

文章编号:1000-582X(2011)04-062-05

页岩气藏渗流机理及压裂井产能评价

段永刚¹, 魏明强¹, 李建秋¹, 唐艳²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500;

2. 西南油气田分公司蜀南气矿, 四川泸州 646001)

摘要:为了掌握页岩气藏生产动态特征,提高页岩气井产能,对页岩气藏渗流机理及产能评价进行研究。页岩气藏与常规气藏最主要的差异在于页岩气藏存在吸附解吸特性。利用 Langmuir 等温吸附方程描述页岩气的吸附解吸现象,点源函数及质量守恒法,结合页岩气渗流特征建立双重介质压裂井渗流数学模型,通过数值反演及计算机编程绘制了产能递减曲线图版。分析了 Langmuir 体积、Langmuir 压力、弹性储容比、窜流系数、边界、裂缝长度等因素对页岩气井产能的影响。

关键词:页岩气;渗流机理;产能评价;压裂;Langmuir 方程

中图分类号:TD166

文献标志码:A

Shale gas seepage mechanism and fractured wells' production evaluation

DUAN Yong-gang¹, WEI Ming-qiang¹, LI Jian-qiu¹, TANG Yan²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, P. R. China; 2. Shunan Gas Field, CNPC South-west Oil & Gas Co., Luzhou 646001, Sichuan, P. R. China)

Abstract: To know the dynamic characteristics of shale gas reservoirs' production and to improve shale gas wells production, it is very important to research on shale gas seepage mechanism and production evaluation. The main difference between shale gas reservoir and conventional gas reservoir is that shale gas reservoir has the adsorption and desorption characteristics. Combined with shale gas seepage characteristics, using point source function, the mass conservation law and Langmuir isotherm equation to describe the shale gas adsorption and desorption phenomena, it establishes dual media shale fracturing wells' seepage model. By the numerical inversion and computer programming, it draws production decline curve charts and analyses the Langmuir volume, Langmuir pressure, elastic storativity ratio, cross flow coefficient, borders, fracture length and other factors on the impact of shale gas wells production.

Key words: shale gas; flow mechanism; productivity evaluation; fracture; Langmuir isotherm equation

目前页岩气勘探开发已成为世界焦点,美国、加拿大已在多个盆地进行了页岩气商业性开采,2009年美国页岩气产量占全美天然气总量近15%^[1]。研究表明中国也拥有丰富的页岩气资源,初步计算页岩气资源量约为 $(15\sim 30)\times 10^{12}\text{ m}^3$,开发前景广阔^[2-5]。在储层条件下页岩气藏中20%~80%的气

体以吸附态储存在页岩基质颗粒表面,其余绝大部分以游离态储存于孔隙和裂缝中。针对页岩气存在特有的吸附解吸特性,国外许多学者通过修正物质平衡时间^[6]、建立半解析数学模型^[7]及整合 Blasingame 产能递减^[8]等方法在页岩气产能方面取得了一系列研究成果,但其将页岩气藏假设为均质储

收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家重大专项资助项目(2008ZX05022-001-02HZ)

作者简介:段永刚(1963-),西南石油大学教授,博士,主要从事油气藏渗流理论、试井及油气藏动态分析与研究工作,

(Tel)028-83037532;(E-mail)nanchongdyg@163.com。

层,不能很好的体现页岩气藏渗流特征。目前国内对于页岩气渗流机理及产能评价的研究仍处于一片空白,因此笔者在考虑页岩气的吸附解吸特性的基础上,利用点源函数法及质量守恒法则,结合页岩气藏渗流特征对传统的渗流微分方程进行修正,建立双重介质压裂井渗流数学模型,通过数值反演及计算机编程绘制了产能递减曲线并对其影响因素进行分析。

1 页岩气渗流机理及解吸特性

页岩气藏是一种“自生自储式”气藏^[9],开采过程中,地层压力降低,打破原来的吸附平衡,原先吸附在页岩基质表面的气体将发生解吸,形成游离态气体,最终重新到达平衡。页岩气穿过页岩孔隙介质的流动可描述为图 1 所示的解吸、扩散和渗流这 3 个过程^[10]。

