

基于雷诺数的流量校准点优化设计新方法

刘立

中国石油大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司 黑龙江大庆 163513

通讯作者:Email:dlts_liuli@petrochina.com.cn

引用:刘立. 基于雷诺数的流量校准点优化设计新方法[J]. 油气井测试,2020,29(6):8-14.

Cite: LIU Li. A new method of optimal design of flow calibration point based on Reynolds number[J]. Well Testing, 2020,29(6):8-14.

摘要 为有效提高井下流量计流量校准精度,落实在一定流量校准区间或特定流量校准点出现示值超差或偏差的问题,采用基于雷诺数的流体力学临界流量方程数学推导模型,确定了按流型流量区间、临界流量、流量校准曲线拐点、流道切换点等进行流量校准点选取新原则,考虑了井下流量计校准影响因素,实施了流量校准点优化设计新方法。流量校准点采用新方法后流量校准结果表明,在流量校准精度上,流量曲线标定方程相关系数 R 较未采用流量校准点优化设计前明显提高;在流量曲线台阶平稳性上,150 支井下流量计流量曲线台阶平稳率平均达 80% 以上;在流量校准上限选定上,当测量上限不大于 $100\text{ m}^3/\text{d}$,150 支井下流量计一次校准成功率平均达 80% 以上;当测量上限大于 $100\text{ m}^3/\text{d}$,一次校准成功率平均达 90% 以上,流量校准上限不同,一次校准成功率有所不同,流量校准上限越高,一次校准成功率越高。流量校准点优化再设计,有效规避一定流量校准区间或特定流量校准点,为提高流量校准质量提供可借鉴方法。

关键词 井下流量计;校准点;雷诺数;临界流量;校准曲线拐点;流道切换点

中图分类号:TE21 **文献标识码:**A **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.002

A new method of optimal design of flow calibration point based on Reynolds number

LIU Li

Well Testing Technology Service Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163513, China

Abstract: In order to effectively improve the flow calibration accuracy of downhole flowmeter, and solve the problem that the indication value is out of tolerance or deviation in a certain flow calibration interval or a specific flow calibration point, the mathematical derivation model of critical flow equation based on Reynolds number is used to determine the new principle of selecting flow calibration points according to flow pattern and flow interval, critical flow rate, inflection point of flow calibration curve and channel switching point. This method takes the influence factors of downhole flowmeter calibration into account, and implements a new method of flow calibration point optimization design. The flow calibration results show that the correlation coefficient R of the calibration equation of the flow curve is significantly improved compared with that before the optimization design of the flow calibration point. In terms of the step stability of the flow curve, the average stability rate of the 150 downhole flowmeters is more than 80%. When the upper limit of flow calibration is selected, and the upper limit of measurement is not more than $100\text{ m}^3/\text{d}$, the average success rate of one calibration of 150 downhole flowmeters is more than 80%; when the upper limit of measurement is greater than $100\text{ m}^3/\text{d}$, the average success rate of one calibration is more than 90%. The higher the upper limit of flow calibration is, the higher the success rate of primary calibration is. The optimal redesign of flow calibration points can effectively avoid a certain flow calibration interval or a specific flow calibration point and provide a reference method for improving the quality of flow calibration.

Keywords: Downhole flowmeter; calibration point; Reynolds number; critical flow rate; inflection point of calibration curve; switching point of flow channel

井下流量计被广泛应用于油田注入井流量测试、流量调配、评价验封效果^[1-4]。井下流量计按工作原理可分为超声波井下流量计和电磁井下流量计;按数据存储方式可分为存储式井下流量计和直读式井下流量计,其中直读式井下流量计主要用于

注入剖面测井,用于确定分层注入量,评价压裂、调剖、堵水效果^[5-7]。井下流量计依据相关校准方法进行设定流量校准点的要求有所不同。对于存储式电磁井下流量计校准,每次校准的流量点不少于 6 个,依次从小流量到大流量均匀分布,每支井下流

