

# 游梁式抽油机 节能控制技术

● 孙正贵 编著



中国石油大学出版社

# 游梁式抽油机节能控制技术

YOU LIANG SHI CHOU YOU JI JIE NENG KONG ZHI JI SHU

孙正贵 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

游梁式抽油机节能控制技术/孙正贵编著. —东营:中国石油大学出版社, 2008. 3

ISBN 978-7-5636-2554-3

I. 游… II. 孙… III. 抽油机—节能—技术 IV. TE933

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 031495 号

书 名: 游梁式抽油机节能控制技术

作 者: 孙正贵

---

责任编辑: 袁超红 (电话 0546—8396214)

封面设计: 王凌波

---

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0546—8392791, 8392563)

开 本: 180×235 印张: 13.375 字数: 275 千字

版 次: 2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

## Preface



游梁式抽油机具有结构简单、制造容易、可靠性高、耐久性好、维修方便、适应现场工况等优点,在采油机械中占有举足轻重的地位,在今后相当长的时间内仍将是油田的首选采油设备。但是常规游梁式抽油机本身的结构特征决定了其平衡效果差,曲柄净扭矩脉动大,存在负扭矩、载荷率低、工作效率低和能耗大等缺点。

在采油成本中,抽油机电费占 30% 左右,年耗电量占油田总耗电量的 20%~30%,为油田电耗的第 2 位,仅次于注水。游梁式抽油机抽油系统的总效率在国内一般地区平均只有 12%~23%,在先进地区至今也不到 30%,由此可见降低抽油系统高能耗的迫切程度与难度。多年来,全世界各油田在节能降耗与降低生产成本方面投入了大量技术力量进行研究。大量用于游梁式抽油机的节能装置投入使用,不同程度地起到了节能的作用。

本书对国内近十年来开发、使用的游梁式抽油机节能控制技术进行了论述。第一章和第二章介绍了游梁式抽油机节能控制技术的意义,以及游梁式抽油机的工作特性与节能途径。近年来,游梁式抽油机的节能控制技术大都采用变频控制技术,因此第三章和第四章简要介绍了电动机拖动原理以及 PWM 控制的基本原理与方法,以方便读者阅读。第五章至第八章对近十年来各油田所采用的节能控制技术进行了分类介绍,包括抽油机调压节能控制技术、抽油机倒发电控制技术、抽油机电动机变频节能控制技术、抽油机间抽节能控制技术。以上四大类技术中的每一类又包含若干种技术细节不同的技术。

本书所介绍的每一种技术基本上都进行过现场试验,并由试验证明该技术具有实用及推广价值。书中所介绍的游梁式抽油机节能控制技术基本涵盖了国内在该领域所使用的技术,因此对于从事此方面研究与技术开发的技术人员来说,本书具有一定的参考价值。

书中介绍的众多节能技术各有千秋。有的技术虽然简单且开发时间比较早,但是具有成本低、经久耐用的特点;有的技术在某种条件及环境下的使用效果比较理想,在另一种条件及环境下就不一定适用了。因此,书中对每一种节能技术的开发背景都进行了简单介绍,以便于读者获得更全面的信息。

本书的编写得到了同行、朋友及同事的大力支持,在此一并向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中必有不足之处,欢迎广大读者提出宝贵意见。