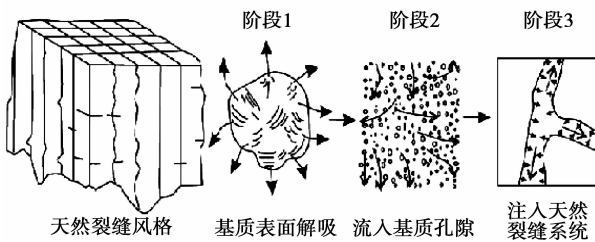


图 1 裂缝页岩气生成模式

页岩气在裂缝和基质中流动机理:①裂缝中游离气向井底流动,裂缝中压力降低;②在压降的作用下,页岩气由基质向内表面解吸;③在浓度差作用下,页岩气由基质向裂缝中扩散;④在流体势作用下,页岩气遵循达西定律流向井筒。

页岩气与常规天然气藏最主要区别是页岩气主要以吸附状态储存于页岩基质中。Langmuir 等温吸附曲线能描述在恒温条件下页岩气吸附解吸的平衡关系。等温吸附曲线能定量描述吸附气体的压力和被吸附量之间的关系。由于吸附是解吸的可逆过程,等温吸附曲线可以表征页岩气的解吸特征。1918 年,Langmuir 从动力学的观点出发,得出了单分子层吸附的状态方程,即 Langmuir 方程^[11]。

$$V_E = \frac{V_L P}{P_L + P} \quad (1)$$

式中: V_L —Langmuir 体积(吸附气的最大体积), m^3/t ; V_E —吸附量, m^3/t ; P_L —Langmuir 压力(吸附量达到最大吸附量的 50%的压力),MPa。

实验和理论分析表明,Langmuir 等温吸附曲线

同样适用页岩气的吸附解吸特性,因此目前主要运用 Langmuir 等温吸附原理来描述页岩气的吸附解吸。

2 页岩气考虑解吸的点源解推导

页岩脆性较强,外力作用下易形成天然裂缝和诱导裂缝,通常将页岩气藏简化成双重介质孔隙结构模型。考虑页岩气解吸特性,利用点源法推导了考虑页岩气解吸的压裂井数学模型^[12-15]。

运用质量守恒和达西定律,获得在页岩裂缝中气体流动方程^[16]

$$\nabla \left(\frac{k_{gf}}{\mu_{gf}} \rho_{gf} \nabla p_{gf} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_{gf} \rho_{gf}) + \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_{gm} \rho_{gm} + \rho_{gsc} V_E) \quad (2)$$

联立(1),(2)式得

$$\nabla \left(\frac{p_{gf}}{\mu_{gf} z_{gf}} \nabla \Delta p_{gf} \right) = \frac{\varphi_{gf} p_{gf}}{k_{gf} z_{gf} c_{gf}} \frac{\partial \Delta p_{gm}}{\partial t} + \frac{\varphi_{gm} p_{gm}}{k_{gf} z_{gm}} \left[c_{gm} + \frac{\rho_{gsc} V_L p_L}{\rho_{gm} \varphi_{gm} (p_L + p_g)^2} \right] \frac{\partial \Delta p_{gm}}{\partial t} \quad (3)$$

相关定义:

$$\text{拟压力 } \psi = 2 \int_0^{p_g} \frac{p_g}{\mu_g z_g} dp_g;$$

$$\text{基质的综合压缩系数 } \bar{c}_{tm} = \bar{c}_g + \frac{\rho_{gsc} V_L p_L}{\rho_{gm} \varphi_{gm} (p_L + \bar{p}_g)^2};$$

$$\text{无因次时间 } t_D = \int_0^t \frac{k_{gf}}{[\varphi_{gf} \bar{c}_g + \varphi_{gm} \bar{c}_{tm}] \mu_g r_w^2} dt;$$

