

西安石油大学

硕士学位论文

陕京管道站场区域性阴极保护技术研究

姓名：葛艾天

申请学位级别：硕士

专业：机械工程

指导教师：王荣;路民旭

20081008

论文题目：陕京管道站场区域性阴极保护技术研究

专 业：机械工程

硕 士 生：葛艾天 (签字)

指导教师：王 荣 (签字)

路民旭 (签字)

摘 要

区域性阴极保护技术是防止站库地下金属设施腐蚀的一项有效手段。我国的区域性阴极保护技术的发展相对落后，好多站场还没有应用阴极保护技术，同时在区域性阴极保护技术的实施过程中，对于阴极保护设计参数的选取，施工、检测的相关问题也缺乏系统的研究，如果参数选择不合适，施工过程不注意，不但会影响区域性阴极保护的保护效果，还会带来很大的安全隐患，因此开展区域性阴极保护技术研究，以为区域性阴极保护技术的设计、施工、测量和维护提供理论指导对于提高站区阴极保护效果、确保站区的安全具有重要的意义。

以陕京管道站场区域性阴极保护技术为研究对象，系统的讨论了区域性阴极保护技术在设计、施工、检测、效果评价等方面的注意事项，并将数值模拟技术应用于区域性阴极保护技术的效果预测，为区域性阴极保护技术在我国的应用提供了工程实践案例和大量的实测数据。

区域性阴极保护技术是将某一区域内的所有预保护对象当作一个整体来进行保护，具有保护区域内保护对象繁多、地下金属结构复杂、分布范围小、干扰和屏蔽现象严重、安全要求高等特点，因此在设计过程中要获得最佳的保护效果，需要综合考虑多种因素的影响，本文讨论了保护对象和保护电流密度的选取、阳极地床的设计、对绝缘和干扰问题的处理等问题。

根据站场内实际的管网分布情况，建立了区域性阴极保护体系的三维数学模型，计算了分布式浅埋阳极和深井阳极两种区域性阴极保护方案下的阴极保护电位分布，并和实际测量结果进行了对比，数值模拟计算结果和实测结果吻合较好，说明数值模拟技术可以用于区域性阴极保护的效果预测，对于提高区域性阴极保护设计方案的保护效果具有重要的意义。

结合陕京管线琉璃河、石景山、永清、通州南四个分输站场区域性阴极保护施工的具体实践，讨论了施工的注意事项，包括对设计和施工方案的要求以及对施工过程的要求。讨论了区域性阴极保护效果检测的内容并提供了详细的现场检测数据；讨论了区域性阴极保护技术的后期整改和调试。

关键词： 站场；区域性阴极保护；电位分布；数值模拟；施工；检测；整改调试

论文类型：应用研究

**Subject: A Study of Regional Cathodic Protection Technology for Gas Distribution
Station of ShanJing Pipeline**

Speciality: School of Machinery Engineering

Name: Ge Aitian (Signature) Ge Aitian

Instructor: Wang Rong (Signature) Wang Rong

Lu Minxu (Signature) Lu Minxu

Abstract

Regional cathodic protection can protect buried pipelines and facilities in stations from corrosion effectively, while it develops more slowly in China than foreign countries, and in many pump or compression stations of China, cathodic protection technology hasn't been adopted. At the same time, during the implementation of regional cathodic protection in stations, there exist many problems in the course of design, construction and inspection. Therefore, it is significative to carry out an research on regional cathodic protection for providing theoretical guidance for the design, construction, inspection and maintenance.

The regional cathodic protection in stations of Shan-jing pipeline is taken as the subject investigated and many problems existing in design, construction, inspection and effect evaluation are analyzed. Numerical simulation is applied to predict the effect of regional cathodic protection. The practical cases and a lot of measured data are provided for the application of regional cathodic protection in China.

In regional cathodic protection, all of the protective objects are protected as a whole, so there are various and complicated buried metal structures, which spread in a small scope, and there are serious interference and shielding, while higher safety is requested in stations. In order to acquire good protection, many factors should be considered during design, construction, inspection and maintenance, such as the choice of protective current, the design of anode bed, the disposal of insulation and interference, and so on.

According to the actual spread of pipe network in station, a 3-D mathematical model of regional cathodic protection is established. The cathodic protection potential distributions of distributed shallow anodes and deep well anodes are calculated and compared with measured data. A good agreement exists between them, which verifies the rationality of modeling ideas and the veracity of modeling methods. Numerical simulation can be used for effect prediction to improve the protective effect of regional cathodic protection.

The requirements for design and construction are analyzed combining with the material practice of regional cathodic protection, besides, the content of cathodic protection inspection are discussed and lots of inspected data on spot are provided. The rectification, improvement

and debugging after construction are also discussed in the paper.

Keywords: station; regional cathodic protection; potential distribution; numerical simulation; construction; inspection; rectification and debuggin

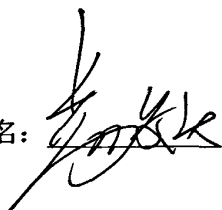
Thesis: Application Study

学位论文创新性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安石油大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：



日期：

2008.10.8

学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安石油大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安石油大学。学校享有以任何方法发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利，同时授权中国科学技术信息研究所将本论文收录到《中国学位论文全文数据库》并通过网络向社会公众提供信息服务。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署单位名称仍然为西安石油大学。

论文作者签名：



日期：

2008.10.8

导 师 签 名：



日期：

2008.10.10

·注：如本论文涉密，请在授权说明中指出（含解密年限等）。

第一章 绪 论

1.1 课题研究的背景和意义

阴极保护技术被公认为是金属腐蚀防护最经济最有效的方法。我国阴极保护技术的应用始于 1958 年^[1], 发展到现在, 全国的主要油气干线均采用了这项技术, 取得了良好的经济效益和社会效益。但是由于受技术的、观念的、安全的和经济的多方面的因素影响, 站(库)内的阴极保护技术远远落后于干线。输油泵站和输气管道中间站场, 站内空间区域较小, 生产设施如储油罐、压缩机、输油泵、加热炉和相连的工艺管网相对较集中, 分支较多, 构成复杂, 敷设方式有埋地、地沟、架空等多种方式, 都给站内采用常规的阴极保护带来一定的困难。最初大多数站内管线及金属设施防腐方法基本上都采用传统的外涂层物理防护方法, 由于防护程度有限, 随着时间的延长, 站库内埋地管网和储罐腐蚀危害已日益严重的暴露出来, 对于输油管线, 储罐的底板腐蚀穿孔时有发生, 这不但严重地影响了原油正常的储运、外输任务, 也造成了严重的环境污染问题对于输气管线; 对于输气管线, 由于输送介质为高压可燃气体, 一旦发生腐蚀穿孔导致泄漏, 将极易引发着火爆炸等恶性事故, 给企业和国家带来巨大损失。

区域性阴极保护技术是防止站库地下金属设施腐蚀的一项有效手段。该技术就是将某一区域内的所有预保护对象作为一个整体进行阴极保护, 依靠辅助阳极的合理布局、保护电流的自由分配以及与干线管道的电绝缘措施, 使被保护对象处于规定的保护电位范围之内。与常规阴极保护方法相比, 保护对象不是单一的, 而是一定区域内的金属结构复合体, 例如输气站场内分离、放空、排污管线及埋地汇管、防雷防静电接地网等空间几何布局复杂。我国的区域性阴极保护技术的发展还是相对落后, 在实施过程中, 对于阴极保护电流密度的选取, 阴极保护方式的选择, 阳极位置、埋深、数量等参数的确定, 区域内多保护电流回路之间的相互干扰和屏蔽等一系列问题的处理多依靠经验, 缺乏理论指导, 如果参数选择不合适, 势必会影响区域性阴极保护的保护效果, 因此开展区域性阴极保护技术研究, 以为区域性阴极保护技术的设计、施工、测量和维护提供理论指导对于提高站区阴极保护效果、确保站区的安全具有重要的意义。

陕京管道干线主要采用三层 PE 涂层外加强制电流阴极保护的防腐方式, 取得了较好的防腐效果。管道进出计量分输站、压气站和地下储气库工艺站场处均设置了绝缘接头, 最初站内埋地管线未施加阴极保护。由于站内埋地管道和金属构筑物规格多, 外涂层难以在工厂进行统一预制, 多为现场涂敷, 涂层质量控制难度较大, 具有较高的腐蚀风险。2007 年 6 月 29 日, 作为陕京输气管道末站的采育站内一条规格为 PN10.0Mpa, $\Phi 60.3 \times 3.6$, 管材为 L245 的天然气输气管道发生了漏气事故, 影响了站场的安全运行。为控制站内埋地管道的腐蚀风险, 对站场埋地管道补加区域性阴极保护技术是很有必要的。站场内埋地管道和设施阴极保护效果具有一定的特殊性, 即要求所有管道达到有效的保护效果, 又要避免由于阴极保护带来的电流干扰, 同时站场内部施工运行安全要求

也十分严格。本课题即以陕京管道琉璃河、石景山、永清、通州南四个分输站场内埋地管道及设施为研究对象,结合具体的工程实践和实测数据来对区域性阴极保护系统的设计、施工、检测、效果评价与数值模拟技术在区域性阴极保护中的应用等问题开展研究,进而推动区域性阴极保护技术在我国的进一步发展。

1.2 区域性阴极保护技术的特点及存在问题

在西方发达国家,大型油气站库的区域性阴极保护已走上强制实施的法制轨道,并且实现了阴极保护系统和主体工程同时设计、同时施工、同时投产,取得了良好的效果^[2]。区域性阴极保护在我国也已经有了实践。该技术早在五十年代首先应用于油田的单井保护,并逐步发展而来。在七十年代初,胜利油田首先开展了区域性阴极保护技术的研究工作,经不断探索取得了初步应用经验,到八十年代国内不少油田都成功的应用了这项技术。自1990年以来,中国石油天然气管道局先后对东营首站、濮阳首站、石楼末站等几座土壤腐蚀性强的热泵站进行了站区阴极保护改造,取得了良好的效果^[3]。

区域性阴极保护技术是将某一区域内的所有预保护对象当作一个整体来进行保护,由于保护区域内保护对象繁多,地下金属结构复杂,分布范围小,干扰和屏蔽现象严重,使得典型的站区阴极保护具有如下特点:

1. 接地系统庞大,保护电流消耗较高。随着兰成渝、陕京管道、西气东输等长输管道相继建成投产,国内管道工业发展迅猛,新建管道自动化控制水平较高,工艺站场中普遍采用工艺、电气、自控、通信联合防雷防静电接地,接地网的接地电阻要求 4Ω 以下,一般达到 1Ω 。尽管站区阴极保护的對象主要为储罐和埋地管网,但工艺、伴热、消防等管线与输油泵、加热炉、阀组、分离器、收发球、压缩机等众多的设施与接地网电联接构成了庞大的接地网,彻底进行绝缘处理不仅费用高昂、而且也不现实,难于实施。众多的接地必然导致较高的电流消耗。

2. 地下金属结构错综复杂,干扰和屏蔽问题突出。与站外长输管线相比,站区由于众多设施彼此电性相连,形成纵横交错的金属结构网。特别是建站较久的老站,经过多次改造、扩建,许多已废弃管网、设备仍与在用设施存在电性连接,地下金属结构更为错综复杂,干扰和屏蔽问题也更为突出。

3. 安全要求高。站区压力容器、大型储油罐的存在,对防范事故的安全措施要求较高,给站区阴极保护的实施增加了难度。

4. 阳极床设计受到限制。采用浅埋阳极需要考虑干扰和屏蔽问题,解决不好易引起电流的均衡分布困难;而深井阳极的应用又受地下水文地质条件的制约。因此阳极地床的设计在一定程度上受到限制,要达到理想的阳极床设计是非常困难的。

5. 保护系统内金属结构复杂,后期调试整改必不可少。区域性阴极保护由于具有保护对象错综复杂及与之相连的接地设施众多等特点,使得保护回路复杂多变,造成了一次设计的不确定性,要达到理想的保护和最大限度的降低对本保护系统的干扰,施工

和调试阶段的设计更改及调整是必不可少的。

由于区域性阴极保护具有以上特点,在设计过程中要综合考虑多种因素的影响,以求获得最佳的保护效果。

1.3 阴极保护电位分布数值计算的研究现状

在阴极保护工程中掌握阴极表面电位分布规律是非常重要的,它直接关系到阴极保护的效果。在传统的阴极保护工程设计中,大多采用实际测量或经验估计的方法掌握电位分布规律。然而,对于某些被保护结构,如海底管道、海洋平台、深埋的钢桩或钢管、大罐的罐底等,实地测量技术难度很大,或需要昂贵的费用,对于待上马的新项目,根本不可能事先在现场测试,而经验公式法对于复杂结构往往需要较大的安全系数,由此引起过保护更会带来一些不利的后果,可见传统的设计方法难以满足越来越高的安全可靠性和经济性的要求。随着电化学和计算机技术的发展,人们尝试采用数值计算方法来获取被保护体表面的电位和电流分布状况,这在地下长输管道、近海石油平台等场合已经得到了较好的应用^[4-53],节省了大量的人力、物力,实现了优化设计。

1.3.1 阴极保护体系的数学模型

近几十年来,随着对阴极保护理论的深入了解和高性能计算机的普及,阴极保护设计中数学模型研究取得某些实际应用,例如在计算海洋构件的阴极保护电位分布和阳极参数等方面显示出模型研究的重要作用^[5-7]。

为建立阴极保护体系数学模型,必须知道这个体系所有组成部分及反映体系特性的各种参数关系,一个实际的阴极保护体系大致有以下几种参数:

- (1) 被保护构件的几何尺寸和阳极的位置、形状等;
- (2) 电流流经的体系周围介质的电性能;
- (3) 阳极的电学行为,尤其是电化学(如极化曲线)特性;
- (4) 被保护构件的电学行为,主要是极化行为和表面钙沉淀行为。

阴极保护体系数学模型可分为两大类,即分布型模型和时变型模型。

a. 分布型模型

① 模型描述

该模型研究阴极保护电位和电流密度的分布及其相互关系,研究中往往假设环境介质为均匀、单一导体,宏观不均匀介质被分割成局部均匀区域来处理。假设阴极保护体系已经达到稳态,即阴极电流及极化行为已不随时间改变,以便采用静态场理论来处理。

稳态阴极保护体系中稳定电流场满足静态场理论,其基本电位分布方程是泊松方程:

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho/\xi \quad (1-1)$$

式中: U 为电位; x 、 y 、 z 为三个坐标方向; ρ 为体电荷密度,场源项; ξ 为综合表征体系特性的函数。

当无场源存在时变成拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1-2)$$

式中参数意义同前。

② 模型求解

泊松(拉普拉斯)方程的定解取决于求解区域的几何布局和边界条件。从数学上讲, 满足一个偏微分方程的解可以有很多, 还必须有一些特定的边界条件来补充和限制, 才能得到定解。边界条件根据实际问题的特点而提出。在阴极保护系统中通常遇到的边界条件有以下几类: 1. 边界上的电位已知, 例如, 无穷远边界条件的电位为零, 阳极电位恒定的等位面, 恒电位控制的外加电流阴极保护系统中的控制点等; 2. 边界上流入的电流密度已知, 例如恒电流控制的外加电流阴极保护系统, 其绝缘面是电流等于零的特例; 3. 边界上流入的电流密度与电位的函数关系已知。在金属平衡电位附近几十毫伏范围内, 电位与电流是线性关系。而一般地说, 两者之间是非线性关系, 这是电化学问题不同于其它电磁场问题的最本质特点。

一般来说, 微分方程的求解可以用解析解, 也可以用数值解。只有对于一些特别简单的情形, 才能精确地求出上述阴极保护电位分布模型的解析解; 对于多数实际体系, 一般有较复杂的边界, 只能用数值方法求近似解。这时, 把连续的求解区域用设想的包含一系列节点的网络来表示。数值解法的基本出发点是: 用离散的、只含有限个未知数的代数方程组去近似代替连续变量的微分方程及边界条件, 从而求出节点上待定函数的近似值。

在求解过程中为了减少计算工作量, 缩短计算时间, 提高计算精度需要注意以下两点: 1. 首先要根据问题的具体特点尽可能加以简化, 常常是利用系统的几何对称性, 如轴对称、面对称等。轴对称时采用柱面坐标最方便, 这时只需计算任一子午面上电位的分布情况, 而不必求解整个空间电场, 而面对称时只要计算一半就够了。此外, 简化计算对象的维数始终是一种最优选择, 因为在同样分辨率下, 按三维考虑时所需节点数大约比二维考虑时高一个数量级。2. 离散化时用假想的线(或面)根据问题的具体特点将求解区域分割为有限个互补重叠的单元, 二维的如正方形、三角形、矩形、平行四边形、正六边形等, 三维的如四面体、长方体、任意六面体以及曲面六面体等。这些单元的顶点称为节点。求解就是寻求节点上未知函数的近似值。分割时单元的形状、大小、数目是任意选择决定的, 可根据实际情况灵活掌握。一般地说, 单元越小, 结果的精度越高, 但计算工作量越大, 因此节点数量需加控制。

到目前为止, 各种数值方法多是针对达到稳态的阴极保护系统开展的^[8-10, 11~15]。邱枫利用有限元法计算了钢质储罐底板外侧、码头钢管桩以及用带状阳极对钢管进行阴极保护时的电位和电流分布^[14, 15, 9], 采用如下稳态分布型模型:

$$V: \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} = 0$$

$$S_1: \quad \phi = \phi_0 \quad (\text{第一类边界条件})$$

$$S_2: \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = -\sigma \cdot f(\phi) \quad (\text{第二类边界条件})$$

其中, V 为所研究的区域, S_1 为第一类边界条件, S_2 为第二类边界条件, ϕ 为电位, X 、 Y 、 Z 为空间直角坐标, ϕ_0 为阳极电位, n 为阴极表面法线方向的单位矢量, σ 为介质的电导率, $f(\phi)$ 为阴极表面电位等于 ϕ 时对应的极化电流。为了获得方程的数值解, 需要把求解区域离散化, 再结合具体的边界条件求解电位分布。得到电位分布后可按关系式 $j=f(\phi)$ 求解电流分布。

文献[10]中采用稳态分布型阴极保护模型利用有限差分法计算了处于海泥或海水介质中被保护构件表面的电位分布, 构件表面及介质域内的每一点的电位遵循 Laplace 方程, 并采用阴阳极的极化曲线作为非线性边界条件建立模型。应用 Quick Basic4.5 软件编制了相应的计算程序, 为了加快迭代速度, 采用了超松弛迭代法, 取松弛系数 $\alpha=1.81$ 。

b. 时变型模型

时变型模型研究阴极垢层形成及极化随时间的变化关系。环境参数如土壤含水量、温度等周期变化的影响也可以在模型中考虑, 但微观不均匀及体系瞬间扰动很难考虑。这类模型比分布型模型研究难度更大, 主要是缺乏对其规律理解, 目前尚无合适的数学处理方法。

1.3.2 阴极保护体系数学模型的数值处理方法

阴极保护体系的数学模型可通过有限元法、有限差分法和边界元法等来求得数值解。这些数值解法都具有递推性, 计算的工作量非常大, 只有依靠电子计算机才能实现。目前在阴极保护模型研究中主要采用以下几种数值解法:

(1) 有限差分法(FDM)

有限差分法(Finite Difference Method)是近似求解偏微分方程边值问题最常用的方法。它用代数式 $[\Phi(x+\Delta x)-\Phi(x)]/\Delta x$ 近似代替原微分方程中的导数 $d\Phi/dx$, 即用折线近似代替原边界曲线, 来求解微分方程。从六十年代开始, 有限差分方法(FDM)已用于电化学体系中来计算多电极系统的电流分布^[16]及铜、锌的电偶腐蚀^[17]等, 并用来掌握腐蚀过程的电流和电位分布规律^[18,19]。张鸣镝^[10]利用 FDM 计算了在装有海泥的槽中被保护海底管道表面的电位分布及其随保护时间的变化。钱海军等^[20]采用有限差分技术对大口径输水管道管内阴极保护电位分布进行了计算。Kranc 等人^[21]采用有限差分方法计算了混凝土结构中钢筋阴极保护的电位和电流分布。尽管在许多情况下有限差分方法可以给出较为准确的结果, 但由于 FDM 法计算结果的准确度与网络交叉点即节点的数目和分布有关, 因此使用该方法难以准确地描述结构的几何形状和模拟边界条件。

(2)有限元法(FEM)

有限元法也称有限元素法 (Finite Element Method), 是五十年代为了用计算机求解数学物理问题而出现的, 从 60 年代开始国外就采用有限元法(FEM)^[22,23]来掌握腐蚀过程的电位分布规律, 作为阴极保护计算机辅助设计及工程设施安全可靠寿命评价的一个主要内容, 现在有限元法已成为数值分析中一种实用而又重要的工具。有限元法是变分原理在差分方法中的应用, 根据变分原理, 引进边界条件, 建立一个等价的二次泛函。当二次泛函达到极小时的相应函数, 就是满足这些边界条件的拉普拉斯方程的解。

邱枫利用有限元程序计算了钢质储罐底板外侧、码头钢管桩和用带状牺牲阳极进行阴极保护时埋地钢管的阴极保护电位分布^[14,15,9]。Munn^[24]应用有限元法研究了牺牲阳极以及钢板在电解液中的腐蚀行为。Kasper^[25]利用有限元法研究了海水中钢棒的腐蚀行为以及阴极、阳极的形状大小、涂层电阻、涂层缺陷对电位分布的影响。Chin, Sabde 等人^[26,27]研究了二维稳态涂层缺陷缝隙阴极保护数学模型, 采用有限元法计算了缝隙内电化学环境改变时的电流分布。

有限元法与有限差分法相比的一个优点在于可方便地处理复杂的或弯曲的几何面, 因为其元素不必非要有正规形状或尺寸。但同 FDM 法一样, FEM 法也需要用网络对所研究区域离散, 并且结果的精度也与单元的大小和数目有关, 因此进行三维阴极保护系统模拟时, 计算量和花费的时间将是很大的。到目前为止, FEM 法对二维问题是非常有效的, 而对三维问题则在一定程度上影响了计算的精确度。

有限差分法和有限元法的共同特点是必须对全部区域进行网格划分, 要想得到被保护体表面的电位分布必须首先计算电解质内部的电位分布, 因此计算过程的精度损失以及计算上的浪费和数据准备量大是这两种方法的明显缺陷。

(3)边界元法(BEM)

边界元法 (Boundary Element Method) 是于 80 年代初在阴极保护领域出现的一种数值计算方法^[30,31]。该方法以问题控制微分方程的基本解为基础, 建立边界积分方程, 然后对边界积分方程通过离散、插值等手段, 获得关于边界上未知数的方程, 求解而获得所要求的物理量。

DeGiorgi 等人^[9]采用边界元方法模拟了船侧推进器阴极保护系统的电位分布。Douglas^[31]对采用罐旁深井阳极、罐周阳极、罐底网状阳极的地上储罐罐底阴极保护系统电位分布进行了模拟。刘曼^[32]应用边界元方法计算了管内介质处于流动状态时, 受到阴极保护的管道内壁的瞬时电位分布和稳定电位分布。梁旭魏, 吴中元等人^[33,34]将 BEM 应用于油田区域性阴极保护阳极位置的优化设计中确定了最佳阳极位置和电流输出。

