

中华人民共和国国家标准

GB/T 21117—2007

磁致伸缩液位计

Magnetostrictive liquid level meter

2007-10-11 发布

2007-12-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准的附录 A 为规范性附录。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国工业过程测量和控制标准化技术委员会第一分技术委员会归口。

本标准起草单位：北京航天神舟测控仪器有限公司、上海工业自动化仪表研究所、沈阳仪表科学研究院、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、北京航天计量测试技术研究所。

本标准主要起草人：潘年茂、程言峰、李永清、徐秋玲、李竞武、冯晓升、金丽辉、潘岩、缪寅宵、潘抒平。

本标准为首次制定。

磁致伸缩液位计

1 范围

本标准规定了磁致伸缩液位计的产品分类、基本参数、技术要求、试验方法、检验规则、标志、使用说明书、包装、贮存、运输。

本标准适用于磁致伸缩液位计(以下简称液位计)。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB 3836.1 爆炸性气体环境用电气设备 第1部分:通用要求(GB 3836.1—2000,eqv IEC 60079-0:1998)

GB 3836.2 爆炸性气体环境用电气设备 第2部分:隔爆型“d”(GB 3836.2—2000,eqv IEC 60079-1:1990)

GB 3836.4 爆炸性气体环境用电气设备 第4部分:本质安全型“i”(GB 3836.4—2000,eqv IEC 60079-11:1999)

GB 4208 外壳防护等级(IP代码)(GB 4208—1993,eqv IEC 60529:1989)

GB 9969.1 工业产品使用说明书 总则

GB/T 15464 仪器仪表包装通用技术条件

GB/T 15479—1995 工业自动化仪表绝缘电阻、绝缘强度技术要求和试验方法

GB/T 17626.2—1998 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验(idt IEC 61000-4-2:1995)

GB/T 17626.3—1998 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验(idt IEC 61000-4-3:1995)

GB/T 17626.4—1998 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验(idt IEC 61000-4-4:1995)

GB/T 17626.5—1999 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验(idt IEC 61000-4-5:1995)

GB/T 17626.6—1998 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验(idt IEC 61000-4-6:1996)

GB/T 17626.8—1998 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验(idt IEC 61000-4-8:1993)

GB/T 18268—2000 测量、控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求(idt IEC 61326-1:1997, Amd. 1:1998)

GB/T 18271.1—2000 过程测量和控制装置 通用性能评定方法和程序 第1部分:总则(idt IEC 61298-1:1995)

GB/T 18271.3—2000 过程测量和控制装置 通用性能评定方法和程序 第3部分:影响量影响的试验(idt IEC 61298-3:1998)

GB/T 18271.4—2000 过程测量和控制装置 通用性能评定方法和程序 第4部分:评定报告的

引 言

本标准是根据国内外磁致伸缩液位计的当前技术状态和发展方向,在充分考虑国内市场需求的前提下制定的。该液位计具有高精度的特点,不仅属于通用的传感器,也可作为计量器具使用。为此,在编写时,力求使本标准兼顾上述两个应用方向,并尽量保持和 JJG 971—2002《液位计检定规程》一致。

内容(idt IEC 61298-4:1995)

JB/T 9329—1999 仪器仪表运输、运输贮存基本环境条件及试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

磁致伸缩 magnetostriction

铁磁质中磁化方向的改变会引起介质晶格间距的改变,从而使得铁磁质的长度和体积发生改变的现象。

3.2

磁致伸缩液位计 magnetostrictive liquid level meter

一种用于测量液面或液-液界面位置的装置,其内部检测元件基于磁致伸缩原理设计制造。

4 产品分类

4.1 按液位计测杆结构分

- 刚性杆,测杆整体为刚性结构,并具有一定的支撑强度,以保证其直线状态;
- 柔性杆,测杆在运输和安装过程时可弯曲,使用时应采用重锤、磁钢、吊钩、护套等方式,保证其工作所需的直线状态。

