

# 伺服驱动技术及其在钻修井装备中的应用研究

杨双业<sup>1,2</sup>, 于兴军<sup>1,2</sup>, 鲁运来<sup>3</sup>, 夏辉<sup>1,2</sup>, 田德宝<sup>1,2</sup>

(1. 宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西 宝鸡 721002; 2. 国家油气钻井装备工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721002; 3. 西部钻探吐哈钻井公司, 新疆 鄯善 838200)

**摘要:** 针对钻修井装备中对降低人员劳动强度、提高作业安全性、提高装备自动化程度等要求的提高, 提出了基于交流永磁同步伺服电机(PMSSM)驱动的钻修井装备解决方案, 详细阐述了PMSSM的基本原理、主要特点、适用于钻修井装备的PID三闭环控制策略, 并针对钻修井装备的工况特点提出了PMSSM的选型方法。最后, 分析了基于防爆型PMSSM驱动的机械臂在油田的应用情况, 结果表明, 该驱动方式达到现场防爆、防护和连续作业的要求, 可满足钻修井装备作业工艺需求, 具有一定的应用前景。

**关键词:** 钻修井装备; 永磁同步伺服电机; PID控制; 伺服电机选型; 防爆伺服电机

**中图分类号:** TP23 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19863

## Research on Servo Driver Technology and the Application of Drilling & Workover Rig Equipment

YANG Shuangye<sup>1,2</sup>, YU Xingjun<sup>1,2</sup>, LU Yunlai<sup>3</sup>, XIA Hui<sup>1,2</sup>, TIAN Debao<sup>1,2</sup>

(1. Baoji Oilfield Machinery Co., Ltd., Baoji 721002, Shaanxi, China; 2. National Oil & Gas Drilling Equipment Research Center, Baoji 721002, Shaanxi, China; 3. Xibu Drilling Engineering Tuha Drilling Co., Shanshan 838200, Xinjiang, China)

**Abstract:** Aiming at the drilling and workover equipment demand for reducing labor intensity, increasing job security, improving automation level of equipment, a drilling and workover rigs equipment drive system solution was proposed, which was based on the AC permanent magnet synchronous servo motor(PMSSM) drive technology. The composing principle, main features and triple closed-loop PID control theory of the PMSSM was discussed, and then according to the characteristics of drilling and workover rig equipment, the selection method of PMSSM was proposed. Finally, the application of the robotic arm drive by the explosion-proof PMSSM system was analyzed. The result shows that the explosion-proof PMSSM driving mode meets explosion prevention, protection, continuous operation requirements, drilling and workover rig equipment technological requirements, and has a certain application prospect.

**Key words:** drilling & workover equipment; permanent magnet synchronous servo motor(PMSSM); proportion integration differentiation(PID) control; servo motor selection; explosion-proof servo motor

近年来,随着工业自动化技术的日渐成熟、现场HSE要求的不断提高,石油钻采装备领域也在逐步改变现有的作业方式,致使传统人力操作的工具正逐步被高精度、高安全性的自动化工具所取代。伺服驱动技术的工业化应用日渐成熟,伺服系统的输出功率密度、防爆防护性能、单元部件稳定性等方面已趋于满足油田现场作业工况,应进行相关产品的应用研制。

伺服电机的控制精度高、抗干扰能力强,自身

具有反馈装置,易于实现闭环控制。按供电方式可将伺服电机分为交流和直流两类。其中交流伺服电机按其内部结构的不同可分为永磁同步伺服电机和鼠笼式异步伺服电机,主要应用于印刷、纺织、塑料、食品和包装等工业领域<sup>[1]</sup>;直流伺服电机按其内部结构可分为有刷直流伺服电机和无刷直流伺服电机,主要应用于机器人、机械连杆机构等。较之直流伺服电机,交流伺服电机具有动态响应好、输出功率大、转速高、结构相对简单等特

