = \left( \frac{q}{c} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{q^2} \left( \frac{1}{n} - 1 \right)$$

(4) 产能方程分析的主要用途

以二项式产能方程的拟压力平方形式为例。二项式产能方程的应用主要有以下四个方面:

计算无阻流量,确定合理产能

$$q_{AOF} = \frac{\sqrt{A^2 + 4B[(p_R - p_{st}) - 0.1^2]} - A}{2B}$$

计算井底压力变化,对其预测

$$p_{wf} = \sqrt{(p_R - p_{st})^2 - (Aq + Bq^2)}$$

计算气井产量,预测其未来变化

当气藏压力  $p_R$  下降到  $p_{R1}$ 、井底流压为  $p_{wf}$  时,气井的产量约为

$$q = \frac{\sqrt{A^2 + 4B[(p_{R1} - p_{st}) - p_{wf}^2]} - A}{2B} \quad (\text{压力平方法})$$

估算气层渗透率

$$K = \frac{1.228 \times 10^{-2} (\mu Z)_p T_f \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - \frac{3}{4} + S \right]}{Ah}$$

其中  $r_e$  不易确定,一般可取  $\ln(r_e/r_w) = 6.0 \sim 8.0$ 。

式中:  $T_f$  ——地层温度, K;

下标  $\bar{p}$  ——平均压力。

## 分析实例

通过对 10 余口凝析气井产能测试资料分析,笔者认为凝析气井异常产能测试资料分析的主要标准有以下三个方面:使测试资料能进行正常分析;二项式产能试井资料分析结果与指数式产能试井资料分析结果基本一致;产能分析结果符合矿场实际情况。下面以分析实例进行说明。

某凝析气井的测试数据如表 1 所示,二项式产能分析图如图 1 所示。

表 1 某凝析气井的测试数据

| 序号 | 地层压力 (MPa) | 井底流压 (MPa) | 流量 ( $10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ) |
|----|------------|------------|-----------------------------------|
| 1  | 62.66      | 61.60      | 68                                |
| 2  | 62.66      | 61.30      | 113                               |
| 3  | 62.66      | 61.47      | 159                               |
| 4  | 62.66      | 60.48      | 220                               |
| 5  | 62.66      | 59.81      | 243                               |

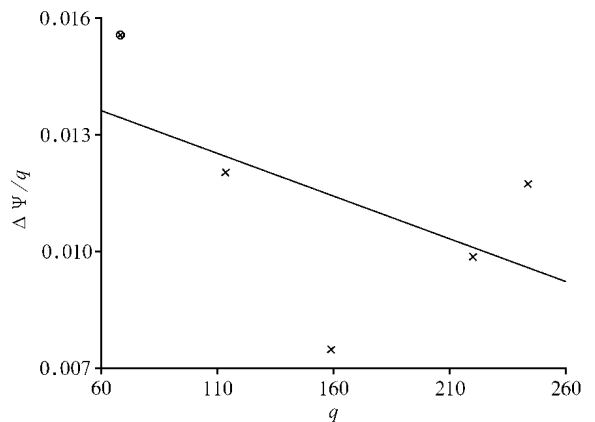


图 1 二项式产能分析图

根据所确定的三条判别标准进行分析,认为启动压力  $p_{st} = 0.966 \text{ MPa}$ ,得到分析结果如下:

1. 二项式产能方程分析结果

$$p_{wf}^2 - \frac{2}{q} = -1.20315 \times 10^{-3} q_g + 3.17648 \times 10^{-5} q_g^2$$

