

文章编号:1009-3087(2013)04-0097-06

基于电位矩阵法的金属管道腐蚀剩余厚度监测研究

万正军,甘芳吉,罗航,宋康,廖俊必

(四川大学 制造科学与工程学院,四川 成都 610065)

摘要:针对目前电位矩阵法在坑蚀的情况下求解剩余厚度的精度仅为壁厚的 $\pm(10\% \sim 15\%)$,并且要用经验系数修正的问题,在分析了监测区域在腐蚀前后的电流场的改变是产生坑蚀精度误差的主要原因的基础之上,提出了一种利用电阻网络的数学模型来计算坑蚀剩余厚度的方法。管道腐蚀可以等效为探针之间电阻值的变化,因此根据监测的金属管道上所布置的探针间距和数量来确定1个单层电阻网络,然后利用基尔霍夫定律计算出各个电阻在腐蚀前后的电流值,最后建立腐蚀前后电阻函数关系,将坑蚀时电流变化的因素消除,得到精度较高的剩余厚度值计算公式。有限元分析软件仿真和实际实验结果表明,新的坑蚀剩余厚度算法的精度可以达到壁厚的3%,且不需要经验系数修正,验证了新算法的可行性。

关键词:无损检测;管道腐蚀;电位矩阵法;腐蚀监测;剩余厚度

中图分类号:TH89

文献标志码:A

Research on Monitoring the Remaining Thickness of the Corrosion of Metal Pipe Based on the Field Signature Method

WAN Zheng-jun, GAN Fang-ji, LUO Hang, SONG Kang, LIAO Jun-bi

(School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the problem that the accuracy of remaining thickness of the field signature method (FSM) is $\pm(10\% \sim 15\%)$ of the wall thickness in pit corrosion and should be modified by empirical coefficient, a new method was proposed to calculate the remaining thickness in FSM using the mathematical model of resistor network, which was based on the analysis of change of current field in monitoring area. The corrosion of pipe can be equivalent to the change of resistor between probes, and a single resistor network can be determined by the distance and amount of probes in monitoring area of pipe. The current of resistor can be calculated before and after corrosion with Kirchhoff's law. The function relation of resistor before and after corrosion is established, and the formula of remaining thickness in high accuracy is obtained after the factor of change of current field is eliminated. The simulation in finite element analysis software and experiment results showed that the new algorithm of remaining thickness of pit corrosion is much higher than the algorithm commonly used at present in accuracy, and don't need to modify by empirical coefficient, which showed that the efficiency calculation method is practical.

Key words: non-destructive testing; pipe corrosion; field signature method; corrosion monitoring; remaining thickness

资料表明,腐蚀因素是金属管道发生事故的主要原因,占事故总数的70%~90%^[1]。目前石化行业普遍采用电阻探针法和极化探针法在线监测管道的腐蚀状况,但这些方法只能进行间接均匀腐蚀检

测,对危害性极大的坑蚀无监测能力^[2-3]。高精度和高可靠性的坑蚀监测方法和技术是石油化工业安全运营迫切需要的技术之一。电位矩阵法(field signature method, FSM)具有直接检测局部典型范围内在役管道的均匀腐蚀、坑蚀、焊缝腐蚀、冲蚀的能力。与传统的腐蚀检测方法相比较,FSM属于直接测量,精度高,可靠性好,耐高低温,寿命长,目前已被广泛应用于国外石化行业中^[4-6]。

FSM其测量用的电极和所有配套设备都安装在被监测对象(如储罐、管道等)外部,与被检测区域内的流体无接触,在离测量区域一定距离的位置

收稿日期:2013-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271329);四川省科技支撑计划资助项目(2012GZ0094);四川大学青年基金资助项目(2011SCU11120)

