

24. 基于 1stOpt 的降雨-径流水文模型参数优化率定应用

24.1 背景

1stOpt 不仅仅可以解决基本数值计算问题如非线性方程组, 非线性曲线拟合或多约束优化问题, 结合编程模式, 还可以轻松处理复杂的实际工程仿真模型计算问题, 下面以新安江和 Tank (水箱) 两款水文界知名的流域降雨-径流水文模型为例进行演示。

24.2 新安江及 Tank 模型

流域降雨-径流模型主要用于模拟仿真流域从降雨到(洪水)径流的过程。虽然目前具有物理意义的分布式水文模型成为行业热点, 但历史悠久使用方便的概念性降雨-径流水文模型在当今洪水预报及防洪减灾中应用仍然十分广泛。

至今世界范围内提出的概念性水文模型众多, 而其中的新安江水文模型可以说是我国唯一在世界范围内享有盛誉并被广泛认可和应用的降雨-径流水文模型, 该模型是河海大学(原华东水利学院)赵人俊教授于上世纪 70 年代末 80 年代初提出的, 并获评建国 40 周年 100 项重大科技成果之一。其基本概念如图 24-1 示。

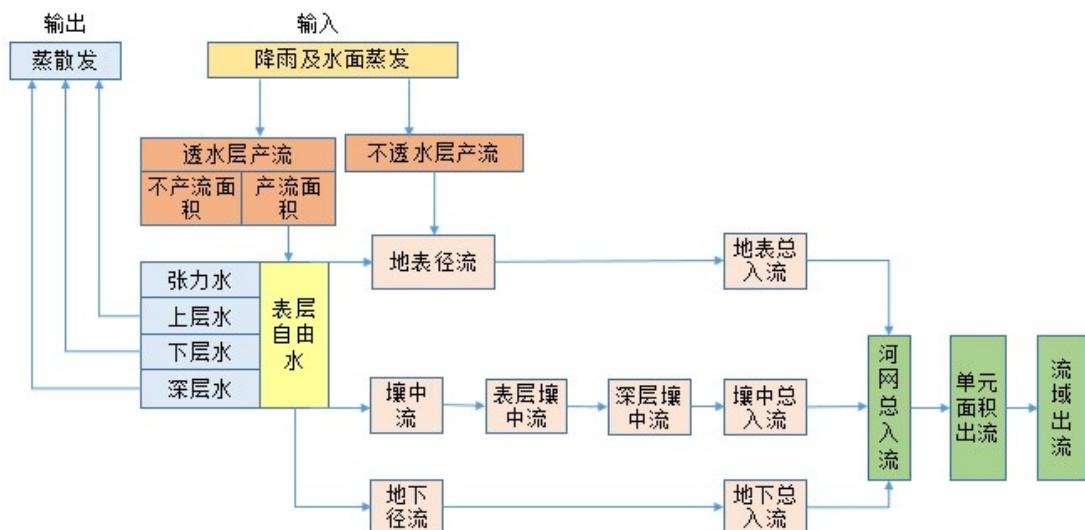


图 24-1. 新安江模型示意图

Tank 模型由日本学者菅原正巳博士在上世纪 60 年代提出, 世界各国应用广泛, 其基本概念如图 24-2 示。

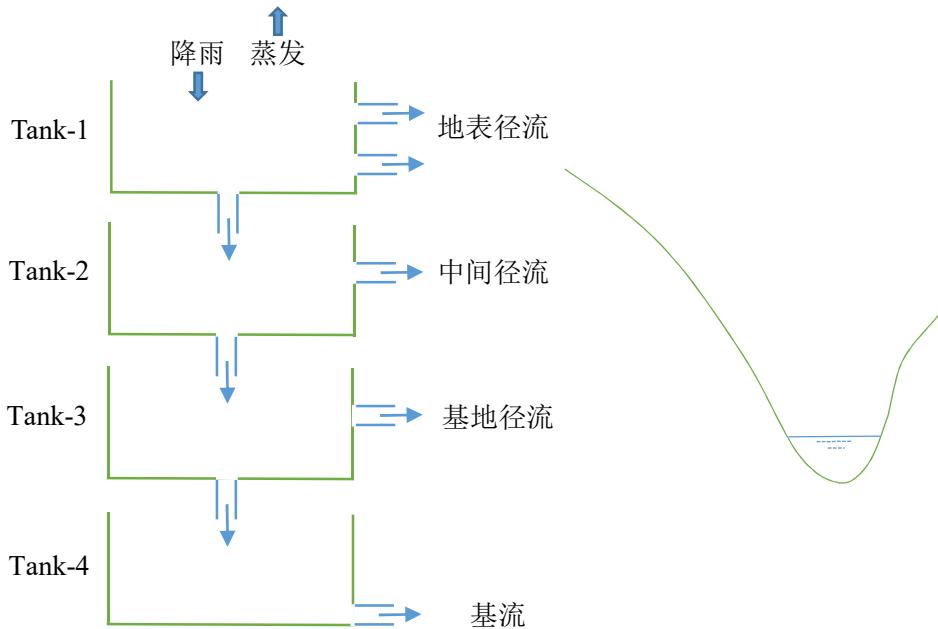


图 24-2. Tank 模型示意图

24.3 水文模型参数确定

模型一旦确定，下一步关键就是如何确定模型参数，无论是新安江模型还是 Tank 模型都有十个左右或更多的模型参数需要通过已有实际观测降雨-径流资料率定获得，该率定过程实际就是一个优化求解过程。理论上很多优化算法都可以用于水文模型参数率定，比如经典的高斯牛顿算法，遗传算法等，而这其中尤其需要提到的是 SCE-UA 算法。

SCE-UA 算法是“源自水文服务于水文”的经典案例。该算法是段青云博士 90 年代初在美国亚利桑那大学攻读水文博士学位时提出的专门用于其博士论文中水文模型参数优化率定的算法，SCE-UA 算法提出后不仅水文水资源领域得到了广泛的认可和应用，比如一些水文专业模拟软件将 SCE-UA 算法设定为缺省的优化算法，在其它行业也获得了很多成功的案例，具体可参考图-3 段博士与其昔日导师及同事撰写的一篇关于 SCE-UA 算法三十周年回顾及总结的文章。

SCE-UA 算法可以说是段青云博士学术生涯的最亮点，也是其获聘为国家特聘专家的最重要支撑业绩之一。段青云博士其于 2009 年 4 月受聘为北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院首席科学家，2019 年 4 月至今为河海大学水文水资源学院特聘教授，全球水文气象预报研究中心主任。

新安江模型和 SCE-UA 算法的提出者均为华人，而两者最终都交汇于河海大

学，可以说是一段美谈了，遗憾的是赵人俊先生已于 1993 年病逝于南京。

SCE-UA 算法有时也被俗称为“洗牌法”，虽然也具有不依赖于初值的全局优化特性，但相比于 1stOpt 的通用全局优化算法，已经存在相当的差距，段博士及其团队在其一篇论文中即采用了 1stOpt 而没有使用其自身研发的 SCE-UA 算法，见图 24-3 至图 24-5.

Scientia Iranica A (2019) 26(4), 2015–2031



Invited/Review Article

Three decades of the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) optimization algorithm: Review and applications

M. Rahnamay Naeini^{a,*}, B. Analui^a, H.V. Gupta^b, Q. Duan^c, and S. Sorooshian^{a,d}

- a. Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS) & Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine, CA, USA.
