

Multi-segment wells: (Holmes & Durlofsky, 2006) 井筒中多相流的漂移模型 (Drift-flux model) (2006)

思想: 将井筒分割成一节一节的, 用以分析井筒不同区段的流体组成、运动性质、状态参数.

需求: Simple, continuous, differentiable.

井段结构及井段与油藏网格间的关系.

井控制方程

定压: $P_{1,seg} = P_{const}$

定流量: $F_{1,out}^{seg} = P_o \cdot Q_o$

控制方程: (4个)

质量守恒方程 (X3; 油、气、水)

压力关系 (动量方程)

$$\Delta P_{total} = \Delta P_h + \Delta P_f + \Delta P_a$$

\uparrow height \uparrow friction \uparrow acceleration

流动项的处理: $F_g^{seg} = A \cdot V_g$

|
流速

补充: mechanistic models

均质模型: $V_g = V_m$

漂移模型: $V_g = C_o V_m + V_d$ (1965)

| |
拖前系数 气相漂移速度

pre-calculated (profile para.) VFP tables (或解系数)

井段与油藏网格联合求解:

1. Domain Decomposition (改进方法)
2. Domain Decomposition + Multigrid
3. 直接求解

parameter optimization (参数优化)

三相流动: 假设油水无滑动, 以气液排处理;

两步式 (two-stage): 气液流, 液相中的油 (ECLIPSE)

三相流动的参数优化

倾角效应 (deviation effect)

模型框架 (modeling framework)

井段未知量: $P, V_m, \alpha_g, \alpha_o$;
或 P, V_m, F_g, F_o

已知量: input flow rate, reference pressure, in/out flow rate along wellbore

控制方程: (见前)

大纲 ECLIPSE 2005a

1. The multi-segment well model (多段井模型)
 - 1) segment structure (井段结构)
 - 2) Inflow performance (流入行为)
 - 3) pressure ^{loss} calculation (压降计算)
 - 4) the top segment (顶部井段)
 - 5) External sources and sinks (外部源汇)
2. Pressure drops from VFP table (由VFP表计算压降)
 - 1) pressure drop scaling
 - 2) pressure drop components (压降构成)
 - 3) Reverse flow (逆流)
 - 4) chokes (阻塞门)
 - 5) Injection wells (注入井)
3. The drift-flux slip model (漂移滑动模型)
 - 1) Introduction
 - 2) model formulation for gas-liquid slip (气液滑动的模型阐述)
 - 3) the profile parameter (轮廓参数)
 - 4) the drift velocity (漂移速度)
 - 5) Three-phase flow and oil-water slip (三相流与油水滑动)
 - 6) Friction (摩擦)
 - 7) Acceleration pressure loss (加速度压力损失)
- * Down-hole separators (井下分离器)
 - 1) defining a down-hole separator (定义)
 - 2) The separator model (分离器模型)
 - 3) Behavior of the model (模型性能)
- * Thermal multi-segment well model (热多段井模型)
 - 1) Energy inflow (能量流入)
 - 2) conductive heat transfer (热传导)
 - ~~3) using the multi-segment well model~~
- * Using the multi-segment well model (应用多段井模型)
 - 1) defining multi-segment well (定义多段井)
 - 2) defining the flow models (定义流动模型)
 - 3) modifying pressure drops and segment properties (调节压力降与井段性质)
 - 4) workovers (油井检修)
 - 5) heat loss (热损失)
 - 6) Thermal contact lengths (热接触长度)
 - 7) Output (输出)
 - 8) performance (性能)
 - 9) restrictions (限制)
 - 10) Converting friction wells into multi-segment wells. (将摩擦井转换为多段井)
 - 8. Summary of keywords
 - 1) RUNSPEC
 - 2) PROPS
 - 3) SUMMARY
 - 4) ...

- 流态 (flow pattern) (flow regime)

- Input volume fraction: (输入体积分数; 含率) (动态特性) (cut)

$$C_G = \frac{Q_G}{Q_L + Q_G}$$

$$C_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_G}$$

In situ volume fraction: (原地体积分数; 持率) (静态特性)

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A}$$

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A}$$

(average across the area of the pipe.)
(截面和体积都有持率)

Deviation effect (倾斜效应): $m(\theta)$ (1999)

优化 Optimization

参数向量: 气液 $X_p = [A, B, a_1, a_2, m(\theta)]$
油水 $X_p' = [A', B', B_2, n, m(\theta)]$

$$E_\alpha = \sum_{i=1}^N w_i |\alpha_i - \alpha_i^*|^2$$

grid block: 网格块 (指地层网格)

multilateral wells: 分支井

密度 $\rho_p = b_p \rho_p^{STC}$
(b_p : 地层压缩系数, $b_p = \frac{1}{B_p}$)

地层压缩系数: $b_g = \frac{MP}{Z_g RT} \frac{1}{\rho_g^{STC}}$
 $b_l = 1 + C_l (P - P^{STC})$
(C_l : 压缩率)

- superficial velocity (表观速度)

$$V_{SG} = \frac{Q_G}{A}$$

$$V_{SL} = \frac{Q_L}{A}$$

in situ velocity (原地速度)

$$V_{OG} = \frac{Q_G}{A_G}$$

$$V_{OL} = \frac{Q_L}{A_L}$$

mixture velocity

$$V_m = V_{SG} + V_{SL} = \alpha_G V_{OG} + (1 - \alpha_G) V_{OL}$$

tree: (分支井的) 顶部
heel: (分支井的) 根部

Stanford
- 发展漂移模型的动机

- 使用大直径管道 (< 2 inch ~ 6 inch)
- 使用两、三相流体
- 使用有倾角管道

漂移模型参数:

分布参数 distribution parameter: C_0
速度分布、浓度分布的联合值。

漂移速度 drift velocity: V_d
气、液在当地的相对速度。

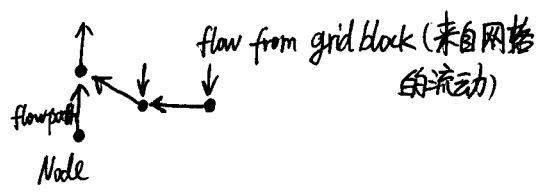
气液流动: $C_0 = f(\alpha_g, V_m)$
 $V_d = f(\alpha, \theta, D, \rho_g, \rho_l, \sigma)$
油水流动: $C_0 = f(\alpha_o)$

(Technical details) Pca

Segment structure (井段结构):

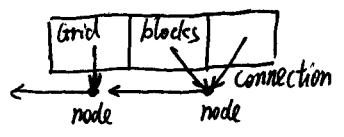


2° multi-segment well topology



3° allocating connection flows to segments
 (将网格与井连接处的流动分配给井段)

- one connection, one node
- several connections, one node
- (ECLIPSE) connection to the nearest node.



