油气钻井井场防雷击理论及实践

王 豫　谭刚强　孟 军　王黎清　王五一　沈凡儿
中国石油天然气集团公司川庆钻探工程有限公司

王豫等.油气钻井井场防雷击理论及实践.天然气工业,2010,30(12):100-103.

摘　要　钻井井场防雷击是一个系统工程,涉及多种复杂设备,需要满足防火防爆防雷等耐环境特殊要求,不是普通防雷厂家在井场简单地安装防雷器所能解决的。针对川渝高雷暴地区雷击风险高的特点,中国石油天然气集团公司川庆钻探工程公司对钻井井场专用防雷击系统进行了科技攻关,开展了钻井井场防雷接地、井场总等位联结和井场接零保护等理论研究,将电气保护、防静电和防雷击 3 者有机结合起来,形成油气钻井井场防雷击实用理论,并将该理论应用于钻机总体设计、改造及安装。两年多来,在川渝地区 68 台钻机上进行了应用,结果证明,该理论在降低井场直击雷损失和预防感应雷方面起到了重要作用。同时,在使用中发现了该系统存在的问题,制订了相应的整改措施,并指出采取屏蔽和均压方法可将直击雷损失降到最低,以及功能地与现场故障地错误联结的危险性。

关键词　钻井井场　防雷击　理论　实践　川渝地区　中国石油天然气集团公司川庆钻探工程有限公司
DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.12.024

针对川渝高雷暴地区雷击风险高的特点,中国石油天然气集团公司川庆钻探工程公司开展了钻井井场专用防雷击系统科研项目研究,建立了井场防雷击实用理论,在川渝地区井场推广实施后取得了显著效果。但是,项目推广后仍有个别井场产生雷击损失,笔者针对这些损失,找出了存在的问题,制订了相应的整改措施。

1　井场防雷击理论简介

1.1　雷电形成原理概述

通常闪电包括云内闪电、云际闪电和云地闪电 3 种。雷云雨在井架等设备上的直接放电,称为“直击雷”。不论何种闪电,都会产生雷击电磁脉冲(LEMP)即“感应雷”,并在井场设备上产生浪涌电压,“感应雷”的形式有静电感应、电磁感应、电磁脉冲和雷电反击等。

1.2　井场防雷击的基本措施

防雷击的基本措施主要包括消雷、屏蔽、均压和分流。消雷是针对直击雷而言,通过避雷针和接地体将雷击电流引入大地,通过散流电阻向大地散入电流,即散流;屏蔽是利用法拉第笼原理保护设备;均压是将金属导体与等电位母线联结后接入大地,雷击电流通过等电位母线直接散入大地;分流是通过防雷器保护设备,当雷击电位升高到保护电压时,防雷器电阻下降,雷击浪涌电流通过防雷器散入大地。井场采取消雷、屏蔽和均压措施即可起到很好的防雷作用,只对弱电设备和重要仪器房的入户电源采取分流措施。

1.3　井场防雷接地理论[1]

1)钻机主机接地将主机(井架、钻机)、柴油机房、泥浆循环系统、泥浆泵房、录井房、发电房、油水罐、野营房等金属结构用一根电缆连接起来,形成总等电位联结母线,并在多处非防爆区域重复接地。钻机底座直接放在地面上的水泥基础上,石油套管通过水泥固定在地层内。钻进时,套管内的泥浆不断进入井底,并循环返回泥浆罐,使套管与井底形成离子导电通道。套管头通过方井与地面形成离子导电通道,套管中部与底部均通过水泥中的气泡水分接地。所以,井筒实

基金项目:四川石油管理局 2008 年度科研项目“石油井场专用防雷击系统”(编号:2008 科通字第 35 号),该项目获川庆钻探工程有限公司 2009 年度科技进步一等奖。

作者简介:王豫,1963 年生,高级工程师,仪器仪表工程硕士,2006 年毕业于西安石油大学并获工程硕士学位;主要从事石油钻井装备技术管理工作。地址:(610051)四川省成都市府青路 1 段 3 号。电话:(028)86011467,13908220568。E-mail:wyu_sc@sina.com.cn

际上成为一个巨型接地体,钻机底座通过井控管线与井筒相连形成接地通道。井架固定在钻机底座上,偏房、司控房固定在钻台上。经实测,钻机底座、井架、偏房、司控房的固定共同构成了主机的接地装置,接地性能很好。