b. Department of Hydrology & Atmospheric Sciences, The University of Arizona, Tucson, AZ, USA.
c. Faculty of Geographical Sciences, Beijing Normal University, Beijing, China.
d. Department of Earth System Science, University of California, Irvine, CA, USA.

Received 11 April 2019; received in revised form 27 May 2019; accepted 28 May 2019

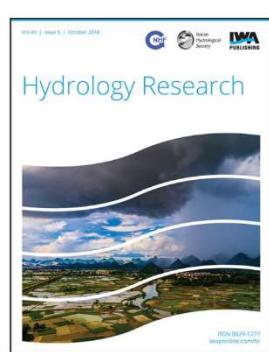
图 24-3. SCE-UA 三十周年回顾及总结论文

Hydrology Research

ISSUES JOURNAL INFORMATION ▾ LIBRARIANS ▾ OPEN ACCESS ▾ BOOKS ▾ ABOUT ▾

Volume 49, Issue 5

1 October 2018



RESEARCH ARTICLE | FEBRUARY 28 2018

Dynamic Manning's roughness coefficients for hydrological modelling in basins **FREE**

Aizhong Ye; Zheng Zhou; Jinjun You; Feng Ma; Qingyun Duan

Hydrology Research (2018) 49 (5): 1379–1395.

<https://doi.org/10.2166/nh.2018.175>



Aizhong Ye
Beijing Normal University



Zheng Zhou



Jin Jun You
China Institute of Water Resources and Hydropower Research



Feng Ma
Nanjing University of Information Science & Technology



Qingyun Duan
Hohai University

图 24-4. SCE-UA 开发者论文中采用 1stOpt

The p_1 , p_2 and p_3 parameters were optimized by **1stOpt** (<http://www.7d-soft.com/>). **1stOpt** is a robust, easy-to-use and powerful optimization tool that is widely used in various engineering fields. Based on the optimization software package **1stOpt**, multiple nonlinear regression can be easily established and solved (Wang *et al.* 2009; Hu *et al.* 2011). The **1stOpt** search of optimization capability is stronger than that of other simulation software because it can find relatively accurate results from any initial value (Tang *et al.* 2008). The Levenberg–Marquardt + Universal Global Optimization of **1stOpt** was applied to optimize a set of parameters in Equation (2).