Inflow performance relationship

$$q_{pj} = T_{wj} M_{pj} (P_j + H_{cj} - P_n - H_{nc})$$

q_{pj} : j 连接处 p 相的体积流量, 以产出为正

T_{wj} : j 连接的传导率

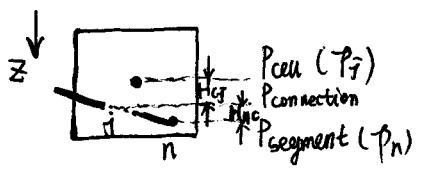
M_{pj} : j 连接处的 phase mobility

P_j : j 连接对应网格的压力

H_{cj} : j 连接深度与对应网格中心深度间的静水压力头 (hydrostatic pressure head)

P_n : 对应结点 n 处的压力

H_{nc} : 结点 n 深度与连接深度间的静水压力头



pressure loss calculation

均质流模型: 相间无滑动 (default)

用预计算的 VFP 表插值 (flexible)

滑移滑动模型: a simple correlation
 (主要用于模拟相分离、逆流) { continuous
 two phase

特殊流控制 设备模型:

- 流限制阀
- 亚临界流
- 速度流控制

the top segment.

$P_{segment} = BHP$

no pressure loss

boundary condition (mode of control)

external sources and sinks (非油藏网格的源/汇)

- Eg: lift gas injection
- down-hole hydraulic pump

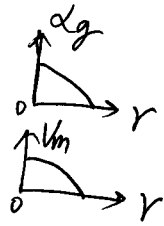
drift-flux slip model introduction

- 通常气相速度大于液相。
- VFP 程序可以计算一维滑动关联, 但无法直接应用。能应用的模型应满足简单、连续、可微。
- 简单: 每一井段每一时间步, 要计算多次。
- 连续: 不连续会使迭代过程不收敛。
- 可微。

- model formulation for gas-liquid slip

G-L slip mechanisms:

1° concentration profile + speed profile



$V_g > V_l$ ($V_g = C_o V_m$)

2° gas rise due to buoyancy ($V_g = V_d$)

$V_g = C_o V_m + V_d$

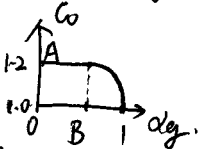
profile parameter 轮廓参数

$V_l = \frac{1-\alpha_g C_o}{1-\alpha_g} V_m - \frac{\alpha_g}{1-\alpha_g} V_d$
 $C_o(\alpha_g, V_m)$

- The profile parameter

- $C_o \approx 1/2$, if α_g, V_m low.
- $C_o \rightarrow 1.0$, if $\alpha_g \rightarrow 1, V_m \rightarrow$ "big enough"

$C_o = \frac{A}{1 + (A-1)\beta^{*2}}$



A = 1.2 or other constants.

$\beta^* = \frac{\beta - B}{1 - B}$ ($0 \leq \beta^* \leq 1$)

$\beta = \max\{\alpha_g, F_v \frac{\alpha_g V_m}{V_{sgf}}\}$ (if $\alpha_g \geq 1$, or $V_m \rightarrow$ "big enough")
 $B = 0.3$, or other constants

$F_v = 1.0$, or other constants
 V_{sgf} : the flooding velocity (溢流速度)

- The drift velocity stationary liquid

(CASE 1) $V_g(V_l=0) = \frac{V_d}{1 - \alpha_g C_o}$ (It's a scalar!)

V_d : rise velocity of a single bubble

$V_d \approx 1.53 V_c$, (Hermythy)

V_c : characteristic velocity

(CASE 2) flooding velocity (annular flow) (Wallis & Makkenchery)

$V_g(V_l=0) = k_u \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{2}} V_c$ (It's scalar)

k_u : critical Kutateladze num
 $k_u = f(D^*)$

D^* : dimensionless pipe diameter

$D^* = \left[\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma_{gl}}\right]^{\frac{1}{2}} D$

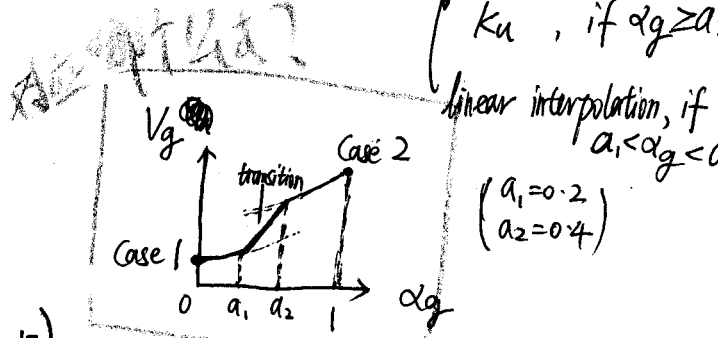
• flooding curve (vertical pipe) (interpolation)

linear ramp (线性坡道):

$V_d|_{\theta=0} = \frac{(1 - \alpha_g C_o) C_o k(\alpha_g) V_c}{\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \alpha_g C_o + 1 - \alpha_g C_o}$

$k(\alpha_g) = \begin{cases} \frac{1.53}{C_o}, & \text{if } \alpha_g \leq a_1 \\ k_u, & \text{if } \alpha_g \geq a_2 \end{cases}$

linear interpolation, if $a_1 < \alpha_g < a_2$



inclination factor $m(\theta)$

(Hasan & Kabir) $m(\theta) = (C_{SD})^{0.5} (H \sin \theta)^2$ ($\theta < 70^\circ$)

(SHI-04) $m(\theta) = 1.85 (C_{SD})^{0.2} (H \sin \theta)^{0.9}$

θ : inclination angle from the vertical.

