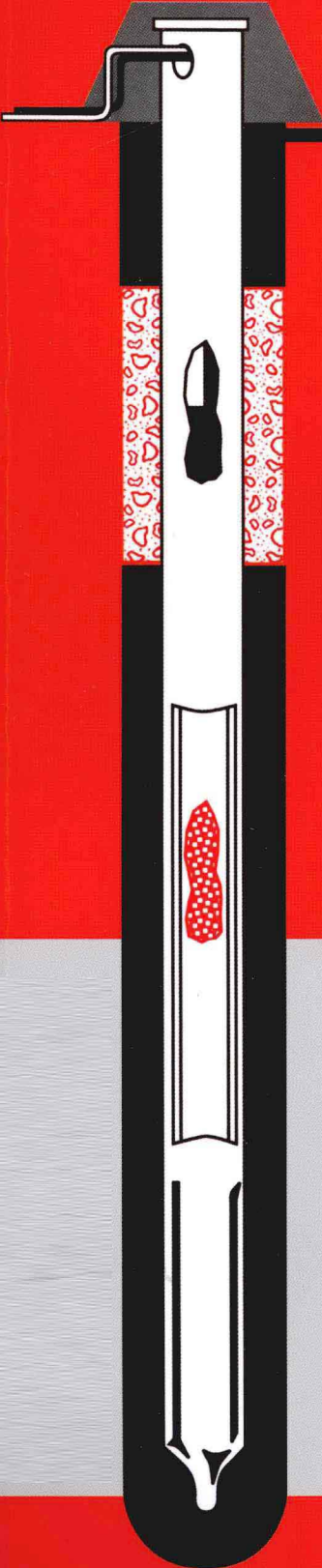




深井阳极系统 设计、安装和运行

[美] T. H. Lewis, Jr. 编著

北京安科管道工程科技有限公司 组织翻译

路民旭 陈少松 张薇 等译

DEEP ANODE SYSTEMS
Design,
Installation,
and Operation



化学工业出版社

深井阳极系统 设计、安装和运行

DEEP ANODE SYSTEMS

Design, Installation, and Operation

[美] T. H. Lewis, Jr. 编著

北京安科管道工程科技有限公司 组织翻译

路民旭 陈少松 张 薇 等译



化学工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

深井阳极系统设计、安装和运行/ [美] 路易斯
(Lewis, T. H.) 编著; 路民旭等译. —北京: 化
学工业出版社, 2013. 3
ISBN 978-7-122-16323-3

I. ①深… II. ①路…②路… III. ①阴极保护
IV. ①TG174.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 009287 号

Deep Anode System, Design, Installation and Operation.
ISBN 978-1-57950-111-4, by T. H. Lewis, Jr.
Copyright © 2000 by Loresco International. All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition reprinted by NACE
International, with permission from Loresco International.
本书中文简体字版由 Loresco International. 授权化学工业出版社独家出版
发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2013-3226

责任编辑: 段志兵
责任校对: 宋 玮

封面设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
710mm×1000mm 1/16 印张 7½ 字数 110 千字 2013 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)
售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究



译 序

深井阳极技术是一种强制电流阴极保护的阳极安装方法，在国内外的应用较为广泛。比之浅埋阳极地床，深井阳极地床有诸多优越性，包括其地床占地面积小、接地电阻小、能提供更理想的电流分布、对周围埋地金属构筑物干扰较小、工作环境稳定、可免遭人为破坏等，因此特别适合于在城市以及工厂管网密集区进行强制电流阴极保护。然而相比于具有同等电流输出容量的浅埋阳极地床，深井阳极地床的造价偏高，因而人们对其运行效率和使用寿命也就有较高的期望。国内近十年来也安装了不少深井阳极地床，取得了一些成绩，也得到了一些经验教训：运行过程中阳极电缆发生中断，阳极的不均匀溶解（如高硅铸铁阳极和石墨阳极常发生的端部效应和颈部效应）造成其过早在接头和端部断裂，以及运行中常发生的气体阻塞现象使阳极地床的平均寿命较短等。国外深井阳极地床的使用年限比较长，目前已开发出可更换的深井阳极地床，这也是我们今后努力的方向。

