

文章编号: 1000-8241(2017)04-0426-04

# 管输油流静电监测与联锁控制技术及其试验应用

李亮亮 孙立富 刘全桢 李义鹏 宫宏 孟鹤

中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院/化学品安全控制国家重点实验室

**摘要:** 为解决管输油流因静电带电可能引发的静电安全问题,提出了管输油流电荷密度监测与联锁控制系统的设计思路与实现方案。研究了测量输油管道内中心电位得到油流静电电荷密度的检测原理,基于杆球传感器设计开发了油品电荷密度表;利用该油品电荷密度表,结合溢油静电保护控制器,组成管输油流静电监测与联锁控制系统,并在国内首次开展了油库装车过程油流静电电荷密度监测与联锁控制现场试验。现场试验结果表明:测试数据很好地反映了油罐车装油时的静电起电情况,该技术有效提高了油流静电监测能力,可基于此技术控制输油过程,确保油品输送安全。(图3,表2,参20)

**关键词:** 输油管道; 静电安全; 电荷密度; 油流静电监测; 联锁控制

中图分类号: TE89

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.04.012

网络出版时间: 2016-9-30 11:44:29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20160930.1144.008.html>

## Electrostatic monitoring and interlocking control technology for pipeline oil flow and its test application

LI Liangliang, SUN Lifu, LIU Quanzhen, LI Yipeng, GONG Hong, MENG He

SINOPEC Research Institute of Safety Engineering/State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals

**Abstract:** When oil is transported through pipelines, electrostatic safety accidents may be caused by the static electricity of oil flow in pipelines. In order to solve this problem, the design idea and implementation scheme of pipeline oil-flow charge density monitoring and interlocking control system were proposed. The principle of detecting oil-flow electrostatic charge density by measuring the central potential in the oil pipeline was studied. Oil product charge density gauge was designed and developed on the basis of rod ball sensor. This gauge, together with oil-spill electrostatic protector, constitutes the pipeline oil flow electrostatic monitoring and interlocking control system. And this system was, for the first time, used on site for the monitoring and interlocking control of oil-flow electrostatic charge density in the process of oil loading at an oil depot in China. It is shown that testing data can reflect the static electrification situations while the oil is loaded onto tank trucks and this technology improves the oil-flow electrostatic monitoring capacity effectively. If this technology is used for oil transportation process control, the safety of oil production transportation can be guaranteed. (3 Figures, 2 Tables, 20 References)

**Key words:** oil pipeline, electrostatic safety, charge density, oil-flow electrostatic monitoring, interlocking control

油品的静电燃爆事故多发生在油品装卸等操作过程中<sup>[1-5]</sup>,如果能对油品装卸过程中的静电参数进行实时监测,在油品静电存在风险的情况下采取停止装卸等控制措施,则可有效避免油品装卸静电燃爆事故的发生,保障安全生产<sup>[6-8]</sup>。油面电位和带电量是表征油品静电非常重要的两个参数,可以分别采用EST202油面电位测量系统和法拉第筒法进行检测<sup>[9-13]</sup>。其中,

EST202油面电位测量系统因浮球安装困难,不适用于在线监测;法拉第筒法可以检测油流带电量的大小和极性,但注油速度太快会导致油液喷溅。因此,上述方法均难以实现对油品静电的实时监测。从油品静电安全角度考虑,建立简便、高效的管输油品静电监测系统,将安全控制端口提前至输油管道,对提高输油作业安全水平至关重要<sup>[14-15]</sup>。

## 1 油流静电监测与联锁控制系统

油流静电监测与联锁控制系统包括:①检测油流电荷密度的油品电荷密度表;②发出警报或直接控制输油进程的联锁控制系统。

### 1.1 油品电荷密度表

#### 1.1.1 检测原理

针对无限长接地金属输油管道,假设油流的静电电荷均匀分布,根据高斯定理可得管道断面内任意一点的电位为<sup>[16]</sup>:

$$V_r = \frac{\rho}{4\varepsilon}(r_0^2 - r^2) \quad (1)$$

式中:  $V_r$  为管道断面内任意一点的电位, V;  $\rho$  为油流电荷密度, C/m<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  为油品介电常数, F/m;  $r_0$  为管道半径, m;  $r$  为管道断面内任意一点到圆心的距离, m。