图 24-5. SCE-UA 开发者论文采用 **1stOpt** 并做相关评价

24.4 基于 **1stOpt** 的新安江及 **Tank** 模型优化率定

对新安江和 **Tank** 模型在 **1stOpt** 编程模式下分别直接用 Fortran 和 Pascal 语言实现。一般情况下，降雨-径流模拟计算难度是短历时（分、小时）高于长历时（日、月），多次洪水过程同时模拟计算高于单次洪水，本次采用三次时间间隔为 1 小时的短历时降雨-径流过程进行参数优化率定，见图 24-6，蒸发忽略不计。

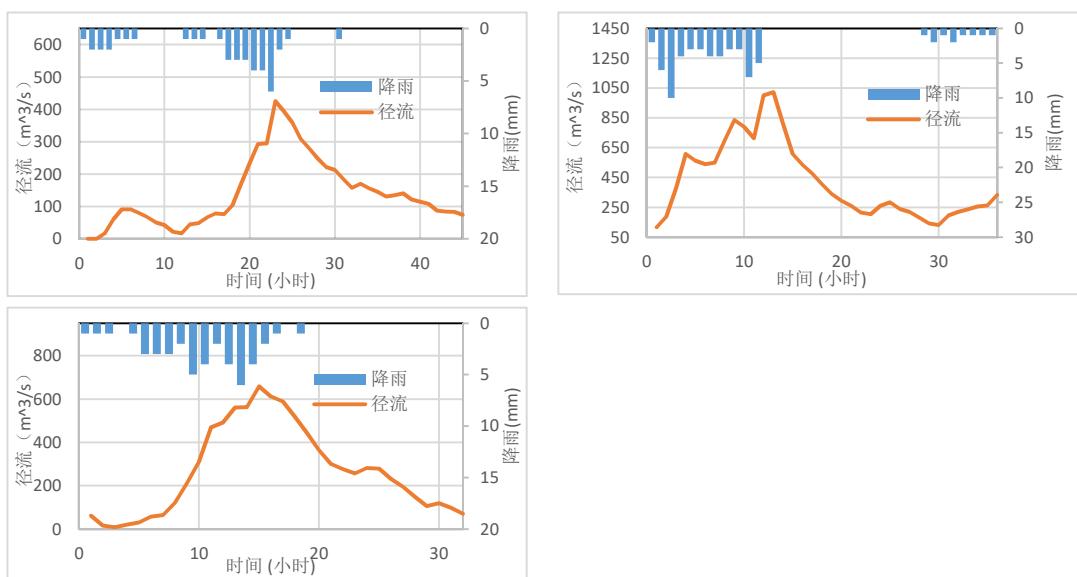


图 24-6 三次实测降雨-径流过程

降雨-径流实际模拟仿真计算中涉及到每次降雨前流域的初始状态数据，不

同的模型需求也不同，如新安江模型需要流域地表径流，壤中流，基流等数据，而 Tank 模型需要知道每个水箱的既存水量，为了方便展示，均将这些本应该是已知的数据也设为参数进行求解，用到关键字“VarParameter”，也即该关键字定义的参数随数据（降雨-径流过程）不同而不同。三次洪水过程同时进行模拟，对新安江模型而言共有 34 个参数，其中 10 个共有参数，24 个变参数，Tank 模型则有 24 个参数，其中 12 个共有参数，12 个变参数。1stOpt 求解代码及结果见下。

