

Research on Real-time Dynamic Analysis of the System for Pumping Wells

Xie Xiong (Oil & Gas Field Development Engineering)

Directed by Vice Prof. Fan Ling

Abstract

One of the most important processes in current oil production is the pumping method, whose working conditions will directly influence the productivity of the oilfield. In order to enhance the crude oil production, lower the working stress of workers and improve working efficiency and the oil field management levels, this paper based on the GPRS communication technology, puts forward and designed the real-time dynamic analysis system of pumping wells, which can be used to collect and transfer the working conditions of pumping system, draw the dynamometer cards, and monitor the pumping system all the time. Mainly through the direct torque control (DTC) technology, this system can estimate the electromagnetic torque and rotor speed by using electromagnetic torque equation of motors and dynamically estimating speed methods, just needing to measure the voltage and current signals. Then we can calculate the output torque of the motors. According to the power transmitting process and the equilibrium principle of the reducing gearbox, we could calculate the net torque of the reducing gear box and the load torque of the well. Finally, we can use the torque factor of the pumping units to obtain the polished rod load and draw the indicator diagram by connecting polished rod load and rod motion. This system mainly contains three parts: the remote detection terminal unit of pumping, the remote data transmission unit of GPRS, and the data processing unit of monitoring center. The remote detection terminal unit is mainly used to transmit, receive and process the data and control the pumping unit. With the embedded ARM CPU as the core, it could realize the design of the software and the hardware of the well pumping unit's data collection, process the circuit of sensor and signals, and the module of the remote data transmission unit of GPRS. Using the GPRS communication unit, the remote data transfer unit of GPRS can transmission data and be responsible for the communication between terminal detection and monitor center. With the application of Visual C++ and Matlab, the data processing unit of monitoring center can be used for noise-suppressed processing of the signals by the wavelet analysis technology. Then we can

get the working conditions of the engine by referring to the DTC, and obtain the indicator diagram by the dynamic and kinetic model. Finally, we can analyze the signals with spectrum analysis technology. Through the practical measure of the experimental data of the Oilfield of Da Gang, the dynamic real-time analysis system of pumping system can precisely reflect the working conditions of pumping unit. And with the fact that we just need to install the sensors used to monitor voltage, current, upper and bottom dead position, pulley speed, the installing process is simple and can be suitable to the harsh conditions of the oilfield, and can monitor the dynamic real-time process of pumping units.

Key words: The monitoring of pumping unit, Dynamometer cards, Direct torque control, Wavelet de-noising, Frequency spectrum analysis

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：谢雄

日期：2009 年 5 月 10 日

学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：谢雄

日期：2009 年 5 月 10 日

指导教师签名：赵书灵

日期：2009 年 5 月 10 日

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景

作为现代生活中不可取代的动力能源和化工原料,石油是现代社会经济的基石,是工业文明时代最具战略意义的重要商品,在现代国际政治、经济中具有重要地位。此外,石油在世界金融体系中也扮演着至关重要的角色,堪称“黑色的液体黄金”^[1]。

在2010年初期,中国的常规石油产量估计会达到390万桶/日的高峰,随后开始下降。因此,中国的石油净进口量将从2006年的350万桶/日增长到2030年的1310万桶/日,而净进口在总需求中的比例将从50%上升到80%^[2]。因此,我国的能源安全形势非常严峻。

自2004年国际原油价格快速上升,从当时30美元/桶一路上升到2008年7月份的接近150美元/桶。然而,随着美国次贷危机的加重,经济危机开始影响实体经济,2008年12月国际原油期货价格跌破40美元/桶。由于预测当前的经济危机不会很快结束,因此,预测油价会在低价位波动,低的油价要求各个石油公司对生产成本进行严格的控制。

我国的油田中,杆式抽油方法是应用最广泛的一种采油法。杆式抽油机的抽油泵工作在井下数千米位置。由于工作状况恶劣,杆式抽油机在工作中,不但受到机、杆、泵抽油设备的影响,而且还直接受到砂、蜡、气、水的影响,会产生各种各样的故障,甚至会多个故障一起发生,严重影响了油田的正常生产。

据有关资料统计,目前全国有9万多口井,其中常规抽油机占80%以上,耗电量占油田油气生产总耗电量的30%左右。其系统效率一般不足30%,有些甚至在5%以下。按最新资料统计,国内有杆抽油的系统效率以大庆油田为最高,达30%,胜利油田为24%,也就是说整个系统工作过程中有70%以上的能量做了无用功,造成了大量的浪费。以1口井为例,系统效率为20%,油井抽油实际用功率10kw,系统效率提高1个百分点,每天节电约220kw·h,全年节电 8×10^4 kw·h^[3],因此,对抽油机井进行实时监测,及时准确地发现出现异常的油井,对经济效益不好的抽油机井远程遥控进行关停,以节省电力成本。

目前,油田上分析抽油机井深井泵工况时,广泛采用实测示功图分析方法。

实测示功图可以反映出深井泵在井下工作中的异常现象,可结合地质情况和利用生产数据、仪器工作状况,来分析解释抽油机的工作制度是否合理,机、杆、泵、参数组

合是否与油井相适应。实测示功图经过诊断技术处理,可以找出影响油井泵效或不出油的原因,然后根据本油田采油工艺技术的配套措施来解决生产问题。

实测示功图其优点是:简便、直观、迅速、可靠。但是,由于油田油井数量多且分布范围由几十至上百平方公里,分布比较零散,且油区道路交通条件差。人工每日定时检查设备运行情况并记录采油数据,用动力仪完成示功图的绘制,但只能是一次测一口井,测量时需要停机安装动力仪,结果往往使得实测示功图不能很好地反映深井泵的实际工况,而且费时费力,影响抽油机井的产量。这种方式不但受天气和距离的限制,也必然增加工人劳动强度,并且影响了设备监控与采油数据的实时性,甚至准确性。当抽油机深井泵出现故障时不能及时发现,得不到有效检测、防患和监控。

早在上世纪六十年代,我国即开始了对抽油机远程监控系统的研究和开发,国内先后有数十家企业涉足过此类系统的研究工作,有不少油田的一些区块安装过远程监控系统,但在实际应用中由于种种技术问题也遇到过许多障碍,抽油机远程监控系统的研究开发工作进展缓慢,由于多种技术原因,国内还没有一套很好的油田远程监控系统诞生。虽然目前有多家企业涉足此类远程监控系统的研究,但都刚刚起步,总有不尽如人意的地方^[4]。国外油田生产自动化监测技术虽然达到了很高的水平,监测系统的功能也十分完善,但很多功能不符合我国目前的油田管理的实际状况,且价格十分昂贵。

1.2 课题研究的必要性

应用电机直接转矩控制技术和 GPRS 无线通信技术,设计抽油机井系统动态实时分析系统,可以充分克服人工数据采集中的弊端,实现数据的实时连续采集,并且采集的数据不受地域与环境的限制,通过采集的数据分析抽油机井的工作状态、及时诊断并处理抽油机井的各种故障。

(1) 可降低工人劳动强度,提高生产率。传统的数据采集方法,工作量大而繁重,费用高,特别是在雨雪天气,有些油井无法采集数据,严重影响生产分析。采用远程实时监控系统,数据采集只需室内查看,大大降低工人的劳动强度,同时可减少冗余人员,利于降低生产成本,增加油田企业效益。

(2) 便于采集生产数据,利于科学决策。油井管理中的大量生产数据全靠人工采集,耗费大量的人力和物力,而数据的准确性则因数据采集人员的工作责任心而异。人工采集数据,每口井一般每天只测一次工作参数,为了诊断井下工作情况,一般每口井一个月要停机测试一次示功图,费时费力而且数据量小,难以及时、准确、全面直观、

高效、连续地反映生产动态。实现实时远程监控系统可快速测试并长期保存大量工作数据，并以此为依据进行科学的生产分析，为决策提供可靠论据。各级管理部门可随时掌握一线的生产情况，真正做到运筹帷幄之中，决胜千里之外。

(3) 油田油井一般都很分散，分布范围广，地区偏远。对油井出现的异常情况不能及时发现、及时采取措施，从而导致原油产量降低，设备使用寿命减短，能耗增加，有时甚至会造成严重的经济损失，降低了经济效益。通过抽油机井系统动态实时分析系统，便于及时发现问题，提高工作效率。实现抽油机的远程监控，可以及时发现各种抽油机井故障，如抽油杆断裂、不正常停机、油管泄漏、液量不足等情况，可以减少或避免油井故障，减少经济损失。

(4) 人工采集的数据为非连续性数据，对油井的真实工作状况无法准确地掌握，导致对油井的诊断时间拖得很长，而降低生产效率，增加了采油成本。通过抽油机井系统动态实时分析系统，可以实时连续地获得抽油机井的工况参数。

(5) 通过抽油机井系统动态实时分析系统，对抽油机进行远程监控，并对所有的油井进行现代化的网络管理。

总之，采用抽油机井系统动态实时分析系统后，可以极大地提高生产运行管理的安全性能和可靠程度，实现油井管理的自动化、提高工作效率、保证数据采集的准确性和及时性，减少不必要的人工浪费，提高生产效率，通过生产过程的集中监控和管理还可极大地提高企业整体的竞争能力，提高预测突发事件的能力和紧急情况下快速反应能力，带来潜在的社会和经济效益^{[4][5]}。

1.3 国内外研究现状

抽油机井示功图是了解井下采油泵工作状况的一个重要技术，是抽油机井管理的一个重要手段。目前示功图分为地面和井下示功图的测量，地面示功图利用各种方法获得光杆位移变化一个完整周期内载荷和位移数据，并绘制光杆载荷和光杆位移关系曲线，即光杆示功图，然后对光杆示功图进行分析，判断油井和设备故障。井下示功图诊断法是将井下示功仪和抽油泵一起下到油井中，直接测量抽油泵的示功图，这样可以消除不确定因素给油井分析带来的困难，可以直接获得抽油泵工作状态的资料，掌握抽油泵的实际工作状况。虽然这种方法可以直接获得泵的示功图，但是，施工比较复杂，费用较高，因此一直没有推广使用。

示功图的测试最早是靠液压传动的机械装置动力仪，20 世纪 70 年代出现了处理模

拟电信号的示功仪，20 世纪 80 年代中期出现的第一代 YBC 抽油机井示功图测试仪，采用的是 8086 系列的计算机作为采集器，20 世纪 90 年代，YBC 经历了从 80386 的掌上计算机，到采用 PC104 嵌入式工控机作为采集器，具有运行速度快、功能完善等特点。目前国内外开发了多种抽油机远程监测控制系统，目前已经研制的相关设备有俄罗斯西姆技术创新公司研制 SID2-DOS 自动示功仪、北京烽火石油科技的 YBC 无线式抽油机诊断仪、北京玛斯莱特公司研制的无线示功仪、华北石油新科技技术开发有限公司的 HiBiT 油井监控系统和无线网络示功仪等^{[6][7]}。

在地面示功图的测量中，除了光杆的测量外，还可以通过油管受力图转化法以及通过测量减速箱的输出轴扭矩、电机的输出功率、电机的转速、电机的输出转矩等参数，然后通过数学模型公式推导来间接获得地面示功图。

（1）光杆测量法

该方法是利用光杆示功仪采集光杆位移变化一个完整周期内载荷和位移数据，并绘制光杆载荷和光杆位移关系曲线，由于光杆示功仪操作简单，使用方便，至今仍在许多国家得到广泛的使用。随着油田自动化程度的提高，目前通过在光杆和驴头上加装载荷和位移传感器，使之能自动测量载荷和位移^[8-11]。光杆测量法在我国的大部分油田中，使用最多的也是这种方法，但这种方法需要在抽油杆或悬点上安装载荷传感器，每时每刻都受到应力的作用，易老化、使用寿命短，以及人为破坏严重等限制，因此没有很好的应用效果。

（2）减速箱输出轴扭矩法

悬点载荷与减速箱输出轴的输出扭矩之间存在着一定的关系，如能获得减速箱输出扭矩，则可通过数学方法推出示功图。由于抽油机减速箱曲柄轴特定的安装和工作方式决定了其采用一般的常规测量方法只能测得减速箱曲柄轴的平均扭矩，如现在所采用的通过直接测量其它电参数，再通过各种公式计算间接获得减速箱曲柄轴扭矩，故目前在抽油机工作状态下减速箱的输出扭矩的测量并不是很精确，很难真实、准确地反映抽油机减速箱曲柄轴扭矩的动态工作情况。2003 年邱小锋、丁建林、刘先刚等应用电阻应变测量技术获得了减速箱输出扭矩^[12]，2003 年付路长利用遥测应变技术对减速箱输出扭矩进行瞬时的连续测量^[13]。

（3）电机功率曲线转化法

利用电机功率曲线预测抽油机井示功图时，关键是找出抽油机悬点载荷与电机输出轴功率之间的关系。根据扭矩系数法，如果忽略抽油机结构不平衡重随曲柄转角改变而

发生的变化、各运动部件的惯性力和轴承之间的摩擦影响,则悬点载荷与曲柄轴净扭矩之间是线性关系,而电机功率与曲柄轴净扭矩之间也是线性关系,因此通过电机功率曲线就可以得出示功图。1991 年李虎君、张继芬、支连友利用电机功率曲线法间接获得示功图^[14]。1992 年李虎君、李英、龙黔胜等利用实测功率曲线计算前置式抽油机井的示功图^[15]。由于油田中抽油机井的有功功率普遍不高,因此通过测试电机的输入功率,然后导出抽油机井的示功图与实测示功图之间的误差就会很大^[16]。

(4) 功率损耗转化法

在电机功率曲线转化法中,由于根据功率曲线与抽油机的尺寸的关系求解示功图时,每口井的抽油机几何尺寸数据不容易获得,并且尺寸误差对结果影响很大,因此,可以采用一组已知的示功图与功率曲线图计算功率损耗来推测其它时间的示功图。2004 年张世荣、李昌禧提出了通过同步点信号来获取抽油机电机功率与光杆位移对应关系的方法来间接测量示功图^[17]。由于油井泵工况变化,载荷在不断变化,事实上,损耗功率也是不断变化的,该方法假定系统的损耗功率不变显然是不正确的。只有油井工况不变时,油井损耗功率不发生变化,才有可能转化出与实际比较相符合的示功图^[16]。

(5) 油管受力图转化法

油管受力图转化法,采用从油管悬挂器以下测取油管受力图对井下泵的工况进行分析,认为利用油管受力图可以反映井下泵的工况特性。油管受力图转化法主要原理是根据上冲程时液柱载荷作用在活塞上时,抽油杆柱受力而伸长;下冲程时液柱载荷作用在固定凡尔上时,油管柱受力而伸长。液柱载荷转移时,相应地抽油杆柱或油管柱便缩短或伸长,这种载荷交替出现造成的杆、管柱的长度变化即造成了冲程损失。若将油管柱受力过程按时间展开或按光杆位移展开,则可得到油管上所承受的液柱载荷与时间的关系曲线或与光杆位移的关系曲线,这些曲线反映出液柱载荷周期出现在油管上的规律。2000 年陈镭利用油管受力图转化法间接获得示功图^[18]。通过研究可以知道,油管上反映出的载荷与光杆位移间的对应关系,很难正确反映悬点载荷的变化。通过油管受力图来判断油井工况,与直接通过示功图判断油井工况相比,其实施过程复杂,维修困难,而且通过油管受力图来判断油井工况其理论基础不强,并且油田现场工作人员实践较少,容易产生误差,给生产带来了许多不便^[16]。

(6) 电机转速法

1987 年 S.G.Gibbs 在 SPE 上发表的一篇文章《Utility of Motor-Speed Measurements in Pumping-Well Analysis and Control》,详细地介绍了如何通过测量电机的转速,推断出减

速箱扭矩、抽油机平衡、电机负载、示功图、电机功耗^[19]。在文章中电机转速是通过安装在输出轴上的具有霍耳效应的电磁传感器采集的,电磁传感器造价高,不易安装,在油区恶劣的自然环境和治安条件下,容易遭到破坏。

(7) 电机直接转矩控制转化法

1985 年,德国的 M.Dепенbrock 教授提出了直接转矩控制方法^[20],该方法存在电压、电流波形畸变比较严重、低速时转矩脉动较大等缺点,日本学者 I.Takahashi 则提出了直接转矩控制的另一种形式—磁链轨迹的圆形方案^[21]。直接转矩控制方法用空间矢量的分析方法,简单地通过检测到的定子电压和电流,直接在定子坐标系下计算电机的磁链和转矩。2007 年万小东、廖勇、何志明结合异步电动机动态速度估算、电磁转矩方程和可编程低通滤波器观测磁链,实现了无速度、无扭矩传感器的异步电动机转速和转矩的估算^[22]。2008 年何志明、廖勇、陈建在异步电机动态速度估计方法和电磁转矩方程基础上,采用校正补偿方法实现了异步电机转速和转矩的高精度估计^[23]。

1.4 课题研究的主要内容

本课题通过电机直接转矩控制(DTC)理论,通过直接测量电机的电流、电压信号,利用异步电动机的电磁转矩方程和速度动态估算方法实现对电磁转矩和转子转速估算,计算出电机的输出扭矩,根据动力传递过程和减速箱的平衡原理,计算出减速箱的净扭矩、油井负荷扭矩,根据抽油机的扭矩因数,得到悬点载荷,再把悬点载荷与悬点位移联系起来,间接绘制抽油机井的示功图,从而可以使用目前比较成熟的示功图分析和诊断技术对抽油机井的工况进行分析,并且通过对减速箱输出轴净扭矩曲线进行频谱分析可以发现一些细节变化,这些细节是通过示功图所不能发现的,而这些细节暗示着抽油机井的某种工况。通过 GPRS 远程传输所测量电机的电参数,监控中心足不出户就可以获得抽油机井的实时动态工况,远程控制抽油机井。

本课题在研究过程中,拟采取理论研究和油田现场实验的方法开展相应的研究工作。理论研究中主要是对各种常用抽油机的运动规律、抽油机四连杆机构的能量传递过程以及曲柄轴输出扭矩与悬点载荷、位移的关系等抽油机运动学和动力学进行研究。通过在大港油田现场测量获得抽油机井的工况参数,对理论模型进行评估和修正。

本课题研究的主要内容为:

(1) 研究电机直接转矩控制理论,研究电机的数学模型,通过异步电动机的电磁转矩方程和速度动态估算方法获得电磁转矩和转子转速估算,推导有功功率、无功功率、

功率因数、电磁功率、电机效率等。

(2) 掌握硬件电路设计方法,通过电压电流传感器测量抽油机电机电参数;利用接近开关传感器测量减速箱皮带轮转速以及抽油机的上、下死点;掌握 GPRS 无线传输技术,通过 GPRS 硬件无线传输模块把所测量的数据无线传送给监控中心。

(3) 研究各种电机-减速箱之间的传动方式,增加减速箱皮带轮转速测量模块,防止皮带轮打滑,建立电机输出扭矩到减速箱输出轴扭矩之间的数学模型。

(4) 由于抽油机种类繁多,不同的抽油机其运动规律不同,因此,研究实验中所用到的两种抽油机(常规型和双驴头型)的运动学和动力学,包括悬点的位移、速度、加速度以及减速箱输出轴的扭矩与曲柄转角的关系,通过曲柄轴扭矩反推悬点载荷,进行示功图的绘制,利用现有的示功图分析技术对抽油机井工况进行分析。

(5) 研究小波分析去噪的理论方法,利用 Matlab 提供的小波分析工具箱对所获得的电机参数使用小波分析滤波技术去除噪声等干扰。

(6) 研究频谱分析方法,对减速箱输出轴净扭矩曲线进行频谱分析,找出各种工况的特征谱图,并能通过分析对比不同时间的频谱图,自动判断抽油机井的工况是否改变。

本课题研究的内容大致可分为五个阶段:前期调研、方案论证与系统设计、系统开发和实现、现场实验、数据分析。围绕以上研究内容,本文总分为六章,除了第一章绪论外,其余各章节的内容及关键技术如下:

(1) 第二章首先介绍抽油机井系统动态实时分析系统的总体设计思想,包括系统的功能要求、系统的组成和结构以及系统的工作过程。

(2) 第三章详细介绍系统远程检测终端数据采集模块电路的软、硬件设计。其中包括各种芯片的选择,测量的原理以及最关键的电机直接转矩控制原理和电机工况参数的算法,最后介绍了 GPRG 无线传输模块的设计。

(3) 第四章研究实验中所用到的两种抽油机(常规型和双驴头型)的运动学和动力学。由于系统只是测量电机的电压和电流参数,推算出电机的输出扭矩。如何通过电机输出扭矩获得示功图,需要研究不同抽油机的运动规律,建立由电机通过皮带轮把扭矩传递给减速箱开始到最后的悬点位移之间一系列的运动过程。在这一章中详细研究了常规后置式以及双驴头抽油机的运动学和动力学。

(4) 第五章分别介绍小波分析在信号去噪中的应用以及信号的频谱分析,在第六章的结果分析中,要用到小波分析的理论,结合 Matlab 提供的小波分析工具箱,对所

采集的数据进行去噪，同样，利用 Matlab 所提供的信号分析工具箱，对所获得的减速箱净扭矩曲线进行频谱分析，找出各种工况的特征谱图，并判断抽油机井的工况是否改变。

（5）第六章是本论文的核心部分——实验及结果分析。通过第三章所介绍的远程检测终端数据采集模块所获得的数据，首先利用第五章所介绍的小波分析技术，对信号进行滤波去噪，然后根据第四章抽油机的运动学和动力学所研究的方法以及这口井的抽油机基础参数，推算出示功图，然后利用 Matlab 所提供的频谱函数对所获得的信号进行频谱分析，找出特征谱图。在这一章中所有的工作都是基于 Visual C++与 Matlab 的混合编程，结合 Visual C++强大的图形界面编程能力和 Matlab 强大的数值处理分析能力和功能完善的算法工具，实现了系统的高效开发。

第二章 系统的总体设计

2.1 系统的设计原则

油田企业非常重视现场的安全正常生产,由于本系统的数据采集模块安装在现场的抽油设备上,因此,根据油田现场生产的实际情况,本课题中按下列原则进行了总体设计^[24]:

(1) 可靠性

抽油机井系统动态实时分析系统要求长期运行情况下的稳定性、可靠性。远程数据采集终端、现场仪表等采用高可靠的器件;采取一定的抗干扰设施,具有良好的接地、电磁屏蔽措施;采取可靠的施工工艺,确保人为故障率降到最低。并且确保在系统发生故障时,不会影响到油井的正常生产。

(2) 可扩充性

油田企业为了满足生产的需要,经常对油田的生产进行调整,如增加新的油井、计量站等,为方便以后系统的扩展,系统留有扩展余地。

(3) 易管理性和易操作性

系统应具有友好的人机操作界面,系统的参数设置和调整应直观和简单。

(4) 调试和维护简便

可实现远程调试、远程修改参数;现场的各个测量模块可实现单元测试功能,方便维护。

(5) 模块化结构设计

硬件系统应实现模块化结构,使系统配置灵活、紧凑简便,易于升级、维护。当某一个模块出现故障时,可以只更换这个模块,不用更换整个硬件系统。

2.2 系统的功能要求

抽油井系统动态实时分析系统是对抽油机井进行集中监控和自动管理的专用数据系统。系统由监控中心、抽油机远程检测终端和 GPRS 无线通讯模块组成。抽油机远程检测终端安装在抽油机井上,可完成数据的采集、传送、状态反馈、故障报警和应急处理等,其数据通过 GPRS 无线通讯模块上传到监控中心。监控中心可根据情况设在采油厂、采油队或油田信息中心,一般情况下在各采油队设立监控中心,完成对现场各类信息的接收、分类、显示和储存。

抽油机井系统动态实时分析系统主要完成如下几个方面的功能:

- (1) 数据检测功能: 自动监测、记录抽油机电机的电压、电流、电机轴转速, 减速箱皮带轮转速等数据;
- (2) 数据共享功能: 所测数据以及抽油机设备的工作状态可以传输到油田局域网上, 实现多方远程数据共享;
- (3) 显示功能: 对抽油机井的采集数据进行实时分析显示、历史分析显示, 显示各口井的电参数图、示功图、扭矩曲线图、频谱分析图等;
- (4) 辅助分析功能: 对所采集的数据进行分析, 及时发现停电、电机缺相、油管堵塞、液面过低等各种异常工况;
- (5) 通讯功能: 具有有线上位机模式和 GPRS 无线远程通讯功能;
- (6) 时钟及校时: 具有时钟显示, 并可远程校时, 日误差小于 1 秒;
- (7) 参数设置和修改: 通过 RS232 接口或者 GPRS 无线远程进行参数设置和修改;
- (8) 权限设置功能: 权限设置分一般操作员、管理员、超级系统管理三种, 利用用户名和密码加以限制。

2.3 系统的组成和结构

抽油机井系统动态实时分析系统采用集散分布式监控系统模式, 由三部分组成: 抽油机远程检测终端单元、GPRS 远程传输数据单元、监控中心数据处理单元。结构如图 2-1 所示。

(1) 抽油机远程检测终端单元

此单元装置安装在电机控制柜内, 用于采集抽油机电动机的线电压、线电流; 检测电机轴转速, 减速箱皮带轮转速, 为电机计算转速提供参考, 同时可判断抽油机皮带轮是否打滑; 检测游梁式抽油机的上、下死点; 同时接受通信指令, 实现遥控功能。一旦出现异常情况立即通过发送 GSM 短消息或 GPRS 信息向指定的维护人员手机和监控中心报警。远程检测终端单元与监控中心之间通过 GSM/GPRS 网络连接, 所以远程检测终端单元必须提供一定的通信接口, 也就是一个 GPRS Modem。远程检测终端单元完成检测控制功能的系统也必须是一个多任务的系统。

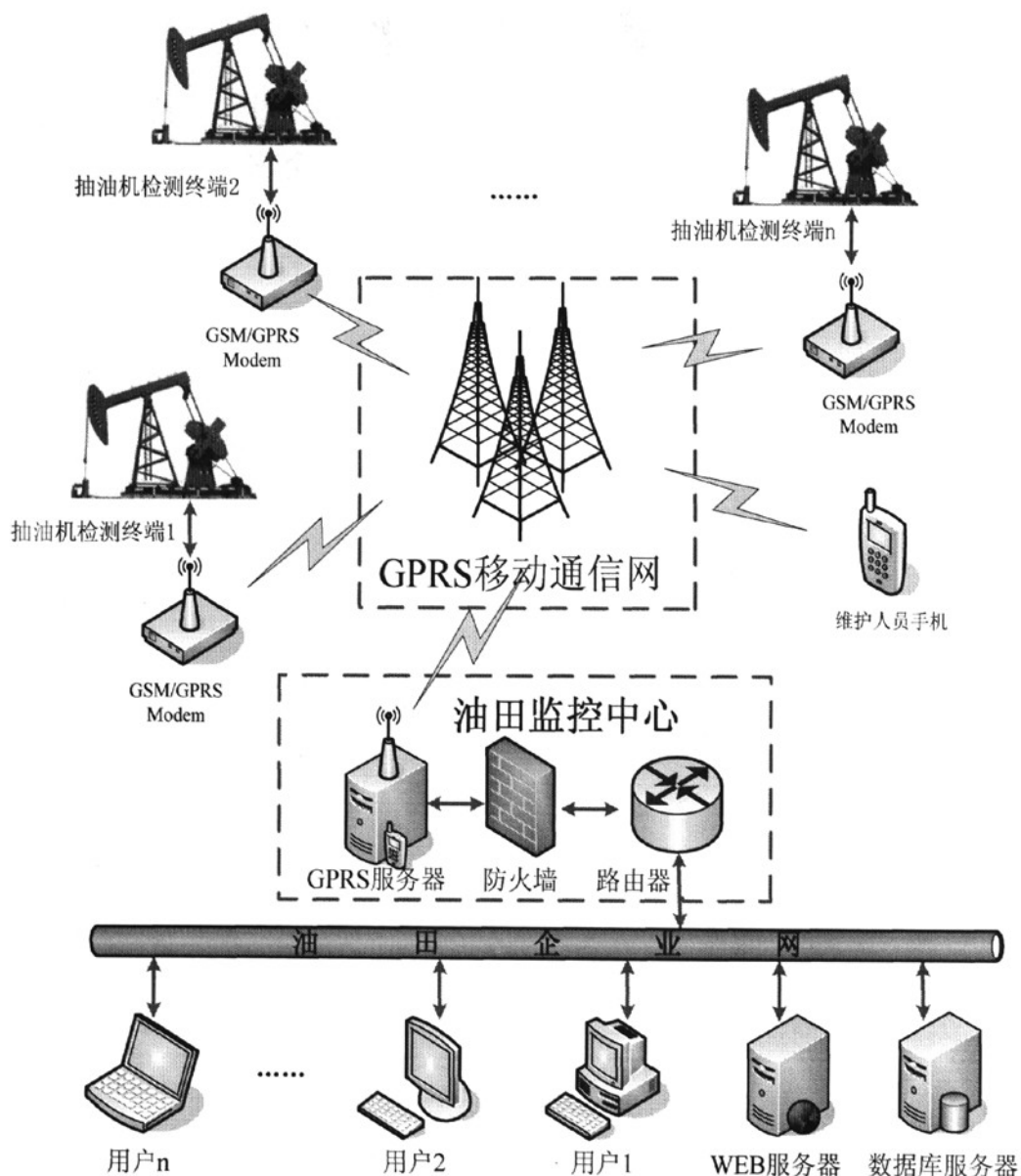


图 2-1 系统结构图

Fig2-1 System construction drawing

(2) GPRS 远程传输数据单元

由于油井大量分布在野外，为了实现抽油机井工况的实时分析，不可能通过传统的人工采集的方法去现场测量。因此，在本系统中，抽油机远程检测终端单元所采集的数据，利用 GPRS 硬件模块，通过中国移动公司所提供的 GPRS 服务，远程传输给油田监控中心。