边界元法是在经典积分方程和有限元基础上发展起来的, 能使问题维数降低一维, 方程组阶数降低, 给定节点密度下的计算精度提高, 克服了 FDM 法和 FEM 法数据准备量大的缺陷, 成为一种在阴极保护辅助设计中有着广阔前景的计算方法。边界元法既可处理有界区域问题, 也能处理无界区域问题, 但通常要求研究介质是均匀的。

以上三种方法在研究阴极保护体系, 尤其是海洋结构阴极保护模型中都取得过成功

经验^[5-7]，我国这方面研究工作也十分活跃^[14,15,9,10,20]。一种新动向是将几种方法组合使用^[35,36]，提高解决实际问题的能力。

(4) 借助软件包对阴极保护电位进行数值计算

除了以上三种数值计算方法，拉普拉斯方程还可借用现成的计算程序软件包求解，如 ANSYS^[37,38]，MATLAB^[39]，FLUENT^[40]，利用现成软件包进行数值计算，研究者无需编制复杂的程序，可以节省时间，深入研究问题的本质。有些软件原先并不是为阴极保护而编写，但可以借用。这是基于物理现象数学模型的相似性，例如导电与传热现象的相似性。另一方面，要注意阴极保护问题的特殊性，主要是电化学极化行为往往是非线性函数，它受到许多因素的影响，并且随时间而变化，这使问题更加复杂化。

1.3.3 阴极保护电位分布数值计算的研究难点与发展方向

随着计算机的加速普及和广泛应用，利用数值方法求解阴极保护体系的电位和电流分布问题已成为最近十多年阴极保护领域中十分活跃的一个方面。由于受保护系统复杂几何形状、结构表面状态随时间变化、腐蚀性介质不均匀等多种因素的限制，使得数值计算结果与实际体系之间还存在一定的差距。阴极保护体系电位和电流的分布计算还是一个尚待深入研究的课题，可从以下几个方面进行深入的探讨：

1. 到目前为止，阴极保护电位分布的数值计算研究多是针对稳态分布型模型开展的，研究中往往假设系统处于稳态，环境介质为均匀、单一导体，而实际的阴极保护体系状态是随时间发生变化的，腐蚀介质也是不均匀的，因此数值计算模型还有待进一步完善，应在模型中考虑介质的不均匀性以及环境参数如土壤含水率、温度等因素周期性变化的影响。

2. 边界条件的选取直接影响数值计算结果的准确性，在阴极保护电位分布的数值计算中一个很重要的边界条件是确定阴极边界上电位和电流密度的关系以及这种关系随时间的变化。由于缺乏对阴极极化和垢层随时间变化规律的深入了解，迄今尚未建立比较完善的反映阴极表面极化及结垢的理论模型，因此，有必要对阴极极化特性开展更深入的研究。

3. 包含多条埋地管道及多口井套管的区域性阴极保护体系以及形状复杂的海洋平台或构件的阴极保护模型的建立已日益受到关注，因此需要进一步改进计算技术，对于复杂形状的构件在不降低体系复杂性前提下，应能够通过合理的网格划分来提高计算精度。

4. 阴极保护系统优化设计方法有待深入的研究，以电位和电流分布的数值计算为基础，通过各种方案的比较可以在阳极种类、尺寸、数量、布置等方面进行优化设计，使阴极保护达到经济、有效的目标。

1.4 本论文的主要研究内容

本课题以陕京管道琉璃河、石景山、永清、通州南四个分输站场内埋地管道及设施

为研究对象，开展区域性阴极保护技术研究，主要内容涉及以下几个方面：

1. 对区域性阴极保护系统的设计方法和设计参数的选择开展研究。结合工程实际对区域性阴极保护电流密度的选取、阳极地床的位置和数量的确定、控制参比电极的位置、区域性阴极保护中遇到的干扰和屏蔽等具体问题进行了探讨，并提出了合理的解决方案。

2. 开展基于数值模拟的区域性阴极保护技术研究，根据陕京管道站区内保护管道、设备及阴极保护系统的实际安装布置图，以站区为单位，建立区域性阴极保护电位分布的数学模型，对所建立的阴极保护数学模型进行求解，获得站区内所有被保护构件表面各处的电位分布情况。通过数值计算方法来研究区域性阴极保护中阳极的设置方式、埋设位置、数量等因素对保护电位分布的影响，以确定使阴极保护效果最佳的阳极设置方式和埋设位置。通过数值计算方法来研究站区内不同阴极保护回路之间的相互干扰问题，针对干扰的大小提出减弱或消除干扰的方案。

3. 结合具体的工程实际来讨论区域性阴极保护工程施工过程中的注意事项和相关问题。

4. 结合具体的工程实际来讨论区域性阴极保护效果检测与评价的主要内容和方法。

5. 结合具体的工程实践来讨论区域性阴极保护系统的调试和后期整改，以及长期运行维护的注意事项。

第二章 区域性阴极保护系统的设计

2.1 区域性阴极保护系统设计依据的标准

1. 长输管道阴极保护工程施工及验收规范 SYJ 4006-90
2. 埋地钢质管道阴极保护技术规范 GB/T 21448-2008
3. 站内区域性阴极保护设计规范 Q/GD 0199-1996
4. 站内区域性阴极保护施工验收规范 Q/GD 0200-1996
5. 站内区域性阴极保护运行管理规范 Q/GD 0201-1996
6. 区域性阴极保护技术规范 Q/SY 29.1~29.3—2002
7. 埋地钢质管道直流排流保护技术标准 SY/T 0017-96
8. 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法 GB/T 21246-2007
9. 钢质管道及储罐腐蚀控制工程设计规范 SY 0007—1999
10. 强制电流深阳极地床技术规范 SY/T 0096—2000
11. 美国腐蚀工程师协会标准 埋地或水下金属管道系统的外腐蚀控制 NACE RP 0169-96/2002

2.2 区域性阴极保护系统设计过程中的相关问题

1. 区域性阴极保护设计的准备工作

在区域性阴极保护设计前期应进行资料调研和现场勘测，详细了解保护区内金属结构的布局、功能、接地面积、绝缘状况及环境的腐蚀性等。要考虑采用深井阳极或深埋阳极的可能性，必须掌握站区地下的地质结构、地层条件和水文资料，必要时可钻试验孔实际勘测。

2. 区域性阴极保护的保护对象

区域性阴极保护保护对象繁多，并且分布于一个相对紧凑狭小的区域内，相互间以管道相连通。工艺管网布置较复杂，有平行、交叉，有埋地、地沟和架空，还有与之相连的接地网和相随的伴热管线。鉴于此，在实施区域性阴极保护过程中应结合规范，抓住重点，进行主次分明的保护。根据国内外的实践经验，在进行区域性阴极保护过程中应将阴极保护对象集中在储油罐底板，其次是埋地和地沟管线，以及其相关设备如压缩机、加热炉和输油泵底座、固定墩等。

3. 区域性阴极保护电流密度的选取

油气输送站场区域内由于埋地构件众多，庞大的避雷防静电接地金属结构网导致电流消耗较高。在区域性阴极保护设计中阴极保护电流密度是一个非常重要的参数，能否准确确定该参数是区域性阴极保护设计成功与否的关键。

在常规的阴极保护设计中，一般根据设计经验综合考虑埋地构件防腐层状况，按照估计的防腐层面电阻率来选取阴极保护电流密度，将该值乘以结构的总理地面积得到近

似的电流总需求量。例如在埋地钢质管道阴极保护技术规范中给出了常用的防腐层面电阻率：

石油沥青、煤焦油瓷漆： $10000 \Omega \cdot \text{m}^2$ ；

环氧煤沥青 $5000 \Omega \cdot \text{m}^2$ ；

环氧粉末 $50000 \Omega \cdot \text{m}^2$ ；

三层PE结构 $50000 \Omega \cdot \text{m}^2$ 。

根据防腐层面的面电阻率可按如下原则选取保护电流密度：

$5000 \sim 10000 \Omega \cdot \text{m}^2$ 取 $100 \sim 50 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ；

$> 10000 \sim 50000 \Omega \cdot \text{m}^2$ 取 $< 50 \sim 10 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ；

$> 50000 \Omega \cdot \text{m}^2$ 取 $< 10 \mu\text{A}/\text{m}^2$

国内在进行阴极保护设计时多按照以上方法来确定保护电流密度，对于长输管道干线阴极保护系统，由于埋地构件单一，表面状况差异不大，采用这种方法是方便、可行的，但是对于油气输送站场，由于埋地金属构件的多样性和分布的复杂性，且埋地管网、罐底外侧、接地结构网等表面状况差异较大，仅通过经验估计的方法很难准确的确定实际所需的电流值。在陕京管道采育站场区域性阴极保护设计中按照传统的设计方法选择了保护电流密度，并在保护电流密度基础上估算了采育站场区域性阴极保护电源系统所需的电流值和电压值，选用了 $30\text{A} \cdot 50\text{V}$ 的恒电位仪，按照设计方案施工完成后，恒电位仪输出接近额定电流输出（ 25A 、 33V ）时，检测结果显示，阴极保护极化电位介于 $-0.425\text{V} \sim -0.688\text{V}$ （CSE），不满足 -0.85V （CSE）的阴极保护极化电位要求。说明由于油气输送站场的复杂性，要较为准确的确定所需的阴极保护电流，仅参照标准中给定的参数通过经验估计方法是难以准确确定所需的保护电流密度的。

要准确的确定站场区域性阴极保护电流密度，参考国外的工程经验，采用现场电流需要量测试实验，即现场馈电试验法，具体方法是：先建立一个临时保护站，试探性的预埋几支阳极，通电后测量被保护结构的电位，再调整输出电流，直至在一个小区域内建立起较理想的保护电位，然后根据实际的输出电流和保护面积计算出保护电流密度。前面提到的陕京管道采育站由于采用传统的保护电流密度确定方法无法满足要求的保护水平，后来利用已有的深井阳极进行了馈电试验，确定了需要的保护电流为 40A ，于是更换了大功率的恒电位仪（ 50A 、 50V ），运行后保护电位介于 $-0.880\text{V} \sim -1.128\text{V}$ ，检测数据表明达到满意的保护水平。由于馈电实验法根据实际工程情况来开展测试实验，因此所确定的保护电流密度较为准确，能够满足保护要求，因此在陕京管道的其他站场区域性阴极保护设计中均采用馈电实验法来确定保护电流密度。

4. 区域性阴极保护阳极地床的设计

在区域性阴极保护设计中，阳极地床的设计是保护效果理想与否的关键。阳极地床的设计包括阳极的布置方式和数量确定。

为了减少被保护体间的相互屏蔽，使被保护体的电位分布均匀，就需要设多组阳极，故阳极位置的选择就显得非常重要，将直接影响站区阴极保护的效果。在已运行的站区

阴极保护系统中,因选位的问题,有的阳极床至今未能投入运行,造成了浪费。对个别的阳极床而言,若不投用,远处的保护体就不能被保护;若投用,近处的保护体就发生过保护。合理的阳极分布应使站内埋地管道电位分布均匀,干扰屏蔽作用小,并应考虑到设置的现场条件。

常用的阳极分布方式有近间距阳极,分布阳极,集中阳极,深井阳极。近间距阳极要求有足够的地面空间,且易于产生较大的屏蔽和干扰问题而使远离阳极的设备或管线等得不到保护。分布阳极可有效的改善电流分布,使被保护结构体的电位分布均匀,被保护结构体复杂时,分布阳极是经常被采用的阳极布置形式。当地表空间小或地表土壤电阻率太高时,不能采用分布阳极,可采用深井阳极方法。文献指出对空间区域小,设施相对集中的站场,深井阳极以其占地极少,使保护电流分布均匀,相对干扰小等优点成为站内区域性阴极保护首选阳极地床。深井阳极的应用对于均衡保护电流分布、避免屏蔽和最大限度地消除干扰无疑是最有效的,但是必须要有合适的地质结构和地层条件。阳极应尽量放置在低土壤电阻率的土壤层中,被保护结构体与阳极之间不能有高电阻率岩石层。为使阴极保护电流较均匀流至保护体,阳极井距保护体位置要适中,其深度应在 20m 以下。例如南三油库内的阴极保护所采用的阳极地床为 60m 深阳极井^[44],泗县泵站内的阴极保护所采用的阳极地床为 20m 深井阳极^[45],而仪征站采用的则是 50m 的深井阳极^[45]。应说明的是,深井阳极的应用并非越深越好,除了地质结构和地层条件的限制外,无疑还应考虑经济性和施工难度。而且从技术上讲,阳极越深,其排流辐射的范围越广,有些本不希望构成保护回路的设施就会成为保护电流大量漏失的通道,最终导致电流居高不下,因此最佳阳极埋深的确定还有待进一步研究。

对区域阴极保护来说,要求阳极输送电流大、寿命长、性能稳定、地床牢固,常用阳极材料为高硅铸铁阳极。每口阳极井放入数组阳极,间隙中填充焦炭或降阻剂,形成长度连续的阳极地床。每口阳极井设置接线盒一个,每支阳极电缆通过接线盒合并成一路接到恒电位仪上。在进行阳极地床设计时要综合考虑站区现状和保护需求,合理的选择阳极井数,灵活的应用各种阳极井布置方式,采取优化保护回路、平衡各回路输出、控制电流流向等措施,以达到满意的结果。

油气输送站场阴极保护技术的特点给站场内阳极地床的设计带来较大的困难,由于目前站场阴极保护设计方法较为陈旧,多参照长输管道阴极保护设计规范进行,难以体现站场的具体特点,阳极位置、埋深、数量等设计参数选择往往依靠经验性的估算,对于设计系统的阴极保护效果预知性较差,也无法在设计中对干扰和屏蔽问题进行处理,往往导致阳极布置和保护电流设置不够合理,后期的调试和整改工作量较大。因此,改进站场阴极保护设计技术对于提高设计水平具有重要的意义。

随着电化学和计算机技术的发展,采用数值计算方法来获取被保护体表面的电位和电流分布状况,成为阴极保护领域中十分活跃的一个方面,并且在地下长输管道、海洋构件、近海石油平台等场合已经得到了较好的应用。在油气输送站场阴极保护,若将数值模拟技术与阴极保护设计相结合,通过计算阴极保护电位和电流密度的分布,来评价

保护效果, 优选保护方案, 确定合理的阳极种类、形状、数量、位置等参数, 将变阴极保护的的经验性设计为科学性设计, 对提高站场阴极保护设计水平提供了一个发展方向。

5. 参比电极位置的选择

站内阴极保护与管道干线阴极保护不同, 由于具有多个保护对象且结构相对复杂, 通常需要多组阳极地床和汇流点才能满足保护要求, 以往的阴极保护系统受到整流器性能的局限, 一般作为输出控制信号源的参比电极只有一个, 如果选位不准确, 就不能对整个区域进行有效的控制。随着区域阴极保护设计、管理标准的提高, 特别是相关电子技术在阴极保护设备中的采用, 国外常见的是将几个、甚至十几个带恒流、恒位功能的保护回路集成在一台设备中, 有了硬件上的支持, 可方便地将作为保护对象的站区划分成独立保护区域, 每个区域对应一个集成了恒流、恒位输出功能的电子模块, 分别设置通电汇流点、阳极床及参比电极。

6. 干扰问题

由于保护区域内保护对象繁多, 地下金属结构复杂, 布局紧凑, 干扰问题必须给予重视, 可从以下三个方面考虑。

1. 对外部金属构件的电干扰腐蚀: 设计时应考虑到站区阴极保护系统对邻近外部金属结构干扰的可能性, 并通过合理分布阳极床的位置适当调整, 尽量降低干扰程度。必要时对受干扰的外部金属结构采取适当的保护措施。

2. 对站外阴极保护系统的影响: 由于站外长输管线阴极保护系统的控制参比电极一般紧邻绝缘接头之外, 很可能处于站内阴极保护范围, 站区阴极保护系统运行后, 大电流所形成的强电场可能会对站外阴极保护系统产生干扰, 因此设计时应使站区阴极保护系统的深井阳极床尽可能地远离站外阴极保护系统的参比电极, 或采取近阳极分布式浅埋。必要时可将站外阴极保护系统的控制参比外移至非影响区。同时要加强对两个阴极保护系统运行监控, 以满足规范要求。

3. 杂散电流干扰。杂散电流干扰问题一直是影响区域阴极保护应用的主要原因之一。由阴极保护带来的对未保护体的干扰, 主要是杂散电流的电解作用, 当电流从阳极流向阴极的回路中, 遇到未保护的地下金属体, 构成回路的一部分, 由于电位的差别, 在电流流出端造成腐蚀, 这种情况下, 可以把地下金属体全部纳入阴极保护系统来避免干扰腐蚀现象发生; 其次是平行、交叉等相邻管道间因电位差存在相互影响, 这一影响是极其微弱的, 可通过连接均压线平衡电位来消除影响。由于站区域小, 用电设备较多, 相对集中, 因接地线的存在, 可能有较大的电流入地而成为杂散电流的干扰源, 这种干扰属交变性质。根据当前资料的研究结果来看, 一般认为交流干扰在 10V 以下为安全电压, 大于 15V 对防腐将产生严重影响, 甚至会发生牺牲阳极性逆转。文献中针对泵站干扰现状, 在设计中注意加强系统的排流能力, 首先在设备的选型中, 采用抗干扰强的恒电位仪, 其次是采用锌合金阳极的联合保护, 不仅起到电气接地作用, 同时避免了传统材料接地的不足, 对强制电流阴极保护起到补偿作用。

第三章 区域性阴极保护电位分布数值模拟计算研究

近几十年来,随着对阴极保护理论的深入理解和高性能计算机的应用,阴极保护设计中数学模型的研究取得一些实际应用,例如在计算海洋构件的阴极保护电位分布和阳极参数等方面显示出模型研究的重要作用^[4-53]。为建立阴极保护体系的数学模型,必须知道这个体系的所有组成部分及反映体系特性的各种参数,一个实际的阴极保护体系大致有以下几种参数:

- (1) 被保护构件的几何尺寸和阳极的位置、形状等;
- (2) 电流流经介质的电性能;
- (3) 阳极的电学行为,尤其是电化学(如极化曲线)特性;
- (4) 被保护构件的电学行为,主要是极化行为和表面钙沉积行为。

阴极保护体系数学模型可分为两大类,即分布型模型和时变型模型。

分布型模型研究阴极保护电位和电流密度的分布及其相互关系,研究中往往假设环境介质为均匀、单一导体,宏观不均匀介质被分割成局部均匀区域来处理。假设阴极保护体系已经达到稳态,即阴极电流及极化行为已不随时间改变,以便采用稳流电场理论来处理。其基本电位分布方程为拉普拉斯方程或泊松方程,到目前为止,对阴极保护电位分布进行研究时大多采用分布型模型^[6-28]。

时变型模型研究阴极垢层形成及极化随时间的变化关系。环境参数如土壤含水量、温度等周期变化的影响也可以在模型中考虑,但微观不均匀及体系瞬间扰动很难考虑。这类模型比分布型模型研究难度大,主要是缺乏对其规律的理解,目前尚无合适的数学处理方法。

从第1章中介绍的目前国内外学者对阴极保护电位分布数学模型的研究来看,在以下三个方面还有待进一步改进:

一、现有的数学模型中多假设环境介质是均匀的,即介质电阻率为一恒定值。由于介质电阻率是影响阴极保护效果的一个重要参数,在实际的阴极保护体系中介质的电阻率并不是恒定不变的,忽略其变化势必带来模拟结果和实际情况之间的误差;

二、在现有的模型中为了求解的方便,作为重要边界条件的阴极极化特性多采用线性公式或仅对 Tafel 段进行拟合,没有考虑浓差极化的影响,由于扩散过程是埋地金属阴极极化反应的主要控制步骤,这样就会使得采用的极化边界条件和实际情况存在较大差异。边界条件的选择直接影响到数值计算结果的准确性,因此有必要进一步改进极化边界条件,尽可能采用更加符合实际情况的极化特性参数;

三、现有的阴极保护电位分布数学模型大多只对单一阳极埋设方式下的简单构件表面电位分布进行了计算,对于站场类埋地管道错综复杂的情况研究较少。由于站场区域性阴极保护系统的设计目前主要依靠设计者的经验估计,缺乏理论指导,采用数值模拟方法来对区域性阴极保护效果进行预测,对于提高阴极保护的效果具有重要意义。本论文即将数值模拟方法应用于区域性阴极保护系统的设计,并用现场实测结果进行验证。

3.1 区域性阴极保护电位分布数学模型的建立

区域性阴极保护电位分布的数学模型包括问题的描述方程和相应的边界条件两个方面。

3.1.1 描述方程

国内外学者在对阴极保护电位分布进行数值计算时，大多采用 Laplace 方程 (3-1) 作为电位分布的描述方程^[6-28]：

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3-1)$$

要保证 Laplace 方程的有效性，需要假设所研究区域内导电介质均匀，系统内没有电流的得失，不存在源点或汇点，系统状态不随时间发生变化即处于稳态。

但对于实际的站场阴极保护体系，土壤介质的性质并不是均匀一致的，同时由于环境参数如土壤含水率、温度等周期性变化因素的影响致使土壤中氧浓度分布也是周期变化的，这些因素均导致实际的阴极保护系统状态也是随时间发生变化的。本论文采用考虑介质不均匀情况下的描述方程，假定在一定的时间内系统处于稳态求出所对应的阴极保护电位分布，通过改变作为边界条件的极化特性参数，来模拟站场区域的阴极保护电位分布随时间的变化情况。

假定在一定的时间段内阴极保护体系处于稳态，可利用静电场理论处理。在研究区域内取一微元体，如图 3-1 所示。

设微元体内土壤介质均匀，电导率为 σ ，电流密度 $q = (q_x, q_y, q_z)$ ，对于稳恒电流场，根据基尔霍夫定律，进出区域的电通量之和为零，即

$$\text{div} q = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (3-2)$$

由于电流密度 q 与电位梯度成正比，

$$q = -\sigma \nabla \phi = -\sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (3-3)$$

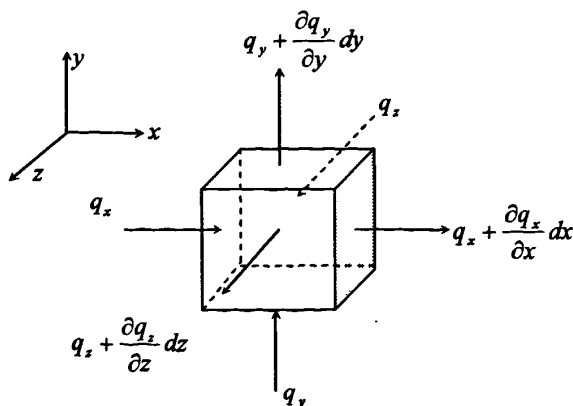


图 3-1 阴极保护体系微元体

由式(3-2)、(3-3)可得:

$$\operatorname{div}(-\sigma \nabla \phi) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0$$

$$\text{即:} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (3-4)$$

当假设所研究区域内介质均匀且各向同性, (3-4) 式中的 σ 在整个研究区域内为一恒定值, (3-4) 式可简化为 (3-1)。本文考虑区域阴极保护体系中环境介质的不均匀性, 采用 (3-4) 式作为电位分布的描述方程。

