

深井泵采油

〔美〕J. 扎 巴

石油化学工业出版社

深井泵采油

〔美〕J. 扎巴

玉门石油管理局采油科学研究所译

石油化学工业出版社

本书系统介绍了美国深井泵采油设备和工艺技术，内容包括有杆抽油、液压深井泵抽油和电动潜油泵抽油。书中对各种抽油方法的设备性能、工艺计算和应用等都有论述。

本书可供采油工程技术人员和专业院校师生参考。

Joseph Zaba
MODERN OIL-WELL PUMPING
The Petroleum Publishing Co.
Tulsa, Oklahoma
U.S.A. 1962

深井泵采油
玉门石油管理局采油科学研究所译

石油化学工业出版社出版
(北京和平里七区十六号楼)

石油化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $6^{3/8}$ 字数138千字印数1—4,750
1978年6月北京第1版 1978年6月北京第1次印刷
书号15063·油167 定价0.52元

前 言

本书是作者就这一主题从1943年7月1日开始在《油、气杂志》上陆续发表过的文章修订而成的。

十七年来，现场上用各种抽油方法进行人工采油方面有很大的变化和发展。根据对这一主题的理论研究，一些新的途径也正在探索。研制出了很多新型装置，对过去应用的一些装置也发现有新的用途。在当时连载文章中曾介绍的一些方法和装置，现在有的已经过时了。根据这些情况都重新作了编排和增删。

用泵抽油方法，根据其本身的结构原理可分为两类。第一类是，抽油泵下到井中，通过抽油杆柱从地面驱动，即有杆抽油方法。第二类是指原动机与抽油泵连在一起下到井中，构成一个深井机组，从地面把能量供给井下的原动机。属于这一类的有液压深井泵、电动潜油离心泵。

与原来连载文章的情况一样，本书是从抽油装置的实际应用的观点来编写的。书中兼顾到地面装置和井下装置以及它们的选择方法、应用情况和使用效果。至于这一问题的理论方面，已经不属于实用研究的范围，所以只在有必要更好地了解装置工作状况时才大致涉及。

有关抽油方面的文献非常广泛。书末所附参考文献只限于本书的资料来源，以及读者为更深入研究所必备的。

原来连载时的许多参考文献仍予保留，尽管有的已是卅年前的了，但从1930年后的15~20年间是研究抽油，尤其是有杆抽油法和积累文献的“黄金时代”。有志于深入研究近代抽油方法的读者，仍必须熟悉那个时期的一些基本情况。

目 录

前言

第一章 有杆抽油..... 1

第一节 抽油系统..... 1

一、抽汲运动..... 6

二、作用力.....10

三、抽汲载荷.....13

四、抽汲载荷的测定.....17

五、载荷的计算.....22

六、平衡.....29

七、转矩问题.....32

八、需要的功率.....35

第二节 抽油杆.....41

一、抽油杆的特性.....41

二、抽油杆的损坏.....50

三、抽油杆接头的损坏.....56

四、抽油杆与油管的磨损.....62

五、损坏频率.....64

六、抽油杆的各项常数.....65

七、抽油杆的选择.....66

八、抽油杆柱的设计方法.....69

第三节 有杆抽油泵.....76

一、柱塞行程.....76

二、柱塞直径.....86

三、抽油泵排量.....88

四、容积效率.....89

五、气体的影响·····	92
六、API (美国石油学会) 深井泵标准 ·····	101
七、抽油泵的类型·····	103
第四节 抽油机·····	113
一、平衡问题·····	116
二、扭矩系数·····	123
第五节 三角皮带的传动·····	129
第六节 原动机·····	132
一、内燃机·····	134
二、电动机·····	138
第七节 游梁式抽油机的设计·····	142
第八节 长冲程液压有杆抽油装置·····	145
第九节 多层有杆泵抽油·····	149
第十节 小井眼有杆泵抽油·····	154
第十一节 多井有杆抽油·····	158
第二章 液压深井泵抽油 ·····	164
第一节 地面系统·····	164
第二节 井下泵组·····	166
第三节 抽油方式·····	170
第四节 选泵·····	175
第五节 设计·····	176
第六节 工作情况的分析·····	178
第七节 双层采油的液压泵组·····	179
第三章 电动离心泵 ·····	182
结束语 ·····	189