量计的示值校准应重复做三次^[8];对于存储式超声波井下流量计校准,每次校准共进行三个循环组校准,每个循环组应有 10 个校准点,且在被校准流量计的测量范围内相对均匀分布,各循环组内数据不相同^[9];对于直读式井下流量计校准(边测边调井下流量计),在流量测量范围内,均匀选择 10 个流量校准点,按照从大流量到小流量的顺序,每个校准点流量稳定后,连续测量记录时间不小于 120 s^[10]。对于注入剖面组合测井流量计校准,在被标流量计上下限之间均匀选 10 或 5 个点(包括上、下限)设定为校准点^[11]。以上有关井下流量计流量校准方法,主要体现在对流量点设定数量,流量点循环次数,流量点设置顺序,流量保持时间,流量点设定数值及流量测量上下限的要求。井下流量计流量校准方法中有关这些流量校准点的设定只是一个推荐性要求,并且由于对井下流量计校准方法的理解以及人为因素等影响^[12-13],对被校准流量计校准点的设定具有随意性,没有建立一个理论性的综合指导设计方案。

张秋平^[14-15]针对井下流量计校准影响因素,采用流量标准表法,研究了流量点设置顺序、流道切换点、流量保持时间、停泵时间、放空等是流量计校准精度的影响因素,并针对井下流量计校准曲线拐点影响,采用标准模拟井筒临界雷诺数推导模型,获得了井下流量计的校准曲线在层流临界流量附近存在拐点,提出超声波井下流量计校准曲线拐点为 10 m³/d,而电磁井下流量计校准曲线拐点为 12 m³/d。张扬洋^[16]针对稳定距离对井下流量计校

准结果的影响,采用层流和紊流稳定经验公式,获得了稳定距离为 2.5 m 时,校准精度最高。朱振国等^[17]针对井下流量计检定模拟井不同井深对井下流量计校准结果的影响,采用对 3.0 m 深的模拟井进行不同深度比对试验方法,获得了测量段距离井深 2.0 m 时,测量误差最小。孙冠男^[18]针对超声波井下流量计流量台阶形状对流量测试结果的影响,提出了超声波流量计流量台阶出现锯齿状爬坡等不平稳形态,而流量台阶呈现平直形态才能真实反应仪器测试精度。

以上针对流量校准点的设定对流量校准结果的诸多影响,其相关报道都是离散性的文献信息,未见形成一个对流量校准点进行有效指导的综合要求。同时,由于流量与流速有关,而流速与雷诺数有关,未见基于雷诺数与流量的数学推导模型对校准结果的影响的报道。因此,按照井下流量计相关校准方法要求,并结合这些离散性的有关流量校准点的实践成果,将这些要求或成果进行优化整合,再利用,设计基于雷诺数的流量校准点新方法。

1 流量校准点设定现状统计分析

井下流量计通常采用“两标一检”对校准项目进行校准,即在校准过程中对被校准流量计先进行两组循环标定,再进行一组循环检定,共进行三组循环校准,一般要求每组循环有 10 个校准点。对 150 支次井下流量计流量校准资料的调查统计分析结果见表 1。

表 1 流量校准点未采用优化设计前校准数据
Table 1 Calibration data of flow calibration points before optimization design

测量上限/ (m ³ ·d ⁻¹)	校准支数	最大引用 误差超差支数	超差占比/ %	一次校准 成功率/%	校准点总数	校准 不平稳点数	流量台阶 平稳率/%
50	50	13	26.0	74.0	1 500	352	76.5
70	50	14	28.0	72.0	1 500	341	77.3
100	50	17	34.0	66.0	1 500	373	75.1
200	50	8	16.0	84.0	1 500	274	81.7
300	50	4	8.0	92.0	1 500	161	89.3
500	50	4	8.0	92.0	1 500	235	84.3
≤100(50、70、100)	150	44	29.3	70.3	4 500	1 066	76.3
>100(200、300、500)	150	16	10.7	89.3	4 500	670	85.1

在表 1 中,当设定测量上限不超过 100 m³/d 时,如测量上限选定 50 m³/d、70 m³/d 或 100 m³/d,其一次校准成功率平均为 70.3%,流量曲线台阶平稳率平均为 76.3%;而同样再次选用这 150 支次被校准流量计,当设定测量上限大于 100 m³/d 时,如测量上限设定 200 m³/d、300 m³/d 或 500 m³/d,其