$$q_{AOF} = 1412.68 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$$

2. 指数式产能方程分析结果

$$q_g = 211.434 \left( p_{wf}^2 - \frac{2}{q} \right)^{0.467552}$$

$$q_{AOF} = 1452.79 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$$

分析成果图及 IPR 曲线如图 2 所示。

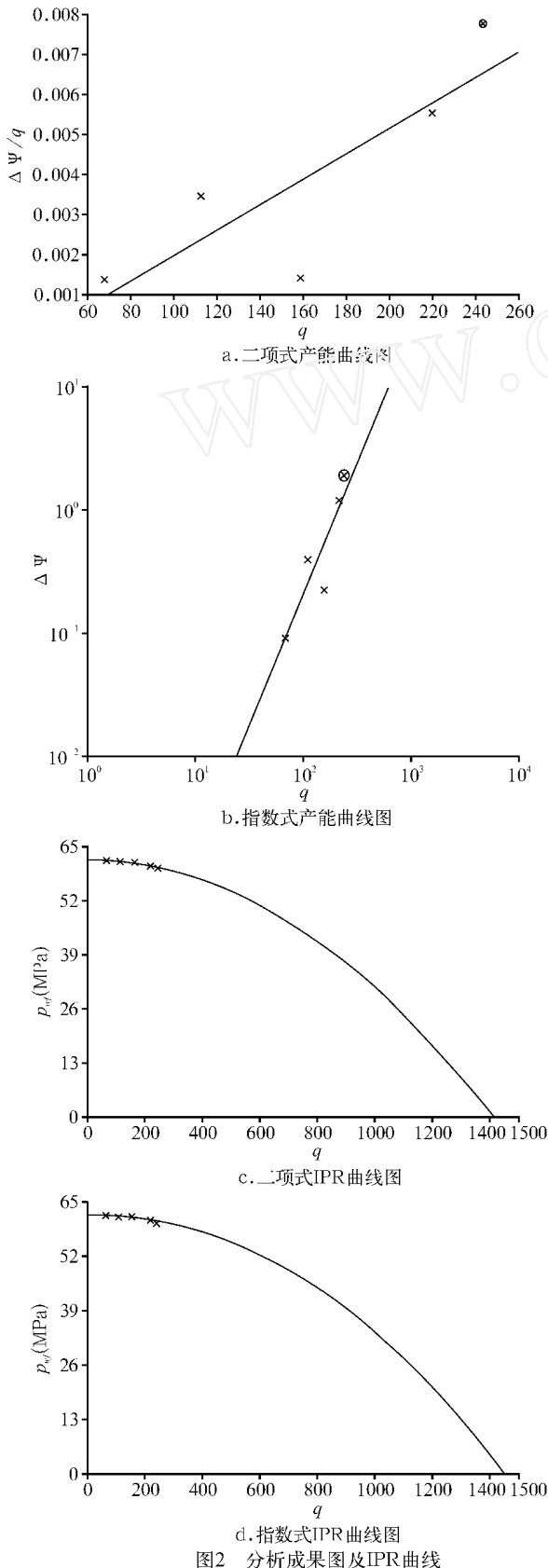


图2 分析成果图及IPR曲线

根据试采情况分析,认为本文得到的结果是可靠的。

## 结 论

1. 分析了凝析气井产能测试资料异常的原因。
2. 给出了一类系统的分析凝析气井异常产能测试资料的方法,包括拟压力方法、压力方法和压力平方方法三种形式。
3. 首次建立了凝析气井二项式产能方程和指数式产能方程的关系,提出了凝析气井异常产能测试资料判断的判断标准。
4. 通过凝析气井的实际产能测试资料分析,说明了该方法的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 ERCB of Canada. Gas Well Testing Theory and Practice. Fourth Edition (metric), Calgary Alberta, 1979
- 2 Pierce H R and EL Rawlins. The Study of a Fundamental Basis for Controlling and Gauging Natural Gas Wells. U. S. Dept. of Commerce-Bureau of Mines, Serial 2929, 1929
- 3 Rawlins EL and M A Schellhardt. Backpressure Data on Natural Gas Wells and Their Application to Production Practices. U. S. Bureau of Mines, Monograph 7, 1936
- 4 Cullender M H. The Isochronal Performance Method of Determining the Flow Characteristics of Gas Wells [J], Trans., AIME, 204, 1955: 137 - 142
- 5 Katz DL, D Cornell, R Kobayashi, F H Poettmann, J A Vary, J R Elenbaas and C. F. Weinaug. Handbook of Natural Gas Engineering. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1959
- 6 王卫红,沈平平,等.低渗透气藏气井产能试井资料分析方法研究[J].天然气工业,2005,25(11):76-78
- 7 郝玉鸿,贾廷,等.气井当前地层压力及无阻流量确定的简单方法[J].低渗透油气田,1999(2):14-16
- 8 张黔川,吕涛,等.气藏水平井非达西流动二项式产能试井公式[J].天然气工业,2004,24(10):83-85
- 9 李跃刚,范继武,等.修正等时试井技术在长庆气田的应用与发展[J].天然气工业,2002,22(6):68-71

本文收稿日期:2008-03-10 编辑:王 军

## WELL TESTING (YOUQING CESHI)

Vol. 17 No. 3 (Serial No. 108) 2008

## Abstracts

**·Research of Theory & Method ·****A New Analysis Method for the Abnormal Productivity Test Data in Condensate Gas Well.** 2008, 17(3) :1 ~ 4*Zheng Wei (South-West Petroleum University), Liu Yuewu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Wu Lihua, Li Shujing, Yang Bin (The Third Production Factory, Huabei Oilfield)*

By analyzing the reasons caused the abnormal production rate test data in condensate gas well, one kind of analysis method for the abnormal test data is developed which includes three forms of pressure, square-pressure and pseudo-pressure. The relationship between the binomial productivity equation and the productivity index equation is established at the first time and the criterion about analyzing the abnormal test data is presented. By analyzing field test data, the new method is verified.