第一章 有杆抽油

第一节 抽油系统

抽油系统的沿革 知道用地面游梁和一套杆柱来带动井下的泵，把井中的液体提升出来的原理，大概已两千多年了。早在石油工业问世时，就开始用此原理进行人工采油。在过去的四十年中，随着其它工业在工具、设备和加工方法上的不断改善，有杆抽油装置也不断完善，因而今天抽油设备的效率已相当不错。目前，现场使用的人工采油方法中，有杆抽油仍居于首要地位，约占80%。

在这四十年中，有杆抽油方法的进展有三方面，第一，是力求用改善设备的设计和所用材料的方法，以提高抽油机构地面和地下的机械性能；第二，是研究那些制约着有杆抽油系统工况的基本原理；第三，是在设计和分析抽油系统状况时，用上了有关油层性质和动态的知识。

理论研究 为了明确本书在探讨有杆抽油动态的理论问题所引用的方法，先让我们来回顾一下理论研究方面的沿革。

人们都认为，有杆抽油装置是一种十分简单的系统。实际上，它的运动是复杂的，要分析其动态就更困难。这是很多因素所造成的。有杆抽油装置各个部件的运动，彼此之间存在着密切相关的联系，所以要对某一定部件的运动进行探讨将会模棱两可而发生困难。

影响这一系统各部件运动的究竟有哪些因素尚不能严格地加以估计，这些因素起了多大的作用也难以精确判定。抽油设备在每一个往复中，各自承受着不同类型的载荷。在每一个往复运动中，它们有互相影响。抽油杆、油管 and 抽动的液体都属于可延伸的弹性柱体，但它们在承受载荷时则有着不同的反应，因而抽油机构的地面和地下部分运动的因果作用之间，在时间上有一滞后现象。

1930年前后，开始着手对有杆抽油系统的运动进行理论研究。在随后的15~20年中，一些研究者在有杆抽油系统的运动、作用力、载荷、应力和扭矩等理论研究方面曾有所发展。他们根据这些理论推导出现在通用的计算有杆抽油装置的实用公式。

与此同时，为了配合这些研究，进行了抽油井的现场试验。在试验中对各个参数进行了细致的测量，并运用所积累的资料检验理论研究的结果。其中著名的是1940年在奥克拉荷马城油田某井联合进行的一系列试验^[1]。当时，在抽油机构上装有各种精密的地面及地下仪表，然后采用各种泵速和冲程，各种类型的原动机和各种平衡条件，进行了数百次试验。

通过试验，虽然了解到很多东西，但是这些试验只代表某种已定的生产特性的一口井的情况，其结果当然不能概括一般。而且就是要用这些收集到的大量资料也是极其费劲。几年以后，曾对这些资料做了一次研究，通过示功图以探讨曲柄轴销最大扭矩包含哪些因素。

如果想把这口井的多次试验挑出八次进行研究，就需要两个人全力以赴地进行八个月^[2]。M.H.赫德逊对这种解决问题的方法进行经济评价后指出，按1940年价格，此试验开

支达40000美元左右^[3]。特别是在深井，若要取得能概括一般的资料，还需在很多别的井，特别是一些深井中进行试验。而这项费用将是相当惊人的。

考虑到这些问题，一些研究人员认为，正当的途径应当是用其它工程中所采用的方法，即用专门设计制造的模拟机来进行试验才成。早在1936年，埃默里·N·凯姆勒曾按M.玛斯盖特建议，用电模拟对抽油系统进行研究试验^[4]。在一台电模拟系统中，其电压相当于机械系统中的力；远程输电线方程则与抽油杆柱的力学特性方程相当。凯姆勒在试验中曾使用三个电路分别代表抽油杆柱、油柱和油管柱。此试验证明，用电模拟可以研究抽油杆柱、油柱和油管柱的运动，以及影响泵效的各种因素，并可得出载荷-位移图，即示功图。