一次校准成功平均可达 89.3%,流量曲线台阶平稳率平均为 85.1%。由此可见,被校准流量计由于受到仪器本身测量精度的影响,被校准流量计的测量上限越高,其一次校准成功率越高。因此,以上述井下流量计测量上限为 100 m³/d 的校准资料为例,统计出有五种不同的“两标一检”设定点见表 2。

表 2 测量上限为 100 m³/d 时校准点设定表
Table 2 Calibration point setting table when the upper limit of measurement is 100 m³/d

校准点序号	设定一			设定二			设定三			设定四			设定五		
	“两标”		“一检”	“两标”		“一检”	“两标”		“一检”	“两标”		“一检”	“两标”		“一检”
1	2	3	4	5	4	3	2	4	5	5	6	4	3	5	8
2	10	15	12	16	17	14	11	14	20	15	18	19	13	15	18
3	20	25	22	26	27	24	21	27	30	25	28	29	23	25	28
4	30	35	32	36	37	34	31	37	40	35	38	39	33	35	38
5	40	45	42	46	47	44	41	47	50	45	48	49	43	45	48
6	50	55	52	56	57	54	51	57	60	55	58	59	53	55	58
7	60	65	62	66	67	64	61	67	70	65	68	69	63	65	68
8	70	75	72	76	77	74	71	77	80	75	78	79	73	75	78
9	80	85	82	86	87	84	81	87	90	85	88	89	83	85	88
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

在表 2 中,被校准流量计校准时,其流量校准示值超差数据统计如下:

(1) 对于 5 m³/d、10~12 m³/d、13~14 m³/d、27~28 m³/d、50 m³/d,应用上述这些流量校准点或流量校准区间对仪器校准时,仪器校准超差支数占仪器总校准支数的 79.2%。

(2) 其它流量校准点或流量校准区间,仪器校准超差支数占仪器总校准支数的 21.8%。

根据上述统计分析,流量校准点设定在一定流量区间内或流量点会出现较大示值超差现象,说明流量校准点设定需要进一步改进及再设计,以便提高流量校准质量。

2 建立基于雷诺数的临界流量方程数学模型

在油田流量计校准装置标准模拟井筒(油管)中,当仪器下入标准模拟井筒进行校准时,由流体力学可知,标准油管与仪器环形空间内为非圆管中的流体介质流动^[19],其临界雷诺数公式^[20-21]可推导如下,即

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{D_e v \rho}{\mu} = \frac{D_e Q \rho}{\mu A} \\ &= \frac{D_e Q \rho}{\pi \mu \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]} \\ &= \frac{4 \rho Q}{\pi \mu (D + d)} \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $D_e = D - d$
式中: D 为标准模拟井筒内径,m; d 为仪器外径,m; v 为流体介质流动速度,m/s; ρ 为流体介质密度,kg/m³; μ 为流体介质黏度系数,mPa·s; Q 为流体流量,m³/s; A 为标准模拟井筒横截面积,m²; R_e 为雷

诺数(与校准环境温度及注入介质有关,表征有所不同^[22]),无量纲; D_e 为水力直径或有效直径,m。

在流量计校准装置中,标准模拟井筒中注入介质为水(纯水、含微小颗粒的污水),在常温 20 ℃下,实测水的密度是 998.23 kg/m³,水的黏度系数是 1.002×10⁻³ mPa·s,而标准模拟井筒(油管)的内径为 62.0 mm,仪器外径为 38 mm。当 $R_e < 2\,000$,为层流,稳定流态,流量台阶测试较平稳;当 $2\,000 \leq R_e \leq 4\,000$,为过渡流,混合流态;而当 $R_e > 4\,000$,为湍流,不稳定流态^[23]。通过上述表征三种流体流态的临界雷诺数改变,并依据给定的已知条件,依据(1)式推导出(2)式,可以计算出对应于临界雷诺数的流量值,即

