**落差指数法单值化处理若干问题探讨**

 **葛维亚**

在天然河流确立水位流量关系，从而根据一定要求（例如典型年、整编年、设计标准等），以水位推求流量或以流量推求水位是大坝、围堰、提防、船闸、渠首、节制闸等水利工程规划、设计、施工、管理应用以及水文资料整编、洪水预报、防洪会商的重要内容和依据。

河流某一断面受流域气象条件和汇流因素以及下游水力学因素（如回水顶托）影响，在时空分布上，表示出不同的流态。依据水力学角度观察，可分为稳定流（恒定流）和不稳定流（非恒定流）。

从数学上能够高度准确，高度概括，表达河流流态的，非圣维南微分方程组莫属。它由连续方程（1式）和动力（运动）方程（2式）组成，即：

$\frac{δA}{δt}$ + $\frac{δQ}{δL}$ = 0 （1）

 **i -** $\frac{δh}{δL}$ **-** $\frac{ Q^{2}}{ k^{2}}$ **-** $\frac{1}{g}$$\frac{δv}{δt}$ **-** $\frac{v}{g}$$\frac{δv}{δL}$ **= 0** （2）

通过研究，本人早在上世纪70年代就发现，把动力（运动）方程（2式）加以变形，即为水位流量关系严谨的数学表达式：

 **Q =** k $ (i - \frac{δh}{δL} - \frac{1}{g} \frac{δv}{δt} - \frac{v}{g} \frac{δv}{δL} ) ^{0.5}$ = f(Z) （3）

 以上各式中：

 Q—流量；

 L—流程：

 A —过水断面米啊面积；

 **i** —河道比降；

 h—水深；

 K—流量模数，k = $\frac{A}{n}$ $ R^{2/3}$

其中：R— 水力半径；

 n—天然河道糙率 ;

 V—流速；

 t—时间；

 g—重力加速度：

 Z—水位；

 f(Z) —水位函数。

(1) 式反应了水量平衡的质量守恒法则，即蓄量的变化率（第一项）应等于沿程流量的变化率（第二项）。 (2) 式反应了能量守恒法则，主要特征为重力项、摩阻项、和惯性项均起着不同的作用。

圣维南方程组在数学上属于非线性双曲型偏微分方程，通常无法获得精确的解析解，而要用数值方法近似求解，这类方法很多，水文上常用的有隶属于数学范畴近似求解的瞬态法、特征线法、有限差分法和水文学近似求解的马斯京根法、抵偿河长法、水量平衡法、槽蓄曲线法、校正因素法、落差指数法、长办汇流模型、华水汇流模型等。以前水力学总把薛齐-曼宁公式认作经验公式，通过以上演绎，这个从实验得出的公式，居然可以从圣维南微分方程组中的动力方程经简化后得出，意味着经验的背后依然有“数学理论”依据。下面着重探讨落差指数法把水位流量关系从不定解解转换为特定解的关键技术要点。

水文站如果设置在河床稳定的棱柱型河道，水流流态为稳定流，水位—流量关系曲线呈单一线（即单值关系），根据实测的水位与相应流量即可绘制水位—流量关系曲线，其定线精度要求和定线检验应满足水《文资料整编规范SL247-2012》的要求（详见16-22页）。

水文站如果设置在具有变动回水、洪水涨落、测流断面冲淤等单一因素或多因素混合影响时，水位—流量关系曲线呈单一或复式连环绳套（即非单值关系），用水位推流为不定解，根据不同流态特征，可以采用《文资料整编规范SL247-2012》中建议的有关方法。在《水文资料整编规范SL247-2012》中，对于受河道变动回水影响的测站，建议采用“等落差法”（28页）或“落差指数法”（29页），对于受洪水涨落的测站，建议采用“校正因素法”（30页）或“抵偿河长法”（31页）；受单一因素或多种因素混合影响的测站，建议采用“连时序法”（31页）。为了便于标准化、规范化、通用化和自动化，使其定线方法能满足水文资料整编、水文测验（精简测次、改变测流方式等）水情预报、水文计算诸多部门的要求，经笔者多年研究，也经全国有关单位的实践，对于受变动回水单一因素影响以及受变动回水和洪水涨落混合影响的测站，甚至只受洪水涨落等单一影响的测站，采用落差指数法多数可以取得满意的结果，可以达到整编规范求得精度。如此也可以节省从事此项工作的人力、物力和时间。具有明显的技术效应和经济效益。

