

数据处理不能取代仪器的标定^{* 1}

刘序俨

(福建省地震局,福州 350003)

摘要 对四分量钻孔应变观测的实地相对标定、绝对标定问题的分析得出:通过“四分量自检”的数据处理,仅能得到3条测线元件的实地格值分别与作为常数项的测线元件的实地格值的比值,不能得到实地标定格值,无法解决四分量应变观测的实地相对标定。“加衬模型”利用理论固体潮与分量应变观测值之间的关系可以计算得到耦合系数,但并不能对弹性参数进行标定,无法解决分量应变的绝对标定问题。

关键词 四分量钻孔应变观测;格值;相对标定;绝对标定;数据处理

中图分类号:TH76;P315.72⁺⁵

文献标识码:A

INSTRUMENT SITE CALIBRATION CAN NOT BE REPLACED BY DATA PROCESSING

Liu Xuyan

(*Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003*)

Abstract The paper analyzed the relative calibration and absolute calibration of four component borehole strain observation. By the theorem “sum of vertical components must be equal”, we can only obtain the ratio of site scale value of 3 sensors and the sensor which is as a constant element, but we cannot get site scale value, so it cannot solve relative calibration. By the relationship between tides and component strain observation value, the coupling coefficient can be calculated, but calibration of the elastic parameters cannot solve the problem of the absolute calibration of strain.

Key words: four-component borehole strainmeter; scale value; relative calibration; absolute calibration; data processing

1 引言

数据处理可以解决钻孔应变观测的实地标定的论点,先后出现在文献[1-3]中,笔者反复阅读了这三篇论文,发现文中提出的方法解决不了仪器的实地标定问题,为说明这一问题,笔者特写此文与作者商榷。

文献[1,3]所讨论的问题,实际上是一种数据拟合方法,以达到两组相互正交的两条测线的应变观测值之和的残差的平方和为最小。根据弹性力学

理论,平面上某一质点处的面应变等于任意两条通过该质点的相互正交的两个方向上的线应变之和,而面应变是一个与坐标系选择无关的不变量,因此,可以作为4分量应变观测值的自检条件。在此基础上,该文就4分量传感器读数的所谓“相对标定的归一化新方法”展开了讨论。

笔者认为文献[1,3]有如下几点值得商榷:一是文中的 k_i 既不是文献[1]中所说的灵敏度,也不是文献[3]中所称的观测权(gauge weight),而应定义为钻孔应变仪下井后的测线元件的传感器的实地

* 收稿日期:2012-10-23

基金项目:中国地震局老专家科研基金(201313)