4.2 按液位计测量参数类型分

- 液位测量,仅测量液面一个位置参数;
- 界面测量,可同时测量液面和界面多个位置参数。

4.3 按液位计输出信号形式分

- 模拟输出型,包括:电流输出型、电压输出型;
- 数字通信型;
- 复合输出型,同时具备以上两种功能,如:HART 协议。

4.4 按液位计安全性能分

- 普通型;
- 防爆型(主要为:隔爆型、本质安全型,不排除其他类型)。

5 基本参数

5.1 测量范围

刚性杆: ≤ 6 m;柔性杆:3.5 m~20 m。

液面测量的上盲区: ≤ 100 mm,下盲区: ≤ 60 mm。

界面测量的下盲区: ≤ 15 mm。

5.2 输出信号

a) 模拟输出型:

1) 电流输出型:4 mA(d. c)~20 mA(d. c),负载电阻应为:0 Ω ~750 Ω 。

2) 电压输出型:0 V(d. c)~5 V(d. c)、1 V(d. c)~5 V(d. c)或0 V(d. c)~10 V(d. c),负载电阻应为: ≥ 1 k Ω 。

b) 数字通信型:

1) RS485 接口,波特率可选:2 400,4 800,9 600。可多机通信和总线连接。

2) 其他类型的数字总线接口,应符合相应总线的规定要求。

c) 复合输出型:产品应同时符合模拟输出型和数字通信型的规定要求。

5.3 供电电源

额定工作电压:24 V(d. c)。

正常工作电压:9 V(d. c)~30 V(d. c)。

5.4 工作环境

环境温度可选为:

- a) $-25^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$;
- b) $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$;
- c) $-50^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$ 。

相对湿度:0%~98%。

介质温度范围由制造厂自行规定。

5.5 额定工作压力

测杆额定工作压力应从下列数值中选取:0.63 MPa, 1.6 MPa, 2.5 MPa, 4.0 MPa, 6.3 MPa, 10 MPa, 16 MPa。

6 技术要求

6.1 与准确度有关的要求

6.1.1 示值误差

液位计示值的最大允许误差有两种表示方式:

- a) 示值的最大允许误差为 $\pm(a\% \cdot FS + b)$ 。其中: a 为液位计的相对误差标称值,可选为0.01、0.02、0.05、0.1; FS 为液位计的量程(单位:mm或m); b 为数字通信型液位计的分辨力(单位:mm),模拟输出型液位计 $b=0$ 。
- b) 示值的最大允许误差为 $\pm N$ 。 N 为液位计的绝对误差标称值,可选为0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm。

液位计在调校后,零点和满度的输出值误差应不超过最大允许示值误差绝对值的二分之一。

6.1.2 非线性

液位计的非线性误差应不超过最大允许示值误差绝对值的二分之一。

6.1.3 回差

液位计的回差应不超过最大允许示值误差绝对值的五分之二。

6.1.4 重复性

液位计的重复性应不超过最大允许示值误差绝对值的五分之二。

6.2 与影响量有关的要求

6.2.1 稳定性

液位计连续运行72 h。试验前后输出值的变化,以及下限值和满量程的变化均应不超过最大允许示值误差绝对值的二分之一。

6.2.2 负载电阻

对于模拟输出型液位计,在保证液位计正常工作电压不变的前提下,当负载电阻在规定范围(见5.2)内变化时,输出值的变化应不超过最大允许示值误差绝对值的五分之二。

6.2.3 电源变化

供电电压在液位计的正常工作电压范围内变化,输出值的变化应不超过最大允许示值误差绝对值的五分之二。

6.2.4 电源保护

液位计应具备防反向保护功能。当液位计电源端反向施加允许的最大供电电压后,再正常连接时,液位计应能正常工作,输出值的变化应不超过最大允许示值误差绝对值的五分之二。

6.2.5 温度性能

在 5.4 规定的工作环境温度范围内,平均每变化 10℃,输出值变化应不超过最大允许示值误差的绝对值。试验后,液位计应符合 6.1 的要求。

6.2.6 恒定湿热

液位计在温度 40℃和相对湿度 95%的条件下至少保持 48 h。试验后,输出值的变化应不超过最大允许示值误差绝对值的二分之一,并符合 6.3.1 的 b)、6.3.3 的要求。在一般试验大气条件下恢复 24 h 后,应符合 6.1、6.3.1 的 a)的要求。