随着埃默里·N·凯姆勒1936年用电模拟研究有杆抽油系统的试验之后，其他研究人员也沿这一途径从事试验。1958年，M.H.赫德逊提出了理论模拟研究的实用可能性^[5]。在一个专门设置的模拟机中，把所有的已知变数，如冲程长度、抽汲速度、不同规范的抽油杆和抽油泵等等，都可考虑进去，而对于那些未知变数，如抽油杆的摩擦力，则通过反复地加以调整，直到模拟装置能重现出和现场一样的示功图。如把这一过程重复多次，就可求出这些未知数的平均值及变化范围。

下一步则是根据实测情况作出一些曲线，以供在给定的深度和产量条件下，快速选择抽油装置的规格；也还可以作出另一些曲线，以便为特定的井所选用的特定抽油机，确定抽油杆和抽油泵的尺寸、所需马力的大小以及别的一些变量。

将各种不同工作条件下大量的示功图汇集成图册，将有

助于现场示功图的解释。最后，此种模拟也可用来研究值得专门探讨的特殊抽油问题。

1954年曾集资成立了有杆抽油研究公司，对各种可能的途径进行了研究，如利用电模拟、电子模拟计算机、机械模拟器、数字计算机等。经过大量的研究，确定用机械模拟器，而且选定在密苏里州堪萨斯城的中西部研究所建造此种模拟器，从事这项研究工作。

模拟器于1957年基本建成。原动机使用一个小直流马达，其特性的调整范围较大^[5]。抽油机及泵是按比例缩小的模型。抽油杆、油管及液柱，分别用一套振动回转系统进行模拟。该系统是由一些靠扭转弹性元件连接的飞轮所组成。此法之所以可行，是由于描述这种系统的方程和油管柱、油杆柱和液柱的方程相同。在回旋振动系统的模拟中，扭矩、角位移、转动惯量及扭转弹性分别与力、线位移、质量和线弹性等成正比。

对于迄今仍在进行的此项研究中，用这种设计经常会碰到很多问题。例如，对阻尼现象的模拟就是这些问题之一。以致原先建造的模拟器必须做一定的修改。现在也已用上了电子模拟器。

用模拟器研究有杆抽油系统加深了我们对这个问题的认识，这对分析现有的抽油装置动态及设法改善抽油装置有着特殊的价值。但对原先想靠它选择设备而言，好处并不明显。

目前用以初步选择抽油设备的公式，大家都公认仅是近似的。但事实上，使用这些公式进行了成千上万次的有杆抽油设计，而运转上发生的问题极少。这说明使用这些公式进行的设计，即使有误差，也仍然在许可的安全范围以内。

在初步选择抽油设备规格时，比较保守是可以理解的，因为要对一口油井选择新的抽油设备时，都要对油井特性作出某些假设，这些假设可能证明是正确的，也可能不正确。另外，影响此系统负荷的因素，在装置整个的使用期间，可能而且经常是变化的。所以，尽管计算此系统的载荷、扭矩及运动的公式如何精确，主要仍然决定于设计人员的判断，即对于经常碰到的一些未知数选取多大的安全系数。

即使有一种新方法，判定可以选择小而廉价的设备，也还是要注意到油井整个抽油阶段的生产费用决不次于，至少与基建费用一样地重要。如果所选设备由于油井情况的变化而显得过小，则生产费用就会更高。

研究方法 本书提到的计算和分析游梁式抽油装置的公式，为了实用明了起见，都力求将其理论依据简略。这是由于问题过于复杂，因而需要有一个特殊的论述方法。

有杆抽油系统基本上由七部分组成，即原动机、传动装置、抽油机、抽油杆、油管、液柱及深井泵。如前所述，这些部分的动作是互相依赖的，因此在开始进行此装置的设计计算时，应把整个系统当作一个单元来考虑。在设计计算中之所以需要用这种方法，是因为当所用的公式已为大家所熟悉和公认时，是可行的，这在一般的论著中是不这样做的，因为本文目的只在于讨论抽油系统的动态特性。

另一方面，由于各部分的互相影响，要有逻辑、推理地对抽油机构的部件进行讨论也很困难。例如，如果从泵出发进行讨论，随之而来就不得不考虑抽油杆的运动，才能解释抽油泵的运动。