GPRS 是通用分组无线业务（General Packet Radio Service）的英文简称，是在现有

GSM 系统上发展出来的一种新的承载业务,目的是为 GSM 用户提供分组形式的数据业务。GPRS 允许用户在端到端分组转移模式下发送和接收数据,而不需要利用电路交换模式的网络资源,从而提供了一种高效、低成本的无线分组数据业务。它非常适用于要求实时性的、大数据量传输的场合。

(3) 监控中心数据处理单元

此系统可以定性和定量地识别抽油机井的工况。系统根据安装在现场的远程检测终端单元所采集的抽油机电机的数据,通过 GPRS 接收后,首先通过小波变换等滤波算法,对所采集的数据进行滤波,去掉噪声干扰,然后针对不同的抽油机类型,调用不同的抽油机运动和动力学算法以及抽油机的基础参数,根据电机的扭矩曲线推算出抽油机减速箱输出轴的扭矩曲线,并推算出示功图。利用高档服务器强大的运算和数据处理能力和基于 PC 机平台上方便高效的开发工具,来实现监控系统。本系统的开发平台用 Microsoft 公司的 Visual C++和 Mathswork 公司的 Matlab 语言相结合,Visual C++具有友好的图形用户界面,而 Matlab 具有强大的数学工具,包括小波分析和频谱分析等,通过 C++直接调用 Matlab 的数学函数,减少用 C++语言实现各种算法的工作量,以便高效快捷开发。本系统运行于 Windows XP 平台之上,可以直接接入 TCP/IP 协议构建的油田企业局域网。系统具有很好的数据库和网络支持,对传送回的检测数据可以利用油田局域网与 Internet 相连,为油田科研工作人员实现对抽油机井的动态实时分析和实时远程监控提供资料。

2.4 系统的工作过程

(1) 信号采集处理

系统分别采用两个电压互感器和电流互感器采集抽油机电动机端的线电压和线电流,并将互感器的小电压信号经过调理、滤波电路处理,然后送入 LPC2378 单片机进行 A/D 转换。减速箱皮带轮转速、上死点和下死点等油井工作参数经接近开关测量、光电隔离后送入 LPC2378 单片机。信号采集处理单元以 LPC2378 单片机为核心,在采集程序的控制下,依次采集电机电压,电流,减速箱皮带轮转速和减速箱曲柄上、下死点位置信号。

(2) 远程测量示功图

当井场远程检测终端单元接到监控中心发送的示功图请求指令信息后,进入示功图采集程序,由接近开关传感器自动判定抽油机工作的下死点,并从下死点开始采集电机

电压、电流参数,当抽油机光杆再次运行到下死点时,停止采集,至此完成了抽油机一个工作冲程的参数采集;系统也可以根据设置的数据采样频率,采集 10000 个数据点,并捕获接近开关传感器信号自动记录上死点和下死点对应的数据点,实现抽油机多个工作冲程的参数采集。采集的数据,经现场程序的初步处理、编码,通过 GPRS 模块发回监控中心。监控中心收到信息后进行解码处理还原数据,然后利用软件推算成反映抽油机工作状况的示功图数据,最后由监控中心软件进行分析。

(3) 远程油井诊断

对油井的远程诊断是利用远程检测终端采集单元、GPRS 远程数据传输单元等把抽油机的运行参数(多个冲程的两相电流、电压图)传回主站的监控中心,经监控中心对这些数据的分析,判断出抽油机运行的工作状况,提出调整建议。通过对电机轴转速与减速箱转速数据的分析,并与实际减速比比较,判断出抽油机皮带轮是否打滑,并有警报信号输出。

(4) 远程油井控制

油井远程控制技术是利用 GPRS 远程数据传输模块接收主站监控中心的控制指令,经解码后产生控制动作,接通或断开电机控制器的交流接触器的控制线包,通过控制电机的运行和停止来控制抽油机的起抽和停抽。

2.5 本章小结

本章是系统的总体设计部分,从宏观上介绍抽油机井系统动态实时分析系统的整体框架,从全局的角度把握系统的组成原理。本章首先从油田现场的实际情况出发,说明了抽油机井系统动态实时分析系统的设计原则以及系统所应有的功能要求;然后分析了抽油机井系统动态实时分析系统的三层结构模式,各层的主要功能,给出了整体结构示意图;最后简要介绍了系统的工作过程,包括信号采集处理、远程测量示功图、远程油井诊断、远程油井监控。

第三章 远程检测终端设计

远程检测终端模块是抽油机井系统动态实时分析系统工作的基础,是系统最底层的检测单元,其软硬件设计的好坏,将直接影响到系统功能的实现。系统后续的工作都是在远程检测终端所采集的数据基础上进行的,并且监控中心所需要的数据也是通过远程检测终端单元上的 GPRS 无线传输模块传输。

3.1 硬件电路设计

硬件电路是远程检测终端模块的核心部件,电机信号的获得都需要硬件电路的直接测量。因此,硬件电路的设计要考虑到硬件系统中的相关器件要尽可能做到性能匹配,同时当单片机外围电路较多时,必须考虑其驱动能力。除了工作性能以外,经济指标也是工业应用系统在设计过程中要考虑到的一个重要因素,能够长期占据市场的将是那些高性价比的产品。

硬件电路的设计围绕实现抽油机井动态分析的功能要求进行。本监控单元集成测量、控制、通讯等功能于一体,检测设备必须对电机工况参数、接近开关的开关量进行测试。同时可以和上位机进行通讯,而且得具有良好的人机交互功能。在设计时应充分考虑增强其自身的抗干扰性能。硬件设计的主要任务是综合考虑系统所要实现的各种功能和各部分硬件之间的关系,来选择所需芯片,设计出系统电路原理图以及印刷电路板[25]。

3.1.1 硬件组成结构

单片机最小系统设计是单片机最基本的外围电路设计,如时钟电路、复位电路、RAM 扩展电路等。本系统硬件也是采用单片机最小系统结构设计方法,以单片机最小系统为中心,配合数据采集模块和 GSM/GPRS 无线通信模块完成检测终端的功能。终端的硬件组成框图如图 3-1 所示:

硬件主要包括:电压电流传感器、电平转换及放大电路以及选择开关和 12 位串行 A/D(ADS7829),用于检测电压电流;串联型稳压电源,提供 $\pm 5V$ 和 $3.3V$ 电压;看门狗(X5043),确保程序正常运行并用来保存参数;CPU(LPC2378)完成计算处理等功能,它有 512KB 的 FLASH 内存和 58KB 的 RAM,从而不需要外扩数据和程序存储器;为实现系统临时数据保存、检测系统参数保存以及系统时间实时显示,选用低成本、低功耗的日历时钟芯片(SD2000CPI),日历时钟芯片不仅可作为系统的时间基准,而且其内

部的数据存储单元可实现参数的保存，同时该系统的系统时间还可通过远程通讯的方式进行时间校准，其日误差小于 1 秒（0.5 秒）。MC35I 模块用来实现监测系统与远程计算机之间的通信；另外还有两个串行通信接口，一个用作 RS232 接口，一个用来与 MC35I 模块通信。采用上位计算机系统通过 RS232 接口对检测系统进行参数设置和修改，另外可根据实际要求选取通信方式，若需要对某些参数进行远程修改或对检测系统实现远程监控，可采用 RS422/RS485 传输方式进行数据通信，还可采用无线通信方式进行监控。转速、转矩传感器是在实验时用来验证电机直接转矩控制所推算的转速、转矩算法是否正确，误差大小，在系统的使用阶段，将去除转速、转矩传感器，节省成本，最重要的是减少系统的安装过程。

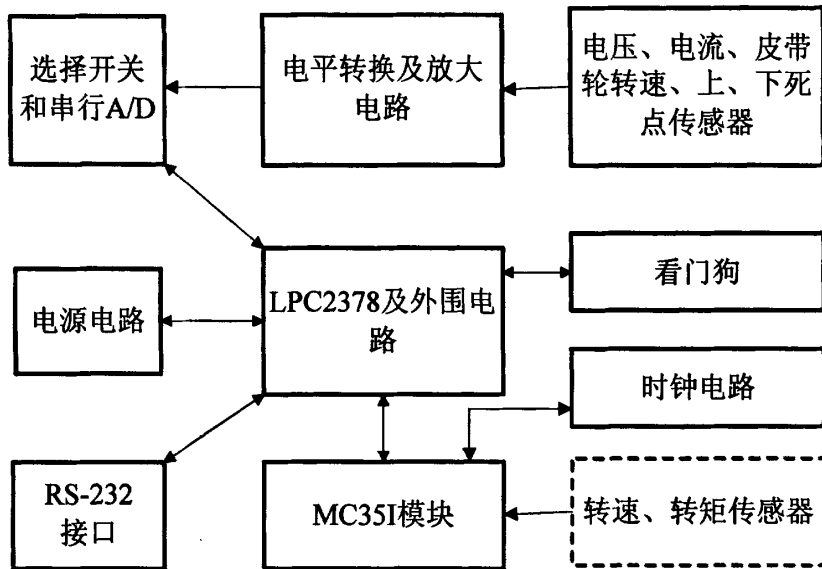


图 3-1 检测终端硬件组成框图

Fig3-1 The hardware principle chart of the detection terminal

3.1.2 CPU 的选择

远程检测终端模块采用 NXP 公司（前身为飞利浦半导体）的 ARM7 芯片 LPC2378 作为核心数据处理单元。LPC2378 是一款基于 ARM7TDMI-S 核的高性能 32 位 RISC 微处理器。处理器带有 Thumb 指令扩展；主频高达 72MHz；片内集成 512KBFlash，支持 ISP 及 IAP，58KBSRAM，PLL 加强型矢量中断控制器，10/100M 以太网带 DMA，USB2.0 全速设备接口，2 路 CAN2.0 接口，通用 DMA 控制器，4 个 UART 接口，1 个具有全功能 Modem 的接口，3 个 I2C 串行接口，3 个 SPI/SSP 串行接口，一个 I²S 接口，SD/MMC 记忆卡接口，8 路 10 位 ADC，1 路 10 位 DAC，4 个 32 位捕获/比较时钟，看门狗时钟，

PWM 模块支持 3 相马达控制, RTC 实时时钟带可选后备电池, 通用 I/O 等^[26]。

3.1.3 电压、电流采集电路设计

电参数的测量主要包括电压和电流两个方面, 分别使用电压互感器和电流互感器。电流互感器的输入要求范围为 0-150A, 输出为 5V。一般的电流互感器由于其磁化效应, 对于宽电流范围测量时会引起相应的误差, 应该采取一定的补偿措施。

信号采集模块将前一部分模拟电压、电流信号转换为数字信号, 才能由单片机读取。这一模块包含传感器、采样保持器、多路模拟开关和 A/D 模数转换器。监控系统中需要输入电压、电流两路模拟信号, 因此要用一片多路模拟开关。此外由于采样的信号是一个快速变化的信号, 因此在模拟开关和 A/D 转换芯片之前需加一个采样保持器。在采样电压信号时保持电流信号, 这样才能保证采样的电压和电流信号为同一时刻的值^[27]。

单片机检测感应电动机定子侧两个线电压、线电流瞬时值, 通过计算得到感应电动机的有功功率、无功功率、输出转矩和估算转速。通过三个接近开关分别检测电减速箱皮带轮转速, 上死点和下死点, 并根据减速比判断皮带是否打滑。对于实际系统, 交流电网的频率是变化的, 因此有必要检测电网的频率。系统中设计了一个 16 倍频锁相环 (PLL) 电路, 使用 PLL 电路的优点在于系统可以严格地跟踪电压电流频率的变化, 使得计算更加精确, 数据采集电路框图如图 3-2 所示。

利用两个电压、两个电流传感器实现对两相电压和两相电流采集。为了降低系统成本, 采用变压器型电压、电流传感器。该类型传感器的线性度较好, 但有较大的相位延迟。为了保证功率、功率因数等计算结果的精度需要对其进行相位补偿。一般可对电流电压传感器分别进行相位补偿 (并联补偿电容, 变压器属于感性负载), 补偿后使传感器的输入信号与输出信号相位一致。为了提高相位补偿效率, 本文采用电压电流融为一体的相位补偿方法。对电压传感器进行相位补偿后, 电压电流传感器输出的波形相位一致, 从而保证了电压电流传感器具有相同的相位延迟。采用该补偿方法后, 传感器相位与输入信号之间的相位可能有差异, 但只要两者之间具有相同的相位延迟就不会影响计算结果的精度。

在电压、电流传感器增益标定时, 把传感器、电平转换、放大电路和选择开关作为一个整体进行统一标定^[22]。

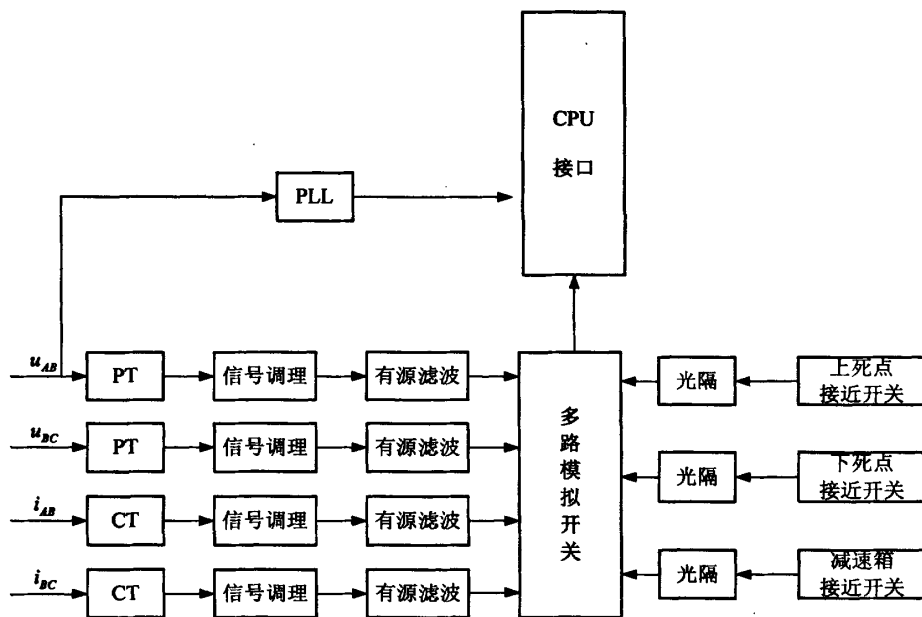


图 3-2 数据采集电路框图

Fig3-2 The diagram of the data acquisition circuit

3.1.4 皮带轮转速和上、下死点数据采集电路设计

皮带轮转速的测量是利用接近开关的输出信号配合单片机的定时/计数器来测量皮带轮的转速。常用的测量方法有 M 法、T 法和 M/T 法三种^[28]，本系统中使用的是 T 法测速，T 法测速是在接近开关输出的一个脉冲周期内对高频时钟脉冲个数 m 进行计数。转速为

$$n = \frac{60f_0}{Pm} \quad (3-1)$$

式中 f_0 ——高频时钟脉冲的频率；

P ——接近开关转一周发出的脉冲数。

为了减少量化误差， m 不能太小，所以 T 法在测量低速时精度较高。当然，转速也不宜很低，以免接近开关发出一个脉冲的周期太长，影响测量的快速性。接近开关测量皮带轮的安装图如图 3-3 所示。

上、下死点使用两个电容式接近开关测量游梁抽油机经过上死点和下死点的时间。接近开关安装在游梁式抽油机曲柄旋转至正下方和正上方非常接近曲柄处，以保证信号能够在曲柄接近时触发。该方法结构简单、易于实现且成本低廉，在一定精度范围内完全可以满足使用要求。

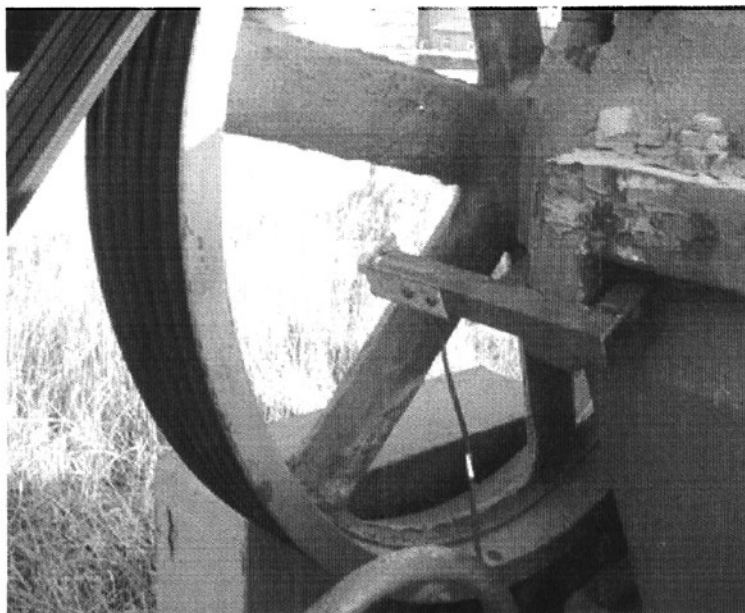


图 3-3 皮带轮转速接近开关安装图

Fig3-3 Erection diagram of the pulley speed proximity switch

电容式接近开关是一个以电极检测端的静电电容式接近开关，它由高频振荡电路、检测电路、放大电路、输出电路等组成。当检测物体接近检测电极时，由于检测电极加有电压，检测物体就会受到静电感应而产生极化现象，被测物体越靠近，检测电极上的电荷就越多，使电容随之增大，从而使振荡电路的振荡减弱，甚至停止振荡。振荡电路的振荡与停振这两种状态被检测电路转换为开关信号后向外输出^[29]。

3.2 软件算法设计

3.2.1 电机直接转矩控制理论

电机直接转矩控制技术（DTC）于上世纪 80 年代提出，是继矢量控制之后又一具有高静、动态性能的交流调速技术。德国教授 M.Dепенbrock 和日本学者 I.Takahashi 最早提出了这一开创性方案，获得了令人振奋的控制效果。其基本思想是：通过易于测量的定子电压、电流和转速等，借助瞬时空问矢量理论直接计算出电机的磁链和转矩，利用两个滞环比较器，直接对定子磁链和转矩控制。当时的控制系统有两种典型的方案，德国学者提出的自控制方案，即六边形磁链控制，和日本学者提出的直接转矩与磁链控制方案，即近似圆形磁链控制两种磁链控制方式。

（1）德国 M.Dепенbrock 教授提出的自控制(DSC)方案（六边形磁链）

80 年代，由德国 M.Dепенbrock 教授提出的自控制方案也就是六边形磁链直接转矩

控制方案。定子磁链由定子三相电压与电流经过坐标变换后计算，并分解得到 α 、 β 磁链的分量，再进行 2/3 坐标变换，计算所得磁链与磁链给定值比较，得到相应的开关量，转矩滞环调节输出决定插入零矢量与否，确定正确的电压状态，以控制逆变器的输出电压，产生所期望的六边形磁链^[30]。

（2）日本 I.Takahashi 提出的 DTC 方案（近似圆形磁链）

近似圆形磁链控制系统在每 1/6 周期中要交替多种开关工作状态，即多个工作电压矢量，系统需要实时计算定子磁链矢量 $\vec{\psi}_s$ 的幅值和相角，计算工作量大，但磁链脉动量较小。根据测得的定子实际磁链与给定值的差值进行滞环比较，当误差超出允许值时进行开关的切换，即实际定子磁链矢量 $\vec{\psi}_s$ 的端点轨迹不能超出以给定磁链 $|\vec{\psi}_s^*|$ 为中心圆的圆形偏差带（偏差为 e_ψ ）^[30]。

与六边形磁链控制系统类似，同样需要计算定子磁链，但在近似圆形磁链控制系统中只需进行一次 3/2 变换得到定子磁链在静止坐标系下的分量 ψ_{sa} 、 $\psi_{s\beta}$ 对定子磁链所在的区间进行判断。转矩滞环和磁链滞环将决定正确的空间电压矢量，使定子磁链按照近似圆形的磁链轨迹旋转。

在直接转矩控制技术中，定子磁链是作为电机转矩控制的关键状态变量，它的观测准确度直接影响系统的性能，是 DTC 技术实现的关键。然而由于受传感器安装技术以及气隙齿谐波的影响，磁链的直接检测非常困难，在实际系统中使用较少。常用的方法为间接测量，即通过易于测量的电机其他物理量（如定子电压、定子电流和转子转速等），建立定子磁链的观测模型，在控制系统中实时地推算出定子磁链的幅值和相位。

目前在直接转矩控制系统中，常用的是三种定子磁链模型。

（1）基于定子电压和电流的磁链观测模型（u-i 模型）

$$\vec{\psi}_s = \int (\vec{U}_s - \vec{I}_s R_s) dt \quad (3-2)$$

式中 $\vec{\psi}_s$ ——定子磁链矢量；

$\vec{U}_s$ ——定子电压矢量；

$\vec{I}_s$ ——定子电流矢量；

R_s ——定子电阻。

此观测模型只用到一个易于观测的定子电阻。式中的定子电压 U_s 和定子电流 I_s 也是易于确定的物理量，它们能以足够的精度被检测出来。基于电压模型的定子磁链估算基本方法采用公式 3-2 所示的理想积分器，但利用理想积分器观测磁链时，定子电流与变频器直流电压的测量误差以及定子电阻参数不准都可能在磁链估算结果中引起直流漂移。2008 年何志明提出了一种新型低通滤波改进算法，通过简单交换磁链观测器中低通滤波环节与补偿环节的顺序，大大提高了传统的改进低通滤波器动态性能^{[31][32]}。

(2) 基于定子电流与转速的磁链观测模型 (i-n 模型)

$$\psi_s = \frac{L_s}{L_s + L_\sigma} (I_s L_\sigma + \psi_r) \quad (3-3)$$

式中 ψ_r —— 转子磁链矢量；

L_s —— 定子主电感；

L_σ —— 漏电感。

相对于 u-i 模型，这个计算式要复杂一些，直接影响到计算结果的物理量不仅有定子主电感 L_s 、漏电感 L_σ ，还有转子磁链矢量 ψ_r ，因此根据 i-n 模型来估算定子磁链也有它自身的局限性。

(3) 基于定子电压、电流和转速的磁链观测模型 (u-n 模型)

u-n 模型由定子电压和转速来获得定子磁链。它综合了 u-i 模型和 i-n 模型的优点，高速时电动机模型实际工作在 u-i 模型下，磁链实际上只是由定子电压和定子电流计算得到。由定子电阻误差、转速测量误差以及电动机参数误差引起的磁链误差在这个工作范围内将不再有意义。低速时，电动机模型实际工作在 i-n 模型下。但该模型结构复杂，实现较为困难。

本课题综合考虑三种定子磁链模型，最终选择最简单也是最容易测量的基于定子电压和电流的 u-i 模型来获得定子磁链，针对 u-i 模型的不足，通过使用文献 31、32 所用的新型低通滤波改进算法加以改进。

3.2.2 电机工况参数算法

根据上一节电机直接转矩控制理论，利用电压电流互感器所采集的两相线电流、线电压采样值 u_{AB} 、 u_{BC} 、 i_A 、 i_B ，计算另一相的线电压、线电流的值^[33-36]。

$$u_{CA} = -u_{AB} - u_{BC} \quad (3-4)$$

$$i_C = -i_A - i_B \quad (3-5)$$

将采样得到的三相静止坐标系下（ABC 坐标系）的定子电压、电流的瞬时值 u_{AB} 、 u_{BC} 、 u_{CA} 和 i_A 、 i_B 、 i_C 分别进行静止坐标变换得到两相静止正交坐标系下（ α - β 坐标系，其中 α 相与 A 相重合， β 相超前 α 相 90° ）的相电压和相电流 $u_{s\phi\alpha}$ 、 $u_{s\phi\beta}$ 、 $i_{s\phi\alpha}$ 、 $i_{s\phi\beta}$ 。

因为电机为三角形联结，采样的线电压即为相电压，采样的线电流需转换为相电流，因此，有下方程：

$$u_{s\phi\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(u_{A\phi} - \frac{1}{2} u_{B\phi} - \frac{1}{2} u_{C\phi} \right) = \sqrt{\frac{1}{6}} (2u_{AB} - u_{BC} - u_{CA}) \quad (3-6)$$

$$u_{s\phi\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} u_{B\phi} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{C\phi} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (u_{BC} - u_{CA}) \quad (3-7)$$

$$i_{s\phi\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_A - \frac{1}{2} i_B - \frac{1}{2} i_C \right) = \sqrt{\frac{1}{6}} (2i_A - i_B - i_C) \quad (3-8)$$

$$i_{s\phi\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_B - \frac{\sqrt{3}}{2} i_C \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_B - i_C) \quad (3-9)$$

在 α - β 两相正交坐标系，线电流分量超前相电流分量 30° ，幅值为相电流分量的 $\sqrt{3}$ 倍，于是可求得相电流的 α 轴和 β 轴分量：

$$i_{s\phi\alpha} = i_{s\phi} \cos(\varphi_{i_u} + 30^\circ) = \frac{i_{sl}}{\sqrt{3}} \cos(\varphi_{i_u} + 30^\circ) = \frac{1}{2} i_{sl\alpha} - \frac{1}{2\sqrt{3}} i_{sl\beta} \quad (3-10)$$

$$i_{s\phi\beta} = i_{s\phi} \sin(\varphi_{i_u} + 30^\circ) = \frac{i_{sl}}{\sqrt{3}} \sin(\varphi_{i_u} + 30^\circ) = \frac{1}{2\sqrt{3}} i_{sl\alpha} + \frac{1}{2} i_{sl\beta} \quad (3-11)$$

计算瞬时功率和功率因数：

$$p = u_{s\phi\alpha} i_{s\phi\alpha} + u_{s\phi\beta} i_{s\phi\beta} \quad (3-12)$$

$$q = u_{s\phi\beta} i_{s\phi\alpha} - u_{s\phi\alpha} i_{s\phi\beta} \quad (3-13)$$

$$\cos \varphi = \cos \left(\arctan \frac{q}{p} \right) = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2}} \quad (3-14)$$

由于抽油机异步电机通常以额定频率运行，电机正常工作时定子电压远大于定子电

阻压降,因此定子电阻变化对估算定子磁链的精度影响很小,根据感应电机在静止两相 α 和 β 坐标上的数学模型,可利用式 3-15 和 3-16 通过积分的方法来估算定子磁链分量。

$$\psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \quad (3-15)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \quad (3-16)$$

利用式 3-15 和 3-16 可计算得到定子磁链的幅值和相位:

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \quad (3-17)$$

$$\theta_\psi = \arctan\left(\frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}}\right) \quad (3-18)$$

式中 R_s 为定子电阻。

因为单片机系统为离散系统,磁链的积分一般由累加实现,即:

$$e_{sak} = u_{s\alpha k} - i_{s\alpha k} R_s \quad (3-19)$$

$$e_{s\beta k} = u_{s\beta k} - i_{s\beta k} R_s \quad (3-20)$$

$$\psi_{sak} = a e_{sak} + b \psi_{sak-1} \quad (3-21)$$

$$\psi_{s\beta k} = a e_{s\beta k} + b \psi_{s\beta k-1} \quad (3-22)$$

式中
$$a = \frac{1}{1+RC/T} = \frac{\omega_c T}{1+\omega_c T}$$

$$b = \frac{RC/T}{1+RC/T} = \frac{1}{1+\omega_c T} = 1-a$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 5 \text{ Hz}, T = 0.1 \text{ ms}$$

利用异步电动机的电磁转矩方程和计算所得的定子磁链和电流分量可根据式 3-23 估算电机电磁转矩, 式中 P_n 为电机极对数。

$$T_e = \frac{3}{2} P_n (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (3-23)$$

电磁功率的计算公式为:

$$P_e = T_e * \Omega_s \quad (3-24)$$

根据计算所得的电磁转矩、定子磁链幅值可根据式 3-25 的异步电动机速度动态估

算方法实现电机转子转差电角速度估算。

$$\omega_f = \frac{2}{3p_n} \frac{R_r T_e}{\psi_{sa}^2 + \psi_{s\beta}^2} = \frac{2}{3p_n} \frac{R_r T_e}{\psi_s^2} \quad (3-25)$$

电机定子同步电角速度可由静止坐标系下的定子电压方程得到：

$$\omega_s = \frac{(u_\beta - R_s i_\beta) \psi_\alpha - (u_\alpha - R_s i_\alpha) \psi_\beta}{\psi_s^2} \quad (3-26)$$