$$\text{无因次半径 } r_D = \frac{r}{r_w};$$

$$\text{窜流系数 } \lambda = \alpha \frac{k_{gm}}{k_{gf}} r_w^2;$$

$$\text{无因次厚度 } h_D = \frac{h}{x_f};$$

弹性储容比

$$\omega = \frac{\varphi_{gf} \bar{c}_g}{\varphi_{gf} \bar{c}_g + \varphi_{gm} \bar{c}_{tm}}.$$

$$f(s) = \frac{s\omega(1-\omega) + \lambda}{s(1-\omega) + \lambda},$$

$$u = sf(s).$$

点源函数渗流方程及边界条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r_D^2} \frac{d}{dr_D} (r_D^2 \frac{d\Delta \psi_i}{dr_D}) - u \psi_i &= 0, \\ \Delta \psi_i (r_D \rightarrow \infty) &= 0, \\ \lim_{\epsilon \rightarrow 0} 4\pi L^3 (r_D^2 \frac{d\Delta \psi_i}{dr_D}) &= -1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对方程组(4)求解,运用叠加原理和镜像反映得到上下边界为不渗透边界的连续点源解

$$\Delta \bar{\psi}_f(p) = \frac{\bar{q}_\mu h}{2\pi k h_D L s} [k_0(r_D \sqrt{u})] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_0(r_D \sqrt{u + \frac{(n\pi)^2}{h_D^2}}) \cos n\pi \frac{z_D}{h_D} \cos n\pi \frac{z_w D}{h_D} \quad (5)$$

上面(2)-(5)式中： P_g —压力，MPa； ϕ_g —拟压力； Z_g —气体的压缩因子，无量纲； μ_g —气体粘度，MPa·s； ρ_g —气体密度，kg/m³； r_e —泄油半径，m； r_w —井筒半径，m； s —拉普拉斯转换变量； φ —孔隙度，无量纲； c_g —气体压缩系数，MPa⁻¹； \bar{c}_m —平均压力下气体的压缩系数，MPa⁻¹； \bar{c}_{m1} —基质的综合压缩系数，MPa⁻¹； S —表皮，无因次； K_0, K_1 —修正二类贝塞尔函数，0阶或者1阶； t_D —无因次时间； r_D —无因次半径； λ —窜流系数，m²； ω —弹性储容比，无量纲； c_D 表示无因次井储系数，无量纲， x_f —裂缝半长，m。下标 f, m, sc 分别裂缝系统和基质系统，和标准状态。

3 页岩气压裂井物理模型及求解

双重介质封闭页岩气藏中一口垂直井的物理模型^[17]，如图 2 所示，假设条件为：

- 1) 储层顶部 $z=h$ 和底部 $z=0$ 为封闭边，储层在水平方向的半径为 r_e 的封闭外边界；
- 2) 垂直裂缝长度为 $2L$ ，高度为 h ，中心在 (x_w, y_w, z_w) 处；
- 3) 储集层各向同性，即各方向渗透率相等；
- 4) 忽略重力和毛管力的影响。

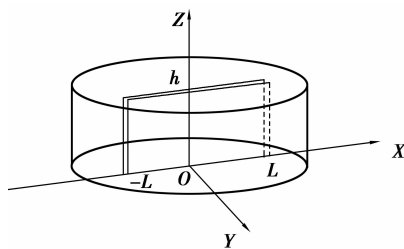


图 2 页岩气藏封闭储层垂直裂缝井物理模型

点源解式(5)在 $[z_w - h/2, z_w + h/2]$ 对 z_w 积分，再在 $[x_w - L_h/2, x_w + L_h/2]$ 上对 x_w 积分，并考虑井筒储效应和表皮因子的影响，即可得到 Laplace 空间顶底封闭圆形边界储层垂直压裂井井底的压力响应

$$\psi_{wD} = \frac{\frac{1}{2} \int_{-1}^1 \left[k_0(\bar{r}_D \sqrt{u}) + \frac{I_0(\bar{r}_D \sqrt{u}) k_1(\bar{r}_D \sqrt{u})}{I_1(\bar{r}_D \sqrt{u})} \right] d\alpha + h_D S}{s + c_{DS}^2 \left(\frac{1}{2} \int_{-1}^1 \left[k_0(\bar{r}_D \sqrt{u}) + \frac{I_0(\bar{r}_D \sqrt{u}) k_1(\bar{r}_D \sqrt{u})}{I_1(\bar{r}_D \sqrt{u})} \right] d\alpha + h_D S \right)} \quad (6)$$