6.2.7 机械振动

按照 GB/T 18271.3—2000 中 7.1 的规定,选择以下试验条件:

- a) 频率范围:10 Hz~500 Hz;
- b) 位移峰幅值:0.15 mm;
- c) 加速度幅值:19.6 m/s²。

液位计经受振动试验后,应符合 6.1、6.3.1 的 a)、6.3.3 的要求。

6.2.8 电磁兼容性

液位计的抗扰度试验的最低要求在表 1 中给出,评定试验结果的性能判据(通用原则)应符合 GB/T 18268—2000 中 6.5 的规定。

本标准不对液位计的发射要求做规定。如需要,可选用 GB/T 18268—2000 中 7.2 规定的 A 类设备的发射限值。

表 1 液位计的抗扰度试验要求和性能判据

端口	试验项目	基础标准	试验值	性能判据
外壳	静电放电(ESD)	GB/T 17626.2—1998	接触放电 4 kV;空气放电 8 kV	2
	射频电磁场辐射	GB/T 17626.3—1998	10 V/m	1
	工频磁场	GB/T 17626.8—1998	400 A/m	1
电源端	电快速瞬变脉冲群	GB/T 17626.4—1998	2 kV	2
	浪涌(冲击)	GB/T 17626.5—1999	1 kV(线对线)/2 kV(线对地)	2
	射频场感应的传导骚扰	GB/T 17626.6—1998	3 V	1
信号端	电快速瞬变脉冲群	GB/T 17626.4—1998	1 kV	2
	浪涌(冲击)	GB/T 17626.5—1999	1 kV(线对地)	2
	射频场感应的传导骚扰	GB/T 17626.6—1998	3 V	1

6.3 其他要求

6.3.1 绝缘电阻

液位计应带有接地端子或接地导线,该端和壳体的导通电阻应 $\leq 0.5 \Omega$ 。

液位计的绝缘电阻应符合 GB/T 15479—1995 的规定。试验电压为:100 V(d.c)。具体要求如下:

- a) 在一般大气条件下,电源端和接地端之间的绝缘电阻应 $\geq 10 M\Omega$;
- b) 经湿热试验后,电源端和接地端之间的绝缘电阻应 $\geq 5 M\Omega$ 。

6.3.2 工作压力

测杆承受的试验压力为额定工作压力的 1.5 倍。持续 20 min,不应有渗漏和损坏现象,并符合 6.1、6.3.1 的 a)、6.3.3 的要求。

6.3.3 外观

液位计的外表面应光洁、平整、色泽均匀,不得有剥落及伤痕等缺陷。标牌应清晰、完整。紧固件不得有松动、损坏现象。刚性杆液位计的测杆不得有弯曲、变形现象。

6.3.4 防爆性能

防爆型液位计需经国家指定的防爆检验单位审查和检验,取得防爆合格证书。在液位计明显处应有防爆标志和防爆合格证号。其中:隔爆型液位计应按 GB 3836.1 和 GB 3836.2 的要求设计和生产;本质安全型液位计应按 GB 3836.1 和 GB 3836.4 的要求设计和生产。

6.3.5 防护性能

液位计应符合 GB 4208 的要求。防护等级可选择:IP65,IP66 或 IP67。

6.3.6 抗运输环境性能

液位计应符合 JB/T 9329—1999 的要求。在包装好的情况下,产品经低温、碰撞、跌落试验后,应符合 6.1、6.3.1 中 a)、6.3.3 的要求。其中,低温试验的温度为:—40℃;跌落试验的自由跌落高度为:500 mm。

7 试验方法

7.1 试验条件

7.1.1 环境条件

7.1.1.1 参比大气条件

液位计的参比性能应在参比大气条件下进行试验:

- a) 温度:(20±2)℃;
- b) 相对湿度:60%~70%;
- c) 大气压力:86 kPa~106 kPa。

7.1.1.2 一般试验大气条件

无需在参比大气条件下进行的试验,推荐采用下列一般试验大气条件:

- a) 温度:15℃~35℃;
- b) 相对湿度:45%~75%;
- c) 大气压力:86 kPa~106 kPa。

7.1.1.3 其他环境条件

磁场:除地磁场外,应使其他外界磁场小到可以忽略不计。

机械振动:无影响性能的机械振动。

7.1.1.4 电源条件

交流供电电源(测量仪器用):

- 电压:(220±10)V;
- 频率:(50±0.5)Hz;
- 谐波含量:≤5%。

直流供电电源(液位计用):

- 电压:0 V~32 V 可调;
- 输出电流:2 A;
- 峰值噪声:≤50 mV。

7.2 试验的一般规定

7.2.1 每项试验前允许调整“下限值”和“量程”,在试验过程中,不得进行调整。

7.2.2 试验采用的测量仪器的最大允许误差应不大于被测液位计最大允许误差的四分之一。

7.2.3 试验前,液位计应在试验场地放置 2 h 以上。

7.2.4 液位计和试验设备通电后,应预热 30 min。

7.2.5 影响量试验中,应只有涉及的影响量在规定范围内变化,其他影响量在规定条件下保持恒定。

7.2.6 除非本标准另有规定,影响量试验在一般试验大气条件下,并仅在液位计测量范围的中间点附

近(量程的 $50\% \pm 5\%$)进行;液位计电源电压为:额定工作电压,其允差为 $\pm 10\%$ 。

7.2.7 试验规定中未涉及到的部分按 GB/T 18271.1—2000 进行。

7.2.8 试验结果记录和评定的书面报告内容按 GB/T 18271.4—2000 进行。

7.3 与准确度有关的试验

与准确度有关的试验应在参比大气条件下进行,且试验样品和试验设备均应先在参比大气条件下使之稳定,所有可能影响试验结果的工作条件均应随时进行观察并作记录。

液位计按图 1 固定和连接;比对用标准尺可采用磁栅尺、光栅尺或游标卡尺等;标准尺和随动机构在一起的综合误差应符合 7.2.2 的要求;电源供电电压应满足 7.1.1.4 规定的要求。

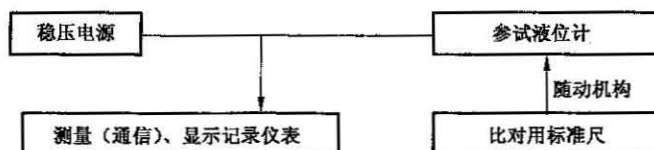


图 1 示值误差测试系统示意图

液位计的校准点应按量程均匀分布,选择包括测量上、下限在内的 7~21 个点。校准试验循环次数为正、反行程各 3 次。校准时,改变随动机构的位置,使标准尺示值接近于当前校准点,其差值应不大于相邻校准点间隔值的 0.03 倍。记录各校准点的标准尺示值和液位计输出值。示值误差、非线性、回差、重复性的计算方法见附录 A。

7.4 与影响量有关的试验

7.4.1 稳定性试验

试验在参比条件下进行。试验前,液位计预热 30 min,测量液位计满量程的 50% 处以及下限值和满度输出值;运行 72 h 后,测量液位计满量程的 50% 处以及下限值和满度输出值,比较两次测量数据的变化。

7.4.2 负载电阻试验

模拟输出型液位计的输出端接标准电阻箱,在测量范围内改变液位计的输出,使其信号值最大。电流输出型液位计的负载电阻从“0 Ω ”改变到“750 Ω ”,电压输出型液位计的负载电阻从“断路”改变到“1 k Ω ”。测量仪表的输入阻抗应不小于 1 M Ω 。观察液位计输出值的变化,记录最大值。