**基金项目:** 国家“十三五”科技重大专项(2016ZX05020-001)

**作者简介:** 杨双业(1984—),男,硕士,高级工程师,Email: yangshuangye@cnpc.com.cn

性,在工业领域应用比率高于其他类型。

## 1 PMSSM 原理及转矩特性

### 1.1 PMSSM 原理

交流永磁同步伺服电机主要由定子和转子组成,定子形状与普通感应电动机的相同,但其转子用永磁铁构成,以此形成励磁磁通,无需励磁电源<sup>[2]</sup>。为提高伺服电机的动态响应特性和加减速性能、降低自身转动惯量,其转子长度与直径的比值较高。

将电机连接至特定的伺服驱动器,使其定子绕组形成可控的旋转磁场,旋转磁场会对转子产生磁力,转子旋转磁场与定子旋转磁场间的滞后角为 $\alpha$ 。 $\alpha$ 越大电机输出转矩越大,当 $\alpha=90^\circ$ 时达到峰值。为有效地控制电机输出转矩,应通过一个特定的模型计算电机的三相电流,须用编码器测量转子位置。

### 1.2 PMSSM 转矩特性

设 PMSSM 转子的阻抗为  $R$ ,感抗为  $X$ ,其绕组的  $X/R$  值较小,而常规感应电机的  $X/R$  值较大。在恒功率段,PMSSM 的转矩特性曲线与常规感应电机的转矩特性曲线对比如图 1 所示。曲线 1 为常规感应电机的转矩特性曲线,其非线性程度高,在超过特定的转速后转矩急剧下滑,并且低速段出现的正斜率会造成系统运行的不稳定。曲线 2 为 PMSSM 的转矩特性曲线,其速度  $n$  和转矩  $T_e$  基本呈线性关系,且斜率持续为负值,有利于系统的稳定运行<sup>[3]</sup>。

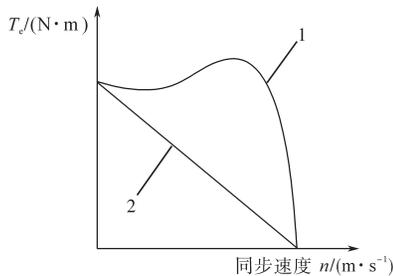


图 1 交流电机转矩特性曲线

Fig.1 The characteristic curves of AC motor torque

## 2 伺服控制技术

### 2.1 伺服控制总体方案

伺服系统一般采用多级闭环层叠的控制方式<sup>[4]</sup>,图 2 为 PMSSM 闭环控制原理图。全桥逆变器驱动电机 M 转动, M 带动负载执行动作,编码器与 M 的输出轴直接连接,反馈信号经处理后分

别输出当前位置和当前速度。闭环控制回路由内到外依次为电流控制、速度控制和位置控制。图 2 中,  $X_{set}$  为伺服电机设定位移,  $m$ ;  $X_{act}$  为实际位移量,  $m$ ;  $n_{set}$  为设定速度,  $rad/s$ ;  $n_{act}$  为实际速度,  $rad/s$ ;  $I_{qset}$  为设定电流,  $A$ ;  $I_{qact}$  为实际电流,  $A$ ;  $M$  为交流伺服电机。

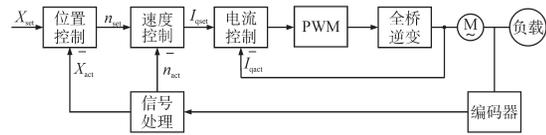


图 2 三闭环控制原理

Fig.2 The principle diagram of triple closed-loop control

### 2.2 电流控制

PMSSM 的输出转矩取决于定子电流。电流的动态特性和稳定性决定了输出转矩的性能指标。同时,多闭环系统外环性能的发 挥依赖于系统内环的优化,因此,提高电流性能是改善环伺 服控制特性的根本<sup>[1]</sup>。