4 页岩气井不稳定产能分析

Van Everdingen 和 Hurst^[18] 研究表明在 Laplace 空间中定压生产的无因次流量 \bar{q}_D 和定压生产的无因次拟压力 $\bar{\psi}_D$ 之间存在以下关系：

$$\bar{q}_D = \frac{1}{s^2 \bar{\psi}_D} \quad (7)$$

利用 Stehfest 法^[19] 对 Laplace 空间 \bar{q}_D 反演，可获得实空间无因次产量 q_D 与无因次时间 t_D 的关系，进一步绘制了无限导流垂直压裂井产能动态曲线。

根据式(5)-(6)得出了曲线的控制参数主要有 $P_L, V_L, \omega, \lambda, x_f$ 。下面对各参数对页岩气藏产能动态特征曲线影响进行分析。

图 3 反映了考虑吸附解吸与不考虑吸附解吸对压裂页岩气井产能动态曲线的影响。页岩气藏考虑解吸吸附比不考虑了解吸吸附产量递减更慢且生产时间更长，产量更加稳定。

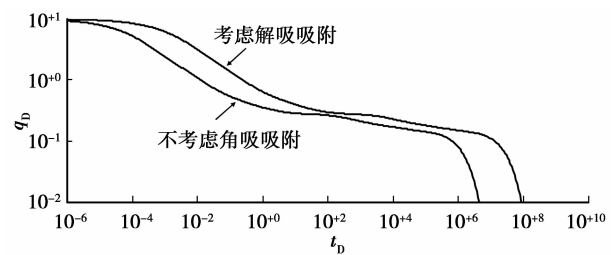


图 3 考虑解吸吸附与不考虑解吸对产能的影响

图 4 反映了 Langmuir 压力 (P_L) 对压裂页岩气井产能动态曲线的影响。在同一 Langmuir 体积 (V_L) 下，Langmuir 压力 (P_L) 越大，压力传播越快，产量递减越快。

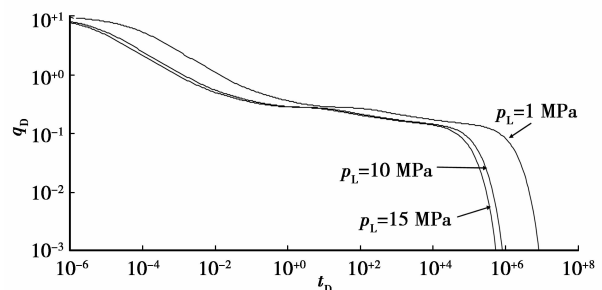


图 4 Langmuir 压力 (P_L) 对产能的影响

图 5 反映了 Langmuir 体积 (V_L) 对压裂页岩气井产能动态曲线的影响。在 Langmuir 压力 (P_L) 相同的情况下，Langmuir 体积 (V_L) 越大压力传播越