$$Q = \frac{3.14 R_e \mu (D + d)}{4 \rho} = 6.796 \times 10^{-3} R_e \tag{2}$$

(2) 式中对于在标准模拟井筒中下入外径 38 mm 仪器,可计算出其层流临界流量为 13.62 m³/d,湍流临界流量为 27.23 m³/d(本文中层流临界流量为 13.57 m³/d,湍流临界流量 27.13 m³/d,主要由于检定(校准)室或实验室所处环境温度及属地注水介质不同,略有差异),即当在标准模拟井筒中,0< Q <13.62 m³/d,为层流;13.62 m³/d≤ Q ≤27.23 m³/d,为过渡流; Q >27.23 m³/d,为湍流。

通过在(2)式中建立流体流量 Q 与雷诺数 R_e 的比例关系,说明对于流量校准点设定为临界流量值或其附近流量区间内流量值时,在 13~14 m³/d 设定流量区间内,使其流型处于由层流转变为过渡流的临界变化;在 27~28 m³/d 设定流量区间内,使其流型处于过渡流转变为湍流的临界变化,不可避免造成流量测试台阶极易不平稳,也极易出现超差现象(表 1)。因此,对于这些处于临界流量值的校准点,需要进行有效的、合理的设定,以提高设定流量校准点的可操作性。

通过井下流量计校准曲线分析,井下流量计校准曲线在层流临界流量 $13.62\text{ m}^3/\text{d}$ 附近存在拐点。据试验数据分析,在校准曲线拐点以下流量校准曲线符合多项式规律。如果将流量校准曲线拐点作为校准点,在 $10\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $12\text{ m}^3/\text{d}$ 或在 $10\sim 12\text{ m}^3/\text{d}$ 流量区间内选取校准点,将使其偏离于整个校准拟合线性曲线,易出现偏差现象(表 1)。

另外,本文采用的某一型号流量计校准装置由三组不同标称流量的标准电磁流量计组成。这三组电磁流量计口径不一,其每组电磁流量计流道切换点不同^[24-26](表 3)。若设定该流道切换点为流量校准点,致使流量台阶极易不稳定,易出现超差现象。

表 3 不同标称流量的电磁流量计对比表

Table 3 Comparison of electromagnetic flow meters with different nominal flow rates

流道	口径/ mm	标称流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	标称流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	流道(流量) 切换点/($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)
小流道	DN2.5	0.194	4.66	5
中流道	DN10	2.330	55.90	50
大流道	DN50	36.000	864.00	500

综上所述,通过雷诺数找出临界流量值、通过流量校准曲线确定拐点值以及通过流量计校准装置流量标准器确定流道切换点,这些流量值对于优化设计流量校准点有极大指导意义。

3 流量校准点的优化设计及试验效果

井下流量计校准时,对于设定流量校准点一般遵循相关井下流量计校准方法,通过建立基于雷诺数的临界流量方程数学模型以及井下流量计校准实践,开展流量校准点的优化再设计。

3.1 流量校准点优化设计原则

对于井下流量计校准时,选取每组循环 10 个流量校准点,应遵循以下原则进行优化设计:

(1)测量上、下限确定。测量上限选择应是测试区块注入井最高配注量的 1.1~1.2 倍;测量下限选择在满足井下流量计测量精度、流量分辨率及流量传感器结构的性能指标要求下,一般应满足不小于测量上限的最大允许误差的绝对值。

(2)流型流量区间选点。在测量下限与小于湍流临界流量之间至少选取 2 个校准点,即在层流流量区间或过渡流流量区间内各至少选取 1 个校准点;其它流量校准点可以在大于湍流临界流量与测量上限之间相对均匀选取。流量校准点的选取要兼顾在流量计校准装置标准模拟井筒中层流、过渡流及湍流三种流型流量区间内选点。

(3)临界流量点选取。如在环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,雷诺数 $R_e=2\text{ }000$ 时,层流临界流量为 $13.62\text{ m}^3/\text{d}$;雷诺数 $R_e=4\text{ }000$ 时,湍流临界流量为 $27.23\text{ m}^3/\text{d}$ 。因此,设定流量校准点应避开选取层流、湍流临界流量值,或避开选取与其非常接近的流量值。