《深井阳极系统》的作者 Thomas. H. Lewis, Jr.，是美国工业界资深的职业工程师（Professional Engineer, PE），具有丰富的工程实践经验。他本人拥有美国腐蚀工程师协会（NACE）颁发的腐蚀专家（Corrosion Specialist, CS）和阴极保护专家（Cathodic Protection Specialist, CPS）等多项专业资质，并长期致力于 NACE 的课程培训。Lewis 先生带领他的团队经过反复研究，开发出了世界上最先进的可更换的深井阳极系统。此外，他还对该领域中的专业接地设计有所贡献。这本书融入了他多年研究和实践的经验，其中许多工程判断决策以及对某个特定设计作出特殊选择均来自他的经验。

《深井阳极系统》一书作为一本工作指南，所讨论的内容非常实用和细

化。全书以收集设计信息开篇，这部分是基础工作，决定着深井阳极地床的安装方法和运行效率。然后是深井阳极系统设计，这是全书的核心，包括阳极柱长度的确定、阳极和碳填包料的选择、电缆的选定、环境因素及其他特殊考虑因素对设计的影响等。进而讲到安装技术，这里面涉及钻井设备、钻井技术、套管的设置、阳极的设置及碳填包料的设置等。本书还特别讲述了运行过程中地床的维护和故障排除，在这里面作者根据自己的经验系统地讲述了调试和检查过程。最后一章，附上了电阻值测量方法、阳极间距计算方法等常用的计算方法以及碳填包料电阻率的测试方法等，这些对于阴极保护设计安装技术人员具有极大的参考和利用价值。

本书的翻译出版将填补国内图书市场在电化学保护领域内的一项空白，希望对我国管道工程、电化学保护工程专业人员有所裨益，对我国深井阳极技术的发展起到指导和推动作用。

北京安科管道工程科技有限公司
2013 年 3 月

目 录

第一章 概述	1
1.1 目的	1
1.2 定义	1
1.3 优点	1
1.4 缺点	2
1.5 声明	3
参考文献	3
第二章 收集设计信息	5
2.1 确定设计电流	5
2.2 确定地质结构和水文结构	5
2.2.1 检索用数据库	6
2.2.2 地表测试	7
2.2.3 驱动棒测试	10
2.2.4 测试孔测试法	12
2.3 测定水化学	19
2.4 材料选择	20
2.4.1 电化学	20
2.4.2 阳极	21
2.4.3 碳回填料	26
2.4.4 导线	30
2.4.5 其他部件	31
2.5 环境考虑因素	33

2.5.1 地表水径流	34
2.5.2 地下蓄水层交换	35
2.5.3 材料污染	35
2.5.4 遗弃	35
2.6 地表完工考虑因素	35
参考文献	36

第三章 设计 39

3.1 阳极柱长度	39
3.1.1 地质状况	39
3.1.2 系统电阻	40
3.1.3 电流密度	42
3.2 阳极的选择	43
3.2.1 电流密度	43
3.2.2 间距	43
3.2.3 阳极寿命计算	44
3.2.4 可靠性与安全系数	45
3.3 碳回填料的选择	45
3.3.1 电阻	45
3.3.2 电流密度	46
3.3.3 碳回填料消耗	47
3.4 线缆选择	48
3.4.1 机械要求	48
3.4.2 化学要求	48
3.4.3 电气要求	49
3.5 环境因素	50
3.5.1 表面密封	50
3.5.2 蓄水层交换	51
3.5.3 材料和流体的测试	51
3.6 其他设计考虑因素	52
3.6.1 通风系统	53
3.6.2 阳极对中装置	54
3.6.3 阳极更换	54

3.7 设计时的特殊考虑	56
3.7.1 平行孔	56
3.7.2 结构衰减	57
3.7.3 碳素填料柱衰减	57
3.7.4 安全	57
3.7.5 温升	59
3.7.6 电渗析	60
3.7.7 水的消耗和置换	60
参考文献	61