**Key words:** condensate gas well, productivity test, abnormal test data, productivity equation**Discussing on Reasonable Working Rule in Gas Well by IPR Curve.** 2008, 17(3) :5 ~ 6*Cui Shuzhang, Qin Xuecheng, Shen Aping (Designing Department, Huadong Sub-Company)*

In order to define reasonable working rule in gas well, method of indicative curve about relationship between production and producing differential pressure is usually used. The corner in the indicative curve about relationship between production of gas well and producing differential pressure is acquired by using one enlarged choke to find production after finding production by many continuous work rules. So it loses a large quantity of natural gas. By analysis of IPR curve, a reasonable working rule in gas well can be determined too which needn't enlarge choke to find production, and save a large quantity of natural gas resources.

**Subject words:** back pressure well test, modified isochronal test, IPR curve analysis, working rule**A Brief Discussion about "Single Point Test".** 2008, 17(3) :7 ~ 8*Liu Nengqiang (China National Logging Corporation)*

Formula of "single point well testing" has its applicability, but considerable error appears in new exploration district. Because it is not an independent and completed productivity analysis method, so representative data must be chosen in new exploration district to correct formula by conducting conductivity testing in one or more wells and the "single point well testing" is used in another well then so that open flow capacity is calculated by corrected formula.

**Subject words:** well test, productivity analysis, open flow capacity, error, correct**A Method to Ascertain the Contact Relationship on Sand Body in Low Permeability Reservoir by Numerical Simulation and Early Time Well Testing Data.** 2008, 17(3) :9 ~ 11*Yang Tianlong, Cheng Shiqing, Ma Sujun (CMOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China Petroleum University), Chen Jianwen, Zhao Jiyong (Changqing Oilfield Company)*

Taking example as of a practical low-permeability developing block, a vertical heterogeneity well testing conceptual geology model is achieved which describes the contact relationship of sand body with an emphasis. Using numerical simulation software to simulate the variation pressure data in bottom hole corresponding different kinds of contact relationship of sand body, many typical derivative curves chart are obtained which can describe the contact relationship of sand body of reservoir. By matching the early time reality pressure derivative curves of oil well in reservoir with the model chart, heterogeneity parameters of reservoir can be obtained. applying commercial numerical simulation software to analyze well testing data of heterogeneity reservoir, a useful research for simplifying method about numerical well testing analysis has been done.

**Key words:** numerical simulation, low-permeability reservoir, vertical heterogeneity, well testing interpretation chart**Study on Method of Nervous Network about Productivity Forecast in New Gas Well.** 2008, 17(3) :12 ~ 14*Xu Ling, Chen Demin, Lai Fengpeng (China University of Geosciences), Xu Ling, Chen Demin (Liaohu Petroleum Exploration Bureau)*

By using exploration well data and nervous network method, nervous network method about productivity forecast in new gas well is studied. By applying it in gas field shows this method has many characteristics, such as needing little data, high accuracy and so on.

**Subject words:** productivity in new well, nervous network, method, principle**The Method of Determine Productivity of Producing Water Gas Well.** 2008, 17(3) :15 ~ 16*Huang Xiaoliang, Tang Hai, Lv Jianjiang, Yu Beibei (Southwest Petroleum University), Yang Zaiyong, Zhou Min (Chuanzhong Oil and Gas Field, South-West Oil and Gas Field Company), Ren Sheng (Yellow River Drilling Company, Shengli Petroleum Administrative Bureau), Tian Jianjun (Tuha Department, Well Logging Ltd. Co.)*

Production and productivity will be affected greatly if formation water intrudes into gas reservoir and condensate water gathers at bottom well during gas reservoir is developed. By using formula which is influenced of permeability variation around well on productivity of gas well, productivity equation of gas well is got to analysis productivity of producing water gas well in varying liquid phase damage degrees and scope, and on condition of different formation pressure. The example demonstrates this method is simple and practical.

**Subject words:** gas well of producing water, liquid phase damage, productivity, method**·Evaluation & Application ·****Application and Improvement of One Empirical Equation on Jinzhou20-2 Condensate Field.** 2008, 17(3) :17 ~ 19*Ma Shigang, Li Bo, Wang Shimin, Wang Huizhi, Zhang Zhanmv, Feng Zhihua, Fu Ying (Technical Department, China Ocean Petroleum Ltd. Tianjin Branch Company)*

At present, it has a limitation when productivity formula of an empirical equation to forecast open flow capacity in one particular reservoir and there is some error between calculating result and the binomial deliverability equation's. Basing on abundant systematic well test data in Jinzhou20-2 abnormally high pressure condensate field, an empirical productivity formula is improved, and one productivity formula reflecting geology characteristics is established. Practical example shows that the new productivity formula is easy to use, and its