作者简介:刘序俨,男,1939年生,研究员,长期从事固体潮与地形变观测研究. E-mail: xuyanliu@126.com

格值,格值与灵敏度两者互为倒数,皆为一个有量纲的数;观测权是一种表征观测精度的相对指标,其定义是 $k_i = \sigma_0^2 / \sigma_i^2$,式中 σ_0^2 为任一选取的常数, σ_i^2 为第 i 条测线传感器观测的方差。钻孔应变观测是在相同观测条件下进行的 4 组观测,其观测精度是相同或者相当的,可以说是等权观测。在此条件下,无需引进观测权。对于不等权观测,则要考虑观测权,以权衡并确定各个观测值在平差结果中所占的比重。如果把 k_i 定义为灵敏度抑或定义为观测权,则不能把传感器的读数转换成应变,那么文中以面应变作为自检的 $k_1 R_1 - k_2 R_2 + k_3 R_3 - k_4 R_4 = 0$ 不成立。在这两篇文章中,对于同一方程中的 k_i 做不同的定义也不妥当;为方便起见,在下文把灵敏度改为格值;二是钻孔应变仪的 4 条测线在探头端面的分布均为均匀分布,根据探头端面的面应变应为不变量的原理,文中 $k_1 R_1 - k_2 R_2 + k_3 R_3 - k_4 R_4 = 0$ (*) 才成立,但由于上式为一个常数项为 0 的一次线性方程,无非零解,因此 $k_i (i=1,2,3,4)$ 是无法求解的;三是文献[1]中把确定钻孔应变仪 4 条测线的传感器的实地格值之比定义为实地相对标定,在文献[3]中直接把式(7)中的 4 个方程先进行相加,然后两边除以 4,最后把经过如此数学运算所得到的 4 个系数 $\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij} (j=1,2,3,4)$ 定义为钻孔应变仪 4 个传感器的实地相对标定,都是不妥当的。标定(calibration)在英语中还有“校准、核定、测定、定标、调准”之意^[4],对传感器观测系统的标定实际上是一种操作过程,是指在规定条件下,通过一定的实验方法记录相应的输入-输出数据,以确定传感器或观测系统性能的过程^[5]。标定的最终目的是要给出观测系统的每一个输出单位到底代表了相应的被观测对象所输入的量的多少。两者之比称为灵敏度,其倒数则为格值。之所以能这样做,是因为在所规定的频率域中,输入的所有频率分量几乎有同一的放大倍数、其时延近似为 0 或某一常数。相对标定是以某已标定的传感器做参考,将传感器的输出与已校正的传感器输出相比较^[5]。定义和概念是全世界科学共同体的通用语言或范式,唯有如此,世界各国科技工作者才能相互沟通。在两篇论文中,对实地相对标定做不同的定义是不行的;四是文献[1,3]所给出的以相对标定值 $k_{ij} = k_i / k_j (i, j=1,2,3,4)$ 或 $k_{ij} = k_j / k_i (i, j=1,2,3,4)$ 作为待定常数的 4 个线性方程组,笔者认为应改写成 4 个观测误差方程式为妥。例如把文献[1]中的式(8)所示的 $k_{11} R_1 - k_{21} R_2 + k_{31} R_3 - k_{41} R_4 = 0$ 改写成 $k_{21} R_2 - k_{31} R_3 + k_{41} R_4 - R_1 = v_n$ 的误差方程,式中 v_n 为残差, n 为观测时序号,其余 3 个方程亦同。如果不改写成误差方程式,则

上述方程的 3 个待定常数可由 3 个不同时刻的传感器的读数 $R_i (i=1,2,3,4)$ 求出,但与根据另外 3 个不同时刻求出的值是不同的。这是由于观测误差、定向误差以及耦合的不完善性使待定常数围绕其期望值出现一种随机波动,因此需改写成误差方程式,然后对大量观测数据采用最小二乘原理进行求解,这样才能保证由大量观测数据所得到的待定常数 k_1, k_2, k_3, k_4 具有最大的或然率;五是文献[1]中式(8)~(11)分别是以 k_1, k_2, k_3, k_4 去除(*)式经移项整理后得到的。这 4 个方程式亦是与(*)式一样,是一种约束条件,后者是以面应变为常数的约束条件,前者则是从 4 个传感器读数中的 3 个分别按式(8)~(11)所示的那样得到 4 个组合值应该等于第 4 个传感器的读数,作为约束条件。这种组合共有 4 个,又因为这 4 个待定常数的系数是成比例的,因此,这四个方程只有一个是独立的,其他 3 个是相关的。依该文对 $k_{ij} = k_i / k_j (i, j=1,2,3,4)$ 的约定,则有 $k_{ij} = k_{iR} / k_{jR} (i, j, R=1,2,3,4)$,根据文献[3]对 $k_{ij} = k_j / k_i$ 的定义,则有 $k_{ij} = k_{jR} / k_{iR} (i, j, R=1,2,3,4)$,就可由一个方程转换得到另一个方程,亦无须像文献[1]中那样对 4 个误差方程式进行最小二乘求解,由最小二乘所求解得到的表达式亦证实了该点。因此说当被取为 1 的元件灵敏度出现问题时,就会导致结果不准确,所以要分别取所有 4 个元件的灵敏度(或观测权)为 1,依次对 k_i 或 k_j 进行求解^[1,3]是没有道理的。因为式(8)~(11)中的常数项 $k_{ii} R_i$ 是将式(*)中的 R_i 的系数 k_i 去除该式后的结果,此时 $k_{ii} = 1$,但不能认为此时第 i 个元件的灵敏度或观测权(实为格值)就等于 1。依据文中对 $k_{ij} = k_i / k_j (i, j=1,2,3,4)$ 的约定, k_{ij} 分明为一个无量纲的数。此外,式(8)~(11)求解结果的好坏,不但取决于作为常数项的那个元件传感器读数的好坏,而且与其他 3 个传感器读数的好坏有关,且 4 组求解结果彼此相关,只要对其中一个方程求解即可,根本用不着同时求解 4 个方程;六是在文献[1]中计算 k_i 的公式 $k_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij}$ 是不成立的, k_i 为实地格值,是一个有量纲的数,而 k_{ij} 则为无量纲的数,两者不相等。文献[3]中的式(8)有误,应把 $k_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij} (i=1,2,3,4)$ 改写成 $k_j = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (i=1,2,3,4)$ 。在这两篇文章中,没有做推导与证明,当然也是不能证明的,就直接把 $\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij}$ 定义为 k_i (或把 $\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij}$ 定义为 k_j),但此 k_i (或 k_j) 不再是彼 k_i (或 k_j)。在同一文中,对同一字母做不同的定义,会误导读者。且在文献[1]中 $\sum_{j=1}^4 k_{ij}$ 又可写为 $\sum_{j=1}^4 k_{ij} = \sum_{j=1}^4 1/k_{ji}$,可见 $\sum_{j=1}^4 k_{ij}$ 仅与