当  $r=0$  时,根据式(1)可得油流电荷密度:

$$\rho = \frac{4\varepsilon V_0}{r_0^2} \quad (2)$$

式中:  $V_0$  是管道中心油品的电位, V。

#### 1.1.2 结构设计及工作原理

油品电荷密度表主要由杆球传感器、压电陶瓷耦合谐振装置及数据处理系统组成(图1)。

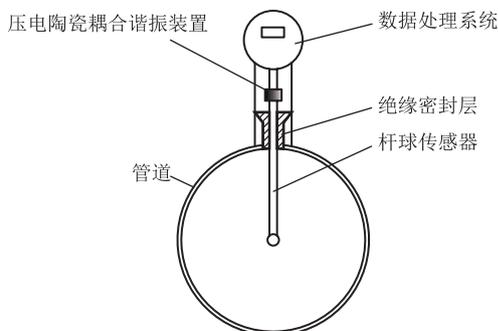


图1 油品电荷密度表结构示意图

油品电荷密度表通过法兰接入输油管道,杆球传感器的直杆部分通过绝缘密封层固定在连接孔上,球头部分置于管道中央采集油流带电信息。压电陶瓷耦合装置将杆球传感器采集的带电信息转化为电流信号,其工作原理是:基于压电陶瓷-金属双迭片弯曲型压电传感器原理,将压电陶瓷圆片作为电容器一极板,在外电场的作用下会产生形变而发生谐振。谐振频率  $f_r$  的经验公式为<sup>[17]</sup>:

$$f_r = K \frac{h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{A(1-\mu^2)}} \quad (3)$$

式中:  $K$  为待定常数,可通过测试获得;  $h$  为压电陶瓷片厚度, m;  $R$  为金属膜片的半径, m;  $E$  为金属膜片材料的杨氏模量, N/m<sup>2</sup>;  $A$  为金属膜片和压电陶瓷片的复合等效密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mu$  为泊松比。

外电场作用导致电容因极板间距变化产生一个交变振荡的电流信号,电流的大小间接反映了待测静电的电压。利用非接触式的压电陶瓷耦合谐振装置,将带电油品的静电信息传输至数据处理系统,获得管输油流的静电体电荷密度数据。

油品电荷密度表经特殊防爆设计,符合 GB 3836.1—2010《爆炸性环境第1部分:设备通用要求》和 GB 3836.4—2010《爆炸性环境第4部分:由本质安全型“i”保护的防爆标准》。

#### 1.1.3 实验室样机校准测试

在实验室对 50 mm、100 mm 及 200 mm 管径的油品电荷密度表样机分别进行了测试。测试时在样机杆球上接高压电源输出端,法兰端接地,改变高压电源电压测试得到样机电荷密度。根据式(2)计算得到该高压电源电压下的电荷密度,并与测试值进行对比(表1)可见,油品电荷密度表样机满足设计要求。

表1 不同管径下油品电荷密度表样机测试值与计算值对比

管径/mm	高压电源电压/V	电荷密度/( $\mu\text{Cm}^{-3}$ )	
		测试值	计算值
50	530	60	60.02
	353	40	39.98
	264	30	29.90
	175	20	19.82
	88	10	9.97
100	2 123	60	60.14
	1 412	40	40.00
	1 071	30	30.34
	706	20	20.00
	352	10	9.97
200	8 463	60	60.02
	5 641	40	40.01
	4 229	30	29.99
	2 821	20	20.01
	1 412	10	10.01
	705	5	5.00
	140	1	0.99

#### 1.1.4 主要特点和技术指标

油品电荷密度表可实现在线监测,将现场采集的静电信息无线传输至中央控制室或设备终端,实现远距离监控;通过国家安全防爆认证,适用于所认证安全级别的各种防爆场合,具有全天候、无间断、免维护、安全性能高的特点,各项技术指标可满足现场应用的实际需求(表2)。

表2 油品电荷密度表主要技术参数

防爆等级	输入电压/V	工作电流/mA	工作温度/℃	工作湿度%	电荷密度/( $\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-3}$ )	
					测试精度	测试范围
Ex ib IIB T3 Gb	外接供电 DC 3~5	<100	-20~50	<85	±0.1	-99~99

1.2 联锁控制系统

灌装油品时,油库等常采用溢油静电保护器来监测罐车的液位和接地情况<sup>[18-19]</sup>。当液位达到上限或接地电阻值超标时,语音提示报警,并输出关闭信号至定量装车系统,停止发油。通过改造溢油静电保护器,将油品电荷密度表输出信号作为其控制器一次仪表信号,即可组成油流静电监测与联锁控制系统(图2)。