作 者

2007年10月于东营

## Contents

## 目

## 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 绪 论                      | 1   |
| 第一节 抽油机的国内外概况                | 1   |
| 第二节 抽油机的发展方向及新型抽油机           | 2   |
| 第三节 研究游梁式抽油机节能的意义            | 4   |
| 第二章 游梁式抽油机的工作特性与节能途径         | 6   |
| 第一节 游梁式抽油机的工作特性              | 6   |
| 第二节 游梁式抽油机效率低的主要原因与节能途径      | 8   |
| 第三章 电动机的制动、启动与拖动系统的速度调节      | 13  |
| 第一节 三相异步电动机的电动和制动运行状态        | 13  |
| 第二节 三相异步电动机的轻载启动             | 27  |
| 第三节 电动机的重载启动                 | 38  |
| 第四节 三相异步电动机启动的过渡过程           | 47  |
| 第五节 三相交流电动机拖动系统的速度调节         | 51  |
| 第四章 PWM 控制的基本原理与方法           | 80  |
| 第一节 PWM 控制的基本原理              | 80  |
| 第二节 PWM 型逆变电路的控制方式           | 83  |
| 第三节 SPWM 波形的生成方法             | 85  |
| 第四节 PWM 型变频器的主电路             | 90  |
| 第五节 跟踪型 PWM 逆变电路             | 93  |
| 第五章 抽油机电机调压节能控制技术            | 97  |
| 第一节 电动机 Y- $\Delta$ 切换调压节能技术 | 97  |
| 第二节 双功率电动机节能技术               | 102 |
| 第三节 可控硅调压节能控制技术              | 108 |
| 第四节 电容无功补偿节能控制技术             | 114 |
| 第五节 晶闸管控制电压的节能技术             | 118 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第六节 降压调压节能控制技术           | 129 |
| 第六章 抽油机倒发电控制技术           | 136 |
| 第一节 抽油机倒发电的危害            | 136 |
| 第二节 逆变式 PWM 变流技术         | 137 |
| 第三节 双向 AC/DC 变换技术        | 140 |
| 第四节 抽油机超越离合器节能技术         | 142 |
| 第五节 抽油机机电联合节能技术          | 144 |
| 第六节 液力耦合器节能技术            | 145 |
| 第七章 抽油机电机变频节能控制技术        | 149 |
| 第一节 内置最小功率损耗曲线的变频控制技术    | 149 |
| 第二节 装有可编程控制器(PLC)的变频节能技术 | 151 |
| 第三节 有回馈控制电路的变频节能技术       | 154 |
| 第四节 再生能量可反馈的高功率因数变频节能技术  | 159 |
| 第五节 消除变频器噪声的技术           | 162 |
| 第六节 双 PWM 变频电路节能技术       | 162 |
| 第七节 抽油机智能化变频节能技术         | 166 |
| 第八章 抽油机间抽节能控制技术          | 170 |
| 第一节 游梁式抽油机的“空抽”运行状态      | 170 |
| 第二节 抽油机智能间抽节能技术          | 173 |
| 第三节 根据液击特点控制间抽时间的节能技术    | 186 |
| 第四节 根据井口流量控制间抽时间的节能技术    | 189 |
| 第五节 RL 模糊神经网络控制间抽的节能技术   | 192 |
| 第六节 PLC 间抽控制节能技术         | 196 |
| 第七节 电动机“高速改低速”控制间抽的节能技术  | 199 |
| 第八节 根据电动机功率因数控制间抽的节能技术   | 201 |
| 第九节 MCU 控制间抽的节能技术        | 204 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 抽油机的国内外概况

在世界范围内,研究与应用抽油机已有 100 多年的历史。在百余年的采油实践中,抽油机发生了很大变化。特别是近 20 年来,世界抽油机技术发展较快,先后研究开发了多种新型抽油机。其特点是:增强了抽油机的适应性、可靠性、经济性和先进性;改善了抽油性能,降低了抽油机载荷与载荷变化范围,提高了抽油效率,减少了动力消耗,提高了抽油机平衡效果,改善了抽油机的运动特性、动力特性与平衡特性;增大了抽油机的使用范围,减小了抽油机的体积和质量,强化了抽油机自动化与智能化程度。总之,抽油机的各项技术经济指标达到了有史以来的最高水平。

目前,世界上生产抽油机的国家主要有美国、俄罗斯、法国、加拿大和罗马尼亚等。美国石油学会 API Spec 11E《抽油机规范》中规定,抽油机共有 77 种规格,悬点最大载荷为 9~214 kN,冲程长度 0.4~7.6 m。Lufkin 公司是美国生产抽油机最早和最大的公司,在 1923 年生产了美国第一台游梁式抽油机,1931 年率先研制了两块平衡重的曲柄平衡抽油机,1959 年研制了前置式抽油机。该公司也是最早生产前置式气平衡抽油机的公司。目前,Lufkin 公司生产 B,C,M,A 等 4 种系列抽油机:B 系列游梁平衡抽油机有 8 种规格,悬点最大载荷 24~49.4 kN,冲程长度 0.6~1.21 m;C 系列曲柄平衡抽油机有 64 种规格,悬点最大载荷 24~165.5 kN,冲程长度 0.76~4.2 m;M 系列前置式抽油机有 46 种规格,悬点最大载荷 64.86~193.68 kN,冲程长度 1.62~5.68 m;A 系列前置式气平衡抽油机有 26 种规格,悬点最大载荷 78.47~213.1 kN,冲程长度 1.62~6.09 m。俄罗斯生产 13 种规格的游梁抽油机,悬点最大载荷 20~200 kN,冲程长度 0.6~6 m;生产 20 种规格的曲柄摇臂式抽油机,悬点最大载荷 10~200 kN,冲程长度 0.4~6 m;生产 06M 型、液压驱动型、平衡液缸型等无游梁抽油机,悬点最大载荷 150 kN,最大冲程长度 10 m。法国 Mape 公司生产 12 种规格的曲柄平衡游梁抽油机,悬点最大载荷 160 kN,最大冲程长度 4.2 m;生产 H 系列长冲程液压驱动抽油机,悬点最大载荷 199 kN,最大冲程长度 10 m,最大冲次 5 次/min。此外,Mape 公司还生产立式斜井抽油机和液缸型抽油机,并均已形成系列。加拿大生产液、电、气组合一体式 HEP 抽油机,悬点最大载荷 72~103.9 kN,冲程长度 1.63~4.27 m,具有较好的使用性能。罗马尼亚按美国 API 标准生产 51 种规格的游梁抽油机,悬点最大载荷 194 kN,最大冲程长度 4.8 m;生产 35 种规格的前置式抽油机,悬点最大载荷 194 kN,最大冲程