作者简介:万正军(1987—),男,博士生。研究方向:精密测试技术及仪器。E-mail:wanzj1987@qq.com

注入直流电或者是频率非常低的交流电(几 Hz 左右),与此同时,为了消除温度和注入电流变化的影响,须增加一对参比电极,通常放置在一个紧贴管道外部且和管道绝缘的金属板上。任一对测量电极所代表的腐蚀程度由指纹系数(FC 值)判断,在通过精密电压采样模块获得电压之后,通过式(1)进行计算得到 FC 值^[4-7]。

$$FC_{i,j;i+1,j} = \left(\frac{\frac{V_{i,j;i+1,j}(t_x)}{V_{i,j;i+1,j}(t_0)}}{\frac{V_{ref}(t_x)}{V_{ref}(t_0)}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中, $V_{i,j;i+1,j}(t_0)$ 、 $V_{i,j;i+1,j}(t_x)$ 为探针 (i,j) 和 $(i+1,j)$ 在 t_0 和 t_x 时刻的电压, $V_{ref}(t_0)$ 、 $V_{ref}(t_x)$ 为标准电极对在 t_0 和 t_x 时刻的电压。

FC 值只是反映了管道监测区域电压变化量,若想得到具体的剩余厚度量,还需要对 FC 值进一步计算。国外文献资料表明^[4-8],对于均匀腐蚀,即所有探针下的测量区域,剩余厚度量精度为壁厚的 $\pm 0.5\%$,即管道壁厚 10 mm 时,误差 0.05 mm。但是在坑蚀的情况下,监测精度为 $\pm (10\% \sim 15\%)$ 壁厚,即壁厚 10 mm 时,误差 1 ~ 1.5 mm。可见原始厚度换算公式在计算坑蚀的时候会产生大量误差,且在计算坑蚀之后要用系数修正,例如在计算出剩余厚度的基础之上,在乘上一定的经验系数,例如 3 ~ 5 倍的修正系数,使坑蚀量没有普适性和精度确定性。为此作者分析 FSM 在计算坑蚀时误差所产生原因的基础上,提出一种新的具体计算坑蚀情况下剩余厚度的方法,该方法比目前常用的方法的精度更高,得到的结果更加可靠。

1 FSM 剩余厚度计算原理及精度分析

在电压探针所布局的范围之内被测件发生腐蚀时,将导致被测件的电阻值发生变化,通过这一变化即可计算被测件的腐蚀情况,得到被测件的剩余厚度及腐蚀速率。可以得到腐蚀后的剩余厚度和原始厚度之间的关系:

$$\frac{R_{i,j;i+1,j}(t_x)}{R_{i,j;i+1,j}(t_0)} = \frac{h_{i,j;i+1,j}'}{h_{i,j;i+1,j}} \quad (2)$$

式中, $R_{i,j;i+1,j}(t_0)$ 、 $R_{i,j;i+1,j}(t_x)$ 为探针 (i,j) 和 $(i+1,j)$ 之间在 t_0 和 t_x 时刻的电阻值, $h_{i,j;i+1,j}$ 为探针对 (i,j) 和 $(i+1,j)$ 之间的当前剩余厚度, $h_{i,j;i+1,j}'$ 为探针 (i,j) 和 $(i+1,j)$ 之间的原始厚度。

理想情况下不考虑温度和电流变化的影响,利用式(1)、(2)得到目前国外使用的基于电位矩阵法

的管道剩余厚度 $h_{i,j;i+1,j}$ 和腐蚀厚度 $\Delta h_{i,j;i+1,j}$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} h_{i,j;i+1,j} = \frac{1000 \cdot h_{i,j;i+1,j}'}{1000 + FC_{i,j;i+1,j}}, \\ \Delta h_{i,j;i+1,j} = \frac{FC_{i,j;i+1,j} \cdot h_{i,j;i+1,j}'}{1000 + FC_{i,j;i+1,j}} \end{cases} \quad (3)$$

值得注意的是,在计算管道剩余厚度时,是把每一探针对的 FC 值来分开计算,一一对应算出该探针对所覆盖面积的被测件的剩余厚度。坑蚀可以认为是一对探针下的均匀腐蚀。

对长度为 1 500 mm,内径为 304 mm,外径为 324 mm 的管道进行有限元分析。测量区域位于管道中间,且探针间距为 35 mm;注入电流为 40 A。在整个测量区域均匀腐蚀下,腐蚀厚度依次为 0.1、0.5、1、2、3、5 mm 的情况下,得到如图 1 所示的 FC 值。计算出 FC 值之后利用式(3)得到腐蚀的厚度值,如图 1 所示。

