

交流变频驱动海洋绞车多电机同步控制技术研究

李成

湖南机电职业技术学院，湖南 长沙 410000

DOI:10.61369/EPTSM.2026070013

摘 要： 在二十大中明确“既要追求高质量发展的同时，也要注重安全保障，促进经济发展保障关键产品、重大工程、重要物质及战略性先进技术领域的自给率”。为获得和使用海洋深处或极端环境的海洋资源，必须使用专用海洋工程装备来完成该功能。较高级的海洋资源调查、开采设备是开发海洋资源的前提与保障。因此本文对交流变频驱动海洋绞车的多电机同步控制技术进行深入研究，旨在提升我国海洋设备的研究水平与创新能力。

关 键 词： 交流变频驱动；海洋绞车；多电机；同步控制

Research on Multi-Motor Synchronous Control Technology of AC Variable Frequency Drive Marine Winch

Li Cheng

Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha, Hunan 410000

Abstract： In the 20 th National Congress of the Communist Party of China, it is clear that ' we should not only pursue high-quality development, but also pay attention to safety and security, promote economic development and ensure the self-sufficiency rate of key products, major projects, important materials and strategic advanced technology '. In order to obtain and use marine resources in the deep ocean or extreme environment, it is necessary to use special marine engineering equipment to complete this function. Advanced marine resources survey and mining equipment are the premise and guarantee for the development of marine resources. Therefore, this paper makes an in-depth study on the multi-motor synchronous control technology of AC variable frequency drive marine winch, aiming at improving the research level and innovation ability of marine equipment in China.

Keywords： AC frequency conversion drive ; marine winch ; multi-motor ; synchronous control

引言

海洋绞车广泛应用于各类船上，包括海上科考船、海底资源调查船、海上运维船以及海底铺管船等等。其作用包括但不限于：水下拖曳、海洋钻井、海洋管道铺设、深海油气开采等海疆资源开采以及深海作业的环境中。海洋绞车必须经常在动荡的深海环境中工作，将会受到汹涌的波浪影响，同时导致母船发生上下摆动，其最大幅值可高达5 ~ 10m。一些海底作业装备需要保持一个固定的位置，但是母船由于风浪的影响发生上下位移而会干扰正常的潜底工作，还会导致缆绳发生突然的脱开以及断裂，对于其连接器尤其严重。因此，海洋绞车需要有自动张力调整与升降补偿功能。当拖船与被拖物之间的张力因风浪等外界因素发生变化时，卷筒会自动调节缆绳，使张力始终维持在一定范围内，避免不平衡的张力损伤缆绳，影响海下作业。

一、储缆绞车多电机传动系统

使用四台电动机同时驱动一个载荷进行储缆绞车运动（如图1所示）。理论上，可以使四台电动机经过刚性连接带动储缆绞车，从而保证驱动力的平衡，降低零部件的损耗，同时提高整套传动机构的机械强度，并且降低电机额外的能量损耗，提高电机的效率，以及设备整体的布置弹性，此外电动机体积小且安装方便，便于现场调整维护工作^[1]。

海洋绞车多电机传动系统在运行过程中，呈现出的特点较多，包括重载低速、柔性连接、工况多变等，具体分析如下：

（1）重载低速。海洋绞车作业过程中，所处的环境较为恶劣，缆绳负载大，特别是在深水铺管、拖拽作业中，单台电机很难满足峰值扭矩需求，需要通过多台电机并联驱动同一根输出轴。此种传动形式要求各电机在低速大转矩工况下保持高度一致的出力，任何一台电机出现扭转波动或转速偏差，均可能导致轴系受力缺乏均衡性，一旦情况严重，可能出现机械破损、缆绳断

裂等问题^[2]。

(2) 柔性连接。多电机与绞车卷筒间通常采用齿轮箱、联轴器是实现机械耦合,属于非刚性直联。此种柔性传动结构在吸收冲击载荷、减小振动方面的优势明显,但也会出现扭转弹性形变、传动间隙等问题,导致各电机转子间的转角差很难直接通过刚性约束强制一致,需要依赖电气控制手段动态补偿,而此过程可能使得同步控制难度增大。

(3) 工况多变。海洋作业过程中,收缆和放缆需要交替推进,负载随缆绳长度、海流阻力等因素影响而发生不同程度变化。系统在运行过程中,因为需要反复经历加速、减速、正反转切换等动态过程,在此种情况下,各电机的动态响应特性会因为个体差异而存在明显区别,如果采用的控制方式不合理,很难短时间内适应负载变化,容易出现电机间转矩分配失衡的情况,致使系统无法平稳运行,最终对作业的安全性、可靠性造成负面影响。