长度 5.4 m, 配用 7 种规格的减速器, 最大扭矩  $105.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。此外, 罗马尼亚还生产前置式气平衡抽油机, 悬点最大载荷 152 kN, 最大冲程长度 4.2 m。

目前, 世界上抽油机最大下泵深度为 4 530 m, 在美国 Reno 油田的一口抽油井上使用。俄罗斯抽油机最大下泵深度为 4 000 m。全世界生产抽油装置的公司有 300 多家, 其中生产抽油机的公司有 150 多家。美国的抽油机品种规格齐全, 技术水平先进, 质量较好且较稳定, 应用范围较广泛。

国内在抽油机先进技术研究方面, 新油田基本与国际接轨; 在先进技术的推广、大面积使用方面, 国内则比国外发达国家落后。尤其是老油田使用的常规游梁式抽油机若用技术先进的抽油机代替, 投入成本太高, 回收成本周期过长, 从而影响了新式抽油机的推广使用, 因此各油田还是以游梁式抽油机为主。为了节能增效, 各油田及研究单位采取了各种不同的方法对常规游梁式抽油机进行技术改造, 取得了一定的效果。

## 第二节 抽油机的发展方向及新型抽油机

### 一、抽油机的发展方向

#### 1. 朝着大型化方向发展

随着世界油气资源的不断开发, 开采油层深度逐年增加, 石油含水量也不断增多。由于采用大泵提液采油工艺和开采稠油等都要求采用大型抽油机, 所以近年来国外出现了许多大载荷抽油机, 如前置式气平衡抽油机最大载荷 213 kN、气囊平衡抽油机最大载荷 227 kN 等, 以后还会出现更大载荷的新型抽油机。由于采用长冲程抽油方式的抽油效率高、抽油机寿命长、动载荷小、排量稳定、具有较好的采油经济效益, 所以近年来国外出现了许多长冲程抽油机, 如法国 Mape 公司生产的抽油机最大冲程为 10 m, 美国 WECO 公司生产的抽油机最大冲程为 24.38 m、NSCO 公司生产的抽油机最大冲程为 27.48 m, 前苏联的钢带式超长冲程抽油机最大冲程为 1 500 m。长冲程抽油机全部采用低冲次抽油方式, Mape 公司生产的抽油机最大冲次为 5 次/min、WECO 公司生产的抽油机最大冲次为 3 次/min。

#### 2. 朝着低能耗方向发展

为减少能耗, 提高采油经济效益, 近年来国外研制与应用了许多节能型抽油机。例如, 异相型抽油机可节电 15%~35%; 前置式抽油机可节电 36.8%; 前置式气平衡抽油机可节电 35%; 轮式抽油机可节电 50%~80%; 大圈式抽油机可节电 30%; 自动平衡抽油机可节电 30%~50%; 低矮型抽油机可节电 5%~20%; ROTAFLEX 抽油机可节电 25%; 智能抽油机可节电 17.4%; 螺杆泵采油系统可节电 40%~50%。

#### 3. 朝着精确平衡方向发展

近年来国外很重视改进和提高抽油机的平衡效果, 使抽油机平衡更精确。例如, 变平衡力矩抽油机可使上冲程平衡力矩大于下冲程力矩; 由于可在动态下调节气平衡, 前

置式气平衡抽油机平衡效果较好;气囊平衡抽油机有 90% 以上的载荷可得到平衡;双井抽油机可利用两口油井抽油杆柱的合理设计得到更精确的平衡;自动平衡抽油机可保证在上下冲程每一瞬间都得到较精确的平衡效果。

#### 4. 朝着高适应性方向发展

现代抽油机应具有较高的适应性,以便拓宽使用范围。例如,适应各种自然地理和地质构造条件抽油的需要;适应各种成分石油抽汲的需要;适应各种类型油井抽汲的需要;适应深井抽油需要;适应长冲程抽油的需要;适应节电的需要,等等。

#### 5. 朝着长冲程无游梁方向发展

近年来国外研制与应用了多种类型长冲程抽油机,其中包括增大冲程游梁抽油机、增大冲程无游梁抽油机和长冲程无游梁抽油机。实践与理论分析表明,增大冲程游梁抽油机是常规游梁抽油机的发展方向;增大冲程无游梁抽油机是增大冲程抽油机的发展方向;长冲程无游梁抽油机是长冲程抽油机的发展方向。