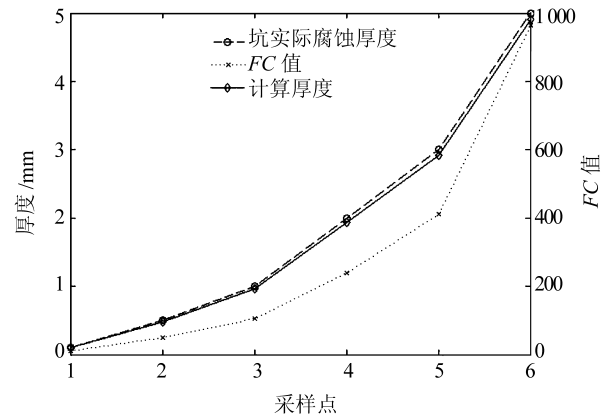


图 1 均匀腐蚀下实际剩余厚度和式(3)计算厚度与 FC 值的关系曲线

Fig. 1 Curves about the actual remaining thickness and calculated thickness with formula (3) and FC value in case of general corrosion

从图 1 可以看到,在整体均匀腐蚀下,计算的腐蚀厚度与实际腐蚀厚度之间的误差相当之小。可见当整个测量区域为均匀腐蚀时,利用上述公式计算可以基本得到在均匀腐蚀下正确的腐蚀深度及管道均匀腐蚀速率。

但是在管道测量区域未发生整体均匀腐蚀,仅仅只是坑蚀时,这时会发现上述公式会产生很大的误差。

在相同管道下,在 2 个探针之间(大小为 4 个探针的投影面积)腐蚀一个坑,在不同厚度下得到不同的 FC 值,再利用式(3)得到计算的厚度值,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看到,此时的计算腐蚀厚度与实际腐蚀掉的厚度值之间存在着很大的差异,误差在最大的地方达到了 1.96 mm(在腐蚀深度为

5 mm 的条件下,相对误差为 39.2%)。在这种情况下,对于判断坑的腐蚀情况产生很大的影响,甚至可能得出错误的结论。

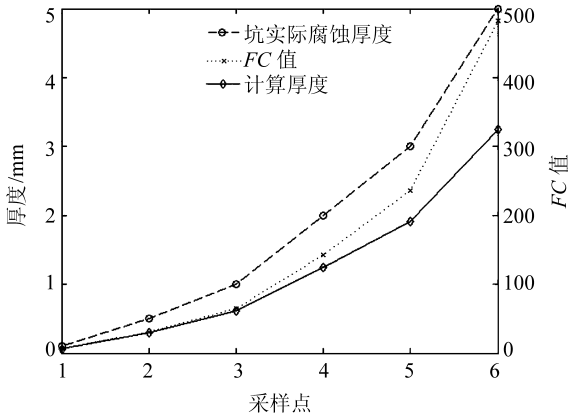


图2 坑蚀下实际剩余厚度和式(3)计算厚度与FC值的关系曲线

Fig. 2 Curves about the actual remaining thickness and calculated thickness with formula (3) and FC value in case of pit corrosion

目前国外对在坑蚀情况下求解剩余厚度的解决办法是在利用原始公式计算完剩余厚度之后,再来乘以一定的系数值来加以修正,这失去了对计算公式的普适性,而且针对不同的管道,修正系数均有所不同,这为求解坑蚀时的腐蚀厚度带来不便,而且会产生较大误差,对于判断实际腐蚀厚度造成很大的问题。通过对比均匀腐蚀和局部坑蚀的曲线可以发现,坑蚀下的FC值较均匀腐蚀的变小了,这样算出的腐蚀厚度偏小。造成这一原因主要是因为发生坑

