

# 无杆泵采油 技术

朱君 徐广天 刘合 白振国 编著



石油工业出版社

登录号	124132
分类号	TE355.5
种次号	009

# 无杆泵采油技术

朱 君 徐广天 刘 合 白振国 编著



石油0117072

石 油 工 业 出 版 社

DP26/30

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了在原油开采中广泛应用的几种无杆泵采油设备的原理、工作特性、优选方法和设计计算，以满足油田工程技术人员在设计、科研、选型和使用无杆泵采油时的实际需要。全书由基础知识、潜油电泵采油、水力活塞泵采油、射流泵采油和无杆泵采油系统设计与对比等五章组成。

本书可供从事机械采油方面工作的工程技术人员阅读，也可作为石油高校的教学参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

无杆泵采油技术/朱君等编著.  
北京:石油工业出版社,1999.3  
ISBN 7-5021-2515-9

I. 无·

II. 朱·

III. 机械采油-技术,无杆泵

IV. TE 355.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 02400 号

石油工业出版社出版  
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)  
石油工业出版社印刷厂排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

850×1168 毫米 32 开本 7 $\frac{1}{2}$ 印张 197 千字 印 1—1000  
1999 年 3 月北京第 1 版 1999 年 3 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5021-2515-9/TE·2057

定价: 20.00 元

## 前 言

无杆泵采油是油田生产中常见的机械采油方式，它在油田生产中也占据着非常重要的地位。以我国为例，大约有 20% 的油井使用无杆泵采油技术，其产液量约占全国总产液量的 30%，能耗量占机械采油设备总能耗量的三分之一左右。无杆泵采油设备和采油技术直接影响到油田的高产、稳产及综合开采经济效益。

无杆泵采油技术主要包括潜油电泵采油技术、水力活塞泵采油技术、水力射流泵采油技术及电动潜油螺杆泵采油技术等。与有杆泵采油技术相比，无杆泵采油设备的最大特点是取消了抽油杆柱，因此减少了抽油杆资金投入，也减少了由于抽油杆断脱、磨损而带来的作业、修井费用。并且随着我国东部几大油田相继进入中、后期开采，地质条件越来越复杂，油井井身结构也不只局限于直井、斜直井，又出现了水平井、侧钻定向井及侧钻水平井等。无杆泵采油技术将更适合于这些特殊井身结构的油井开采。

编写本书的目的是为从事机械采油方面的生产管理人员及科研人员提供一本详细介绍无杆泵采油基础知识、生产管理、优化设计等方面的知识和技术的书籍。本书融贯了前人在这些方面的基本理论和科研成果，同时也总结了作者多年来在无杆泵采油技术方面的科研成果及实践经验。但是，随着科学技术的发展，一些新的无杆泵采油技术、采油设备也将不断涌现，有关这方面的研究也将不断深入。

本书共分五章，第一章、第四章和第五章由朱君编著，第二章由姜民政编著，第三章由杜永军编著，全书由朱君、徐广天、刘合和白振国主编。

本书缺点、错误之处在所难免，我们热情欢迎读者批评指正。

编著者 1999.1

# 目 录

<b>第一章 基础知识</b> .....	(1)
第一节 电工基础.....	(1)
第二节 流体力学基础 .....	(27)
第三节 采油工艺基础 .....	(51)
<b>第二章 潜油电泵</b> .....	(64)
第一节 概述 .....	(64)
第二节 潜油电泵系统的组成 .....	(77)
第三节 潜油电泵井优化设计 .....	(88)
第四节 影响潜油电泵井优化设计因素分析.....	(112)
第五节 潜油电泵高效运行.....	(120)
第六节 潜油电泵井生产管理与故障诊断.....	(133)
<b>第三章 水力活塞泵</b> .....	(159)
第一节 概述.....	(159)
第二节 水力活塞泵装置的结构、组成及工作原理.....	(161)
第三节 水力活塞泵井下机组的安装型式及其选择.....	(186)
第四节 水力活塞泵的设计计算.....	(189)
第五节 水力活塞泵采油完整系统设计.....	(204)
第六节 水力活塞泵的工况诊断.....	(209)
<b>第四章 射流泵</b> .....	(212)
第一节 射流泵的结构和工作原理.....	(212)
第二节 射流泵的基本方程式.....	(213)
第三节 射流泵的特性曲线.....	(217)
第四节 射流泵的设计.....	(220)
第五节 射流泵的汽蚀.....	(222)
第六节 深井射流泵装置.....	(224)