于是，唯一适当的讨论方法，是首先对所考察的系统有个一般的概念，对这一总成的各机械细节先不考虑，仅考虑它

的运动、力、载荷和扭矩。随后，当需要更详尽地考虑这一系统的各个部分，而需要包括这种装备的机械零件时，那么这个概论就为便于了解奠定了基础。很明显，利用此种方法，仍将会牵涉到某些基本理论。但是它的好处是保持了思路的一贯和消除可能出现的紊乱。

然而，即使在这种初步讨论中，关于抽油机几何形状对该系统运动的影响仍须作适当地考虑。一套抽油机实质上是一组杠杆和连杆系统，这些杠杆和连杆的连接点的相对位置及相对长度是很重要的，它们对抽油机的运动、作用力的形式、载荷和扭矩的大小都会产生影响。

对于一定几何布局的抽油机来说，旋转方向也是重要的。虽然考虑这些细节是抽油机设计和制造厂家的职责，但用户为了保证有高效率的设备，对此有一般的了解也仍是重要的。

一、抽 汲 运 动

通常在分析有杆抽油系统的运动时，为简化问题都要作一定的假设。其中之一是假设为简谐运动，实际上它只是近似于简谐运动。

图1表示真正的简谐运动。若点M沿直径为AB的圆周作匀角速旋转，则点M在直径AB上的投影M'被描述为作简谐运动。这是一种直线振幅运动，其加速度与位移成比例，但符号相反，所谓位移是指对应于某个固定的参考点的位置变化。

一台普通的抽油机曲柄的旋转运动引起的光杆的振幅运动并不是一种真正的简谐运动，其理由是：首先曲柄的角速度难以保持不变；其次，连杆的角度会影响运动的性质；第

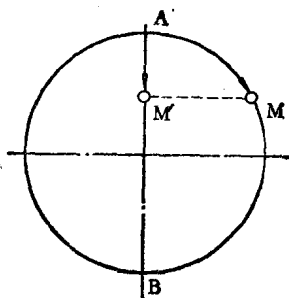


图 1 M 作匀角速旋转时， M' 作真正的简谐运动

三，抽油机的几何形状对运动速度有一定的影响。

光杆运动 抽油机连杆角度对运动的影响可以用抽油机连杆及连杆轴承总成的运动与发动机的连杆及十字头的运动的对比来说明^[6,1]。虽然十字头是作直线运动，而抽油机连杆轴承作圆弧运动（以游梁中轴承为圆心），但这样比拟还是可以的。

参看图 2，当曲柄沿着圆周由 A 经 B 至 C，十字头移动的距离从 a 至 b 又回到 a。这个距离要比相当于曲柄由 C 经 D 到 A 运动时十字头运动从 a 至 c 又回到 a 的距离要长。其理由是，就十字头的行程来说，曲柄行程的水平及垂直分量，在曲柄行程的上半部是相加的，而在曲柄行程的下半部是相减的。

当连杆长度与曲柄长度的比值增大时，则与曲柄行程的上部及下部相对应的十字头行程距离的差值将会减少。对无限长的连杆，这一差值将等于零。

以上情况可进一步与速度与加速度问题联系起来。假设曲柄的角速度不变，十字头行程距离 ab 比 ac 长，则十字头在行

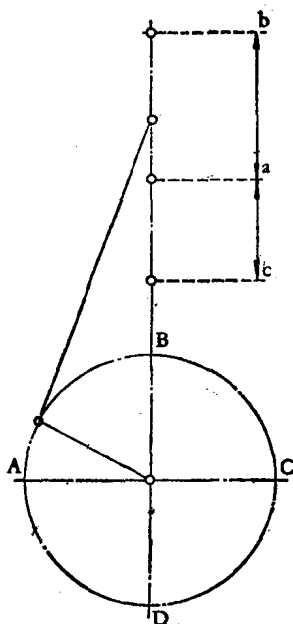


图 2 此处表示曲柄运动
不是简谐运动

程上半部的速度和加速度高于行程下半部的速度和加速度。

用以上概念来研究抽汲运动。由于抽油机连杆轴承的行程方向与光杆相反，故从冲程中部到下死点和回程，光杆的速度及加速度将比从冲程中部到上死点和回程的要高。

这种速度及加速度的差别随连杆与曲柄长度比值的增大而减小。

普通抽油机的曲柄和连杆位于支架的另一侧和油井相对，所以光杆速度在冲程下半部比上半部要快。空气平衡或几何形状类似空气平

衡的重块平衡抽油机，其曲柄及连杆位于支架的、靠油井的一方，所以连杆轴承的行程与光杆方向相同。因此，光杆行程上半部的速度及加速度高于下半部。

从若干年前所做的解析研究可知^[8]，光杆的速度及加速度受以下因素的影响：1. 中轴承与连杆轴承的相对位置；2. 游梁水平时曲柄旋转中心与连杆轴承的相对位置；3. 抽油机各部分的相对长度。