因此，电机转子机械转速的计算表达式为：

$$n = \frac{\omega_s - \omega_f}{p_n} \quad (3-27)$$

利用同步电角速度可计算得到电机的同步速度，利用机械转速和同步速度可计算得到电机的转差率表达式为：

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3-28)$$

总机械功率：

$$P_\Omega = (1-s)P_e \quad (3-29)$$

机械功率：

$$P_2 = P_\Omega - (P_\Omega + P_\lambda) \quad (3-30)$$

式中 p_Ω ——机械损耗；

p_λ ——杂散损耗。

由转速可以得到机械角速度 Ω ，则输出转矩为：

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} \quad (3-31)$$

3.2.3 程序运行流程

远程检测终端软件算法采用标准 C 语言编程，程序构架充分采用结构化和模块化方案设计，程序执行效率高，易读性强，可扩充性强，便于软件程序的进一步修改、移植及扩展等。该系统通过实时采集异步电机的两相电压和电流可实时计算电机的三相有功功率、无功功率和功率因数，根据定子三相电压和电流可实时计算得到电机定子磁链的幅值和相位，结合定子电流可估算得到电机电磁转矩，利用定子电压和电流还可进一步估算定子电角频率，利用估算所得的定子磁链幅值和电磁转矩可得到转子转差电角频

率,利用定子电角频率和转子转差电角频率就可计算得到转子实际转速。利用电磁转矩和同步电角速度可计算电机电磁功率,结合所估算的转差率和机械损耗可估算电机输出机械转矩,根据电机输出转矩和转速可得到电机输出机械功率以及系统的整体效率。电机转速转矩估计原理框图如图 3-4 所示^[23]。

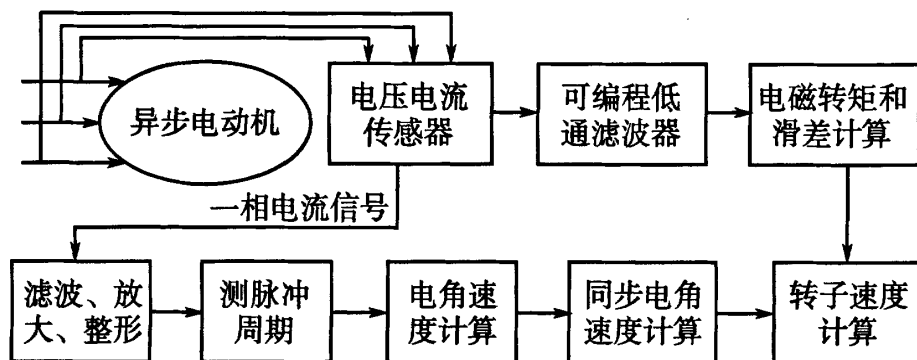


图 3-4 转速转矩估计原理框图

Fig3-4 The principle diagram of the rotor speed and torque estimation method

在计算转速转矩时需要准确得到定子磁链。而磁链的计算与其初值有关。为了解决初值问题,一是对定子磁链进行连续观测。但由于磁链观测、转子转速转矩计算的计算量较大,对 CPU 的实时性要求较高,增加了系统成本;此外,在计算电动机转子转速和电磁转矩前先对定子磁链进行一定时间的观测,由低通滤波器消除初值误差问题。本设计采用后者,其处理流程图如图 3-5 所示,磁链计算周期为 $100\mu\text{s}$ ^[22]。

主程序的功能是循环计算电磁转矩、相电压、相电流有效值及相功率因数、输入功率、输出功率、视在功率、总功率因数、效率等,并通过无线方式把数据发送给远程计算机。控制周期采用时钟芯片的分钟中断功能进行设置,具体控制周期可远程或通过 RS-232 串口进行设置。当计算处理已完成,而新的控制周期还没到时进行接收数据处理。主程序的处理流程图如图 3-6 所示^[22]。

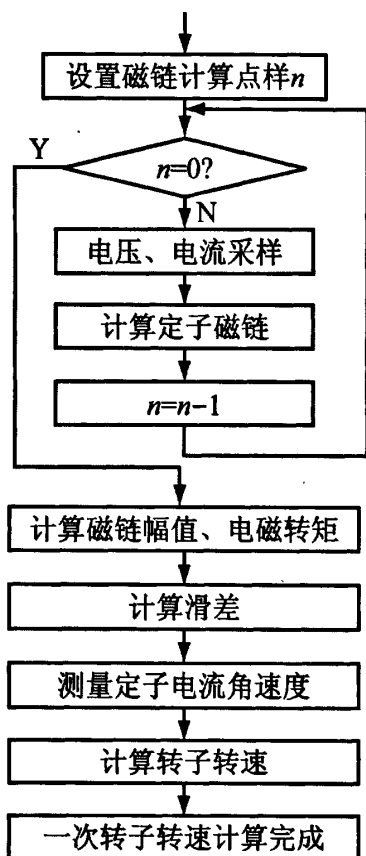


图 3-5 转子转速估算流程图

Fig3-5 The flow chart of the rotor speed estimation method

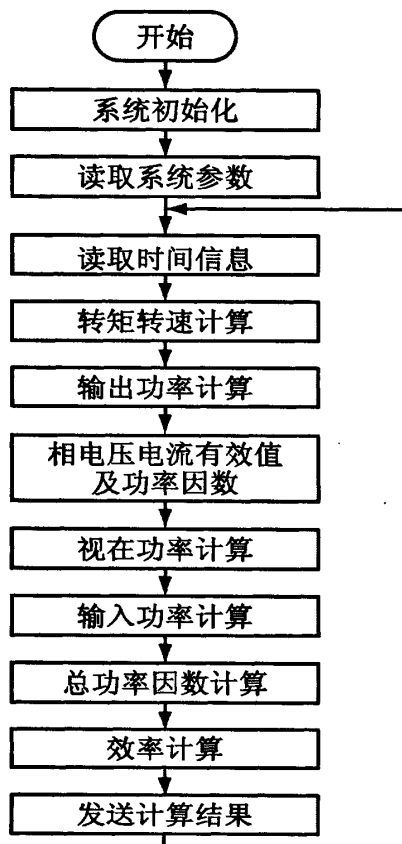


图 3-6 主程序处理流程图

Fig3-6 The flow chart of the main program

3.3 GPRS 无线模块设计

3.3.1 GPRS 简介

GPRS 是通用分组无线业务（General Packet Radio Service）的英文简称，是在现有 GSM 系统上发展出来的一种新的承载业务，目的是为 GSM 用户提供分组形式的数据传输。作为迈向第三代无线通信的重要里程碑，世纪之初开启的通用分组无线业务 GPRS，使移动通信与数据网络合二为一。GPRS 采用与 GSM 同样的无线调制标准、同样的频带、同样的 TDMA 帧结构。这种新的分组数据信道与当前的电路交换的话音业务信道极其相似，因此现有的基站子系统只要增加一些模块即可提供 GPRS 服务。

GPRS 允许用户在分组交换模式下发送和接收数据，从而提供了一种高效、低成本的无线分组数据业务。分组交换的基本过程是把数据先分成若干个小的数据包，可通过不同的路由，以存储转发的接力方式传送到目的端，再组装成完整的数据。分组交换基本上不是实时系统，延时也不固定，但可以使不同的数据传输“共用”传输带宽，有数

据时占用带宽，无数据时不占用，从而共享资源^[37]。

3.3.2 GPRS 数据传输优点

GPRS 系统的主要特点如下^{[38][39]}：

(1) GPRS 接入范围广，可充分利用全国范围的电信网络，方便、快速、低成本地为用户数据终端提供远程接入网络的部署；

(2) GPRS 采用分组交换技术，高效传输高速或低速数据和信令，优化了对网络资源和无线资源的利用；

(3) 支持中、高速率数据传输，可提供 9.05 至 171.2kbps 的数据传输速率，是常用有线 56kModem 理想速率的三倍左右，下一代 GPRS 业务的速度甚至可以达 384kbps，系统接入速度快，一般只需 2-3 秒，适合间歇的突发性数据传输；

(4) GPRS 支持基于标准数据通信协议的应用，可以和 IP 网、X.25 网等互联。支持特定的点到点和点到多点服务，以实现一些特殊应用如远程信息处理。GPRS 也允许短消息业务（SMS）经 GPRS 无线信道传输；

(5) 用户数据在数据终端和外部数据网络之间透明地传输，它使用的方法是封装和隧道技术。用户数据能够压缩，并有重传协议保护，因此数据传输高效且可靠；

(6) GPRS 提供实时在线功能，现在用 GPRS MODEM 上网，用户将始终处于连线 and 在线状态，这将使访问服务变得非常简单、快速；

(7) GPRS 可以实现基于数据流量、业务类型及服务质量等级（QOS）的计费功能，用户只有在发送或接收数据期间才占用资源，用户可以一直在线，按照用户接收和发送数据包的数量来收取费用，没有数据流量的传递时，用户即使挂在网上也是不收费的，计费方式更加合理。

以上优势使 GPRS 非常适用于开展行业和企业无线接入应用。

3.3.3 GPRS 模块硬件设计

在众多 GPRS 模块中，德国西门子（SIEMENS）公司生产的系列产品是其中一个典型的代表。本方案采用了德国西门子公司生产的 MC35i 型模块。该模块是该公司生产的 MC35 模块的改进产品，在硬件连接上保证了与 MC35 模块的完全兼容。

MC35i 模块专门为基于 EGSM900MHz 与 GSM1800MHz 移动网络应用而设计，与之前系列（如 TC 系列）的最大不同之处在于 MC35i 模块支持多时隙、等级 8 的 GPRS 应用，并且完全支持 CS-1、CS-2、CS-3 和 CS-4 四个 GPRS 编码方案。MC35i 采用 RS232

标准与外部进行数据连接，并采用一个安装简便的 40 引脚的 ZIF 物理接口与外部硬件进行连接，在具体的硬件设计上只需将一根 40 线宽的排线压入 ZIF 接口中即可。控制方面则采用标准的 AT 指令集，MC35i 的接线图如图 3-7 所示。

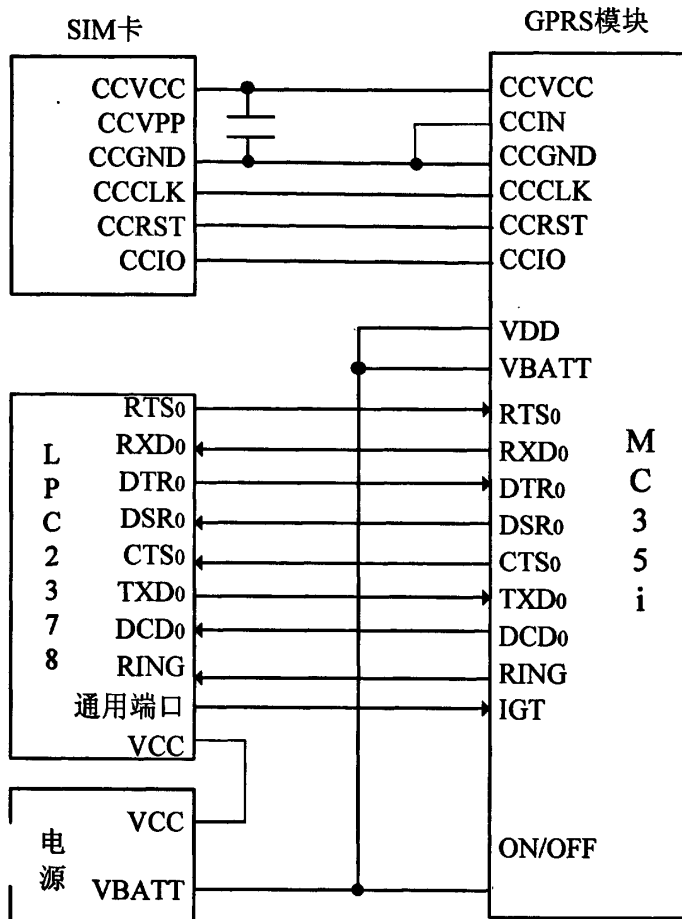


图 3-7 MC35i 接线简图

Fig3-7 Interconnection diagram of MC35I

MC35i 数据接口为 TTL 电平的 RS232 接口，共有九条信号线，它提供给用户上位机与 MC35i 的命令和数据传输通道，可以通过 AT 指令集进行参数配置，最高速率可达 57600bps。

由于 MC35i 数据接口为 TTL 电平的 RS232 接口，而 LPC2378 的 RS232 接口也为 TTL 电平，因此，可以直接把 MC35i 数据接口与 LPC2378 的 RS232 接口相连。对于标准 RS232 中未使用的引脚，如果为输出引脚则浮空，如果为输入引脚则通过 10K 欧姆电阻上拉。IGT 引脚用于启动 GPRS 引擎模块，为下降沿使能。IGT 引脚与 LPC2378 通用端口相连，利用软件启动 MC35i。

MC35i 模块是机卡分离的移动终端设备,要登录到移动网络上,还必须通过其 SIM 卡接口扩展外部 SIM 卡插槽,MC35i 模块的 SIM 卡接口符合 ISO7816-3IC 卡标准。MC35i 模块的 SIM 卡接口共有 6 个引脚,MC35i 模块的启动过程包括在一秒钟内对 SIM 卡进行初始化,这个操作过程和 CCIN 引脚的高低密切相关,如果 MC35i 启动过程中 CCIN 引脚为低,模块将尝试初始化 SIM 卡,在这种情况下,仅当插槽内有 SIM 卡时初始化才会成功。SIM 卡初始化完成后,如果卡不能用或者拔出,模块不会再次查询 SIM 卡,只能进行紧急通话。使用时应特别注意先将 SIM 卡可靠插入,否则将造成无线通讯失败^[40]。

3.3.4 GPRS 数据传输设置

20 世纪,美国的 Hayes Micro-computer product 开发了一个产品,称为智能调制解调器,它可以接收 ASCII 文本字符串形式的高级命令,即所谓的 Hayes AT 指令集 (HayesAT command set),它简化了调制解调器与通信软件的接口,并成为调制解调器命令事实上的标准。每一台与 Hayes Modem 兼容的调制解调器都能使用 Hayes AT 指令集。采集终端的 CPU 通过 AT 命令实现对模块的驱动。

MC35i 模块也是采用 AT 指令集进行控制的,采用 AT 指令可以实现模块参数的设置,实现数据的发送与接收。在进行 GPRS 上网操作之前,首先要对 GPRS 模块进行一定的设置。主要的设置工作有^[41]:

(1) 设置通信波特率,可以使用 AT+IPR=38400 命令,把波特率设为 38400b/s 或其它合适的波特率,默认的通信速度为 9600b/s;

(2) 设置接入网关,通过 AT+CGDCONT=1,“IP”“,CMNET”命令设置 GPRS 接入网关为移动梦网;

(3) 设置移动终端的类别,通过 AT+CGCLASS=“B”设置移动终端的类别为 B 类,即同时监控多种业务,但只能运行一种业务,即在同一时间只能使用 GPRS 上网,或者使用 GSM 的语音通信;

(4) 测试 GPRS 服务是否开通,使用 AT+CGACT=1,1 命令激活 GPRS 功能。如果返回 OK,则 GPRS 连接成功;如果返回 ERROR,则意味着 GPRS 失败。这时应检查一下 SIM 卡的 GPRS 业务是否已经开通,GPRS 模块天线是否安装正确等问题。

GPRS 模块完成上述初始化后,则可以通过拨号程序来实现 GPRS 连接。由于 GPRS 是基于 IP 协议的,数据包在主机与 GPRS 服务器群中间的传输使用的是基于 IP 的分组,

这意味着所有的数据报文都要基于 IP 包。但是明文传送 IP 包也是不可取的,因为这种方式不能保证数据的完整性,所以一般使用 PPP 协议进行 GPRS 数据的传输。在中国移动的接入网关 CMNET 中,就是使用 PPP 协议与 GPRS 使用终端进行协商通讯的。这与使用 MODEM 拨号上网类似,相应的电话号码为“*99***1#”,用户名、密码都为空。使用 PPP 协议登录上之后,就可以通过移动梦网的网关接上互联网。

3.4 本章小结

本章根据上一章提出的抽油机井系统动态实时分析系统结构和系统性能要求,对其远程检测终端的硬件和软件进行了设计。本章主要讨论了远程检测终端的软、硬件设计,特别是介绍了电机直接转矩控制原理和电机工况参数的算法,最后介绍了本系统所使用的西门子公司 GPRS 无线模块 MC35i。

第四章 抽油机的运动学和动力学分析

抽油机井系统动态实时分析系统通过测量电机的电压和电流,利用电机直接转矩控制理论,推导出电机的输出轴扭矩,然后通过皮带把动力传递给减速箱。在本课题的现场实验中,共测试了两种类型的抽油机,分别是常规后置式游梁抽油机和双驴头抽油机。因此,需要研究这两种抽油机的运动规律,建立由电机通过皮带轮把扭矩传递给减速箱开始到最后的悬点位移之间一系列的运动过程,对应于抽油机某一曲柄旋转角速度,求出驴头及各铰接点的位移、速度和加速度随时间或曲柄旋转角的变化规律,为进行载荷、扭矩等的动力学分析和计算提供依据,并且考虑动力传递过程中的功率损失。

游梁式抽油机将电动机的旋转运动转变为直线往复运动,其效率较低,主要环节是皮带传动、减速箱和四连杆机构^[42]。

(1) 皮带传动的功率损失。一般以弯曲功率损失和弹性滑动损失为主。20 世纪 70 年代以来,对皮带做了大量改进工作,创造出窄 V 带、多楔带、同步带等,使得传动效率由 83% 提高到 94%,由于管理等方面的原因,目前大量的抽油机皮带传动效率在 85% 左右。

① 单根皮带的弯曲功率损失可由式 4-1 计算^[43],电机的转速可以推算出来,通过检测皮带轮的转速,就可以计算弯曲功率损失。

$$\Delta P_b = E_b I \pi (n_1 / r_1 \theta_1 + n_2 / r_2 \theta_2) \times 10^{-3} / 30 \quad (4-1)$$

式中 ΔP_b ——单根皮带绕轮弯曲造成的功率损失, kw;

E_b ——皮带纵向弯曲弹性模量(传动胶带为 0.20~0.35,帘布芯三角带为 0.25~0.40), GPa;

I ——皮带截面惯性矩, mm^4 ;

$r_1 r_2$ ——分别为大小皮带轮的半径, mm;

$n_1 n_2$ ——分别为大小皮带轮的转速, r/min;

$\theta_1 \theta_2$ ——分别为大小皮带轮的包角, rad。

② 单根皮带的弹性滑动功率损失可由式 4-2 计算:

$$\Delta P_s = (F_s^2 v / E_s A) \times 10^{-3} \quad (4-2)$$

式中 ΔP_s ——单根皮带的弹性滑动功率损失，kw；

F_e ——皮带工作时的有效圆周力，N；

E_s ——皮带的拉伸弹性模量，MPa；

A ——皮带截面积， mm^2 。

(2) 减速箱传动效率一般比较高，一副轴承传动损失约为 1%，一对齿轮传动损失约为 2%，减速箱总传动损失约为 9%~10%，传动效率约为 90%左右。

(3) 四连杆机构三副轴承传动效率损失 3%，钢丝绳变形损失通常统计约为 3%，总计四连杆机构传动效率约为 94%左右。

4.1 常规后置式抽油机的运动、动力学分析

4.1.1 常规后置式抽油机简介

后置式游梁抽油机是游梁式抽油机的基本形式之一。它的结构特点是，曲柄连杆机构和驴头分别位于支架的两侧，曲柄轴中心基本上位于游梁尾轴承的正下方，利用四连杆机构将旋转运动转变为往复运动。它主要由动力机、减速箱、曲柄、连杆、横梁、驴头、支架、底座、刹车装置、悬绳器以及平衡重等部分组成，其结构简图如图 4-1 所示。抽油机的动力机有电动机和天然气发动机等，目前应用最多的是电动机。

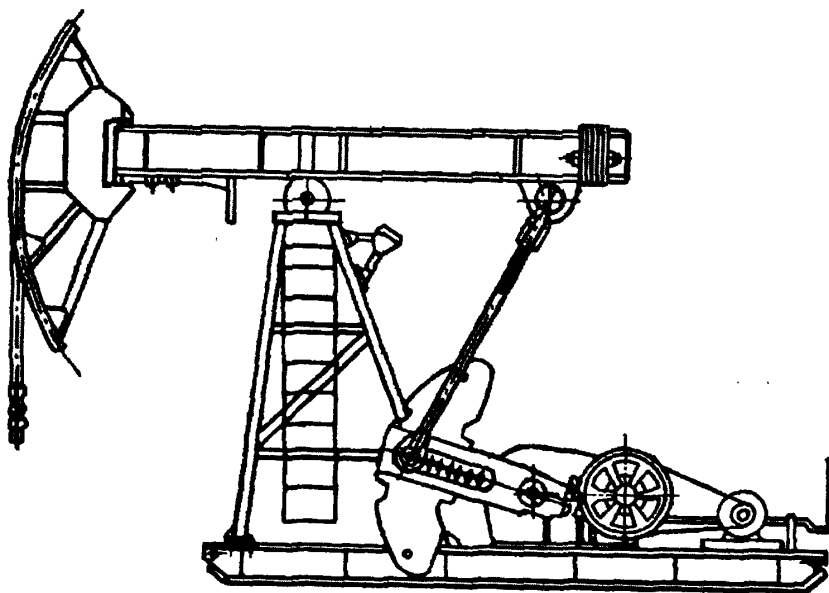


图 4-1 常规抽油机结构示意图

Fig4-1 The structure plot of the conventional pumping unit

4.1.2 常规后置式抽油机运动学分析

游梁式抽油机运动分析的主要任务是：求出驴头悬点的位移、速度和加速度随时间的变化规律^[44-47]。后置式游梁抽油机的机构简图如图 4-2 所示。

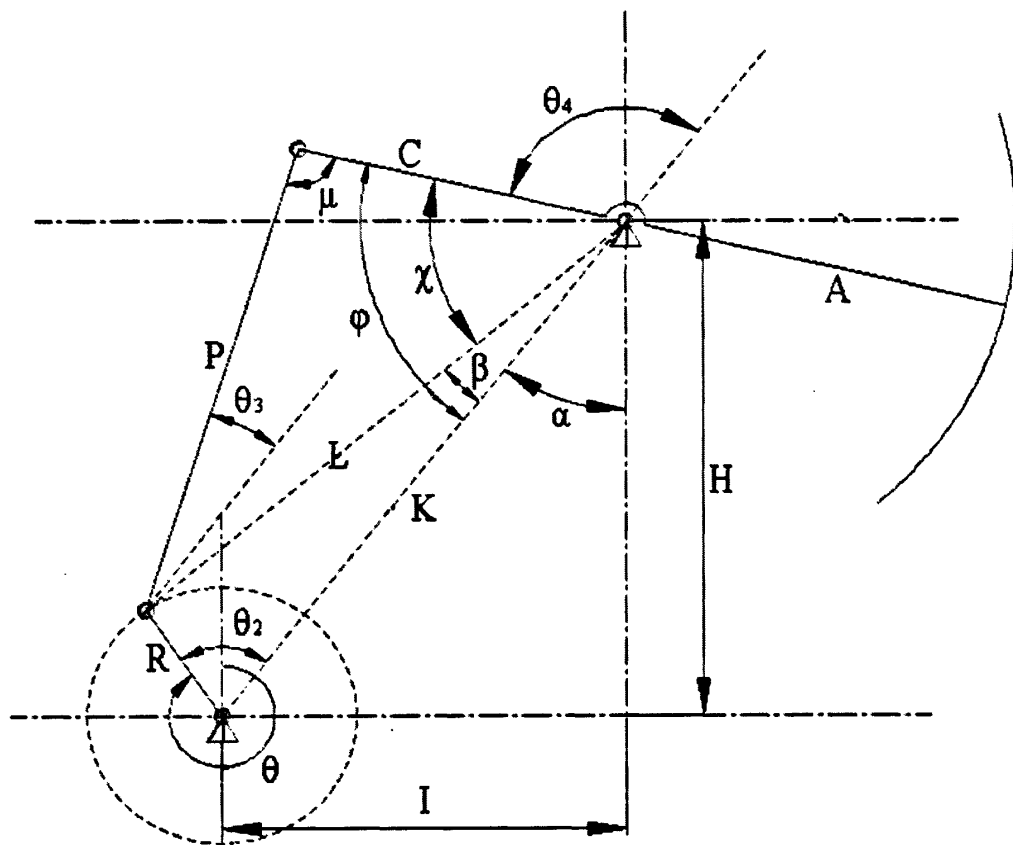


图 4-2 常规抽油机几何简图

Fig4-2 The geometric diagram of the conventional pumping unit

由机构简图可得几何关系:

$$K = \sqrt{I^2 + H^2} \quad (4-3)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{I}{K}\right) \quad (4.4)$$

$$\theta_2 = 2\pi - \theta + \alpha \quad (4-5)$$

$$L = \sqrt{R^2 + K^2 - 2RK \cos \theta_2} \quad (4-6)$$

式中 K ——基杆长度，即曲柄轴中心到游梁轴中心的距离，m；

I ——基杆的水平投影，即游梁轴中心到曲柄轴中心的水平距离，m；

H ——游梁轴中心到底座底部的垂直距离，m；

α ——基杆与 y 轴的夹角， $^{\circ}$ ；

θ ——曲柄与 y 轴的夹角， $^{\circ}$ ；

R ——曲柄半径，m；

L ——曲柄销中心至游梁支撑中心的距离，m。

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R}{L} \sin \theta_2\right) \quad (4-7)$$

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{P^2 + L^2 - C^2}{2PL}\right) - \beta \quad (4-8)$$

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{P^2 - L^2 - C^2}{2CL}\right) - \beta \quad (4-9)$$

$$\chi = \arccos\left(\frac{C^2 + L^2 - P^2}{2CL}\right) \quad (4-10)$$

$$\mu = \arccos\left(\frac{C^2 + P^2 - L^2}{2CP}\right) \quad (4-11)$$

$$\varphi = \chi + \beta \quad (4-12)$$

$$\omega = \dot{\theta} \quad (4-13)$$

式中 β ——基杆与 L 的夹角，m；

P ——连杆长度，m；

C ——游梁后臂长度，m；

θ_3 ——连杆与基杆的夹角， $^{\circ}$ ；

θ_4 ——游梁后臂与基杆的夹角， $^{\circ}$ ；

χ ——游梁后臂与 L 的夹角， $^{\circ}$ ；

μ ——后臂与连杆的夹角， $^{\circ}$ ；

ω ——曲柄旋转角速度， s^{-1} 。

由后置式游梁抽油机机构简图中各矢量关系可得运动封闭方程为：

$$\begin{cases} R \cos \theta_2 + P \cos \theta_3 = C \cos \theta_4 \\ R \sin \theta_2 + P \sin \theta_3 = C \sin \theta_4 \end{cases} \quad (4-14)$$

将式 4-14 两边对时间 t 求导可得:

$$\begin{cases} R \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + P \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 = C \dot{\theta}_4 \sin \theta_4 \\ R \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + P \dot{\theta}_3 \cos \theta_3 = C \dot{\theta}_4 \cos \theta_4 \end{cases} \quad (4-15)$$

联立方程, 求解得连杆及游梁运动的角速度 $\dot{\theta}_3$, $\dot{\theta}_4$:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_3 = \frac{P \dot{\theta}_2}{P} \cdot \frac{\sin(\theta_4 - \theta_2)}{\sin(\theta_3 - \theta_4)} \\ \dot{\theta}_4 = \frac{P \dot{\theta}_2}{C} \cdot \frac{\sin(\theta_3 - \theta_2)}{\sin(\theta_3 - \theta_4)} \end{cases} \quad (4-16)$$

将 (4-16) 对时间 t 求导, 可得连杆及游梁运动的角加速度 $\ddot{\theta}_3$, $\ddot{\theta}_4$ 为:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_3 = \dot{\theta}_3 \left[\frac{\ddot{\theta}_2}{\dot{\theta}_2} - \left(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4 \right) \cot(\theta_3 - \theta_4) + \left(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2 \right) \cot(\theta_4 - \theta_2) \right] \\ \ddot{\theta}_4 = \dot{\theta}_4 \left[\frac{\ddot{\theta}_2}{\dot{\theta}_2} - \left(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4 \right) \cot(\theta_3 - \theta_4) + \left(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2 \right) \cot(\theta_2 - \theta_3) \right] \end{cases} \quad (4-17)$$

由此可得悬点的速度和加速度分别为:

$$v = A \dot{\theta}_4 \quad (4-18)$$

$$a = A \ddot{\theta}_4 \quad (4-19)$$

式中 A —游梁前臂长度, m。

当悬点处于下死点和上死点位置时, 游梁后臂和基杆之间的最大夹角 $\varphi_{\max}$ 和最小夹角 $\varphi_{\min}$ 为:

$$\varphi_{\max} = \arccos \left(\frac{C^2 + K^2 - (R + P)^2}{2CK} \right) \quad (4-20)$$

$$\varphi_{\min} = \arccos \left(\frac{C^2 + K^2 - (P - R)^2}{2CK} \right) \quad (4-21)$$