蚀时,流过测量区域的电流与未腐蚀或均匀腐蚀时的电流值不同,电流值偏低,具体表现形式是该坑蚀区域前后的电流将减少,上下的电流将增加,特别是在变化电阻的相邻区域影响很大^[6-8]。但是现有的电位矩阵法剩余厚度计算公式在计算坑蚀时,忽略了这一电流变化问题,认为坑蚀的电流流动情况与均匀腐蚀相同,这样带来了较大的误差。

如果能够量化给出减小的电流值,将有效地解决这一问题。

2 分析求解

在被测管道监测区域发生坑蚀时,会对坑蚀周围的探针的电压产生明显的影响,特别是该腐蚀坑所在探针的上下探针对和左右探针对。由于这一现象的存在,使得流过腐蚀坑所在的电极对的电流降低,与未腐蚀时电流不一样,导致了FC值减少,这样就出现了通过原始厚度计算公式时的大量误差。在这一基础之上,考虑到探针之间完全是靠电阻联系在一起,可以将整个管道等效为一个互相关联的电阻网络来对其进行分析计算。

2.1 电阻网络模型

如图3所示,将两对探针固定在管道的内外侧,管道长度为1500 mm,探针之间相距50 mm。若一个腐蚀坑发生在管道内层,大小如图所示,此时若槽沿着X轴方向移动,移动的范围在离管道两端695 mm处,每一次移动5 mm,记录每次得到的FC值,得到如图4的曲线。

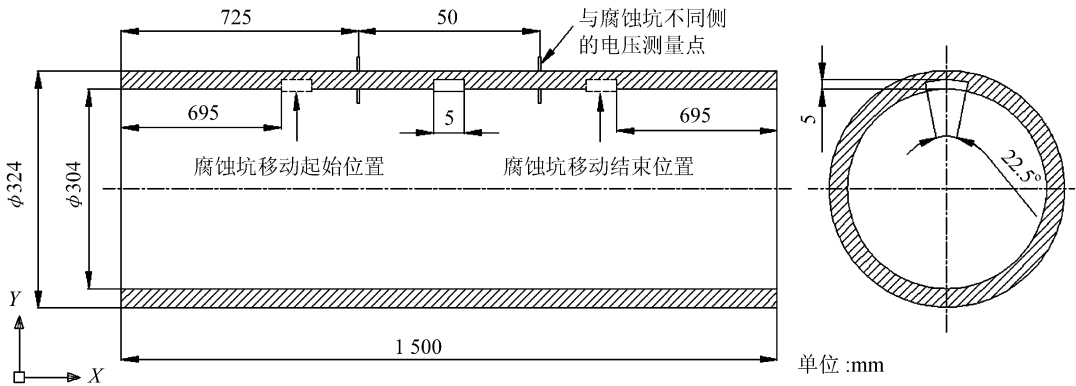


图3 腐蚀坑在管道内位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram about the position of the pit corrosion in the inside of pipeline

从图4中可以看出,管道内侧发生腐蚀时,处于两侧的探针所测得的FC值是不同的,尤其是在腐蚀坑靠近探针时差异越明显。由于FSM的测量原理是建立在欧姆定律的基础之上的,当探针形成探针矩阵布置在被测管道上时,若管道内侧有着与

外侧相对应位置的探针,这样在管道外侧每个电极之间存在电阻关系,内侧和外侧之间也存在着电阻关系,因此可以将整个网络等效为一个电阻网络。

如图5所示,截取管道测量区域一部分,上面分布探针1~9,在内侧映射出探针1'~9',每个点之

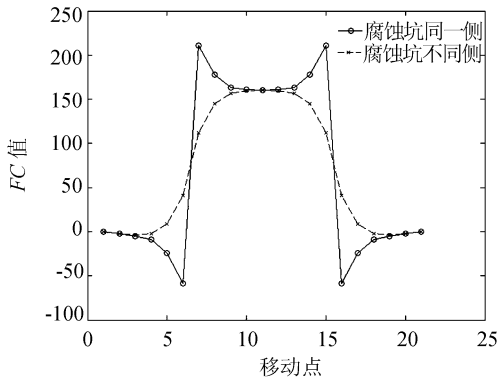


图 4 腐蚀坑移动,管道内外侧探针固定不动时的 FC 值曲线

Fig. 4 FC curves of the probe in the inner and outer pipe when the position of pit corrosion move