Fortran 模式新安江模型求解代码

```

Variable Rainfall;          //unit: mm
Variable Runoff[OutPut];    //unit: m^3/s
//Variable Evap;           //Evaporation, unit: mm
Constant Area = 700;        //catchment area, unit: km^2
Constant DT = 1;            //time interval, unit: hr
Constant WUM = 40;          //upper field capacity, unit: mm
Constant WLM = 80;          //lower field capacity, unit: mm
Constant WDM = 80;          //deeper field capacity, unit: mm
VarParameter wu=[0,40];      //initial surface water, unit: mm
VarParameter wl=[0,100];     //initial ground water, unit: mm
VarParameter wd=[0,80];      //initial deep water, unit: mm
Parameter K1=[0.001,1];      //蒸发皿系数, 无量纲
Parameter C=[0.001,1];       //深层蒸散发系数, 无量纲
Parameter B=[0.001,1];       //蓄水容量曲线指数, 无量纲
Parameter IMP=[0.001,0.03];   //不透水面积占全流域面积之比, 无量纲
Parameter SM=[5,80];         //流域平均自由水蓄水容量, 单位: mm
Parameter EX=[0,1,2];        //自由水抛物线指数, 无量纲
Parameter KG=[0.01,1];       //地下水从自由水蓄水库中的出流系数, 无量纲
Parameter KSS=[0.01,1];      //自由水壤中流出流系数, 无量纲
Parameter KKG=[0.01,1];      //自由水地下水消退系数, 无量纲
Parameter KKSS=[0.01,1];     //壤中流消退系数, 无量纲
VarParameter s=[0,80];        //自由水在产流面积上的平均蓄水深, 单位: mm
VarParameter QRSS=[0,140];    //初始壤中流, 单位: m^3/s
VarParameter QRG=[0,60];      //初始地下径流, 单位: m^3/s
VarParameter pu(2)=[0,1];
StartProgram [Fortran];
Subroutine MainModel
    integer i
    real*8 temd, temd1, temd2
    real*8 wmm, w, SSM, U, D1, A, tem_EM, tem_pe, tem_ei
    real*8 UH(0:2)
    real*8 EU, EL, ED, wu_u, wl_l, wd_d, w_w, R, s_s, AU, FR, RSS, RG, QRSS_s, QRG_g, QRS, Q
    real*8 RS, RS_1, RS_2

    UH(0) = pu1          !//0.3;//无因次单位线
    UH(1) = pu2          !//0.6;//无因次单位线
    UH(2) = 1-pu1-pu2   !//0.1;//无因次单位线
    wmm = wum + wlm + wdm !//总土壤最大蓄水容量
    w = wu + wl + wd    !//第一次总土壤初始蓄水量
    wmm = (1 + B)*wmm    !//流域最大储水量
    SSM = (1 + EX)*SM    !全流域上最大点的自由水蓄水容量

    temd2 = 0

```

```

!计算三层蒸散发量
wu_u = wu
wl_l = wl
wd_d = wd
w_w = w
s_s = s
QRSS_s = QRSS
QRG_g = QRG
U = Area/(DT*3.6)    !//单位转换系数

do i = 0, DataLength - 1
    tem_EM = 0      !Evap(i)*k1;
    if ((wu_u + Rainfall(i)) >= tem_EM) then
        EU = tem_EM
        EL = 0
        ED = 0
    else
        EU = wu_u + Rainfall(i)
        if (wl_l >= c*wlm) then
            EL = (tem_EM - EU)*wl_l/wlm
            ED = 0
        else
            if (wl_l >= c*(tem_EM - EU)) then
                EL = c*(tem_EM - EU)
                ED = 0
            else
                EL = wl_l
                ED = c*(tem_EM - EU) - EL
            end if
        end if
    end if
    tem_ei = EU + EL + ED
    tem_pe = Rainfall(i) - tem_ei

    !开始计算三水源情况下的产流量、划分水源
    temd1 = (1 - w_w/wm)
    if (temd1 < 0) temd1 = 0
    A = wwmm*(1 - temd1**((1/(1 + B)))
    if (tem_pe > 0) then
        if ((tem_pe + A)>=wwmm) then
            R = tem_pe - (wm - w_w)
        else
            R = tem_pe - ((wm - w_w) - wm*(1-(tem_pe + A)/wwmm)**(1 + B))
        end if
    else
        R = 0
    end if

    temd1 = (1 - s_s/SM)
    if (temd1 < 0) temd1 = 0

    AU = SSM*(1-temd1**((1/(1 + EX)))
    !注：以下计算认为 ss-fs/f 曲线是按全流域（FR=1）计算产流，再缩至 FR
    if (tem_pe > 0) then
        FR = R/tem_pe - IMP
        if ((AU + tem_pe) < SSM) then
            RS = (1 - IMP)*FR*(tem_pe - SM + s_s + SM*(1 - (tem_pe + AU)/SSM)**(1 + EX))
            RSS =(SM - SM*(1 - (tem_pe + AU)/SSM)**(1 + EX))*KSS*(1 - IMP)*FR