但是,录井房、发电房、电控房、顶驱房与钻机井架距离较远,钻机井架能否起到避雷针的作用,取决于土壤电阻率等多种因素。

2)钻机主机接地电阻及对地电压

由欧姆定律得土壤散入电流时的散流电阻和接地装置散流电阻:

$$\mathrm{d}R_{\mathrm{d}} = \rho\frac{\mathrm{d}r}{2\pi r^2} \tag{1}$$

$$R_{\mathrm{d}} = \int_{r_0}^{\infty}\mathrm{d}R_{\mathrm{d}} = \int_{r_0}^{\infty}\frac{\rho}{2\pi r^2}\mathrm{d}r = \frac{\rho}{2\pi r_0} \tag{2}$$

式中 $\mathrm{d}R_{\mathrm{d}}$ 为土壤散流电阻;R_{d} 为钻机对地电阻;r_0 为钻机底座与人体接触处距井口中心的距离;ρ 为土壤电阻率;r 为人体距井口中心的距离。

由式(1)和(2)可得钻机对地电压和对地电阻

$$U_{\mathrm{d}} = \frac{\rho I_{\mathrm{d}}}{2\pi r_0} = R_{\mathrm{d}} I_{\mathrm{d}} \text{ 或 } R_{\mathrm{d}} = \frac{U_{\mathrm{d}}}{I_{\mathrm{d}}} \tag{3}$$

式中 U_{d} 为钻机对地电压;I_{d} 为散入电流。

由式(3)可知,对地电压 U_{d} 取决于钻机接地电阻,而钻机接地电阻取决于钻机主机接地装置。

钻机主机接地装置包括井架到底座至套管的电阻、套管至井口/井底土壤间的过渡电阻、井口/井底大地的散流电阻。如果井架到底座以及底座到井控管线的连接可靠,这部分电阻可忽略不计;但若因油漆绝缘性能良好及采用非金属连接方式,无法形成良好的接地通道,则必须采取恰当措施。井架及底座至套管间形成良好的接地通道,其电阻可忽略不计。套管至井口/井底土壤间的过渡电阻可忽略不计。因此,在钻机井控管线与钻机底座之间采取正确的措施后,可将井筒直接视为钻机接地装置的人工类型的单根接地体,钻机接地装置的对地电阻 R_{d} 与土壤的电阻率 ρ 成正比,与接地体即石油套管半径成反比。

井架和石油套管远远超出常规的接地体尺寸,因此一般认为石油钻机井架就是最好的巨型避雷针,石油套管就是最好的巨型接地体。当钻台上工频下某相绝缘破坏或设备外壳带电时,触摸带电设备外壳时的接触电位为 U_{d},身体站立处的电位为 U_1:

$$U_1 = \frac{\rho I_{\mathrm{d}}}{2\pi(r_0 + 0.8)} \tag{4}$$

施加在人体上的电压(U_{k})为:

$$U_{\mathrm{k}} = U_{\mathrm{d}} - U_1 = \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0 + 0.8}\right)\frac{\rho I_{\mathrm{d}}}{2\pi} \tag{5}$$

由图 1 和式(5)可知,在井架与套管之间形成可靠接地通道的前提下,钻机对地电位分布曲线即双曲线非常平缓,在工频下主机电气设备某相绝缘破坏或设备外壳带电以及井架遭受直击雷的情况下,操作者在主机附近的接触电压和跨步电压都比常规避雷装置低,这也是井场很少发生操作人员因主机漏电或雷击发生触电事故的原因。更为重要的是,接地良好情况下,形成了良好的防雷接地通道,当钻机遭受直击雷时能够迅速释放。

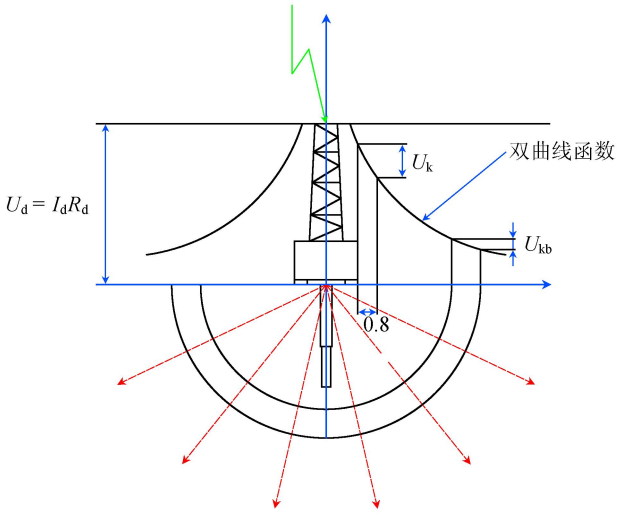

图 1 石油套管对地电位分布曲线图

注:U_{kb}为跨步电位差

3)钻机接地的电感特性

对于带有机房的钻机,其金属底座较长较宽,在潮湿环境下有可能通过离子导电形成水平布置的接地体。由于雷电流的等值频率很高,可能使这个大型接地体呈现出自身的电感特性,阻碍雷电流向远端接地体流通,使石油套管这种接地体得不到充分利用,造成冲击接地电阻大于工频接地电阻,这种现象称为电感效应。良好的接地体需要冲击电阻小于工频接地电阻,即火花效应。这也是有些带机房的钻机防雷性能不稳定的原因之一,造成了雷击损失大小不一的奇怪现象。