(4)流量校准曲线拐点选取。如在环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,雷诺数 $R_e<2\text{ }000$ 时,在层流流量校准曲线拐点为 $10\text{ m}^3/\text{d}$ 或 $12\text{ m}^3/\text{d}$ 。校准环境温度不同,其注入介质的密度和黏度系数不同,其表征的雷诺数也不同,需要根据校准试验及数据分析,确定在一定环境温度下流量校准曲线拐点数值。因此,设定流量校准点应避开选取流量校准曲线拐点。

(5)流量标准器流道切换点选取。如流量计校准装置中小流道切换点 $5\text{ m}^3/\text{d}$ 、中流道切换点 $50\text{ m}^3/\text{d}$ (表 3)。因此,设定流量校准点应避开流量计校准装置流量标准器(标准表)流道切换点。

3.2 基于雷诺数的流量校准点优化设计

井下流量计校准时,当层流临界雷诺数为 2 000,湍流临界雷诺数为 4 000 时,依据流量校准点优化设计原则,选取测量上限为 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 或 $200\text{ m}^3/\text{d}$ 的井下流量计(校准环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$),每次校准共进行“两标一检”三个循环组校准,每个循环设定 10 个流量校准点,每组流量校准点依次从小流量到大流量均匀分布,设定流量保持时间为 120 s,见表 4、表 5。

表 4 测量上限为 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 时实际校准点设定

Table 4 Actual calibration point setting when the upper limit of measurement is $100\text{ m}^3/\text{d}$

校准点 序号	循环一/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	循环二/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	循环三/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	流型
1	2	3	6	层流
2	8	15	17	
3	16	25	24	
4	26	35	34	
5	36	45	44	湍流
6	46	55	54	
7	56	65	64	
8	66	75	74	
9	76	85	84	
10	100	100	100	

井下流量计在实际校准过程中,以软连接方式连接井下流量计,测量进液口到测量段的稳定距离为 2.1 m,介于 2.0~2.5 m 稳定距离之间;每组流量校准循环结束后,停泵时间保持在 8 min 后起泵,并且每次起泵前需要放空,放空时观察流体介质无气泡即可起泵。

表 5 测量上限为 200 m³/d 时实际校准点设定

Table 5 Actual calibration point setting when the upper limit of measurement is 200 m³/d

校准点 序号	循环一/ (m³·d ⁻¹)	循环二/ (m³·d ⁻¹)	循环三/ (m³·d ⁻¹)	流型
1	7	9	8	层流 过渡流
2	20	25	23	
3	40	45	43	
4	60	65	63	
5	80	85	83	湍流
6	100	105	103	
7	120	125	123	
8	150	155	153	
9	180	185	183	
10	200	200	200	

表 6 井下流量计校准数据对比表

Table 6 Comparison of downhole flowmeter calibration data

仪器编号	仪器类型	是否新设定 校准点	最大引用 误差/%	是否超差	拟合优度 R^2	相关系数 R	$R-R'$	备注
1	超声	×	2.16	✓	0.998 018	0.999 009	0.000 374	R'
		✓	1.74	×	0.998 766	0.999 383		R
2	超声	×	1.21	×	0.996 625	0.998 311	0.000 285	R
		✓	0.63	×	0.997 193	0.998 595		R'
3	超声	×	1.88	×	0.996 831	0.998 414	0.000 403	R
		✓	1.27	×	0.997 635	0.998 817		R'
4	超声	×	1.03	×	0.997 833	0.998 916	0.000 128	R
		✓	1.67	×	0.998 089	0.999 044		R'
5	超声	×	2.05	✓	0.996 050	0.998 023	0.000 160	R
		✓	1.56	×	0.996 369	0.998 183		R'
6	电磁	×	0.33	×	0.999 590	0.999 795	0.000 013	R
		✓	0.26	×	0.999 617	0.999 809		R'
7	电磁	×	0.42	×	0.999 660	0.999 830	0.000 081	R
		✓	0.59	×	0.999 821	0.999 911		R'
8	电磁	×	0.62	×	0.999 666	0.999 833	0.000 002	R
		✓	0.34	×	0.999 669	0.999 834		R'
9	电磁	×	0.56	×	0.999 710	0.999 855	-0.000 001	R
		✓	0.30	×	0.999 708	0.999 854		R'
10	电磁	×	1.61	×	0.999 674	0.999 837	0.000 003	R
		✓	0.34	×	0.999 680	0.999 840		R'