三十多年来，水文单值化技术已经在长江、黄河、珠江、海河、淮河、松花江、辽河等流域和全国各省区遍地开花，其中广西、湖南、湖北、山东河南、江西、浙江、广东、安徽、吉林、江苏、河北、甘肃、陕西、等省区水文部门推广应用成绩斐然，取得显著技术进步和经济效益。在单值化处理处于领头羊地位的长江水利委员会内，单值化技术不断创新，不仅用于水文测验和资料整编，也用于水文计算（参阅蒋学东在1992年05期《人民长江》刊布的论文“单值化技术在水文计算中的应用”）和水文预报（参阅葛守西在2003年 第7期《人民长江》刊布的论文“用落差指数法将受顶托测站水位转换为流量”）。何超典在1995年4期《广西水利水电》载文表示: “着重探讨落差指数法的基本原理及其在水文测验、整编改革中的应用问题，落差指数法具有较好的概括性与适应性，论据充分、方法简捷、便于应用、精度较高是其独具优点，适合大中河流水文测站应用, 成果为推广这一方法和改革水文测验整编在判断上提供了依据和可能，也为应用电算技术实现水文整编程序的自动化、通用化和标准化创造条件”。邓柳言在《广西水利水电》2013年第04期发表的“广西水文单值化工作现状与对策探讨”一文中说，水文站实现水位流量关系单值化后，每年流量测验次数可从单站几十次或百次以上减少到15次左右，可以将大量的人力资源从传统的测验方式中解放出来，将有限的技术资源集中起来开展巡测，拓展水文服务领域，为经济社会可持续发展提供更加优质的水文服务。工程院院士韩其为会同毛继新1998年所写的《长江中游散乱水位流量关系单值化处理方法研究》一文。采用了综合落差指数法和幂函数拟合法的概念和思路，利用了较远距离参证水尺的水位资料， 以落差或比降作为校正要素，均把落差系数和落差指数作为重要参数并进行优选，所取得的结果，均和当年单值化处理的落差指数法原理基本一致。几十年的实践表明，落差指数法在水位流量关系单值化处理方面，具有相当广泛的适用性，并且产生巨大的社会和经济效益。

对水文站而言，枯水或低水期一般近似为稳定流，中高水期，尤其是洪水期，多受洪水涨落、变动回水等因素影响，为不稳定流。从测站的水位Z与测流断面平均流速v的关系曲线上观察，水位越高，v的变化越小，即$\frac{δv}{δt}$ **≈0；在测站选址中，又把“河段顺直”、“底坡一致”、“测流河段内横断面变化不大”作为基本条件，此时可以认为**$\frac{δv}{δL}≈0$**。基于上述处理，（3）式变为：**

 **Q =** k $ i ^{1/2}$ （4）

很明显，忽略了（3）式里面的重力项、摩阻项和惯性项后，就变成（4）式，此式就是水力学著名的薛齐（谢才）-曼宁公式。它仅仅适用于稳定流，如果把它也用于非稳定流情况，毕竟产生很大误差，甚至谬误。

同理，也可以从（3）式，通过一定的初始条件和边界条件，可以得出落差指数法单值化基本公式：

 **q = Q /** $F^{β}$（5）

**上式中：q —** 单值化“流量”（实质为落差指数法校正因素）；

 **Q —** 实测流量（秒立米）；

 **β—** 落差指数，一般为0.2—0.8；

 **F—**单值化落差（米），计算公式如下：

 **F=** a1F1+ a2 F2+ a3F3+…+ an Fn**=** $\sum\_{i=0}^{n}ai Fi $ （6）

 **其中的**$ai$ **（**$i=1，2，3…..n$**）** 为落差系数，并且。

a1+ a2 + a3 +…+ an **= 1** （7）

当a1 = 1，a2 = a3 =…+= an = 0 时，水文站处于只受变动回水单一因素影响的状态，采用一组具有代表性的水尺，计算单一落差，即就可进行单值化处理计算。否则，要采用多组水尺，按（6）式计算综合落差，用于受多种因素影响的单值化处理计算。由此可见落差指数法（5）式中的单值化落差包括单一落差和综合落差两种。根据实践经验，一般采用2至3组水尺，可以达到精度的要求。

**（**5）式中的F**i** 为测站选定的第i组落差水尺的落差，基于代表性和最优化考虑来加以优选。落差系数$ai$ 值为落差水尺权重，它反映了每组落差水尺对单值化处理影响的大小。

由此可见，（5）式已经不是严格意义上的数学解析式，而是参数F、**β** 需要由水文资料率定的水文模型。这一模型的参数各种率定方法 以及它在水文水资源计算、水文预报等领域的应用，构成了科学合理，内容丰富，实效显著的水文单值化技术。