3.1.2 边界条件

设区域性阴极保护电位分布数学模型的研究区域由表面 Γ 所包围, 其中:

$$\Gamma = \Gamma_A + \Gamma_C + \Gamma_I \quad (3-5)$$

式中, Γ_A 为辅助阳极表面; Γ_C 为与土壤相接触的埋地管道或构件外表面; Γ_I 为绝缘表面。下面来分别介绍这几种边界条件的设置。

(1) 阳极边界条件

在本文的研究中不考虑辅助阳极材料输出电流和电位随时间的变化, 即将阳极区定义为具有恒定的电流值 q_A ,

$$\partial \phi(x, y, z) / \partial n(x, y, z) = -q_A / \sigma \quad (3-6)$$

或定义为具有恒定的电压值 ϕ_A ,

$$\phi(x, y, z) = \phi_A \quad (3-7)$$

式中 $\phi(x, y, z)$ 为点 (x, y, z) 处的电位值, $n(x, y, z)$ 为在该点处表面的法线方向。

(2) 绝缘面边界条件

对于绝缘表面, 电流不随时间发生变化, 为常数零, 其边界条件如下定义:

$$\partial \phi(x, y, z) / \partial n(x, y, z) = 0 \quad (3-8)$$

(3) 阴极边界条件

阴极区表面上的边界条件采用极化函数进行定义:

$$\partial \phi(x, y, z) / \partial n(x, y, z) = -f_c / \sigma \quad (3-9)$$

式中 f_c 为阴极极化函数, 表示电流密度与电位之间的函数关系, 即阴极表面的极化曲线。因此获得与实际情况相符合的极化函数对于数值计算的准确性是非常重要的。

下面根据埋地管道或金属设备腐蚀电极过程的动力学原理来讨论金属外表面极化函数的表达式。未进行保护时, 金属在土壤中发生腐蚀, 阳极反应为铁的溶解反应, 阴极反应一般为氧的还原反应, 只有在酸性很强的土壤中, 才会发生析氢反应。金属构件在土壤中的腐蚀, 阴极过程主要受氧输送过程所控制^[46], 因为氧从地面向地下的金属构件表面扩散, 是一个非常缓慢的过程。与传统电解液中的腐蚀不同, 在土壤条件下, 氧的进入不仅受到紧靠着阴极表面的电解质(扩散层)的限制, 而且还受到阴极上面整个土层的阻力等, 输送氧的主要途径是氧在土壤气相中(空隙)的扩散。氧的扩散速度不仅

取决于金属构件的埋设深度，还受土壤结构、湿度、松紧程度以及土壤中胶体粒子含量等因素的影响。对于颗粒状的疏松土壤来说，氧的输送还是比较快的；相反，在紧密的高度潮湿的土壤中，氧的输送效率是非常低的；尤其是在排水和通气不良，甚至在水饱和的土壤中，因土壤结构很细，氧的扩散速度很低。尽管扩散过程对氧还原过程的反应速度有很大的影响，但文献^[47]中指出在氧的阴极还原过程中，仅用浓差极化理论来描述阴极极化过程是不准确的，因为在一般工业用的金属如钢铁腐蚀时，氧的阴极还原反应是不可逆地进行的，活化过程和扩散过程同时影响整个电极反应过程。由上面的讨论可见对于埋地管道和钢质管件的腐蚀采用混合极化理论来描述阴极极化过程将与实际情况更加符合。

当腐蚀达到稳定状态时，阳极反应与阴极反应电流密度的绝对值相等，为腐蚀电流密度 i_{corr} ，外测电流密度为零，腐蚀电位为 E_{corr} 。对站内埋地金属构件施加强制电流阴极保护，外加电流由辅助阳极经过土壤介质进入被保护金属，使金属发生阴极极化，此时腐蚀电池的阴阳两极都将偏离腐蚀电位，阳极极化过程由活化极化控制，阴极极化过程由活化极化和浓差极化混合控制，根据 Butler-Volmer 极化动力学原理^[48]，可得施加阴极保护后阴、阳极反应的极化电流密度与极化电位之间的关系如下。

阳极反应：

$$|i_a| = i_{\text{corr}} \cdot 10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_a}\right)} \quad (3-10)$$

阴极反应：

$$|i_c| = \frac{i_{\text{corr}} \cdot 10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_c}\right)}}{1 - \frac{i_{\text{corr}}}{i_L} \left[1 - 10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_c}\right)} \right]} \quad (3-11)$$

式中：

- $|i_a|$ 、 $|i_c|$ ——阳极、阴极反应的极化电流密度绝对值， A/m^2 ；
- i_{corr} ——站内埋地金属在接触介质中的自腐蚀电流密度， A/m^2 ；
- E_{corr} ——站内埋地金属在接触介质中的自腐蚀电位，V；
- b_a 、 b_c ——阳极、阴极反应的 Tafel 常数或直线斜率，V/decade；
- ϕ ——通入外加电流后站内埋地金属所达到的电位，V；
- i_L ——氧还原反应的极限扩散电流密度， A/m^2 。

则流经腐蚀体系的外加阴极电流密度 i_A 为:

$$i_A = |i_c| - |i_a| = i_{\text{corr}} \left\{ \frac{10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_c}\right)}}{1 - \frac{i_{\text{corr}}}{i_L} \left[1 - 10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_c}\right)} \right]} - 10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_a}\right)} \right\} \quad (3-12)$$

(3-12) 式给出了流向金属的外加电流密度与电位之间的函数关系, 代入 (3-9) 中即可得到阴极表面的边界条件。由方程 (3-12) 给出的极化曲线的参数设定能够大大影响到性能预测, 因此获得与实际情况更加符合的极化特性对于数值计算的准确性是非常重要的。综上可以得到本文所建立的区域性阴极保护电位分布的数学模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} V: \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (3-4)$$

$$\Gamma_A: \phi = \phi_A \quad (3-7)$$

$$\Gamma_I: \partial \phi / \partial n = 0 \quad (3-8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_C: \frac{\partial \phi}{\partial n} + \frac{i_{\text{corr}}}{\sigma} \left\{ \frac{10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_c}\right)}}{1 - \frac{i_{\text{corr}}}{i_L} \left[1 - 10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_c}\right)} \right]} - 10^{\left(\frac{\phi - E_{\text{corr}}}{b_a}\right)} \right\} = 0 \end{array} \right. \quad (3-13)$$

V 表示研究区域, 式中其它参数意义如前所述。

陕京管道站场内埋地管线防腐层以 3PE 为主。从现场获取带涂层试样和裸钢试样。采用美国 EG&G 公司生产的“Model 352”腐蚀测试系统测定了陕京管道现场所取的带涂层试样和裸钢试样在站场土样中的极化曲线如图 3-2 所示。

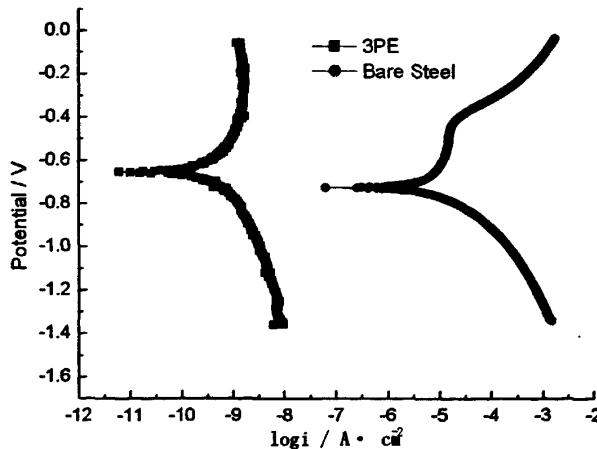


图 3-2 3PE 涂层试样和裸钢试样在站场土样中的极化曲线

由极化曲线拟合得到的带 3PE 涂层试样和裸钢试样的腐蚀极化动力学参数如下：

3PE 涂层试样： $E_{\text{corr}} = -0.658\text{V (SCE)}$ ， $i_{\text{corr}} = 1.445 \times 10^{-6} \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $b_a = 0.1\text{V/decade}$ ， $b_c = 0.1\text{V/decade}$ ， $i_L = 7.0 \times 10^{-5} \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ；裸钢试样： $E_{\text{corr}} = -0.715\text{V (SCE)}$ ， $i_{\text{corr}} = 1.53 \times 10^{-5} \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $b_a = 0.239\text{V/decade}$ ， $b_c = 0.253\text{V/decade}$ ， $i_L = 3.09 \times 10^{-2} \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。以上参数作为阴极保护数值计算的阴极极化边界条件参数。

3.2 区域性阴极保护电位分布数学模型的求解

在建立了区域性阴极保护电位分布的数学模型后，下一步的工作是如何来求解该模型，以获得所关心的区域性阴极保护电位分布规律。对于给出定解条件的偏微分方程，可尝试采用解析求解和数值离散两种途径进行求解。

数学物理方程的各种定解问题，只有当描述方程及边界条件比较简单而求解区域又很规则时，才可能用诸如分离变量法、行波法、积分变换法、格林函数法这些常用解法求出准确解来^[49-51]。对于 3.1 节中所建立的区域性阴极保护电位分布数学模型，由于描述方程为二阶变系数的偏微分方程，采用混合控制极化理论描述的阴极边界条件为非线性，同时阳极埋设方式的多样性也增加了求解区域及边界的复杂性，这些问题都给数学模型的解析求解带来了很大的困难。采用数值离散方法来求得近似解为区域性阴极保护电位分布数学模型的求解提供了一种有效的解决途径。

在采用数值方法对模型进行求解时可以根据数值算法的计算原理编程计算，也可利用现成的数值计算程序软件包求解。现在广泛使用的数值计算程序软件包有 FLUENT、ANSYS、COMSOL、MATLAB 等，这些数值计算程序软件包大都自带强大的前处理和后处理工具，无论是模型的建立、网格的生成，还是结果的处理和显示，功能都很完善，操作也很方便。

本文利用 FLUENT 软件来对所建立的区域性阴极保护电位分布数学模型进行求解，求解的方法和步骤如下：

(1) 在 FLUENT 专用前处理软件 GAMBIT 中建立区域性阴极保护系统计算区域几何模型，计算区域包括辅助阳极、导电介质、被保护管道三部分，区域边界由阳极边界、绝缘边界和阴极边界三部分构成。在 GAMBIT 中对所建立的区域性阴极保护系统几何模型划分网格，考虑到计算时间和精度，在计算区域边缘、阳极表面和罐底设定不同的网格节点密度；设定计算区域的固体类型和边界类型。

(2) 在 FLUENT 中导入由 GAMBIT 创建的计算区域网格模型，检查网格质量，设定计算单位，选择计算模型。材料物性和边界条件在 FLUENT 专门的设置面板中进行设置，对于阳极表面的第一类边界条件和绝缘表面的第二类边界条件在边界条件设置面板中直接设置即可，但对于阴极表面的第三类非线性边界条件需要应用 FLUENT 软件中的 UDF（用户自定义）功能根据阴极表面的实际极化特性编程定义，然后在控制面板中设置阴极表面的边界条件从自定义函数中读取。土壤介质电阻率的不均匀变化情况也需要

由自定义函数设置。

3.3 数值模拟计算结果与现场测量结果对比

在区域性阴极保护中经常采用分布式浅埋阳极和深井阳极两种阴极保护方案，这两种方案在陕京管道不同的输气站场均有应用。根据陕京管道站场不同的区域性阴极保护系统设计方案建立数学模型，通过对数学模型进行求解来获得不同方案下区域性阴极保护电位分布效果，并将数值计算结果与现场测量结果进行比较，从而验证数值计算结果的准确性，并找出设计方案中的不足之处。

3.3.1 分布式浅埋阳极区域性阴极保护电位分布计算

在陕京管线的琉璃河站，由于站内埋地管道分布较为规则且数量较少，故设计采用分布式浅埋阳极区域性阴极保护方案。站场内埋地管道的分布照片如图 3-3 所示。



图 3-3 琉璃河站内管道地表分布照片

区域性阴极保护浅埋阳极分布如图 3-4 所示。

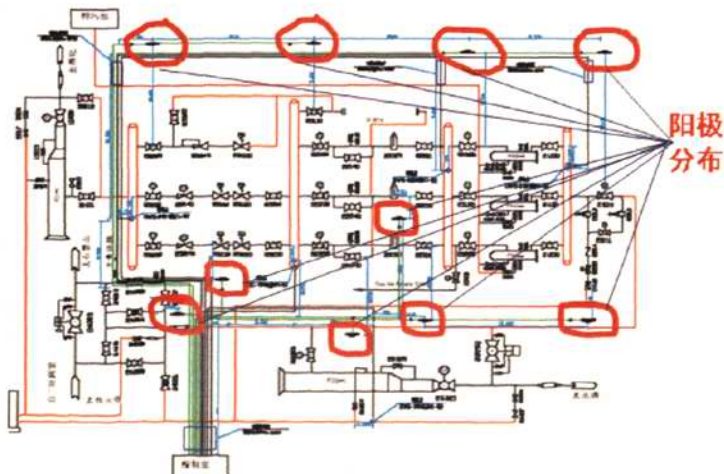


图 3-4 琉璃河站区域性阴极保护浅埋阳极分布图

采用 ZC-8 土壤电阻仪“四极法”测量了琉璃河站内的土壤电阻率分布,如图 3-5 所示。

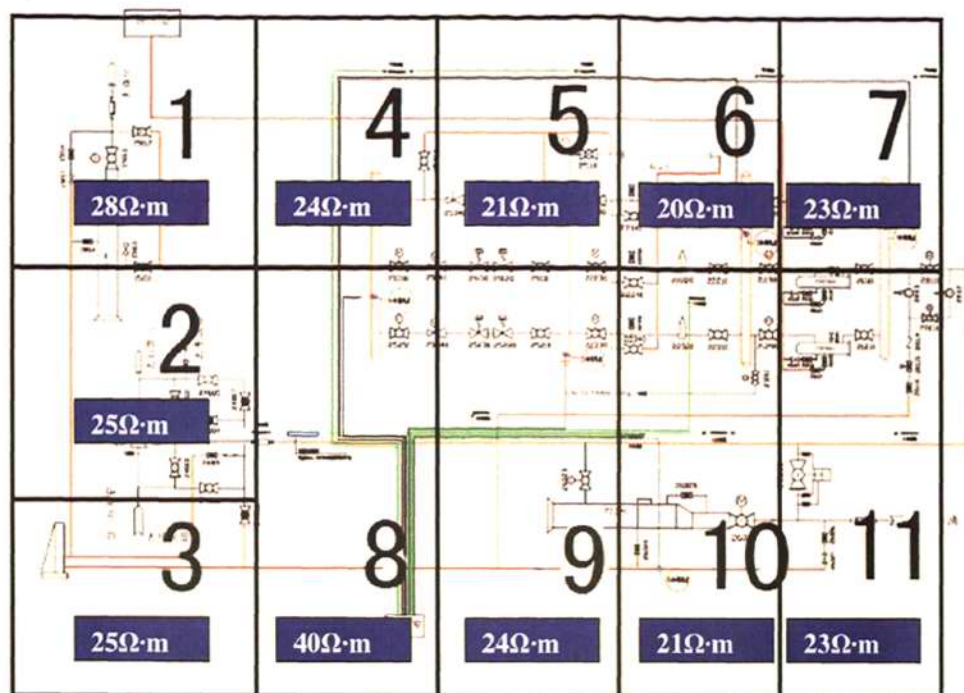


图 3-5 琉璃河站土壤电阻率分布

根据站场内埋地管道和阳极的分布在 GAMBIT 中建立几何模型,并导入 FLUENT 中进行数值模拟计算,得到站场内埋地管道管地电位分布如图 3-6 所示。

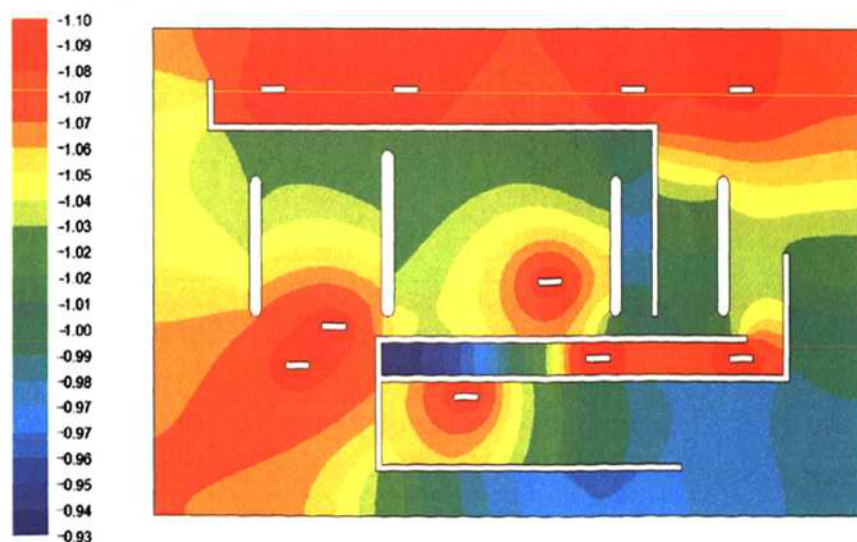


图 3-6 站场内埋地管道管地电位分布

电位分布数值计算结果表明在该阳极分布方案下,站场的管地电位数值满足阴极保护

标准要求。采用该方案进行阴极保护工程施工，施工完成后选取了测试点进行现场测量，管地电位测试点分布如图 3-7 所示，管地电位的测量结果与数值模拟计算结果对比如表 3-1 所示。

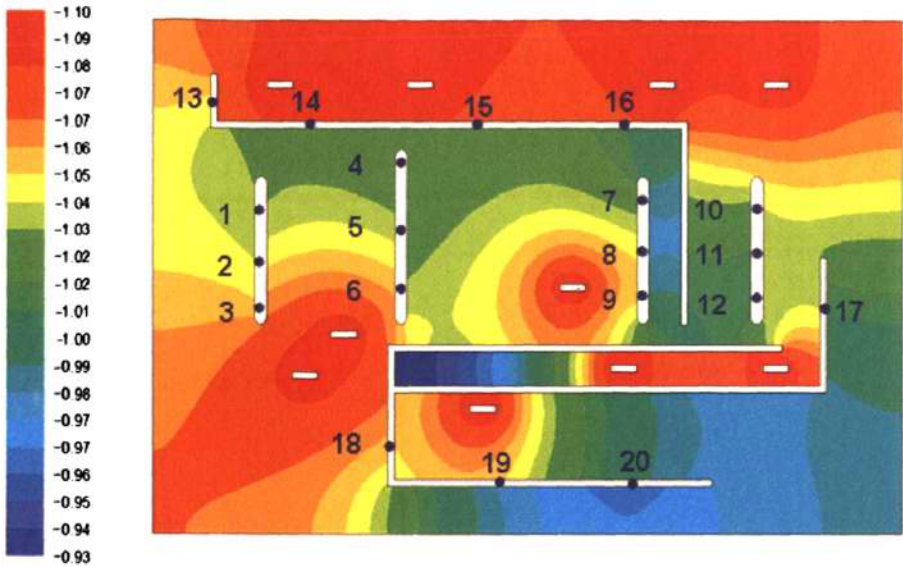
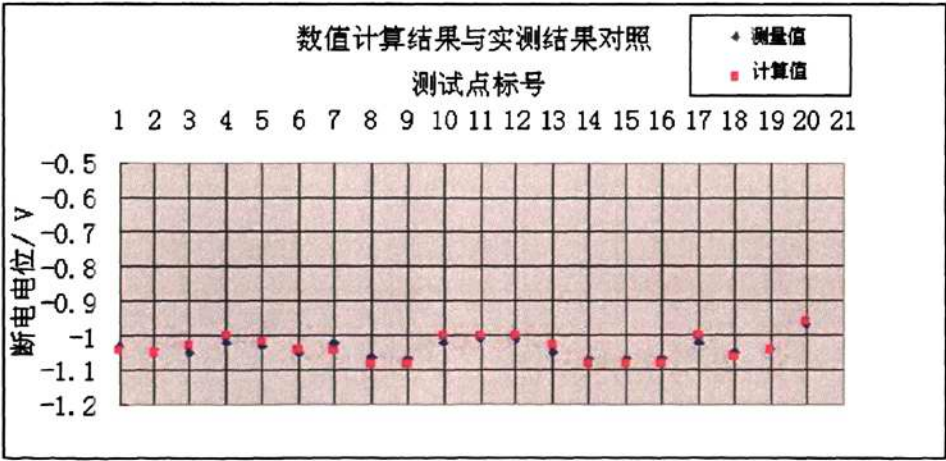


图 3-7 管地电位测试点分布图

表 3-1 管地电位数值计算结果与实测结果对照表



由表 3-1 可见，测试点的管地电位，数值计算结果和实际测量结果很接近，说明对于分布式浅埋阳极阴极保护方式，可以采用数值模拟计算来预测区域性阴极保护的电位分布效果。