4 实例应用

选取本文中 150 支次井下流量计,当流量校准点采用优化设计后,对这些井下流量计流量校准资料进行统计分析。

4.1 井下流量计流量校准点优化应用效果分析

在测量上限为不大于 100 m³/d (50 m³/d、70 m³/d 或 100 m³/d) 时,其一次校准成功率平均可达 87.3% (表 7),与表 1 相比未采用校准点优化设计时提高了 16.6%;在测量上限为大于 100 m³/d (200 m³/d、300 m³/d 或 500 m³/d) 时,其一次校准成功平均可达 94.7%,与表 1 相比未采用校准点优化设计

3.3 流量校准点优化设计试验效果

选测量上限为 100 m³/d 的超声波井下流量计及电磁井下流量计各 5 支 (校准环境温度为 20 ℃)。按表 4 设定流量校准点,校准结果见表 6。

在表 6 中,流量标定方程相关系数 R 用来评价仪器测量的精度^[23]。10 支井下流量计流量校准点采用优化设计后,按表 4 所设定流量校准点进行标定,其流量标定方程相关系数 R 绝大多数高于采用表 2 中所设定流量校准点的相关系数 R' ,最大引用误差均未超差,说明经过优化再设计后的流量校准点,可以有效提高仪器线性相关度,提高了仪器校准精度。

时提高了 5.4%。由此说明,井下流量计流量校准点采用优化设计后,其一次校准成功率均有所提高。

4.2 井下流量计流量校准曲线台阶对比分析

在流量台阶平稳性上,在测量上限为不大于 100 m³/d 时,其流量曲线台阶平稳率平均可达 86.4% (表 7),与表 1 相比,未采用校准点优化设计时提高了 10.1%;在测量上限为大于 100 m³/d 时,其流量曲线台阶平稳率平均可达 89.9%,与表 1 相比,未采用校准点优化设计时提高了 4.8%。由此说明,井下流量计流量校准点采用优化设计后,其流量曲线台阶平稳率有所提高。

表 7 采用优化设计后校准数据对比表

Table 7 Comparison table of calibration data after optimized design

测量上限/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	校准支数	最大引用 误差超差支数	超差占比/ %	一次校准 成功率/%	校准点 总数	校准 不平稳点数	流量台阶 平稳率/%
50	50	6	12.0	88.0	1 500	220	85.3
70	50	7	14.0	86.0	1 500	208	86.1
100	50	6	12.0	88.0	1 500	186	87.6
200	50	5	10.0	90.0	1 500	174	88.4
300	50	2	4.0	96.0	1 500	150	90.0
500	50	2	2.0	98.0	1 500	130	91.3
≤ 100 (50、70、100)	150	19	12.7	87.3	4 500	614	86.4
> 100 (200、300、500)	150	8	5.3	94.7	4 500	454	89.9

某一超声波井下流量计流量校准点优化设计前,随机抽取表 2 的“设定三”,设定流量保持时间为 60 s,稳定距离为 1.5 m,停泵 5 min 起泵,每次起泵均未放空(图 1)。在三个循环组流量曲线台阶中,有 9 处出现较明显的锯齿状爬坡或下坡等不平稳形态,流量校准点包含了校准曲线拐点、临界流量(层流、湍流)、流道切换点共 6 处,其中 30 个校准点有 11 处出现超差,超差占比达 36.7%。可见井下流量计在未考虑影响流量校准精度因素的前提下,流量点随意设定是造成流量台阶不平稳或出现超差的重要原因;而采用表 4 中优化设计的流量校准点,三个循环组流量曲线台阶均较平稳,说明流量点优化设计后,提高了流量曲线台阶测试平稳性,该支仪器流量校准点均未超差(图 2)。