悬点冲程长度 S 为:

$$S = A(\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) \quad (4-22)$$

以下死点为位移的零点，向上为位移正方向，则任意时刻悬点的位移 S_c 为：

$$S_c = A(\varphi_{\max} - \varphi) \quad (4-23)$$

扭矩因数 $\overline{TF}$ 为：

$$\overline{TF} = \frac{\nu}{\omega} \quad (4-24)$$

4.1.3 常规后置式抽油机动力学分析

由于连杆本身的重量较小，忽略本身的重量，可以看为二力杆，如图 4-3 所示，取游梁为分析对象^[44]：

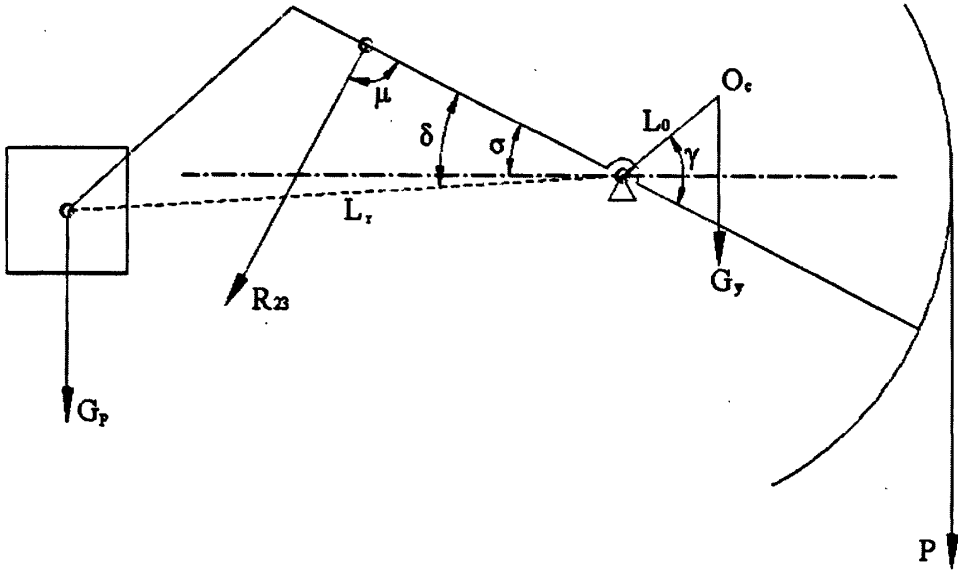


图 4-3 常规抽油机游梁受力简图

Fig4-3 Force analysis of the beam of the conventional pumping unit

由游梁受力简图可得：

$$G_p L_r \cos(\delta - \sigma) + R_{23} C \sin \mu = PA + J_b \varepsilon_b + G_y L_0 \cos(\gamma - \sigma) \quad (4-25)$$

于是连杆拉力 R_{23} 为：

$$R_{23} = \frac{G_p L_r \cos(\delta - \sigma) - PA - J_b \varepsilon_b - G_y L_0 \cos(\gamma - \sigma)}{C \sin \mu} \quad (4-26)$$

式中 G_p ——游梁平衡块重，kN；

L_r ——游梁平衡块重心至支撑中心的距离, m;

δ —— L_r 与游梁后臂的夹角, °;

γ —— L_0 与前臂的夹角, °;

σ ——游梁后臂与水平线的夹角, °;

μ ——连杆与后臂的夹角, °;

P ——悬点载荷, kN;

L_0 ——游梁和驴头重心 O_c 距离支撑中心的距离, m;

J_b ——游梁转动惯量, $t \cdot m^2$;

ε_b ——悬点加速度, s^{-2} ;

R_{23} ——连杆拉力, kN;

G_y ——游梁和驴头的重量, kN。

支架水平受力 R_x (指向井口为正) 为:

$$R_x = R_{23} \cos(\mu + \sigma) \quad (4-27)$$

支架垂直受力 R_y (向上为正) 为:

$$R_y = -(P + G_y + G_p + R_{23} \sin(\mu + \sigma)) \quad (4-28)$$

取曲柄为分析对象, 如图 4-4 所示, 有:

由曲柄受力图可知曲柄轴水平受力 R_{ax} (指向井口为正) 为:

$$R_{ax} = -R_x \quad (4-29)$$

曲柄轴垂直受力 R_{ay} (向上为正) 为:

$$R_{ay} = R_{23} \sin(\mu + \sigma) - G_q - G_R \quad (4-30)$$

式中 G_q ——曲柄平衡块重, kN;

G_R ——曲柄自重, kN。

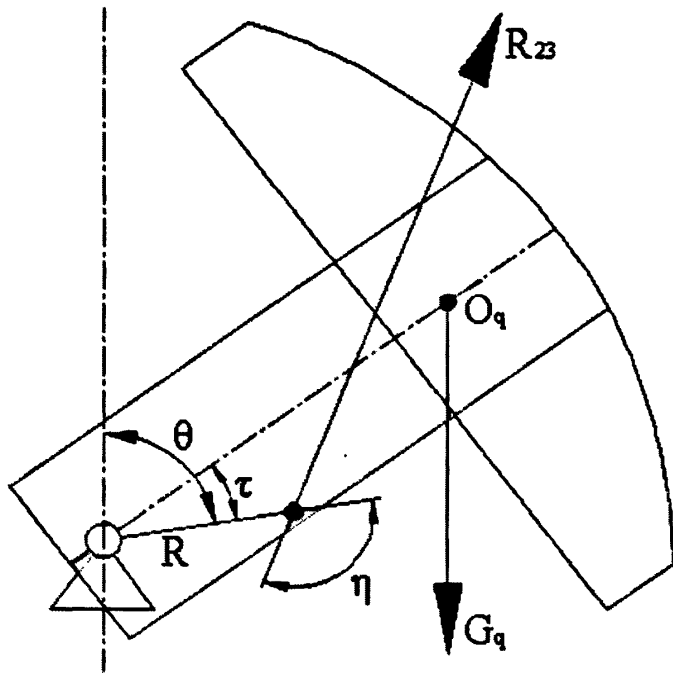


图 4-4 常规抽油机曲柄受力简图

Fig4-4 Force analysis of the crank of the conventional pumping unit

减速箱输出轴净扭矩 T_n 为:

$$T_n = R_{23}R \sin \eta - G_q L_q \sin(\theta - \tau) - G_R \frac{L_R}{2} \sin(\theta - \tau) \quad (4-31)$$

式中 L_q ——曲柄平衡块重心 O_q 至曲柄轴的距离, kN;

L_R ——曲柄长, kN;

τ ——平衡相位角,

由此可得均方根扭矩:

$$T_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_n^2 d\theta} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{ni}^2} \quad (4-32)$$

4.2 双驴头抽油机的运动、动力学分析

4.2.1 双驴头抽油机简介

双驴头抽油机（也叫异型游梁式抽油机）可视为是将常规游梁式抽油机的游梁后臂加装一个驴头，用一段驱动绳来代替连杆的硬连接，以满足变力臂的工作要求。

其特点是将常规游梁抽油机的固定四连杆机构改为可变四连杆机构，利用尾驴头摆

动时,后毛辫子与驴头弧面接触点的改变来改变后臂长和后臂与前臂的夹角,按照驴头负荷增大时有效后臂长变长,而驴头负荷减小时有效后臂长变短的原则设计后驴头曲面,其结构如图 4-5 所示。

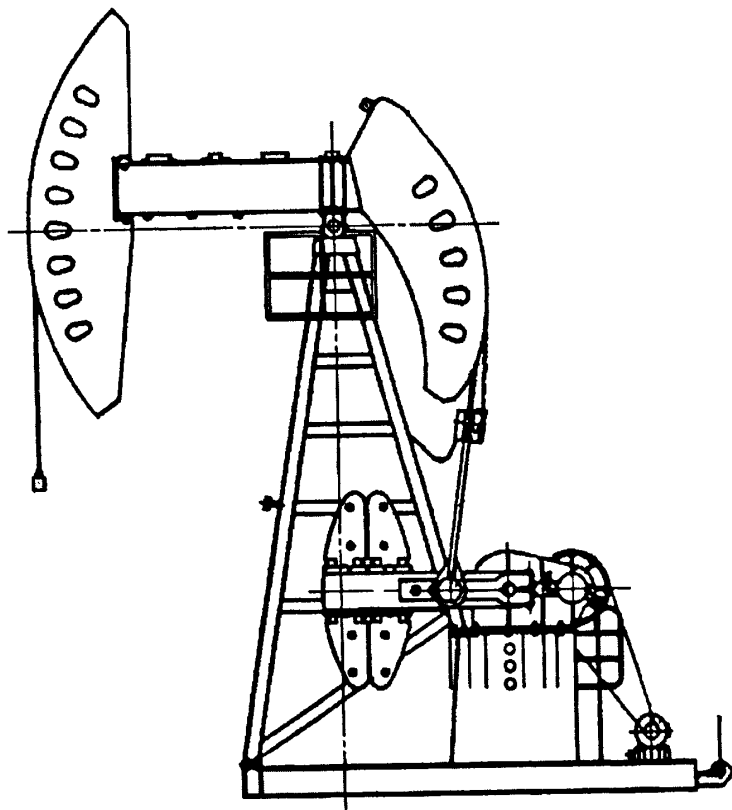


图 4-5 双驴头抽油机结构示意图

Fig4-5 The structural drawing of the double-horse head beam pumping unit

这种结构使得后臂长的变化规律满足载荷大时平衡力矩大,载荷小时平衡力矩小,使得平衡扭矩尽可能地拟合载荷扭矩的变化,从而使抽油机运行时净扭矩变化不大,从而降低了减速箱的峰值扭矩,一般可降低 20~60%;启动电流减小 20~77%;最大工作电流减小 60~70%;能耗可降低 20~60%;所配电动机功率减小 20~70%;运行平稳,易启动。所需电网容量可降低 50%左右,供电设备投资低,电路损耗降低 30~90%。并且克服了常规游梁抽油机游梁摆动死角,增大游梁摆角,使冲程提高 20~70%,在大冲程条件下有效地减轻整机重量。同时由于存在可变极位夹角,当驴头在右侧,曲柄顺时针旋转时,上慢下快,适用了稀油油井采油;旋转方向相反时,下慢上快,适用于稠油油井采油。双驴头抽油机尽管存在后驴头软连接的弱点,但可采取备用毛辫子的措施,部分克服软连接的弱点^[42]。

4.2.2 双驴头抽油机运动学分析

(1) 后驴头与驱动绳切点坐标的求取^[48]

双驴头抽油机的游梁后臂采用了由变径圆弧构成的后驴头，有效后臂长度在运动过程中随驱动绳与后驴头的切点的变化而不断变化，切点的运动轨迹与后驴头形状有关，所以求解常规游梁式抽油机运动参数的解析方法无法用于双驴头抽油机运动参数的求解。求解双驴头抽油机运动参数的关键是求解驱动绳与后驴头切点的变化规律，根据双驴头抽油机的运动特点可知悬点位置可由切点位置来确定，而切点位置随曲柄转角变化。因此，切点位置与曲柄转角之间的函数关系属于超越方程，在求解数学模型时，采用了迭代法。

求解双驴头抽油机的悬点位移、速度、加速度的关键是建立游梁摆角与曲柄转角之间的关系，而要建立这一关系则首先要确定驱动绳在后驴头上的切点的位置，详细的推导过程如下。

建立如图 4-6 所示，以 O 为原点的平面直角坐标系，建立好坐标系后，对其进行分析，现将已知的条件列出如下。

图中 O——曲柄的旋转中心，也是坐标系的原点；

O_1 ——游梁摆动支点，也是后驴头的旋转中心， O_1 点的坐标为 (L,H)；

O_2 ——后驴头圆心；

D_0 ——后驴头上悬挂驱动绳的点；

E——后驴头圆弧的末端；

Q——驱动绳与后驴头的切点；

ω ——曲柄旋转的角速度，rad/s；

R——曲柄半径，m；

L——游梁前臂长度，m；

θ ——曲柄的转角，以十二点方向为起点，顺时针方向为正，°；

D——曲柄销的位置，D 点任一时刻的坐标为 ($R \sin \theta$, $R \cos \theta$)；

R_{O_2} ——后驴头的半径，m；

γ —— $O_1 O_2$ 与游梁夹角（为固定值），°；

δ ——游梁所在的直线与 x 轴之间的夹角，向下为正，向上为负，°；

φ —— O_1E 所在的直线与游梁后臂的夹角, (为固定值), $^\circ$;

L_s ——驱动绳和连杆的总长度, 对于某一型号的双驴头抽油机, 为定值, m。

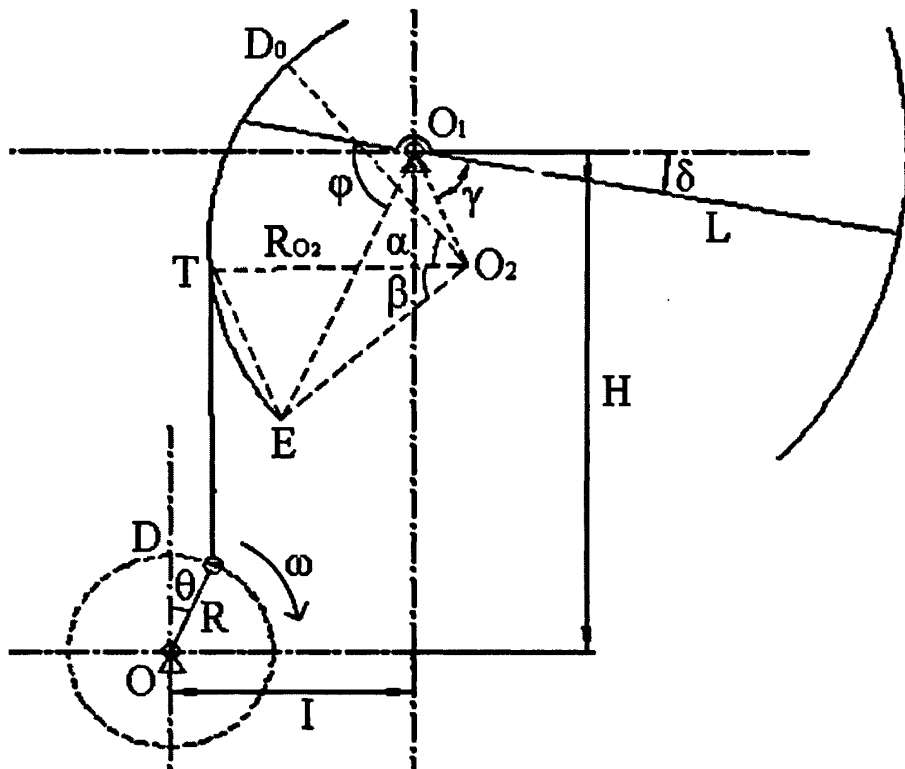


图 4-6 双驴头抽油机几何简图

Fig4-6 The geometric diagram of the double-horse head beam pumping unit

在任意时刻, 对应曲柄的转角 θ , 就可以得到 D 、 O_2 、 E 各点的坐标:

$$x_D = R \sin \theta \quad (4-33)$$

$$y_D = R \cos \theta \quad (4-34)$$

$$x_{O_2} = |O_1O_2| \cos(\gamma + \delta) \quad (4-35)$$

$$y_{O_2} = |O_1O_2| \sin(\gamma + \delta) \quad (4-36)$$

$$x_E = I - |O_1E| \cos(\varphi - \delta) \quad (4-37)$$

$$y_E = H - |O_1E| \sin(\varphi - \delta) \quad (4-38)$$

由于在任意时刻, $O_2Q \perp DQ$, 于是就有直线 O_2Q 与直线 DQ 的斜率乘积等于-1,

因此有如下方程：

$$\frac{y_Q - y_D}{x_Q - x_D} \cdot \frac{y_Q - y_{O_2}}{x_Q - x_{O_2}} = -1 \quad (4-39)$$

Q 点是圆 O_2 上的点，所以其坐标满足圆 O_2 的方程，于是就有：

$$(x_Q - x_{O_2})^2 + (y_Q - y_{O_2})^2 = R_{O_2}^2 \quad (4-40)$$

因为无论在什么情况下，连杆与驱动绳的长度总和为定值，即直线段 DQ 与圆弧 $\widehat{D_0Q}$ 的长度之和为定值，在这里，我们暂设 $\angle D_0O_2Q$ 的大小为 α ， $\angle EO_2Q$ 的大小为 β ，则有：

$$|DQ| + \widehat{D_0Q} = L_s \quad (4-41)$$

直线 DT 的长度为：

$$|DQ| = \sqrt{(x_Q - x_D)^2 + (y_Q - y_D)^2} \quad (4-42)$$

圆弧 $\widehat{D_0Q}$ 的长度为：

$$\widehat{D_0Q} = R_{O_2}^2 = \widehat{D_0E} - \beta R_{O_2} \quad (4-43)$$

在三角形 $\triangle EO_2Q$ 中，利用余弦定理得到：

$$\beta = 2 \arcsin \frac{|EQ|}{2R_{O_2}} \quad (4-44)$$

$$|EQ| = \sqrt{(x_E - x_Q)^2 + (y_E - y_Q)^2} \quad (4-45)$$

将式 (4-33)、(4-34)、(4-35)、(4-36)、(4-37)、(4-38) 和式 (4-42)、(4-43)、(4-44)、(4-45) 代入方程 (4-39)、(4-40)、(4-41) 中，消去中间变量就可得到关于 θ 、 δ 、 x_Q 、 y_Q 的方程。这里需要注意， θ 是自变量，我们的目的是求得由 θ 表示的 x_Q 、 y_Q 的解析式，即切点 Q 的坐标。由 (4-39)、(4-40)、(4-41) 式得到的方程化简如下：

$$\frac{y_Q - R \cos \theta}{x_Q - R \sin \theta} \cdot \frac{y_Q - |O_1O_2| \cos(\gamma + \delta)}{x_Q - |O_1O_2| \sin(\gamma + \delta)} = -1 \quad (4-39a)$$

$$[x_Q - |O_1O_2| \cos(\gamma + \delta)]^2 + [y_Q - |O_1O_2| \sin(\gamma + \delta)]^2 = R_{O_2}^2 \quad (4-40a)$$

$$\sqrt{(x_Q - R \sin \theta)^2 + (y_Q - R \cos \theta)^2} + \widehat{D_0 E} - L_s = 2R_{O_2} \arcsin \left(\frac{\sqrt{[x_Q - |O_1 E| \cos(\varphi - \delta)]^2 + [y_Q - |O_1 E| \sin(\varphi - \delta)]^2}}{2R_{O_2}} \right) \quad (4-41a)$$

以上三个方程中, 因为 θ 是自变量, 可以随便取 $(0, 360^\circ)$ 之间的值, 所以就只含有三个未知数, 这样任意给定一个 θ , 就可以求出对应的切点坐标。

在这里, 由以上方程联立组成的方程组中含超越方程, 无法直接用算术的方法求解, 所以我们借助于计算机编程, 采用迭代的方法求解, 具体的求解步骤如下:

①先假定一个 θ 对应的 δ' 的值;

②由式 (4-33) ~ (4-38) 分别求出 D 、 O_2 、 E 点的坐标。

③再将 D 、 O_2 、 E 点的坐标代入 (4-39)、(4-40) 就可得到切点 Q 的坐标值。

④再由切点的坐标值代入方程 (4-41) 反求出 δ'' 的值, 对比 δ' 与 δ'' 的差值, 直到 $|\delta' - \delta''| \leq \varepsilon$ (ε 的值可取得非常小), 就认为此时曲柄的转角对应的切点坐标是所求的切点坐标, 则 $\delta = \delta''$, 计算完毕, 否则, 令 $\delta' = \delta''$, 重复②~④步的计算。

综上所述, 就求得了不同的曲柄转角下驱动绳与后驴头的切点坐标。

(2) 悬点位移方程的建立

还是以图 4-6 为例, 曲柄末端 D 点任一时刻的坐标为 $(R \sin \theta, R \cos \theta)$, 由于连杆的软硬连接在任意时刻都在一条直线上, 我们可将其视为全是软连接, 该连接所在直线与后驴头切点 Q 的坐标为 (x_Q, y_Q) , 该坐标可由上一节的方法求得。则任一时刻软硬连接所在直线 DQ 的斜率为:

$$k_{DQ} = \frac{y_Q - R \cos \theta}{x_Q - R \sin \theta} \quad (4-46)$$

由于 $DQ \perp O_2 Q$, 因此, 任一时刻直线 $O_2 Q$ 的斜率为:

$$k_{O_2 Q} = -\frac{1}{k_{DQ}} = -\frac{x_Q - R \sin \theta}{y_Q - R \cos \theta} \quad (4-47)$$

设直线 $O_2 Q$ 的方程为,

$$y = k_{O_2 Q} x + b \quad (4-48)$$

把特殊点 $Q(x_Q, y_Q)$ 代入式 4-48, 可求得参数 b 的值:

$$b = y_Q + \frac{x_Q - R \sin \theta}{y_Q - R \cos \theta} x_r \quad (4-49)$$

又已知 O_2 点的运动轨迹为以抽油机支点 O_1 为圆心, 以 $|O_1O_2|$ 长为半径的圆, 由已知可知 O_2 点的坐标 (x, y) 满足方程:

$$(x - I)^2 + (y - H)^2 = R_{O_2}^2 \quad (4-50)$$

将式 4-48 代入式 4-50 求解可得到 O_2 点的坐标 (x, y) 的值, 在任一时刻有:

$$\begin{cases} x = \frac{B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \\ y = k_{O_2Q} \frac{B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} + b \end{cases} \quad (4-51)$$

上式中:

$$A = k_{O_2Q}^2 + 1, \quad B = I - k_{O_2Q}(b - H), \quad C = I^2 + (b - H)^2 + |O_1O_2|^2$$

此时由 O_2 点的坐标 (x, y) 的值就可以求得 O_1O_2 所在的直线与 x 轴之间的夹角 φ , 见下式:

$$\varphi = \arctg(y/x) \quad (4-52)$$

$$\varphi = \delta + \gamma \quad (4-53)$$

由式 4-52 得

$$\delta = \varphi - \gamma \quad (4-54)$$

于是该抽油机悬点的位移为:

$$S = L(\delta/180) \quad (4-55)$$

(3) 悬点速度、加速度方程的建立^{[45][46][49]}

由于双驴头抽油机的游梁后臂长度时刻都是变化的, 这就使得双驴头抽油机的四连杆机构是变参数的四连杆机构, 如图 4-7 所示。

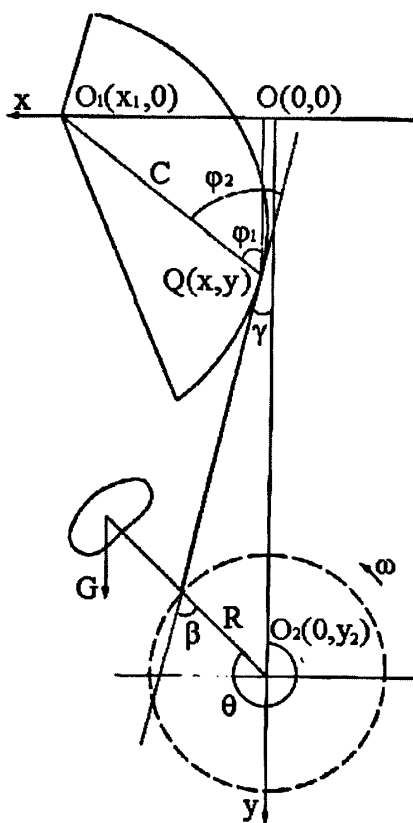


图 4-7 双驴头抽油机变四连杆运动结构示意图

Fig4-7 The structural drawing of the 4-linkage beating-up movement of the double-horse head beam pumping unit

以减速箱输出轴中心和游梁水平线的交点为原点 $O(0,0)$ 建立平面直角坐标系，则抽油机支点（游梁的摆动中心）的坐标为 $O_1(x_1,0)$ ，曲柄的旋转中心坐标为 $O_2(0,y_2)$ 。

图中 R ——曲柄的旋转半径，m；

ω ——曲柄旋转的角速度，rad/s；

α ——曲柄在任一时刻的转角（以曲柄在十二点方向为起点，单位°）；

γ ——连杆与 y 轴的夹角；

β ——连杆与曲柄轴中心线的夹角；

$Q(x,y)$ ——连杆力线（软硬连接所在的直线）与后驴头在任一时刻的切点，m；

C —— Q 点到摆动中心的长度，m；

φ_1 ——游梁后臂的视在长度与 y 轴的夹角；

φ_2 ——游梁后臂的视在长度与连杆的夹角。

如图 4-7 所示，曲柄旋转的角速度 ω 是抽油机的电动机经减速箱减速后所拥有的转速，可以视为定值。则在任一时刻：

$$\theta = \omega t \quad \theta \in (0, 2\pi) \quad (4-56)$$

$$\beta = 2\pi - \theta + \gamma \quad \beta \in (0, 2\pi) \quad (4-57)$$

由图中的几何关系可知：

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{R \sin(2\pi - \theta) - x}{y_2 - R \cos(2\pi - \theta) - y} \quad (4-58)$$

于是可得：

$$\gamma = \arctg \left[\frac{R \sin(2\pi - \theta) - x}{y_2 - R \cos(2\pi - \theta) - y} \right] \quad \gamma \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \quad (4-59)$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{x_1 - x}{y} \right) \quad \varphi \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \quad (4-60)$$

$\varphi \geq 0$ 时， $\varphi_1 = \varphi$

$\varphi \leq 0$ 时， $\varphi_1 = \varphi + \pi$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \gamma \quad \varphi_2 \in (0, \pi) \quad (4-61)$$

$$C' = \sqrt{(x_1 - x)^2 + y^2} \quad (4-62)$$

设 K 为游梁后臂的有效长度（m），游梁的前臂长为定值，设为 L 。

$$K = C' \sin \varphi_2 \quad (4-63)$$

在这里，只要求出 Q 点相对于 O_1 点的角速度和角加速度，就可以求出悬点的速度和加速度。

曲柄与连杆的连接点在连杆力线所在方向上的分速度可以表示为：

$$V_1 = R\omega \sin \beta \quad (4-64)$$

由速度的分解和合成可以得到 Q 点在垂直于 O_1Q 方向上的角速度为：

$$\omega_1 = \frac{V_1}{K} \quad (4-65)$$

所以悬点运动的速度就可以表示为：

$$V_A = \frac{LR\omega \sin \beta}{K} \quad (4-66)$$

式中 V_A ——悬点的运动速度, m/s;

x, y ——切点 Q 的坐标值;

L ——游梁的前臂长, m。

悬点运动的加速度是悬点速度对时间 t 的导数, 所以悬点的加速度为:

$$a_A = \frac{LR\omega^2 \cos \beta}{K} \quad (4-67)$$

扭矩因数, 可用下式计算:

$$\overline{TF} = \frac{LR \sin \beta}{K} \quad (4-68)$$

综上, 在用几何的方法求得了双驴头抽油机悬点运动的位移、速度和加速度的解析式之后, 将其计算切点的迭代方法编制一个计算机程序, 就可以求得双驴头抽油机运动参数的精确解。

4.2.3 双驴头抽油机动力学分析

取游梁为分析对象^[44], 由双驴头抽油机游梁受力简图 4-8 可知:

$$R_{23} \left(L_c - L_e \cos \left(\gamma + \delta + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right) = PA + J_b \varepsilon_b + G_y L_0 \cos(\alpha - \delta) \quad (4-69)$$

所以钢丝绳受力 R_{23} 为:

$$R_{23} = \frac{PA + J_b \varepsilon_b + G_y L_0 \cos(\alpha - \delta)}{\left(L_c - L_e \cos \left(\gamma + \delta + \varphi_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right)} \quad (4-70)$$

式中 J_b ——游梁转动惯量, $t \cdot m^2$;

ε_b ——悬点加速度, s^{-2} ;

G_y ——游梁和驴头的重量, kN;

L_0 ——游梁和驴头重心 O_c 距离支撑中心的距离, m;