<b>第五章 机械采油系统的设计与比较</b> .....	(228)
<b>第一节 机械采油方式的选择</b> .....	(228)
<b>第二节 经济效益分析</b> .....	(231)
<b>第三节 各种机械采油方法的讨论</b> .....	(231)

# 第一章 基础知识

本章主要介绍在无杆泵采油中所要用到的一些基础知识，主要讲述以下几个方面的内容：电工基础、水力学基础和采油工艺基础等方面的基础知识，不做详细的理论阐述。如读者想要更详细地研究这一内容，可参阅专门的技术文献。

## 第一节 电工基础

### 一、电的概念

#### 1. 电压与电动势

在电场中，将单位正电荷由高电位点移向低电位点时，电场力所做的功称为电压。电压又可表述为高低两点之间的电位差。其表达式为

$$U = \frac{A_D}{q} \quad (1-1)$$

式中  $A_D$ ——电场力所做的功，J；

$q$ ——电荷量，C；

$U$ ——两点之间的电压，V。

电压的正方向规定为高电位指向低电位，即电位降的方向。

在电场中，将单位正电荷由低电位移向高电位时外力所做的功，称为电动势。电动势不是一种机械力，而是单位电荷产生的电能，电动势在数值上等于外电路断开时电源两极间的电位差，其单位为伏特，即单位电荷的能量。换句话说，当把单位电荷从一点移到另一点时所做的功为一焦耳时，则两点间的电位差为1伏特。其表达式为

$$E = \frac{A_w}{q} \quad (1-2)$$

式中  $A_w$ ——外力所做的功, J;

$q$ ——电荷量, C;

$E$ ——电动势, V。

电动势的方向规定为由低电位指向高电位, 即电位升的方向。

电压与电动势的区别: 电压是反映电场力做功的概念, 其正方向为电位降的方向; 而电动势则是反映外力克服电场力做功的概念, 其正方向为电位升方向, 两者的方向相反。

## 2. 电流与电流强度

电子在导体中, 当受到某种力(电动势)的作用时, 便形成了有规律电子流, 我们把这种电子流称之为电流。

电流是有方向性的, 它是从电位较高点移向电位较低点。根据电子运动特点, 在电路中, 电荷是从负极流向正极, 这才是电流的真正流动方向, 但是我们一般讲电流的方向是从正极流向负极, 现在已成为习惯。

为了衡量电流的强弱, 我们引入电流强度这一物理量, 它的定义是: 单位时间内通过导体某一横截面电荷量的代数和。用公式表示为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-3)$$

式中  $I$ ——电流强度, A;

$t$ ——时间, s。

我们规定在每秒种内通过导体某一横截面积的电子数为 625 亿个时, 该电流强度为 1 安培, 用符号 A 表示。

## 3. 电阻

电流在导体内流动所受到的阻力叫电阻, 用符号  $R$  表示;



单位为欧姆，用符号  $\Omega$  表示。电阻的大小是由导体本身的性质和条件来决定的。

在导体温度不变的条件下，导体的两点之间的电压为 1 伏特，若导体中的电流强度为 1 安培，则两点之间导体的电阻为 1 欧姆。即

$$1\Omega = 1\text{V}/\text{A}$$

电阻的大小与导体的长度  $L$  成正比，与导体的横截面积  $S$  成反比，并且与该导体材料有关，我们把这一关系称为电阻定律，其公式为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-4)$$

式中  $\rho$ ——导体材料的电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

$L$ ——导体的长度， $\text{m}$ ；

$S$ ——导体横截面积， $\text{mm}^2$ 。

实际上，几乎所有材料的电阻都随温度变化。用于电子工程的绝大多数为金属导体，其电阻随温度升高而增大；而绝大多数非金属导体和电介质，电阻都随温度升高而减小。

在实际应用中，任何温度下金属导体的电阻都可以近似地用下面的关系式计算

$$R_T = R_0(1 + \alpha_0 T) \quad (1-5)$$

式中  $R_T$ ——导体在  $T^\circ\text{C}$  下的电阻， $\Omega$ ；

$R_0$ ——导体在  $0^\circ\text{C}$  下的电阻， $\Omega$ ；

$\alpha_0$ ——导体在  $0^\circ\text{C}$  下的温度系数。

#### 4. 导体和绝缘体

电子流动阻力小的物质称为导体，如铜、铝、金、银等，电子流动阻力大的或几乎不导电的物质称为绝缘体，如橡胶、塑料、陶瓷等。

导体内拥有大量的自由电子或离子，在电场力作用下，很容

易定向移动形成电流。导体的电阻率很小，一般在  $10^{-2} \sim 1\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  之间。