第四章 安装 63

4.1 器材和钻井设备	63
4.2 钻井	66
4.2.1 测试孔的确定	67
4.2.2 钻井过程中的观测	68
4.3 测试	68
4.3.1 钻井过程中的测试	69
4.3.2 钻孔完成后的测试	70
4.4 套管设置	70
4.5 阳极设置	72
4.6 碳回填料设置	72
4.7 完工	74
参考文献	75

第五章 运行 77

5.1 维护	77
5.1.1 安装	77
5.1.2 调试试验	77
5.1.3 常规检查	81
5.1.4 其他考虑	81
5.2 故障排除	81
参考文献	85

第六章 相关资料 87

6.1	阳极信息	87
6.2	电阻值测量	87
6.2.1	电阻值公式	88
6.2.2	电阻图	90
6.3	阳极间距计算	95
6.4	碳回填料电阻率测试	97
6.5	泵计算	101
6.6	阳极温升计算	104
参考文献		106

第一章 概述

1.1 目的

作为一本指南，本书的目的是给设计工程师在深井阳极系统设计、安装和操作等方面提供全面的指导。一个成功的深井阳极系统的设计和安装过程包括：收集数据，设计计算，选择特定的材料和安装技术，以及按计划安装。除了完成特定设计所必需的数学运算之外，许多设计决策还需要良好的工程判断方面的练习。像设备需求、钻孔技术、选址、材料选择和安全规程等方面的决策就常常需要综合经验、知识、预见和判断。本设计指南将讨论许多工程判断决策，并就能影响对某个特定设计作出特殊选择的因素提供一些可能的有用的选择方案。

1.2 定义

深井地床或深井阳极系统的定义见 NACE International RP0572^[1]：是指一个或多个阳极，垂直安装于位于地表以下 15m (50ft，标称深度) 或更深部位的钻孔内，为埋地或水下的金属结构物提供阴极保护。

1.3 优点

虽然使用深井阳极系统的所有优点可见于 RP0572，但其中最重

要的几大优点很值得一提。由于深井地床的电流排放发生在大地的深处而不是地表附近，因而在公用设施结构物的地表附近，阳极电势梯度就不那么大。这意味着引起阳极干扰的电势大大减少了。所以，在很多外在金属地表结构物（如市政建筑和大型工业设施）集中的地域，深井阳极系统可以表现出很大的优势。

使用深井阳极设计的另一个重要的优势在于：安装需要地表面积有限。由于所有阳极都垂直地堆叠在一个钻孔内，安装在非常有限的地表面积内就可完成。这一优势不仅体现在地表面积非常有限的拥挤区域，而且即使在不太拥挤的区域，耗在路权上的额外花费常可避免。甚至在已有的为一些设施（如输送管线）所辟的路权地段内，安装深井阳极系统通常也是完全可行的，这是因为电流排放区域设置在大地的更深处，阳极可以远离结构物。

外加电流阴极保护系统的基本运行花费是所需要的商业交流电的费用。电费则代表了阴极保护系统所消耗的能量费用。能量即在一段时间内传输的电力。电力取决于电流输入的平方与负载电阻的乘积。由于电流输入取决于达到阴极保护的特定水平所需的电流，因而要使保护的度不受折损就不能降低电流输入。尽管如此，如果输入电阻可以减少，那么为实现阴极保护所传输的电力则可以减少。由于表层土的电阻率较高，所以通过将阳极设置在大地的更深处（此部位常为低电阻率的地层）以实现系统输入电阻的大幅降低是可能的。此外，电阻可以在长时间内更稳定，因为控制电阻的因素（湿度和温度）在深地层处更加稳定。

1.4 缺点

使用深井阳极系统的所有缺点亦见于 RP0572。虽然大多数缺点经适当的考虑和设计可以被克服或最小化，但相比于表面地床设计，最严重的缺点通常在于阴极保护所需的每安培的额外安装花费。然而，这一花费常可以被电费、路权费或解决干扰的费用的节省而抵消。