α —— L_0 与前臂的夹角, $^\circ$ 。

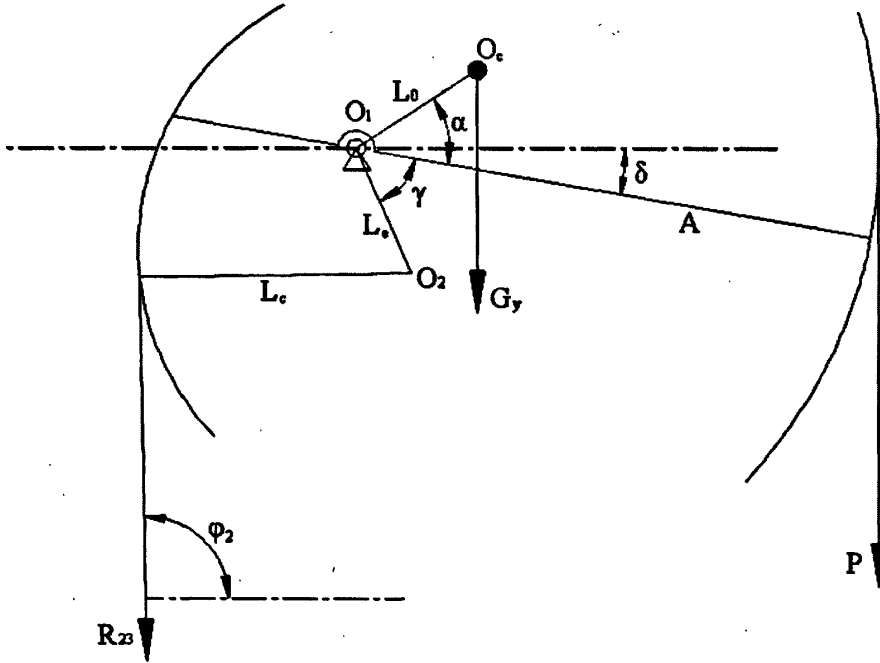


图 4-8 双驴头抽油机游梁受力简图

Fig4-8 Force analysis of the beam of the double-horse head pumping unit

支架水平受力 R_x （指向井口为正）为：

$$R_x = R_{23} \cos \varphi_2 \quad (4-71)$$

支架垂直受力 R_y （向上为正）为：

$$R_y = -(P + G_y + R_{23} \sin \varphi_2) \quad (4-72)$$

取曲柄为分析对象，如图 4-9 所示，有：

由曲柄受力简图可知曲柄轴水平受力 R_{ox} （指向井口为正）为：

$$R_{ox} = -R_x \quad (4-73)$$

曲柄轴垂直受力 R_{oy} （向上为正）为：

$$R_{oy} = R_{23} \sin \varphi_2 - G_q - G_R \quad (4-74)$$

式中 G_q ——曲柄平衡块重，kN；

G_R ——曲柄自重，kN。

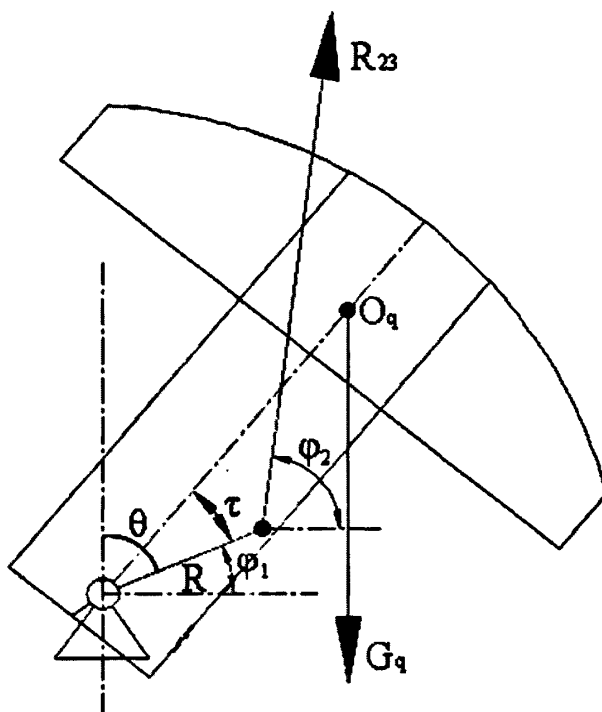


图 4-9 双驴头抽油机曲柄受力简图

Fig4-9 Force analysis of the crank of the double-horse head pumping unit

减速箱输出轴净扭矩 T_n 为:

$$T_n = R_{23}R \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - G_q L_q \sin(\theta - \tau) - G_R \frac{L_R}{2} \sin(\theta - \tau) \quad (4-75)$$

式中 L_R ——曲柄长, m;

L_q ——曲柄平衡块重心 O_q 至曲柄轴的距离, m;

τ ——平衡相位角, $^\circ$ 。

双驴头抽油机由于柔性件和驴头圆弧始终相切, 使该机构的压力角为 0° , 传动角为 90° , 从而改善了抽油机的效率。

4.3 本章小结

本章介绍了实验中所用的两种抽油机(常规后置型和双驴头型)的运动学和动力学, 推算出抽油机悬点位移、速度、加速度和扭矩随时间或曲柄旋转角的变化规律, 为利用电机输出扭矩推算示功图奠定理论基础。

第五章 信号的小波去噪与频谱分析

5.1 信号的小波去噪

5.1.1 信号去噪方法的比较

油田现场工作环境恶劣，各种电磁干扰严重，而检测系统中电压、电流互感器输出为毫伏级微弱信号，在采集过程中不可避免的会引入电磁干扰，严重时干扰信号甚至会淹没真实的测量信号。因此如何从受噪声干扰的信号中得到真实的信号是检测系统准确地检测抽油机电机输出转矩的关键，直接影响到检测系统的可靠性和测试的精度。在实际应用中，为降低噪声的影响，不仅应研究信号采集的方式及信号调理电路的设计，更重要的是对采集的信号寻找最佳的降噪处理方法。

在传统的信号去噪方法中，最常用的是频域里的滤波方法（如傅立叶变换）以及时域里的平均方法（如算术平均滤波）。滤波方法对去除信号和噪声频带相互分离的确定性噪声较为有效，但对随机噪声（例如白噪声），其去噪效果则较差。时域平均方法在对信号进行足够多次的平均处理后能较有效的去除随机噪声，但它要求信号必须有充分的长度来保证平均所需的样本数。然而，实际信号的长度一般都是有限的，尤其是对于那些持续时间很短的信号，平均方法的使用将会受到很大限制^[50]。

而小波变换（Wavelet Transform）是继傅立叶变换后的一重大突破，它是一种窗口面积恒定、窗口形状可变（时间域窗口和频率域窗口均可改变）的时频局域化分析方法，它具有这样的特性：在低频段具有较高的频率分辨率及较低的时间分辨率，在高频段具有较高的时间分辨率及较低的频率分辨率，实现了时频窗口的自适应变化，具有时频分析局域性。将小波变换用于信号去噪，它能在去噪的同时而不损坏信号的突变部分。从原则上讲，凡是传统上使用傅立叶变换的地方，都可用小波变换来代替。小波变换在时域和频域同时具有良好的局部化特性，克服了传统傅立叶变换的不足，而且由于它对高频采取逐渐精细的时域步长，从而可以聚焦到被分析信号的任意细节，因此小波变换具有数学显微镜的美称^{[51][52]}。

作为一种新的信号处理工具，小波变换可根据信号和噪声的不同特性进行非线性滤波，特别适于时变信号和突变信号的噪声滤波，这样可以提高采样数据的可靠性。鉴于小波变换在信号去噪方面的优异性，本系统采用小波变换对转矩信号进行去噪处理。

5.1.2 信号去噪的小波分析原理

传统的基于傅立叶变换的信号去噪，要使信号与噪声的频带重叠得尽可能的少，这

样,就可以在频域通过时不变滤波方法将信号与噪声分离开来;但是当信号和噪声的频域大量重叠时,这种方法就不行了。而另一方面,信号 $f(t)$ 的性质可以用它的小波系数来刻画,小波系数较大者,携带的信号能量较多,而小波系数较小者携带的信号能量较少,因此可以用携带信号能量的多少作为衡量小波系数在信号中的权重大小。由于小波变换具有一种“集中”的能力,可以使信号的能量在小波变换域集中于少数系数上,这些系数的取值远大于能量分散于大量小波系数上的信号或噪声的小波系数值。如果引入以信号能量为判据阈值作为甄别受到噪声污染的小波系数时,情况就截然不同了。随着噪声能量强弱变化,可以选择合适的值(甚至可以是浮动的),将小于等于阈值的小波系数视为零而舍去,实际上也就是把这些数值作为噪声处理。仅用阈值以上的数据(即小波系数)来重建原信号。既去掉了大部分噪声,又不会引起重建信号 $\bar{f}(t)$ 的明显失真,这就是基于小波阈值去噪方法的基本思想^[53]。

一个含噪声的一维信号的模型可以表示成如下的形式

$$s(i) = f(i) + \sigma e(i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5-1)$$

其中, $f(i)$ 为真实的信号, $e(i)$ 为噪声, $s(i)$ 为含噪声的信号。

在这里,我们以一个最简单的噪声模型加以说明,即认为 $e(i)$ 为高斯白噪声 $N(0,1)$, 噪声级 (Noise Level) 为 1。在实际的工程中,有用信号通常表现为低频信号或是一些比较平稳的信号,而噪声信号则通常表现为高频信号。所以去噪过程可按如下方法进行处理:首先对信号 S 进行小波分解(如进行三层分解,分解过程如图 5-1 所示),则噪声部分通常包含在 $cD1$ 、 $cD2$ 、 $cD3$ 中,因而可以以门限阈值等形式对小波系数进行处理,然后对信号进行重构即可以达到去噪的目的。对信号 $s(i)$ 去噪的目的就是要抑制信号中的噪声部分,从而在 $s(i)$ 中恢复出真实信号 $f(i)$ 。

一般来说,一维信号的去噪过程可分为三个步骤进行:

(1) 一维信号的小波分解。选择一个小波并确定一个小波分解的层次 N , 然后对信号 S 进行 N 层小波分解;

(2) 小波分解高频系数的阈值量化。对第 1 到第 N 层的每一层高频系数,选择一个阈值进行阈值量化处理;

(3) 一维小波的重构。根据小波分解的第 N 层的低频系数和经过量化处理后的第

1 层到第 N 层高频系数，进行一维信号的小波重构。

在这三个步骤之中，最关键的就是如何选取阈值和如何进行阈值的量化，从某种程度上说，它直接关系到信号去噪的质量^[54]。

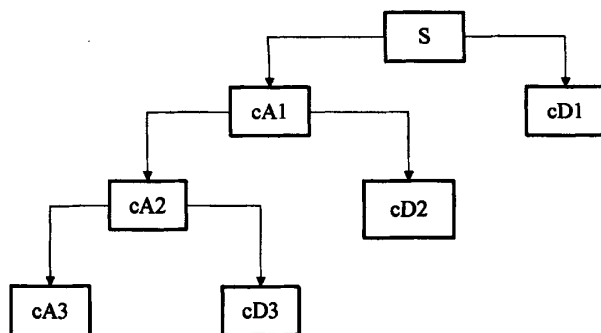


图 5-1 小波分解

Fig5-1 Diagram wavelet dissection

5.1.3 小波去噪的方法

在实际的工程应用中，所分析的信号可能包含许多尖峰或突变部分，并且噪声也不是平稳的白噪声，对这种信号进行分析，首先需要作信号的预处理，将信号的噪声部分去除，提取有用信号。而这种信号的去噪，用传统的傅立叶变换分析，显得无能为力。因为傅立叶分析是将信号完全在频域中进行分析，它不能给出信号在某个时间点上的变化情况，信号在时间轴上任何一个突变，都会影响信号的整个频谱图。而小波分析能同时在时频域内进行分析，在频域内分辨率低时，时域内分辨率则高，具有自动变焦的功能，所以它能有效地区分信号中突变部分和噪声，从而实现信号的去噪。

小波去噪的方法有很多种，归结起来有模极大值检测法、阈值去噪法、屏蔽去噪法^[55]等。其中最常用的就是阈值去噪法，目前很多去噪法都是基于阈值去噪。关于这三种去噪方法可以参考相关文献，这里不再介绍。这里介绍一下阈值去噪法中最为关键的一个环节：阈值的选择。

小波阈值处理方法，主要有硬阈值、软阈值和几乎硬阈值以及一个带一般化参数 α 阈值策略的分数幂阈值处理等几种方法。阈值的选取是比较灵活的，选取的规则一般也可以根据具体的情况而进行合适的取舍。

（1）硬阈值法和软阈值法

常用的阈值处理方法有硬阈值法(Hard Shrinkage)和软阈值法(Soft Shrinkage)^[56, 57]。它们的定义如下：

①硬阈值法

$$WT = \begin{cases} WT & |WT| > Th \\ 0 & |WT| \leq Th \end{cases} \quad (5-2)$$

其中 WT 为小波系数, Th 为阈值。上式的含义即把信号的小波系数的绝对值和阈值进行比较, 小于或等于阈值的点变为 0, 大于阈值的保持不变, 如图 5-2 所示。

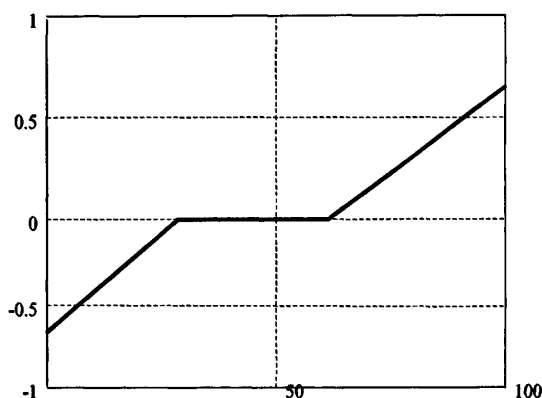


图 5-2 硬阈值处理

Fig5-2 Diagram of hard thresholding process

②软阈值法

$$WT = \begin{cases} \text{sign}(WT)(|WT| - Th) & |WT| > Th \\ 0 & |WT| \leq Th \end{cases} \quad (5-3)$$

其中 WT 为小波系数, Th 为阈值, 上式的含义为把信号的小波系数的绝对值和阈值进行比较, 小于或等于阈值的点变为 0, 大于阈值的点变为该点值与阈值的差值, 并保持符号不变, 如图 5-3 所示。

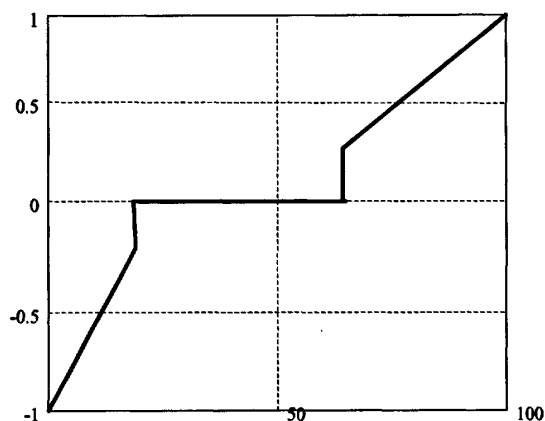


图 5-3 软阈值处理

Fig5-3 Diagram of soft thresholding process

虽然硬阈值是简单的方法，软阈值却可以获得比硬阈值更好的结果。原因是由于硬阈值将绝对值小于阈值的元素置 0，所以在 $\pm Th$ 处会产生不连续的情况，而软阈值在 $\pm Th$ 处是连续的。

(2) 几乎硬阈值法

几乎硬阈值法（Hyperbolic Shrinkage 或 Almost Hard Shrinkage）定义为

$$WT = \begin{cases} \text{sign}(WT) \sqrt{(|WT|^2 - Th^2)} & |WT| > Th \\ 0 & |WT| \leq Th \end{cases} \quad (5-4)$$

(3) 分数幂模型

此阈值处理方法，是构造了一个一般化的带有参数 α 的阈值策略分数幂模型（Fractional Power Model），该模型描述如下

$$WT = \begin{cases} \text{sign}(WT) (|WT|^\alpha - Th^\alpha)^\alpha & |WT| > Th \\ 0 & |WT| \leq Th \end{cases} \quad (5-5)$$

前面硬阈值、软阈值和几乎硬阈值三种方法可以看作是这个模型的三个特例，分别对应于 $\alpha = \pm\infty$ 、 $\alpha = 1$ 和 $\alpha = 2$ [56]。

图 5-4 表示将一个信号加入白噪声，然后用傅立叶分析方法和小波分析方法同时对加入白噪声的信号进行消噪处理。

由图 5-4(d)中可以看出，白噪声具有均匀的功率谱密度，也就是说能量均匀分布在各个频率段上。图 5-4(e)则分别表示用 sym8 小波进行三层分解并使用浮动阈值进行小波系数阈值量化消噪后的信号波形。图 5-4(f)为使用传统的基于傅立叶变换的滤波器进行滤波去噪后的波形。从图中可以看出，用小波进行信号的消噪可以很好地保存有用信号中的尖峰和突变部分。而用傅立叶变换进行滤波时，由于信号集中在低频部分，而噪声是均匀地分布在各个频率，因此，使用传统的基于傅立叶频谱设计的各种滤波器不能有效地将有用信号的频率部分和由噪声引起的在该频率段内的干扰成分加以区分。而且如何选择合适的滤波器宽度是一个不容忽视的问题：若滤波器太宽，则在滤波后，信号中仍存在大量的噪声；若滤波器太窄，则可能将一部分有用信号当作噪声而滤除了。因此，小波分析对非平稳信号消噪有着傅立叶变换所不可比拟的优点。

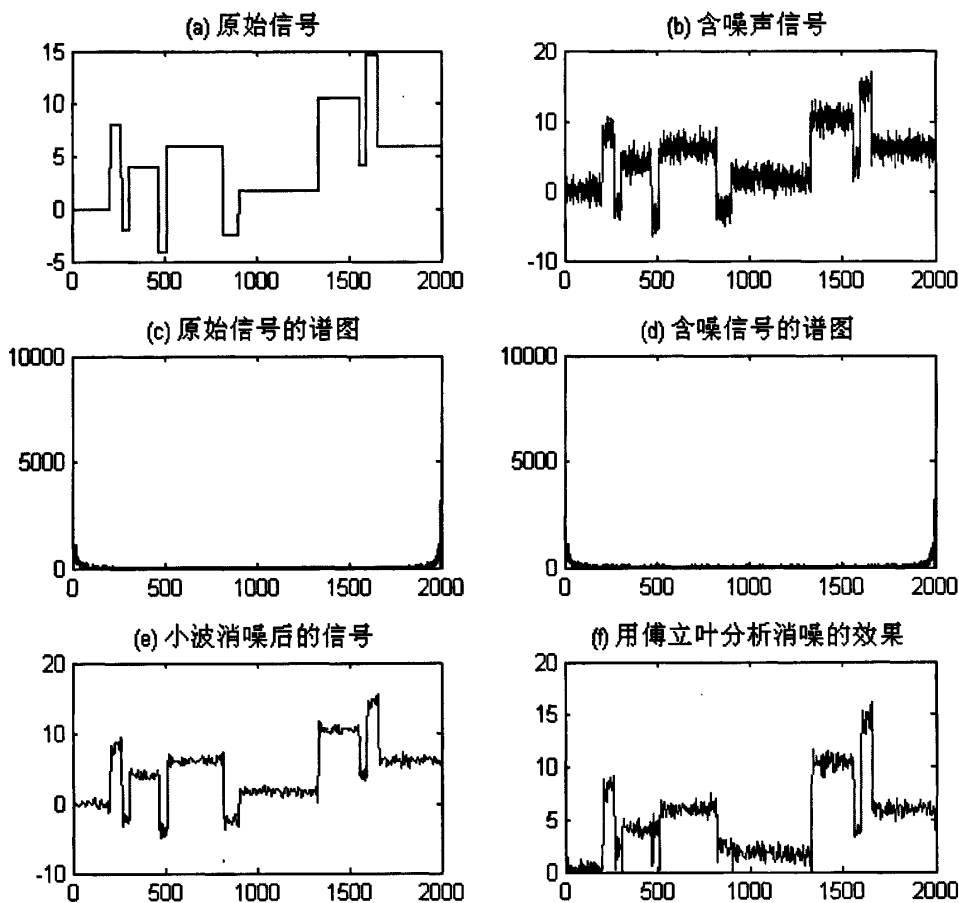


图 5-4 小波变换和傅立叶变换对非平稳信号去噪效果比较

Fig5-4 The difference of the wavelet transform and the fourier transform in decreasing the non-stationary noise

5.2 信号的频谱分析

在动态测试技术中往往需要将时间域信号变换到频率域上加以分析,从频率角度来反映和揭示信号的变化规律,这种频率分析的方法又称为频谱分析方法。对信号进行频谱分析可以获得更多的有用信息,如求得动态信号中的各个频率成分和频率分布范围,求出各个频率成分的幅值分布和能量分布,从而得到主要幅度和能量分布的频率值。常用的频谱分析方法有幅值谱分析、相位谱分析、功率谱分析和倒频谱分析等。

5.2.1 幅值谱分析和相位谱分析

以 T 为周期的信号 $f(t)$ 可以展开为复数形式的傅立叶级数^[58]

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j\omega_n t} \quad (5-6)$$

式中 $\omega_n = \frac{2\pi n}{T}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm \infty$

$$C_n(\omega) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-j\omega_n t} dt = \frac{1}{2} (A_n - jB_n) \quad (5-7)$$

称 C_n 为复振幅函数

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(\omega_n t) dt \quad (5-8)$$

称为实频函数

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(\omega_n t) dt \quad (5-9)$$

称为虚频函数

$$\tan \varphi_n(\omega) = \frac{B(\omega)}{A(\omega)} \quad (5-10)$$

称为相频函数

上述相关的集合 (C_n , A_n , B_n , φ_n) 统称为频谱函数, 且都是离散谱。

对非周期信号 $f(t)$, 用傅立叶积分进行变换

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5-11)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (5-12)$$

如果频率用 f (赫兹) 而不是 ω 表示时, 则上式的系数都是 1, 那么非周期信号 $x(t)$ 的傅立叶变换为:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5-13)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (5-14)$$

5.2.2 功率谱分析

(1) 自功率谱密度函数

随机信号的自功率谱密度函数 (简称功率谱) 是该随机信号自相关函数的傅立叶变换, 记作 $S_x(f)$ 。

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5-15)$$

$$R_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5-16)$$

$S_x(f)$ 也称为均方谱密度函数, 简称自谱。其意义是每单位频带内的谐波均方值, 即相当于能量, 所以自谱表征能量按频率的分布情况。自谱是随机过程中最重要的特征参数之一。

自谱的主要性质有:

① 密度曲线下的面积等于均方值;

② 是 ω 的实非负偶函数;

③ $S_x(f) = S_0$, 为常数时 ($-\infty \leq f \leq \infty$) 的 $X[t]$ 称为理想白噪声。当等幅自谱为有限带宽时, 有

$$S_x(f) = \begin{cases} S_0 \\ 0 \end{cases} \quad (5-17)$$

随机过程 $X[t]$ 及其导出过程 $\dot{X}[t]$ 、 $\ddot{X}[t]$ 的谱密度之间的关系为

$$S_{\dot{x}}(\omega) = \omega^2 S_x(\omega) \quad (5-18)$$

$$S_{\ddot{x}}(\omega) = \omega^2 S_{\dot{x}}(\omega) = \omega^4 S_x(\omega) \quad (5-19)$$

自谱的用途:

① 分析振动的频率成份和结构;

② 反映动载荷在频率成份上的振动能量与振幅, 从而决定载荷谱, 使得受振动载荷的零部件的设计更为合理;

③ 作为监查重要设备运行并诊断其故障的依据。

(2) 互功率谱密度函数

对平稳随机过程 $X(t)$, $Y(t)$ 的互相关函数进行傅立叶变换, 得

$$C_c(\tau) = F^{-1}[\log S_x(f)] \quad (5-20)$$

称为互谱密度函数 (双边形式), 简称互谱。

互谱密度函数与自谱密度函数有如下关系:

$$|S_{xy}(f)|^2 \leq S_x(f) S_y(f) \quad (5-21)$$

可用一个相关性系数 γ_{xy}^2 来描述, 它取决于频率, 通常称为相干函数或凝聚函数。

$$y_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_x(f)S_y(f)} \leq 1 \quad (5-22)$$

互功率谱函数在工程上的应用包括：大型结构固有频率测定、机器设备的振动监视与故障检测、振动类型研究和模拟随机振动环境等^[59]。

5.2.3 倒频谱分析

倒频谱分析是对频谱的再次谱分析，也称为二次频谱分析，它对具有同族或异族谱波以及多成分边频的频谱图分析非常有效，具有解卷积作用，可以分离和提取原信号或传输系统特性，是检测复杂谱图中周期分量的有用工具。倒频谱的定义主要有两类：一是功率倒频谱，二是复倒频谱。实际上，倒频谱是频域信号取对数的傅立叶变换再处理，或称为“频域信号的傅立叶再变换”。对功率谱密度函数取对数的目的是使再变换以后，信号能量更加集中^[60]。

(1) 功率倒频谱

若时域信号 $x(t)$ 的自谱为 $S_x(f)$ ，则其功率倒频谱定义为

$$C(\tau) = |F[\log S_x(f)]|^2 \quad (5-23)$$

工程应用上常取其平方根作为信号 $x(t)$ 的有效幅值倒频谱

$$C_a(\tau) = \sqrt{C(\tau)} = |F[\log S_x(f)]| \quad (5-24)$$

可见，倒频谱实质上是对频域中自功率谱再做一次谱分析。

(2) 复倒频谱

信号 $x(t)$ 的复倒频谱可定义为

$$C_c(\tau) = F^{-1}[\log S_x(f)] \quad (5-25)$$

在此需说明两点：一是倒频谱的不同定义方法可根据不同应用场合选取；二是倒频谱的自变量的量纲问题。联系到相关函数 $R_x(\tau) = F^{-1}[S_x(f)]$ ，可以看到倒频谱的自变量 τ 具有与函数自变量相同的量纲，即时间量纲。在倒频谱中称此自变量 τ 为“倒频率”。 τ 值大的称为高倒频率，表示在频谱图上的快速波动和密集谱频；与此相反， τ 值小的称为低倒频率，表示在频谱图上的缓慢波动和离散谱频。倒频谱的单位为 dB。

频谱可以十分有效的检测出功率谱中的周期分量。倒频谱可以方便地检测出混有不同族的谱波的复杂信号中的周期信号，这是自相关函数分析无能为力的。

只根据系统输出就有可能求得系统输入及系统特性。复倒频谱可以把信号传递中的各种影响分离出来,能排除某种影响而恢复没有影响的原时间信号。即从所测信号的复倒频谱中减去信号传输途径的传递函数的复倒频谱(这部分通常是低倒频谱),从而可以去掉在传输中所受的影响以获得信号源的信号。

5.3 本章小结

本章介绍了信号的小波去噪原理以及信号的频谱分析原理。首先对小波分析去噪的原理和步骤,进行了详细的说明,重点讨论了小波去噪的阈值处理方法,其次对常用的频谱分析方法,如幅值谱分析、相位谱分析、功率谱和倒频谱进行了介绍。

第六章 实验及结果分析

在前面的章节中介绍了本系统的相关理论，包括系统的总体设计、远程检测终端的设计、抽油机的运动学和动力学、小波分析去噪和信号的频域分析原理。在这一章中，将结合抽油机井系统动态实时分析系统中石油大港油田采油工艺研究院和采油二厂的现场实验，介绍本系统的实验过程以及对实验结果的分析。

本文实验选取了大港油田采油二厂的三口采油井，井号分别为歧 626-1、歧 625-2 和歧 625-1，其中歧 626-1 井和歧 625-2 井的抽油机型号为抚顺石油机械厂的 CYJ12-4.8-73HB 常规型抽油机，歧 625-1 井的抽油机型号为华北石油第一机械厂的 YCYJ10-5-48HB 异形抽油机。这两种抽油机的技术参数和主要几何尺寸如表 6-1 和表 6-2 所示。

表 6-1 抽油机技术参数

Table6-1 The technical parameters of pumping unit

型号	悬点 最大 载荷 kN	冲程 m	曲柄旋转 半径 mm	冲数 min^{-1}	皮带 轮直 径 mm	结构 不平 衡重 kN	曲柄 重心 mm	单块 曲柄 质量 kg	平衡 块数 量， 块	单块 平衡 块质 量 kg
CYJ12-4.8- 73HB	120	3.0,3.6, 4.3,4.8	1000,1200, 1400,1600	4,6,8	190,290, 380	-8.7	1250	2150	4	2275
YCYJ10-5- 48HB	100	3.0,4.0, 5.0	790,1020, 1250	4,5,6	165,205, 245	-5	1000	1160	8	780

表 6-2 抽油机几何尺寸

Table6-2 The geometry property of pumping unit

型号	a	b	L	H	G	H-G	I	r	R	ϕ_0
CYJ12-4.8- 73HB	5600	4000	4540	7300	3000	4300	5220	1000,1200, 1400,1600	5610	-8.7
YCYJ10-5- 48HB	3935	2130	2220	7640	2700	4940	2300	790,1020, 1250	3935	0

附注 表中各尺寸符号意义如下：

a——游梁前臂长度，mm；

b ——游梁后臂长度, mm;

L ——连杆长度, mm;

H ——支架轴承中心至底座底面的高度, mm;

I ——减速箱输出轴中心至支架轴承中心的水平距离, mm;

G ——减速箱输出轴中心至底座底面的高度, mm;

r ——曲柄最大旋转半径, mm;

R ——驴头曲率半径, mm。

6.1 远程检测终端的安装

由于利用了电机直接转矩控制理论, 获得电机的输出转矩只需要测量电机的两相电压和两相电流, 因此, 只需要在抽油机的电机控制柜里加装两个电压互感器和两个电流互感器, 并且在抽油机上安装测量皮带轮转速和上、下死点的接近开关。远程检测终端的安装示意图如图 6-1 所示。