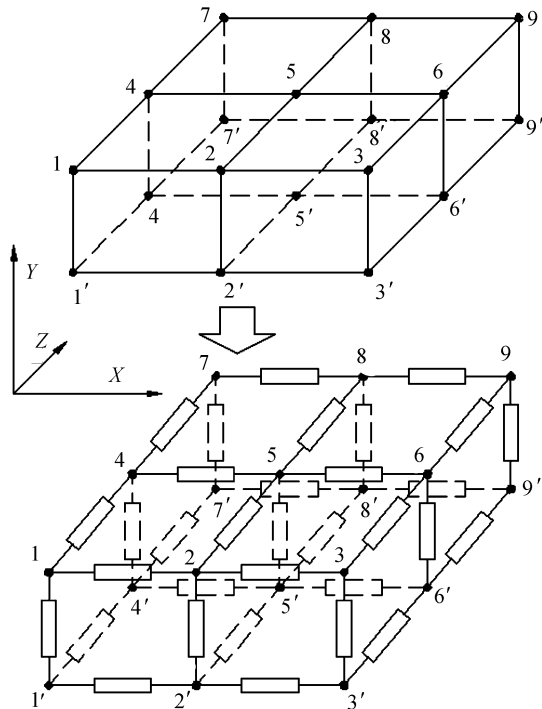


图 5 双层电阻网络模型

Fig. 5 A model of double resistor network

间存在着电阻关系,组成图 5 右边所示的双层电阻网络。对于整个测量区域可以依此类推,形成整个测量区域的双层电阻网络。

当管道测量区域发生腐蚀后,等效于电阻网络中电阻发生变化。因此腐蚀坑在管道中移动的情况相当于于一个变化的电阻在双层电阻网络中的移动,其 FC 值曲线如图 6 所示。

从图 6 中可以看出电阻网络能够反映出与测量管道相同的 FC 变化情况,且电阻网络的 FC 值在合适的电阻值的情况下与管道相同,因此建立电阻网络模型来分析是可行的。注意到 FSM 是将电极探针布置在管道外侧,只能获取外侧的电压,同时由于

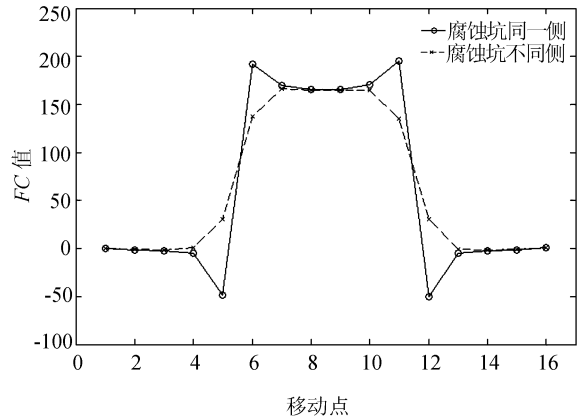


图 6 双层电阻网络中腐蚀电阻移动探针固定不动的 FC 值曲线

Fig. 6 Curves of FC value when probe is fixed but the corrosion resistor is moved in double resistance network

双层电阻网络的计算的复杂性,因此将整个管道测量区域考虑为单层电阻网络,即把双层电阻网络等效为单层电阻网络,得到的测量数据也将能够更简单的计算电阻网络之间的关系及对应的金属剩余厚度。如图 7 所示环形电阻网络,每个测量电极之间为一个电阻。