#### 6. 朝着自动化和智能化方向发展

近年来抽油机技术发展的显著标志是自动化和智能化。美国 Baker 提升系统公司、Delta-X 公司、APS 公司等均研制了自动化抽油机,具有保护和报警功能,可实时测得油井运行参数,及时显示与记录并通过计算机进行综合计算分析,推出最优工况参数,进一步指导抽油机以最优工况抽油。美国 NSCO 公司的智能抽油机采用微处理机和自适应电子控制器进行控制与监测,具有抽油效率高、节电、功能多、安全可靠、自动化程度高、经济性好、适应性强等优点。

## 二、各种新型抽油机

主要的新型抽油机如下:

(1) 为了适应各种地质油藏条件,研制与应用了液压缸式抽油机、气压缸式抽油机、长冲程低冲次抽油机和螺杆泵采油系统等。

(2) 为了满足陆地、城市、农村水利喷灌区、山区、沼泽、森林地带、沙漠地区、浅海和海滩、海洋地区和更复杂地区抽油的需要,研制与应用了低矮型抽油机、城市抽油机、前置式抽油机、前置式气平衡抽油机、紧凑型抽油机、两点式抽油机和井架型抽油机等。

(3) 为了适应垂直井、斜井、丛式井和水平井的抽油工况,研制与应用了斜井抽油机、丛式井抽油机、双驴头抽油机和高效能丛式井抽油机等。

(4) 为了满足稠油和深井开采的需要,研制与应用了各种大型抽油机。例如,常规型抽油机最大载荷为 160 kN;前置式抽油机最大载荷为 193 kN;前置式气平衡抽油机最大载荷为 213 kN。

(5) 为了提高抽油系统的效率,减少抽油机动载荷与振动载荷,研制了增大冲程游梁抽油机和增大冲程无游梁抽油机及长冲程无游梁抽油机(分立式和卧式两种)。

(6) 为了提高采油经济效益,降低能源消耗,减少抽油成本,研制与应用了各种新型节能抽油机和节能部件。例如,异相型抽油机、前置式抽油机、前置式气平衡抽油机、

大圈式抽油机、轮式抽油机、全胶带传动抽油机、井架型抽油机、滚筒式抽油机、缸体式抽油机、玻璃钢抽油杆用抽油机、自动化抽油机和智能抽油机等。节能部件有高转差率电动机、天然气发动机、抽油机节能控制柜、窄 V 联组胶带、同步胶带、齿形胶带等。上述抽油机和部件可节电 10%~50%。

(7) 为了提高抽油机精确平衡的效果,达到节电和提高抽油机运动平稳性与使用寿命的目的,研制与应用了各种平衡方式的抽油机。例如,变平衡力矩抽油机、气平衡抽油机、气囊平衡抽油机、双井平衡抽油机和自动平衡抽油机等。

(8) 为了满足边远地区没有电源的抽油井试油或采油以及间歇抽油的需要,研制与应用了车装式抽油机。该抽油机采用天然气发动机或汽油机、柴油机驱动抽油机,具有使用方便、移动灵活等特点。

(9) 为了提高采油效率,实现自动化采油,研制与应用了各种自动化抽油机和智能抽油机。这类抽油机采用了先进的微机系统控制、检测和诊断抽油机运行与故障,以确保高效、安全、经济地抽油。

可以预见,随着科学技术的不断发展与进步,还将出现更多的新型抽油机。

### 第三节 研究游梁式抽油机节能的意义

常规游梁式抽油机(简称常规机)具有结构简单、制造容易、可靠性高、耐久性好、维修方便、适应现场工况等优点,在采油机械中占有举足轻重的地位。在今后相当长的时间内,常规机仍将是油田的首选采油设备。但是,常规机本身的结构特征决定了它的平衡效果差,曲柄净扭矩脉动大,存在负扭矩、载荷率低、工作效率低和能耗大等缺点。

在采油成本中,抽油机电费占 30%左右,年耗电量占油田总耗电量的 20%~30%,为油田电耗的第 2 位,仅次于注水。游梁式抽油机抽油系统的总效率在国内一般地区平均只有 12%~23%,先进地区至今也不到 30%,由此可见降低抽油系统高能耗的迫切程度与难度。自 1985 年第 1 台异相曲柄平衡游梁抽油机(简称异相机)应用以来,国内各大油田就已开始重视抽油机的节能工作。1991 年双驴头节能型抽油机的问世开创了游梁式抽油机(简称游梁机)节能应用研究工作的新局面,此后不断涌现出各种各样的新型节能抽油机。