慢,产量递减越慢。

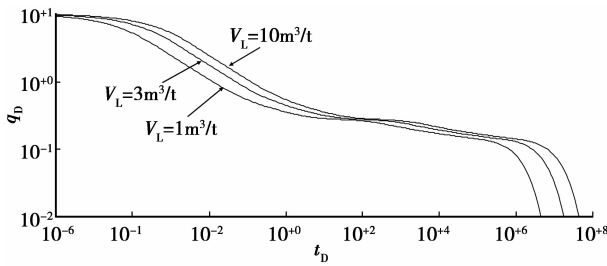


图5 Langmuir 体积(V_L)对产能的影响

图6反映了弹性储容比(ω)对压裂页岩气井产能动态曲线的影响。弹性储容比对裂缝流动阶段的产能影响显著,弹性储容比越小,产量越低。

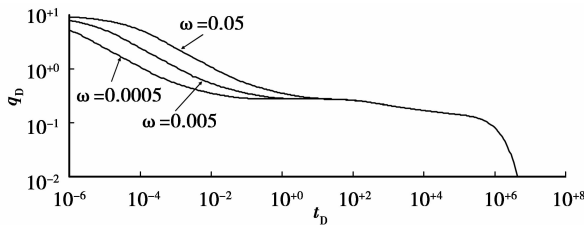


图6 弹性储容比(ω)对产能的影响

图7反映了窜流系数(λ)对压裂页岩气井产能动态曲线的影响。窜流系数越大,窜流发生的时间越早,窜流阶段的产量越高。

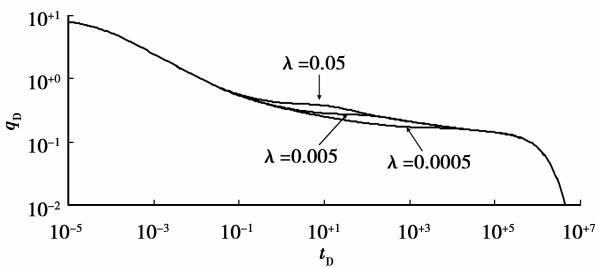


图7 窜流系数的对压裂页岩气井的影响

图8反映了裂缝长度(x_f)对压裂页岩气井产能动态曲线的影响。压裂裂缝长度只能短期增加产量,压裂裂缝长度越长产量越高,在后期产能基本一致。

图9反映了边界对压裂页岩气井动态产能曲线的影响。压力波传到边界时产量急剧下降,边界越大,压力波到达边界的时间越长。

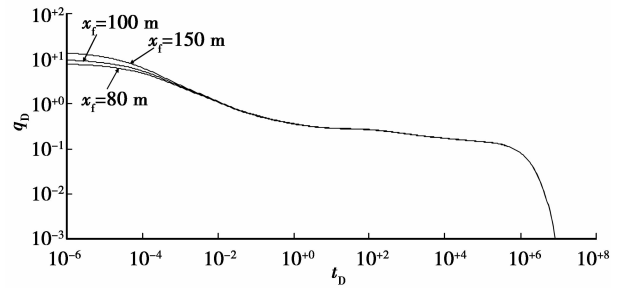


图8 压裂裂缝长度(x_f)对压裂页岩气井的影响

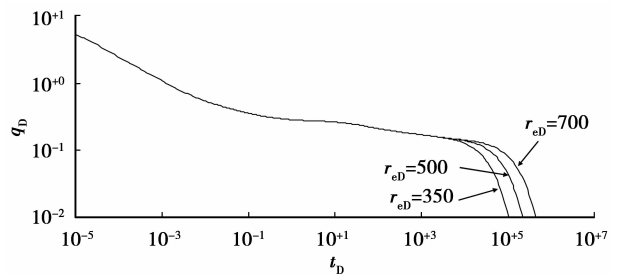


图9 边界(r_{eb})对压裂页岩气井产能的影响

5 结论

1)与常规气藏的主要区别是页岩气存在吸附解吸特性,把吸附解吸特性考虑到压缩系数中,可以得出与常规气藏渗流方程相一致的形式。

2)页岩的解吸特性,使得气井产量递减更慢且生产时间更长。Langmuir 体积越大,压力传播越慢,产量递减越慢;Langmuir 压力越小,压力传播越慢,产量递减越慢。

3)弹性储容比越大,裂缝流动流动阶段产能越大,窜流系数对窜流阶段的产能影响显著,窜流系数越大,进入窜流阶段时间就越早。

4)压裂裂缝长度只能短期增加产量,压裂裂缝长度越长产量越高,在后期产能基本一致。

5)压力波到到达边界的时间由边界控制,压力波达到边界时产量急剧下降,边界越大,压力波到达边界时间越晚。

参考文献:

- [1] 胡文瑞,翟光明,李景明. 中国非常规油气的潜力和发展[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 25-29.
HU WEN-RUI, ZHAI GUANG-MING, LI JING-MING. Potential and development of unconventional hydrocarbon resources in China [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(5): 25-29.
- [2] 张金川,徐波,聂海宽等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.