绝缘体由于原子核对其外层电子束缚力很强，自由电子极少，故导电能力差，电阻率很大，一般约为  $10^{13} \sim 10^{24}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。但是，绝缘体的绝缘是有前提的，它与电压有很大关系，当电压高到一定程度，电场力超过原子核束缚外层电子的能力时，外围电子就变成了自由电子，绝缘体发生质变而成为导体，这种情况称为“绝缘击穿”。

## 二、磁的概念

电与磁是电工技术中大量接触的现象，彼此之间有着密切的联系，研究其中一个必然涉及到另一个。各种发电机、电动机和变压器等都是根据电与磁的相互转化，相互作用原理制造出来的。下面我们主要讲述以下几个概念：磁场、电流与磁的关系、电动机左手定律、电磁感应。

### 1. 磁场

在磁性物质周围的空间存在一种特殊的物质，它能表现一种力的作用，这一特殊物质叫磁场。

如图 1-1 所示，磁场有大小和方向，可用磁力线表示。磁场越强，磁力线越密。磁力线的方向是从 N 极指向 S 极，这也是磁场的方向。

在磁体的内部，磁力线的方向是从 S 极指向 N 极，磁力线永远不会交叉，始终是闭合的。

通过磁路导磁截面积 ( $S$ ) 磁力线的总数称为磁通 ( $\Phi$ )，磁通的单位是 Wb，较小的单位是 Mx，1Mx 就是一根磁力线，那么  $1\text{Wb} = 10^8\text{Mx}$

单位面积通过的磁通量称为磁感应强度，用符号  $B$  表示，即

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-6)$$

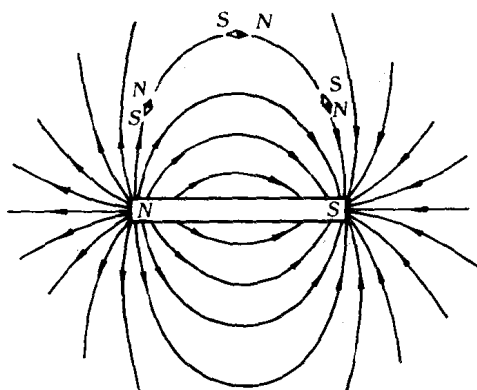


图 1-1 条形磁铁磁场的磁力线

式中  $\Phi$ ——磁通量, Wb;

$S$ ——导磁截面积,  $m^2$ ;

$B$ ——磁感应强度 (磁通密度), T。

如果磁通量  $\Phi$  的单位是 Wb, 导磁截面积  $S$  的单位是  $m^2$ , 则  $1\text{Wb}/m^2 = 1\text{T}$ 。

## 2. 电流与磁的关系

磁现象与电现象是相互关联、不可分割的统一体。有磁就有电流存在, 有电流必定有磁的存在。

通电导体周围存在着磁场, 电流磁场的磁力线是环绕着电流的一些闭合曲线。电流磁场的强度与导体通过的电流量有关, 通过的电流量越多, 磁场强度越大。导体通电后产生磁场的方向可用右手定则来确定, 如图 1-2 所示。

右手握导线, 拇指指向电流方向, 四指指向的是磁力线方向。

若是一个线圈通电后, 同样也产生磁场, 那么它的磁场方向可用右手螺旋定则来确定, 用右手所握线圈四指指的是电流方向, 那么拇指的方向为磁场方向, 如图 1-3 所示。

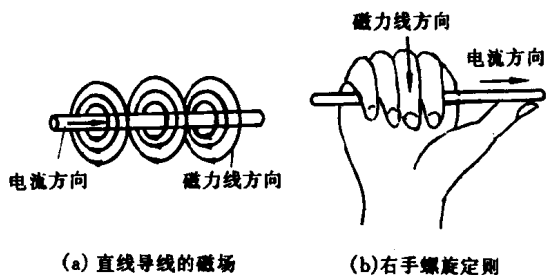


图 1-2 通电导体中电流产生的磁场

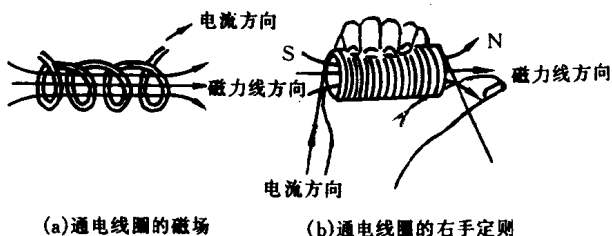


图 1-3 右手螺旋定则

### 3. 左手定则

通电导体在磁场中总要受到一种力的作用，这种力（ $F$ ）的大小与磁通密度（ $B$ ）、导线中的电流及导线有效长度（在磁场内的导线长度）（ $L$ ）成正比关系，即