目前,各油田普遍采用游梁式抽油机进行石油开采。抽油机在采油的过程中,由于启动负荷大且地下油层出油量不十分稳定,一昼夜周期内的液位变化比较大,工作电动机的负荷是不完全稳定的。为了顺利进行生产,必须按大负荷状态配备电动机,这就导致抽油机的驱动电动机经常处于“大马拉小车”的运行状态,使电动机的工作效率和功率因数明显下降。另外,游梁式抽油机在完成一个抽油周期的过程中,其上冲程和下冲程的负荷也不平衡,并且差别较大。为了改善这种不平衡状态,减小工作电动机的容量,提高工作效率,节约电能,游梁式抽油机都设计有配重悬锤。尽管如此,由于配重悬

锤的配重是固定的,而油井的工况是变化的,再加上配重悬锤机构的机械调整受到现场诸多条件的限制,使抽油机不能完全达到平衡,从而使实际运行中的电动机往往处于两种工作状态,即电动状态和倒发电状态。在电—机—电反复转换的过程中,倒发电既造成了一定的能量损失,又对大网的正常供电造成了一定程度的扰动,同时还使电网与电动机的功率因数再一次降低,从而造成能源浪费。

多年来,全世界各油田在节能降耗与降低生产成本方面投入大量技术力量进行研究。大量用于游梁式抽油机的节能装置投入使用,不同程度地起到了节能的作用。本书力图对游梁式抽油机的节能技术进行较全面的介绍,希望读者能从中受到一定启发。

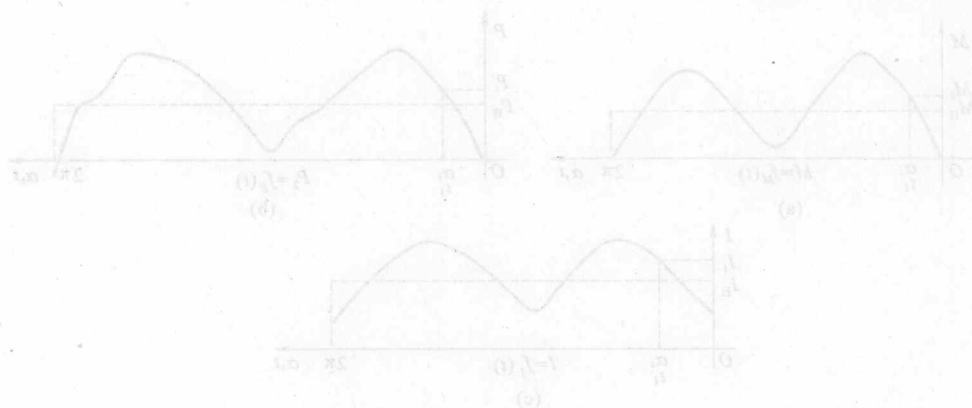


图 2-1 抽油机工作状态与电动机输出功率  $P$ 、转矩  $M$  和速度  $\omega$  的关系

这时需要电动机输出功率  $P$  为:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \Delta t_i$$

$$P = \frac{1}{250} \sqrt{\sum_{i=1}^n M_i^2 \Delta t_i^2}$$

式中:  $n$  为变量个数;  $\Delta t_i$  为第  $i$  个变量  $M_i$  的时间间隔;  $M_i$  为第  $i$  个变量  $M$  的瞬时值。

式中:  $M_i$  为第  $i$  个变量  $M$  的瞬时值;  $\Delta t_i$  为第  $i$  个变量  $M$  的时间间隔。

若上述计算所用的电动机,其输入功率  $P_i$  远小于  $P$ ,则可认为  $P_i \approx P$ 。

而,当电动机功率  $P$  远大于  $P_i$  时,则可认为  $P_i \approx P$ 。

一个电动机功率  $P$  远大于  $P_i$  时,则可认为  $P_i \approx P$ 。

## 第二章 游梁式抽油机的工作特性与节能途径

### 第一节 游梁式抽油机的工作特性

设计性能良好、经过细致平衡、在曲柄轴上没有负扭矩并已进入稳定工作状态的游梁式抽油机的曲柄轴扭矩  $M$ 、电动机输出功率  $P_2$  和电流  $I$  与曲柄轴转角  $\alpha$  (或时间  $t$ ) 的关系如图 2-1 所示。