PMSSM 输出转矩的大小取决于电流值,输出转矩的动态响应能力决定于电流的动态响应性能。应用数字控制技术将三相电流值经过坐标变换转化为两相电流值。坐标变换后,  $I_q$  用于产生转矩。图 3 为  $I_q$  的闭环 PI 电流控制原理图。

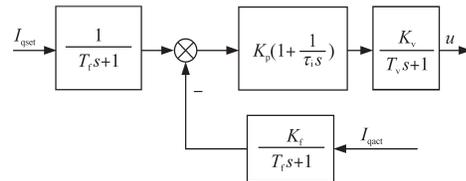


图 3 电流控制原理

Fig.3 The principle diagram of current control

指令信号  $I_{qset}$  和反馈信号  $I_{qact}$  中串联的一阶惯性环节用于滤除控制信号中的谐波,主要谐波频率为  $f \pm 2\pi/\omega$ ,其中,  $f$  为三角波载波频率,  $Hz$ ;  $\omega$  为逆变器输出的角频率,  $rad/s$ 。滤波器时间常数  $T_f$  由下式计算:

$$T_f = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}\right) \frac{1}{f} \quad (1)$$

反馈电流  $I_{qact}$  增加了比例系数  $K_f$ 。

PWM 逆变器可视为具有时间常数  $T_v$  和增益  $K_v$  的一阶惯性环节。  $T_v$  和  $K_v$  的参数分别由下式计算:

$$T_v = \frac{1}{2f} \quad (2)$$

$$K_v = \frac{U_0}{2U_\Delta} \quad (3)$$

式中:  $U_0$ 为逆变器直流电压, V;  $U_\Delta$ 为三角波载波幅值, V。

设置电流控制环节比例系数为  $K_p$ , 积分时间常数为  $\tau_i$ ,  $K_p$  和  $\tau_i$  与伺服电机的等效电阻、等效电感、系统超调量、阻尼比等多个参数有关, 具体按下式计算:

$$K_p = \frac{\tau_i K'}{KK_i} \quad (4)$$

其中

$$\tau_i = \frac{L}{R} \quad K' = \frac{1}{2(T_f + T_v)} \quad K = \frac{1}{R}$$

式中:  $K_i$  为小惯性环节控制增益;  $L$  为定子绕组的等效电感, H;  $R$  为定子绕组的等效电阻,  $\Omega$ 。

### 2.3 速度控制

图4为速度闭环控制的基本原理, 实际角速度值  $n_{set}$  与反馈角速度值  $n_{act}$  之间的差值通过PI调节后再转换为设定电流值  $I_{qset}$ 。其中, 角速度比例系数  $K_n$  和角速度积分时间常数  $\tau_n$  为伺服驱动器的设定参数, 一般根据具体伺服电机参数、伺服驱动器性能等确定。影响  $K_n$  的因素包括: 电流控制器的动态特性、实际速度检测的时间特性、速度控制器的采样频率和运算时间等。

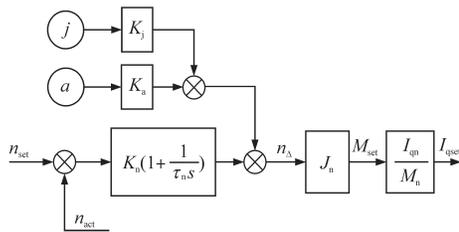


图4 速度控制原理

Fig.4 Principle of the velocity control

在PI控制的基础上增加加速度  $j$  和角加速度  $a$  的前馈控制以提高速度控制器的动态响应特性, 其比例系数分别为  $K_j$  和  $K_a$ 。  $j$  和  $a$  的值由不同的  $n_{set}$  值决定, 用于矫正速度控制器对当前速度的误差, 可在实际速度反馈之前调整伺服电机的输出转矩。一般伺服驱动器按增加前馈控制的百分比(0%~100%)进行设置。