式(8)~(11)中的常数项为 R_i 的这个方程的4个系数有关,而与其他3个方程无关。在文献[3]中 $\sum_{i=1}^4 k_{ij} = \sum_{i=1}^4 1/k_{ji}$, 可见 $\sum_{j=1}^4 k_{ij}$ (或 $\sum_{j=1}^4 k_{ij}$) 仅与文中4个方程中的常数项为 R_i (或 R_j) 的这个方程的4个系数有关,而与其他3个方程无关。此外,文献[1]的表1中与该文的(8)~(11)式中相对应的 k_{ij} 值也不符合 $k_{ij} = k_{iR}/k_{jR}$ 关系式,差别太大,绝不是计算误差所能解释的,即使 $k_{ij} (i, j = 1, 2, 3, 4)$ 都等于1,也不能说明 k_i 等于1,因为 $k_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 取任意一个相同的数值, k_{ij} 都可以等于1,怎么能说 k_i 在1附近取值? 并且对 k_{ij} 取平均值也毫无任何物理意义。

笔者认为文献[3]之图3中, $k_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 实际为 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$, 而不是该文式(6)中的 $k_j (j = 1, 2, 3, 4)$, 该文直接把 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$ 当做 k_j 不但是错误的,并且会造成误导。由图4不能说明采用 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$ 作为实地标定格值计算所得到的面应变之差的可靠性指数 C_{95} 要比采用室内标定格值所得的面应变之差的可靠性指数 C_{95} 要高,这是预料中的。因为把式(7)4个方程相加后除以4所得到的方程 $\frac{1}{4} (\sum_{i=1}^4 k_{i1} R_1 + \sum_{i=1}^4 k_{i3} R_3) - \frac{1}{4} (\sum_{i=1}^4 k_{i2} R_2 + \sum_{i=1}^4 k_{i4} R_4) = 0$, 也是与式(7)4个方程式相关的,当然也是与文中式(6)等价的一个约束条件。 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$ 可由式(7)中任何一个方程的常数项为 $R_n (n = 1, 2, 3, 4)$ 误差方程式的最小二乘解 $k_{Rn} (R = 1, 2, 3, 4)$, 依 $k_{ij} = k_{in}/k_{jn} (i, j = 1, 2, 3, 4)$, 并分别设 j 等于1、2、3、4, 然后分别把 k_{ij} 对 i 求和、并除以4, 最后得到 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$, 根本用不着文献[3]那样对文中的4个方程分别作最小二乘解, 然后相加再除以4来得到这4个数值, 当然 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$ 也是新增加的上述方程的误差方程式的最小二乘解。当然由它计算所得到的 C_{95} 要比由室内格值计算要高, 钻孔应变仪下井后的格值已不再是原室内标定格值, 自然由原室内标定格值计算得到的 C_{95} 要小一些。关键问题是 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$ 不是4个传感器的实地标定格值 $k_j (j = 1, 2, 3, 4)$, 因此 $\frac{1}{4} (\sum_{i=1}^4 k_{i1} R_1 + \sum_{i=1}^4 k_{i3} R_3) - \frac{1}{4} (\sum_{i=1}^4 k_{i2} R_2 + \sum_{i=1}^4 k_{i4} R_4)$ 并不等于钻孔中的分别由2组相互正交的应变观测值所得到的钻孔面应变 $(S_1 +$