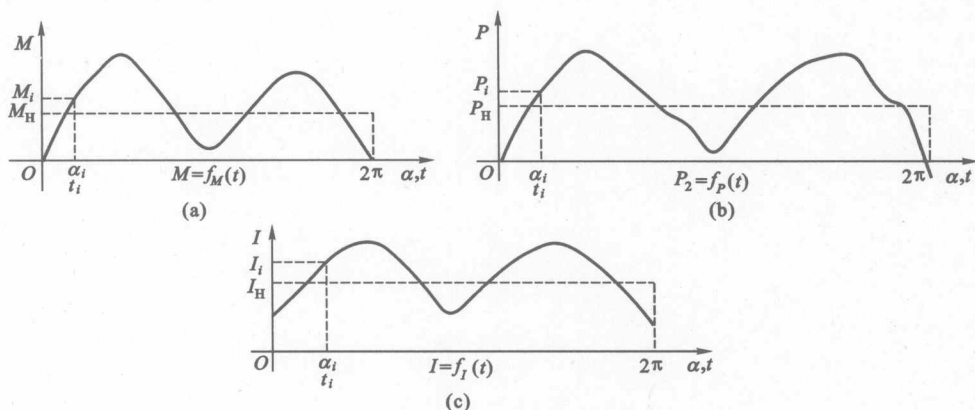


图 2-1 抽油机稳定工作状态下曲柄轴扭矩  $M$ 、电动机输出功率  $P_2$  和电流  $I$  与曲柄轴转角  $\alpha$  的关系

这时游梁式抽油机实际需要的功率  $P_2$  为：

$$P_2 = \sqrt{\sum_i P_i^2 \Delta t_i / T}$$

或

$$P_2 = \frac{n}{9\,550} \sqrt{\sum_i M_i^2 \Delta \alpha_i / (2\pi)}$$

式中,  $P_i$  为  $t_i$  时刻电动机输出功率;  $T$  为一个抽油周期;  $\Delta t_i$  为时间改变量;  $n$  为电动机转速;  $M_i$  为  $\alpha_i$  时的扭矩;  $\Delta \alpha_i$  为转角改变量。

按上述计算选用的电动机,其输入功率  $P_1$  应等于  $P_2 / \eta_2$  ( $\eta_2$  为选定的电动机在输出功率为  $P_2$  时的效率)。游梁式抽油机工作时,施加给电动机的不是波动的负荷,而是一个与上述抽油机平均功耗相同的恒定负荷  $P_H$  (或  $M_H$ ),这时游梁式抽油机实际需

要的功率  $P_{2H}$  为:

$$P_{2H} = P_H = \sum_i^T P_i \Delta t_i / T$$

或

$$P_{2H} = \frac{n}{9\,550} M_H = \frac{n}{9\,550} \sum_i^{2\pi} M_i \Delta \alpha_i / (2\pi) \quad (2-1)$$

相应选用的电动机的输入功率  $P_{1H}$  为:

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_{2H} \quad (2-2)$$

式中,  $\eta_{2H}$  为选定的电动机在输出功率为  $P_{2H}$  时的效率。

根据载荷波动系数  $CLF$  的定义:

$$CLF = \sqrt{\frac{\sum_i^{2\pi} M_i^2 \Delta \alpha_i / (2\pi)}{\sum_i^{2\pi} M_i \Delta \alpha_i / (2\pi)}} \quad (2-3)$$

可得:

$$P_1 = P_{1H} CLF \eta_{2H} / \eta_2 \quad (2-4)$$

由此可见,游梁式抽油机载荷的变动特性与按恒定载荷设计制造的普通电动机工作特性不匹配,使电动机输入功率增加,其增加量与载荷波动系数成正比。对于井上使用的游梁式抽油机,即使设计性能良好,也很少完全工作在设计工况下,其载荷多有异常剧烈变动(如停车再启动),载荷波动系数大于预期值,甚至在平衡不当时,每周内还会出现负扭矩(见图 2-2)而使电动机处于“倒发电”运行状态(见图 2-2 中阴影部分)。

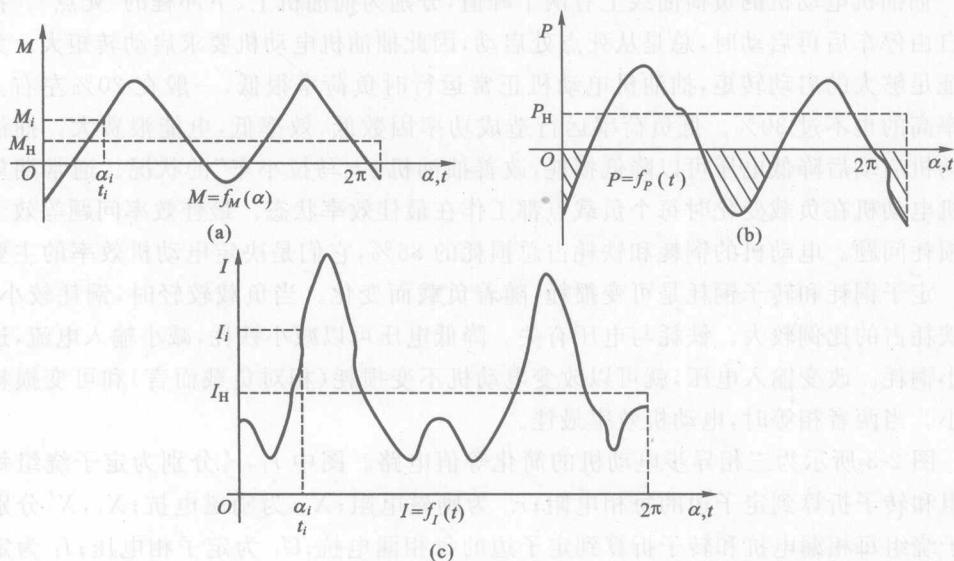


图 2-2 抽油机载荷波动状态下曲柄轴扭矩  $M$ 、电动机功率  $P$  和电流  $I$  与曲柄轴转角  $\alpha$  的关系

这种状态是极为不良的工作状态。这时,在电网与电动机间会出现能量储存和相互交换传输,大幅度降低电网功率因数,甚至恶化电网品质,使普通电动机的综合损耗突然增大,使游梁式抽油机的效率降低,并使其能耗随载荷波动系数的增大而变得更为显著。