- ZHANG JIN-CHUAN, XU BO, LIE HAIKUAN, et al. Explorati-on potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(6):136-140.
- [3] 雷群,王红岩,赵群,等. 国内外非常规油气资源勘探发现状及建议[J]. 天然气工业,2008,28(12):7-10.
LEI QUN, WANG HONG-YAN, ZHAO QUN, et al. Status analysis and advices on exploration and development of unconventional hydrocarbon resources[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(12):7-10.
- [4] 李海平,贾爱林,何东博,等. 中国石油的天然气开发技术进展及展望[J]. 天然气工业,2010,30(1):5-7.
LI HAI-PING, JIA AI-LIN, HE DONG-BO, et al. Technical progress and outlook of natural gas development for the PetroChina [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(1):5-7.
- [5] 赵群,王红岩,刘人和等. 世界页岩气发展现状及其我国勘探前景[J]. 天然气技术,2008,2(3):11-14.
ZHAO QUN, WANG HONG-YAN, LIU REN-HE, et al. Global Development and China's Exploration for shalegas[J]. Natural Gas Technology, 2008, 2 (3): 11-14.
- [6] ADAM M LEWIS, RICHARED G HUGHES. PRODUCTION DATA analysis of shale gas reservoirs[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition Denver, Colorado, USA, 21-24 September 2008;SPE116688.
- [7] MATTAR L, GAULT B, MORAD K, et al. Production analysis and forecasting of shale gas reservoirs: case history-based approach[C]// SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, Texas, U. S. A. , 16-18 November 2008; SPE119897.
- [8] JOHNSON N L, CURRIE S M, BLASINGAME T A. A simple methodology for direct estimation of gas-in-place and reserves using rate-time data[C]// SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference , 14-16 April 2009 Denver, Colorado, U;SPE123298.
- [9] 孙超,朱筱敏,陈菁,等. 页岩气与深盆地成藏的相似与相关性[J]. 油气地质与采收率,2007,14(1):26-31.
SUN CHAO, ZHU XIAOMIN, CHEN JING , et al. Similarity and correlation on reservoir forming factors between shale gas reservoirs and deep basin reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recoery Efficiency, 2007. 14(1):26-31.
- [10] 王祥,刘玉华,张敏等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学,2010,21(2):350-355.
WANG XIANG, LIU YU-HUA, ZHANG MIN , et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas natural[J]. Gas Geoscience, 2010,21(2):350-355.
- [11] A E 薛定谔. 多孔介质中的渗流物理方程[M]. 王鸿勋,译. 北京:石油工业出版社,1982.
- [12] ERDAL OZKAN. Performance of Horizontal Wells [D]. Tulsa: University of Tulsa,1988.
- [13] OZKAN E, RAGHAVAN R. Some New Solutions to Solve Problems in Well Test Analysis; Part1-Analytical Considerations [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 359-368.
- [14] OZKAN E, RAGHAVAN R. Some New Solutions to Solve Problems in Well Test Analysis; Part2-Computational Considerations[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3):369-378.
- [15] OZKAN E, RAGHAVAN R. Some New Solutions to Solve Problems in Well Test Analysis; Part3-Additional Algorithms [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September 1994, New Orleans, Louisiana;SPE28424.
- [16] CHAO GAO, JOHN LEE W. Modeling Multilayer Gas Reservoirs Including Sorption Effects [C]// SPE Eastern Regional Meeting, 8-10 Npvemner, 1994, Charleston, West Vinginin; Paper SPE29173.
- [17] 段永刚,李建秋. 页岩气无限导流压裂井压力动态分析[J]. 天然气工业,2010. 30(10):1-4.
DUAN YONG-GANG, LI JIAN-QIU. Transient pressure analysis of infinite conductivity fractured wells for shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2010. 30(10):1-4.
- [18] VAN EVERDINGEN A F, HURST W. The application of Laplace transformation to flow problem in reservoirs [M]. Trans AIME, 1949;186,305-324.
- [19] STEHFEST H. Numerical inversion of Laplace transforms. Communications of the ACM, 1970, 13(1): 47-49.

(编辑 张小强)