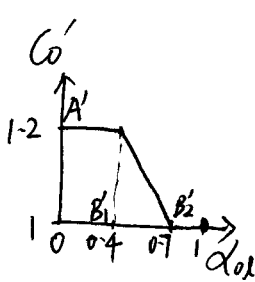
then $V_d = m(\theta) \cdot V_d|_{\theta=0}$
 (注意: 倾斜因子只作用于漂移速度上, 即只有 V_d 与 θ 有关. (Technical details) Case 3)

* Three phase flow and oil-water slip.

油水混合液相的密度、粘度 \rightarrow 取为油水各相对应性质按体积分数的加权平均。

oil-water slip

(Hasan & Kabir) $V_o = C_o' V_L + V_d'$



$$C_o' = \begin{cases} A' & \text{if } \alpha_{o1} \leq B_1 \\ 1 & \text{if } \alpha_{o1} \geq B_2 \\ A' - (A'-1) \frac{(\alpha_{o1} - B_1)}{B_2 - B_1} & \text{if } B_1 < \alpha_{o1} < B_2 \end{cases}$$

(linear interpolation)

$A' = 1.2$

$B_1 = 0.4$

$B_2 = 0.7$

$\alpha_{o1} = \frac{\alpha_o}{\alpha_o + \alpha_w}$ (holdup fraction of oil in liquid)

$V_d' = 1.53 V_c' (1 - \alpha_{o1})^2$

$V_c' = \left(\frac{\sigma_{ow} g (R_w - P_o)}{\rho_w^2} \right)^{\frac{1}{4}}$ (V_d' should be 0, when $\alpha_{o1} \geq 0.7$, becoming oil

(SHI-03/SHI-04) $C_o' = 1$ (a continuous phase) (but V_d' is actually negligible then)

$V_d' = 1.53 V_c' (1 - \alpha_{o1})^{n'}$

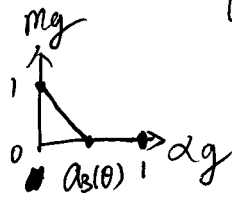
$\begin{cases} n' = 0.95 & \text{for SHI-03} \\ n' = 1.0 & \text{for SHI-04} \end{cases}$

inclination factor

(SHI-04) $m'(\theta) = 1.07 \cos \theta + 3.23 \sin 2\theta$
 $\begin{cases} -2.32 \sin 3\theta & , 0 \leq \theta \leq 88^\circ \\ \text{Linear extrapolation to 0} & \end{cases}$

气体对油水滑动的影晌。(gas effect)

$m_g(\theta, \alpha_g) = 1 - \frac{\alpha_g}{\alpha_{g3}(\theta)}$, if $\alpha_g < \alpha_{g3}$
 0 , if $\alpha_g > \alpha_{g3}$



气体量高于一定量时, 液体内部无滑动。

$\alpha_{g3}(\theta) = 0.017 \exp\{\theta_r^{3.28}\}$

$\theta_r = \theta$ in radians ($\theta \leq 88^\circ$)

friction (pressure loss)

(Hagedorn & Brown)

$\Delta P_f = \frac{C_f f L W^2}{A^2 D \rho}$

f : the Fanning friction factor

L : 井段长

W : 混合物质量流量

A : 井段截面积

D : 井段直径

ρ : 混合物的 in-situ density

C_f : units conversion constant

- Acceleration pressure loss

$\Delta P_a = H_{V_{out}} - \sum_{inlets} H_{V_{in}}$

H_v : (输入/输出的) 速度头

$H_v = \frac{0.5 C_f W^2}{A^2 \rho}$

假设流入流体无动量损失

不考虑油藏网络连接处的(流入)速度头。

● pipe-flow model (管流模型)

empirical correlations (经验公式): 实验数据曲线拟合, 适用范围小。
 homogeneous models (均质模型): 用单相流模型处理多相流。
 mechanistic models: (机理模型) 用参数表现相间滑移, 即漂移模型。

最精确;
 基于各流态性质建模;

(模拟中)可能出 现压降不连续, 或流态转变受阻, 使计算不收敛。可在转变点, 做平滑处理来避免这个问题;

均质模型: 简单、连续、可微 \Rightarrow 适合油藏数值模拟;

简单均质模型没有考虑 in situ volume fraction 与 input volume fraction 之间的真联系, 模拟效果不好;

漂移模型考虑相间滑移, 可以处理 counter-current flow (逆向流) 一种出现总流速小, 或闭井情形下的流动。

研究内容: 1° 在大直径, 有倾角, 相组成变化的管流下做实验。

2° 用实验数据评价已有漂移模型中使用的参数。

3° 修正经验参数, 以最小化模型误差。(优化 optimization)

两步式处理三相流动的方法总是忽视了第三相对被考虑的两相的影响, 但还是可以反映一些定性行为, 比如静滞混合物的相分离。

● 漂移模型 drift-flux model

1° profile mechanism 轮廓机制

持气率 α_g 与混相速度 V_m 在管道中心同时达到最大值, 使气体的 in situ velocity (原地速度) 大于液体的 V_L 。

V_g

$$V_G \equiv \frac{\int V_m \alpha_g dA}{\int \alpha_g dA}$$

$$V_L \equiv \frac{\int V_m (1 - \alpha_g) dA}{\int (1 - \alpha_g) dA}$$

$\alpha_g(r)$ 与 $V_m(r)$ 的单调性一致

\therefore 可证 $V_G > V_L$

Profile parameter 轮廓参数
 常用的轮廓参数值:

$C_0 = 1.2$, bubble/slug flow (气泡流/段塞流)
 ≈ 1.0 , annular mist flow (环状雾状流)

结论:

$$C_0(\alpha_g, V_m) \leq \frac{1}{\alpha_g}$$

(证明:

$$\alpha_g C_0 \leq 1$$

$$\Leftrightarrow \alpha_g C_0 V_m \leq V_m$$

$$\Leftrightarrow \alpha_g (C_0 V_m + V_d) \leq V_m$$

$$\Leftrightarrow \alpha_g V_g \leq V_m$$

$$\Leftrightarrow V_{sg} \leq V_m$$

$$\Leftrightarrow V_{sg} \leq V_{sg} + V_{sl}$$

$$\Leftrightarrow V_{sl} \geq 0$$

好像有点附加假设。

参数 B 的含义:

1) 轮廓参数 C_0 开始下降的持气率 α_g

2) 轮廓参数 C_0 开始下降的 $\frac{V_m}{V_{sg}}$ 比。
 (这个解释有问题。)

结论2: $\frac{\partial(\alpha_g \epsilon_0)}{\partial \alpha_g} > 0$

结论3: $\frac{\partial(V_m \epsilon_0)}{\partial V_m} > 0$

(证明: 我们要证 V_{sg} 与 α_g 和 V_m 正相关。

$\therefore V_{sg} = V_g \cdot \alpha_g$

$V_g = C_0 V_m$ (这里没有考虑漂移速度!)