将（5）式改写为：

 **Q** **= q** $F^{β}$（8）

（8）式即为单值化方法推求水文站流量的计算公式。此时得出的Q值为特定唯一解，避免了Z—Q 关系曲线所得的不定解。

（5）式中的落差指数**β，**系通过实测资料率定和优选得出，因而**β**就变成误差“校正器”了，所以落差指数法的基本公式具有广泛的适用性。

通过实测水位Z与（5）式计算得出的单值化流量q值绘制出的Z—q关系曲线，从统计学角度观察，实质上为两变量相关曲线，三十多年来，全国大量计算表明，其相关系数多在0.8以上，回归线随机误差，在±标准差**σ**内的机率大于68%，在±2**σ**内的机率大于95%，在±3**σ**内的机率大于99%，表明这种单值化计算方法的精度是很高的。利用（8）**式**推求的流量，与实测流量比较，也十分接近，精度也很高。

落差指数法的计算分为手算和电脑程序计算两种。有条件应优先考虑电算。在全国这方面的计算软件和程序很多，可以通过网上巡查，实地调研和本人试用加以选择。笔者会同有关人员在上世纪70年代就使用DJS-6国产第一代电脑进行单值化计算，后来在80年代，在美国一些个人计算机和微机上计算，深切体会到电算的准确、快捷和无以伦比的优越性。但是如果没有条件，也可以手算。这里，简要介绍笔者对于若干单值化技术的处理经验。

 **1水文站单值化落差水尺的选择**

首先，从流态特性考虑，只受变动回水影响的水文站，要在变动回水影响范围内选择落差水尺，一般不宜太近，也不能过远。 可以根据历年资料分析，选取变动回水区重复率在95%以上，而又距离水文站最近的水尺作为单值化落差水尺，这种水尺距离水文站多在3公里至180公里之间，流域面积越大，地势越平坦，距离越大。对于受洪水涨落影响的水文站，根据历年资料分析，选取特征河长或抵偿河长最小范围内的水尺作为单值化落差水尺，这种水尺距离水文站测流断面距离，与流域大小、洪水特性，河道坡度、河床糙率、横断面几何形状等众多因素有关，例如河流量在200-600秒立米时，与测流测流断面距离为0.02-0.2公里，流量在2000-11000秒立米时，与测流测流断面距离为3-20公里，因这种距离不具备分区特性，无时空分布规律可循，只能作为参考，看看而已，还是要依据自己计算的特征河长或抵偿河长加以考虑。

其次，从误差控制角度考虑，基于水尺观测误差而引起落差与流量的误差，经演绎得出的落差水尺最小距离 **Lmin**和最大距离**Lmax**如下：

 **Lmin =** $\frac{｜ΔF\_{min }｜}{ i\_{1} [ (1+δQ\_{max} )^{1/}β-1] }$（9）

 **Lmax =** $\frac{-｜ΔF\_{max }｜}{ i\_{2} [ (1-δQ\_{min} )^{1/}β-1] }$ （10）

 **以上二式中：**

$ΔF\_{min }$ **、**$ΔF\_{max }$ **—**落差允许的的最小min与最大max绝对误差；

$i\_{1}$—**与**$ΔF\_{min }$、$δQ\_{max}$相应的水面平均比降；

$i\_{2}$ **—与**$ΔF\_{max }$、$δQ\_{min}$相应的水面平均比降；

$δQ\_{max} $ **、**$δQ\_{min} $ **—**流量的允许的最大max与最小min相对对误差；

 **β**—落差指数。

综合以上两方面的分析，对于多组待选的落差水尺，手算方法是，依据（6）式，把落差系数划分成若干组合，根据已经优选出的落差指数**β**，对每一个组合进行单值化计算，得出每一个组合的水位Z与单值化“流量” q（即落差指数法校正因素）关系曲线。再利用每一测次水位查出的曲线上的单值化“流量” q c与测流的实测资料计算出的q m，按照《文资料整编规范SL247-2012》要求，计算反映定线精度的随机不确定度和系统误差，以及进行符号检验、适线检验、偏离检验等三种检验（详见16-22页）。在全部达标的各个方案中，选出其中综合精度最高的待选落差水尺即为最优水尺。在这方面，过去我们在电算方面，曾经采用“线性逐步回归”的算法，与手算一样，取得了成功。