总惯量  $J_n$ 、电机的额定电流  $I_{qn}$  和额定转矩  $M_n$  3个参数为特定伺服电机的基本属性。  $J_n$ 、 $I_{qn}$ 、 $M_n$  与  $I_{qset}$  之间的关系如下所示:

$$M_{set} = n_\Delta J_n \quad (5)$$

$$I_{qset} = M_{set} \frac{I_{qn}}{M_n} \quad (6)$$

式中:  $n_\Delta$  为速度, rad/s;  $M_{set}$  为设定转矩, N·m。

通过上述运算将设定速度与实际速度之间的误差值转换为驱动伺服电机变换转矩的电流值  $I_{qset}$ 。

### 2.4 位置控制

位置控制是伺服控制有别于常规变频控制的关键点, 位置控制时禁止出现超调量, 因此一般仅采用比例控制, 如图5所示, 其增益  $K_x$  按下式计算:

$$K_x = \frac{K_n}{2} \quad (7)$$

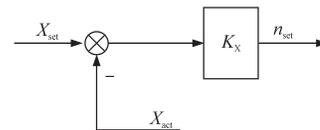


图5 位置控制原理

Fig.5 The principle of position control

将实际位置  $X_{act}$  与设定位置  $X_{set}$  的差值放大, 以提高位置控制的动态响应。当位置差值减小时, 以更大的倍数减小速度; 当位置差为0时, 设定速度为0, 电机0速运行。

## 3 钻修井装备应用研究

### 3.1 负载和工作特点

#### 3.1.1 重载且低速大转矩

要求在有限的设备空间内提供足够的低速转矩。如: ZJ70DB 钻机绞车滚筒转动惯量为  $31.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ <sup>[5]</sup>, 最大快绳拉力 485 kN, 最高速度 1.5 m/s<sup>[6]</sup>。 ZJ30DB 自动化钻机的最大钩载 1 800 kN<sup>[7]</sup>, 输送最大管柱质量 3 000 kg<sup>[8]</sup>。铁钻工最大卸扣转矩 140 kN·m, 最大上扣转矩 98 kN·m, 最大旋扣速度 90 r/min<sup>[9]</sup>。

#### 3.1.2 严格的防爆区域划分和防爆要求

油气钻修井作业过程中随时可能有易燃易爆气体泄漏, 因此对于特定区域的电气设备必须按规定采取良好的防爆措施。图6所示为 API RP500 中对于开放式井架防爆区域的划分规定<sup>[10]</sup>。防爆1区包括: 以井口中心为圆心, 半径 1.5 m 的球形内; 以井口中心为圆心, 半径 1.5 m 的地面圆井; 半径 1.5 m 的半圆型地沟。防爆2区包括: 1区之外, 以井口中心为圆心, 半径 3 m 的钻台面之上半球区域以及钻台面之下的圆柱投影区; 地面圆井外边界为圆心, 半径 1.5 m 的扇形区域并与半径 3 m 的投影区形成闭合区间。

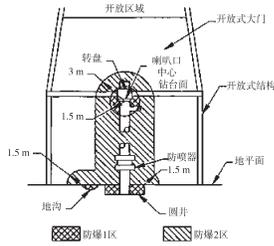


图6 防爆区域划分

Fig.6 Explosion-proof zone division

### 3.1.3 稳定性要求高

钻修井工作的另一特点为连续不间断作业。如:5 000 m定向井的平均钻井周期18个月,在此期间内若设备停机超过4 h即有可能出现塌陷、井漏、卡钻等井下事故。因此,对设备的稳定性提出更高的要求。

### 3.1.4 具有紧急重载停车工况

相互交接的不同设备之间会存在交叉的工作区间,应按防撞区域规划控制设备的运动状态。实时计算各设备可能存在的防撞关键轮廓点,若处于防撞区域内,则通过紧急制动实现设备的停车<sup>[11]</sup>。PMSSM应具有带载0速保持的能力。