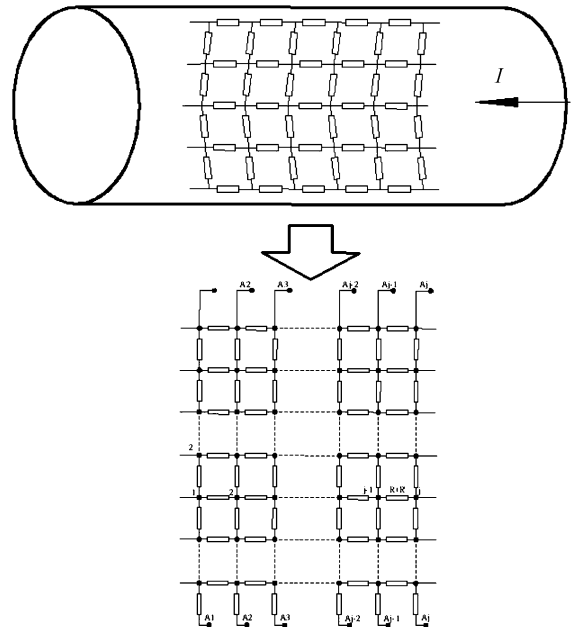


图 7 管道测量探针转化为单层电阻网络

Fig. 7 Measuring probes of pipe change into monolayer resistance network

2.2 电阻网络计算

设测量区域电阻网络大小为 $(i-1) \times 2$ 行 j 列,如图 7。设电阻阻值均未改变时,每路上的电流为 I 。当探针点 $(1, j-1)$ 和 $(1, j)$ 之间发生腐蚀时,电阻阻值变成 $R + R'$ 后,引起电流变化。由于对称性,整

个电阻网络上电流将以该电阻所在位置为对称轴上下对称,左右对称,电阻变化所在行上下两侧的电流值相等,方向相反,所需计算的行数为 $i + 1$ 行,列数为 j 列。若电阻网络行数为奇数,计算方法类似。

以电阻变化所在行为第一行,设 m 行流向 $m + 1$ 行的电流大小为 ΔI_m , 则

$$\Delta I_m = I_{m,j-1;m+1,j-1} + I_{m,j-2;m+1,j-2} + \dots + I_{m,1;m+1,1} \quad (m = 1, \dots, i - 1) \quad (4)$$

其中, $I_{i,j;i+1,j}$ 为探针 (i,j) 和 $(i + 1,j)$ 之间的电流值。

根据对称性,在 $j - 1$ 和 j 列之间有:

$$I_{i,j-1;i+1,j-1} = I_{i+1,j;i,j} \quad (5)$$

根据基尔霍夫电流定律,对于 $j - 1$ 列和 j 列之间电阻的电流为:

$$\begin{cases} I_{1,j-1;1,j} = I - 2\Delta_1, \\ I_{m-1,j-1;m-1,j} = I + \Delta_{m-2} - \Delta_{m-1} \quad (m = 2, \dots, i - 1), \\ I_{i,j-1;i,j} = I + 2\Delta_{i-1} \end{cases} \quad (6)$$

对于其他剩余探针点之间的电流为:

$$\begin{cases} I_{1,n;1,n+1} = I_{1,n+1;1,n+2} - 2 \times I_{1,n+1;2,n} \quad n = 1, \dots, j - 1; \\ I_{m-1,n;m-1,n} = I_{m,n;m,n+1} + I_{m,n;m,n-1} + I_{m,n;m+1,n}, \\ \quad m = 2, \dots, i - 1; n = 1, \dots, j - 1; \\ I_{i,n;i,n+1} = I_{i,n+1;i,n+2} + 2 \times I_{i-1,n+1;i,n+1}, \\ \quad n = 1, \dots, j - 1 \end{cases} \quad (7)$$

根据基尔霍夫电压定律,在 4 个探针组成的环路中,建立电压方程组:

$$\begin{aligned} R_{m,n;m+1,n} I_{m,n;m+1,n} &= R_{m,n;m,n+1} I_{m,n;m,n+1} + \\ R_{m,n+1;m+1,n+1} I_{m,n+1;m+1,n+1} &+ R_{m+1,n+1;m+1,n} I_{m+1,n+1;m+1,n} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $m = 1, \dots, i; n = 1, \dots, j$ 。