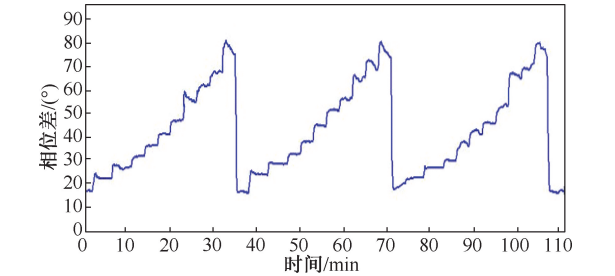


图 1 井下流量计流量点优化设计前流量台阶

Fig. 1 Flow steps of flow point of downhole flowmeter before optimization design

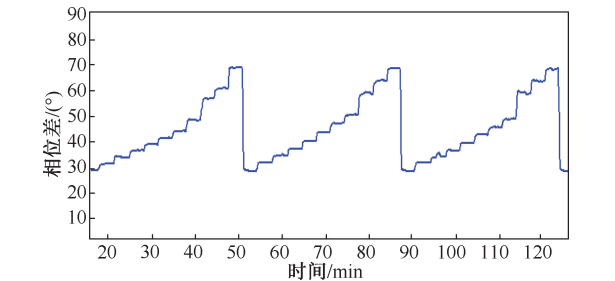


图 2 井下流量计流量点优化设计后流量台阶

Fig. 2 Flow steps of flow point of downhole flowmeter after optimization design

5 结论

(1)井下流量计校准时,基于雷诺数的流量校准点优化设计,可以极大减少临界流量、校准曲线拐点、电磁流量计标准器流道切换点等特定流量值或一定流量校准区间对校准精度的影响。

(2)针对流量校准精度影响因素采取有效措施,可以有利于提高流量校准曲线台阶平稳性,减少因流量校准点设定不合理造成的示值超差现象,井下流量计校准成功率显著提升。

(3)基于雷诺数的流量校准点新方法的应用,提高了流量校准点设定的可操作性,可以有效提高井下流量计流量校准精度,从而提高井下流量计流量校准质量。

致谢:感谢大庆油田测试技术服务分公司同意本论文公开发表。

参考文献

[1] 孙国民,孙晓雷,高良艳,等. 超声波流量计在油田测试中的应用[J]. 油气田地面工程,2003,22(1):29-30.
SUN Guomin, SUN Xiaolei, GAO Liangyan, et al. Application of ultrasonic flowmeter in oilfield test [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2003,22(1):29-30.

[2] 王绍峰. 电磁流量计测井在注入剖面测井中的应用[J]. 石油天然气学报,2005,27(2):404-405.
WANG Shaofeng. Application of electromagnetic flowmeter logging in injection profile logging [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005,27(2):404-405.

[3] 郑波,缪立南. 试井仪器组合验封技术的研究与应用[J]. 石油管材与仪器,2015,1(5):52-54.
ZHENG Bo, MIAO Linan. Combined well-test instruments used in packer test [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015,1(5):52-54.