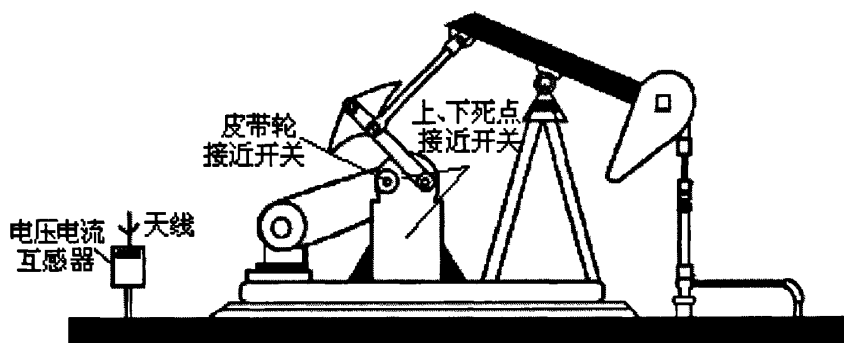


图 6-1 远程检测终端安装示意图

Fig6-1 The erection diagram of the remote detection terminal unit

6.2 GPRS 远程启动检测终端

在实验过程中, 监控中心通过上位机软件利用中国移动的 GPRS 网络远程发送命令给现场检测终端上的 GPRS 无线模块, GPRS 模块接收到上位机发送的命令后, 通过串口把命令传给单片机 LPC2378, LPC2378 会根据不同的命令, 作出相应的反应。如检测终端接收到上位机发送过来的测量命令后, 就会初始化各个传感器, 然后测量各参数, 最后再通过串口把所测量的数据发送给 GPRS 模块, GPRS 模块利用中国移动 GPRS 网络把所测量的数据传送回监控中心的上位机中, 系统的整体结构见图 2-1。

监控中心上位机通过软件远程发送 GPRS 命令时, 首先需要设置电机的一些物理参数。由于每口采油井所用的电机一般不会变动很频繁, 因此, 可把所有的采油井的信息

都存到数据库里，根据井号一一对应，当要测量某一口井时，只需要从数据库中自动把这口井的参数读取出来。图 6-2、6-3 是电压电流调零和电压电流校正设置，表示的是远程检测终端传感器调试的时候需要校正的值，即校正 AD 采样值和实际输入标准信号值一样，如用信号发生器输入一个正弦波，经过 AD 转换后得到的波形要跟它一样，这个功能是远程检测终端安装或维修时需要校正传感器的零点，以减小误差，在装置正常运行后，每次测量时可以不用设置，使用原来设定的值。

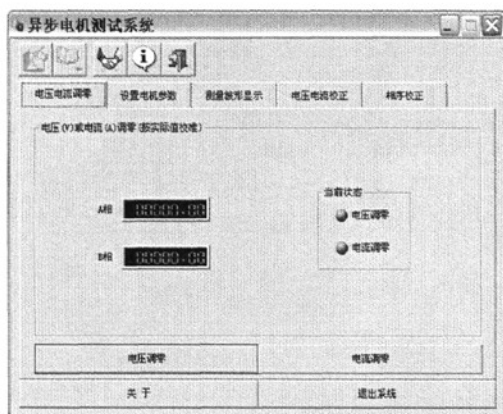


图 6-2 电压电流调零设置

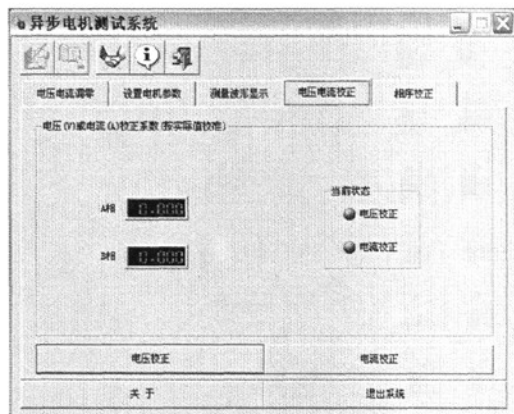


图 6-3 电压电流校正设置

Fig6-2 The zero setting of voltage and current

Fig6-3 The correction of voltage and current

由于使用电机直接转矩控制理论推算转速和电磁转矩，因此预先要知道电机的一些物理参数，如定子电阻、电机极对数等，同样的，这些参数都可以保存在数据库中，测量的时候再读取出来，如图 6-4 设置电机参数页面所示。

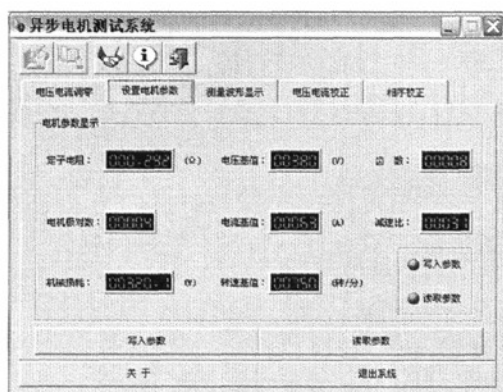


图 6-4 电机参数设置

Fig6-4 The parameter setting of the motor

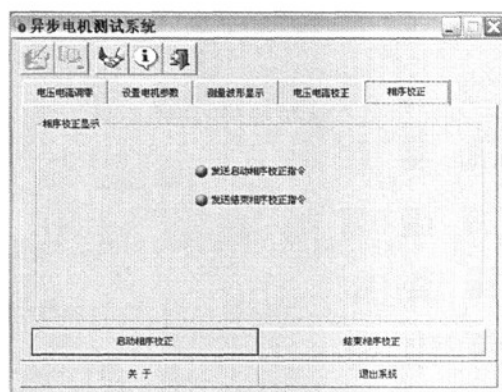


图 6-5 相序校正设置

Fig6-5 The adjustment setting of phase sequence

实际电机绕组的接法有三角形和星形，在远程检测终端中，可以自动判断电机绕组接法以调用不同的算法，通过图 6-5 所示，发送相序校正命令，远程检测终端会检测电机的绕组接法，以调用不同的电机绕组算法。

以上步骤都设置好后,就可以在测量波形显示页面设置传感器数据采样间隔,然后点击“读取波形”,软件将通过 GPRS 方式向远程检测终端发送测量命令,如图 6-6 所示:

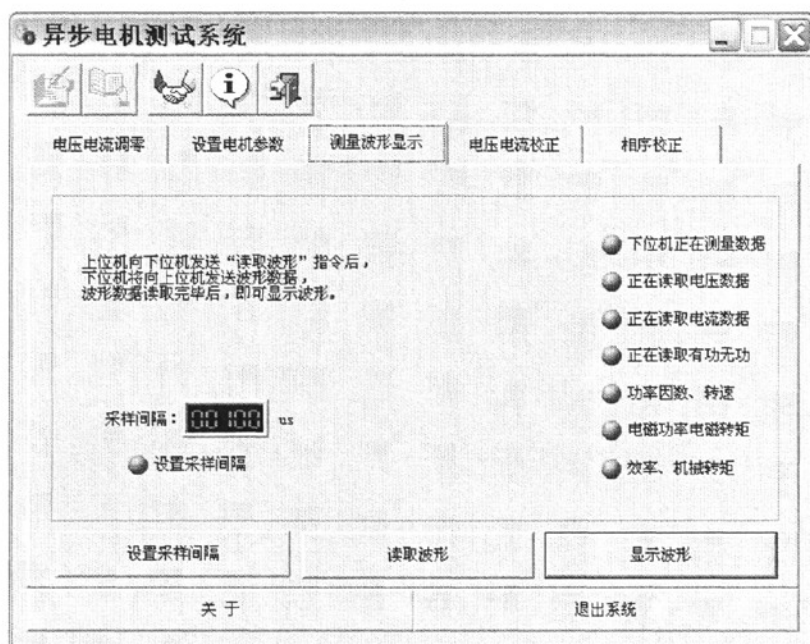


图 6-6 设置采样间隔和读取波形

Fig6-6 The setting of intervals of sampling and waves getting

6.3 小波分析对信号去噪

远程检测终端测量完成后,会把所测量的数据通过 GPRS 发送回监控中心,由于现场噪声、电磁干扰比较严重,数据信号被噪声所污染,以实验的三口抽油机的电流测量信号为例,如图 6-7 所示。

从图 6-7 中可以看出,电流采样信号的“毛刺”较多,显然是受到了一定幅度的干扰,因此无法准确得出电流信号的真实值。由于我国的供电频率为 50Hz,因此,在电机电流的测量中,可以认为电流信号是一低频信号。为了提高信号测量的精度,利用 Matlab 所提供的小波分析工具箱,使用一维离散小波图形工具,采用 db3 小波对电流原始采样信号进行 5 层分解,图 6-8、图 6-9、图 6-10 分别为采油井歧 626-1、歧 625-2 和歧 625-1 所测量电流原始采样信号的各层分解图。

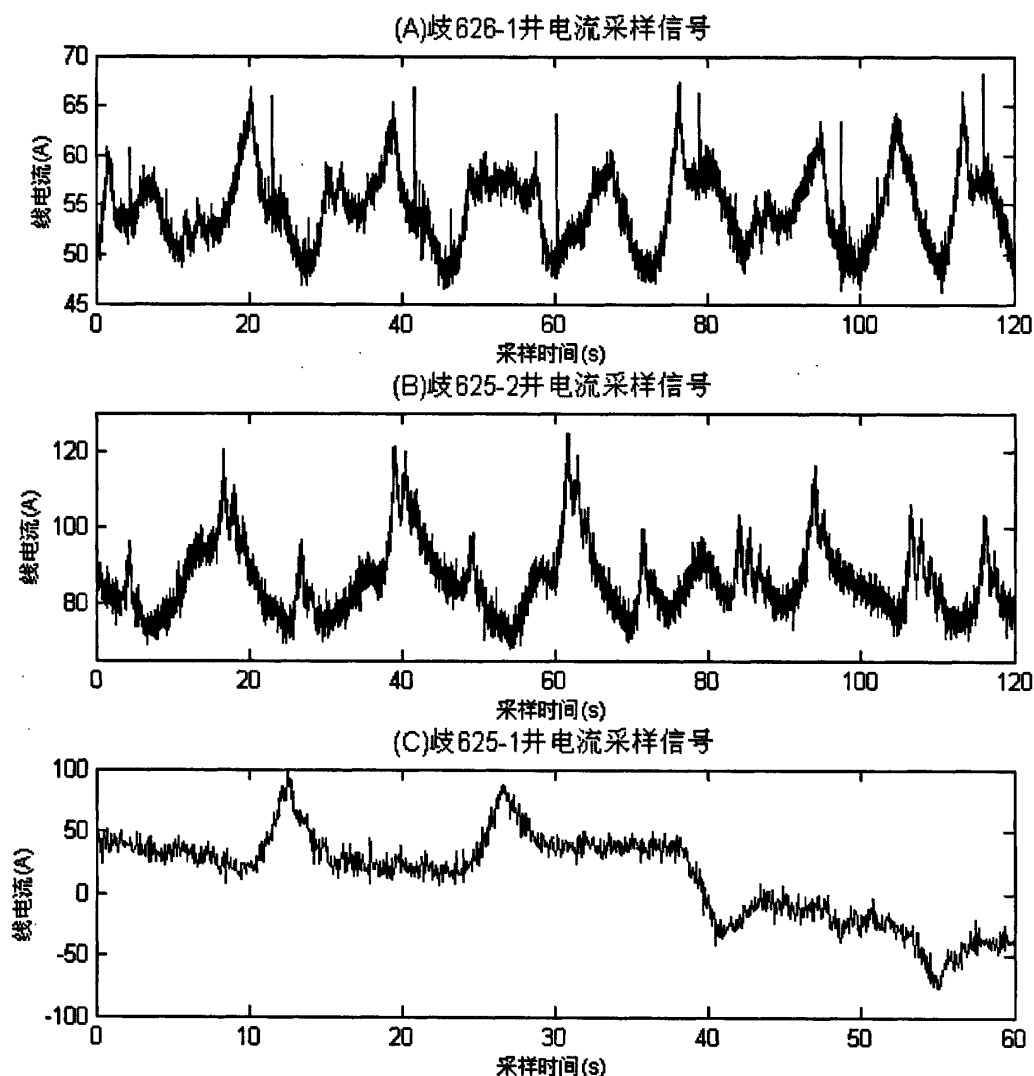


图 6-7 电流原始采样信号

Fig6-7 The initial sampling signals of current

图 6-8、图 6-9、图 6-10 通过小波分解将原始信号的近似特征 a 和细节特征 d 提取了出来。近似特征 a 为 5 层分解，从 a_1 到 a_5 ，为低频信号，细节特征 d 也为 5 层分解，从 d_1 到 d_5 ，为高频信号。由各层高频信号分析可知，在图 6-8 中的 d_1 、 d_4 、 d_5 层的高频信号幅值均不大，可认为是在电流信号的采集过程中引入的噪声干扰。同理，图 6-9 中的 d_3 、 d_4 层和图 6-10 中的 d_3 层也是采集过程中引入的噪声干扰。

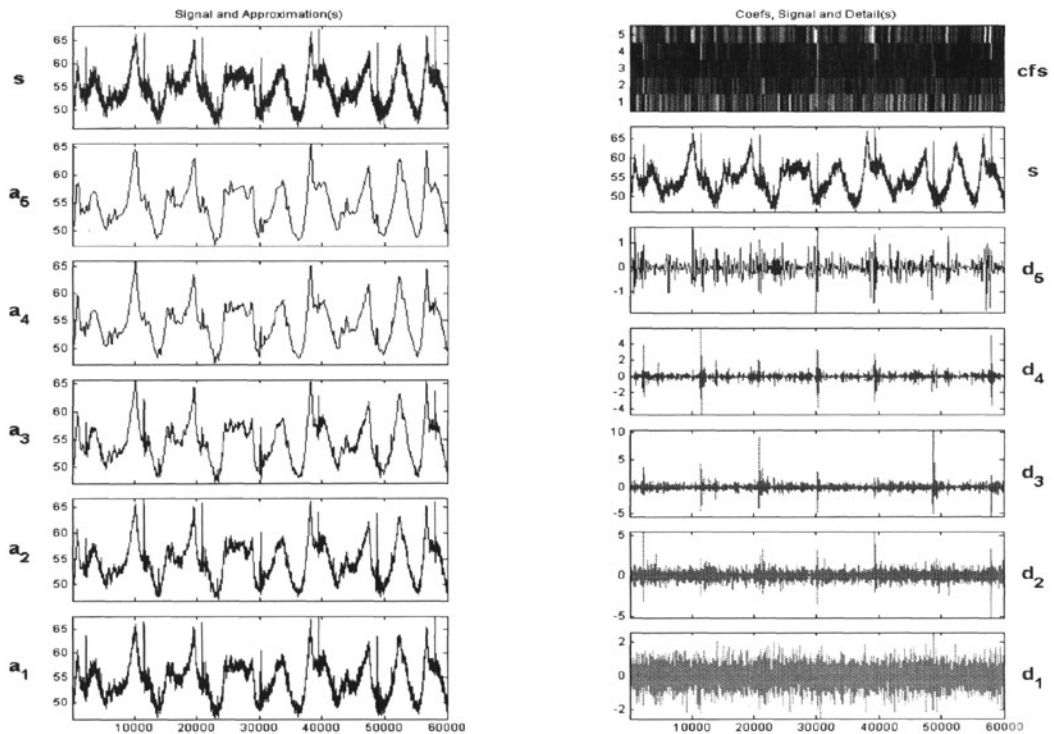


图 6-8 歧 626-1 井电流信号的各层分解

Fig6-8 The dissection of current signals of Q1626-1 well

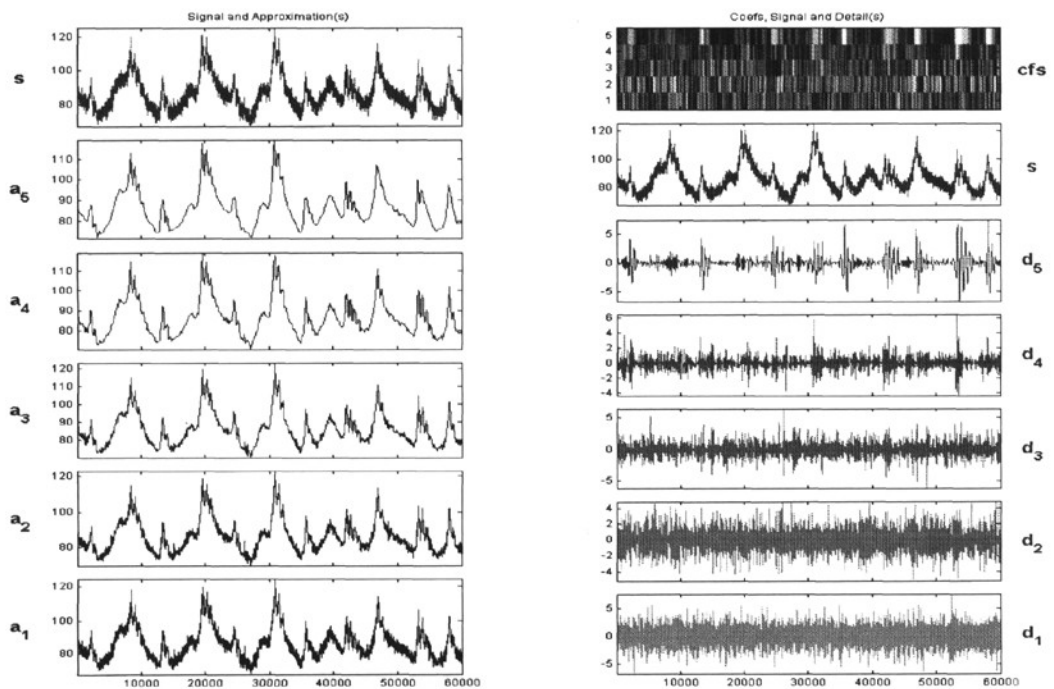


图 6-9 歧 625-2 井电流信号的各层分解

Fig6-9 The dissection of current signals of Q1625-2 well

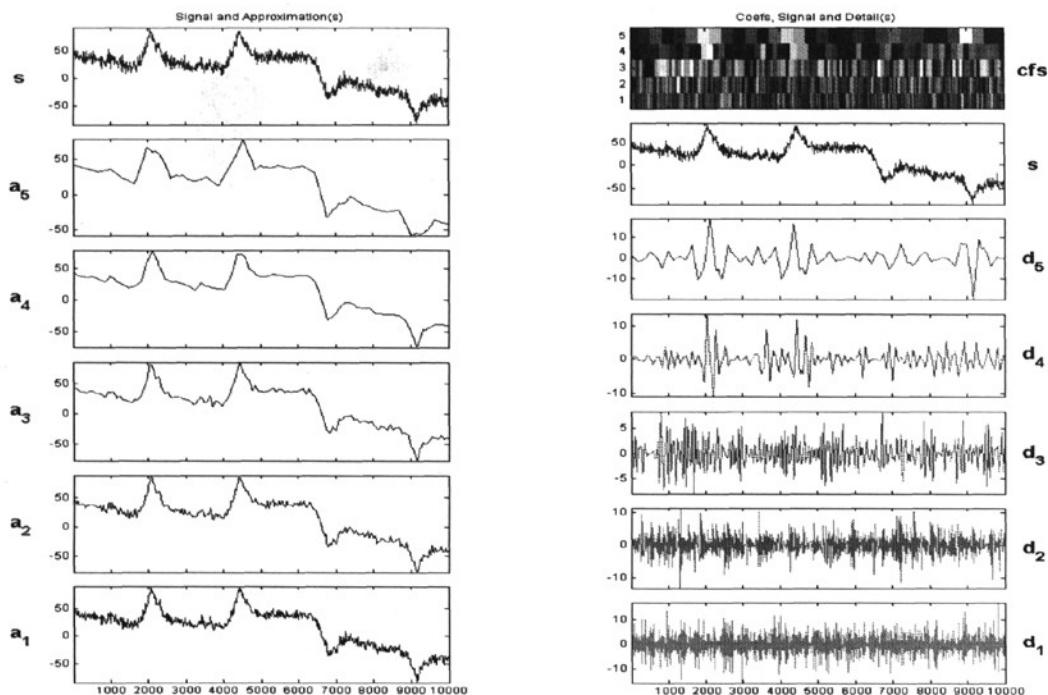


图 6-10 歧 625-1 井电流信号的各层分解

Fig6-10 The dissection of current signals of Qi625-1 well

从图 6-8、图 6-9、图 6-10 可看出采集的电流原始信号混有较强的噪声干扰，对于这种原始信号和噪声的频带相互重叠的信号来说，采用小波分解与重构的方法并不能得到很好的滤波效果，因此采用非线性变换软阈值法对原始信号进行分析。图 6-8、图 6-9、图 6-10 是利用 Matlab 提供的小波图形工具箱，手动进行分析的，无法通过 C++ 程序和小波图形工具箱连接。不过，Matlab 还提供小波分析的所有函数，用户可以使用这些函数构建自己的小波分析工具。在本系统中，通过调用 Matlab 所提供的小波分析函数，利用这些函数编写一套适合本系统的小波分析算法，然后再通过 C++ 调用这套算法，以实现数据的自动分析、保存结果等。

由第 5.1 节小波分析的相关理论可得非线性阈值法去噪的算法如下：

- (1) 对信号用 dwt 进行小波塔式分解，将每层高频系数 $W_{2^j}^d f$ 存入数组 W_j 内；
- (2) 计算小波系数阈值 δ 。考虑到采用的是小波塔式分解，每级分解的采样点 N_j 不同，故阈值 δ 计算式如下：

$$\delta_j = \sqrt{2 \log(N_j) / N_j} \cdot \sigma_j \quad (6-1)$$

式中 δ_j 由 $MAD / 0.675$ 来估计， MAD 为正规化后小波系数 ($\sqrt{N} \cdot W_{2^j}^d f$) 的中数。中数

的定义为对于一个 N 维数组, 当 N 为奇数时, 中数是第 $(N+1)/2$ 个数的数值; 当 N 为偶数时, 中数是第 $N/2$ 与第 $(N+1)/2$ 两数数值和的一半;

(3) 利用软阈值计算公式 5-3, 对小波系数进行阈值化, 得到各层新的高频系数 W_{δ_j} , 并存入数组 $W_{\delta_j}^d f$ 中;

(4) 将每层新的高频系数 $W_{\delta_j}^d f$ 和低频系数 $W_{2^j}^a f$ 进行小波逆变换完成信号重构, 从而达到去噪的效果。

使用非线性阈值法去噪算法对图 6-7 所示的三口采油井电机电流采样信号的去噪效果如图 6-11 所示。

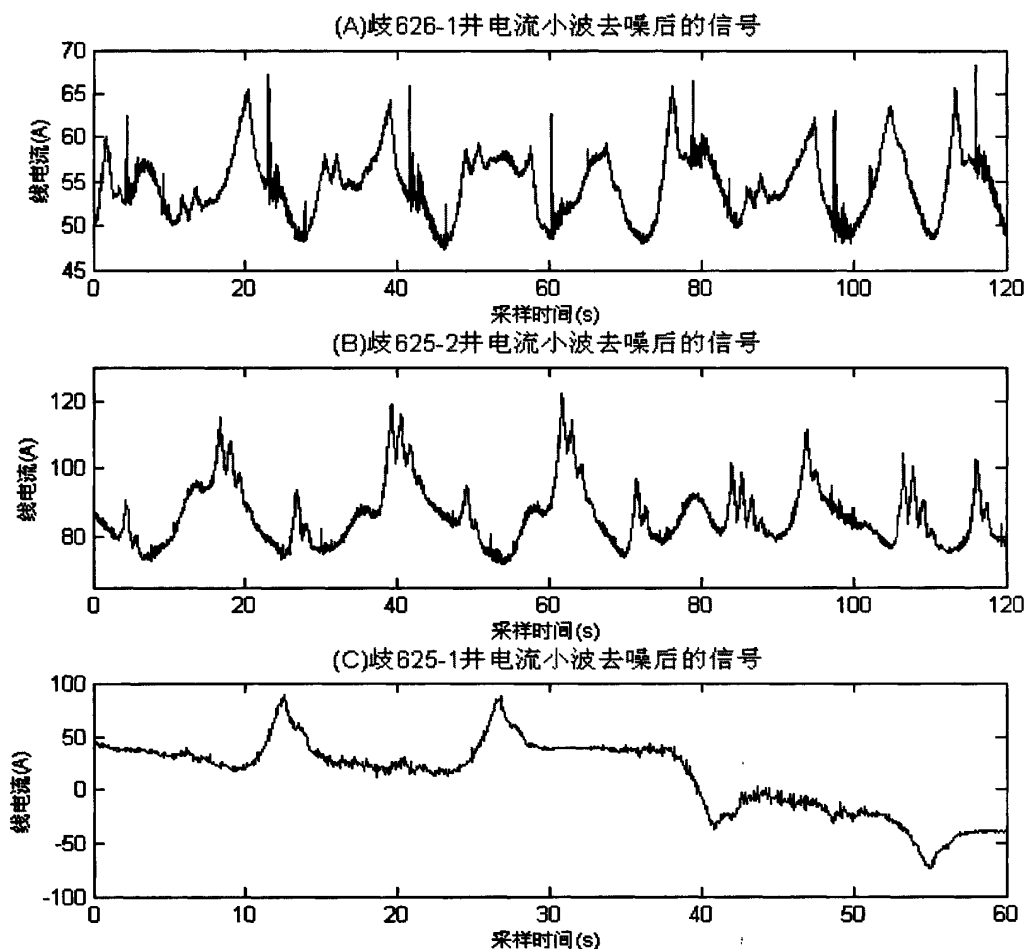


图 6-11 经过小波去噪后的电流信号

Fig6-11 The current signals after wavelet de-noising

从图 6-11 中可以看出 (与图 6-7 比较), 这种滤波方法具有较好的效果, 经过平滑

去噪以后的波形中噪声分量已经大为减少，为下一步的分析计算打下了很好的基础。

6.4 电机工况参数推算

远程检测终端所采集的两相电压和电流信号经过小波去噪后，利用第 3.2.2 节所介绍的算法，可实时计算电机的三相有功功率、无功功率和功率因数，根据定子三相电压和电流可实时计算得到电机定子磁链的幅值和相位，结合定子电流可估算得到电机电磁转矩，利用定子电压和电流还可进一步估算定子电角频率，利用估算所得的定子磁链幅值和电磁转矩可得到转子转差电角频率，利用定子电角频率和转子转差电角频率就可计算得到转子实际转速。利用电磁转矩和同步电角速度可计算电机电磁功率，结合所估算的转差率和机械损耗可估算电机输出机械转矩，根据电机输出转矩和转速可得到电机输出机械功率以及系统的整体效率。

图 6-12、图 6-13 和图 6-14 分别是采油井歧 626-1、歧 625-2 和歧 625-1 利用所测量的两相电压和电流所推算出的电机的有功功率、无功功率、电磁转矩和机械转矩，其他的参数如功率因数、机械转速、电磁功率、电机效率等由于篇幅所限，不一一列出。