3.3.2 深井阳极区域性阴极保护电位分布计算

由于站场内空间区域小，设施相对集中，深井阳极以其占地极少，保护电流分布均匀，相对干扰小等优点成为站内区域性阴极保护常选用的阳极地床形式。陕京管线的永

清输气站场内埋地管道数量较多，分布错综复杂，因此初步设计选用深井阳极。初步设计中给出的深井阳极的布置位置如图 3-8 所示。

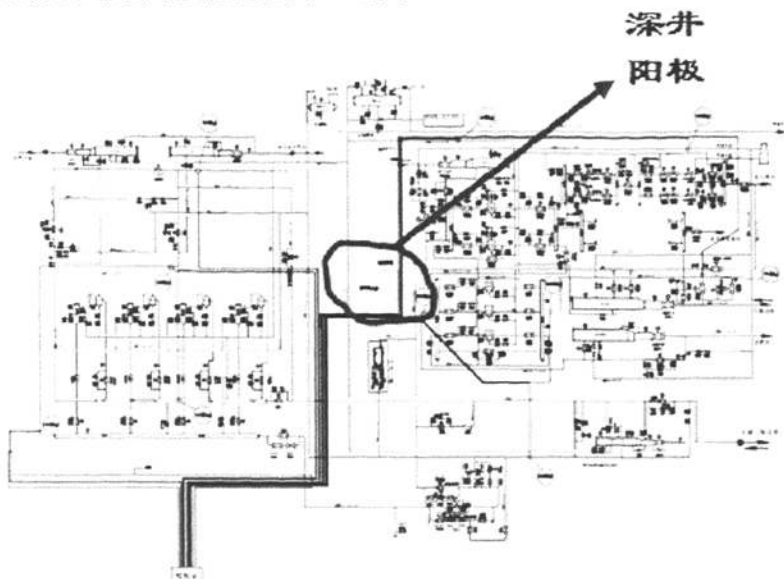


图 3-8 永清站场埋地管道及深井阳极分布图

采用 ZC-8 土壤电阻仪“四极法”测量了永清站场内土壤电阻率分布如图 3-9 所示。

永清站场保地工图

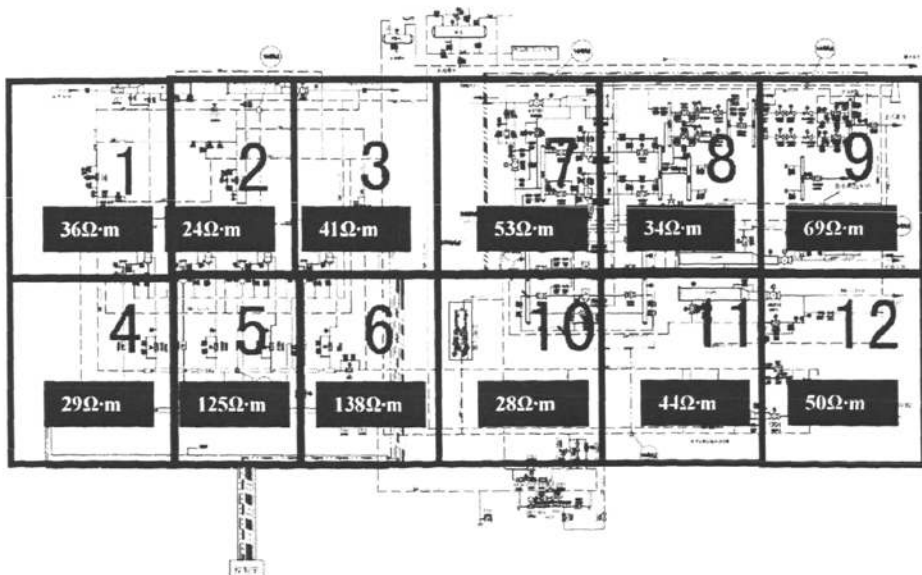


图 3-9 永清站土壤电阻率分布图

由于永清站场内埋地管道分布密集，采用一口深井阳极地床能否使整个站场满足阴极保护要求，传统的设计方法无法对站场各处的保护效果进行预测，本论文将数值模拟

方法应用于站场区域性阴极保护电位分布计算中, 来对保护效果进行预测。

针对永清站场内实际的管网分布和设计的阳极地床位置建立几何模型, 如图 3-10 所示。

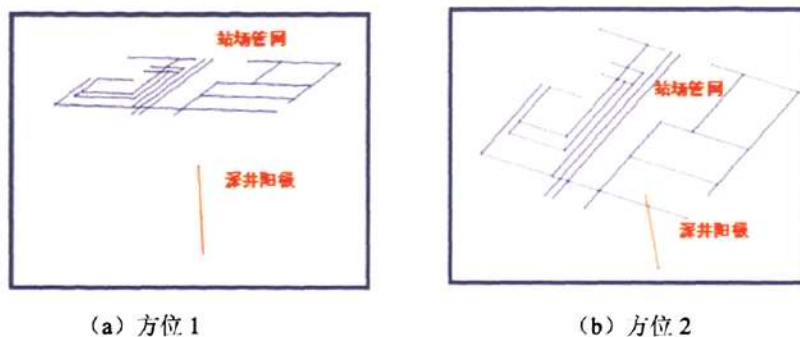


图 3-10 永清站场内实际的管网分布和阳极地床位置几何模型

根据几何模型, 划分网格, 如图 3-11 所示。

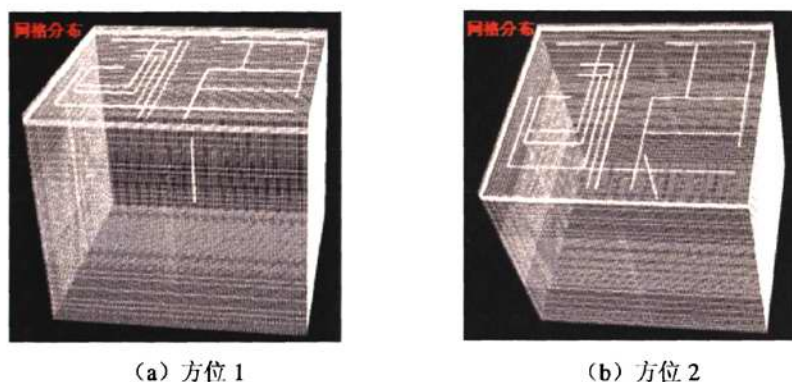


图 3-11 永清站场内实际的管网分布和阳极地床位置几何模型网格分布

计算得到土壤场中的电位分布如图 3-12 所示。

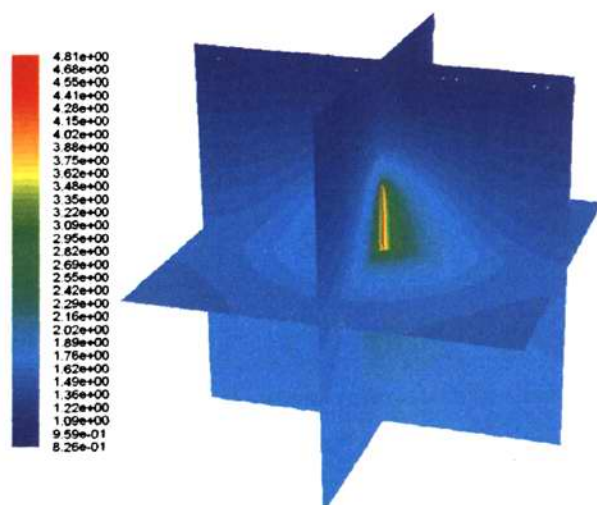


图 3-12 土壤场中的电位分布

计算得到永清站内埋地管道管地电位分布如图 3-13 所示。

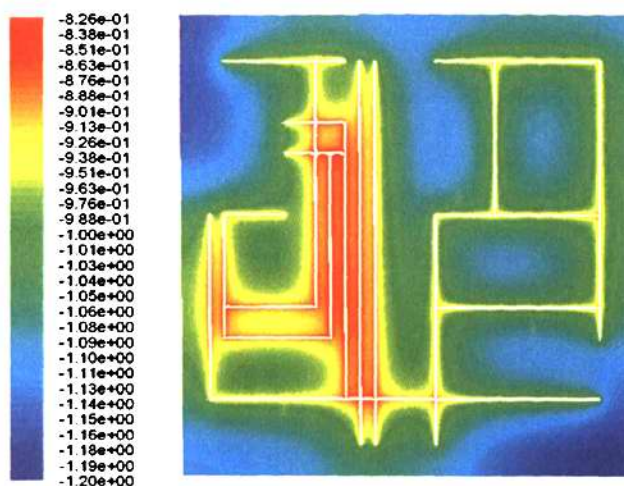


图 3-13 永清站内埋地管道管地电位分布计算结果

由图 3-13 所示的管地电位分布数值计算结果可见，管网密集侧的电位偏正，某些点不满足阴极保护相关标准要求，这可能是由于管网密集处对阴极保护电流造成屏蔽作用导致。为了保证整个站场满足阴极保护要求，需要在管网密集处增设阳极地床。为了对此数值计算结果作一验证，在深井阳极施工完成后对管地电位分布进行了实际测量，测量点分布如图 3-14 所示，电位数值计算结果和实测结果对比如表 3-2 所示。

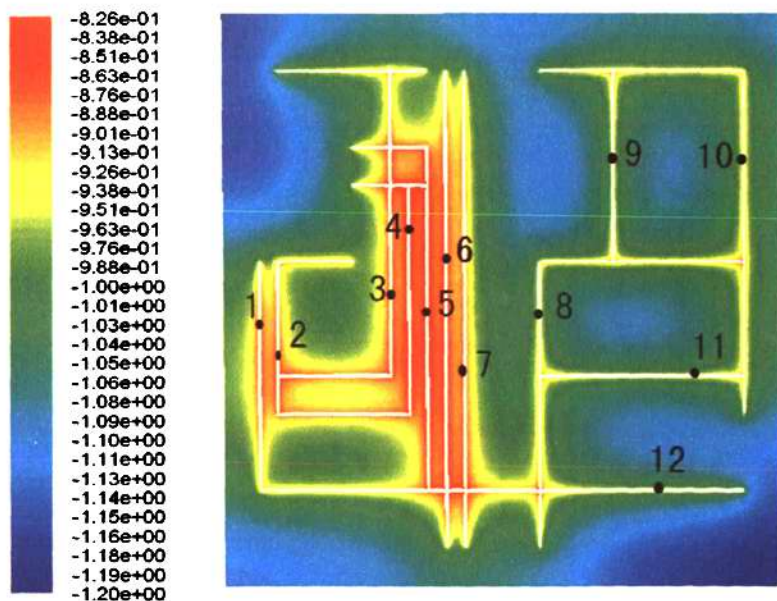
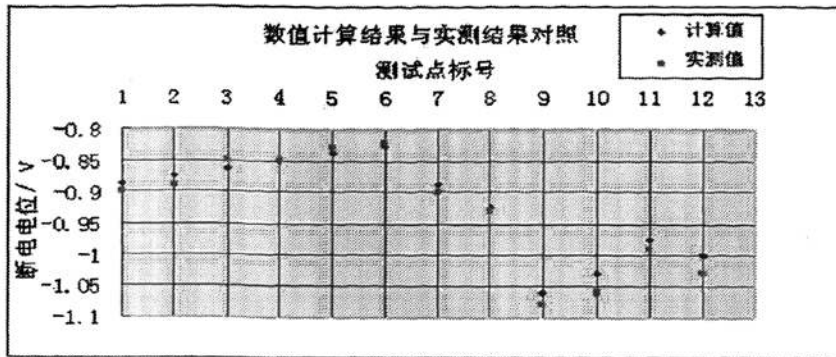


图 3-14 永清站场埋地管道管地电位测量点分布图

表 3-2 管地电位数値计算结果与实测结果对照表



由表 3-2 可见，管地电位的现场测量值和数值模拟计算值接近，同时现场测量也显示管网密集侧的电位偏正，不满足阴极保护要求，这也是与数值模拟结果相吻合的。此结果表明说明对于深井式阳极阴极保护方式，可以采用数值模拟计算来预测区域性阴极保护的电位分布效果。

第四章 区域性阴极保护的施工及注意事项

由于站场区域内埋地管道及接地网错综复杂且分布范围小，同时站场内部具有更高的安全要求，因此对站场区域性阴极保护施工的质量和安全性也提出了更高的要求，为了确保施工过程的安全性以及区域性阴极保护的效果，在区域性阴极保护施工过程中需要注意以下问题。

4.1 对设计和施工方案的要求

设计和施工方案是施工过程的主要依据，方案中必须明确规定施工过程所用材料的型号数量、放置搬运方法；明确规定具有可行性的操作步骤和操作方法；明确说明施工过程中遵守的相应规范标准。针对站场区域性阴极保护的特点，设计和施工方案中应该明确以下内容。

4.1.1 相关材料和工具

1. 辅助阳极相关参数

不同埋设地点辅助阳极的设计使用寿命；辅助阳极的材料、重量、尺寸、型号以及包装情况；阳极填料的类型；同时应该明确辅助阳极在保存、搬运、安装和回填过程中的注意事项。

2. 电缆

主电缆、各个分电缆、电极连接电缆的型号、使用长度、使用环境、电缆绝缘连接材料和绝缘连接的方法，对不同的电缆进行明确编码，并规定不同颜色的电缆所用位置。

3. 整流器

整流器型号；输入输出规格；连接方法和安装过程中的注意事项；保证整流器输出功率大于额定功率的 15~25%。

4. 焊料和模具

焊料的材料型号；不同电缆和管道焊接点的焊料用量以及模具选择；焊料模具的使用方法。

5. 补伤材料

补伤材料的类型；是否与原防腐层相容；补伤材料的使用方法和效果检验方法标准。

6. 永久（长效）参比电极

永久参比电极的型号、数量、安装方法和安装位置。

7. 施工过程中使用的测量、检测工具的型号、数量和使用过程中的注意事项。

4.1.2 施工步骤中的具体要求

施工方案中必须明确规定施工操作的具体步骤，其应该具有很强的现场可操作性，并明确规定阳极埋深和位置、电缆埋深、参比电极的安装位置、各个阳极与管道的距离、整流器的安装位置和安装步骤、焊接过程的焊料重量、补口材料的施工方法、水文钻井的位置和钻井深度和口径等。每个施工过程都应包括如下内容：

1. 施工过程中详细的施工步骤；
2. 每一步施工步骤中，针对输气站场防爆等 HSE 要求必须明确操作者的注意事项；
3. 明确规定操作步骤的检查方法，便于控制施工质量。
4. 对于站场中存在高温管、异金属连接管，存在细菌腐蚀、防腐层剥离等特殊情况下的埋地管道和设备，设计方案中应该给予特别考虑，并提出适合这种特殊情况的施工方法。

4.2 对施工过程的要求

阴极保护系统施工的质量直接决定阴极保护系统的运行效果、使用寿命，不适当的施工和安装方法不但会影响阴极保护的防护效果和寿命，甚至会引起安全问题。长输油气管道站场的特点对站场区域性阴极保护的施工安全性和施工质量提出了更严格的要求。

4.2.1 对人员的要求

为了确保区域性阴极保护施工的质量和安全性，应派阴极保护专业人员进行现场监督，对施工过程的各个环节进行检查和质量把关；并由各个站场派熟悉站场埋地管道分布的安全人员进行现场安全检查，确保施工的安全性。进行站场区域性阴极保护施工作业的施工人员应经过专业培训，具备基本的阴极保护理论基础，了解阴极保护施工中的相关注意事项。由于站场内埋地管网分布错综复杂，在土方开挖、阳极及电缆敷设过程中需要格外小心，以免对分布复杂的埋地管道、光缆电缆等造成损坏，在施工队进站施工前需由各站场相关人员进行严格的安全培训。同时施工队伍中应具备熟练掌握有关防腐施工的技术工人，能够完成土方开挖、阳极敷设、电缆敷设、电缆连接、通电点安装、防腐层补伤、整流器安装及调试、土壤回填等相关的施工操作，并配备必要的自检仪器，如探管仪、万用表、电火花检漏仪、接地电阻测试仪等。

4.2.2 对使用工具材料的检查

1. 质量监督人员应仔细检查施工过程中使用的材料（辅助阳极、电缆、整流器、补伤材料、焊剂、填料等）是否由正规厂家制造并出厂质量检验合格证书，是否满足技术方案的要求，及时发现和纠正施工过程中不正当的施工方法，防止材料的错用、漏用。
2. 确认整流器型号，对整流器的输入和输出进行调试，保证整流器的最大输出电流大于系统需求电流的 15%~25%；按照出厂技术标准对交流输入特征、漂移特征、负载特征、防干扰能力、流经参比的电流、防雷击余波性能、过流短路保护和复位、自动报警等各项性能进行检验。
3. 确定各个埋设地点辅助阳极的型号、材料、重量、数量，确认阳极没有断裂破损现象、接线头完好无损；确保阳极材料和施工方案一致。根据 SY/T0036 的要求，阳极引出线与阳极的接触电阻小于 0.01Ω ，拉伸力应该大于殃及自身质量的 1.5 倍。

4. 审查施工过程中电缆和电缆接头的型号和绝缘层破损情况，保证埋地电缆无老化、断裂现象，保证电缆接头牢固可靠。
5. 检查永久（长效）参比电极是否处于良好的工作状态。根据 SY/T0036 的要求，参比电极的稳定性应在 30mV 以内。
6. 检查焊料、补口材料是否符合施工方案的要求。根据 Nace 标准要求，一般焊剂的用量小于 15g，使用时保证焊接的牢固，同时保证焊接不造成对管道材料性能的影响。
7. 检查施工过程中需要的其它材料和检测、测量工具是否齐备，是否处于良好的工作状态。

4.2.3 对施工过程的检查

对施工过程的具体步骤进行严格的检查和监督，保证施工人员按照方案的要求进行施工，杜绝不正当的施工方式，防止施工过程中对工程用材料、站场设施的破坏，保证阴极保护达到最佳的保护效果。施工过程中要遵循 NACE RP169、SY/T0036 等相关行业规定的规定。

1. 保证整流器正确的安装和连接，确保用电安全；整流器的输出能力一般要大于系统需求的 15~25%，以满足系统电阻发生变化时的需求。
2. 整流器安装时要遵守国家电器规程，电源应该与整流器需求的电源保持一致。
3. 防止安装阳极的过程中野蛮施工，杜绝扔、砸、磕、碰辅助阳极，保证在整个安装和回填过程中阳极完好无损，特别注意在安装过程中对阳极接线头和阳极电缆的保护，禁止用力拖拽接头；安装过程如果发现阳极接头处出现松动或损坏，必须对此处进行维修或更换阳极。
4. 如果阳极有防水容器包装，在安装过程中，必须把该容器去掉，在阳极的存储期间，袋装阳极内部必须保持干燥。
5. 辅助阳极的填料要和施工方案保持一致，深井阳极的填料要分层夯实，以减少填料中间的缝隙，减小阳极的电阻；水平阳极也要夯实，填充缝隙，并保证阳极处于填料的中间；压实过程中，保证导线和接头不受损伤。填料的密度要满足标准 SY/T0036 对阳极地床和深井阳极填料的规定。
6. 确保电缆沟的深度，保证电缆按照图纸设计的要求进行走向，保证电缆的松弛度，严禁硬拉、硬扯；注意电缆颜色和接线柱的对应；使用 PVC 管对电缆的保护；电缆沟在回填时，首先利用沙土回填，然后用开挖土回填，保证回填物中没有物体损毁电缆；确保电缆在铺设、回填和连接过程中不发生任何损伤断裂现象。
7. 利用焊剂对通电汇流点进行焊接时，去除管道防腐层的过程中，严禁野蛮施工，防止对管道造成伤害；焊接前，要按照方案要求对管道进行除锈，确保表面处理质量；焊接过程中，要控制焊剂的使用数量，既要使焊接点牢固，又要避免焊接过程对管道造成的影响；避免焊接过程中烧坏、烫坏电缆的绝缘层。焊接后对管道和电缆进行电火花检漏，电缆漏电电压不得低于 2.4KV；为了保证通电点的长期有效性，每

个通电点应有双电缆分别焊接，以防某一焊接点出现问题时，另一焊点能够继续保证通电。

8. 对焊接点要进行补伤，补伤时保证电缆的完好性，并对修补后的涂层进行检测，采用电火花检漏仪对补伤处进行检测，补伤处耐电电压不低于主管耐电电压。
9. 阴极保护系统的测试桩必须符合设计和施工要求，桩位和设计位置一致，不同的导线使用不同的颜色，并要按照设计方案进行编码。
10. 深井阳极水文钻井位置必须和设计位置一致，并保证钻井处没有其他管道或电缆。确保钻井的直径和深度都达到设计和施工要求。
12. 深井阳极安装过程中要保证阳极电缆不发生断裂损害；阳极安装过程中要正确地固定，保证阳极处于深井的中心位置。
13. 深井阳极水文钻井的 PVC 排气管要紧贴钻井壁放置，安装过程中要保证排气管的通畅，防止堵塞影响其正常工作。
14. 安装完毕后，电缆沟的回填、阳极地床的回填地点要恢复原貌，保持站内的整洁。
15. 测量站内阴极保护系统对干线的影响，对比站外阴极保护系统在站内实施区域性阴极保护前后输出是否发生变化，如果发生变化则要查看控制电位点是否受到了站内阴极保护系统的影响。如果站外阴极保护系统受到站内保护系统的影响，则要采取措施进行消除干扰。
16. 由于站场内埋地管网错综复杂，在区域性阴极保护施工过程中，会出现根据现场情况对阳极或电缆的埋设位置作一定的调整，为了日后管理的方便，要求施工方在施工完成后提供每支阳极的精确位置和变动原因，并确保调整后依然能够达到预期效果。
17. 在深井阳极施工过程中，要根据阳极井的寿命、井内要安装的阳极的数量、电缆的数量、排气管的直径和数量来确定井口的直径，不宜太小，否则给施工带来困难。
18. 在深井阳极的填料施工过程中，应确保所采用的焦炭填料含碳量及粒度等性能指标符合设计要求，并在填料沉降充分达到设计要求的高度后，方可向井内填充石子，否则会增大阳极的接地电阻，严重影响深井阳极的效果和使用和寿命。

第五章 陕京管道站场区域性阴极保护测试与效果评价

区域性阴极保护技术是将某一区域内的所有预保护对象作为一个整体进行阴极保护,依靠辅助阳极的合理布局、保护电流的自由分配以及与相邻设备的电绝缘措施,使被保护对象处于规定的保护电位范围之内。与常规阴极保护方法相比,保护对象不是单一的,而是一定区域内的金属结构复合体,由于保护区域内保护对象繁多,地下金属结构复杂,分布范围小,保护电流消耗较高,同时由于区域性阴极保护具有多保护回路,易产生屏蔽和干扰问题。鉴于区域性阴极保护技术的以上特点,在站区内阴极保护工程施工完成后,对阴极保护效果进行检测与评价是很有必要的,根据阴极保护效果检测与评价结果,来确定合理的阴极保护系统输出参数,并对阴极保护系统作一定的调整,以达到均衡的保护和最大限度的降低对非本保护系统的干扰,从而获得最佳的保护效果。

5.1 区域性阴极保护效果检测内容

区域性阴极保护效果检测内容分为三个阶段:1)阴极保护系统投产前检测;2)阴极保护系统投产后检测;3)作相应的整改调试后阴极保护效果检测。

5.1.1 投产前检测

投产前测试主要包括:站场的土壤电阻率分布、埋地管道自然电位测试、阳极地床接地电阻测试。

(1) 站场土壤电阻率的测定

土壤电阻率是影响地下金属构件腐蚀的一个重要的综合性因素,是判断土壤腐蚀性的最基本参数,同时也是影响阴极保护输出电流及保护效果的一个重要因素。按照 GB/T 21246-2007 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法,采用 Wenner 对称四极交流电法来测量站场土壤电阻率。所用仪器为 ZC-8 接地电阻测量仪(4 端)、卷尺、温度计和 4 支金属探针。测量步骤为:将 4 支金属探针垂直等间距 a (1.5m 或 2.0m) 插入土壤中,探针插入深度为 b (不大于 $a/20$)。将仪器水平放置,检查仪器表盘指针是否在中心线上,并将导线按顺序接到金属探针上。摇动 ZC-8 电阻测量仪的手柄,同时转动“测量标度盘”和倍率钮,当接近平衡位置时,加快发电机摇动速度,使转速大于 120r/min,调整标度盘,使指针指在中心线上,即可读数,从而求得待测土壤的电阻率。Winner 四极法测土壤电阻率示意图如图 5-1 所示。

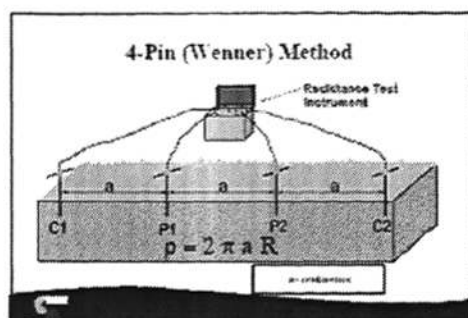


图 5-1 Winner 四极法测土壤电阻率

(2) 管道自然电位测试

无论采用牺牲阳极法还是采用强制电流法阴极保护，被保护构筑物的自然腐蚀电位都是一个极为重要的参数。它体现了构筑物本身的活性，决定了阴极保护所需电流的大小，同时又是阴极保护准则中重要的参考点。

自然腐蚀电位是金属埋入土壤（或浸在其它介质中）后，无外部电流影响时的对地电位。自然腐蚀电位随着金属结构的材质、表面状况和土质状况，含水量等因素不同而异，一般有涂层埋地管道的自然腐蚀电位在-0.4~0.7V（CSE）之间。自然腐蚀电位可表示金属失去电子的相对难易，腐蚀电位愈负愈容易失去电子，即越容易充当阳极。自然腐蚀电位的测量采用数字万用表和便携式 Cu/CuSO₄ 参比电极进行。