柱塞运动 抽汲时光杆的运动通过抽油杆传给柱塞，产生如图 3 所示的抽油循环过程。深井泵可以简化地分为四个

基本部分：泵筒、柱塞、游动凡尔及固定凡尔。

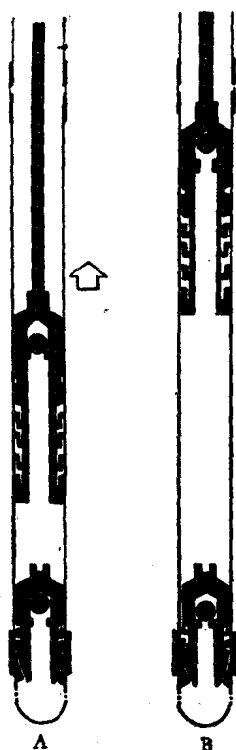


图 3

A—上冲程时液体重量由抽油杆承受；B—下冲程时液体重量转给油管承受

深井泵沉没在油井的液体中，上冲程开始时，柱塞向上运动（图 3-A），油管内的柱塞以上液柱的重量使游动凡尔关闭。全部液体重量由抽油杆承受。与此同时，由于柱塞向上运动，泵筒内压力降低，油管外的流体压开固定凡尔进入泵内。

柱塞移动到上死点后返回（图 3-B），这时游动凡尔打开，固定凡尔关闭，液体重量转由油管承受，柱塞经由液体又回到抽汲循环的起始点。

上述抽油过程比实际情况简单得多，因为它忽略了上行程时泵筒充不满、泵内出现气体以及抽汲机构各部分性能不同作用等所带来的影响。

这样叙述的目的是要说明，在每一抽汲循环中，液体载荷是先从抽油杆转至油管，然后又再回到抽油杆，这乃是一个影响柱塞运动的因素。而抽油杆及油管都是有弹性的，它们的长度会随载荷的增减而变化。

抽油杆受载荷要伸长，故在上冲程开始时，要使柱塞在

泵筒内开始移动，需要光杆先作一定的运动。载荷的转换及一些其它因素，使柱塞的运动变得非常复杂。这一点将在以后分析。

二、作用力

抽油机的几何结构及曲柄旋转方向会影响作用到游梁上的力的方向，进而会影响有杆抽油系统地面装置的效率。

连杆拉力 普通的游梁结构，尾轴承高于中轴承，当游梁在水平位置时，它们不在同一水平线上。通过连杆作用在游梁上的力，其方向（图4）从与游梁杠杆臂正交而逐渐偏高；所有用于作功的作用力中，正交的拉力最有效。

当拉力偏离正交方位时，它便分为两个分力（图5）。其中只有与游梁杠杆臂正交的一个分力在作功，而平行分力则在抽油结构中形成应力。

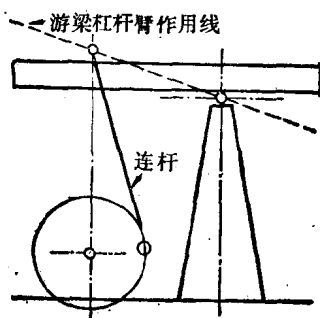


图4 当普通的抽油机游梁处于水平位置时，游梁杠杆臂的作用线不是水平的

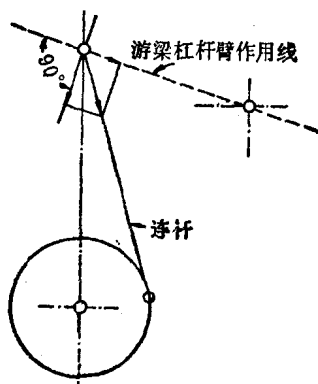


图5 表示连杆拉力各分力之图解