## 第二节 游梁式抽油机效率低的主要原因与节能途径

### 一、游梁式抽油机效率低的主要原因

游梁式抽油机效率低的主要原因是动力机与工作机不匹配。不含动力装置的游梁式抽油机主体,其传动效率一般为 81.4%~88.5%;与其配套的通用电动机的效率可达 91%~92.5%。将两者配套使用时的效率却很低,本质原因在于游梁式抽油机带有周期性交变载荷,而通用电动机则是按恒定负荷设计制造的。两者的工作特性不匹配,造成了效率低下。

### 二、提高游梁式抽油机效率的途径

为了提高游梁式抽油机的工作效率,人们作了大量的工作,总结起来就是使工作载荷与动力机特性相互匹配。为此,有的新技术从载荷出发,通过加平衡块、惯性轮、弹簧等储能装置,调整负荷接近恒定负荷,使其与恒定输出的电动机特性一致,达到节能的目的;有的新技术从电动机出发,通过调制电动机的输入电压、频率,使其输出功率具有波动性,与具有波动性载荷的特性相一致,从而达到节能的目的。

抽油机电机的负荷曲线上有两个峰值,分别为抽油机上、下冲程的“死点”。抽油机自由停车后再启动时,总是从死点处启动,因此抽油机电机要求启动转矩大。为了保证足够大的启动转矩,抽油机电机正常运行时负荷率很低,一般在 20% 左右。负荷率高的也不过 30%。低负荷率运行造成功率因数低,效率低,电能浪费大。抽油机电机启动后降低电压可以降低损耗,改善抽油机“大马拉小车”的状况。通常期望抽油机电机在负载变化时每个负载点都工作在最佳效率状态。最佳效率问题等效于最小损耗问题。电动机的铜耗和铁耗占总损耗的 86%,它们是决定电动机效率的主要因素。定子铜耗和转子铜耗是可变损耗,随着负载而变化。当负载较轻时,铜耗较小,此时铁耗占的比例较大。铁耗与电压有关。降低电压可以减小铁耗,减小输入电流,进而减小铜耗。改变输入电压,就可以改变电动机不变损耗(相对负载而言)和可变损耗的大小。当两者相等时,电动机效率最佳。

图 2-3 所示为三相异步电动机的简化等值电路。图中  $r_1, r_2'$  分别为定子绕组每相电阻和转子折算到定子边的每相电阻; $r_m$  为励磁电阻; $X_m$  为励磁电抗; $X_1, X_2'$  分别为定子绕组每相漏电抗和转子折算到定子边的每相漏电抗; $U_1$  为定子相电压; $I_1$  为定子相电流; $I_2'$  为转子电流折算值; $S$  为电动机转差率。

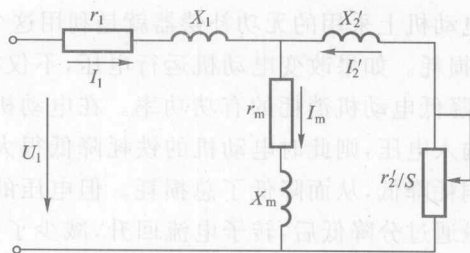


图 2-3 三相异步电动机的简化等值电路

忽略杂散损耗和机械损耗,电动机的总损耗可近似表示  $\Delta P$  为:

$$\Delta P = P_{Cu} + P_{Fe} = U_1^2 \left| K_1 + \frac{K_2}{f} \right| + 3(r_1 + r_2') I_2'^2 = U_1^2 \left| K_1 + \frac{K_2}{f} \right| + (r + r_2') \frac{\omega_0^2 T^2}{3U_1^2} \quad (2-5)$$

式中,  $P_{Cu}$ ,  $P_{Fe}$  分别为铜耗和铁耗;  $f$  为定子电流频率;  $K_1$ ,  $K_2$  分别为与磁滞损耗和涡流损耗有关的常数;  $T$  为电动机的负载转矩;  $\omega_0$  为同步角速度。

对上式取微分,并令其为零,则电动机总损耗最小时的电压  $U_1$  为:

$$U_1 = \sqrt{\frac{(r + r_2') \omega_0}{3 \left( K_1 + \frac{K_2}{f} \right)}} \times \sqrt{T} \quad (2-6)$$