```

```

RG = (1 - IMP)*FR*KG*(SM - SM*(1 - (tem_pe + AU)/SSM)**(1 + EX))
s_s = (1 - KSS - KG)*(SM - SM*(1 - (tem_pe + AU)/SSM)**(1 + EX))
else
    RS = (1 - IMP)*FR*(tem_pe + s_s - SM)
    RSS = (1 - IMP)*FR*SM*KSS
    RG = (1 - IMP)*FR*SM*KG
    s_s = SM*(1 - KSS - KG)
end if
else
    temd1 = (1 - w_w/wm)
    if (temd1 < 0) temd1 = 0
    FR = 1 - temd1**((B/(1 + B)))
    RS = 0
    RSS = s_s*KSS*(1 - IMP)*FR
    RG = s_s*KG*(1 - IMP)*FR
    s_s = (1 - KSS - KG)*s_s
end if

//计算土壤含水量
if ((wu_u + Rainfall(i) - R - EU) <= wum) then
    wu_u = wu_u + Rainfall(i) - R - EU
    wl_l = wl_l - EL
    wd_d = wd_d - ED
else
    wu_u = wum
    if ((wl_l - EL + (wu_u + Rainfall(i) - EU - R - wum)) <= wlm) then
        wl_l = wl_l - EL + (wu_u + Rainfall(i) - EU - R - wum)
    else
        wl_l = wlm
    end if

    if (wd_d - ED + (wl_l - EL + (wu_u + Rainfall(i) - EU - R - wum) - wlm) <= wdm) then
        wd_d = wd_d - ED + (wl_l - EL + (wu_u + Rainfall(i) - EU - R - wum) - wlm)
    else
        wd_d = wdm
    end if
end if
if (wu_u > wum) wu_u = wum
if (wl_l > wlm) wl_l = wlm
if (wd_d > wdm) wd_d = wdm
w_w = wu_u + wl_l + wd_d

!计算地表径流
if (i == 0) then
    QRS = 0
else if (i == 1) then
    QRS = (RS + Rainfall(i)*IMP)*U*UH(0)
    RS_1 = RS
else if (i == 2) then
    QRS = (RS + Rainfall(i)*IMP)*U*UH(0) + (RS_1 + Rainfall(i-1)*IMP)*U*UH(1)
    RS_2 = RS_1
    RS_1 = RS
else
    QRS = (RS + Rainfall(i)*IMP)*U*UH(0) + (RS_1 + Rainfall(i-1)*IMP)*U*UH(1) + (RS_2 + Rainfall(i-2)*IMP)*U*UH(2)
    RS_2 = RS_1
    RS_1 = RS
end if

```

Pascal 模式新安江模型求解代码

```

Variable Rainfall;           //unit: mm
Variable Runoff[OutPut];    //unit: m^3/s
//Variable Evap;            //Evaporation, unit: mm
Constant Area = 700;        //catchment area, unit: km^2
Constant DT = 1;             //time interval, unit: hr
Constant WUM = 40;           //upper field capacity, unit: mm
Constant WLM = 80;           //lower field capacity, unit: mm
Constant WDM = 80;           //deeper field capacity, unit: mm
VarParameter wu=[0,40];       //initial surface water, unit: mm
VarParameter wl=[0,100];      //initial ground water, unit: mm
VarParameter wd=[0,80];       //initial deep water, unit: mm
Parameter K1=[0.001,1];       //蒸发皿系数, 无量纲
Parameter C=[0.001,1];       //深层蒸散发系数, 无量纲
Parameter B=[0.001,1];       //蓄水容量曲线指数, 无量纲
Parameter IMP=[0.001,0.03];   //不透水面积占全流域面积之比, 无量纲
Parameter SM=[5,80];          //流域平均自由水蓄水容量, 单位: mm
Parameter EX=[0.1,2];         //自由水抛物线指数, 无量纲
Parameter KG=[0.01,1];        //地下水从自由水蓄水库中的出流系数, 无量纲
Parameter KSS=[0.01,1];        //自由水壤中流出流系数, 无量纲
Parameter KKG=[0.01,1];        //自由水地下水消退系数, 无量纲
Parameter KKSS=[0.01,1];       //壤中流消退系数, 无量纲
VarParameter s=[0,80];         //自由水在产流面积上的平均蓄水深, 单位: mm
VarParameter QRSS=[0,140];     //初始壤中流, 单位: m^3/s
VarParameter QRG=[0,60];       //初始地下径流, 单位: m^3/s
VarParameter pu(2)=[0,1];
StartProgram;
var i: integer;
temd, temd1, temd2 : Double;
wwmm, wm, w, SSM, U, D1, A, tem_EM, tem_pe, tem_ei : Double;
UH : array[0..2] of Double;
EU, EL, ED, wu_u, wl_l, wd_d, w_w, R, s_s, AU, FR, RSS, RG, QRSS_s, QRG_g, QRS, Q : Double;