## 3.2 伺服电机选型

针对钻修井机中设备负载特性和作业特点,提出PMSSM及其驱动器选型流程如图7所示,其中 $M_{max}$ 为最大输入转矩,  $N \cdot m$ ;  $M_{Load}$ 为最大负载转矩,  $N \cdot m$ ;  $i$ 为减速比;  $\eta$ 为减速机效率;  $M_{DYN}$ 为伺服电机动态转矩限制值,  $N \cdot m$ ;  $k$ 为惯量比,  $k = J_{total} / J_{motor}$ ,  $J_{total}$ 为作用于电机轴的总惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  $J_{motor}$ 为电机惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  $M_{eff}$ 为作用于电机轴的有效转矩,  $N \cdot m$ ;  $M_{in}$ 为  $t_n$ 时间段的电机输出转矩,  $N \cdot m$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ;  $t_a$ 为循环周期,  $s$ ,  $t_a = t_1 + t_2 + \dots$ ;  $n_{ave}$ 为平均速度,  $rad/s$ ;  $n_{Load}$ 为减速机输出轴平均速度,  $rad/s$ ;  $n_m$ 为  $t_n$ 时间段的平均速度,  $rad/s$ ;  $M_{rated}$ 为伺服电机的额定转矩,  $N \cdot m$ ;  $P_{Br, in}$ 为  $t_n$ 时间段内最大刹车功率,  $W$ ;  $P_{Br}$ 为平均刹车功率,  $W$ 。

根据图7所列,分为以下8个步骤:

- 1) 根据  $i, \eta, M_{Load}$  3个参数计算  $M_{max}$ ;
- 2) 通过  $M_{DYN}$  确定若干满足转矩需求的备选电机型号;
- 3) 确定  $k$  值,使其处于10~15之间,应结合  $J_{total}$  和  $J_{motor}$  值反复计算,进一步缩小备选电机的范围<sup>[12]</sup>;
- 4) 按照伺服电机所驱动设备的工艺特性,计算电机在单个循环周期内的加速、匀速、减速等各区间的转矩和时间需求。计算  $M_{eff}$  和  $n_{ave}$  值;

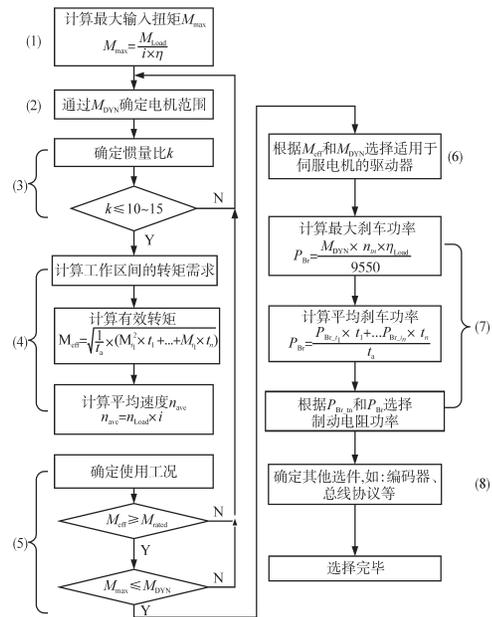


图7 伺服系统选型流程

Fig.7 Selection process of servo system

5) 根据上述限定数据对照备选伺服电机的转矩—转速曲线分析  $M_{eff}$  是否小于等于  $M_{rated}$ , 工况内的  $M_{max}$  是否小于等于  $M_{DYN}$ , 若全部满足需求即可确定电机型号, 否则应返回重新校核最初确定的备选电机是否满足需求, 或重新划定备选电机的范围并重复上述过程;

6) 根据工艺过程中的  $M_{eff}$ ,  $M_{DYN}$ ,  $P_{Br, in}$  和  $P_{Br}$  等参数选择与伺服电机所匹配的伺服驱动器备选型号;

7) 根据  $P_{Br, in}$  和  $P_{Br}$  确定所需的制动电阻功率;