(3) 辅助阳极地床接地电阻测量

辅助阳极的接地电阻约占阴极保护回路总电阻的 70%~80%，故阳极材料的选择及其埋置场所的处理，对节省电能消耗至关重要。在选择电源设备和运行期间，应考虑阴极保护系统辅助阳极的接地电阻值与电源额定负载（ $R_{\text{额}}$ ）相匹配。

$$R_{\text{额}} = \frac{V_{\text{额}}}{I_{\text{额}}} \quad (5-1)$$

式中： $V_{\text{额}}$ ——额定输出电压，V；
 $I_{\text{额}}$ ——额定输出电流，A。

阳极地床的接地电阻必须比额定负载小，才能保证所设计的保护电流的输出。测量仪表采用 ZC-8 接地电阻测试仪，需将 P1、C1 端用铜片短接，其它操作与土壤电阻率测试相同。

5.1.2 投产后检测

阴极保护系统投产后检测内容主要包括：管道通断电位测试、管道的极化电位测试、辅助阳极的输出电流测试。应按照通电极化时间进行多次检测，包括通电后立即进行检测，极化三天后检测，极化一个月后检测，极化三个月后检测，极化半年后检测，以及长期的效果监测。

(1) 管道通断电位测试

保护电位是阴极保护的关键参数，是衡量阴极保护效果的重要指标。在对本文论及的站场阴极保护技术效果进行检测过程中，电位测量采用原位参比和地表参比相结合的测量方法。

a. 原位参比法

在阴极保护工程施工过程中已经在某些靠近保护体的固定点埋设了永久（长效）参比电极，并引线至测试桩，采用数字万用表在测试桩处直接测取被保护体的保护电位，检查电位是否达到 -0.85V （相对饱和硫酸铜参比电极）或更负，如果满足，则认为系统在该处达到满意的阴极保护效果，否则不满足阴极保护要求。测量示意图如图 5-2 所示。

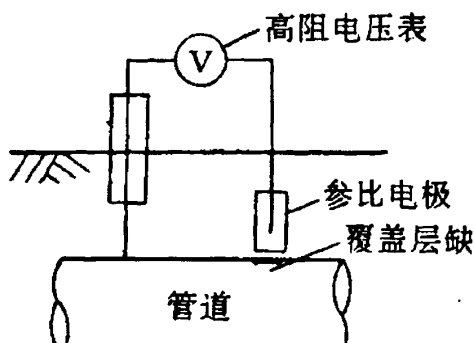


图 5-2 原位参比法电位测量

b. 地表参比法

将便携式参比电极置于埋地管道及设施上方的地表面上，通过数字万用表测量被保护构件与参比电极之间的电位，采用该方法测得的保护电位中包含 IR 降，可通过瞬间断电法来消除 IR 降。瞬间断电法要求待测构件上所有相连的接地保护、牺牲阳极均须断开，相连的多个阴极保护装置也要同时断开，从而排除测试点处杂散电流的干扰，测量中使用响应速度极快的自动记录仪，PM97 型万用示波表，来记录通电保护电位、断电瞬间极化电位及去极化电位差。要达到阴极保护要求，断电瞬间极化电位应达到 -0.85V 或更负，而去极化电位差最小为 100mV 。

地表参比法如图 5-3 所示，通断电电位及去极化示意图如图 5-4 所示。

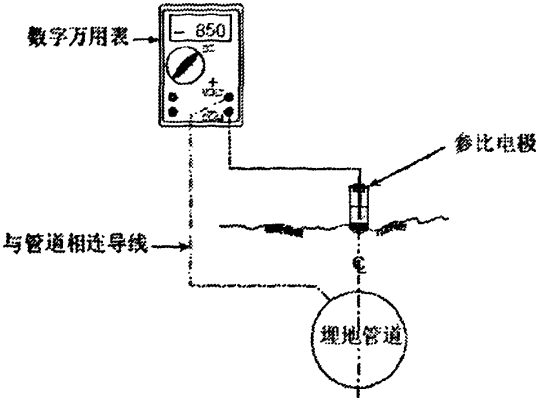


图 5-3 地表参比法测量保护电位

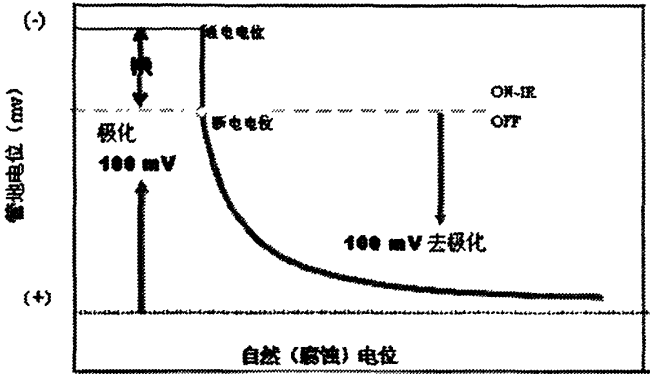


图 5-4 通断电电位及去极化示意图

C. 目前较为先进的多回路整流器仪器本身带有 ON 状态和 INSTANT-OFF 状态电位测试功能，可方便地测得每个回路通电汇流点处的管道通、断电位。

(2) 管道的极化电位测试

用测得的断电保护电位减去自然腐蚀电位即可得到埋地管道不同地点的极化电位。

(3) 辅助阳极输出电流测试

通过将电流表串入阴极保护电路中，来测试辅助阳极的输出电流，检测阳极的工作状况。

通过以上检测项目，根据测量数据评价采育站区域性阴极保护的有效性，给出评价结论。

5.2 区域性阴极保护效果检测数据及评价结果

5.2.1 琉璃河站区域性阴极保护效果检测数据及评价结果

(1) 埋地管道自然电位测量

琉璃河站区域性阴极保护工程竣工图如图 5-5 所示。

琉璃河阴极保护工程图

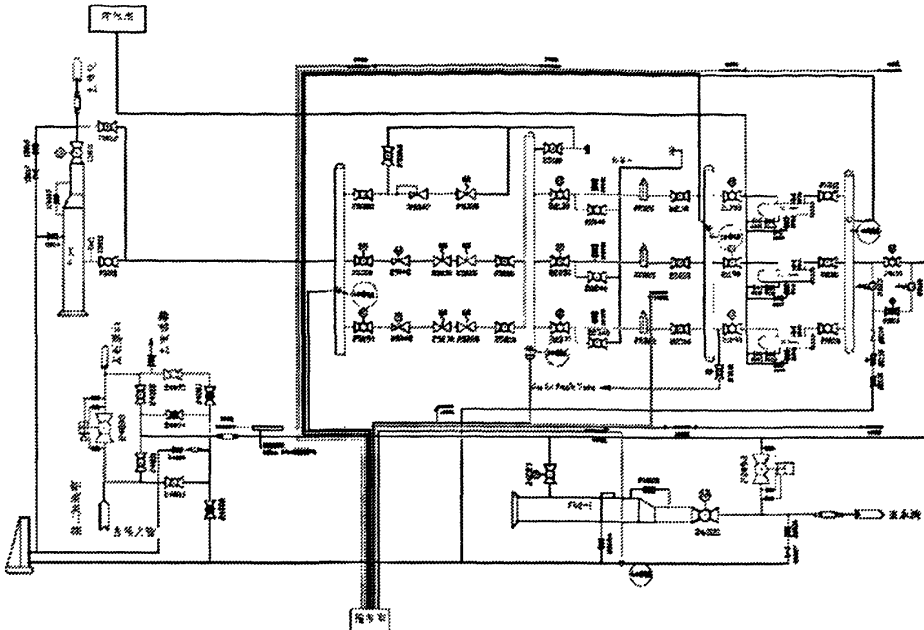


图 5-5 琉璃河站区域性阴极保护工程竣工图

自然电位测量点的分布如图 5-6 所示。

测量得到不同测试点埋地管道的自然腐蚀电位 (V, Cu/CuSO₄ 参比电极) 为:

1: -0.584	2: -0.580	3: -0.573
4: -0.621	5: -0.612	6: -0.606
7: -0.619	8: -0.612	9: -0.605
10: -0.565	11: -0.580	12: -0.590
13: -0.565	14: -0.582	15: -0.590
16: -0.562	17: -0.556	18: -0.568
19: -0.541	20: -0.568	

由以上数据可见, 琉璃河站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在-0.541V~-0.621V (相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极) 之间, 自然腐蚀电位数据正常。

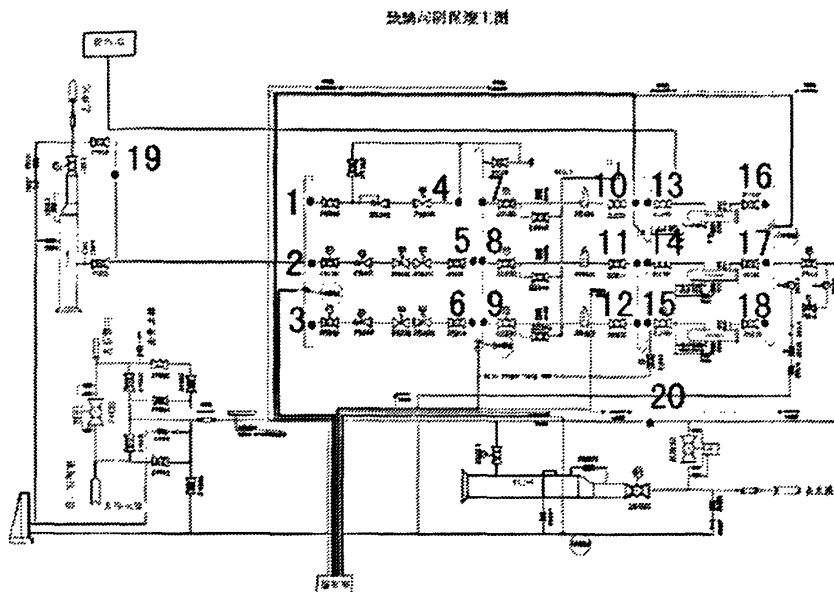


图 5-6 琉璃河站区域性阴极保护电位测试点分布图

(2) 阴极保护电位测量

在阴极保护系统通电后立即进行通、断电电位测量，极化三天后再次测量阴极保护电位，根据电位数值对整流器输出电压和电流作一定的调整后通电 1 个月、3 个月、半年后的通、断电电位测量数据如表 5-1 可见，电位测量点分布如图 5-6 所示。

表 5-1 琉璃河站埋地管道通、断电电位测量 (V, Cu/CuSO₄)

位置标号	自腐蚀电位 V (Cu/CuSO ₄)	通电后立即测量		通电 1 个月		通电 3 个月		通电半年	
		通	断	通	断	通	断	通	断
1	-0.584	-1.059		-1.23	-0.86	-1.41	-0.95	-1.60	-1.04
2	-0.580	-1.048		-1.10	-0.79	-1.17	-0.86	-1.60	-1.08
3	-0.573	-1.015		-1.13	-0.80	-1.33	-0.87	-1.56	-1.00
4	-0.621	-1.122		-1.28	-0.87	-1.52	-0.94	-1.98	-1.00
5	-0.612	-1.316		-1.42	-0.81	-1.45	-0.87	-2.08	-1.00
6	-0.606	-1.422		-1.66	-0.86	-1.82	-0.96	-2.00	-1.04
7	-0.619	-1.123		-1.28	-0.83	-1.37	-0.90	-1.88	-1.01
8	-0.612	-1.316		-1.39	-0.79	-1.44	-0.86	-2.08	-1.00
9	-0.605	-1.425		-1.63	-0.88	-1.82	-0.96	-2.00	-1.04
10	-0.565	-1.182		-1.21	-0.86	-1.28	-0.94	-1.92	-1.08
11	-0.580	-1.397		-1.47	-0.88	-1.57	-0.97	-1.88	-1.08
12	-0.590	-1.480		-1.59	-0.92	-1.69	-1.03	-1.84	-1.08
13	-0.565	-1.182		-1.33	-0.95	-1.50	-1.03	-1.96	-1.09
14	-0.582	-1.367		-1.32	-0.97	-1.33	-1.00	-2.03	-1.10
15	-0.590	-1.468		-1.52	-0.92	-1.58	-0.98	-1.98	-1.08
16	-0.562	-1.062		-1.29	-0.85	-1.35	-0.95	-1.56	-1.00
17	-0.556	-1.056		-1.22	-0.87	-1.33	-0.93	-1.72	-1.00
18	-0.568	-1.058		-1.11	-0.83	-1.16	-0.86	-1.76	-0.96
19	-0.541	-0.691		-0.79	-0.66	-0.83	-0.70	-1.32	-0.82
20	-0.568	-1.558		-1.56	-0.88	-1.60	-0.93	-1.86	-1.06

通电半年后琉璃河站埋地管道测试点处的极化电位如表 5-2 所示。

表 5-2 琉璃河站阴极保护系统通电半年后埋地管道极化电位 (Cu/CuSO₄)

位置标号	自腐蚀电位 /V	通电半年保护电位 /V		通电半年极化电位 /mV
		通	断	
1	-0.584	-1.60	-1.04	456
2	-0.580	-1.60	-1.08	500
3	-0.573	-1.56	-1.00	427
4	-0.621	-1.98	-1.00	379
5	-0.612	-2.08	-1.00	388
6	-0.606	-2.00	-1.04	434
7	-0.619	-1.88	-1.01	391
8	-0.612	-2.08	-1.00	388
9	-0.605	-2.00	-1.04	435
10	-0.565	-1.92	-1.08	515
11	-0.580	-1.88	-1.08	500
12	-0.590	-1.84	-1.08	490
13	-0.565	-1.96	-1.09	525
14	-0.582	-2.03	-1.10	518
15	-0.590	-1.98	-1.08	490
16	-0.562	-1.56	-1.00	438
17	-0.556	-1.72	-1.00	444
18	-0.568	-1.76	-0.96	392
19	-0.541	-1.32	-0.82	279
20	-0.568	-1.86	-1.06	492

由表 5-1、5-2 的阴极保护电位测量数据可见,琉璃河站埋地管道测试点除 19 点外,其它点处阴极保护通、断电电位均负于-0.85V(CSE),极化电位大于 100mV,满足 NACE RP0169 和 SY 0007—1999 的要求。

(3) 琉璃河站阴极保护回路及参比电极对应关系

琉璃河站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图如图 5-7 所示。

陕京一线站内管道阴极保护工程

琉璃河站阴极保护系统平面示意图

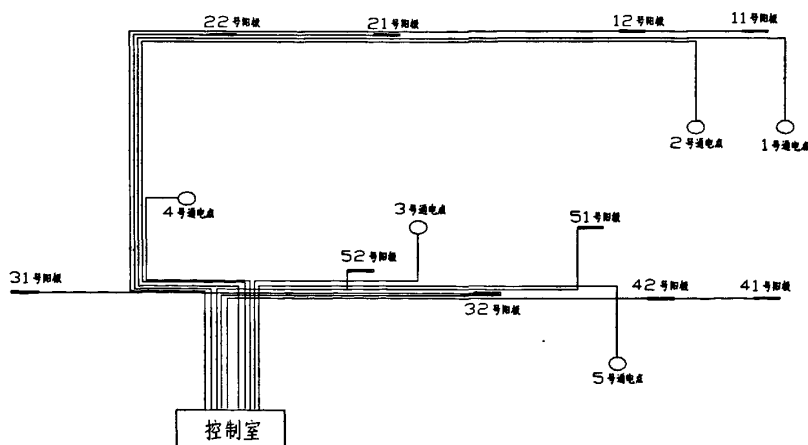


图 5-7 琉璃河站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图

对整流器调试后阴极保护回路与参比电极的对应关系如下：

回路 1： 2 号参比电极

回路 2： 4 号参比电极

回路 3： 3 号参比电极

回路 4： 1 号和 5 号参比电极

回路 5： 恒电流输出

各回路的输出电流、电压及控制参比电极处的电位如表 5-3 所示。

表 5-3 各回路的输出电流 (A)、电压 (V) 及控制参比电位 (V, CSE)

回路标号	输出电压/V	输出电流/A	控制参比 1	控制参比 2
1	6.21	1.481	-0.961	
2	5.09	1.462	-0.903	
3	9.02	1.503	-0.980	
4	6.07	1.533	-0.895	-0.919
5	4.08	0.961		

由表 5-3 的数据可见，各保护回路的控制参比电位均在 -0.85V (CSE) 以下，说明各保护回路的保护效果均较好。

(4) 琉璃河站土壤电阻率测量

将琉璃河站场分为 11 个区块，区块分布如图 5-8 所示，采用 ZC-8 土壤电阻仪“四极法”分别测量了每个区块的土壤电阻率，测量结果及站场的平均土壤电阻率如表 5-4 所示。

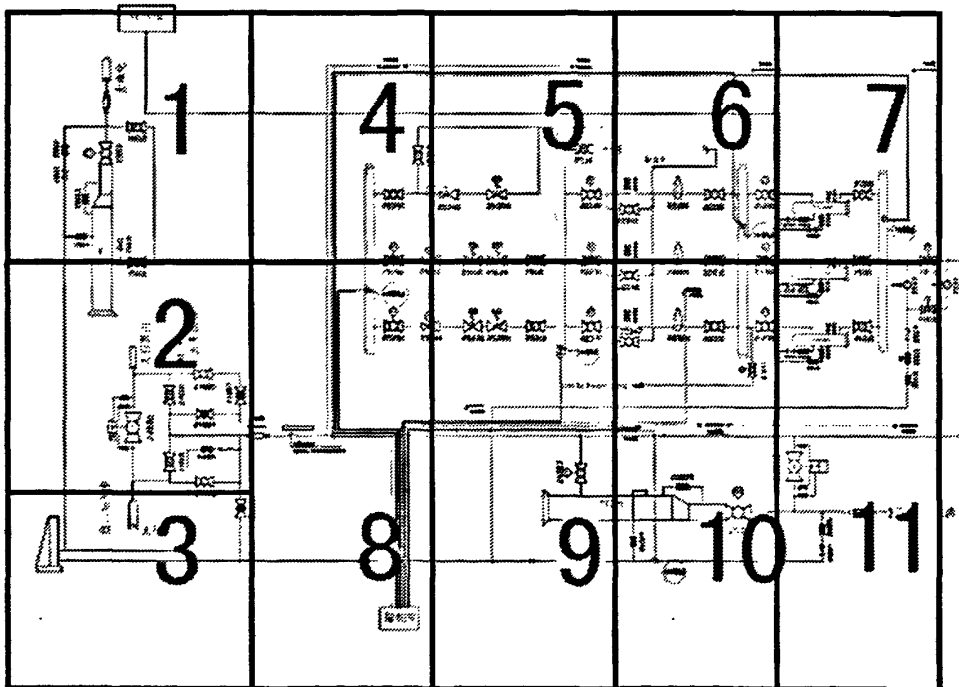


图 5-8 琉璃河站土壤电阻率测量区块

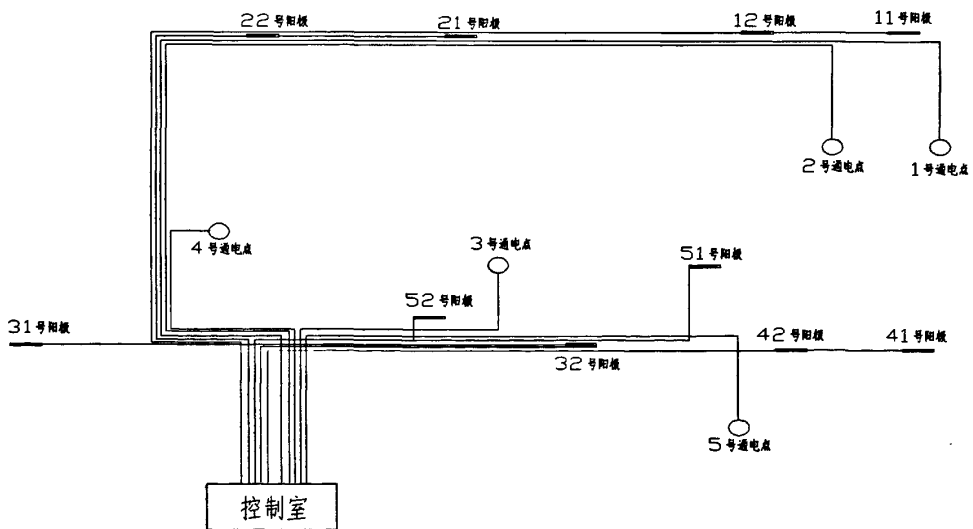
表 5-4 琉璃河站土壤电阻率分布

区块标号	电极间距 a / m	倍率标度 $\frac{I_2}{I_1}$	表盘读数 R_{ob}	土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) $\rho = 2\pi a \frac{I_2}{I_1} R_{ob}$
1	2	1	2.2	27.632
2	2	1	2.0	25.12
3	2	1	2.0	25.12
4	2	1	1.9	23.864
5	2	1	1.7	21.352
6	2	1	1.6	20.096
7	2	1	1.85	23.236
8	2	1	3.2	40.192
9	2	1	1.95	24.492
10	2	1	1.65	20.724
11	2	1	1.8	22.608
平均值				24.949

(5) 琉璃河站阳极接地电阻测量

陕京一线站内管道阴极保护工程

琉璃河站阴极保护系统平面示意图



采用 ZC-8 接地电阻仪“三极法”测量了每支阳极的接地电阻，如表 5-5 所示。

表 5-5 琉璃河站阳极接地电阻测量

序号	阳极标号	电极间距 a / m	倍率标度 $\frac{I_2}{I_1}$		表盘读数 R_{ob}		阳极接地电阻 (Ω) $r = \frac{I_2}{I_1} R_{ob}$
			夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
1	11	20	1	10	2.0	1.8	2.0
2	12	20	1	10	2.0	1.7	2.0
3	21	20	1	10	2.0	1.8	2.0
4	22	20	1	10	2.0	1.8	2.0
5	31	20	1	10	2.0	1.7	2.0
6	32	20	1	10	1.9	1.7	1.9
7	41	20	1	10	1.9	2.0	1.9
8	42	20	1	10	1.9	2.0	1.9
9	51	20	1	10	2.0	1.8	2.0
10	52	20	1	10	2.0	1.8	2.0

由表 5-5 的数据可见，所测得的阳极接地电阻在夏季较小，冬季偏大，这主要是由于冬季土壤冻结导致土壤电阻率增大造成的。

小结:

1. 在阴极保护系统通电之前，对自然腐蚀电位进行了测量，结果表明琉璃河站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在-0.541V~-0.621V（相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极）之间，自然腐蚀电位数据正常。

2. 由阴极保护系统通电 3 个月、半年后的通、断电电位测量数据可见，除个别点外，绝大多数测试点阴极保护通、断电电位均负于-0.85V（CSE），极化电位大于 100mV，满足 NACE RP 0169 和 SY 0007—1999 的要求。而在发球筒 F01-1 附近测试点的阴极保护断电电位正于-0.85V（CSE），可能由于该区域埋地管道与阳极相距较远因而获得的保护电流较少，极化较小，需要采取措施来对该区域管道补加保护。

3. 将琉璃河站场分为 11 个区块，分别测量了每个区块的土壤电阻率，数据分布在 20 $\Omega\cdot\text{m}$ ~40 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间，站场的平均土壤电阻率为 24.95 $\Omega\cdot\text{m}$ 。测量了每支阳极在夏季和冬季的接地电阻，所得结果表明，阳极接地电阻在夏季较小，冬季偏大，这主要是由于冬季土壤冻结导致土壤电阻率增大造成的。因而随着季节的变化，要保持阴极保护效果，整流器的输出需要作一定的调整。