$$F = BIL \quad (1-7)$$

式中  $B$  ——磁通密度， $\text{Wb}/\text{m}^2$ ，(T)；

$I$  ——电流，A；

$L$  ——导线有效长度，m；

$F$  ——作用力，N。

该关系式  $F$ 、 $L$ 、 $B$  用于在空间相互垂直的情况。

左手定则：伸开左手，使拇指与其余四指垂直，并和手掌在

同一平面内，并让磁力线垂直穿过手心，则四指指的是电流方向，拇指指的就是载流导体的受力方向，如图 1-4 所示。

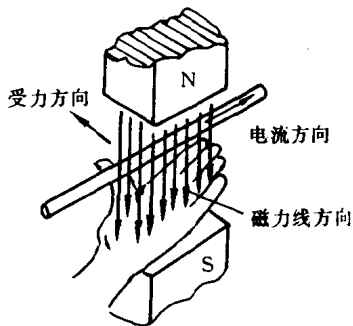


图 1-4 左手定则

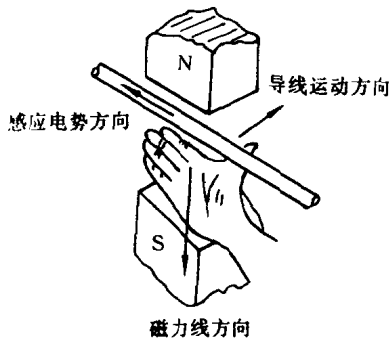


图 1-5 右手定则

#### 4. 电磁感应

由变化的磁场在导体中产生电动势的现象，称为电磁感应。由此产生的电动势称为感应电动势。

感应电动势的方向（感应电流的）可用右手定则来确定：将右手展平，四指伸直，大拇指与四指垂直，使磁力线穿过手心，拇指指向导体的运动方向，那么四指所指的方向就是感应电动势的方向，如图 1-5 所示。

感应电动势的大小与磁场强度  $B$ 、导线运动速度  $v$ 、导线在磁场中的有效长度  $L$  及导线切割磁力线的角度  $\alpha$  的正弦成正比关系，用公式表示为

$$E = B \cdot L \cdot v \sin \alpha \quad (1-8)$$

式中  $B$  ——磁通密度， $\text{Wb}/\text{m}^2$ ；

$L$  ——导线有效长度， $\text{m}$ ；

$v$  ——导线运动速度， $\text{m}/\text{s}$ ；

$E$  ——感应电动势， $\text{V}$ 。

### 三、直流电路

在电路中的电流（或电压）的方向和大小不随时间发生变

化，这样的电流（或电压）称为直流电流（或直流电压），此电路称为直流电路。

本节主要介绍一些直流电路中的几个定律和关系式。

### 1. 基本定律

#### (1) 欧姆定律

部分电路的欧姆定律：一段电路中的电流强度与这段电路上的电压成正比，与这段电路的电阻成反比，其表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-9)$$

式中  $I$  —— 电流，A；

$U$  —— 电压，V；

$R$  —— 电阻， $\Omega$ 。

全电路欧姆定律：在包含有电源在内的完整电路中电流的大小，与电路中电源电动势的大小成正比，而与电路中全部电阻值（包括外电路电阻及内电阻）成反比，其表达式为

$$I = \frac{E}{R + r_{\text{内}}} \quad (1-10)$$

式中  $r_{\text{内}}$  —— 电源电路的内电阻， $\Omega$ 。

图 1-6 为有源直流电路。

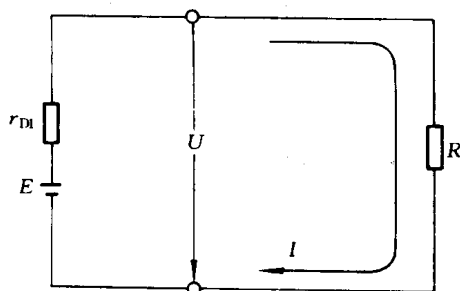


图 1-6 有源直流电路

#### (2) 电功率

单位时间内电流所做的功称为电功率，用符号  $P$  表示，简称功率，其表达式为

$$P = UI \quad (1-11)$$

式中  $P$  ——功率，W。

### (3) 焦耳-楞次定律

电流通过导体消耗的电能所产生的热量 ( $Q$ ) 与通过的电流 ( $I$ ) 的平方成正比，与该导体的电阻 ( $R$ ) 和通电时间 ( $t$ ) 也成正比例，这个关系式为焦耳-楞次定律，其表达式为