[4] 王进宝,李立文,周祚军,等. 相关流量测试技术在分注

- 井验封上的运用[J]. 油气井测试, 2016, 25(5): 63-64.
- WANG Jinbao, LI Liwen, ZHOU Zuojun, et al. Relevant flow test technology applied in seal test to separated injection well [J]. Well Testing, 2016, 25(5): 63-64.
- [5] 陈必威, 李俊武. 分层测试技术适应性分析及提高注水合格率研究[J]. 测井技术, 2006, 30(2): 177-179.
- CHEN Biwei, LI Junwu. On adaptability for zonal testing technology and improvement of water injection effect [J]. Logging Technology, 2006, 30(2): 177-179.
- [6] 张秋平, 黄海, 艾鑫. 几种注入剖面测井方法对比分析[J]. 石油化工应用, 2010, 29(4): 26-30.
- ZHANG Qiuping, HUANG Hai, AI Xin. Several injection profile logging methods were compared [J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(4): 26-30.
- [7] 徐兴安, 张凤辉, 杨万有, 等. 渤海油田分层注水测试新技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(4): 51-56.
- XU Xing'an, ZHANG Fenghui, YANG Wanyou, et al. New testing technology of layered water injection in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2019, 28(4): 51-56.
- [8] 国家发展改革委员会油气计量及分析方法专业标准化技术委员会. SY/T 6675-2007 井下流量计校准方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-4.
- [9] 大庆油田有限责任公司测井测试专业标准化技术委员会. Q/SY DQ1223-2008 井下存储式超声波流量计校准方法[S]. 大庆: 大庆油田有限责任公司, 2008: 1-4.
- [10] 石油工业标准化技术委员计量校准规范组. 注水并分层流量实时测调仪校准方法: SY/T 6977-2014[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-5.
- [11] 大庆油田有限责任公司测井测试专业标准化技术委员会. 注入剖面组合测井仪维修校准规程: Q/SY DQ 0443-2008 [S]. 大庆: 大庆油田有限责任公司, 2008: 1-6.
- [12] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003: 16-21.
- [13] 胡天浩. 井下超声波流量计误差分析[J]. 油气井测试, 2009, 18(1): 66-67.
- HU Tianhao. Error analysis about downhole ultrasonic flowmeter [J]. Well Testing, 2009, 18(1): 66-67.
- [14] 张秋平. 边测边调井下流量计检定影响因素[J]. 石油化工应用, 2012, 31(6): 42-46.
- ZHANG Qiuping. The underground flowmeter the edge the verification influencing factors [J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(6): 42-46.
- [15] 张秋平. 注入剖面井下流量计校准曲线拐点研究[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(3): 24-27.
- ZHANG Qiuping. Inflection point of calibration curve of injection profile downhole flowmeter [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019, 5(3): 24-27.
- [16] 张扬洋. 稳定距离对井下存储流量计校准结果的影响[J]. 石油管材与仪器, 2018, 4(5): 64-66.
- ZHANG Yangyang. Stable distance influence on calibration results of underground storage flowmeter [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2018, 4(5): 64-66.
- [17] 朱振国, 陆广玉, 金东丽, 等. 关于井下流量计检定模拟井建立的探讨[J]. 计量技术, 2006(9): 53-55.
- ZHU Zhenguo, LU Guangyu, JIN Dongli, et al. Discussion on the establishment of simulation well for downhole flowmeter verification [J]. Measurement Technique, 2006(9): 53-55.
- [18] 孙冠男. 超声波流量计在油田测试中的应用分析[J]. 石化技术, 2018, 25(12): 268.
- SUN Guannan. Application of ultrasonic flowmeter in oilfield testing [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(12): 268.
- [19] 黄逸仁. 非牛顿流体流动及流变测量[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 142.
- [20] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 90.
- [21] 蔡一全, 宫敬. 水力光滑圆管临界雷诺数的确定[J]. 油气储运, 2004, 23(9): 23-25, 61.
- CAI Yiquan, GONG Jing. The determination on the critical Reynolds number of the smooth pipe [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(9): 23-25, 61.
- [22] JAMAL M. S. 邓敦夏(译). 流体流动手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 55.
- [23] 杨树人, 汪志明, 何光渝, 等. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 46-47.
- [24] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲, 等. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 124-131.
- [25] 王星富. 气井放喷过程中的气液混合流量测量[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- WANG Xingfu. Measurement of gas-liquid mixing flow in gas well discharge process [J]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [26] 中国石油天然气集团公司职业技能鉴定指导中心. 仪表维修工[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011: 59-63.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 刘立, 男, 1970年出生, 工程师, 2005年毕业于哈尔滨工程学院计算机专业, 现主要从事生产测井仪器维修、校准及管理工作。电话: 0459-5298956, 15304698291; Email: dlts_liuli@petrochina.com.cn。通信地址: 黑龙江省大庆市红岗区图强东街7号, 邮政编码: 163414。