1.4 井场总等电位联结理论[2]

1.4.1 井场总等电位联结母线概念的提出

主等电位联结是将所有金属导体尽量与等电位端子相连,但由于其联结线数量太多,无法实施。因此,假定将主等电位联结端子箱内的母排延伸为一根一定长度的等电位联结母线,即井场总等电位联结母线,如

果能达到等电位的效果,将具有实用意义。

1.4.2　井场总等电位联结母线的理论推导

1.4.2.1　电位差与稳恒电场

经推导可得到下式:

$$\nabla \cdot \vec{j_0} = -\frac{\partial \rho_0}{\partial t} = 0 \qquad (6)$$

即得到稳恒电场自由电荷密度不随时间改变的条件公式(即稳恒电流条件)。式中 j_0 为传导电流密度,ρ_0 为自由电荷密度。

由 $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ 可知,稳恒电流的磁场为稳恒场,磁场不随时间改变。其中 B 为磁感应强度,t 为时间。这个稳恒场结论是井场总等电位的理论基础。

1.4.2.2　静电场与等电位联结端子的理论基础

等电位端子达到静电平衡时,根据电位差定义,端子内任意两点 x_1、x_2 的电位差为

$$U_{x_1 x_2} = \int_{x_2}^{x_1} E \cdot \mathrm{d}l = 0 \qquad (7)$$

式中 E 为静电场强度,l 为等电位端子长度。

由此得出端子内各点电位相等,端子表面是等位面,因此在静电场下,端子是等电位体。

1.4.2.3　雷击电场与井场总等电位联结母线的理论基础

经推导[1],将主电位端子延伸一定长度成为井场总等电位联结母线的条件为

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \approx 0 \text{ 或 } \lambda \gg L \qquad (8)$$

式中 λ 为电流波长,L 为总等电位联结母线长度。

1.4.2.4　波长与母线长度

1)工频电流

电磁波传播速度 $C \approx 30\times10^7$ m/s,取 $L=150$ m。工频交流电压的 1/4 波长为

$$\frac{\lambda}{4} = 0.02 \times C/4 = 0.02 \times 30 \times 10^7/4$$
$$\approx 1\,500(\mathrm{km}) \gg L$$

2)雷击电流

“8/20”雷击电流陡波的 1/4 波长为

$$\frac{\lambda}{4} = 8\times10^{-6} \times C/4 = 8\times10^{-6} \times 30 \times 10^7/4$$
$$\approx 600(\mathrm{m}) \gg L$$

按雷电流的等效频率 10 kHz 计算,其 1/4 波长为

$$\frac{\lambda}{4} = 10^{-4} \times C/4 = 10^{-4} \times 30 \times 10^7/4$$
$$\approx 7\,495(\mathrm{m}) \gg L$$

所以,雷电脉冲下,母线仍满足似稳条件,母线中可近似视为等电位母线。

根据以上推导及实际应用,在川庆钻探工程公司的 QSYCQZ/037—2008 标准中规定,井场总等位联结母线最大长度为 150 m。

1.5　井场接零保护概述[3]

国家标准《施工现场临时用电安全技术规范》规定:在施工现场专用电源为中性点直接接地的电力线路中,必须采用 TN-S 保护接零系统,即电气设备的金属外壳必须与 PE 连接。国家标准《工业与民用电力装置的接地设计规范》规定,中性点接地系统宜采用接零保护。

采取总等电位联结和辅助总等电位联结两种措施,可提高自动供电切断措施的可靠性和有效性,消除用电安全隐患,同时可成为防雷的“大地”基础。

2　井场专用防雷击系统应用中常见问题及整改措施

建立井场专用防雷击理论后,形成了川庆钻探工程公司《石油天然气井场防雷技术规范》,在川渝地区井场使用后,达到了预期效果。但在应用后,个别井队仍有雷击损失,经调查研究,原因是未认真执行标准。

2.1　井场视频系统雷击损失与整改措施

视频系统即井场视频监视系统,其摄像头分别安装于二层台、钻台、振动筛、循环罐及泵房等。按照井场专用防雷击系统要求,二层台摄像头应安装于井架内侧,视频电缆应安装于井架笼梯内,井场内视频电缆线均应安装于屏蔽于金属结构内。雷击损坏原因主要包括安装错误和接地错误两种,具体情况如下:

2.1.1　安装错误及整改措施

二层台摄像头尾部在井架外侧,因其金属外壳感应出静电,直击雷击中摄像头外壳,雷击电流顺着电缆进入摄像头内,烧毁其电路板。

整改措施如下:

1)调整二层台摄像头安装位置,使摄像头置于井架内侧。

2)如果无法躲开井架内绞车钢丝绳的撞碰,摄像头尾部只能置于井架外侧,可将摄像头置于屏蔽金属外壳内。

3)摄像头视频井架段电缆置于井架笼梯内,其余段置于金属屏蔽结构内。特别注意不能将电缆顺着管道或结构件外敷设,防止因耦合作用在电缆内产生雷击耦合电流。

2.1.2　接地错误

直流电源 0 V 与金属外壳连接,雷击时浪涌电流烧坏所有摄像头直流电源电路,将直流电源 0 V 与金

属外壳隔离即可。

2.2 综合录井仪及钻井参数仪雷击损失与整改措施

综合录井仪雷击损失的原因主要是未采取保护措施和接地错误。

2.2.1 保护错误

综合录井仪安装了防雷器的录井终端,均没有雷击损失;录井队自行取消了录井终端防雷器的,存在雷击风险。卫星远传系统没有安装天馈防雷器,因此有雷击损失。

整改措施:①安装录井终端防雷器,采取正确的接地方式;②卫星远传系统摄像头安装屏蔽金属盒,采取正确的接地方式,同时在主机视频输入接头处安装天馈防雷器。

2.2.2 接地错误

包括绞车传感器、出口流量、温度、悬重、立压等传感器、室内接口箱 E 板及工作站工控机等接地错误:①录井房输出端未接地,部分传感器输出端未接地,使传感器屏蔽层失效;②信号地、数字地与电源接地混接,综合录井房内传感器 24 V 直流电源的 0 V 错误接地,与 PE 相连即与房体外壳相通,当雷击时由于地电位升高,导致大部分传感器损坏;③部分录井传感器如出口流量、悬重、立压等传感器,由于裸露在井架外侧,当井架释放雷击电流时,可能在传感器外壳与井架之间产生电位差,导致放电烧坏传感器,同时也有可能因耦合作用,在传感器内产生浪涌电压,通过传感器共接的 0 V 通道损坏所有传感器;④部分传感器未采用双屏蔽电缆,不论输出端是否正确接地,都有可能因耦合作用产生感应电压,导致传感器损坏;⑤屏蔽措施不够,部分信号电缆基本上采取架空方式到循环罐,容易遭受感应雷,造成设备损坏;⑥综合录井房至井场总电位联结母线之间未接辅助等电位母线,造成雷击时地电位反击升高,造成综合录井仪与钻机之间的电位差,从而产生浪涌电流损坏综合录井设备。

整改措施:①在综合录井仪全面采取消雷、屏蔽、均压和分流等防雷措施;②安装录井终端防雷器,同时采取双屏蔽电缆,并在输出端处正确接地;③采用双屏蔽传感器电缆,并在输出端处正确接地;④采取独立的传感器直流供电系统,严禁将直流电源 0 V 与房体外壳相连;⑤裸露的传感器和摄像头应安装屏蔽外壳,并正确接地,防止遭受直击雷。

3 结论与认识

通过钻井井场专用防雷击系统的研发与推广应用,可得如下结论:

1)井场专用防雷击系统理论是降低井场直击雷损失和预防感应雷的行之有效的实用理论。

2)井场总等电位联结母线是电气保护、防雷和防静电的“大地”母线。因此应正确地安装和维护井场总等电位联结母线及辅助等电位母线。

3)直击雷不能完全预防但可降低其损失程度。对于裸露的摄像机、传感器等弱电设备,应采取屏蔽和均压方法,降低其直击雷损失。

4)感应雷可通过消雷、屏蔽和均压等方法进行预防,应正确采取措施。

5)弱电设备的直流电源 0 V、数字地、信号地等与金属结构相连时,当雷击时地电压升高,将造成连接在同一直流电源上的大部分传感器及主机损坏。

6)井场防雷击系统在会议室、队长室和录井房安装了交流电源防雷箱,打印机、电脑、传真机等弱电设备应通过插在防雷箱上的防雷插座供电,并应正确接地。

7)应及时检查维护防雷器,否则仍会造成雷击损失。

参 考 文 献

[1] 王豫.石油井场防雷接地研究[J].中国防雷,2007(5):37-40.

[2] 王豫,谭刚强,孟军,等.石油钻井井场防雷击系统研究报告[R].成都:川庆钻探工程有限公司,2008.

[3] 王豫,谭刚强,孟军,等.钻机接零保护技术研究与实践[J].石油矿场机械,2010,39(1):25-31.

(收稿日期 2010-08-18 编辑 赵 勤)