2 深井阳极系统：设计、安装和运行

1.5 声明

虽然已尽力确保本书所包含的信息的精确完整，但不论 Loresco International 还是任何一个对本书作出贡献的成员，都不对本书的使用或其包含的信息承担任何责任。此外，实际的现场存在许多特定的条件和变量，这种情况下则需要特定领域内具有知识和经验，对工程进行仔细考虑和实施。所以，使用本书的个人可以寻求相关领域内的科学的或工程上的建议和帮助。

参 考 文 献

1. NACE Standard RP0572, "Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Groundbeds" (Houston, TX: NACE, 1995). Approved June 1972, Revised 1995.

第二章

收集设计信息

2.1 确定设计电流

要确定深井阳极系统的设计电流，首先应当确定某结构物的阴极保护所要求的电流。安全因素也应当考虑到阴极保护电流的要求中来，以求能应对预期的系统扩建和涂层恶化等问题。如果关于系统扩建得不到什么有用的信息，并且关于涂层恶化也没有什么历史记录，则建议考虑 25% 的额外的电流容量。

考虑到总设计电流、沿着待保护结构物的预期的电流衰减以及待保护结构物的几何结构这样几方面因素，往往需要一到多个深井阳极系统来提供保护电流。对于单个深井阳极系统而言，推荐的最大设计电流取决于地质结构（地层结构和岩层结构）以及所希望的钻孔最大直径。尽管如此，只有在考虑了所有其他条件后，才能尽量设计出具有大于 50A 电流输出的单个深井阳极地床。考虑到所需的电流排放表面积的大小，建议使用 50A 的限制，该限制能确保产生这一水平的电流输出的同时，不会大量减少湿度，也不会使气体产生太快以至于不能充分地逸散。

2.2 确定地质结构和水文结构

要使深井阳极地床成功安装和运行，在设计阶段获取足够的有关目的地点的地质和水文信息是很有必要的。最好能了解该地点的精确的地层特征、水分含量、电阻率、土壤和岩层的类别以及间隙水化学

情况。如果只能得到有限的信息，所必需的最少信息量包括：适于电流排放的低电阻率地层的深度和厚度，以及到达最高水位（地下水水面）的深度。当然，得到的信息越详细，设计将会越好。

构成适于电流排放的低电阻率地层的要素是相对的。它完全取决于某地区的土层类型及其相对电阻率。除了某些导电性的矿物，例如 Fe_3O_4 ， Fe_2O_3 ，C，石墨， FeS_2 ， PbS ， CuFeS_2 ， Cu_5FeS_4 ， CuS ，Cu 和 FeS 外，大多数组成土壤和岩层的矿物是电绝缘的。所以，从本质上讲，大多数土壤和岩石的电导过程是电解质介导的，其电导有赖于包含在地层的小孔和间隙内的水分。所以，水分含量和化学成分就成了电导率的非常重要的决定因素^[1~3]。

一些最常见的沉积物（它们的电阻率相对较低）包括：黏土，页岩，泥灰岩，白垩，沙，或包含导电水的多孔形成物。以上任何一种物质对于深井阳极系统的适用性均取决于其深度和相对电阻率。

2.2.1 检索用数据库

有几种可能的地质信息来源或许在早期的设计阶段很有帮助。以下列出了一些潜在的信息源，其中包括联系信息和有用的数据。

2.2.1.1 美国地质勘探局 (USGS)

美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 方面，可以通过图书馆的参考书咨询台 [(703) 648-4302] 或从 Earth Science Information Center [(800) 872-6277] 查到大量的地表和地下地质信息。USGS 信息也可通过互联网查询：<http://www.usgs.gov/>。

2.2.1.2 USGS 所属的地区办公室

美国每个州都设有一个 USGS 的地区办公室，它们负责维护该州的地质档案信息。这些办公室通常位于州首府所在地，并且可以通过电话联系到它们。通过电话或传真，给这些区域办公室发出有关地理位置的描述（例如感兴趣的地点的所在县、所在区、所在乡镇、范围或经纬度）的请求，则可以获得相关信息。