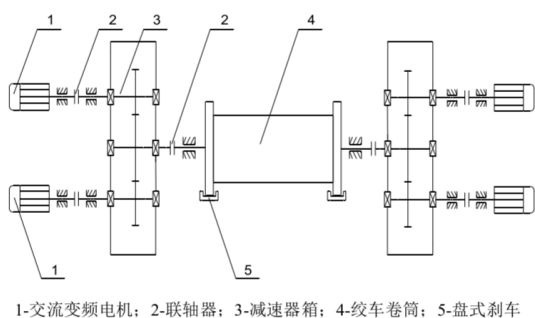


图1 储缆绞车主传动原理结构

二、交流异步电机空间矢量坐标变换

矢量变换的主要原理是将异步电动机在三相静止坐标系中的定子交流电流,经过两次重要的坐标变换,最终等效为旋转坐标系中的直流电流,用来模拟直流电机的控制特性;按照磁动势等效原则,利用 Clarke 变换把空间上互差 120 度的三相静止绕组映射成两相正交的静止绕组,此时三相交流电流也就变成两相交流电流;再经过 Park 变换,两相静止坐标发生旋转,使其和电机磁场保持同步,在该旋转坐标系中,原本随时间正弦变化的交流电流,变成了相互正交且恒定的励磁电流分量和转矩电流分量,达到电流解耦的目的。交流电机中,将三对相互对称的电流输入到三对相互对称的线圈,按电流等效前后的等效旋转磁场原则,按照同步电动机向量变换过程,本文设计出本节提出四驱交流同步电动机的模拟模型如图 2 所示。

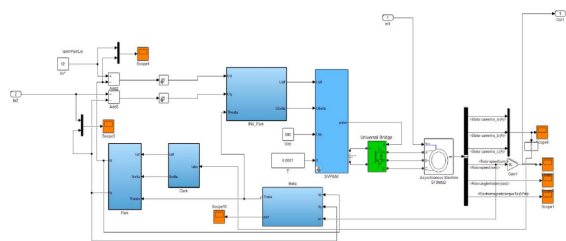


图2 异步电动机仿真模型

三、电机组协同控制策略研究

(一) 主从转矩跟随

交流变频驱动下,在海洋绞车多电机同步控制过程中,主从控制是较为常见的多电机同步策略,主要是将其中一台电机作为主机,运行过程采取速度闭环模式,提升运行的稳定性和可靠性^[3]。同时,其余电机设置为从机,运行过程采取转矩闭环模式,同时动态跟随主机的转矩给定值。此种策略的实施,能够做到结构简单、操作便利,各从机只需要接收主机的转矩指令便可实现基本同步。但需要注意的是,当主机因为负载波动而出现转速跌落的情况,从机只能响应转矩指令,缺乏自主调速能力,从而使得主从机间转速差积累量过大,在频繁加速、减速的情况下,转矩分配可能出现不均衡的问题,需要配合额外的转速补偿,以实现此问题的有效解决。

(二) 交叉耦合补偿

此种方式是通过将一台电机转速偏差和其余电机状态信息加权融合,建立综合补偿信号,让其叠加到各电机的给定值中,以达到电机间相互牵制、动态协调的目的。与主从控制策略相比,此方法的抗扰能力强,如果某台电机因为外部冲击而出现瞬时转速突变的情况,相邻电机在运行过程中,补偿信号能以最快的速度将其拉回同步状态。但需要注意的是,其计算过程较为复杂,会随着电机台数增长而增长,通讯延迟会对补偿效果的实时性、可靠性产生一定影响。因此,在海洋绞车应用过程中,应该利用相邻交叉耦合等简化结构,在控制性能的前提下,实现与工程的动态平衡。

(三) 模型预测与智能协同

近年来,数字化、智能化等技术发展迅速,而多电机同步领域,同样强化了先进技术的应用,尤其是模型预测控制,能通过建立涵盖所有电机和机械耦合环节的状态空间模型,实现对控制周期内各个时刻的系统行为的精准预测,滚动求解最佳的控制量序列,同时处理约束条件等相关问题,提升动态响应速度以及自适应能力。并且,在神经网络等的辅助下,能够实现参数的在线自整定,有助于系统应对海况变化能力的增强,为海洋绞车多电机同步控制效果和水平的提高提供保障。

(四) 非耦合控制与交错连接

非耦合控制方式原理简单,其协调能力较差,但控制精度要求较高的控制系统中,耦合控制方式能有效提高其控制协同能力;然而,耦合控制方式只适用于采用两台电机时,在有限范围进行了控制方案的比较,效果较为单一,在偏差耦合控制模式下,各个电机都和各自的控制器组成独立的闭环控制子系统,各子系统的速度误差可以实时进行交叉反馈补偿,这使电机的运动响应速度得到大幅度提高,同时使系统整体的抗干扰能力和同步协调精度得到明显增强,适用于多台电机驱动控制系统,在上面基础上选用交叉耦合控制方式实现绞车多电机驱动系统的协同控制。