$S_3)$ 与 $(S_2 + S_4)$, 而仅是对式(7)4个方程式经过数学运算后所得到的一种以传感器读数为量纲的虚拟的钻孔面应变, 因此这种可靠性指数的比较就失去了实际意义, 也不能由此证明 $\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 k_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$ 就是实地标定格值 $k_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 。由图6也不能说明该文中相对标定改正后的效果, 理由有三: 一是 $(R_1 + R_3) - (R_2 + R_4)$ 的量纲为传感器的量纲, 并非应变; 二是即使上述 $R_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 的量纲为应变, 也没有任何理由认为标定前钻孔应变仪的4个传感器的格值都等于1, 由此出现的面应变之差有较大的振幅, 正是假定的传感器的格值等于1与实际格值情况不符的反映; 三是标定改正后所得的面应变之差的振幅非常大, 其原因已在上文中讨论了, 关键的问题是标定后计算所得的面应变之差已不再是钻孔本身的面应变, 而是一种虚拟面应变, 从而失去了比较的基础。

如果文献[1]要告诉人们“室内标定结果在钻孔中是否可用, 需要进行怎样的改正”的话, 笔者认为仅需要把文献[1, 3]中传感器输出 $R_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 换成4分量应变观测值 s_i, s_i 为测线 i 的传感器读数乘以相应室内标定格值后得到的。此时 k_i 则不再为传感器的实地标定格值, 而是对下井后对室内格值的一个校正系数, 由于实地标定格值除以相应的室内标定格值就等于校正系数, 同理该校正系数也是不能确定的, 否则, 是与前文实地标定格值不能确定相矛盾的。

在文献[2]中, 把利用理论固体潮等依据对与钻孔周围介质的弹性有关的参数进行标定, 称之为绝对标定。在文献[3]中, 却在把根据4分量应变观测值计算得到的面应变与最大剪应变以及由应变固体潮理论值所得到的相应的面应变与最大剪应变时间序列的基础上, 把分别对两者采用线性相关所得到的加衬模型中的两个待定常数 A 与 B 作为绝对标定。笔者认为这两种说法都不妥。一是绝对标定是以具体技术标准作为参考, 或者说是将传感器的输出与真实的固定输入值相比较^[5]; 二是由文献[2]式(1)所示的 $s = A(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + B(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2(\theta - \phi)$ 所计算得到的 A 与 B , 也没有给出如何由 A 与 B 来对钻孔周围介质的弹性有关的参数进行所谓的标定。该文通篇所讨论的, 是如何计算应变固体潮理论值, 如何根据应变固体潮理论值计算主应变 ε_1 与 ε_2 , 以及如何反演耦合系数 A, B 的方法。但如何利用 A 和 B 来对钻孔周围的弹性参数做标定却没有给出具体的操作方法, 容易造成概念的混淆。众所周知, 除有绝对重力测量外, 其他地形变测量, 例如地倾斜、体应变以及跨断层位移测量都是相对测量, 显然, 钻孔应变也不例外。如果钻孔应变有所谓的绝对标定, 就一定存在绝

对应变,也必然存在绝对应力。绝对应变是绝对应力为0时的长度与绝对应力不为零时刻测量的长度相减,其差值除以长度则为绝对应变。“绝对”一词具有不依赖或不相对于任何一种东西之意^[6],例如有绝对重力测量,绝对零度,绝对一词一般是不能随意使用的。如果要想取得绝对应变,势必要在钻孔周围进行应力解除,应力解除后,这口钻井就再不能进行应变观测了。