5.2.2 石景山站区域性阴极保护效果检测数据及评价结果

(1) 埋地管道自然电位测量

石景山站区域性阴极保护工程竣工图如图 5-9 所示。

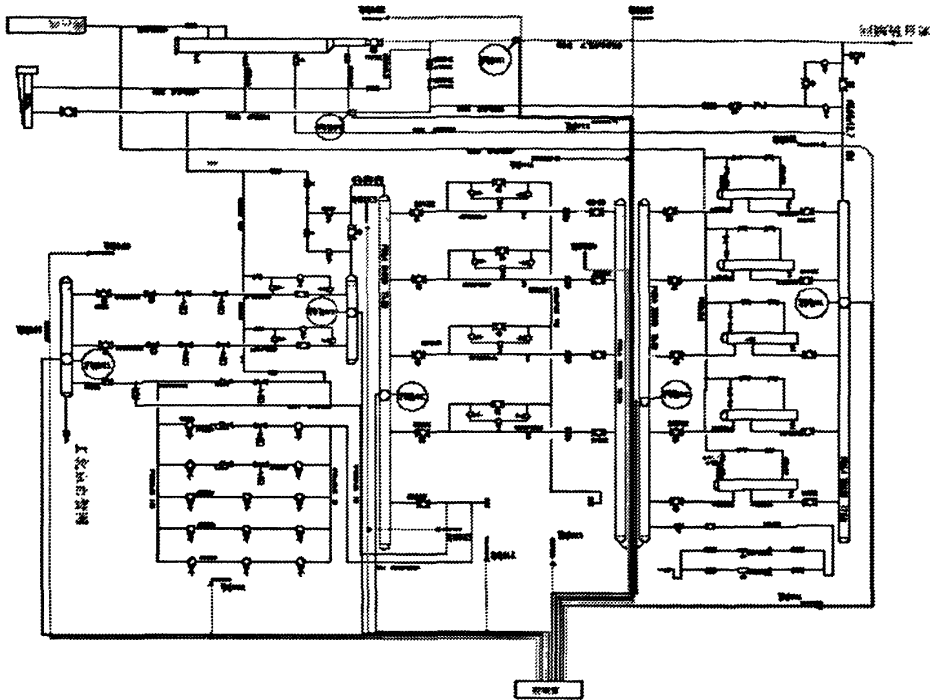


图 5-9 石景山站区域性阴极保护工程竣工图

自然电位测量点的分布如图 5-10 所示。

测量得到不同测试点处埋地管道的自然腐蚀电位 (V, Cu/CuSO₄ 参比电极) 为:

1: -0.619	2: -0.603	3: -0.596	
4: -0.596	5: -0.598	6: -0.618	
7: -0.608	8: -0.596	9: -0.596	
10: -0.586	11: -0.621	12: -0.620	
13: -0.577	14: -0.596	15: -0.622	
16: -0.587	17: -0.596	18: -0.599	
19: -0.584	20: -0.586	21: -0.589	22: -0.626

由以上数据可见, 石景山站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在-0.577V~-0.626V (相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极) 之间, 自然腐蚀电位数据正常。

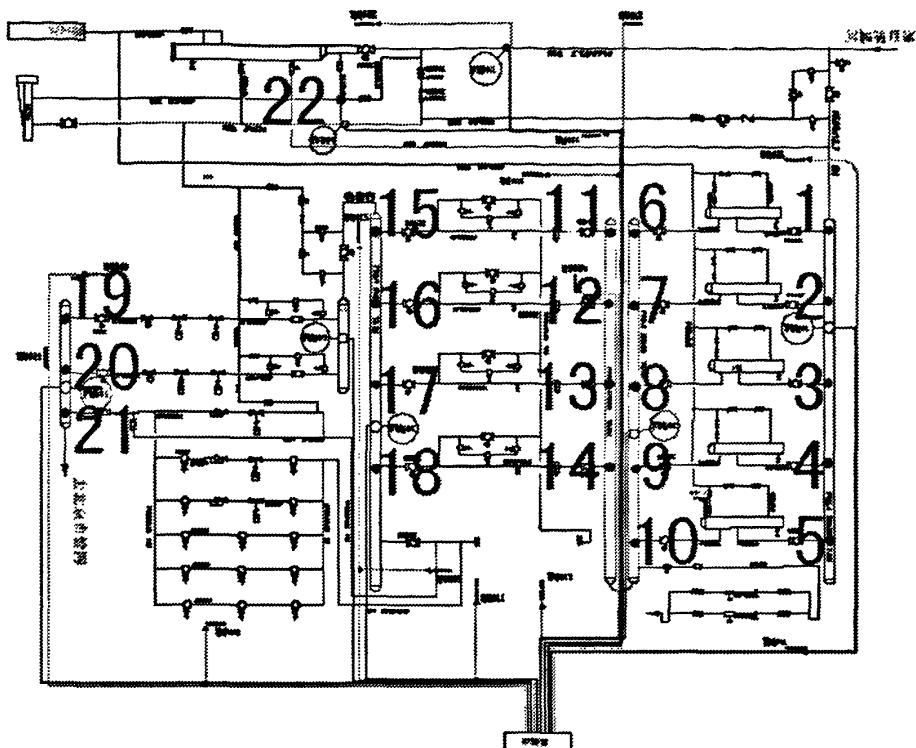


图 5-10 石景山站区域性阴极保护电位测试点分布图

(2) 阴极保护电位测量

在阴极保护系统通电后立即进行通、断电电位测量，极化三天后再次测量阴极保护电位，根据电位数值对整流器输出电压和电流作一定的调整后通电 1 个月、3 个月、半年后的通、断电电位测量数据如表 5-6 可见，电位测量点分布如图 5-10 所示。

表 5-6 石景山站埋地管道通、断电电位测量 (V, Cu/CuSO₄)

位置标号	自腐蚀电位 V (Cu/CuSO ₄)	通电后 立即测量		通电 1 个月		通电 3 个月		通电半年	
		通	断	通	断	通	断	通	断
1	-0.619	-0.991		-1.38	-0.96	-1.57	-1.01	-1.58	-1.08
2	-0.603	-0.987		-1.12	-0.94	-1.28	-0.98	-1.56	-1.22
3	-0.596	-0.905		-1.09	-0.92	-1.17	-0.97	-1.58	-1.06
4	-0.596	-0.998		-1.14	-0.98	-1.34	-1.02	-1.56	-1.20
5	-0.598	-1.127		-1.58	-1.19	-1.74	-1.19	-2.40	-1.20
6	-0.618	-1.197		-1.39	-1.05	-1.76	-1.08	-1.58	-1.10
7	-0.608	-1.136		-1.43	-1.12	-1.91	-1.17	-1.56	-1.20
8	-0.596	-1.268		-1.36	-0.94	-1.56	-1.03	-1.53	-1.06
9	-0.596	-1.034		-1.28	-0.92	-1.57	-1.03	-1.49	-1.05
10	-0.586	-1.127		-1.54	-0.99	-1.83	-1.05	-1.56	-1.06
11	-0.621	-1.197		-1.67	-1.25	-2.30	-1.12	-2.16	-1.12

12	-0.620	-1.136		-1.57	-1.10	-2.10	-1.19	-2.30	-1.23
13	-0.577	-1.089		-1.33	-0.95	-1.64	-1.08	-1.70	-1.16
14	-0.596	-1.148		-1.46	-1.11	-1.96	-1.16	-2.00	-1.18
15	-0.622	-1.136		-1.68	-1.12	-2.57	-1.22	-2.26	-1.11
16	-0.587	-1.129		-1.32	-0.96	-1.56	-1.04	-2.33	-1.22
17	-0.596	-1.197		-1.23	-0.92	-1.29	-0.99	-1.58	-1.08
18	-0.599	-1.024		-1.28	-0.99	-1.47	-1.10	-1.70	-1.15
19	-0.584	-0.992		-1.52	-1.08	-2.12	-1.17	-1.16	-0.90
20	-0.586	-0.991		-1.24	-1.05	-1.58	-1.09	-1.20	-1.08
21	-0.589	-0.959		-1.22	-1.02	-1.58	-1.09	-1.22	-1.08
22	-0.626	-0.833		-0.92	-0.70	-0.94	-0.74	-0.98	-0.76

通电半年后石景山站埋地管道的极化电位如表 5-7 所示。

表 5-7 石景山站阴极保护系统通电半年后埋地管道极化电位 (Cu/CuSO₄)

位置标号	自腐蚀电位 /V	通电半年保护电位 /V		通电半年极化电位 /mV
		通	断	
1	-0.619	-1.58	-1.08	461
2	-0.603	-1.56	-1.22	617
3	-0.596	-1.58	-1.06	464
4	-0.596	-1.56	-1.20	604
5	-0.598	-2.40	-1.20	602
6	-0.618	-1.58	-1.10	482
7	-0.608	-1.56	-1.20	592
8	-0.596	-1.53	-1.06	464
9	-0.596	-1.49	-1.05	454
10	-0.586	-1.56	-1.06	474
11	-0.621	-2.16	-1.12	499
12	-0.620	-2.30	-1.23	610
13	-0.577	-1.70	-1.16	583
14	-0.596	-2.00	-1.18	584
15	-0.622	-2.26	-1.11	488
16	-0.587	-2.33	-1.22	633
17	-0.596	-1.58	-1.08	484
18	-0.599	-1.70	-1.15	551
19	-0.584	-1.16	-0.90	316
20	-0.586	-1.20	-1.08	494
21	-0.589	-1.22	-1.08	491
22	-0.626	-0.98	-0.76	134

由表 5-6、5-7 的阴极保护电位测量数据可见，石景山站埋地管道测试点除 22 点外，其它点处阴极保护通、断电电位均负于-0.85V(CSE)，极化电位大于 100mV，满足 NACE RP 0169 和 SY 0007—1999 的要求。

(3) 石景山站阴极保护回路及参比电极对应关系

石景山站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图如图 5-11 所示。

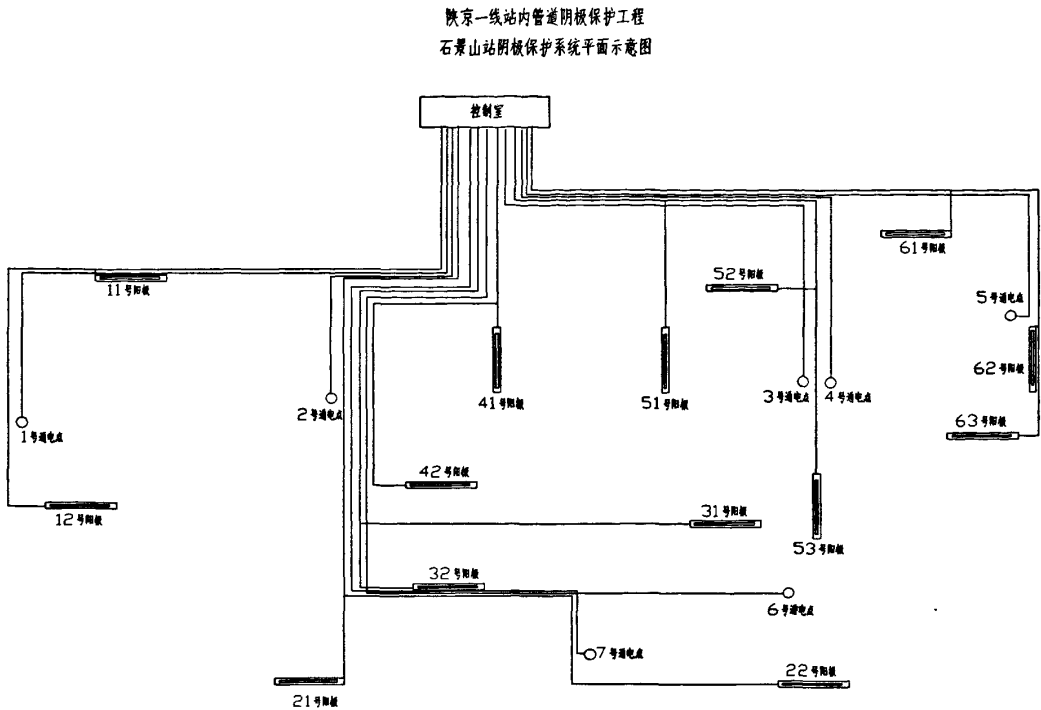


图 5-11 石景山站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图

对整流器调试后阴极保护回路与参比电极的对应关系如下：

- 回路 1： 1 号参比电极
- 回路 2： 2 号参比电极
- 回路 3： 6 号参比电极和 7 号参比电极
- 回路 4： 恒流
- 回路 5： 3 号参比电极和 4 号参比电极
- 回路 6： 5 号参比电极

各回路的输出电流、电压及控制参比电极处的电位如表 5-8 所示。

表 5-8 各回路的输出电流 (A)、电压 (V) 及控制参比电位 (V, CSE)

回路标号	输出电压	输出电流	控制参比 1	控制参比 2
1	9.15	1.921	-0.917	
2	14.68	1.101	-1.095	
3	1.56	0.061	-0.669	0.830
4	11.81	1.918		
5	8.24V	1.933	0.934	0.900
6	7.77	1.962	1.045	

由表 5-8 的数据可见，第 3 个保护回路的控制参比电位较正，不满足阴极保护要求，其它保护回路保护效果较好。第 3 个保护回路有 6 号和 7 号两支控制参比电极，对照图

5-10 和 5-11 可见, 控制参比的位置和 22 号测试点位置接近, 22 号测试点阴极保护电位偏正, 6 号和 7 号控制参比电极电位也偏正, 说明该区域内埋地管道阴极保护效果较差。

(4) 石景山站土壤电阻率测量

将石景山站场分为 12 个区块, 区块分布如图 5-12 示, 采用 ZC-8 土壤电阻仪“四极法”分别测量了每个区块的土壤电阻率, 测量结果及站场的平均土壤电阻率如表 5-9 所示。

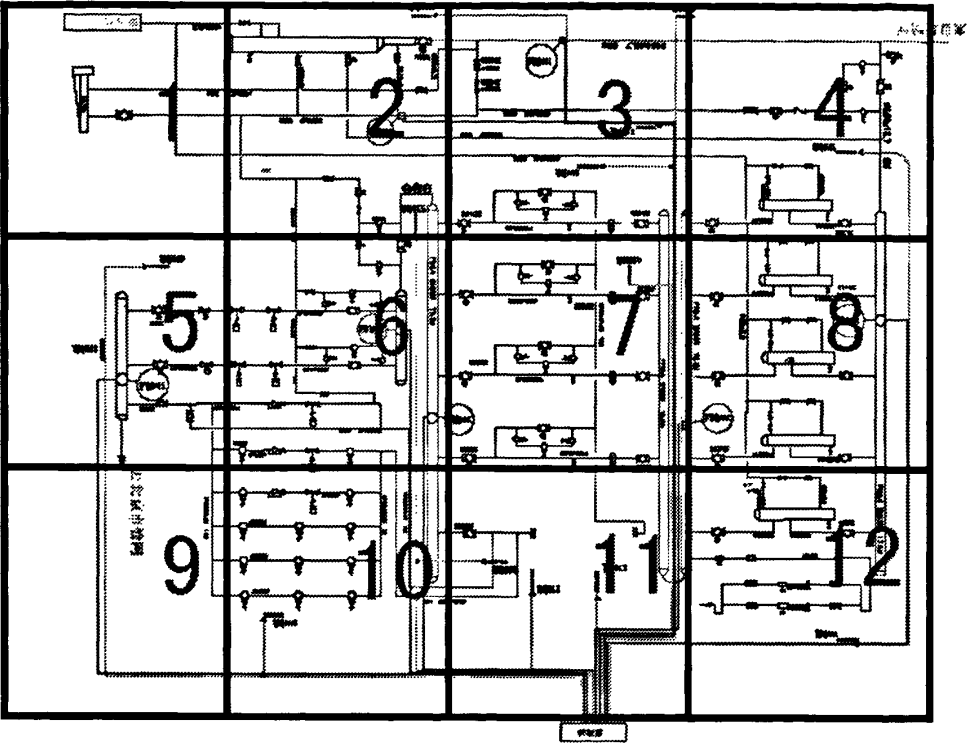


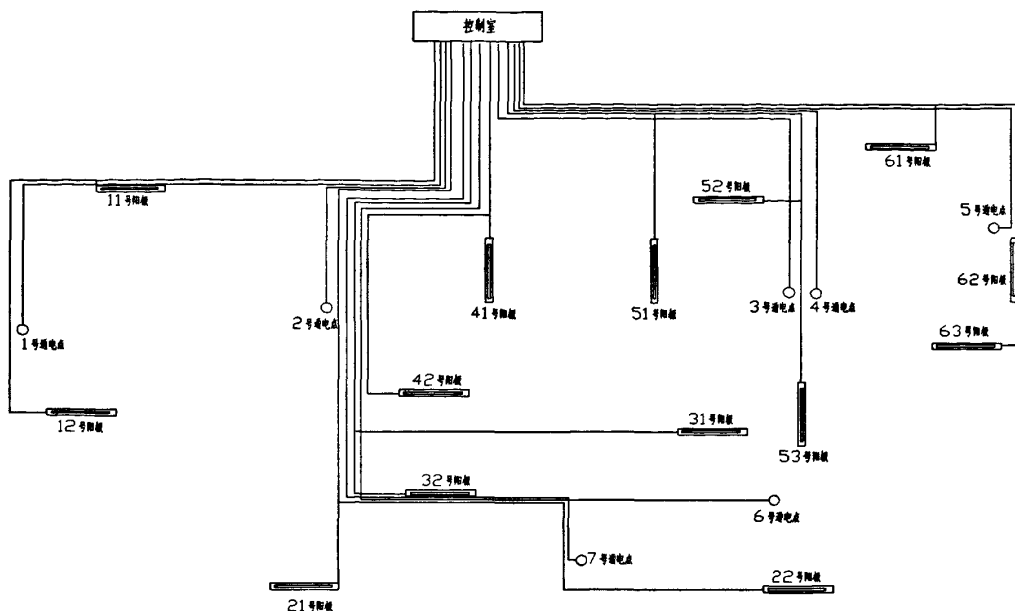
图 5-12 石景山站土壤电阻率分布图

表 5-9 石景山站土壤电阻率分布

区块标号	电极间距 a / m	倍率标度 $\frac{I_2}{I_1}$	表盘读数 R_{ob}	土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) $\rho = 2\pi a \frac{I_2}{I_1} R_{ob}$
1	2	1	4.1	51.496
2	2	1	4.8	60.288
3	2	1	6.5	81.64
4	2	1	4.6	57.776
5	2	1	2.8	35.168
6	2	1	3.15	39.564
7	2	1	3.3	41.448
8	2	1	2.65	33.284
9	2	1	4.4	55.264
10	2	1	2.35	29.516
11	2	1	2.6	32.656
12	2	1	2.4	30.144
平均值				45.687

(5) 石景山站阳极接地电阻测量

陕京一线站内管道阴极保护工程
石景山站阴极保护系统平面示意图



采用 ZC-8 接地电阻仪“三极法”测量了每支阳极的接地电阻，如表 5-10 所示。

表 5-10 石景山站阳极接地电阻测量

序号	阳极标号	电极间距 a / m	倍率标度 $\frac{I_2}{I_1}$		表盘读数 R_{ob}		阳极接地电阻 (Ω) $r = \frac{I_2}{I_1} R_{ob}$	
			夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
1	11	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
2	12	20	1	10	2.0	2.0	2.0	20
3	21	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
4	22	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
5	31	20	1	10	2.0	1.9	2.0	19
6	32	20	1	10	2.1	2.0	2.1	20
7	41	20	1	10	2.0	2.0	2.0	20
8	42	20	1	10	2.0	2.1	2.0	21
9	51	20	1	10	2.0	2.1	2.0	21
10	52	20	1	10	2.0	2.0	2.0	20
11	53	20	1	10	2.1	2.0	2.1	20
12	61	20	1	10	2.1	2.0	2.1	20
13	62	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
14	63	20	1	10	2.0	1.9	2.0	19

由表 5-10 的可见，所测得的阳极接地电阻在夏季较小，冬季偏大，这主要是由于冬季土壤冻结导致土壤电阻率增大造成的。

小结:

1. 在阴极保护系统通电之前,对自然腐蚀电位进行了测量,结果表明石景山站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在 $-0.577\text{V}\sim-0.626\text{V}$ (相对于 Cu/CuSO_4 参比电极),自然腐蚀电位数据正常。

2. 由阴极保护系统通电 3 个月、半年后的通、断电电位测量数据可见,除个别点外,绝大多数测试点阴极保护通、断电电位均负于 -0.85V (CSE),极化电位大于 100mV ,满足 NACE RP 0169 和 SY 0007—1999 的要求。而在发球筒附近测试点和控制参比电极的阴极保护电位偏正,可能由于该区域埋地管道与阳极相距较远因而获得的保护电流较少,极化较小,需要采取措施来对该区域管道补加保护。

3. 将石景山站场分为 12 个区块,分别测量了每个区块的土壤电阻率,数据分布在 $30\Omega\cdot\text{m}\sim60\Omega\cdot\text{m}$ 之间,站场的平均土壤电阻率为 $45.69\Omega\cdot\text{m}$ 。测量了每支阳极在夏季和冬季的接地电阻,所得结果表明,阳极接地电阻在夏季较小,冬季偏大,这主要是由于冬季土壤冻结导致土壤电阻率增大造成的。因而随着季节的变化,要保持阴极保护效果,整流器的输出需要作一定的调整。

5.2.3 通州南站区域性阴极保护效果检测数据及评价结果

(1) 埋地管道自然电位测量

通州南站区域性阴极保护工程竣工图如图 5-13 所示。

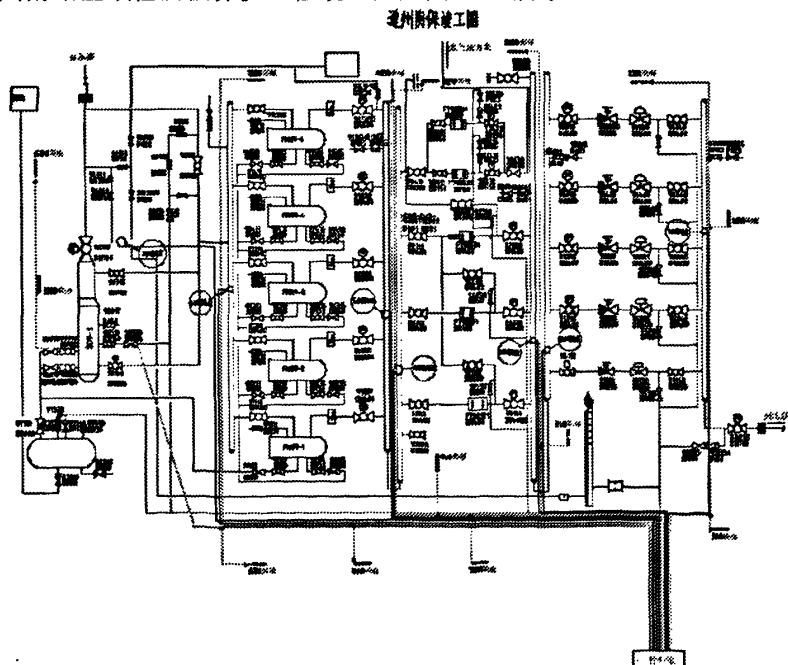


图 5-13 通州南站区域性阴极保护工程竣工图

自然电位测量点的分布如图 5-14 所示。

测量得到不同测试点埋地管道的自然腐蚀电位 (V , Cu/CuSO_4 参比电极) 为:

1: -0.566	2: -0.618	3: -0.611
4: -0.613	5: -0.635	6: -0.612
7: -0.584	8: -0.630	9: -0.557
10: -0.550	11: -0.592	12: -0.589
13: -0.609	14: -0.589	15: -0.591
16: -0.622	17: -0.633	18: -0.617
19: -0.615	20: -0.602	21: -0.633
22: -0.584	23: -0.597	24: -0.611
25: -0.611	26: -0.598	27: -0.612
28: -0.613	29: -0.625	30: -0.628
31: -0.608	32: -0.624	

由以上数据可见,通州南站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在-0.550V~-0.635V(相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极)之间,自然腐蚀电位数据正常。

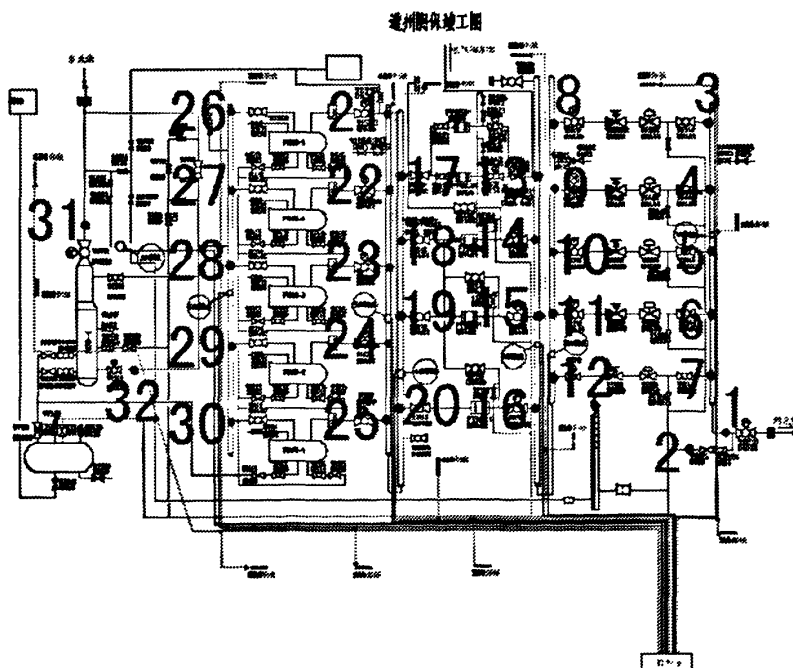


图 5-14 通州南站区域性阴极保护电位测试点分布图

(2) 阴极保护电位测量

在阴极保护系统通电后立即进行通、断电电位测量,极化三天后再次测量阴极保护电位,根据电位数值对整流器输出电压和电流作一定的调整后通电 1 个月、3 个月、半年后的通、断电电位测量数据如表 5-11 可见,电位测量点分布如图 5-14 所示。

表 5-11 通州南站埋地管道通、断电电位测量 (V, Cu/CuSO₄)

位置标号	自腐蚀电位 V (Cu/CuSO ₄)	通电后 立即测量		通电 1 个月		通电 3 个月		通电半年	
		通	断	通	断	通	断	通	断
1	-0.566	-0.730		-0.91	-0.656	-1.04	-0.716	-1.18	-0.852
2	-0.618	-0.810		-1.18	-0.785	-1.34	-0.858	-1.50	-0.920
3	-0.611	-0.760		-1.12	-0.782	-1.26	-0.854	-1.48	-0.916
4	-0.613	-0.765		-1.15	-0.784	-1.30	-0.856	-1.56	-0.928
5	-0.635	-0.850		-1.35	-0.942	-1.68	-1.033	-1.70	-1.206
6	-0.612	-0.769		-1.16	-0.796	-1.32	-0.858	-1.58	-0.957
7	-0.584	-0.740		-1.11	-0.784	-1.21	-0.843	-1.52	-0.940
8	-0.630	-0.878		-1.26	-0.923	-1.56	-1.062	-1.65	-1.194
9	-0.557	-0.826		-1.16	-0.825	-1.32	-0.860	-1.52	-0.923
10	-0.550	-0.756		-0.99	-0.736	-1.10	-0.702	-1.46	-0.916
11	-0.592	-0.759		-1.19	-0.836	-1.28	-0.836	-1.50	-0.920
12	-0.589	-0.758		-1.15	-0.829	-1.24	-0.829	-1.48	-0.918
13	-0.609	-0.848		-1.32	-0.932	-1.53	-0.962	-1.70	-1.103
14	-0.589	-0.748		-1.09	-0.789	-1.20	-0.826	-1.46	-0.916
15	-0.591	-0.756		-1.11	-0.812	-1.22	-0.836	-1.48	-0.920
16	-0.622	-0.920		-1.19	-0.865	-1.39	-0.865	-1.58	-1.092
17	-0.633	-1.053		-1.53	-1.059	-1.77	-1.156	-1.80	-1.121
18	-0.617	-0.898		-1.32	-0.941	-1.51	-1.089	-1.70	-1.116
19	-0.615	-0.892		-1.21	-0.908	-1.47	-1.026	-1.68	-1.115
20	-0.602	-1.058		-1.48	-1.033	-1.61	-1.104	-1.70	-1.108
21	-0.633	-1.023		-1.54	-1.089	-1.70	-1.106	-1.72	-1.108
22	-0.584	-0.831		-1.23	-1.003	-1.43	-1.059	-1.62	-1.104
23	-0.597	-1.031		-1.22	-0.996	-1.41	-1.043	-1.62	-1.105
24	-0.611	-1.042		-1.39	-0.897	-1.53	-1.069	-1.70	-1.124
25	-0.611	-1.043		-1.35	-0.894	-1.53	-1.068	-1.70	-1.120
26	-0.598	-0.721		-0.996	-0.745	-1.15	-0.789	-1.38	-0.916
27	-0.612	-0.825		-1.19	-0.819	-1.31	-0.869	-1.50	-0.920
28	-0.613	-0.828		-1.18	-0.819	-1.32	-0.866	-1.52	-0.940
29	-0.625	-0.817		-1.18	-0.823	-1.33	-0.868	-1.58	-0.957
30	-0.628	-0.823		-1.23	-0.852	-1.38	-0.895	-1.58	-0.959
31	-0.608	-0.959		-1.32	-0.835	-1.55	-1.049	-1.68	-1.112
32	-0.624	-0.795		-1.24	-0.826	-1.40	-1.031	-1.65	-1.106

通电半年后通州南站埋地管道的极化电位如表 5-12 所示。

表 5-12 通州南站阴极保护系统通电半年后埋地管道极化电位 (Cu/CuSO₄)

位置标号	自腐蚀电位 /V	通电半年保护电位 /V		通电半年 极化电位 /mV
		通	断	
1	-0.566	-1.18	-0.852	286
2	-0.618	-1.50	-0.920	302

3	-0.611	-1.48	-0.916	305
4	-0.613	-1.56	-0.928	315
5	-0.635	-1.70	-1.206	571
6	-0.612	-1.58	-0.957	345
7	-0.584	-1.52	-0.940	356
8	-0.630	-1.65	-1.194	564
9	-0.557	-1.52	-0.923	366
10	-0.550	-1.46	-0.916	366
11	-0.592	-1.50	-0.920	328
12	-0.589	-1.48	-0.918	329
13	-0.609	-1.70	-1.103	494
14	-0.589	-1.46	-0.916	327
15	-0.591	-1.48	-0.920	329
16	-0.622	-1.58	-1.092	470
17	-0.633	-1.80	-1.121	488
18	-0.617	-1.70	-1.116	499
19	-0.615	-1.68	-1.115	500
20	-0.602	-1.70	-1.108	506
21	-0.633	-1.72	-1.108	475
22	-0.584	-1.62	-1.104	520
23	-0.597	-1.62	-1.105	508
24	-0.611	-1.70	-1.124	513
25	-0.611	-1.70	-1.120	509
26	-0.598	-1.38	-0.916	318
27	-0.612	-1.50	-0.920	308
28	-0.613	-1.52	-0.940	327
29	-0.625	-1.58	-0.957	332
30	-0.628	-1.58	-0.959	331
31	-0.608	-1.68	-1.112	504
32	-0.624	-1.65	-1.106	482

由表 5-11、5-12 的阴极保护电位测量数据可见，通州南站埋地管道测试点处阴极保护通、断电电位均负于 -0.85V （CSE），极化电位大于 100mV ，满足 NACE RP 0169 和 SY 0007—1999 的要求。

（3）通州南站阴极保护回路及参比电极对应关系

通州南站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图如图 5-15 所示。

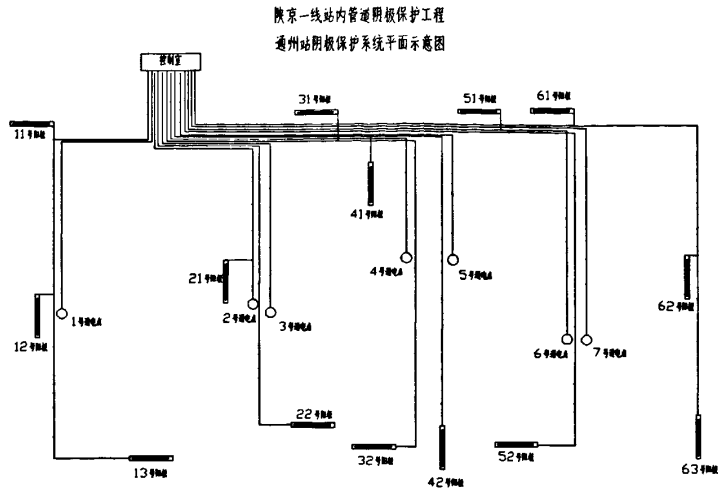


图 5-15 通州南站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图

对整流器调试后阴极保护回路与参比电极的对应关系如下：

- 回路 1: 1 号参比电极
- 回路 2: 2 号参比电极
- 回路 3: 3 号参比电极
- 回路 4: 4 号参比电极和 5 号参比电极
- 回路 5: 6 号参比电极
- 回路 6: 7 号参比电极

各回路的输出电流、电压及控制参比电极处的电位如表 5-13 所示。

表 5-13 各回路的输出电流 (A)、电压 (V) 及控制参比电位 (V, CSE)

回路标号	输出电压	输出电流	控制参比 1	控制参比 2
1	5.99	1.953	-0.891	
2	7.22	1.938	-0.940	
3	6.95	1.945	-0.927	
4	6.71	1.958	0.909	0.928
5	14.42	1.953	0.870	
6	5.60	1.943	0.912	

由表 5-13 的数据可见，6 个保护回路的控制参比电位均满足阴极保护要求，保护效果较好。

(4) 通州南站土壤电阻率测量

将通州南站场分为 8 个区块，区块分布如图 5-16 所示，采用 ZC-8 土壤电阻仪“四极法”分别测量了每个区块的土壤电阻率，测量结果及站场的平均土壤电阻率如表 5-14 所示。

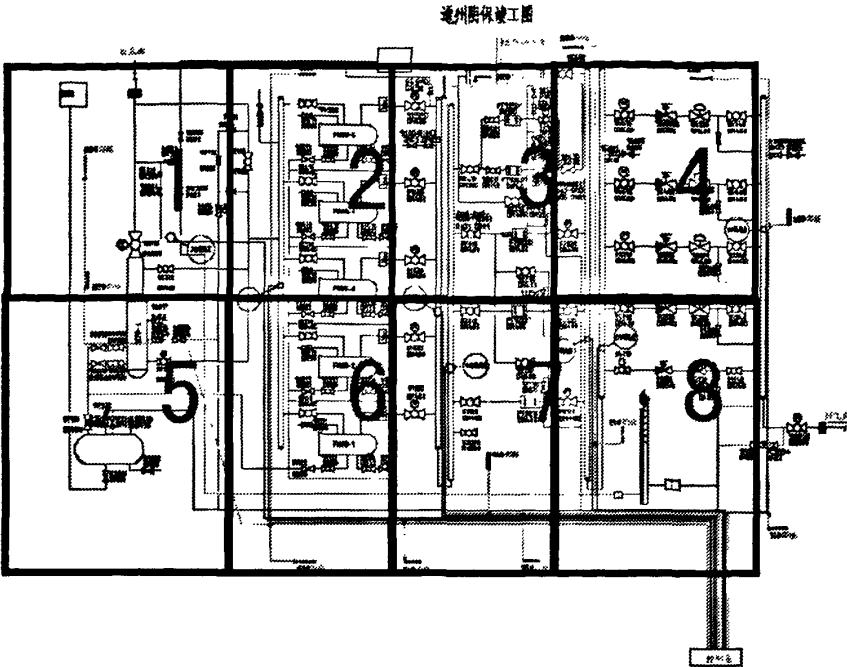


图 5-16 通州南站土壤电阻率分布图

表 5-14 通州南站土壤电阻率分布

区块标号	电极间距 a / m	倍率标度 $\frac{I_2}{I_1}$	表盘读数 R_{ob}	土壤电阻率 (Ωm) $\rho = 2\pi a \frac{I_2}{I_1} R_{ob}$
1	2	1	1.7	21.352
2	2	1	1.5	18.84
3	2	1	1.5	18.84
4	2	1	1.6	20.096
5	2	1	2.7	33.912
6	2	1	1.45	18.212
7	2	1	1.6	20.096
8	2	1	2.05	25.748
平均值				22.137

(5) 通州南站阳极接地电阻测量

采用 ZC-8 接地电阻仪“三极法”测量了每支阳极的接地电阻，如表 5-15 所示。

陕京一线站内管道阴极保护工程
通州站阴极保护系统平面示意图

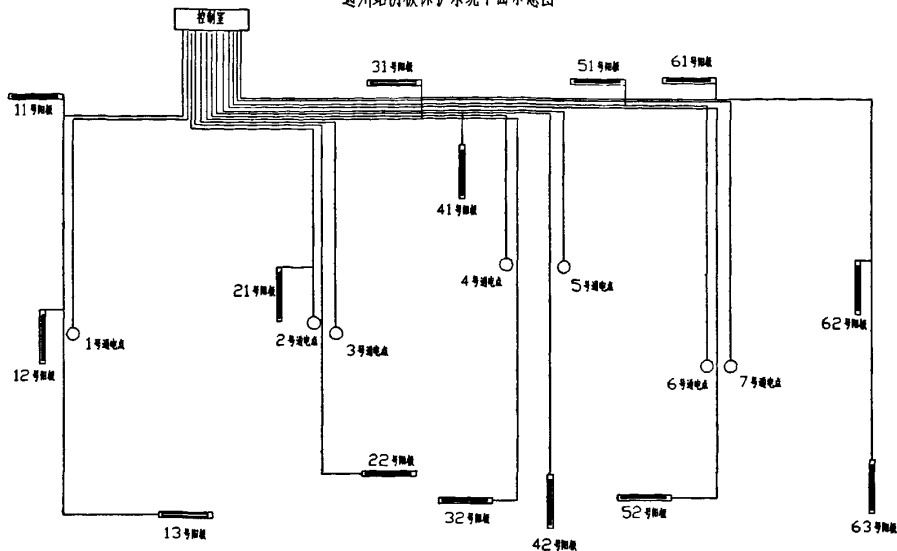


表 5-15 通州南站阳极接地电阻测量

序号	阳极标号	电极间距 a / m	倍率标度 $\frac{I_2}{I_1}$		表盘读数 R_{ob}		阳极接地电阻 (Ω) $r = \frac{I_2}{I_1} R_{ob}$	
			夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
1	11	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
2	12	20	1	10	2.0	2.0	2.0	20
3	13	20	1	10	2.0	2.0	2.0	20
4	21	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
5	22	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
6	31	20	1	10	2.0	1.9	2.0	19
7	32	20	1	10	2.1	2.0	2.1	20
8	41	20	1	10	2.0	2.0	2.0	20
9	42	20	1	10	2.0	2.1	2.0	21
10	51	20	1	10	2.0	2.1	2.0	21
11	52	20	1	10	2.0	2.0	2.0	20
12	61	20	1	10	2.1	2.0	2.1	20
13	62	20	1	10	2.1	1.9	2.1	19
14	63	20	1	10	2.0	1.9	2.0	19

由表 5-15 的数据可见，所测得的阳极接地电阻在夏季较小，冬季偏大，这主要是由于冬季土壤冻结导致土壤电阻率增大造成的。

小结：

1. 在阴极保护系统通电之前，对自然腐蚀电位进行了测量，结果表明通州南站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在-0.550V~-0.635V（相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极）之间，自然腐蚀电位数据正常。

2. 由阴极保护系统通电 3 个月、半年后的通、断电电位测量数据可见，所有测试点

处阴极保护通、断电电位均负于-0.85V(CSE),极化电位大于 100mV,满足 NACE RP 0169 和 SY 0007—1999 的要求。

3. 将通州南站场分为 8 个区块,分别测量了每个区块的土壤电阻率,数据分布在 $18\Omega\cdot\text{m} \sim 25\Omega\cdot\text{m}$ 之间,站场的平均土壤电阻率为 $22.14\Omega\cdot\text{m}$ 。测量了每支阳极在夏季和冬季的接地电阻,所得结果表明,阳极接地电阻在夏季较小,冬季偏大,这主要是由于冬季土壤冻结导致土壤电阻率增大造成的。因而随着季节的变化,要保持阴极保护效果,整流器的输出需要作一定的调整。

5.2.4 永清站区域性阴极保护效果检测数据及评价结果

(1) 埋地管道自然电位测量

永清站区域性阴极保护工程竣工图如图 5-17 所示。

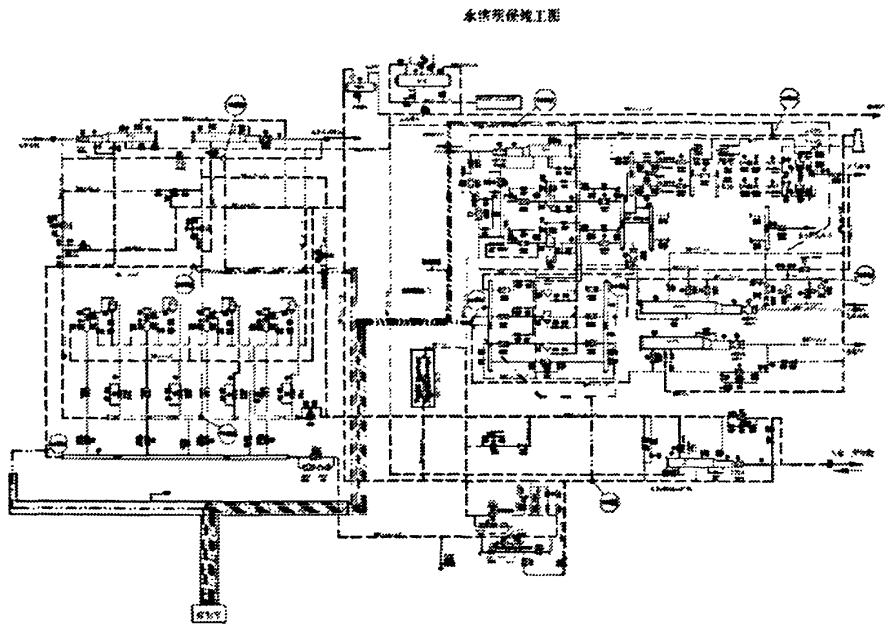


图 5-17 永清站区域性阴极保护工程竣工图

自然电位测量点的分布如图 5-18 所示。

测量得到不同测试点处理地管道的自然腐蚀电位 (V, Cu/CuSO₄ 参比电极) 为:

- | | | |
|------------|------------|------------|
| 1: -0.601 | 2: -0.537 | 3: -0.593 |
| 4: -0.536 | 5: -0.533 | 6: -0.513 |
| 7: -0.510 | 8: -0.531 | 9: -0.495 |
| 10: -0.659 | 11: -0.640 | 12: -0.648 |
| 13: -0.639 | 14: -0.640 | 15: -0.618 |
| 16: -0.635 | | |

由以上数据可见,永清站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在-0.495V~-0.659V (相对

于 Cu/CuSO_4 参比电极) 之间, 深井阳极西测的自然腐蚀电位数据明显正于东侧的自然电位数据。

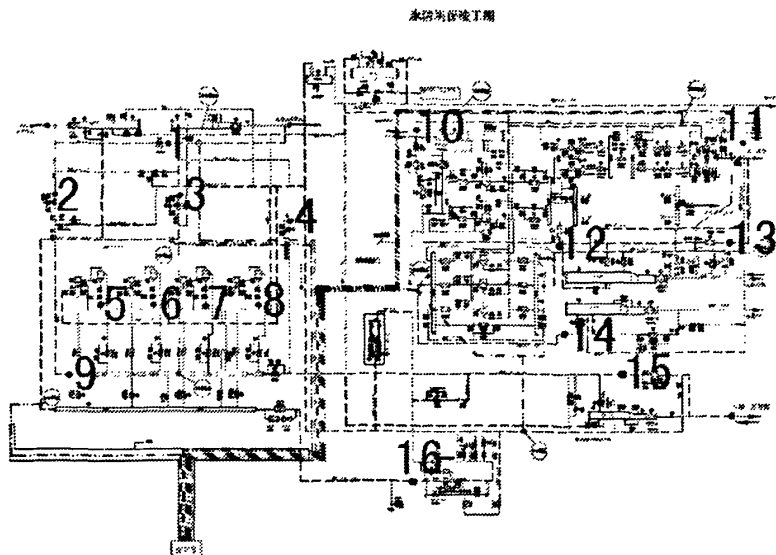


图 5-18 永清站区域性阴极保护电位测试点分布图

(2) 阴极保护电位测量

在阴极保护系统通电后立即进行通、断电电位测量, 极化三天后再次测量阴极保护电位, 根据电位数值对整流器输出电压和电流作一定的调整后通电 1 个月、3 个月后的通、断电电位测量数据如表 5-16 可见, 电位测量点分布如图 5-18 所示。

表 5-16 永清站埋地管道通、断电电位测量 (V, Cu/CuSO_4)

位置标号	自腐蚀电位 $V(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$	通电后 立即测量		通电 1 个月		通电 3 个月	
		通	断	通	断	通	断
1	-0.601	-0.730		-0.98	-0.789	-1.08	-0.826
2	-0.537	-0.810		-0.88	-0.697	-0.93	-0.753
3	-0.593	-0.760		-0.90	-0.763	-0.99	-0.818
4	-0.536	-0.765		-0.86	-0.678	-0.93	-0.754
5	-0.533	-0.70		-0.80	-0.625	-0.85	-0.715
6	-0.513	-0.669		-0.78	-0.619	-0.82	-0.678
7	-0.510	-0.640		-0.82	-0.643	-0.89	-0.687
8	-0.531	-0.678		-0.83	-0.638	-0.90	-0.693
9	-0.495	-0.626		-0.69	-0.633	-0.82	-0.673
10	-0.659	-0.756		-1.19	-1.064	-1.43	-1.123
11	-0.640	-0.759		-1.09	-0.967	-1.24	-1.082
12	-0.648	-0.758		-1.12	-0.986	-1.30	-1.109
13	-0.639	-0.848		-0.98	-0.923	-1.15	-0.967
14	-0.640	-0.748		-0.96	-0.831	-1.06	-0.892
15	-0.618	-0.756		-0.83	-0.712	-0.89	-0.739
16	-0.635	-0.720		-0.886	-0.759	-1.10	-0.815