$\therefore \frac{\partial V_{sg}}{\partial \alpha_g} > 0$

$\Rightarrow V_m \frac{\partial(C_0(\alpha_g, V_m) \cdot \alpha_g)}{\partial \alpha_g} > 0$

$\Rightarrow \frac{\partial(C_0 \alpha_g)}{\partial \alpha_g} > 0$

同理 $\frac{\partial V_{sg}}{\partial V_m} > 0$

$\Rightarrow \frac{\partial(C_0(\alpha_g, V_m) \cdot V_m)}{\partial V_m} > 0$

$\Rightarrow \frac{\partial(C_0 V_m)}{\partial V_m} > 0$

也是有一点问题的。见上。

结论4: 如果 $B < \frac{2-A}{A}$, 则结论2,3

被保障。

(须证明。)

3. Gas-liquid drift velocity 气液漂移速度

如果漂移模型成立, $V_g = C_0 V_m + V_d$, 则

在液相 ~~静止~~ 静滞时 (即 $V_d = 0$)

$V_g = C_0 (\alpha_g V_g + 0) + V_d$
 $\Rightarrow V_g = \frac{V_d}{1 - C_0 \alpha_g}$ 由此可以推算对应漂移速度

flooding curve 溢流曲线:

(Wallis) 稳态 counter-current flow 的气液极限

速率符合曲线:

$\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{V_{sg}} + \sqrt{-V_{sl}} = C \left[\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} g D \right]$

约定速度以向上为正。

当 α_g 接近于1时, 上式右端项(常数)应修正为

$\sqrt{kuV_c}$, 以符合溢流速度公式。

(证明: α_g 接近于1, 且在极限流动态下,

$V_{sl} \ll V_{sg}$

近似有 $\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{V_{sg}} = \sqrt{kuV_c}$

$\Leftrightarrow V_{sg} = kuV_c \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{2}}$

近似有 $V_g = kuV_c \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{2}}$

由漂移模型 $V_g = C_0 V_m + V_d$,

$\Leftrightarrow \alpha_g V_g = \alpha_g [C_0 (V_{sg} + V_{sl}) + V_d]$

$\Leftrightarrow V_{sg} = \alpha_g C_0 V_{sg} + \alpha_g C_0 V_{sl} + \frac{\alpha_g V_d}{\alpha_g}$

$\Leftrightarrow (1 - \alpha_g C_0) V_{sg} - \alpha_g C_0 V_{sl} = \alpha_g V_d$

在给定的持气率 α_g 下, 漂移速度 V_d 是个常数, 并假设轮廓参数 C_0 在所关注的速度范围内不变, 从而气液表观速度 V_{sg} V_{sl} 间满足线性关系。

在稳态 counter-current flow 的极限状态 (溢流, V_{sg}, V_{sl} 满足 Wallis 公式, 也满足对应漂移模型修正的

且两条线在这一点 (V_{sl}, V_{sg}) 相切。

于是得到漂移速度

$V_d = \frac{(1 - \alpha_g C_0) C_0 kuV_c}{\alpha_g C_0 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{2}} + (1 - \alpha_g C_0)}$

(证明) $\therefore \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{V_{sg}} + \sqrt{-V_{sl}} = \sqrt{KuVc}$ ①

$(1-dgCo)V_{sg} - dgCoV_{sl} = dgVd$ ②

$\frac{dV_{sl}}{dV_{sg}} = \sqrt{\frac{V_{sg}}{-V_{sl}}} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{4}}$
 $= \frac{dgCo}{1-dgCo}$ ③

由③得 $\sqrt{\frac{V_{sg}}{-V_{sl}}} = \frac{dgCo}{1-dgCo} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{4}}$ ③*

由①得 $\left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{V_{sg}}{-V_{sl}}} + 1\right]^2 = \frac{KuVc}{-V_{sl}}$ ①*

由②得 $(1-dgCo)\left(\frac{V_{sg}}{-V_{sl}}\right) + dgCo = \frac{dgVd}{-V_{sl}}$ ②*

①*②*乘以相~~同~~系数, 消去右端项得

$KuVc \left[(1-dgCo)\left(\frac{V_{sg}}{-V_{sl}}\right) + dgCo \right] = dgVd \cdot \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{V_{sg}}{-V_{sl}}} + 1 \right]^2$

将③代入上式得
 $KuVc \left[\frac{dgCo}{(1-dgCo)} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{2}} + dgCo \right] =$

$dgVd \left[\frac{dgCo}{1-dgCo} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]^2$

得 $V_d = \frac{(1-dgCo) Co KuVc}{dgCo \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} + (1-dgCo)}$

由右端漂移速度曲线的形式构造出整个漂移速度曲线: $V_d(dg)$

(GeoQuest) $V_d = \frac{(1-dgCo) Co K(dg) Vc}{dgCo \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} + 1 - dgCo}$

$K(dg) = \begin{cases} \frac{1.53}{Co}, & \text{if } dg \leq a_1 \\ \text{linear interpolation,} & \text{if } a_1 < dg < a_2 \\ Ku(P^*), & \text{if } dg \geq a_2 \end{cases}$

a_1, a_2 的意义: 流态转变的~~持~~气率

油-水流动
 要求 V_{so} 与 α_{0o} 正相关, 即 $\frac{\partial V_{so}}{\partial \alpha_{0o}} > 0$

$\Leftrightarrow \frac{\partial (do Co' / m)}{\partial do} > 0$ (没有考虑滑移接)

$\Leftrightarrow Co' + do \frac{\partial Co'}{\partial do} > 0$

$\Leftrightarrow Co' > 0$ ($do \leq B_1$ 或 $do \geq B_2$)

$\Leftrightarrow Co' + do \frac{1-A'}{B_2'-B_1'} > 0$ ($do \in (B_1, B_2)$)