2.2.1.3 美国地理学会 (AGI)

美国地理学会 (American Geological Institute, AGI) 位于 Alexandria, Virginia [(703)379-2480], 可以通过互联网联系: <http://www.agiweb.org/>。AGI 维护北美的地质数据库 (始于 1785 年) 以及世界其他地区的地质数据库 (始于 1933 年)。AGI 以 CD-ROM 的形式提供地质科学数据库, 即 GEOREF。这些信息可以通过年度订阅从商业渠道获得, 通常还可以从大学或研究所的图书馆获得。

2.2.1.4 州立地质勘探局或自然资源部

美国许多州可以根据已报道的钻井日志, 通过州立地质勘探局或自然资源部 (State Geological Surveys 或 Department of Natural Resources) 提供有帮助的地质信息。这些办公室一般位于州首府, 可以通过电话联系。

2.2.1.5 当地钻井机构

通常可以从当地的钻井工人处 (Local Water Well Drillers) 获得有用的信息。他们不仅提供有关土壤地层的信息, 另外, 基于该地区以前的钻井经验, 他们也提供与钻井条件和预期的安装问题有关的信息。当地钻井机构 (Local Water Well Drillers) 在黄页上也可查到。

2.2.2 地表测试

依靠地表形貌、地下金属结构物的位置以及可用的开放式测试区域, 用地表测试技术提供的数据来估计下层土的电阻率是可能的。四点测试法是在原位测量大容积土的平均电阻率的最精确方法^[4]。四个测试电极中, 其中两个是电流注入点 (即电流电极), 另外两个是电位测量点 (即电位电极)。电阻的确定是用电位电极间测得的电压降除以流经电流电极间的测试电流的大小。有几款经商业途径可获得的仪器可以在内部进行该运算并直接给出计算的电阻值。

虽然电极的排列有多种灵活的方式，但最常用的技术是 Wenner 排列法。这一电极排列（见图 2-1）的方式为：沿一直线将四个电极以等间距（ a ）排列，外侧两个是电流电极，内侧两个是电位电极^[5,6]。

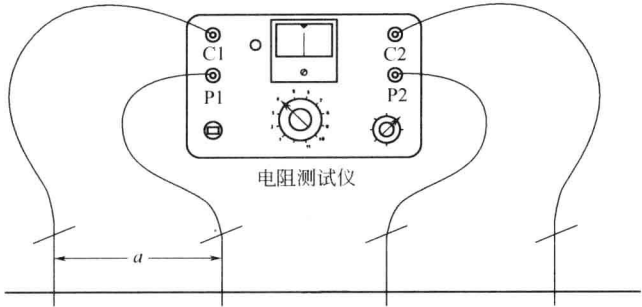


图 2-1 Wenner 电极排列

如果电极的深度不超过 $0.1a$ ，则表观电阻率与深度的关系由下式给出：

$$\rho = 2\pi a R \quad (2-1)$$

式中， ρ = 电阻率， $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

R = 测量电阻， Ω ；

A = 电极间距， cm 。

如果 ρ 的单位是 $\Omega \cdot \text{cm}$ ，而 a 的单位是英尺（ft），则上式变为：

$$\rho = 191.5 a R \quad (2-2)$$

首先应当确定电极阵列的基线。该基线为所要调查的土壤的深度的三倍，而且应是笔直的，越过相对水平的地势。基线的中心应当确定为电极阵列的中心。不同的电极间距测得的电阻值不同，阵列也应当随之以所确立的中点为基准而扩大。电极间距的增量的范围建议是 $10 \sim 50 \text{ft}$ 。

由于测试阵列的尺寸会增大，所以操作过程应当很仔细，以确保与地下实体建筑有一个适当的间距，并避免由于电流导线和电位导线之间的电磁耦合所引起的误差。如果待测量部位的较深，需要大尺寸的测试阵列，则可以使用其他的电极排列方式来增加测量灵敏度