$$Q = 0.24I^2Rt \quad (1-12)$$

式中  $Q$  ——热量，cal；

$I$  ——电流，A；

$R$  ——电阻， $\Omega$ ；

$t$  ——时间，s。

$Q$  在实用中多用千卡，即  $1\text{kcal} = 1000\text{cal}$ 。该公式只适用于纯电阻电路。

### (4) 克希荷夫第一定律

在电路中任何时刻任一节点的各电流的代数和都等于零，这个结论称为克希荷夫第一定律，其表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-13)$$

如图 1-7 所示

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$$

或

$$I_1 + I_4 - I_2 - I_3 - I_5 = 0$$

上式中规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负。

### (5) 克希荷夫第二定律

在电路中，任意时刻任何一个闭合回路的各段上的电压之代数和等于零，这一规律称为克希荷夫第二定律。

如图 1-8 所示，箭头指的是绕行方向。

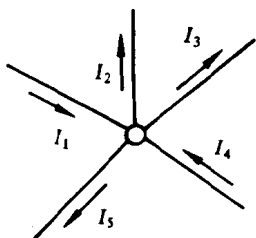


图 1-7 节点电流代数和为零

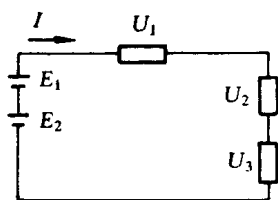


图 1-8 闭合回路中  
电压和为零

$$E_1 + E_2 = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-14)$$

或 
$$E_1 + E_2 - U_1 - U_2 - U_3 = 0$$

我们应用这一定律时，首先要选择回路的绕行方向，这一方向我们可任意确定，在一个闭合的回路中顺时针方向或逆时针方向均可，其次要确定回路中电动势和电阻上的电压降正负符号，电动势的正方向以低电位到高电位，也是电位升的方向，（指电源内部从负极到正极），跟绕行方向一致则该电动势取正值，否则取负值。

## 2. 电阻联接

在电路中，电阻的连接方式通常有串联、并联和混联三种。这里我们介绍一下电阻的三个联接方式及其电路。

### (1) 电阻串联

如图 1-9 所示，把几个电阻的首尾逐个连接起来，剩下一个首端和一个尾端，使电流只有一条通路，这种连接方式称为串联。

串联电路有下列特点：

a. 电路中各处的电流均都相等，流过每个电阻中的电流都和线路中的电流相同。即

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \quad (1-15)$$

b. 总电压等于线路中各段电压降的总和，即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-16)$$



c. 总电阻（等效电阻）等于所有各段电阻的和，即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-17)$$

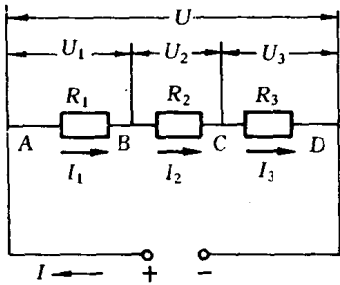


图 1-9 电阻的串联

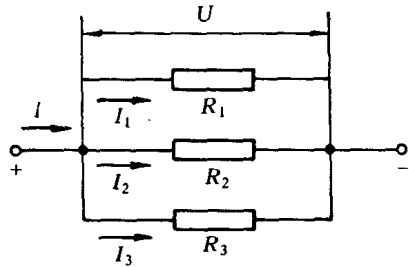


图 1-10 电阻的并联

## (2) 电阻并联

把每个电阻的一端连接在一起，另一端也连接在一起，这样的连接称为并联，如图 1-10 所示。

并联电路有下列特点

a. 并联电路中的总电流等于各并联支路电流的总和，即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-18)$$

b. 各并联电路两端的电压都相同，并都等于电源电压，即

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = U \quad (1-19)$$

c. 并联电路中的总电阻  $R$ （等效电阻）的倒数等于各分路中的电阻倒数的总和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-20)$$

## (3) 电阻混联

电路中有串联也有并联的电路称为混联电路，也称为串并联电路，如图 1-11 所示。在混联电路中，按照串联和并联电阻的计算方法，一步步地把电路简化，求出它们的等效电阻后，再求