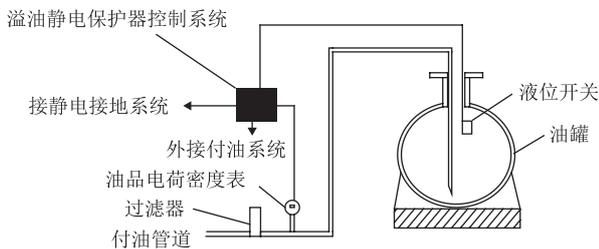


图2 油流静电监测与联锁控制系统组成示意图

2 现场试验

2.1 设备安装

油品电荷密度表安装在某油库付油管道过滤器后的管道(管径 100 mm)上。将油品电荷密度表输出信号作为溢油静电保护器控制器一次仪表信号,组成油库联锁控制系统,控制油库装车过程,一旦超过设定阈值( $30\ \mu\text{C}/\text{m}^3$ )<sup>[20]</sup>,则发出警报信号。

2.2 测试结果

在试验过程中,油库采用上装式发油(93# 汽油),装油速率为 204 L/min,测试温度为 17.3 ℃,相对湿度为 37%,从 3 次检测结果(图 3)可知,检测的油流电荷密度均为负值。由于油流与管壁、过滤器等的摩擦,在装油初始阶段 a 时间点油流带电量迅速增加并趋于稳定(-19~-20  $\mu\text{C}/\text{m}^3$ ),峰值达到 -20.44  $\mu\text{C}/\text{m}^3$ ;分别

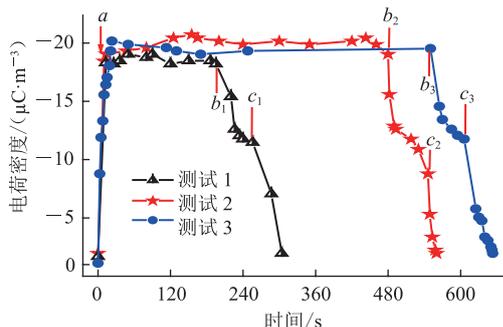


图3 油库装车过程静电检测数据

从  $b_1$ 、 $b_2$  及  $b_3$  时间点开始减速装油,油流速度降低,电荷密度逐渐下降;到  $c_1$ 、 $c_2$  及  $c_3$  时间点完全停止装油,电荷密度迅速下降。测试数据很好地反映了油罐车装油时的静电起电情况,油流静电监测达到了预期的应用效果。

油品电荷密度表在现场试验过程中,由于预先设置的报警/停车阈值为  $30\ \mu\text{C}/\text{m}^3$ ,测试过程油流电荷密度低于报警阈值。通过调低报警阈值,可使油品电荷密度表发出报警信号,并反馈溢油静电保护器发出停止装油指令,达到了联锁控制装车的目的。

3 结论

鉴于现有油品静电检测技术存在不足,提出了一种管输油流体电荷密度的检测方法。利用油品电荷密度表输出信号作为溢油静电保护器的一次仪表信号,可组成装车过程管输油流电荷密度监测与联锁控制系统,控制油品装卸作业。首次在国内开展了油库装车过程油品静电监测与联锁控制现场应用,测试数据很好地反映了油罐车装油时的静电起电情况。结果表明:通过设定管输油流静电阈值,将安全控制端口提前至输油管道上监测油品带电量的变化,对确保油品输送安全具有重要作用。

参考文献:

[1] SHI L, SHUAI J, XU K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278: 529-538.  
 [2] BRITTON G, WALMSLEY L. Static electricity: New guidance for storage tank loading rates[J]. Process Safety Progress, 2012, 31(3): 219-229.  
 [3] 卢大刚. 燃料油装卸过程中静电的产生及消除措施[J]. 油气储运, 2013, 32(4): 431-433, 438.  
 LU D G. Static generation and elimination measures during the fuel oil handling[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(4): 431-433, 438.  
 [4] 蒋国辉, 张晓明, 闫春晖, 等. 国内外储罐事故案例及储罐标准