图 6-12 歧 626-1 井电机工况参数

Fig6-12 The variables of working conditions of motors of Qi626-1 well

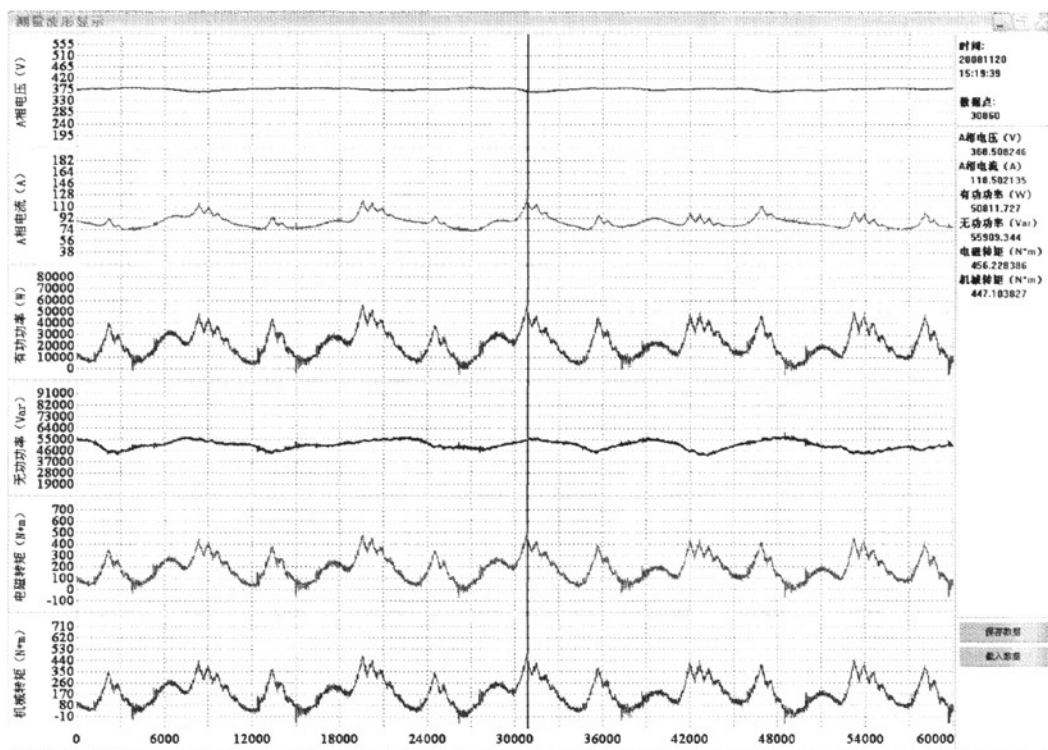


图 6-13 歧 625-2 井电机工况参数

Fig6-13 The variables of working conditions of motors of Q625-2 well

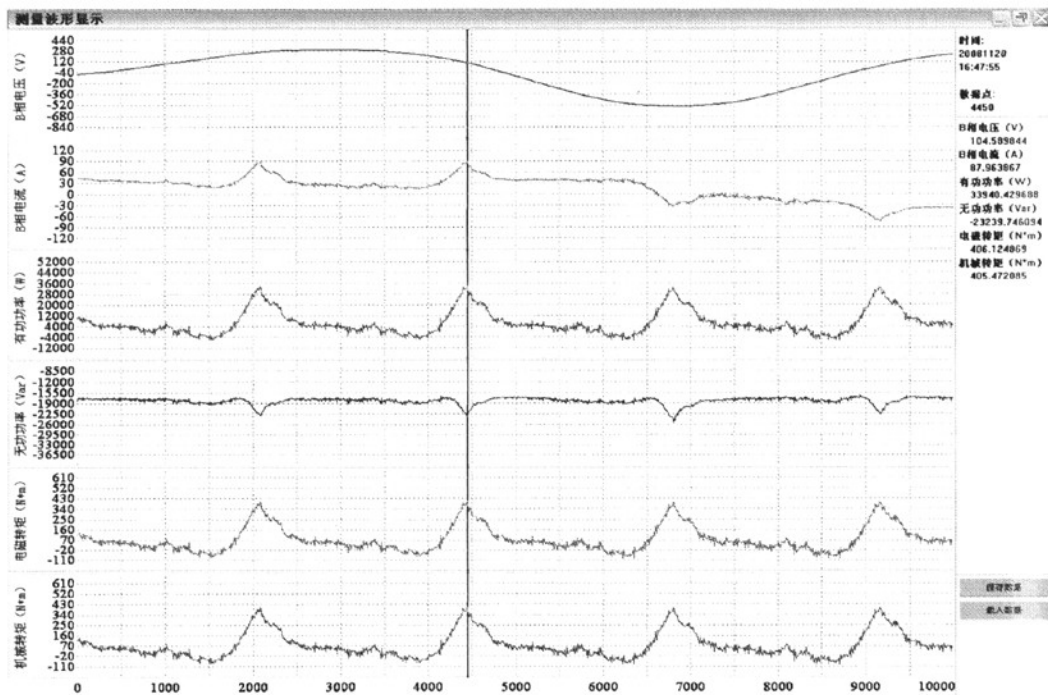


图 6-14 歧 625-1 井电机工况参数

Fig6-14 The variables of working conditions of motors of Q625-1 well

在图 6-12 中，歧 626-1 井在 2 分钟的时间里将近 6 个波峰和波谷，信号的周期为 18s，而这口井实测的冲次为 3.2 min^{-1} ，可知两者时间一样；同理，图 6-13 中，歧 625-2 井在 2 分钟的时间里将近 5 个波峰和波谷，信号的周期为 23s，而这口井实测的冲次为 2.6 min^{-1} ，两者时间也一样；图 6-14 中，歧 625-1 井在 1 分钟的时间里将近 4 个波峰和波谷，信号的周期为 14s，而这口井实测的冲次为 4.23 min^{-1} ，两者时间一样。

6.5 根据测量数据生成示功图

由第 4.1.2 节和第 4.2.2 节常规后置型抽油机和双驴头抽油机的运动学分析过程中可以得出，抽油机的悬点位移、速度、加速度和扭矩因数都与曲柄的转角 θ 有关，常规型见图 4-2 和式 4-23、式 4-18、式 4-19、式 4-24 所示，双驴头抽油机见图 4-6 和式 4-55、式 4-66、式 4-67、式 4-68 所示，它们都是曲柄转角 θ 的函数。同理，由第 4.1.3 节和第 4.2.3 节常规后置型抽油机和双驴头抽油机的动力学分析可以得出，减速箱输出轴净扭矩也是曲柄转角 θ 的函数，常规型见图 4-4 和公式 4-31 所示，双驴头抽油机见图 4-9 和公式 4-75 所示。因此，可以通过曲柄转角 θ 把减速箱输出轴净扭矩 T_n 和扭矩因数 $\overline{TF}$ 、悬点的位移 S 、速度 V_A 、加速度 a_A 联系起来。

减速箱输出轴净扭矩 T_n 是利用电机直接转矩控制算法推算得到的电机输出扭矩，经由皮带传递动力给减速箱所获得的扭矩。通过接近开关检测上、下死点，可以获得电机输出扭矩曲线上的点与曲柄转角 θ 的关系，这是由于电机的转速变化不大，可以认为是匀速的，因此曲柄旋转角速度 ω 也是匀速的，如电压电流互感器从下死点开始测量，则记当前的曲柄转角为 θ_1 ，当接近开关检测到上死点时，则记当前的曲柄转角为 θ_2 ，抽油机完成上冲程曲柄所转过的角度为 $\theta_2 - \theta_1$ ，电机的电压电流信号也是在这 $\theta_2 - \theta_1$ 的曲柄转角内测量的。同理，当抽油机由上死点运行到下死点时，则抽油机完成了周期的运动，同样，电压电流信号也完成了周期的测量。因此，电机输出扭矩也是与曲柄转角 θ 相关联的。

皮带是游梁式抽油机的重要组成部分之一，它与齿轮减速箱一起构成抽油机的减速传动装置，以实现从电动机到曲柄轴的动力传递和减速，在这过程中要考虑动力传递的

功率损失,在第四章已经讨论过皮带轮功率损失的计算公式,见式 4-1、式 4-2 所示。为防止皮带打滑,通过接近开关检测减速箱皮带轮的转速,与电机输出轴的转速乘于皮带轮传动比后的数值相比较,从而判断皮带是否打滑。减速箱内部有多对齿轮,通过这些齿轮的啮合,以实现减速增矩的作用,各种类型的减速箱在出厂时都提供一个传动比,但由于现场环境恶劣,抽油机经过长时间的运转后,减速箱内的齿轮会遭到磨损,造成传动比的改变。齿轮的磨损很难定量检测,因此,本系统中对每一台抽油机,在安装远程检测终端时或每隔一段时间,都通过示功仪实测悬点的示功图,通过示功图反推减速箱的扭矩曲线,然后用这个曲线与通过电机输出扭矩所推算的减速箱输出轴的净扭矩相比较,计算两者之间的误差,得到一个校正系数。通过电机输出扭矩推算减速箱输出轴净扭矩 T_n 的计算公式如下:

$$T_n = T_{\text{电机}} \times i_{\text{皮带}} \times \eta_{\text{皮带}} \times i_{\text{减速箱}} \times \eta_{\text{减速箱}} \quad (6-2)$$

式中 $T_{\text{电机}}$ ——电机的输出扭矩;

$i_{\text{皮带}}$ ——皮带的传动比;

$i_{\text{减速箱}}$ ——减速箱的传动比;

$\eta_{\text{皮带}}$ ——皮带的传动效率;

$\eta_{\text{减速箱}}$ ——减速箱的传动效率。

在计算减速箱输出轴净扭矩 T_n 的公式 4-75 中,可以认为该公式中的第一项为油井负荷扭矩 T_{wn} , 第二项和第三项合在一起,称为曲柄平衡扭矩 T_r 。联合式 4-75 和式 6-2 可以获得油井的负荷扭矩 T_{wn} 为:

$$T_{wn} = T_n - T_r = T_{\text{电机}} \times i_{\text{皮带}} \times \eta_{\text{皮带}} \times i_{\text{减速箱}} \times \eta_{\text{减速箱}} - T_r \quad (6-3)$$

油井负荷扭矩 T_{wn} 除以扭矩因数 $\overline{TF}$, 即可得到悬点载荷 P 的值。由于悬点载荷 P 与悬点位移 S 都是曲柄转角 θ 的函数, 因此可得到以悬点位移 S 为横坐标, 悬点载荷 P 为纵坐标的示功图。

下面根据实验测量的三口采油井的数据推算示功图。

(1) 歧 626-1 井

歧 626-1 井使用的是常规型抽油机 CYJ12-4.8-73HB, 其技术参数和几何尺寸见表

6-1、表 6-2 所示。冲程为 3.6m，冲数为 3.2 次 min^{-1} ，曲柄旋转半径为 1.2m，减速箱型号为 JLH-1000/74，传动比为 31.73，使用了四块平衡块，四块平衡块的平衡半径都为 1m。根据抽油机的运动学分析，歧 626-1 井抽油机的位移、速度、加速度和扭矩因数如图 6-15 所示。图 6-16 是歧 626-1 井的扭矩曲线和示功图，由前面所述的电机输出扭矩—示功图算法，在电机的输出扭矩曲线上，根据上、下死点标定的位置值，取一个完整的抽油井运动周期，最后得到油井的负荷扭矩（图 6-16A），由油井的负荷扭矩除以扭矩因数（图 6-15D），则得到悬点载荷（图 6-16B），最后以曲柄转角 θ 为中间变量，联系悬点位移（图 6-15A）和悬点载荷（图 6-16B），得到示功图（图 6-16C）。

由图 6-16C 可以看出，实测的示功图和推算的示功图，其变化趋势相差不多。由示功图可知该井的生产比较正常，其示功图左右、上下曲线平行，接近理论示功图图形特征，曲线较理想，充满程度 100%，排出系数较高，一般泵效接近理论值。上下曲线出现逐渐减弱的波浪线，这是由于泵深超过 800m 时抽油杆会发生有规律的振动，一般不会影响泵效。振动引起悬点载荷叠加在正常工作产生的曲线上，由于抽油杆柱的振动为阻尼振动，所以出现逐渐减弱的波浪线。

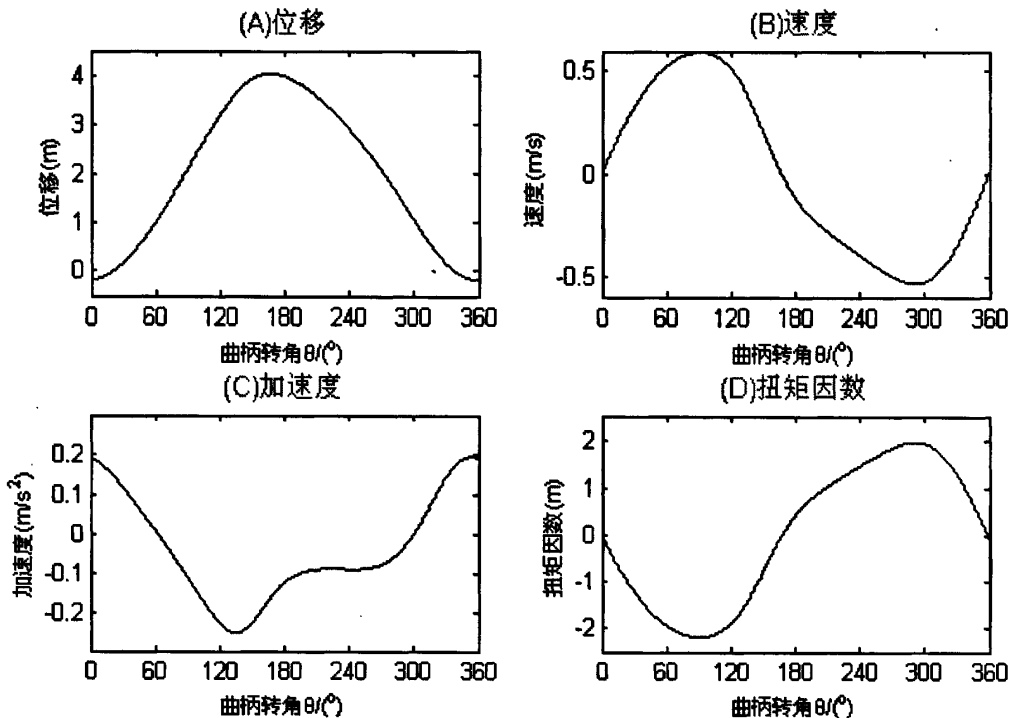


图 6-15 歧 626-1 井运动曲线

Fig6-15 The motion curve of Qi626-1 well

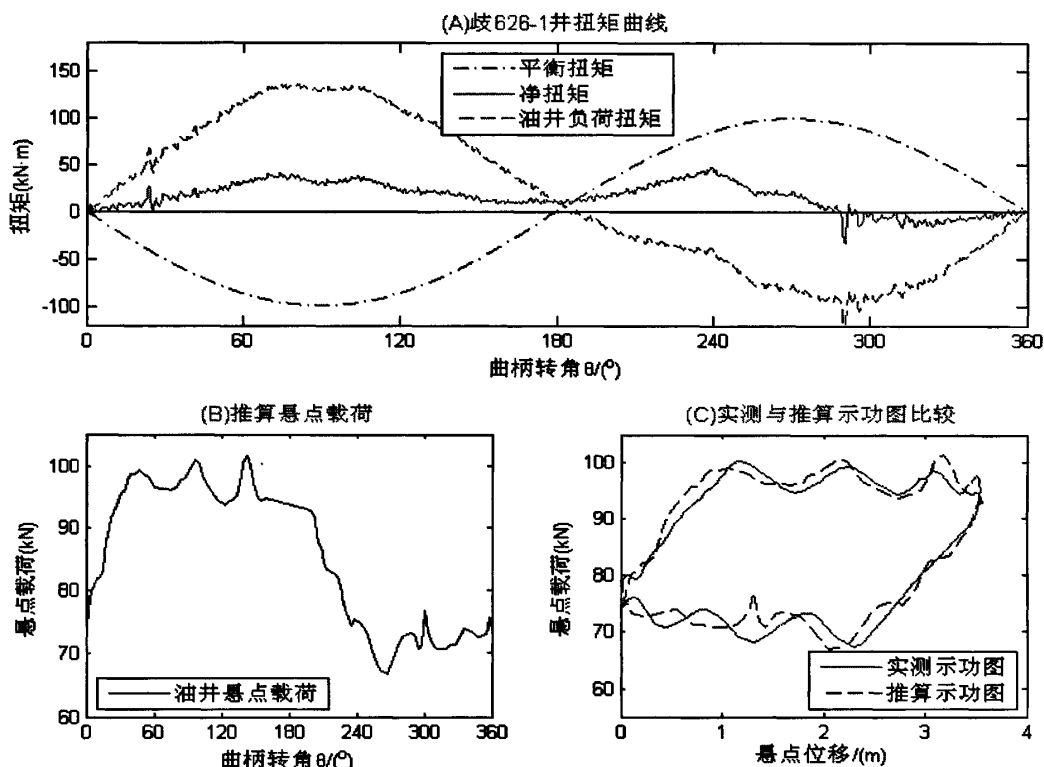


图 6-16 歧 626-1 井扭矩曲线与示功图

Fig6-16 The torque curve and dynamometer card of Qi626-1 well

推算示功图在曲柄转角为 290.5 度，悬点位移为 1.312m 处有个突起的尖峰，这是由于减速箱的问题，在现场的测量过程中，这口井的减速箱在旋转到 290.5 度时，会发出哐当的一声，结果就使得电机测量的信号出现了一些尖脉冲，在图 6-7、图 6-11 的电流波形中可以看得很明显，而在图 6-12 的电机工况参数图上也可以看出，减速箱故障会引起电机输出扭矩的波动。

(2) 歧 625-2 井

歧 625-2 井和歧 626-1 井一样，使用的是常规型抽油机 CYJ12-4.8-73HB，减速箱型号也是 JLH-1000/74。冲程为 4m，冲数为 2.6 min^{-1} ，曲柄旋转半径为 1.4m，传动比为 31.73，使用了四块平衡块，其中两块平衡块的平衡半径为 0.5m，另两块平衡块的平衡半径为 0.9m。歧 625-2 井抽油机的位移、速度、加速度和扭矩因数如图 6-17 所示。扭矩曲线、悬点载荷、实测示功图与推算示功图见图 6-18A、图 6-18B 和图 6-18C 所示。

由图 6-18C 可以看出，歧 625-2 井严重供液不足，示功图的右下方缺失，卸载过程比较快，卸载线比较陡，但上下左右曲线平行。卸载线和加载线平行，卸载线左移说明充满越不好，也就是供液能力越差，形成的图形为“刀把”形。

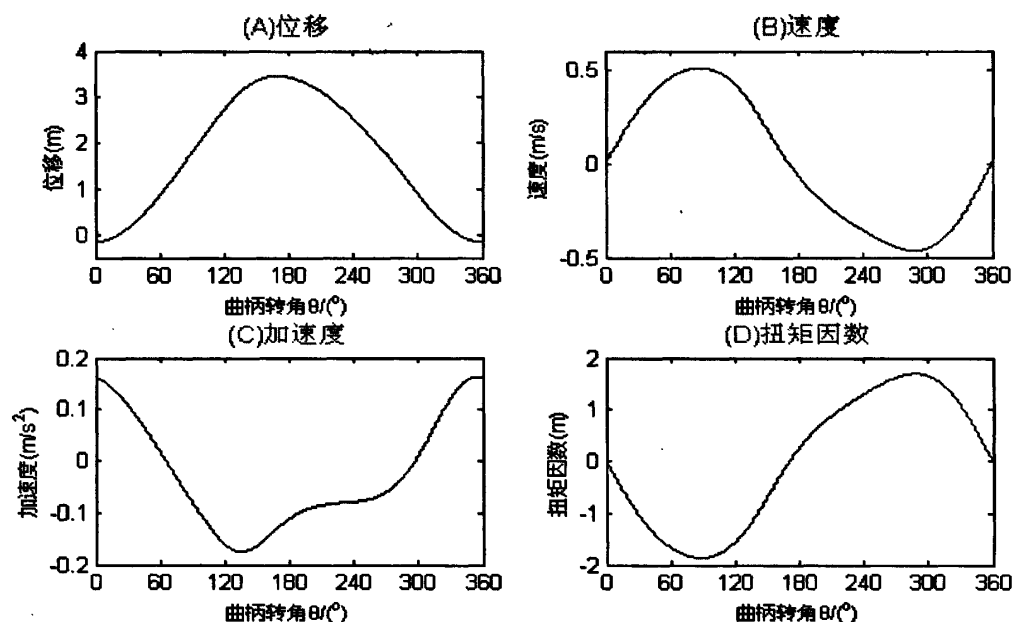


图 6-17 歧 625-2 井运动曲线

Fig6-17 The motion curve of Qi625-2 well

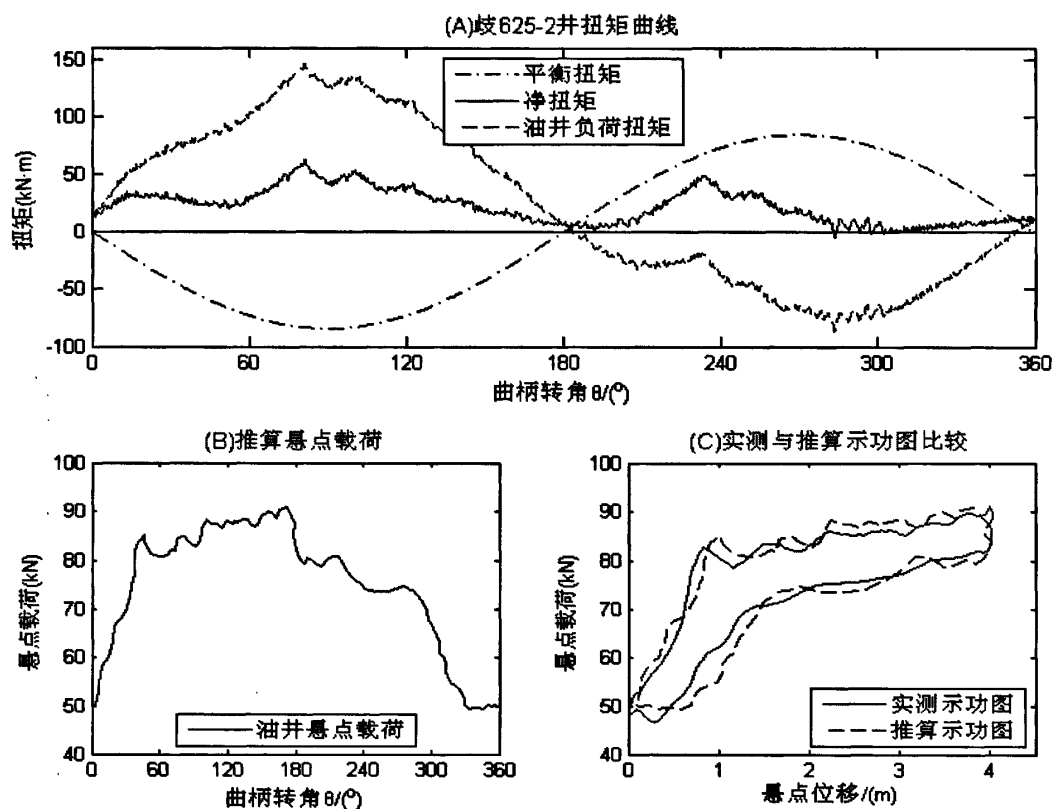


图 6-18 歧 625-2 井扭矩曲线与示功图

Fig6-18 The torque curve and dynamometer card of Qi625-2 well

(3) 歧 625-1 井

歧 625-1 井使用的是双驴头抽油机 YCYJ10-5-48HB, 其技术参数和几何尺寸见表 6-1、表 6-2 所示。冲程为 3m, 冲数为 4.2 次 min^{-1} , 曲柄旋转半径为 1.02m, 减速箱型号为 JLH-1000/48, 传动比为 31.887, 使用了四块平衡块, 四块平衡块的平衡半径都为 1.2m。歧 625-1 井抽油机的位移、速度、加速度和扭矩因数如图 6-19 所示。扭矩曲线、悬点载荷、实测示功图与推算示功图见图 6-20A、图 6-21B 和图 6-22C 所示。

由图 6-20C 可以看出, 歧 625-1 井有轻微的供液不足, 卸载线和加载线平行, 左移了一点, 稍微形成了一点“刀把”。

由图 6-15B、图 6-17B、图 6-19B 中的速度曲线可知, 常规型抽油机在上、下冲程时的速度相差不大, 而双驴头抽油机在上冲程时速度较慢, 在下冲程时速度快。对于中低粘度或高含水原油开采, 要求抽油机的工作方式是慢提快放。上冲程慢提, 能够有效减小悬点附加动载荷; 下冲程快放, 有利于泵底阀的关闭, 提高单位时间的采油量^[61]。

同样, 由图 6-16C、图 6-18C、图 6-20C 中的扭矩曲线可以看出, 双驴头抽油机减速箱净扭矩的峰值比较低, 因此抽油机所匹配减速箱的额定扭矩比常规型要低一个档次, 从而减小电机的输出功率, 进而减小电网的最大负荷及波动量, 以达到节能的目的。

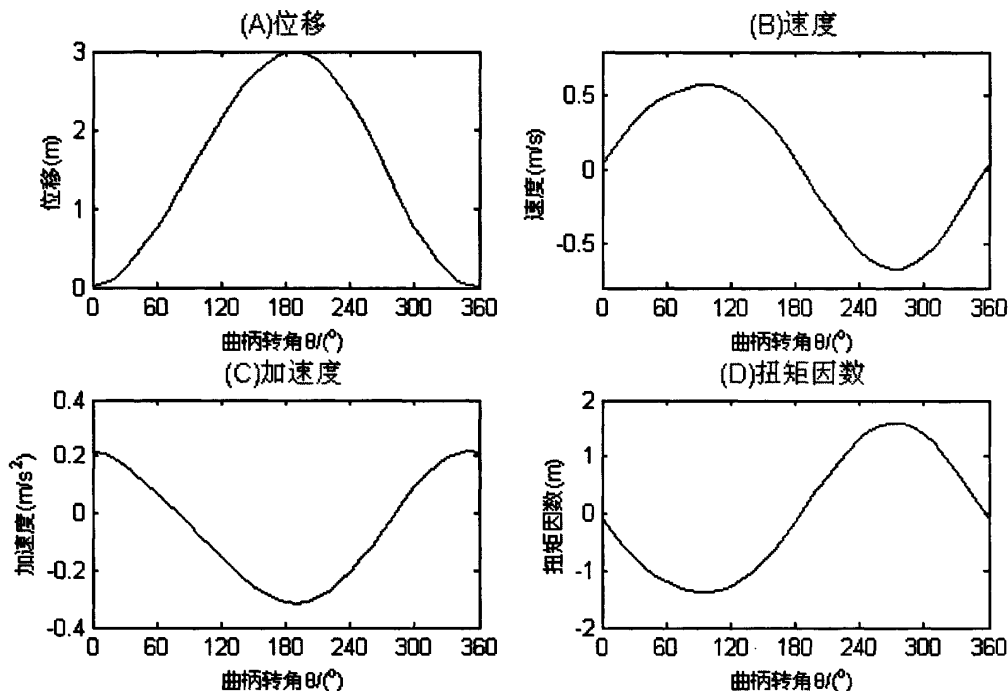


图 6-19 歧 625-1 井运动曲线

Fig6-19 The motion curve of Qi625-1 well

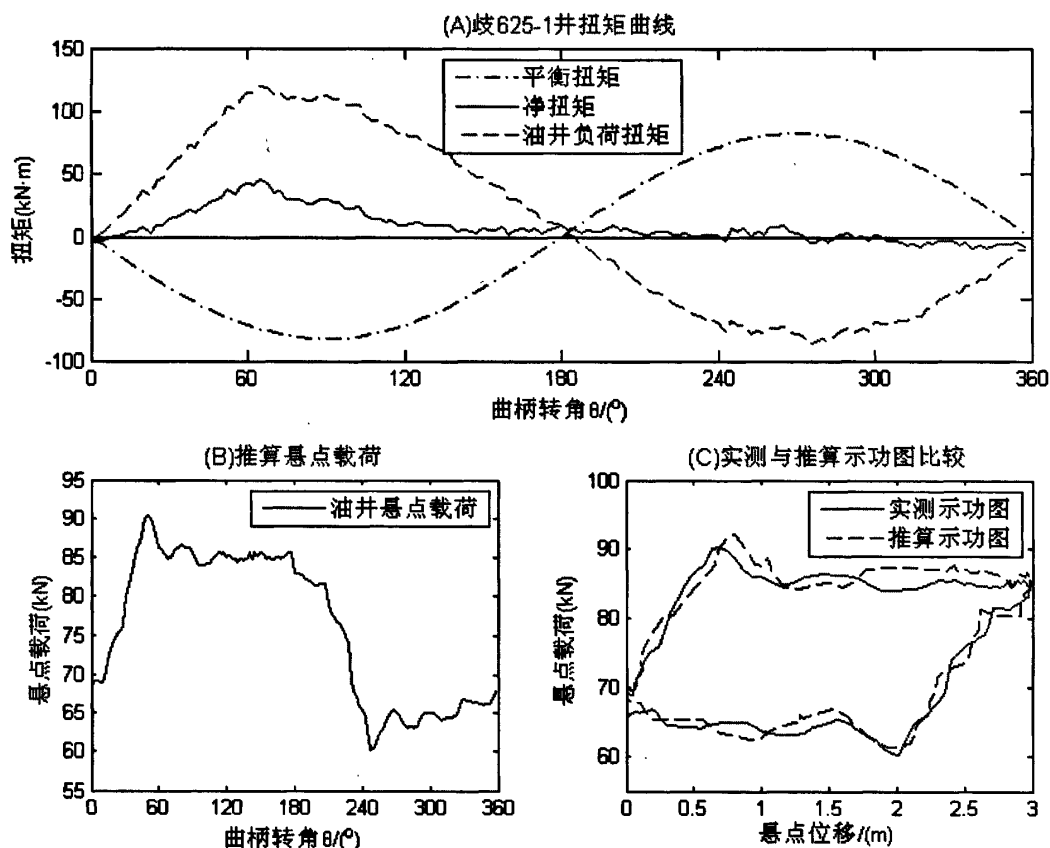


图 6-20 歧 625-1 井扭矩曲线与示功图

Fig6-20 The torque curve and dynamometer card of Qi625-1 well

根据电机输出扭矩生成示功图过程中，有两点需要注意^[14]：

(1) 生成示功图时，在上、下死点附近示功图会出现不闭合现象，即在上、下死点附近悬点载荷出现了异常值。产生这种现象的原因主要是：

- ①在上、下死点处，加速度反向，光杆位移小；
- ②在上、下死点附近悬点载荷发生了突变；
- ③在上、下死点附近，扭矩因数非常小，几乎等于零；
- ④在上、下死点附近，曲柄转角 θ 很小或接近 180° ，所以 $\sin \theta$ 几乎为零。