7.4.3 电源变化试验

在液位计电源电压范围内大致均匀地选择 3~5 个试验点。改变电源电压到各试验点的 $\pm 10\%$,记录液位计输出值的变化。

7.4.4 电源保护试验

在液位计电源端反向施加 30 V~32 V 的电压,持续 1 min。然后,正常连接,测试并记录液位计输出值的变化。

7.4.5 温度性能试验

液位计放入温度试验箱,并通电。试验温度范围按 5.4 的要求,升温、降温时的温度变化率应不超过 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。液位计应先在常温 20 $^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 下静置 1 h,然后进行两次循环试验。一次循环过程为:降温到最低温度点并保持 2 h,升温到最高温度点并保持 2 h,降温到常温并停留 2 h。变温之前进行性能测试,记录液位计输出值,并计算两相邻温度间温度每变化 10 $^{\circ}\text{C}$ 示值的变化量。

7.4.6 恒定湿热试验

液位计在不包装、不通电的情况下放入湿热试验箱,升温至 40 $^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。2 h 后加湿,使相对湿度保持在 90%~95% 范围内,持续 48 h。在试验结束前 10 min,对液位计供电,观察工作是否正常,测量和记录输出值。试验结束后应立即测量绝缘电阻。

7.4.7 机械振动试验

按 GB/T 18271.3—2000 中第 7 章的规定进行试验。

7.4.8 电磁兼容性试验

- 按 GB/T 18268—2000 中第 5 章的规定,制定电磁兼容试验方案;
- 按 GB/T 17626.2—1998 的规定,进行静电放电抗扰度试验;
- 按 GB/T 17626.3—1998 的规定,进行射频电磁场辐射抗扰度试验;
- 按 GB/T 17626.4—1998 的规定,进行电快速瞬变脉冲群抗扰度试验;
- 按 GB/T 17626.5—1999 的规定,进行浪涌(冲击)抗扰度试验;
- 按 GB/T 17626.6—1998 的规定,进行射频场感应的传导骚扰抗扰度试验;
- 按 GB/T 17626.8—1998 的规定,进行工频磁场抗扰度试验;
- 按 GB/T 18268—2000 中 6.5 的规定,对试验结果进行评定。按 GB/T 18268—2000 中第 8 章的要求,编写试验报告。

7.5 其他试验

7.5.1 绝缘电阻试验

试验按 GB/T 15479—1995 中 5.3 的规定进行。

7.5.2 工作压力试验

将液位计的测杆部分安装在压力试验设备上,试验压力为额定工作压力的 1.5 倍。持续 20 min,检查液位计性能。

7.5.3 外观检查

目力观察和通电检查。

7.5.4 防爆性能试验

- 隔爆型液位计应按 GB 3836.1 和 GB 3836.2 的规定进行试验;
- 本质安全型液位计应按 GB 3836.1 和 GB 3836.4 的规定进行试验。

7.5.5 防护性能试验

按照 GB 4208 的规定进行试验。

7.5.6 抗运输环境性能试验

液位计在包装好的情况下,进行运输、运输贮存基本环境条件试验,并按以下顺序进行:

- a) 按 JB/T 9329—1999 中 4.2 的规定进行低温试验。对于工作环境低于 -40°C ,并经过 7.4.5 规定试验的液位计,不进行该项试验。
- b) 按 JB/T 9329—1999 中 4.4 的规定进行碰撞试验。
- c) 按 JB/T 9329—1999 中 4.5 的规定进行跌落试验。
- d) 检查液位计性能。

8 检验规则

8.1 检验项目

按表 2 规定。

表 2 检验项目和检验顺序

序号	项目名称	要求章条号	试验方法章条号	出厂检验	型式检验
1	示值误差	6.1.1	7.3	√	√
2	非线性	6.1.2	7.3	√	√
3	回差	6.1.3	7.3	√	√
4	重复性	6.1.4	7.3	√	√
5	稳定性	6.2.1	7.4.1	—	√

表 2 (续)