8) 主要工作参数确定之后, 根据项目中其他控制器特点或系统网络需求进一步选择其他驱动器选件, 如: 伺服电机编码器类型、定子温度传感器类型、总线通讯协议、驱动器附带 I/O 接口等。

至此, 根据设备特定需求的伺服电机和伺服驱动器选择完毕。

## 4 试验情况

针对上述工况特点, 首先开发负载较小的钻杆处理机械臂, 其具有伸缩、旋转、行走等多个运动关节, 每个关节配一套伺服电机, 均满足 UL Class1, Division1 防爆需求, 防护等级 IP65, 最高转速 2 600 r/min, 最大转矩 18  $N \cdot m$ , 减速机减速比 560。

目前该装置已在油田等进行工业性试验。与液压机械臂的性能比较参见表1, 分析得出: 电

机驱动机械手的运行噪声降低30%,运行速度提高59%,响应时间和定位精度均得以大幅提高,可以表明电驱动方式在环保、效率、精度等方面均优于液压驱动方式。尤其操作时的相应特性,液压系统受环境温度影响较大,冬季使用时响应性能较差,而电驱动则不受该因素的影响。

表1 液压驱动与电驱动机械臂性能比较

Tab.1 Performance comparison between hydraulic actuator mechanical arm and electric actuator mechanical arm

驱动类别	运行噪声/dB	响应时间/s	平均速度/ $(m \cdot s^{-1})$	定位精度/mm	环保特性
液压驱动	78	2~20	0.2	2	漏油隐患
电机驱动	55	$2 \times 10^{-7}$	0.33	1/100	无泄漏隐患

在起下钻环节,该伺服驱动机械臂能够按程序设定轨迹平稳运行、加减速能够按斜坡曲线执行动作。在保证定位精度的前提下可推动1.2 T三立根钻杆。驱动负载能力满足设计要求。

## 5 结论

PMSSM以其简单的生产工艺、高可靠性和动态响应特性在工业自动化领域得以广泛应用。针对该领域,自动化机械设备替代人工作业已是必然趋势。结合新开发产品的工业性试验情况得出,满足石油钻探负载特性需求、现场区域防爆需求、连续作业需求、设备联动控制需求的防爆型伺服电机有较大的应用前景。

## 参考文献

- [1] 陈先锋. 伺服控制技术自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- [2] 秦忆. 现代交流伺服系统[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1995.
- [3] Jagan N C. Control Systems[M]. 2nd ed. Hyderabad: BS Publications,2008:63.
- [4] Kaya A, Scheib T J. Tuning of PID Controls of Different Structures[J]. Control Eng, 1988, 35(7): 62-65.
- [5] 朱奇先,田斌,方永春,等. ZJ70DB变频钻机绞车电机参数配合设计[J]. 石油机械,2016,44(3):39-43.
- [6] 王进全,黄悦华,龚惠娟,等. 石油钻机[M]. 北京:石油工业出版社 2012.
- [7] 沈军利,张友会,康云华,等. ZJ30/1800DB自动化钻机的研制[J]. 石油机械,2016,44(9):31-36.
- [8] 刘春宝,王定亚,王耀华,等. DM3/3.3-J液缸举升式动力猫道设计与试验[J]. 石油机械,2016,44(9):41-46.
- [9] 李洪波,王洪川,赵磊,等. 伸缩臂式铁钻工的研制[J]. 石油机械,2014,42(11):16-19.
- [10] API Recommended Practice 500. Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Division1 and Division2[S]. 2nd ed. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 1998.
- [11] 张鹏飞,朱永庆,张青锋,等. 石油钻机自动化、智能化技术研究和发展建议[J]. 石油机械,2015,43(10):13-17.
- [12] MENG KING,李幼涵. 机器设计中伺服电机及驱动器的选型[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

收稿日期:2019-01-10

修改稿日期:2019-03-21