解决的方法为，在输入上、下死点附近的电机输出扭矩值时，进行圆滑处理，在输出示功图时，根据前后正常点的值对异常值进行修正，使之得出合理的悬点载荷值。

(2) 抽油机的几何尺寸和平衡状况对计算结果的影响很大，必须对抽油机几何尺寸和平衡重的质量、平衡半径进行精确的实际测量。

6.6 信号的频谱分析

抽油机示功图时域信号反映了载荷与位移随时间的变化情况,而示功图分析法是常用的抽油井故障诊断方法。现场往往凭经验识别或借助于计算机进行示功图识别,常用的识别方法有网格法和矢量法。由于受到复杂的井下状况的影响,基于时域特点的示功图往往变形严重,单凭时域信号识别不能得到正确的诊断^[62]。

在本课题的实验过程中,每次所测量的电压、电流信号波形以及最后生成的示功图的图形都不一样,但相差不是太大。同样,根据油田现场工作人员讲述,用示功仪测抽油机井的示功图时,不同的时间所测得的功图都有差别,这是由于受到复杂的井下状况的影响,而示功仪所采样的点数比较少,功图的很多细节没有采集出来,并且示功仪的载荷传感器可能存在误差等。

因此,本课题根据实验所遇到的这个问题,提出一个判断抽油机井工况是否大幅改变的方法。该方法由所测量电机的电压、电流,推算出减速箱的净扭矩后,利用频谱分析方法对净扭矩曲线进行分析,这样就把时域的示功图故障诊断方法转换到频域的减速箱净扭矩分析方法上。

由本文第 5.2 节的内容可知,频域分析法主要是对信号的频率结构进行分析,确定信号是由哪些频率成分所组成,以及这些频率成分幅值的大小。抽油机工况微小的变化就能引起时域信号大的变化,但微小的变化,其能量的改变并不大,因此信号的频谱并不会变化。当信号的频谱发生大的变化时,如引入了新的频率或原来的某一个频率其能量幅值变化很大,则意味着抽油机的工况发生了大的变化。因此,通过对比分析两次减速箱的净扭矩曲线的频谱图,就可以发现其工况是否发生了重大的改变。频谱图的对比只要直接判断每个频率的大小就行,简单且精度高,而示功图的网格和矢量识别方法,需要大量数学方法来判断,误差大,程序编制的工作量和难度也比较大。

下面以歧 626-1 井为例,见图 6-21,说明频谱分析方法比时域分析方法对抽油机井的诊断更有优势。

图 6-21A、图 6-21B 是歧 626-1 井两次通过电机参数测量所推算得到的减速箱的净扭矩曲线,可以看出,两条曲线的总体趋势是相同的,但细节方面存在明显的不同。两条净扭矩曲线所推算出来的功图也存在差别,但两次测量的时间间隔并不长,如果以时域分析,则是认为抽油机的工况已经改变。图 6-21C 和图 6-21D 是两条净扭矩曲线的幅值频谱,可以看出两者的特征频率几乎一样,信号的频率主要集中在 0.5-1Hz 范围内,

在 0.4833Hz、0.5917Hz、8.408Hz 这三个频率点的幅值比较大,另外在 6.725Hz、10.09Hz、11.66Hz 和 12.5Hz 处两者都有明显的幅值,可以认为这两个信号是相同的,误差不大。图 6-21E、图 6-21F 是两条净扭矩曲线的自功率谱,两者的形状基本相同,与幅值谱相对应,自功率谱除了在 1Hz 里快速下降外,在 8.408Hz、10.09Hz 和 12.5Hz 处也快速下降,说明在这些频率处,有信号的存在。因此,利用频谱分析比时域分析可以更好地反映出抽油机井的运行工况。通过 GPRS 远程获得电机的电压、电流参数后,监控中心调用频谱分析程序就可以自动对抽油机井工况进行分析,并把结果保存起来,供现场人员使用。

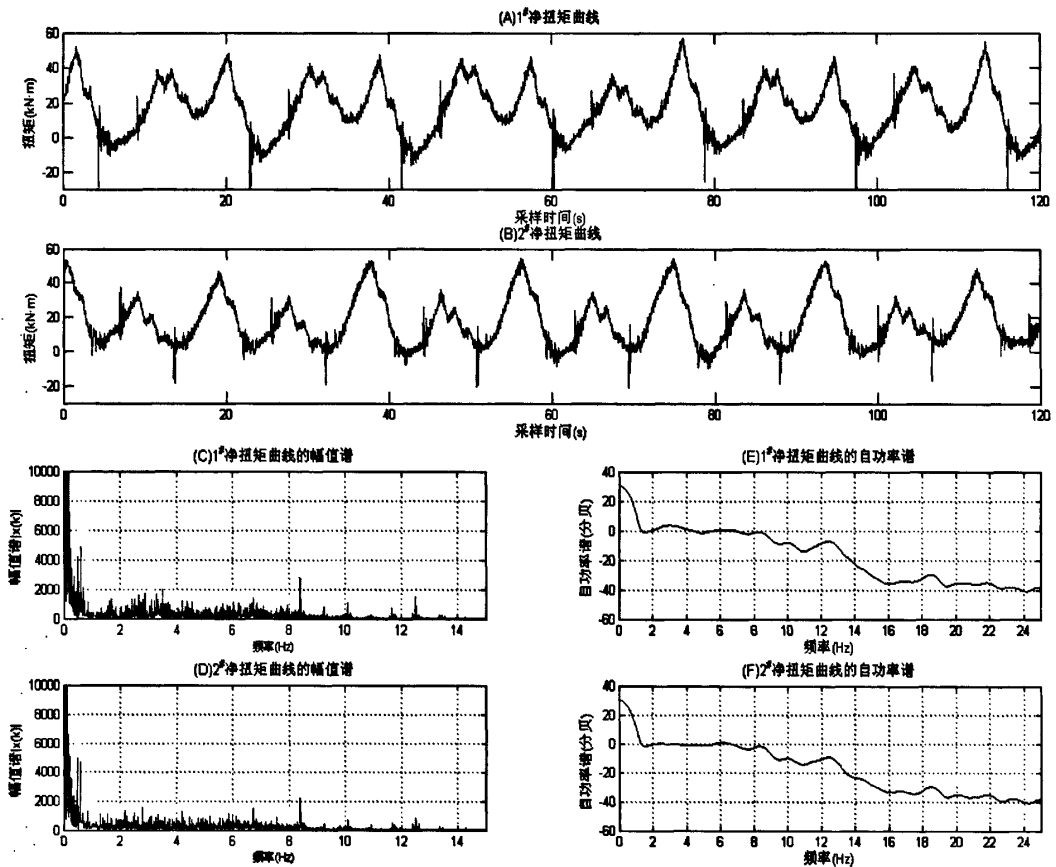


图 6-21 歧 626-1 井两次测量数据分析对比

Fig6-21 The analysis and comparison for two times of measured data of Qi626-1 well

频谱分析除了可以对比抽油机井不同时间所测量的净扭矩曲线,得出这两个时间内抽油机的工况是否变化很大外,还可以通过分析频谱图上的特殊频率来了解被测量信号的频率组成,观察是否包含各种故障信号。以实验所测的三口抽油机井的净扭矩,可以通过幅值谱、自功率谱和倒频谱来查找各种故障信号。

(1) 歧 626-1 井

歧 626-1 井幅值频谱如图 6-21C 所示, 频率主要集中在 0.5-1Hz 范围内, 表明净扭矩响应频率主要是电压、电流的 1 倍频率关系, 即净扭矩的响应频率与电压、电流的频率相当, 而其它幅值比较大的频率点, 正是各种特殊信号的频率所在的点。幅值比较大的 8.408Hz 处正是上一节图 6-16 中, 推算示功图在曲柄转角为 290.5 度, 悬点位移为 1.312m 处有个突起的尖峰, 在现场的测量过程中, 这口井的减速箱在旋转 290.5 度时, 会发出哐当的一声, 而减速箱的这个故障, 正好反应在幅值谱上, 并且这个故障的频率为 8.408Hz。歧 626-1 井自功率频谱如图 6-21E 所示, 从中可以看出, 随着扭矩响应频率的增加, 自功率谱的值急剧下降, 而以 1 倍频左右的值为最大, 显示出扭矩信号能量主要集中在电压、电流 1 倍频范围内, 同样, 在 8.408Hz 处, 自功率谱的值从零变为负值, 说明在该处有个故障信号, 正好是减速箱的故障。歧 626-1 井倒频谱如图 6-22 所示, 由第 5.2.3 倒频谱的定义可知, 倒频谱分析是对频谱的再次谱分析, 是检测复杂谱图中周期分量的有用工具, 因此, 倒频谱可以十分有效的检测出功率谱中的周期分量。由图 6-21E 的自功率频谱中可以看出, 自功率频谱没有周期分量, 因此在图 6-22 中, 当时间 $t=0$ 时, 倒频谱为最大值, 随着 t 的增加, 收敛于零, 说明自功率频谱中无明显周期分量存在。

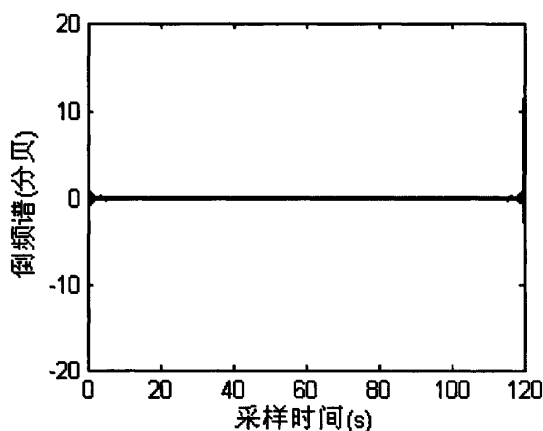


图 6-22 歧 626-1 井倒频谱图

Fig6-22 The cepstrum diagram of Qi626-1 well

(2) 歧 625-2 井

歧 625-2 井的频谱图如图 6-23C 所示, 同样的, 频率主要集中在 0.5-1Hz 范围内, 在频率为 2.808Hz、3.517Hz、4.217Hz、8.325Hz 和 11.24Hz 处有其他信号的叠加。歧 625-2 井自功率频谱如图 6-23D 所示, 同样以 1 倍频左右的值为最大, 显示出扭矩信号

能量主要集中在电压、电流 1 倍频范围内，其他曲线的拐点要定量的分析这口油井的所有负载才能知道是由哪个负载分量引起的。歧 625-2 井倒频谱如图 6-23B 所示，同样，当时间 $t=0$ 时，倒频谱为最大值，随着 t 的增加，收敛于零，说明自功率频谱中无明显周期分量存在。

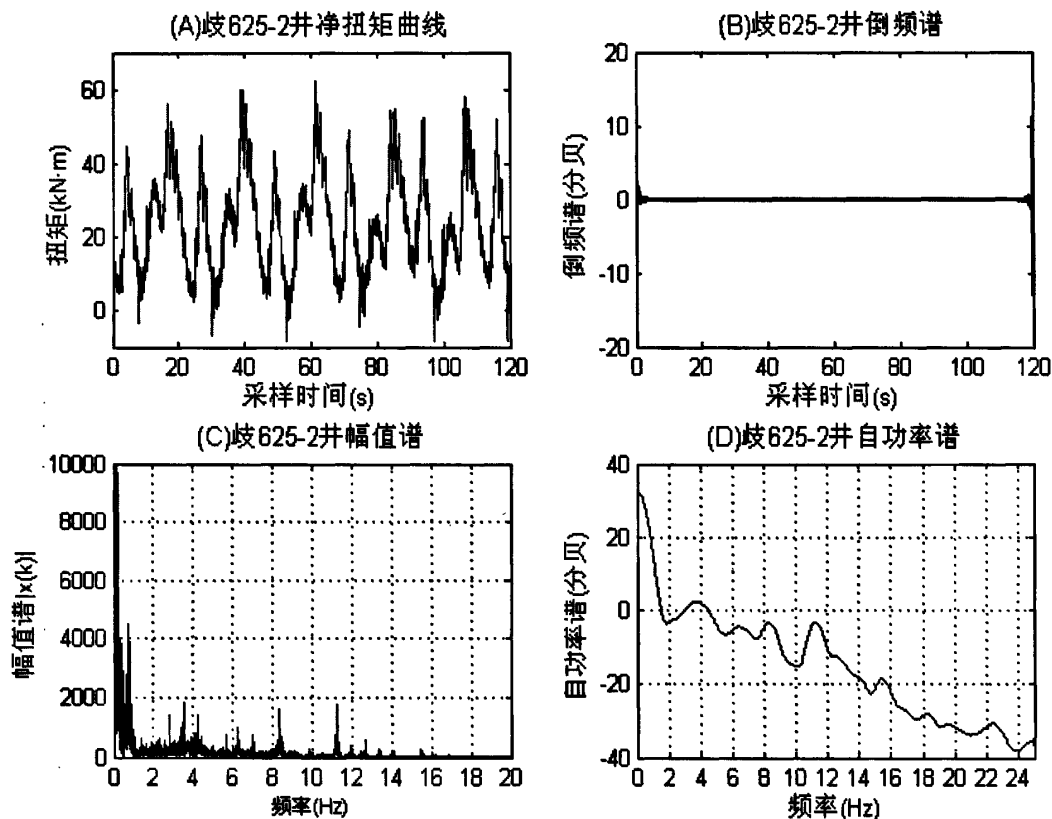


图 6-23 歧 625-2 井频谱图

Fig6-23 The spectrogram of Qi625-2 well

(3) 歧 625-1 井

歧 625-1 井的频谱图如图 6-24C 所示，同样的，频率主要集中在 0.5-1Hz 范围内，在频率为 5.1Hz、6.45Hz 和 7.733Hz 处有其他信号的叠加。歧 625-1 井自功率频谱如图 6-24D 所示，同样以 1 倍频左右的值为最大，显示出扭矩信号能量主要集中在电压、电流 1 倍频范围内，在频率为 5.1Hz、6.45Hz 和 7.733Hz 处出现 3 个峰值。歧 625-1 井倒频谱如图 6-24B 所示，同样，当时间 $t=0$ 时，倒频谱为最大值，随着 t 的增加，收敛于零，说明自功率频谱中无明显周期分量存在。

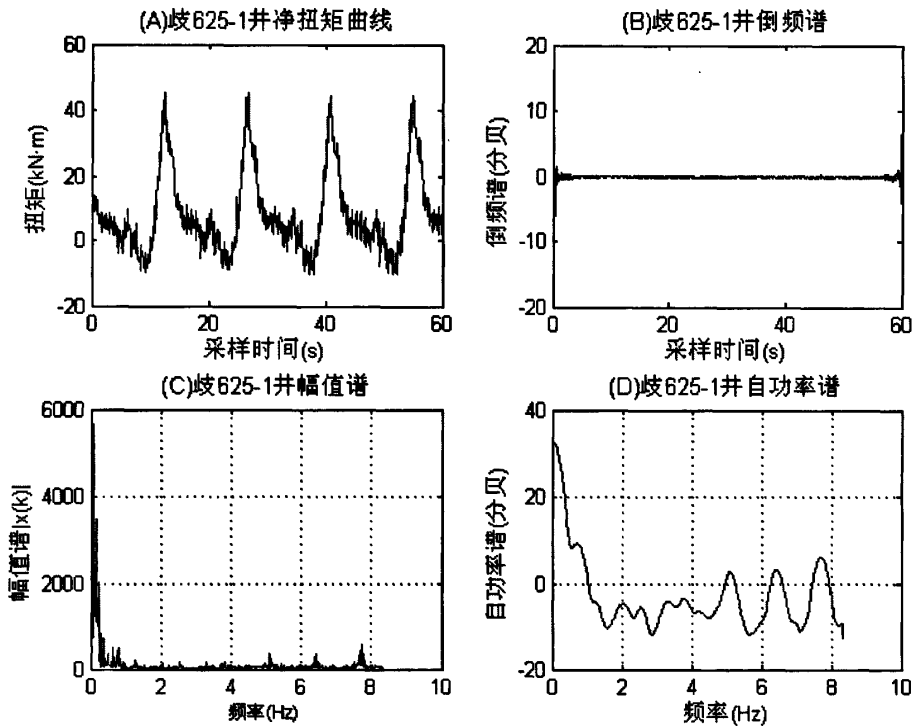


图 6-24 歧 625-1 井频谱图

Fig6-24 The spectrogram of Qi625-1 well

6.7 本章小结

本章是实验与结果分析部分，介绍了抽油机井系统动态实时分析系统在大港油田现场的应用，包括远程检测终端在抽油机上的安装位置，如何通过 GPRS 远程启动检测终端测量数据，如何通过小波分析对所测量的信号去除噪声处理，根据所测信号推算电机的工况参数，根据测量数据生成示功图以及对抽油机减速箱净扭矩进行频谱分析，以判断抽油机井的工况。

结论与建议

本文通过电机直接转矩控制（DTC）理论，研究和设计一种基于 GPRS 数据传输服务的抽油机井系统动态实时分析系统，并详细阐述了该系统的实现原理。在设计过程中，将系统逻辑上分为：抽油机远程检测终端单元、GPRS 远程传输数据单元、监控中心数据处理单元这三个子系统。利用各个单元实现了抽油机数据的采集、传输、数据保存以及数据分析等功能。与以往的抽油机井监控系统相比，本系统只需要测量电机的电压、电流、皮带轮转速和抽油机上、下死点位置这五个物理量，根据抽油机传动原理和效率，把电机负载转换成悬点载荷，从而实现了用电参数间接测量抽油机井示功图的目的，系统的精度比较高，并且安装和维护比较简单。

本文主要完成的工作如下：

- （1）完成硬件测量电路、GPRS 无线传输模块和单片机系统的设计；
- （2）编写监控中心上位机 GPRS 启动连接设置软件；
- （3）利用 Matlab 编写小波去噪程序，对含有干扰的测量信号去噪处理；
- （4）利用电机直接转矩控制理论，编写电机工况参数推算程序；
- （5）研究常规型和双驴头型抽油机的运动学和动力学，建立电机输出扭矩到悬点位移和载荷的数学模型，并编写相关的程序；
- （6）研究频谱分析方法，利用 Matlab 编写频谱分析程序，对减速箱净扭矩曲线进行频谱分析。

本文得出了如下结论：

- （1）GPRS 数据传输方式可以实现大量数据的快速传输且费用较低，数据丢失的概率很小；
- （2）小波分析对高频信号的干扰具有很好的去噪效果；
- （3）根据电机直接转矩控制理论，由电压、电流推算出来的转速和输出扭矩，与利用传感器实测的值误差在 10%以内，精度可以满足系统的要求；
- （4）生成示功图时，抽油机的几何尺寸、平衡块的质量与平衡半径以及减速箱的磨损程度对示功图的形状有很大的影响，甚至会得到波动很大、不收敛的图形，因此对这些物理量的测量要精确；
- （5）采用本文所提出的减速箱净扭矩频谱分析方法，获得减速箱净扭矩各频率分量，可以判断不同的时间，抽油机的工况是否发生了大的变化。

虽然课题研究工作取得了一定的进展,受本人水平、硬件条件及时间的限制,有许多工作尚未完成,有待进一步深入研究,从而使抽油机井系统动态实时分析系统更加趋于完善。今后需要进一步进行的研究工作和内容如下:

(1) 虽然系统的软硬件基本搭建完毕,但由于时间关系,算法中仍然有不完善的地方需要继续改进;

(2) 可以考虑测量更多的油井参数,如油、套压力、动液面位置、原油流量、温度等参数,从整体上对油井进行实时监控;

(3) 目前本系统只能用于常规型和双驴头抽油机,以后可以加入其他类型抽油机的运动学和动力学算法,如下偏杠铃、悬挂偏置和摆杆式抽油机等;

(4) 可以加入示功图智能识别算法,与频谱分析一起对抽油机井工况进行诊断;

(5) 由于复杂的井下状况,抽油机停止后再启动,有可能启动不起来,时间一久会烧坏电机,因此本系统目前并没有控制抽油机启停的功能,以后可以加入这个功能,但要注意判断抽油机是否真正启动,并且在启动前要发出报警的声光信号,并延时一段时间,以使抽油机周围的人员能安全撤离后再启动,避免发生安全事故。

参考文献

- [1] 刘春, 万阳, 王仲瑀. 国际油价上涨“路线图”[J]. 国际石油经济, 2008, 8: 4-9
- [2] IEA. World Energy Outlook 2007[R]. Singapore: IEA, 2007
- [3] 冯子明. 有杆抽油系统优化设计[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2005
- [4] 马俊. 基于 GPRS 和数据库的油田远程监控系统的设计与实现[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2007
- [5] 吴迪. 基于 PC_Based PLC 的油井工况数据采集系统的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2005
- [6] 张莲蓬. 先进的井下监测仪[J]. 国外油田工程, 2001, 17(10): 47-48
- [7] 敬蜀蓉, 李鑫, 倪国强, 等. 抽油机示功图无线测试技术[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26 (4): 79-81
- [8] 李薇, 秦义, 陈雪梅. 抽油机井远程监测示功图质量可靠性改进[J]. 石油工业技术监督, 2006, 22 (4): 20-22
- [9] 潘琢金, 刘泽显. 智能抽油井示功仪[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2000, 17(2): 52-54
- [10] 牟海维, 王永涛, 成国库. 油井抽油机示功仪的研制[J]. 电测与仪表, 2000, 37(5): 35-37
- [11] 杨其荣, 朴家武, 李吉春. CY21 型自动监控系统的研制[J]. 石油机械, 2003, 31(5): 27-29
- [12] 邱小锋, 丁建林, 刘先刚, 等. 悬挂偏置游梁抽油机应力及扭矩测试研究[J]. 石油矿场机械, 2003, 32 (5): 23-26
- [13] 付路长. 遥测应变技术在抽油机减速器输出转矩测试中的应用[J]. 计量与测试技术, 2004, 31 (2): 22-22, 28
- [14] 李虎君, 张继芬, 支连友. 利用抽油机井实测功率曲线预测示功图[J]. 大庆石油地质与开发, 1991, 10 (4): 63-67
- [15] 李虎君, 李英, 龙黔胜, 等. 用实测功率曲线计算前置式抽油机井的示功图[J]. 石油矿场机械, 1992, 21 (5): 33-37
- [16] 檀朝东, 罗小明, 赵海涛, 等. 抽油机井示功图间接测量方法评价研究[J]. 中国石油和化工, 2008, 14: 49-51
- [17] 张世荣, 李昌禧. 游梁式抽油机示功图的间接测量[J]. 华中科技大学学报, 2004,

32 (11): 62-64

- [18] 陈镭. 油管“示功图”与井下泵工况的关系研究[J]. 油气井测试, 2000, 9 (3): 22-24
- [19] S.G.Gibbs.Utility of Motor-Speed Measurements in Pumping-Well Analysis and Control[J].SPE 13198, 1987:199-208
- [20] M.Dепенbrock.Direct Self-Control(DSC)of Inverter-Fed Induction Machine[J].IEEE Trans on PE, Vol.PE-3, 1988, 4:420-429
- [21] Takahashi I.High-performance of direct torque control of an induction motor[J].IEEE Trans on Ind.Vol.252, 1989:257-264
- [22] 万小东, 廖勇, 何志明. 基于 ARM 单片机的异步电动机远程监测系统的设计[J]. 电机与控制应用, 2007, 31 (8): 53-56
- [23] 何志明, 廖勇, 陈建. 无速度传感器异步电动机检测系统研究[J]. 电器传动. 2008, 38 (3): 18-20
- [24] 金晶. GSM/GPRS 通信技术在油井远程监控系统中的应用[D]: 武汉: 华中科技大学, 2006
- [25] 李明. 抽油机智能间抽设备的研制[D]: 乌鲁木齐: 新疆大学, 2006
- [26] 许婧, 付少锋. 基于 LPC2378 的数据采集系统的设计[J]. 电子产品世界, 2008, 9: 100-109
- [27] 季建华, 都志杰, 吴勤勤. 仪表原理、设计及调试[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 1994, 25-30
- [28] 李仁定. 电机的微机控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 20-21
- [29] 文波. 基于嵌入式系统的抽油机远程示功仪的设计[D]: 武汉: 武汉理工大学, 2006
- [30] 李凤. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999, 1-132
- [31] 何志明, 廖勇, 向大为. 定子磁链观测器低通滤波器的改进[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (18): 61-65
- [32] 何志明, 廖勇, 向大为. 基于改进层叠式可编程低通滤波器的磁链观测方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23 (4): 53-58
- [33] 汤蕴璆、张奕黄、范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004, 24-46
- [34] 杨顺昌. 电机的矩阵分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988, 35-100

- [35] 白绪涛, 吴凤江, 孙立. 一种新型异步电动机负载转矩间接检测方法[J]. 电机与控制应用, 2007, 34 (10): 27-29
- [36] 庄磊. 基于观测器模型的负载转矩间接测量[J]. 江苏机械制造与自动化, 2000, (6): 10-11
- [37] 钟章队, 蒋文怡, 李红君. GPRS 通用分组无线业务[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003, 135-168
- [38] 李华, 李学云. 现代移动通信新技术——GPRS 系统[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 2-15
- [39] 郭锐, 徐玉斌. 一种基于 GPRS 的远程监控系统[J]. 太原科技大学学报, 2006, 27(5): 352-356, 374
- [40] 张寅. 基于 GPRS 的远程无线监控系统[D]: 秦皇岛: 燕山大学, 2006
- [41] 黄承安, 张跃, 云怀中. 基于 GPRS 的远程仪表监控系统[J]. 电测与仪表, 2003, 40(8): 42-45
- [42] 陈宪侃, 叶利平, 谷玉洪. 抽油机采油技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 3-122
- [43] 郇云飞, 吴晓东, 金潮苏. 游梁式抽油机皮带传动效率分析[J]. 石油钻探技术, 2002, 30 (6): 45-47
- [44] 陈磊. 常见抽油机运动与动力分析、评价系统的研究[D]: 东营: 中国石油大学, 2007
- [45] 邬亦炯, 刘卓钧, 赵贵祥, 等. 抽油机[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 31-52
- [46] 万仁溥. 采油工程手册(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 422-430
- [47] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 100-103
- [48] 李兆文, 吴晓东, 周赤峰. 异形游梁式抽油机运动参数的求解方法[J]. 石油机械, 2001, 29 (6): 14-16
- [49] 刘洪智, 郭东. 异形游梁式抽油机[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 17-19
- [50] 叶振凯. 基于小波分析的交流电力测功机测试系统研究[D]: 湖南: 湖南大学, 2004
- [51] Mallat S. A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet Representation. IEEE. Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693
- [52] 韩震宇, 申旭娟, 石章林. 信号的多分辨率分析及其在消噪中的应用[J]. 四川联合

大学学报, 1999, 3(1): 52-58

- [53] H.Krim , D.Tucker. S. Mallat , D. Donoho , On Denoising and Best Signal Representation, IEEE. Trans.on Information Theory, 1999,45 (7), 2225-2238
- [54] 胡昌华, 张军波, 厦军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 217
- [55] 姜晨, 舒乃秋, 周静, 等. 基于小波变换的含噪声行波信号奇异点检测[J]. 电网技术, 2004, 10(28): 31-33
- [56] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 157-175
- [57] 林京. 小波奇异性检测及其在故障诊断中的应用[J]. 信号处理, 1997, 11(3): 182-187
- [58] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 150-174
- [59] 王济, 胡晓. Matlab 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水力水电出版社, 2006: 50-54
- [60] 张来斌, 王朝晖, 张喜廷, 等. 机械设备故障诊断技术及方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 68-77
- [61] 刘洪智. 异型游梁抽油机的设计思路[J]. 石油机械, 1996, 24 (增刊): 14-18
- [62] 何岩峰, 吴晓东, 韩国庆, 等. 示功图频谱分析新方法[J]. 石油学报, 2008, 29 (4): 619-624

致谢

三年的研究生生活转瞬即逝，我衷心感谢中国石油大学这一育人的沃土，和所有传授我知识的老师，是他们无私奉献的精神让我在此度过了这一段人生最美好、最有意义的时光。

在此要特别向我的导师樊灵副教授表达最衷心的感谢和最诚挚的敬意。樊老师活跃的学术思想、严谨的治学态度、宽广的学术视野和对事业的忘我追求，深深地影响了我，使我受益匪浅，这也将成为今后我一生中尊敬和效仿的典范。在我攻读硕士学位期间，樊老师尽可能地为我们提供科研机会和良好的学习环境，并在生活上给予我们极大的关怀和帮助。在此，我要向樊老师表示衷心的感谢和崇高的敬意。

感谢采油工程软件中心冯国强老师和隋义勇老师以及同学们的大力帮助和支持，使我顺利的完成论文的撰写。

在完成硕士论文期间，感谢大港油田采油工艺研究院，为我提供了宝贵的现场实验机会，让我有机会将理论与实践紧密地结合在一起，感谢电气自动化室任桂山主任和其他的工程师给予我的极大的指导和帮助，此外，感谢重庆大学廖勇教授、何志明博士和研究生吴强的大力帮助和指导，在此特向他们表示深深的谢意！

还要对一直默默支持和关心我的家人表示感谢，他们无微不至的关怀和鼓励让我不断前进，给与了我战胜一切困难的勇气，支持我顺利完成我的学业。

要感谢的人太多，在此不能枚举，最后祝愿所有的老师和同学们万事顺意！