**2落差指数β的优选**

优选落差指数**β**之前，必须考虑三个问题，即确定优选范围；确立优选的目标函数以及给出结束优选的精度要求，以便手算优选既快又好，电算优选得以结束。

 **（1）确定优选区间**

根据经验和数学“大包围”的概念，落差指数 $α$的优选区间为**〔0,1〕,** 优选步长为0.01—0.03。

 **（2）确立优选的目标函数**

目标函数作为优选的依据，因而非常重要。，我们确定的目标函数为：

 S = $\frac{1}{ \frac{n\_{1}}{n} p\left(δ\_{1} \leq A \% \right)+ \frac{n\_{2}}{n}p\left(δ\_{2} \leq B \%\right)+ \frac{n\_{3}}{n} p\left(δ\_{2} \leq C \%\right) }$ ×

$ \sum\_{i=0}^{n} $$〔 \frac{1}{n-2}（\frac{ Q\_{1i }- Q\_{2I}}{ Q\_{2I}}）^{2}〕^{1/2}$（11）

上式中：

 S—目标函数；$ $

 $p\left(δ\_{1} \leq A \% \right)$ — 在z—q 关系曲线上，高水部分误差在±A %以内的点据占中高水全部点据的百分数，它与水文站等级有关，等级越高，精度要求越高；

 $p\left(δ\_{2} \leq B \%\right)$ — 在z—q 关系曲线上，中水部分误差在±B %以内的点据占中水全部点据的百分数，它与水文站等级有关，等级越高，精度要求越高；

 $p\left(δ\_{2} \leq C \%\right)$ —在z—q 关系曲线上，低水部分误差在±C %以内的点据占低水全部点据的百分数，它与水文站等级有关，等级越高，精度要求越高；

$ Q\_{1i } $ —根据（8）式计算得出的第i测次的流量；

 $Q\_{2I}$—第i测次的实测流量；

$ n\_{1}—全年高水$水测次；

$ n\_{2}—全年中水水测次； $ $ $

$ n\_{3} 全年低水水测次； $ $ $ $ $

 n— 水文站全年总测次，n = $n\_{1}+n\_{2 }+ n\_{3 。} $ $ $

（11）式中A %、B %、C % 可参照《SL 247-2012水文资料整编规范》17页里表2.3.2.2 水位流量关系合并定线精度指标表的规定执行。

计算反映定线精度的随机不确定度和系统误差，以及进行符号检验、适线检验、偏离检验等三种检验（详见16-22页）。从定线精度，各种检验合格的待定方案中，选择各项指标综合最优的落差指数作为选定的最优落差指数。

 **（3）给出结束优选的精度要求**

根据多年许多水文站大量资料单值化计算的经验，相邻的待选的最优化落差指数值，相对误差**≤** 5%，即可完成优选。

过去有些人认为优选落差指数手算方法非常繁复，实际不完全如此。笔者对黄金分割法（即0.618法）的多年探索，，从该法的公式中导出精度和试算次数的关系式，依照此式计算得出“优选次数与相对误差关系表” 。

 **优选次数与相对误差关系表**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  优选次数 |  3 |  4 |  5 |  6 |  7 |  8 |  10 |
| 相对误差 % |  10 |  7 |  5 |  3 |  2 |  1 |  0.3 |

从上表看出，只要6、7次手工优选计算，相对误差只有3% -1 % ，一般只需五六个小时的时间即可完成。当然，有条件利用有关应用软件完成速度更快。我们通过使用单纯形调优法、爬山法，黄金分割法软件等。对于像落差指数、单一水尺落差系数属于单因素优选，使用黄金分割法即可，对于多水尺落差系数属于多因素优选，笔者认为使用爬山法即可，使用线性逐步回归更好。

目前有的部门利用最小二乘法、渐消记忆最小二乘法、优选法、线性逐步回归等算法，研制了计算落差指数的应用软件、以及计算落差系数的应用软件，获得成功，但在网上很少刊布交流。 笔者建议不妨走访我国水文单值化有实力，有经验的单位 ，例如长江委水文局水文监测管理处、长江中游水文水资源勘测局、荆江水文水资源勘测局、广西水文水资源局、湖南文水资源局、山东文水资源局、湖北水文水资源局、山东水文水资源局、河南水文水资源局等，彼此在理论、方法、软件、经验等方面广泛交流，把水文单值化技术不断向前推进。 重点在于突破河道或断面冲淤以及受变动回水、洪水涨落、河道冲淤等混合影响的单值化处理，使其达到规范的进度要求。