由上式可以看出,当负载转矩  $T$  变化时,电动机电压应与  $T$  成正比。当电压变化时,电动机铜耗随电压增加而降低,铁耗随电动机电压增加而增加。对于一定的负载,存在一个最优电压值,在此电压下电动机总损耗最小,效率最高。

基于以上原理,技术人员研究了一系列跟踪负荷调节输入电压的技术。

### 1. Y- $\Delta$ 转换调压技术

常用抽油机电动机的功率一般为 7.5~75 kW。普通 Y 系列异步电动机的定子绕组接法为三角形。抽油机要求启动转矩大,启动时定子绕组接成三角形;抽油机启动后正常工作时,将每相绕组分成两部分,接成延边三角形,即 Y- $\Delta$ 混合绕组,可降低相电压及输入功率,达到节能目的。该方法较好地解决了电动机启动与正常运行负荷变动大的矛盾,但不能较好地解决正常运行期间一个冲次内负荷变动引起的能量损耗问题。

### 2. 可控硅调压技术

利用可控硅技术的典型装置是 PSEC 型抽油机节能控制器。该装置采用了双向反并联可控硅进行控制的三相交流调压技术,随抽油机的交变载荷变化而跟踪调压。电动机的无功功率  $Q$  为:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2-7)$$

式中,  $U$  为电动机端电压平均值;  $I$  为电动机电流平均值;  $\varphi$  为电压、电流波形间的相位角,即功率因数角。

如果使电动机电流相位前移,使之与电压同步,就可以减少无功功率,提高功率因

数。目前,油田抽油机电动机上采用的无功补偿器就是利用这个原理,但这种补偿装置不能节省电动机的有功损耗。如果改变电动机运行电压,不仅能减少电动机的无功功率、提高功率因数,还能降低电动机消耗的有功功率。在电动机轻载运行时,采用调压技术,适当降低电动机输入电压,则此时电动机的铁耗降低很大,励磁电流也因磁通的减少而下降,此时定子铜耗降低,从而降低了总损耗。但电压的降低不能过多,因为产生轻载转矩,当电压和磁通过分降低后,转子电流回升,减少了定子和转子铜耗的降低程度(定子和转子的铜耗与电流的平方成正比),甚至反而使它们增大。此外,过分降低电压会造成电动机不能运转而堵转。

PSEC 型抽油机节能控制器随抽油机载荷的变化而连续跟踪调压,节能过程贯穿于抽油机工作的整个冲程。调压基本原理如下:

为说明调压电路中晶闸管的控制角和电动机负载变化之间的关系,选择单相调压控制过程来加以分析(见图 2-4)。

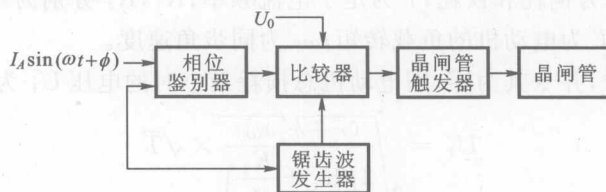


图 2-4 控制器单相调压控制电路

抽油机电动机的端电压与电流之间的相位角是随抽油机负载的变化而变化的。负载越轻,相位角就越大;负载越重,相位角就越小。相位角的大小表明了电动机功率因数的高低。从图 2-4 可看出,不断地检测电动机的电压与电流的相位角,经比较、放大,然后由单片机发出指令,以相应大小的导通角去触发晶闸管导通。把检测到的电动机电压与电流之间的相位差变化作为控制信号去控制晶闸管的导通角,从而改变电动机的工作电压,使电动机在空载或轻载时的工作电压低于额定电压,达到节能目的。可控硅触发跟踪调压式节能控制器的电路简单,易于实现,并具有软启动及多种保护功能,加上电压、电流波形的非正弦所引起的谐波电压和谐波电流幅值远小于国标中所规定的限值,制作成本较低,因此适于在油田抽油机井上大量推广应用。该技术没有改变电动机倒发电向电网反馈能量的状况,没有提高电网的功率因数。

### 3. 变频调压技术

由式(2-5)可知,电动机铜耗随电压增加而降低、铁耗随电压增加而增加,因此跟踪负荷调压是有限度的。由式(2-6)可知,对于一定的负荷,不仅可以通过调压实现效率优化,也可以通过调频达到效率优化。相比单纯调压控制,变频调压控制的硬件成本要高一些,控制要复杂一些,但是变频调压控制除节能外还有单纯调压控制节能所不具备的优势。例如,可以通过调节频率改变抽油机的冲次来适应油井的工况。采油作业区一般通过更换电动机的皮带轮或更换电动机(六级、八级)来改变冲次,这种方法工作量