$\Leftrightarrow 1 + B_2' \frac{1-A'}{B_2'-B_1'} > 0$

$\Leftrightarrow B_1' < (2-A')B_2'$

5° 三相流
 6° 倾斜流

对于不在 $[0, 70^\circ]$ 间的倾角 θ , Hasan & Kabir 提出的倾角因子 $m(\theta)$ 不可用。

Experimental setup and results (实验方案与结果)

1° Experimental setup

10.9m 长, 15.2cm 直径, ~~循环管~~ 循环管, 实验透明

实验倾角 $0^\circ, 5^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 88^\circ, 90^\circ, 92^\circ$;

煤油 kerosene, 自来水, 氮气;

稳态测量;

O-W: $Q_{Oe} \in [2, 40] (m^3/h)$, $Q_{We} \in [2, 130] (m^3/h)$

W-g: $Q_{We} \in [2, 100] (m^3/h)$, $Q_{ge} \in [5, 100] (m^3/h)$

O-W-g: $Q_{Oe} \in [2, 40] (m^3/h)$, $Q_{We} \in [5, 140] (m^3/h)$
 $Q_{ge} \in [5, 50] (m^3/h)$;

2° Steady State holdup results (稳态持液率结果)

Water-gas system:

作 Input water cut (C_w : 含水率) 与 Water holdup (d_w : 持水率) 的插图。实验点对直线 $d_w = C_w$ 的偏离反映了两相滑动程度。

结果表明下列情形滑动减小:

$$Q_g \uparrow, C_w \uparrow, \theta: 45^\circ \rightarrow 0^\circ$$

$$45^\circ \rightarrow 80^\circ$$

maximum at $(45^\circ, 70^\circ)$

oil-water system:

同样作 $d_w - C_w$ 图, 结果表明:

在高流速 ($Q_o = 40 \text{ m}^3/\text{h}$) 时, $\theta = 0^\circ, 70^\circ$ 均无明显滑动;

在中间流速 ($Q_o = 10 \text{ m}^3/\text{h}$) 时, $\theta = 70^\circ$ 的相间滑动远高于 $\theta = 0^\circ$ 的相间滑动。

oil-water-gas system:

作 $d_l - C_l$ 图, 结果表明:

气-液相间滑动很明显;

~~三相系统~~

$\theta: 45^\circ \rightarrow 0^\circ$, 相间滑动减小;

$\theta = 45^\circ$ 和 70° 时, 相间滑动量很接近, 可推测 θ 在 $(45^\circ, 70^\circ)$ 间, 可使滑动量最大;

三相系统与 ~~水-气~~ 水-气系统的滑动量定性变化趋势相似, 可假设它们有相似的滑动效应。

parameter determination (参数确定)

1° 优化目标: 最小化实验数据与模拟数据的误差的平方和。

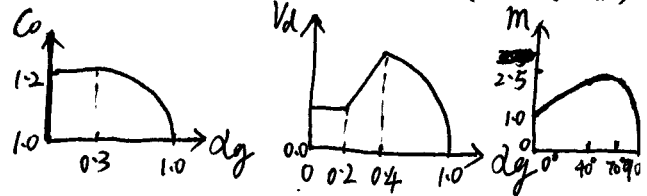
权衡因素: 模型复杂度。

优化参数选择标准: ① 最敏感
② 最不确定

2° 水-气系统优化参数:

$$[A, B; a_1, a_2; m_0, m_1, m_2]$$

其中倾斜因子形式为 $m(\theta) = m_0 (\cos \theta)^{m_1} (\sin \theta)^{m_2}$



所有七个参数都很敏感;

a_1, a_2 很不确定

$$\text{参数向量 } X_p = [A, B, a_1, a_2, m_0, m_1, m_2]^T$$

$$\text{目标函数 } E_{dg} = \sum_{i=1}^N W_i |d_{g_i} - d_{g_i}^*|^2$$

其中, i : 试验点指标

N : 试验点总数

d_{g_i} : 第 i 个试验点的测量 d_g 值。

$d_{g_i}^*$: 第 i 个试验点条件下模拟出的 d_g 值。

W_i : 基于试验重复次数和试验误差等因素赋予第 i 个试验点的权重

最小化算法: trust region reflective Newton algorithm.

模拟量 $d_{g_i}^*$ 的计算:

$$d_{g_i}^* = \frac{V_{sg_i}}{C_o(\alpha_{g_i}^*, X_p) V_{m_i} + V_d(\alpha_{g_i}^*, X_p)}$$

其中 V_{sg_i}, V_{m_i} 可由试验点 i 的信息推得;

X_p 属于输入参数, 也已知。

剩下关于 $\alpha_{g_i}^*$ 的非线性方程, 以实验值 d_{g_i} 为初值进行迭代求解。迭代方法为 successive substitution (逐次代换法)

限制因素: 参数符合物理意义。 有必要么?

优化后参数 $X_p = [1.0, \text{任意值}, 1.0, 1.07, 3.23, -2.3]$
 $\text{error} = 0.0307$;

$C_0 = 1.0$ 与 Hill 的结论很像 [这能是大管的“结果”];

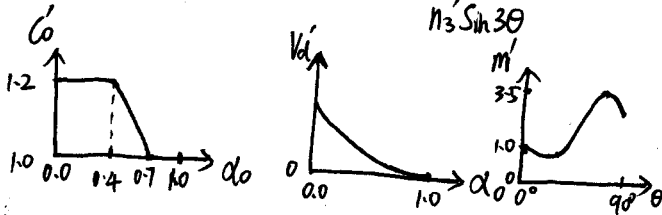
倾斜因子的对比见 pdf。

油-水系统优化参数

$$[A', B', B_2'; n'; n_1, n_2, n_3]^T$$

其中, 漂移速度形式为 $V_d' = 1.53 V_c' (1 - \alpha_{0g})^{n'}$

倾斜因子形式为 $m'(\theta) = n_1' \cos \theta + n_2' \sin 2\theta + n_3' \sin 3\theta$



参数向量: $X_p' = [A', B', B_2', n', n_1', n_2', n_3']^T$

三相参数确定

两步法: ① 用气-液流确定 α_{lg} ;

② 用油-水流确定 α_o, α_w 。

评价: 适合处理分层流 stratified flow;