文献[1,2]是姐妹篇,文献[3]则是[1,2]的综合,这三篇论文都试图采用数据处理方法来解决标定问题,但前两篇还是有所差别的。文献[1,3]所讨论的是如何使4分量的面应变的闭合差为最小,其计算方法实际上就是测量平差所用到的相关间接平差,平差的实质在于对观测值做微调整,使之残差平方和最小。采用式(8)~(11)可以改善4分量传感器读数之间的拟合精度,却无法改善4分量应变观测值之间的拟合精度,其原因是我们无法获知4分量传感器的实地标定格值;文献[2,3]则是介绍如何进行应变固体潮理论值及其主应变计算以及如何对A、B进行反演问题,在文献[3]中却增加了由4分量应变观测值计算主应变和主方向的5组观测组合计算公式和一些计算结果的图件,没有涉及也不可能涉及如何对弹性参数进行标定的,在这里,如果把“标定”改为“测定”更贴切。

显然,实地标定格值或室内标定格值的校正系数客观上是存在的,但对于数据处理而言,是解决不了仪器实地标定问题。但这三篇文章都告诉人们,4分量应变观测蕴含了许多信息,如何进行数据挖掘,是值得大家重视的。

虽然这三篇文章所采用数据处理方法不能解决钻孔应变观测的实地标定难题,但这种尝试还是值得赞赏的。这种尝试揭示了采用数据处理方法是无法解决实地标定难题,就像数据处理方法既不能给观测数据带来额外的信息,也不能提高观测精度一样,因为反映仪器观测频域的传递函数、观测精度、格值及其标定等都是由仪器本身的性能与技术指标决定的。归根结底,仪器的标定问题最终只能由仪器研制者或厂家解决。由于该类型仪器研制者提供了一个冗余观测,这就给用户对应变观测的可靠性进行检核提供了可能性,不但可用面应变,而且可用上下端面由观

测组合公式计算得到的共10组主应变及主方向进行检核。对于钻孔而言,这些量是唯一的,彼此必须相等。不容置疑,这些检核是非常苛刻的,但说回来,既然研制出了4分量钻孔应变仪,就不得不攻关克难,在一定允许的误差范围内,尽量满足这些自检要求。如果说实地标定是该类地下仪器的内在缺陷的话,那么至少目前要在仪器与岩壁耦合、测线定向与仪器稳定性方面攻克难关,这也是仪器使用者所期待的。虽然,目前钻孔应变未能解决实地标定问题,但是只要仪器性能稳定,还是可以由应变的相对变化来研究震前、震时、震后应变演变图像。

最后,笔者认为,虽然这三篇论文在某些方面存在不足,但文中所传递的信息量是十分丰富的,给人许多有益的启示。笔者此文,既是出于商榷,又是出于期待,期待仪器研制者早日解决实地标定问题,并期待如何从4分量钻孔应变观测资料中挖掘更多的地应变信息等方面进行更深入的探索。

参 考 文 献

1 邱泽华,等. 四分量应变观测的实地相对标定[J]. 大地测量与地球动力学,2005,(1):118-122. (Qiu Zehua, et al. Relative in-situ calibration of 4-component borehole strain observation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2005,(1):118-122).

2 邱泽华,等. 四分量应变观测的实地绝对标定[J]. 地震, 2005, 25(3):27-34 (Qiu Zehua, et al. Absolute calibration of 4-component borehole strainmeters[J]. Earthquake, 2005, 25(3):27-34)

3 Qiu Zehu, et al. In situ calibration of and algorithm for strain monitoring using four-gauge borehole strainmeters (FGBS) [J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118: doi: 10.1002/jgrb.50112

4 熊其求. 英汉传动技术与机电一体化词典[M]. 北京:机械出版社,2007. (Xiong Qiqiu. English-Chinese dictionary of drives and Mechatronics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007)

5 段正澄. 光机电一体化技术手册(上册)[M]. 北京:机械工业出版社,2010. (Duan Zhengcheng. Photo-mechanic-electronic technical manuals (First volume) [M]. Beijing: China Machine Press, 2010)

6 Isaacs A. Oxford concise colour science dictionary [M]. Oxford University Press, 1997.