序号	项目名称	要求章条号	试验方法章条号	出厂检验	型式检验
6	负载电阻	6.2.2	7.4.2	√	√
7	电源变化	6.2.3	7.4.3	√	√
8	电源保护	6.2.4	7.4.4	√	√
9	温度性能	6.2.5	7.4.5	—	√
10	恒定湿热	6.2.6	7.4.6	—	√
11	机械振动	6.2.7	7.4.7	—	√
12	电磁兼容性	6.2.8	7.4.8	—	√
13	绝缘电阻	6.3.1	7.5.1	√	√
14	工作压力	6.3.2	7.5.2	√	√
15	外观	6.3.3	7.5.3	√	√
16	防爆性能	6.3.4	7.5.4	—	√
17	防护性能	6.3.5	7.5.5	—	√
18	抗运输环境性能	6.3.6	7.5.6	—	√

注：“√”为必检项目，“—”为不检项目。

8.2 出厂检验

每台产品交货前必须通过出厂检验。

8.3 型式检验

出现下列任一情况,应进行型式检验:

- a) 新产品试制定型;
- b) 正常生产的周期性质量监督,间隔不应超过两年;
- c) 当设计、工艺和材料等方面有重大变更时;
- d) 产品停产一年以上,恢复生产时;
- e) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时;
- f) 国家质量监督机构提出相应的要求时。

在 a)、c)项的情况下,从试制品中任意抽取 2 台,作为被检样本;在 b)、d)、e)、f)项情况下,应随机抽取同一批产品中的 3 台,作为被检样本。被检样本只有在所规定的检验项目全部符合本标准时,则型式检验通过。但对 b)、d)、e)、f)项的情况,若其中只有一台产品中有一个检验项目不符合要求时,则应加倍抽取样本进行复检,复检样本只检验被检样本的不合格项目;经检验全部合格后,则型式检验通过,否则为不通过。

防爆型液位计除按本标准进行型式检验外,还需履行防爆审查和检验手续。

9 标志、使用说明书

9.1 标志

在液位计外壳的适当位置应设有铭牌,铭牌应清晰标明下列标志:

- a) 制造厂名或注册商标;
- b) 产品名称;
- c) 产品型号规格;
- d) 测量范围;

- e) 环境温度;
- f) 工作压力;
- g) 制造日期及编号;
- h) 防爆型产品应注明防爆标志及防爆合格证号,产品的接线端子应有接线标志。本质安全型产品应标明其基本电气参数。

9.2 使用说明书

制造厂应向用户提供使用说明书,内容编制按 GB 9969.1 的规定进行。

10 包装、贮存、运输

10.1 包装

液位计按照 GB/T 15464 的要求进行包装。

10.2 贮存

液位计应贮存在环境温度为: $-25^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为: $10\% \sim 75\%$, 不含有腐蚀性气体并通风的室内。

10.3 运输

液位计在包装好的情况下,可由常规交通工具运输,运输过程中应防止受剧烈冲击、雨淋及暴晒。

附录 A
(规范性附录)
与准确度有关的计算方法

设在液位计的整个测量范围内有 m 个校准点,进行 n 次正反行程校准试验,则在任一校准点上分别有 n 组正反行程校准数据,共计 $N=2mn$ 组。将这 N 组数据按照测量的先后顺序排列成一维数组,得 $x_k, y_k (k=1\sim N)$ 。

液位计的参比直线采用最小二乘直线,其方程见公式(A.1):

$$Y_{LS} = a + bx \quad \dots\dots\dots(A.1)$$

其中:截距 a 和斜率 b 的计算按公式(A.2)、(A.3):

$$a = \frac{\sum x_k^2 \cdot \sum y_k - \sum x_k \cdot \sum x_k y_k}{N \sum x_k^2 - (\sum x_k)^2} \quad \dots\dots\dots(A.2)$$

$$b = \frac{N \sum x_k y_k - \sum x_k \cdot \sum y_k}{N \sum x_k^2 - (\sum x_k)^2} \quad \dots\dots\dots(A.3)$$