可以模拟三相分离;

不适用于很多三相相互影响的稳态流。

1° 将水-气结果应用于三相流 (第一步: α_{lg})

ECLIPSE 参数 $X_p = [1.2, 0.3, 0.20, 0.40, 1, 0.5, 2]$
 $\text{error} = 0.0822$, 实验段内所有结果均偏大;

优化后参数 $X_p = [1.0, \text{任意值}, 0.06, 0.21, 1.85, 0.21, 0.95]$
 $\text{error} = 0.0361$;

次优化参数 $X_p = [1.2, 0.6, 0.06, 0.12, 1.27, 0.24, 1.08]$
 $\text{error} = 0.0385$;

结果表明模拟结果受轮廓因子影响不大;

将水-气流优化后参数应用于三相流中的 α_{lg} , 结果令人满意;

两步法这种处理方式使某一液相消失的三相问题能约化到水-气流, 简化了模型。

2° 将油-水结果应用于三相流 (第一步: α_o, α_w)

ECLIPSE 参数 $X_p' = [1.2, 0.4, 0.7, 2.0, \text{最初的 } m(\theta)]^T$
 $\text{error} = 0.149$;

优化后参数 $X_p = [1.0, \text{任意值}, \text{任意值}, 1.0, 1.07, 3.23, -2.32]$
 $\text{error} = 0.141$, 绝大部分 α_{oi} 被低估, 表明漂移速度远小于满相油-水漂移速度, 除非在几乎水平的条件下 ($\theta = 88^\circ$);

油水相间滑移在三相流中的减少是由轮廓引起的;

两相流的结果与讨论

各试验点

误差 error 定义为 α_{lg} 绝对误差的平方平均数。
 (与 $E_{\alpha_{lg}}$ 很像)

1° 水-气流

只考虑 $\alpha_{lg} > 0.06$ 的试验点;

在 $\alpha_{lg} \in (0.1, 0.3)$ 时, ECLIPSE 模拟值普遍偏高; (原参数 $X_p = [1.2, 0.3, 0.20, 0.40, 1, 0.5, 2]$)

ECLIPSE 参数 $\text{error} = 0.067$;

优化后参数 $\text{error} = 0.0222$;

优化后参数 $X_p = [1.0, 0.06, 0.21, 1.85, 0.21, 0.95]^T$;

强行约束 $A=1.2, B=0.6$ 得到的次优化参数为

$X_p = [1.2, 0.6, 0.06, 0.12, 1.27, 0.24, 1.08]^T$
 $\text{error} = 0.0264$;

倾斜因子的对比见 pdf。

2° 油-水流

ECLIPSE 参数 $X_p' = [1.2, 0.4, 0.7, 2.0, \text{最初的 } m(\theta)]^T$
 $\text{error} = 0.135$;

ECLIPSE 参数中 V_d 被严重低估, 原因部分在倾斜因子;

在倾斜下,

三相流中液相的持油率 α_{ol} 几乎等于液相的含油率 C_{ol} , 即油水相间无滑动;

~~气相流量增加时~~

气相流量增加时, $\alpha_{ol} \rightarrow C_{ol}$, 也暗示气流扰动是阻碍油水滑动的因素。
液相组成不变,

计算流程:

- ① 假定油-水无滑动, 取 $\alpha_{ol} = C_{ol}$, 并计算液相性质;
- ② 用水-气模型计算 α_g ;
- ③ 用三相流油-水模型计算 α_{ol}, α_{wl} ;
- ④ 回到第②步, 除非各持量收敛。

上述迭代法通常在两三步内收敛;

平均 error: $\alpha_g \sim 0.0379$

$\alpha_{ol} \sim 0.0643$;

α_{ol} 误差的扩大可能是因为 α_g 偏大引起的, 但这种结果已经 quite acceptable 了。

3° 三相流中的油-水模型

这一部分修正了三相流两步法中的油水模型; 并保证在无气相存在时, 模型约化到原有油-水模型;

直接优化:

固定轮廓参数 C_0' 与垂直漂移速度 $V_d|_{\theta=0}$ 不变, 修改倾斜因子 $m'(\theta)$ 在 θ 处的量, 使目标函数最小。

统一模型: $m_{3-phase}^{ow} = m_{2-phase}^{ow} \cdot M_g$

气体效应 (gas effect)

气体效应参数 (gas effect parameter) $M_g(\theta, \alpha_g) = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha_g}{\alpha_3(\theta)}, & \text{if } \alpha_g < \alpha_3(\theta) \\ 0, & \text{if } \alpha_g > \alpha_3(\theta) \end{cases} \quad (\theta \leq 88^\circ)$

$\alpha_3(\theta) = 0.017 \exp(\theta^{3.28})$
 $\alpha_3(\theta)$ 表示在倾角为 θ 时, 油水滑移差消失所需要的 α_g ; 大倾角时, α_3 越大, 可以认为是气液分离导致扰动更剧烈的因素。
 M_g 在含气量低时, 约化到两相油水模型。在含气量高时, 漂移速度可以消失; M_g 本应与速度相关, 但高 α_g 水平下的数据量不足以建立函数关系。考虑到在高速流情形下, 漂移速度影响不大, 故可以忽略这项因素。

最终漂移速度 $V_d' = 1.53 V_c' (1 - \alpha_{ol}) m_{2-phase}^{ow}(\theta) \cdot M_g(\theta, \alpha_g)$;

新模型的 error = 0.0483 ;

4° 由体积流量计算持率 (holdup)

计算 α_g 需要知道 α_{ol} 和 α_{wl} 以计算液相性质, 计算 α_{ol}, α_{wl} 又需要知道 α_g 以计算气体效应, 我们需要迭代求解;

MS Well

• model formulation 模型表述

1° 一般质量守恒方程 (假设相间不混溶):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_p \alpha_p) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_p V_{sp}) = \tilde{m}_p$$

(\tilde{m}_p : 源/汇流量密度, $\frac{\text{流量}}{\text{体积}}$)

差分形式的守恒方程:

~~$$\frac{\Delta x}{\Delta t} [(\rho_p \alpha_p)^{n+1} - (\rho_p \alpha_p)^n]$$~~