```

```

RS, RS_1, RS_2: Double;
begin
    UH[0] := pu1;           //0.3;//无因次单位线
    UH[1] := pu2;//0.6;    //无因次单位线
    UH[2] := 1-pu1-pu2;    //0.1;//无因次单位线
    wm := wum + wlm + wdm; //总土壤最大蓄水容量
    w := wu + wl + wd;    //第一次总土壤初始蓄水量
    wmm := (1 + B)*wm;    //流域最大储水量
    SSM := (1 + EX)*SM;   //全流域上最大点的自由水蓄水容量

    temd2 := 0;
    //计算三层蒸散发量
    wu_u := wu;
    wl_l := wl;
    wd_d := wd;
    w_w := w;
    s_s := s;
    QRSS_s := QRSS;
    QRG_g := QRG;
    U := Area/(DT*3.6);   //单位转换系数

    for i := 0 to DataLength - 1 do begin
        tem_EM := 0;          //Evap[i]*k1;
        if (wu_u + Rainfall[i])>=tem_EM then begin
            EU := tem_EM;
            EL := 0;
            ED := 0;
        end
        else begin
            EU := wu_u + Rainfall[i];
            if wl_l>=c*wlm then begin
                EL := (tem_EM - EU)*wl_l/wlm;
                ED := 0;
            end
            else begin
                if wl_l >= c*(tem_EM - EU) then begin
                    EL := c*(tem_EM - EU);
                    ED := 0;
                end
                else begin
                    EL := wl_l;
                    ED := c*(tem_EM - EU) - EL;
                end;
            end;
        end;
        tem_ei := EU + EL + ED;
        tem_pe := Rainfall[i] - tem_ei;

        //开始计算三水源情况下的产流量、划分水源
        temd1 := (1 - w_w/wm);
        if temd1 < 0 then temd1 := 0;
        A := wmm*(1 - power(temd1,1/(1 + B)));
        if tem_pe > 0 then begin
            if (tem_pe + A)>=wmm then R := tem_pe - (wm - w_w)
            else R := tem_pe - ((wm - w_w) - wm*power((1-(tem_pe + A)/wmm),(1 + B)));
        end
        else begin
            R := 0;
        end;
    end;
end;

```

```

end;

temd1 := (1 - s_s/SM);
if temd1 < 0 then temd1 := 0;

AU := SSM*(1-power(temd1,1/(1 + EX)));
//注: 以下计算认为 ss-fs/f 曲线是按全流域 (FR=1) 计算产流, 再缩至 FR
if tem_pe>0 then begin
    FR := R/tem_pe - IMP;
    if (AU + tem_pe)<SSM then begin
        RS := (1 - IMP)*FR*(tem_pe - SM + s_s + SM*power((1 - (tem_pe + AU)/SSM),(1 + EX)));
        RSS :=(SM - SM*power((1 - (tem_pe + AU)/SSM),(1 + EX)))*KSS*(1 - IMP)*FR;
        RG := (1 - IMP)*FR*KG*(SM - SM*power((1 - (tem_pe + AU)/SSM),(1 + EX)));
        s_s := (1 - KSS - KG)*(SM - SM*power((1 - (tem_pe + AU)/SSM),(1 + EX)));
    end
    else begin
        RS :=(1 - IMP)*FR*(tem_pe + s_s - SM);
        RSS :=(1 - IMP)*FR*SM*KSS;
        RG :=(1 - IMP)*FR*SM*KG;
        s_s := SM*(1 - KSS - KG);
    end;
end
else begin
    temd1 := (1 - w_w/wm);
    if temd1 < 0 then temd1 := 0;
    FR := 1 - power(temd1,B/(1 + B));
    RS := 0;
    RSS := s_s*KSS*(1 - IMP)*FR;
    RG := s_s*KG*(1 - IMP)*FR;
    s_s := (1 - KSS - KG)*s_s;
end;

//计算土壤含水量
if ((wu_u + Rainfall[i] - R - EU))<=wum then begin
    wu_u := wu_u + Rainfall[i] - R - EU;
    wl_l := wl_l - EL;
    wd_d := wd_d - ED;
end
else begin
    wu_u := wum;
    if (wl_l - EL + (wu_u + Rainfall[i] - EU - R - wum))<=wlm then
        wl_l := wl_l - EL + (wu_u + Rainfall[i] - EU - R - wum)
    else wl_l := wlm;

    if (wd_d - ED + (wl_l - EL + (wu_u+Rainfall[i] - EU - R - wum) - wlm)<=wdm) then
        wd_d := wd_d - ED + (wl_l - EL + (wu_u + Rainfall[i] - EU - R - wum) - wlm)
    else wd_d := wdm;
end;
if wu_u > wum then wu_u := wum;
if wl_l > wlm then wl_l := wlm;
if wd_d > wdm then wd_d := wdm;
w_w := wu_u+wl_l+wd_d;

//计算地表径流
if i=0 then QRS := 0
else if i=1 then begin
    QRS := (RS + Rainfall[i]*IMP)*U*UH[0];
    RS_1 := RS;