大量计算表明，全国范围的落差指数一般在0.2—0.8，就其面概率分布密度而言，0.4—0.7 面概率分布密度最大，出现机会最多。

**3 落差指数法参数的终定、验算与典型年的选择**

在水文资料整编复审阶段，规定要抽取10%作用的站对考证、定线、数据整理表，数据文件、及成果表进行全面检查。但尚未细化到对于单值化定线的验算和应用问题，这是可以理解的，这也正是规范的精炼之处。

**（1）落差指数法参数的终定**

前面谈到落差指数**β**和落差系数$ai$ 两个参数的具体确定方法有关问题。但是对于一个水文站而言，单值化参数的确定，涉及是历年固定，还是逐年不同（即历年变动）的问题。就测站任务而言，这两种选择，都可以满足水文资料整编的要求，然而，对于水文测验，尤其对于精简测流次数以及巡测而言，历年固定，容易实施，历年变动实施起来困难就很大。就单值化定线精度而言，也存在各年经单值化处理，可以定出每一年各自的一条Z—q曲线，但历年定出一条Z—q曲线，达不到规范要求。这是一个值得研究的大问题。笔者认为，探讨水文典型年分类的思路不妨可以试一试。

**（2）落差指数法参数的验算**

优选落差指数和落差系数过程，也是验算过程。一般都是选择几个代表年份进行。由这些年份优选参数，又利用优选出来的参数对这些年份资料进行验算对比，这很必要，但也还不够。还应该利用未率定的年份资料进行验算对比。这里又涉及是采用未参加率定的历年资料，是全部还是一部分年份资料问题。当然，利用以往未参加率定的历年水文资料验算落差指数和落差系数，最为理想，可是工作量巨大，使用电脑应用软件完成，它需要的资料整理和数据输入也要耗费大量人力和时间。问题还在于有没有必要这样做。多年实践表明，选择适当的典型年的方法是可取的。

**（4）典型年的选择**

在水文水资源诸多业务领域中，常常要面对典型年如何选择的问题。任务不同，典型年选择的原则和方法也不完全相同，典型年起止时间也不尽相同，网上探讨这方面的文章很多，但极少涉及水文测验和整编领域。

对于围绕与水文测验和整编有关的单值化课题所要选择的典型年，是否必要，和水文站的“年龄”有关，对于最长设立10年左右（这个年数可根据实际情况确定）的水文站，因观测年份短，无需再选择什么典型年，可以利用全部年份的资料进行单值化参数率定和验算。设立时间大于10年左右的水文站，可以考虑选择典型年。

选择典型年的目的，在于减少全系列操作带来的大量工作量，减少大量的人力、物力和财力。实践证明，典型年操作一样会得到与长系列操作相近的结果。单值化参数的优选、验证与水文测验和水文资料整编密切相关，因而典型年的年度为日历年度，而非水文年度。

单值化典型年的选择，要分为参数优选典型年和验证典型年两种，前者为参数率定，后者为参数充份性检验（因率定时已经做了必要性检验），它们的选择的方法有些差别。仅就时序而言，参数优选典型的确定在先，验证典型年的确定在后。

参数优选典型年的确定，可以参照现行做法，选择年径流设计频率P=25%的丰水典型年，选择年径流设计频率P=50%的中水典型年，选择年径流设计频率P=75%的中水典型年。但是，为了确保使用Z（水位）—q（单值化“流量”）关系曲线在水文资料整编时，避免出现曲线外延的情况，建议再选用一个P=5%或10%，且年内发生过历年最大或次大的一次洪水，作为特殊丰水典型年。每一设计频率在正负1%—3%的范围内，选出3—5个典型年，进行单值化参数的率定。这样，参数优选典型年的数目为9—15个。各地可根据本地区河流特性，参考以上思路灵活应用。

验证典型年的确定，在设计频率选用上，应与参数优选典型年完全一致，但应在不同典型年内包含更多的特大洪水和极小枯水的测次资料。验证典型年的数目要比参数优选（即率定）典型年的数目多1—2倍。但具体选择上，对历年资料要有代表性。考虑到单值化参数与河流水文情势有关，其中高水、中水、低水，反应了不同的成因，形成不同的流态特性，基于此，验证典型年中，要特别注意丰水年、中水年、枯水年选择中，考虑高、中、低水流量测次所占的比重的极大和极小两种特殊情况，使检验更加严格。

除了上述以设计频率作为指标确定典型年的思路外，也有一些其他方法，例如最小平方逼近法、最优模糊划分理论模型等，作为另一种思路，在未来可以探索，以便推陈出新。