联立上述方程求解,可以求得 ΔI_1 的值。如果选用电阻网络行数为奇数时,计算方法类似。

在理想情况下不考虑参考电压的变化情况 FC 计算公式有:

$$FC_{i,j;i,j+1} = \left(\frac{V_{i,j;i+1,j}(t_x)}{V_{i,j;i+1,j}(t_0)} - 1 \right) \times 1000 \quad (9)$$

根据电压公式腐蚀区域即变化的电阻上(位于第 1 行, j 列)可以得到:

$$FC_{1,j-1;1,j} = \left(\frac{(I - 2\Delta_1)(R_{1,j-1;1,j} + R'_{1,j-1;1,j})}{IR_{1,j-1;1,j}} - 1 \right) \times 1000 \quad (10)$$

通过上述公式可以求得腐蚀区域探针之间原始

电阻和变化电阻之间的比值为:

$$\frac{R_{1,j-1;1,j}'}{R_{1,j-1;1,j}} = \frac{1000(1 - a) - aFc}{\frac{1000(1 - a) - aFc}{Fc} + 1} = \frac{Q}{Q + 1} \quad (11)$$

式中, $Q = \frac{1000(1 - a) - aFc}{Fc}$,

$$a = \frac{2\Delta I R_{i,j;i+1,j}}{R_{i,j;i+1,j}' I_i - 2\Delta I R_{i,j;i+1,j}' I_i}$$

由式(2)可以得到测量区域管道坑蚀后的剩余厚度为:

$$h_{i,j;i+1,j} = \frac{h_{i,j;i+1,j}' Q}{1 + Q} \quad (12)$$

利用上述公式,可以计算得到的最终深度如图 8 所示。

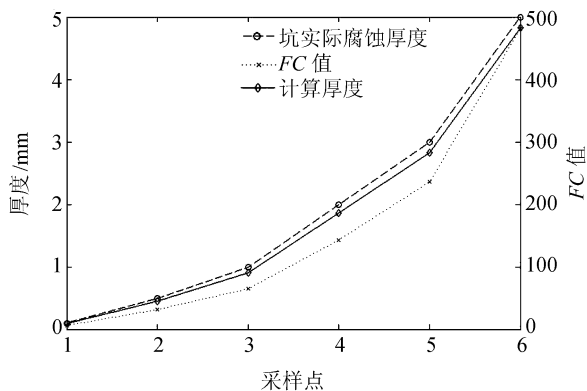


图 8 修正公式下坑蚀厚度值与 FC 值的关系图

Fig. 8 Diagram of thickness of pit corrosion and FC value in modified function

计算的误差最大值在 5 mm 处,计算的深度为 4.72 mm,相差 0.28 mm,相对误差为 5.6%。这是由于在仿真时,电流流过每个探针对的电阻块时不是均匀流过,导致在计算 FC 值的时候相对均匀的情况小了 30,导致计算误差。

3 实验验证和分析

为了验证改进算法在实际管道上的计算效果,在一平板上做腐蚀坑实验。平板长 1 000 mm,宽 150 mm,厚度为 11.4 mm;在管道中间依次布置电压探针,探针行列之间的间距为 30 mm;注入电流为 60 A。整个实验设备如图 9 所示。

在管道上依次腐蚀厚度为 0.6、0.65、1.2、3 mm 的坑,坑面积为 30 mm × 30 mm,位于电流流入方向上的两个探针中间。通过实验数据和上述公式计算出的结果如表 1 所示。