```

Fortran 模式 Tank 模型求解代码

```

Title "Tank Model";
Variable Rainfall; //unit: mm
Variable Runoff[OutPut]; //unit: m^3/s
Constant DT = 1; //time interval, unit: hr
Constant Area=700; //catchment area, unit: km^2
Parameter K(1:8)=[0,1];
Parameter S(1:4)=[0,300];
VarParameter L(1:4)=[0,300];
StartProgram [Fortran];
Subroutine MainModel
    integer i
    real*8 Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8
    real*8 SS1, SS2, SS3, SS4

    SS1 = L1
    SS2 = L2
    SS3 = L3
    SS4 = L4
    do i = 0, DataLength - 1

```

Pascal 模式 Tank 模型求解代码

Variable Rainfall;	//unit: mm
Variable Runoff[OutPut];	//unit: m^3/s
Constant DT = 1;	//time interval, unit: hr
Constant Area=700;	//catchment area, unit: km^2
Parameter K(1:8)=[0,1];	
Parameter S(1:4)=[0.300];	

新安江模型计算结果

Sum Squared Error (SSE): 169619.465093027
 Root of Mean Square Error (RMSE): 38.7434796219006
 Correlation Coef. (R): 0.984176967899181
 R-Square: 0.968604304143226
 Adjusted R-Square: 0.966774281612611
 Determination Coef. (DC): 0.957735632230448
 F-Statistic: -0.909831490795849

Parameter	Best Estimate
k1	0.855426775391485
c	0.808851164524568
b	0.184920770515955
imp	0.00107674998674387
sm	68.1988588979506
ex	1.98514378764974
kg	0.0100003486384829
kss	0.0778087351474036
kkg	0.702865349201855
kkss	0.548362093750518
wu(Data File-1)	38.5012544538966
wl(Data File-1)	87.1469022219206
wd(Data File-1)	74.4895199908127
s(Data File-1)	0.0265345482743812
qrss(Data File-1)	0.0115462615838461
qrg(Data File-1)	5.6576197186981
pu1(Data File-1)	0.664398895219692
pu2(Data File-1)	0.185206720907544
wu(Data File-2)	34.6754317495437
wl(Data File-2)	81.6282361868589
wd(Data File-2)	67.5078674841578
s(Data File-2)	46.9520142027493
qrss(Data File-2)	65.9925646690238
qrg(Data File-2)	59.9489420648713
pu1(Data File-2)	3.16383434163206E-8
pu2(Data File-2)	0.509745053253273
wu(Data File-3)	38.1459887423093
wl(Data File-3)	88.3122760222705
wd(Data File-3)	78.327679664996
s(Data File-3)	14.5505612638131
qrss(Data File-3)	1.93827413780542
qrg(Data File-3)	0.000206467283518477
pu1(Data File-3)	0.157773244578319
pu2(Data File-3)	0.360559778042823

Tank 模型计算结果

Sum Squared Error (SSE): 193831.204981359
 Root of Mean Square Error (RMSE): 41.4164266694403
 Correlation Coef. (R): 0.969943989149011
 R-Square: 0.940791342086297
 Adjusted R-Square: 0.937684678696941
 Determination Coef. (DC): 0.930638034337847
 F-Statistic: 4.17440658148727

Parameter	Best Estimate
k1	6.19569903435736E-5

k2	3.69176604795171E-5
k3	0.150597470577823
k4	1.72750489950023E-21
k5	0.00317266287965916
k6	2.3814675752721E-5
k7	0.107010527619448
k8	4.28378943315246E-6
s1	19.3499224830735
s2	2.37172015093521
s3	236.264755024378
s4	38.1017191785378
I1(Data File-1)	4.92750939685252E-20
I2(Data File-1)	299.999999999974
I3(Data File-1)	3.50674561103486E-27
I4(Data File-1)	3.84436837686498E-15
I1(Data File-2)	2.37172017435349
I2(Data File-2)	1.73707550211224E-23
I3(Data File-2)	7.23738472356803
I4(Data File-2)	49.4430047511876
I1(Data File-3)	1.09556074584763E-20
I2(Data File-3)	9.15067658416832E-23
I3(Data File-3)	40.9737695109564
I4(Data File-3)	7.29566530092775E-15