- 修改建议[J]. 油气储运, 2013, 32(6): 633-637.
- JIANG G H, ZHANG X M, YAN C H, et al. Worldwide tank accidents and tank standards revision advices[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(6): 633-637.
- [5] WALMSLEY L. Electrostatic ignition hazards with plastic pipes at petrol stations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(2): 263-273.
- [6] HE M, MA Q C, ZHANG L B. Numerical study on electrostatic potential distribution of large cylindrical oil tanks[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 75: 77-84.
- [7] WALMSLEY L. Voltage calculations for annular tanks partly-filled with charged liquid[J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71: 1011-1019.
- [8] WALMSLEY L. The electrostatic potentials generated by loading multiple batches of product into a road tanker compartment[J]. Journal of Electrostatics, 1996, 38(3): 177-186.
- [9] 李义鹏, 刘全桢, 孙立富, 等. 油罐车卸油前静置时间试验[J]. 油气储运, 2015, 34(10): 1077-1079.
- LI Y P, LIU Q Z, SUN L F, et al. Tests for holding time before unloading of oil tanker[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(10): 1077-1079.
- [10] 李义鹏, 刘全桢, 孙立富, 等. 加油站卸油过程中油品静电特性的测试试验[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 673-675.
- LI Y P, LIU Q Z, SUN L F, et al. Testing of oil electrostatic properties in oil unloading process at service station[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 673-675.
- [11] CHOI K S, YAMAGUMA M, OHSAWA A. Electrostatic charges during liquid leakage[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23: 294-299.
- [12] 李义鹏, 孟鹤, 孙立富, 等. 大型车辆加油过程静电危险因素的分析及试验研究[J]. 石油库与加油站, 2015, 24(1): 15-17.
- LI Y P, MENG H, SUN L F, et al. Analysis on electrostatic risk factors of large vehicle refueling process[J]. Oil Depot and Gas Station, 2015, 24(1): 15-17.
- [13] WALMSLEY L. Threshold potentials and discharge charge transfers for the evaluation of electrostatic hazards in road-tanker loading[J]. Journal of Electrostatics, 1991, 26(2): 157-173.
- [14] 杨笑源, 赵晓刚. 管输油流静电产生的影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(5): 87-91.
- YANG X Y, ZHAO X G. Analysis of factors affecting static electricity generated in petroleum pipeline[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(5): 87-91.
- [15] 田强, 周邵骑, 刘凯, 等. 流速对管输油品静电的影响[J]. 油气储运, 2013, 32(2): 203-206, 222.
- TIAN Q, ZHOU S Q, LIU K, et al. Impact of flow rate on the static electricity of products in pipelining[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(2): 203-206, 222.
- [16] 金太东. 管输油品电荷密度测量装置的设计与研究[J]. 测控技术, 2002, 21(3): 23-24.
- JIN T D. Monitor & control system for electrostatic charge density[J]. Measurement & Control Technology, 2002, 21(3): 23-24.
- [17] 胡晓冰, 李龙土, 任飞, 等. 双迭片弯曲压电陶瓷换能器及振动模态分析测量[J]. 功能材料, 2002, 33(6): 661-663.
- HU X B, LI L T, REN F, et al. Bimorph flexural piezoelectric ceramic transducer and measurement of its resonance modes[J]. Journal of Functional Materials, 2002, 33(6): 661-663.
- [18] 付石, 谢海林. 油库自动化系统应用现状[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 252-256.
- FU S, XIE H L. Application status of automation system in oil tankfarm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(3): 252-256.
- [19] 李树成. 基于 PLC 的成品油自动装车控制系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(3): 115-117.
- LI S C. The design of automatic loading of product oil control system based on PLC[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2016(3): 115-117.
- [20] 中国石油化工集团公司安全环保局. 静电安全教育读本[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 60-61.
- SINOPEC Safety & Environmental Protection Bureau. Knowledge of electrostatic safety[M]. Beijing: China Petrochemical Press Co. Ltd., 2007: 60-61.

(收稿日期: 2015-12-17; 修回日期: 2017-02-18; 编辑: 王雪莉)

**基金项目:** 中国石化科技部装储处科研项目“油品静电在线监测与联锁控制技术研究”, 313053; 中国石化科技部装储处科研项目“管线油品静电智能消除技术研究及应用”, 316014。

**作者简介:** 李亮亮, 男, 1987年生, 工程师, 2014年博士毕业于中国科学院合肥物质科学研究院凝聚态物理专业, 现主要从事雷电、雷电安全防护技术的研究工作。地址: 山东省青岛市崂山区松岭路339号, 266100。电话: 0532-83786989, Email: lill.qday@sinopec.com