各校准点的示值误差 Δ 的计算按公式(A.4):

$$\Delta = y_k - (a + b \cdot x_k) \quad \dots\dots\dots(A.4)$$

上述式中:

$$\sum x_k = x_1 + x_2 + \dots + x_N;$$

$$\sum y_k = y_1 + y_2 + \dots + y_N;$$

$$\sum x_k y_k = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_N y_N;$$

$$\sum x_k^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2;$$

N ——校准数据组的个数;

a, b ——分别为最小二乘直线方程的截距和斜率;

x_k —— N 组校准数据中,第 k 个校准点的标准尺示值数据;

y_k —— N 组校准数据中,第 k 个校准点的液位计输出值数据。

为计算方便,需要将所有数据归一化到统一的校准点坐标上,计算按公式(A.5):

$$y'_{ij} = y_{ij} + b \cdot (x'_i - x_{ij}) \quad \dots\dots\dots(A.5)$$

式中:

y'_{ij} ——第 i 个校准点第 j 次的液位计理论输出值;

y_{ij} ——第 i 个校准点第 j 次的液位计实际输出值;

x'_i ——第 i 个校准点值,液位计的理想输入值;

x_{ij} ——第 i 个校准点第 j 次的标准尺示值,液位计实际输入值;

b ——最小二乘直线方程的斜率。

正行程理论平均值 $\overline{y'_{Ui}}$ 见公式(A.6):

$$\overline{y'_{Ui}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y'_{Uij} \quad \dots\dots\dots(A.6)$$

反行程理论平均值 $\overline{y'_{Di}}$ 见公式(A.7):

$$\overline{y'_{Di}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y'_{Dij} \quad \dots\dots\dots(A.7)$$

总理论平均值 $\overline{y'_i}$ 见公式(A.8):

$$\overline{y'_i} = (\overline{y'_{Ui}} + \overline{y'_{Di}}) / 2 \quad \dots\dots\dots(A.8)$$

上述式中： y'_{Uij} ——正行程第 i 个校准点第 j 次的液位计理论输出值；
 y'_{Dij} ——反行程第 i 个校准点第 j 次的液位计理论输出值；
 n ——循环试验次数。

满量程输出值 Y_{FS} 的计算公式按公式(A. 9)：

$$Y_{FS} = b \cdot |x_H - x_L| \quad \dots\dots\dots(A. 9)$$

式中：

b ——最小二乘直线方程的斜率；

x_H, x_L ——分别为液位计的测量上、下限值。

非线性度 ξ_L 的计算按公式(A. 10)：

$$\xi_L = \frac{|\overline{y'_i} - (a + b \cdot x'_i)|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(A. 10)$$

式中：

a, b ——分别为最小二乘直线方程的截距和斜率；

x'_i ——第 i 个校准点的值，液位计的理想输入值；

$\overline{y'_i}$ ——第 i 个校准点的总理论平均值，由式(A. 8)计算得到；

Y_{FS} ——满量程输出值，由公式(A. 9)计算得到。

回差 ξ_H 的计算按公式(A. 11)：

$$\xi_H = \frac{|\overline{y'_{Ui}} - \overline{y'_{Di}}|_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(A. 11)$$

式中：

$\overline{y'_{Ui}}$ ——第 i 个校准点的正行程理论平均值；

$\overline{y'_{Di}}$ ——第 i 个校准点的反行程理论平均值；

Y_{FS} ——满量程输出值。

重复性 ξ_R 的计算按公式(A. 12)：

$$\xi_R = \frac{c \cdot S}{Y_{FS}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(A. 12)$$

其中： S 为液位计在整个测量范围内的子样标准偏差，计算按公式(A. 13)：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^n (y'_{Uij} - \overline{y'_{Ui}})^2 + (y'_{Dij} - \overline{y'_{Di}})^2)}{2m(n-1)}} \quad \dots\dots\dots(A. 13)$$

式中：

$\overline{y'_{Ui}}$ ——第 i 个校准点的正行程理论平均值；

$\overline{y'_{Di}}$ ——第 i 个校准点的反行程理论平均值；

y'_{Uij} ——正行程第 i 个校准点第 j 次的液位计理论输出值；

y'_{Dij} ——反行程第 i 个校准点第 j 次的液位计理论输出值；

Y_{FS} ——满量程输出值；

m ——校准点个数；

n ——循环试验次数；

c ——包含因子， $c = t_{0.95}$ (t 分布， $n = 3$ 时， $c = 4.303$)。