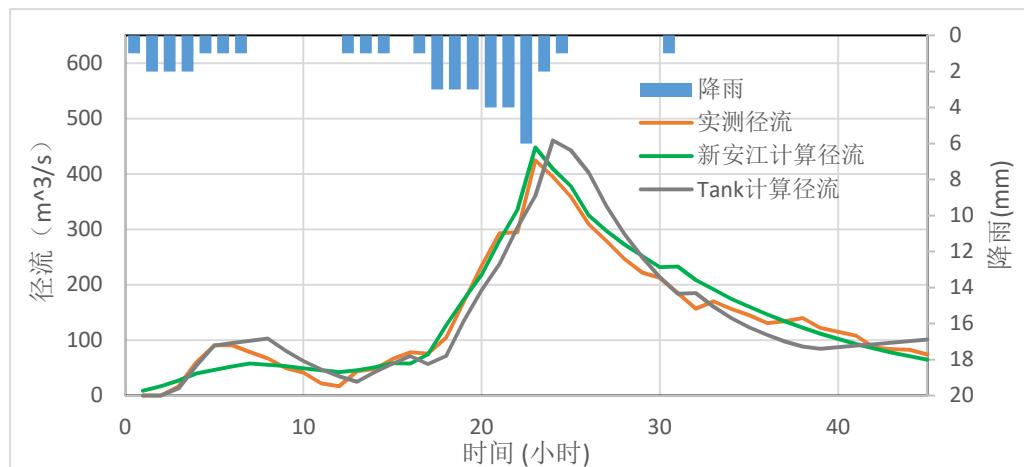


图 24-7 洪水过程 1 模拟计算

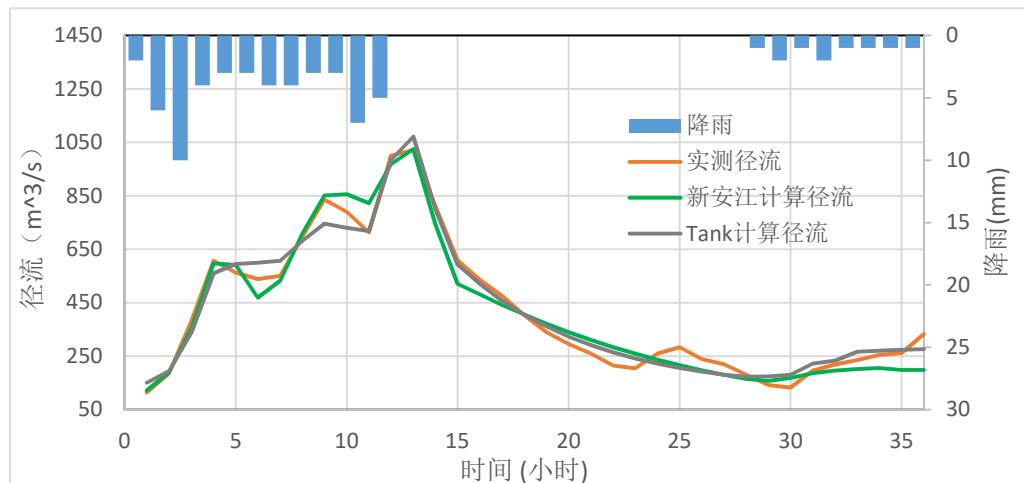


图 24-8 洪水过程 2 模拟计算

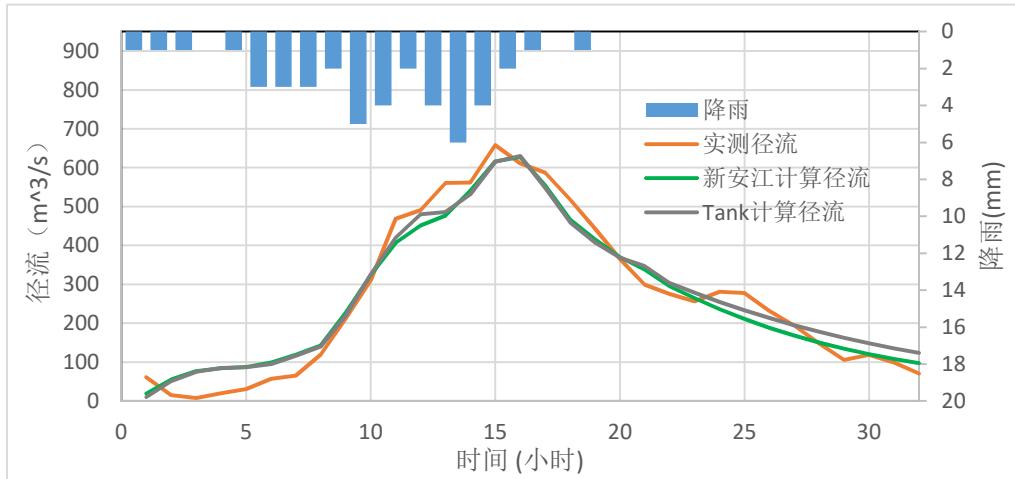


图 24-9 洪水过程 3 模拟计算

从计算结果看，两种模型的模拟计算结果整体上还是相当令人满意的，新安江模型略好于 Tank 模型。

24.5 小结

结合 1stOpt 的编程模式，可以快速高效地处理复杂的工程模拟仿真问题，用户只需将主要精力投注在自己的专业模型问题上即可，不用过多涉及优化算法原理及相关编程知识，真正做到事半功倍。

最后需要说明一点的是，本案例提供的代码及数据仅供学习 1stOpt 使用之参考。