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} [(b_p \alpha_p)^{n+1} - (b_p \alpha_p)^n] + [(b_p V_{sp})_{out}^{n+1} - (b_p V_{sp})_{in}^{n+1}] = \frac{m_p}{A \rho_p}$$

(m_p : 井段内源/汇流量, $\frac{\text{流量}}{\text{时间}}$;
A: 井段截面积;

V_m : 混合物流速 mixture velocity, $\frac{\text{长度}}{\text{时间}}$

Δx : 井段长度

③ 惯性力项

$$\Delta P_a = \frac{2q_{im} \rho_m V_m}{A}$$

(q_{im} : 流入井段 i 的混合物体积流量)

~~形式 2: (Ouyang)~~

$$\Delta P = \Delta P_h + \Delta P_f' + \Delta P_a' + \Delta P_e$$

(ΔP_e : 由气体膨胀引起的 ~~惯性力项~~
惯性力项 (accelerational pressure gradient caused by fluid expansion)

$\Delta P_f'$, $\Delta P_a'$ 与形式 1 中的公式不同。

2° 压力损失方程 (pressure loss equation)

形式 1: (ECLIPSE)

$$\Delta P = \Delta P_h + \Delta P_f + \Delta P_a$$

即总的压力损失由静水压力差, 摩擦耗散和惯性力组成。

① 静水压力差 (井段 i 与 i+1 之间)

$$\Delta P_h = \frac{(\rho_m)_i + (\rho_m)_{i+1}}{2} \cdot g \cdot \Delta x \cos \theta$$

(θ : 倾斜角, 0° 为垂直)

$$\rho_m = \alpha_g \rho_g + \alpha_o \rho_o + \alpha_w \rho_w \quad \text{混合物}$$

② 摩擦耗散项 (与 ECLIPSE 给的公式本质相同)

$$\Delta P_f = \frac{2 f_{tp} \rho_m V_m^2}{D} \Delta x$$

(f_{tp} : 摩擦因子, friction factor)

$$\text{(Haaland)} f_{tp}^{-0.5} = -3.6 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7D} \right)^{1.11} \right]$$

其中 ϵ : 管道粗糙度 pipe roughness

$$Re = \frac{\rho_m V_m D}{\mu_m}$$

$$(\mu_m = \alpha_g \mu_g + \alpha_o \mu_o + \alpha_w \mu_w)$$

• 验证 MS Well

算例: 井筒长 11m, 分为 50 段

1° 稳态三相流

$$\begin{cases} Q_o = 10.0 \text{ m}^3/\text{h} \\ Q_w = 10.1 \text{ m}^3/\text{h} \\ Q_g = 6.2 \text{ m}^3/\text{h} \\ \theta = 5^\circ \end{cases}$$

结果表明, 沿井筒向上, 压力线性下降, 这是因为倾角仅为 5° 时, 静水压力差在总压力损失中占主导地位;

沿井筒向上, 持气率增大, 这是压力下降导致的, MS Well 的结果与 ECLIPSE 的结果吻合得很好。

2° 暂态油-水流 (关井试验)

$$\begin{cases} Q_o = 10.0 \text{ m}^3/\text{h} \\ Q_w = 10.1 \text{ m}^3/\text{h} \\ \theta = 45^\circ \end{cases}$$

结果表明, 上部井段持油率趋向于 1, 下部井段持油率趋向于 0, 持油率稳定最慢的井段处于油水分界;

MSWell的结果与ECLIPSE的结果吻合得很好。

● 结论

漂移模型用于油藏模拟器的原因:

- 相对简单
- 形式连续, 可做

工作: ① 用新的实验数据确定漂移参数;
② 建立了一个多相井筒流动模型 (multiphase wellbore flow model) MSWell, 即计算模块。

结论: ① 大井筒与小井筒需要不同的漂移参数;

有正确
反映主要
关系的模型
系统更简单。

② 优化后的漂移模型可准确描述水-气、油-水、
参数和三相流, 且参数统一地适用于
各种情况;

③ 水-气优化参数可以用于计算三相流的持气率;
流合

④ $\theta \in [0, 70^\circ)$ 时, 持率小于 0.1 的气体就可以
消除油水滑动,
接近水平流动时, 由于气液分离, 气体对
油水滑动的影响就很小,

引入气体效应参数 α_3 gas effect parameter
 $\alpha_3(\alpha_g, \theta)$ 来反映油水滑动的减少;

⑤ 新的模块 MSWell 可以用于 Advanced well
计算
(高级井) 的模拟。

多段井

意义: advanced wells



流限制阀
气举 lift gas injection
downhole ~~hydraulic~~ pump

发展现状:

~~应用~~

MS Well
GPRS
~~精确计算~~

~~应用~~

CCS
Zhang, Y.

模型表述: 1° 质量守恒方程 X3
2° 压力损失方程 X1

单相流 [P, V_m, α_g, α_o]

多相流

流态 (管流) - (环)

核心概念定义

模型 { 均质水模型 / 漂移模型 → i
经验公式
机理模型 → i

我的设想:

$$V_g = C_0 V_m + V_d$$

~~不漂亮的公式~~: $PV = ZRT$

factors =

1. 无量纲量
2. 气体溶解
3. 流态
4. 流速
5. ρ
6. α_g
7. 相



漂移模型

持率 α , 含率 C .

表观速度 V_s , 原地速度 V

混合物速度 V_m .

漂移模型 (Zuber & Findlay)

G-L

~~Q-W~~

← 计算模型的需求: 1°, 2°, 3° (解释)

← C_0, V_d 的意义.

漂移模型参数

(Original)

C_0, V_d .