通电 3 个月后永清站埋地管道的极化电位如表 5-17 所示。

表 5-17 永清站阴极保护系统通电 3 个月后埋地管道极化电位（Cu/CuSO₄）

位置标号	自腐蚀电位 /V	通电 3 个月后保护电位 /V		通电 3 个月后极化电位 /mV
		通	断	
1	-0.601	-1.08	-0.826	225
2	-0.537	-0.93	-0.753	216
3	-0.593	-0.99	-0.818	225
4	-0.536	-0.93	-0.754	218
5	-0.533	-0.85	-0.715	182
6	-0.513	-0.82	-0.678	165
7	-0.510	-0.89	-0.687	177
8	-0.531	-0.90	-0.693	162
9	-0.495	-0.82	-0.673	178
10	-0.659	-1.43	-1.123	464
11	-0.640	-1.24	-1.082	442
12	-0.648	-1.30	-1.109	461
13	-0.639	-1.15	-0.967	328
14	-0.640	-1.06	-0.892	252
15	-0.618	-0.89	-0.739	121
16	-0.635	-1.10	-0.815	180

由表 5-16、5-17 的阴极保护电位测量数据可见，1~9 号测试点处阴极保护通、断电电位偏正，断电电位均正于-0.85V（CSE），极化电位大于 100mV。10~16 号测试点的通断电电位偏负，除 15、16 点外均负于-0.85V（CSE），极化电位大于 100mV。该结果说明深井阳极东侧的保护效果较好，而西侧的保护效果较差，需要调查原因，采取措施使西侧埋地管道部分达到阴极保护要求。

（3）永清站阴极保护回路及参比电极对应关系

永清站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图如图 5-19 所示。

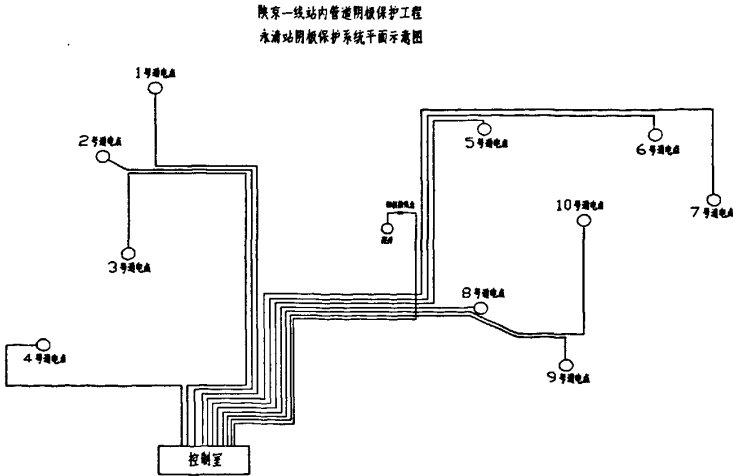


图 5-19 永清站阴极保护系统阳极和参比电极布置平面示意图

对整流器调试后阴极保护回路与参比电极的对应关系如下：

回路 1： 1 号参比电极

回路 2： 2 号参比电极

回路 3： 3 号参比电极

回路 4： 4 号参比电极

回路 5： 5 号参比电极

回路 6： 6 号参比电极

回路 7： 7 号参比电极

回路 8： 8 号参比电极

回路 9： 9 号参比电极

回路 10： 10 号参比电极

各回路的输出电流、电压及控制参比电极处的电位如表 5-18 所示。

表 5-18 各回路的输出电流、电压及控制参比电位（通电电位）

回路标号	输出电压/V	输出电流/A	控制参比电位/ (V, Zn)	控制参比电位/ (V, CSE)
1	20	28	0	-1.10
2	20	28	0.25	-0.85
3	20	28	0.25	-0.85
4	20	28	0.25	-0.85
5	20	28	-0.255	-1.355
6	20	28	-0.24	-1.34
7	20	28	0	-1.10
8	20	28	-0.26	-1.36
9	20	28	-0.245	-1.345
10	20	28	-0.25	-1.35

由表 5-18 的数据可见，2、3、4 号控制参比电位偏正，断电电位可能无法满足阴极保护标准要求，这几个控制点均位于深井阳极西侧，说明深井阳极西侧的埋地管道保护效果较差，而深井阳极东侧站区的埋地管道保护效果较好。

（4）永清站土壤电阻率测量

将永清站场分为 12 个区块，区块分布如图 5-20 所示，采用 ZC-8 土壤电阻仪“四极法”分别测量了每个区块的土壤电阻率，测量结果及站场的平均土壤电阻率如表 5-19 所示。

永清站土壤电阻率分布图

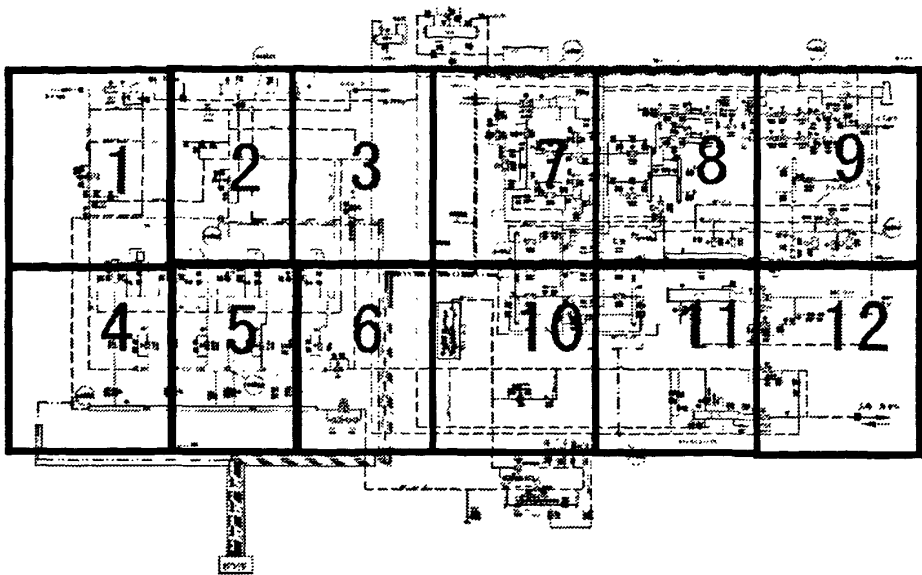


图 5-20 永清站土壤电阻率分布图

表 5-19 永清站土壤电阻率分布

区块标号	电极间距 a / m	倍率标度 $\frac{I_2}{I_1}$	表盘读数 R_{ob}	土壤电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) $\rho = 2\pi a \frac{I_2}{I_1} R_{ob}$
1	2	1	2.9	36.424
2	2	1	1.9	23.864
3	2	1	3.3	41.448
4	2	1	2.3	28.888
5	2	10	1.0	125.6
6	2	10	1.1	138.16
7	2	1	4.2	52.752
8	2	1	2.7	33.912
9	2	1	5.5	69.08
10	2	1	2.2	27.632
11	2	1	3.5	43.96
12	2	1	4	50.24
平均值				55.99667

(5) 永清站阳极回路测量

在深阳极井附近设有阳极回路测试桩，在每个回路里串联了滑动变阻器，可以通过

调节变阻器来改变每个回路的电流。通过测试桩测量每支阳极预设输出端子间的电位差，来表征回路的电流输出特性，在回路接通后立即进行测量和通电 3 个月后的测量数据如表 5-20 所示。

表 5-20 永清站阳极回路测量

阳极标号	通电后立即测量/mV	通电 3 个月后测量/V
1	37.0	1.51
2	18.8	0.69
3	37.6	0.65
4	28.1	0.71
5	27.6	1.60
6	4.9	0
7	7.0	0.31
8	2.3	0.04
9	0	0
10	32.8	0.55

由通电后立即测量的数据可见，从第 6 支阳极往上阳极的输出电流大大减小，并且第 9 支阳极的输出电流为 0，说明第 9 支阳极断路。造成这种现象的主要原因是在深井阳极施工过程中，所采用的焦炭回填料和设计要求的填料性质存在一定的偏差，在注入焦炭回填料时没有等待足够的沉降时间，也没有探测焦炭沉降后达到的深度是否满足设计要求，即开始填充砂子，故而使得上部的五根阳极的接地电阻较大，输出电流较小。后来采取了补救措施，又往井内补加了焦炭回填料，但测试结果表明，效果并不明显，因为砂子已经放入，无法再从井中取出，故而第 6 根阳极往上的输出电流还是偏小，并且第 6、9 支阳极回路仍是断路状态，不能正常工作。

小结：

1. 在阴极保护系统通电之前，对自然腐蚀电位进行了测量，结果表明永清站埋地管道和设备的自然腐蚀电位在-0.495V~-0.659V（相对于 Cu/CuSO₄ 参比电极）之间，电位数值正常，对比深井阳极东西侧的自然电位数据可见，深井阳极西测的自然腐蚀电位数据明显正于东侧的自然电位数据。
2. 由阴极保护系统通电 3 个月后的通、断电电位测量数据可见，深井阳极西侧的 1~9 号测试点处阴极保护通、断电电位偏正，断电电位均正于-0.85V（CSE），保护效果较差；而深井阳极东侧的 10~16 号测试点的通断电电位偏负，除 15、16 点外均负于-0.85V（CSE），极化电位大于 100mV。该结果说明深井阳极东侧的保护效果较好，而西侧的保护效果较差，需要调查原因，采取措施使西侧埋地管道部分达到阴极保护要求。
3. 将永清站场分为 12 个区块，分别测量了每个区块的土壤电阻率，数据分布在 24Ω·m~138Ω·m 之间，土壤电阻率差异较大。

4. 测量了深井阳极的电流输出情况, 测量结果表明从第 6 支阳极往上阳极的输出电流大大减小, 造成这种现象的主要原因是深井阳极施工过程中, 所采用的焦炭回填料和设计要求的填料性质存在一定的偏差, 在注入焦炭回填料时没有等待足够的沉降时间, 也没有探测焦炭沉降后达到的深度是否满足设计要求, 即开始填充砂子, 故而使得上部的五根阳极的接地电阻较大, 输出电流较小。后来采取了补救措施, 又往井内补加了焦炭回填料, 但测试结果表明, 效果并不明显, 因为砂子已经放入, 无法再从井中取出, 故而第 6 根阳极往上的输出电流还是偏小, 并且第 6、9 支阳极回路呈断路状态, 不能正常发挥工作。

5.3 区域性阴极保护效果检测结果

在琉璃河站、石景山站、通州南站、永清站四个站场阴极保护工程施工完成后, 对阴极保护效果进行了跟踪监测, 评价结果如下:

1. 在阴极保护系统通电之前, 对四个站场的自然腐蚀电位进行了测量, 结果表明四个站场埋地管道和设备的自然腐蚀电位在 -0.495V ~ -0.659V (相对于 Cu/CuSO_4 参比电极) 之间, 自然腐蚀电位数值范围正常; 永清站深井阳极西侧埋地管道的自然腐蚀电位明显正于东侧。

2. 对阴极保护系统通电不同时间后埋地管道和设备的阴极保护电位进行了跟踪测量, 由通电 3 个月、半年后的通、断电电位测量数据可见, 对于琉璃河站、石景山站、通州南站三个站场, 除个别点外, 绝大多数测试点阴极保护通、断电电位均负于 -0.85V (CSE), 极化电位大于 100mV , 满足 NACE RP 0169 和 SY 0007—1999 的要求。永清站深井阳极西侧的测试点处阴极保护通、断电电位偏正, 断电电位均正于 -0.85V (CSE), 保护效果较差; 而深井阳极东侧的测试点的通断电电位负于 -0.85V (CSE), 极化电位大于 100mV , 保护效果较好。

3. 将四个站场分为不同的区块, 分别测量了每个区块的土壤电阻率, 获得了不同站场土壤电阻率的分布情况。测量了每支阳极在夏季和冬季的接地电阻, 所得结果表明, 阳极接地电阻在夏季较小, 冬季偏大, 这主要是由于冬季土壤冻结导致土壤电阻率增大造成的。因而随着季节的变化, 要保持阴极保护效果, 整流器的输出需要作一定的调整。

第六章 区域性阴极保护的后期整改调试

在区域性阴极保护中，由于保护对象繁多，地下金属结构复杂，分布范围小，同时往往具有多保护回路，回路之间易产生屏蔽和干扰问题。因此，为了在整个站场获得满意的阴极保护效果，在区域性阴极保护系统施工完成后，根据保护效果检测与评价结果来进行整改和调试是非常有必要的。

6.1 整改调试的主要内容

区域性阴极保护由于具有保护对象错综复杂及与之相连的接地设施众多等特点，使得保护回路复杂多变，造成了一次设计的不确定性，要达到理想的保护和最大限度的降低对本保护系统的干扰，施工和调试阶段的设计更改及调整是必不可少的。

在区域性阴极保护施工完成后，保护效果检测与评价结果表明某些部位保护不充分，或在运行一定时候后定期的检查中测量数据表明保护不充分的时候，需要提出补救整改措施，这些措施包括：

1. 阴极保护系统组件（如整流器、辅助阳极、参比电极、电缆、绝缘接头等）的修理、调整和更换；
2. 在需要增加保护的地方提供补充设施，如增加整流器的输出电流或电位，在局部达不到阴极保护效果的管段处理设牺牲阳极；
3. 修理、更换和调整连续性跨接和干扰跨接；
4. 去除意外的金属性连接，特别是与铜包钢接地极、以石墨为主要成分的接地模块的电连接；
5. 修理有缺陷的绝缘装置；如果是由于防腐层存在问题导致阴极保护效果达不到要求，则在可能的情况下对局部管道的防腐层进行维修。

6.2 阴极保护长期有效性运行建议

在一年内每隔三个月对管道阴极保护电位进行相关测量，以观察阴极保护系统在一年中各个季节的工作情况，测量数据包括：

- 1) 固定参比电极处电位的测量；
- 2) 采用密间隔电位测量方法，确定地下管线的保护效果；
- 3) 阳极影响区域的测量以及相互绝缘的干线、站内管道是否受对方阴极保护阳极地床电厂的干扰；
- 4) 通电电位、断电电位和极化电位的测量；
- 5) 检测整流器的输出，预计辅助阳极的使用寿命；
- 6) 评价阴极保护的有效性。

第七章 结 论

以陕京管道站场区域性阴极保护技术为研究对象,系统的讨论了区域性阴极保护技术在设计、施工、检测、效果评价等方面的注意事项,并将数值模拟技术应用于区域性阴极保护技术的效果预测,所得结论如下:

1. 区域性阴极保护技术是将某一区域内的所有预保护对象当作一个整体来进行保护,具有保护区域内保护对象繁多、地下金属结构复杂、分布范围小、干扰和屏蔽现象严重、安全要求高等特点,因此在设计过程中要获得最佳的保护效果,需要综合考虑多种因素的影响,包括保护对象和保护电流密度的选取、阳极地床的设计、对绝缘和干扰问题的处理等。

2. 根据站场内实际的管网分布情况,建立了区域性阴极保护的三维数学模型,计算了分布式浅埋阳极和深井阳极两种区域性阴极保护方案下的阴极保护电位分布,并和实际测量结果进行了对比,数值模拟计算结果和实测结果吻合较好,说明数值模拟技术可以用于区域性阴极保护的效果预测,对于提高区域性阴极保护设计方案的保护效果具有重要的意义。

3. 结合陕京管线站场区域性阴极保护施工的具体实践,讨论了施工的注意事项,包括对设计和施工方案的要求以及对施工过程的要求。讨论了区域性阴极保护效果检测的内容并提供了详细的现场检测数据;讨论了区域性阴极保护技术的后期整改和调试。

致 谢

本论文是在导师王荣教授的悉心指导和热忱关怀下完成的，在论文的运行过程中，从选题到定稿处处渗透着王老师的心血和辛劳，在此向王老师表示衷心感谢！

同时感谢论文完成过程中给予我支持帮助的家人、同事和朋友！

参考文献

- [1] 胡士信. 阴极保护工程手册[M]. 化学工业出版社, 1999
- [2] (德) W.V. 贝克曼. 阴极保护手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1986
- [3] 张俊义, 刘志刚等. 区域性阴极保护实施过程中的几个问题[J]. 油气储运, 2000, 19(2): 51~52
- [4] NACE Task Group. Collected papers on cathodic protection current distribution. Houston: NACE, 1989
- [5] DeGiorgi VG, Wimmer SA. Geometric details and modeling accuracy requirements for shipboard impressed current cathodic protection system modeling. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2005, 29:15~28
- [6] DeGiorgi VG, Thomas ED, Lucas KE. Scale effects and verification of modeling of ship cathodic protection systems. Eng Anal Bound Elem, 1998, 22:41~59
- [7] Zamani NG. Boundary element simulation of the cathodic protection system in a prototypic ship. Appl Math Comput 1988, 26:119~134
- [8] Bialecki RA, Ostrowski Z, Kassab AJ, et al. Coupling BEM, FEM and analytic solutions in steady-state potential problems. Eng Anal Bound Elem, 2002, 26:597~611
- [9] 邱枫, 徐乃欣. 钢质贮罐底板外侧阴极保护时的电位分布. 中国腐蚀与防护学报. 1996, 16(1): 29~36
- [10] 张鸣镝, 杜元龙等. 有限差分法计算海底管道阴极保护时的电位分布. 中国腐蚀与防护学报, 1994, 14(1): 77~81
- [11] 孟宪级. 区域性阴极保护优化设计方法. 天津大学学报(增刊), 1996, 29: 130~136
- [12] 庄新国. 阴极保护系统设计方法的发展和现状. 港口工程. 1996, 6: 50~54
- [13] 吴中元. 区域性阴极保护电位分布算法的改进. 天津纺织工学院学报. 1997, 15(4): 61~64
- [14] 邱枫, 徐乃欣. 码头钢管桩阴极保护时的电位分布. 中国腐蚀与防护学报. 1997, 17(1): 12~17
- [15] 邱枫, 徐乃欣. 用带状牺牲阳极对埋地钢管实施阴极保护时的电位和电流分布. 中国腐蚀与防护学报. 1997, 17(2): 106~110
- [16] Klingert JA, Lynn S, Tobias C W, Electrochim. Acta, 1964, 9: 297
- [17] Doig P, Flewitt P E J, J. Electrochem. Soc., 1979, 126(12): 205
- [18] Strommen R, Rodland A, Materials Performances, 1981, 20(4): 15
- [19] Klingert J A, Lynn S, Tobias C W. Evaluation of current distribution in electrode systems by high-speed digital computers. Electrochimica Acta, 1964, 9: 297~312
- [20] 钱海军, 刘小光, 张树霞等. 管内阴极保护的数值模拟(II)——有限差分法计算大

口径管内的电位分布 (J) .化工机械. 1997, 24(5): 281~284

[21] Kranc S C, Alberto A S. Detailed modeling of corrosion macrocells on steel reinforcing in concrete, *Corrosion Science* , 2001,43: 1355-1372

[22] Helle H P E, Beek G H M, Ligtelijin J T. Numerical determination of potential distributions and current densities in multi-electro desystems. *Corrosion*, 1981, 37 (9):522~530

[23] Kasper R G , April M G. Electro galvanic finite element analysis of partially protected marine structures. *Corrosion*, 1983, 39(5):181~188

[24] Munn S. A Mathematical Model for a Galvanic Anode Cathodic Protection System . *Corrosion*, 1982, 38(8): 29~36

[25] G Kasper, G April. Electrogalvanic Finite Element Analysis of Partially Protected Marine Structures. *Corrosion*, 1983, 39(5): 181~188

[26] D. T. Chin, GM.Sabde. Current Distribution and Electrochemical Environment in a Cathodically Protected Crevice. *Corrosion*, 2000, 56(3): 229~237

[27] D. T. Chin, GM.Sabde. Modeling Transport Process and Current Distribution in a Cathodically Protected Crevice. *Corrosion*, 2000, 56(8): 783~793

[28] Fu J W, Chow J S K. Cathodic protection designs using an integral equation numerical method. *Corrosion*, 1982, 30(2):163~174

[29] Cherry B W, Foo M, Siauw T H. Boundary element method analysis of the potential field associated with a corroding electrode. *Corrosion*, 1986, 42(11):654~662

[30] DeGiorgi V G, Lucas K E. Computational design of ICCP systems: lessons learned and future directions. American Society for Testing and Materials, 1999: 87~100

[31] Douglas P. Riemer, Mark E. Orazem. A mathematical model for the cathodic protection of tank bottoms, *Corrosion Science*. 2005, 47: 849~868

[32] 刘曼, 殷正安, 战广深. 流动场管内阴极保护的电位分布计算. 大连理工大学学报. 1998, 38 (5): 599~302

[33] 梁旭魏, 吴中元等. 油田区域性阴极保护计算机辅助优化设计研究. 天津纺织工学院学报, 1998, 17(5):90~94

[34] 梁旭魏, 吴中元等. 阴极保护系统中电流的优化控制[J]. 天津纺织工学院学报. 1999, 18(1): 37~40

[35] F.Brichau, J. Deconinck. A Numerical Model for Cathodic Protection of Buried Pipes. *Corrosion*, 1994, 50(6): 39~49

[36] F.Brichau, J. Deconinck. Modeling of Underground Cathodic Protection Stray Currents. *Corrosion*, 1996, 52(6): 480~488

[37] 刘向东, 林莘等. 12kV/31.5Ka 真空断路器灭弧室电场的数值计算. 沈阳工业大学学报. 2003, 25(4): 294~298

- [38] 喻海良, 崔青玲等. 300Ka 铝阳极电解槽三维电热场电位 ANSYS 分析. 有色矿冶. 2004, 20 (3): 30~32
- [39] 卢斌先, 王泽忠等. 故障传输线的电压响应分析. 华北电力大学学报. 2002, 29(2): 31~33
- [40] 马伟平, 张国忠. 深井阳极对储罐底板阴极保护的数值模拟[J]. 油气储运, 2004, 23(9): 31~35
- [41] 王瑞琪, 刘秀云. 东营首站区域性阴极保护研究报告[J], 1995
- [42] 胡正飞, 夏于飞. 泗县泵站站区区域性阴极保护[J]. 华东输油, 1996, 19(1): 1~5
- [43] 孙希功, 王芷芳. 东营原油库区域性阴极保护[J]. 油气储运, 1992, 11 (3): 57~59
- [44] 周立新, 徐建庆. 区域性阴极保护技术在储运设施中的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护. 2003, 20(6): 40~42
- [45] 夏于飞, 陈学江. 区域性阴极保护技术在我公司的应用[J]. 石化管理, 1999, 1: 17~20
- [46] Morgan J H. Cathodic Protection. Leonard Hill[Book] Limited, London, 1959: 159-161
- [47] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护. 第1版. 北京: 国防工业出版社, 2002: 133-135
- [48] 曹楚南. 腐蚀电化学原理. 第2版. 北京: 化学工业出版社. 2004: 60-68
- [49] 王载舆. 数学物理方程及特殊函数. 第1版. 北京: 清华大学出版社. 1991: 102-206
- [50] 刁元胜, 姚仰新. 数学物理方法. 第1版. 广州: 华南理工大学出版社. 2004: 140-340
- [51] 南京工学院数学教研组. 数学物理方程与特殊函数. 北京: 高等教育出版社. 1982. 第2版. 1997: 19-148

攻读硕士学位期间所发表的论文

葛艾天，涂明跃 《区域性阴极保护在陕京管道站场的应用》、《陕京管道外腐蚀直接评价实践》P369-372，发表于腐蚀与防护杂志。ISSN1005-748 CN31-1456/TQ