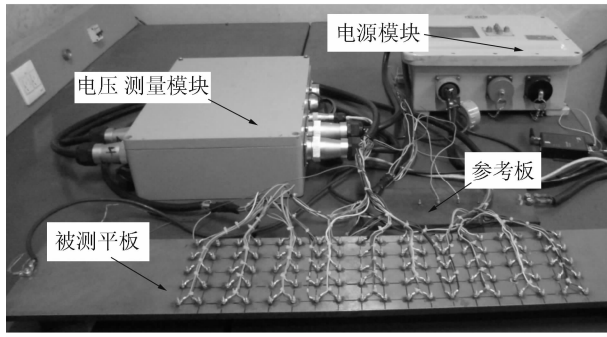


图9 实验装置

Fig.9 Experimental equipment

表1 实验结果

Tab.1 Experimental result

腐蚀坑深度/mm	探针电压变化/ μV	FC值	a	Q	本文的厚度计算值及相对误差	改进前厚度计算值以及相对误差
0.60	2.19	29.76	0.49	16.65	10.75 (-0.43%)	11.07 (2.50%)
0.65	2.35	31.86	0.49	15.52	10.71 (-0.37%)	11.05 (2.77%)
1.00	3.05	41.42	0.49	11.82	10.51 (1.07%)	10.95 (5.26%)
2.00	6.55	88.86	0.49	5.25	9.58 (1.87%)	10.47 (11.38%)
3.00	10.54	143.14	0.49	3.07	8.6 (2.39%)	9.97 (18.72%)
5.00	20.42	277.17	0.49	1.35	6.55 (2.33%)	8.93 (39.47%)

从表1中可以看出在实际测量中该公式是可以较准确地计算出剩余厚度。尤其当腐蚀厚度增加到一定程度时,改进前的厚度计算公式的误差将显著增大,而利用本文的厚度计算公式则可以较为精确地计算出实际腐蚀厚度,为监测管道提供准确信息。

4 结论

有限元分析和实验数据表明在监测均匀腐蚀和坑蚀时,现有的电位矩阵法剩余厚度计算算法不能有效区别这2种腐蚀,导致坑蚀的厚度计算精度很差。由于管道监测区域发生坑蚀时与未腐蚀时电流场的分布不一样,在基于电位矩阵法的本质是欧姆定律的基础上,作者利用电阻网络来解决坑蚀前后电流不一的问题,具体表现在通过电阻网络模型计

算出坑蚀前后电流的具体值。通过仿真和实验发现,新的算法的计算精度更高,且不需要经验系数来修正,取得了很好的效果,为判断因腐蚀带来的事故隐患提供了可靠依据。

参考文献:

- [1] Xu Haijun. Research on oil pipeline for the evaluation of corrosion inspection technologies[J]. Pipe, 2008, 38(1): 47-49. [徐海军. 石油管道腐蚀检测评价技术研究[J]. 焊管, 2008, 38(1): 47-49.]
- [2] Wang Chunlan, Zhang Peng, Chen Liqiong, et al. Methods for assessment of remaining strength of corroded pipe[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003, 35(5): 50-54. [王春兰, 张鹏, 陈利琼, 等. 腐蚀管道剩余强度评价的基本方法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(5): 50-54.]
- [3] Yang Fei, Zhou Yongfeng, Hu Kefeng, et al. Progress of corrosion and protection monitoring/inspection technologies[J]. Total Corrosion Control, 2009, 23(11): 46-51. [杨飞, 周永峰, 胡克峰, 等. 腐蚀防护监测检测技术研究的进展[J]. 全面腐蚀控制, 2009, 23(11): 46-51.]
- [4] Hognestad H. A method and a device for monitoring large metal structures: WIPO Patent, 1983003675[P]. 1983-10-27.
- [5] Daaland A. Modelling of weld corrosion attacks on a pipe geometry for developing an interpretation model from FSM signals[J]. Insight, 1996, 38(6): 435-439.
- [6] Wan Z, Liao J, Tiao G Y, et al. Investigation of drag effect using the field signature method[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(8): 085708.
- [7] Farrell D M, Robbins B J, Stallings J, et al. Crack growth monitoring on industrial plant using established electrical resistance 'scanner' technology[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2008, 50(12): 690-694.
- [8] Sposito G, Cawley P, Nagy P B. Potential drop mapping for the monitoring of corrosion or erosion[J]. NDT&E International, 2010, 43(5): 394-402.