C'_0, V'_d . (Hasan & Kabir)

$m(\theta)$ (Hasan & Kabir)

漂移模型参数

(Stanford)
Optimization

$m'(\theta)$, ~~其他参数~~

← 发展动机: 1°, 2°, 3°

三相流动 (Stanford)

两步法

$M_{ej}(dg, \theta)$

← 适用条件



Executive summary

(bottom-up)

1. Concepts:

$$C_p \equiv \frac{Q_p}{\Sigma Q}$$

$$\alpha_p \equiv \frac{A_p}{A}$$

$$V_{sp} \equiv \frac{Q_p}{A}$$

$$V_p \equiv \frac{Q_p}{A_p}$$

$$V_m \equiv \frac{\Sigma Q}{A}$$

$$V_{sp} = \alpha_p V_p$$

$$V_m = \Sigma V_{sp}$$

$$b_p = \frac{p_p}{p_{STC}^p}$$

$$b_g = \frac{MP}{z_g RT} \cdot \frac{1}{p_g^{STC}}$$

$$b_l = 1 + c_l (p - p^{STC})$$

$$\frac{\partial V_d}{\partial p_g} \quad \frac{\partial V_d}{\partial C_o} \quad \frac{\partial V_d}{\partial p_c}$$

C_o p_g p_c all known

$\frac{\partial C_o}{\partial \beta^*}$ β^* known

2. Drift-flux model

$$V_g = C_o V_m + V_d \quad (G-L)$$

$$V_o' = C_o' V_m + V_d' \quad (O-W)$$

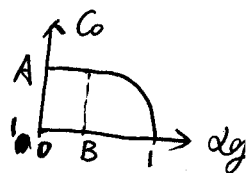
$$V_l = \frac{1 - \alpha_g C_o}{1 - \alpha_g} V_m - \frac{\alpha_g}{1 - \alpha_g} V_d \quad (G-L)$$

$$V_w = \frac{1 - \alpha_o C_o'}{1 - \alpha_o} V_m - \frac{\alpha_o}{1 - \alpha_o} V_d' \quad (O-W)$$

$$C_o = \frac{A}{1 + (A-1)\beta^{*2}}$$

$$\beta^* = \frac{\beta - B}{1 - B} \quad (0 \leq \beta^* \leq 1)$$

$$\beta = \max\left\{\alpha_g, F_v \frac{\alpha_g |V_m|}{V_{sg, f}}\right\}$$



$$V_d = \frac{(1 - \alpha_g C_o) C_o k(\alpha_g) V_c}{\alpha_g C_o \sqrt{\frac{p_g}{p_l}} + 1 - \alpha_g C_o}$$

$$k(\alpha_g) = \frac{1.53}{C_o}, \quad \alpha_g \leq a_1$$

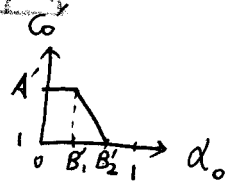
linear interpolation, $a_1 < \alpha_g < a_2$

$$V_c = \left(\frac{\sigma_{lg} g (p_l - p_g)}{p_l^2}\right)^{1/4} k_u(D^*) \quad \alpha_g \geq a_2$$

$$C_o' = A', \quad \alpha_o \leq B_1'$$

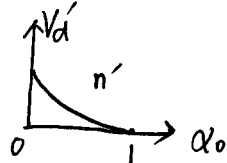
$$1, \quad \alpha_o \geq B_2'$$

$$\frac{A' - (A'-1)(\alpha_o - B_1')}{B_2' - B_1'}, \quad B_1' < \alpha_o < B_2'$$



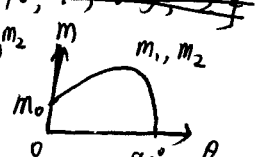
$$V_d' = 1.53 V_c' (1 - \alpha_o)^{n'}$$

$$V_c' = \left(\frac{\sigma_{ow} g (p_w - p_o)}{p_w^2}\right)^{1/4}$$



~~$X_p = [1.2, 0.3, 0.2, 0.4, 1, 0.5, 2]^T$~~

$$m(\theta) = m_0 (\cos \theta)^{m_1} (1 + \sin \theta)^{m_2}$$



$$X_p = [1.2, 0.3; 0.2, 0.4; 1, 0.5, 2]^T$$

$$X_p' = [1.2, 0.4; 0.7; 2; 1, 0.5, 2]^T$$

② $m'(\theta) = n_1' \cos \theta + n_2' \sin 2\theta + n_3' \sin 3\theta$

$X_p = [1.0, \text{任意值}; 0.06, 0.21; 1.85, 0.21, 0.95]^T$

~~XXXXXXXXXX~~

$X_{p\text{-sub}} = [1.2, 0.6; 0.06, 0.12; 1.27, 0.24, 1.08]^T$

$X_p' = [1.0, \text{任意值}, \text{任意值}; 1.0; 1.07, 3.23, -2.32]^T$
(这里用的是 $m'(\theta)$)

3 Optimization

目标函数 $E_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N W_i |d_{g_i} - d_{g_i}^*|^2$

参数向量 $X_p = [A, B, a_1, a_2, m_0, m_1, m_2]$

模拟值迭代公式

$d_{g_i}^* = \frac{V_{sg_i}}{C_0(d_{g_i}^*, X_p) V_{m_i} + V_d(d_{g_i}^*, X_p)}$

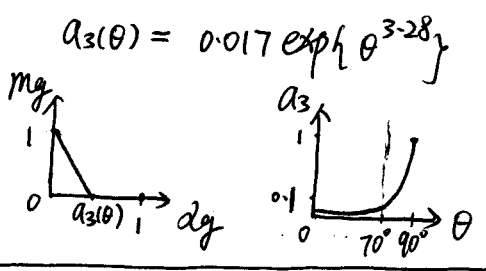
最小化算法: trust region reflective Newton algorithm

限制因素:

- $C_0 \leq \frac{1}{d_g}$
- $B < \frac{2-A}{A}$
- $B_1' < (2-A') B_2'$

- $A \geq 1.0$
- $B \in [0, 1]$
- $0 \leq a_1 \leq a_2 \leq 1$
- $m_0 > 0$
- $A' \geq 1.0$
- $0 \leq B_1 \leq B_2 \leq 1$
- $n' > 0$
- $n_1' > 0$
- (可能还有更多)

$m_g(\theta, d_g) = \begin{cases} 1 - \frac{a_g}{a_3(\theta)} & , d_g < a_3(\theta) \\ 0 & , d_g \geq a_3(\theta) \end{cases} \quad (\theta \leq 88^\circ)$



$V_{d', 3\text{-phase}} = V_d' \cdot m' \cdot m_g$

g-l: $V_g = C_0 V_m + V_d m(\theta)$
 0-w: $V_0 = C_0' V_m + V_d' m'(\theta)$
 g-o-w: $\begin{cases} 1^\circ V_g = C_0 V_m + V_d m(\theta) \\ 2^\circ V_0 = C_0' V_m + V_d' m'(\theta) m_g(\theta, d_g) \end{cases}$