交错连接方法能实现各电机速度的调节,并将其与其他电机速度偏差之和作为速度调节器的输入。本文使用的偏差耦合控制结构如图 3 所示,是文章所设计的储缆绞车四电机联合驱动同步控

制系统。最终实现四电机系统的协同运动。它与交叉连接的区别在于，偏离连接更适用于本文中的四电机驱动控制系统。

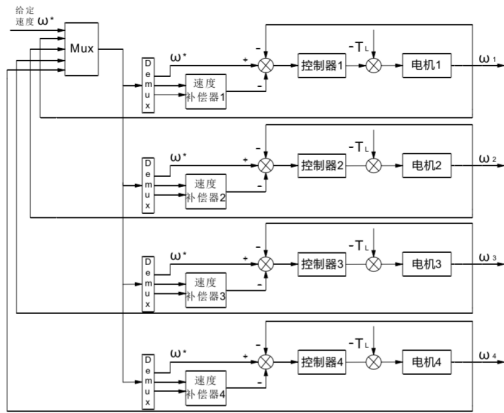


图3 偏差耦合控制结构

四、储缆绞车电机组协同控制系统建模仿真

基于上述对各台交流异步电机驱动装置的传动性能推导，采用上述所述的偏差协同控制结构，利用 Matlab/Simulink 搭建了其动态模型进行仿真试验，以表明上述所提出的协同控制策略的性能与有效性。将异步电机建模包装之后，调用各种组件库元件在 Matlab/Simulink 中构建四台交流异步电机的协同运动模拟测试模型。

本系统采用了以偏差联动控制原理为基础的设计方案，针对四台电机的误差修正模块进行了模块化封装处理。具体来说，电机一号的误差修正模块模型披露，其余三台电机的误差修正模块与电机一号的结构一致，因此不再另行展示^[4]。

五、仿真结果分析

在进行模型动态模拟的过程中，将总时长设定为二十秒。涉及的四台电机具备一致的参数配置。依据前述章节对电缆卷筒电机的选择标准，在理论最优条件下，若四台电机协同作业，则应选用功率输出为75千瓦，扭矩输出为377牛·米的变频交流电动机。具体的电机参数已在表1中详细列出。

表1 电机参数

电机参数	数据
定子电阻 R_s	0.03415 Ω
转子电阻 R_r	0.03271 Ω
定子电感 L_s	0.0409H
转子电感 L_r	0.0398H
互感 L_m	0.0386H
转动惯量 J	0.03415kg · m ²

参考文献

- [1] 程立, 寇蓓, 焦思茵, 陈继甲. 新型高效12000m海洋自升式平台用绞车设计 [J]. 机械研究与应用, 2021, 34(04): 55-56.
- [2] 谢威, 吴坤阳, 刘全良. 海洋科考储缆绞车设计及分析 [J]. 机械工程师, 2021, (08): 36-37+40.
- [3] 严颖, 张小平, 姜海鹏, 张铸, 赵延明, 黄良沛. 基于GSSEC的开关磁阻电机驱动的海洋绞车主动升沉补偿控制方法 [J]. 工程设计学报, 2021, 28(02): 132-140.
- [4] 王钊. 交流变频控制系统在海洋石油修井机的应用 [J]. 当代化工研究, 2019, (04): 50-52.
- [5] 廖薇, 韩维敏, 胡盼, 等. 海洋绞车升沉补偿系统缆绳张力控制分析 [J]. 工程机械, 2023(7): 82-86, 11.

本研究利用模拟方法，分析了绞车多电机系统在现实运行中的工作状态，并且考察了电机在无负载启动和受到不同负载扰动时的启动过程，在对比分析所获取的数据后，对电机启动性能及电机之间同步运作的情况进行分析，以证明所制定的多电机协同控制策略可以提高绞车多电机驱动系统的协同工作效率，减少电机同步运作中的误差，使系统作业效率得到增强。

（一）电机空载运行

在实验条件下，测试电机的基准转速被设定为1000r/min，初始时各个电机的输出转矩均为0N/m，在无负载的情况下进行仿真模拟，结果显示四个电机的转速波动情况发现：这些电机的响应速度非常快，在2.2秒时转速就趋于稳定，并且逐渐接近最初的设定转速；随后，对电机间的转速偏差加以分析，发现四个电机的同步误差数值为零，说明它们的转速变化保持高度的一致性。

电动机在无负载的情况下运转到第5秒时，突然对电机1施加50N/m的负载扭矩，依照电机转速的变化轨迹可以推断，电机转速的波动和无负载运行时的情况大体一致，但在遇到50Nm负载扭矩的瞬间冲击后，电机1的转速出现下降，其他电机的转速也随之下降，各电机下降的幅度表现为同步，经过一段时间的调整，四台电机的转速都达到稳定，在996r/min~998r/min范围内。

（二）电机不同负载启动

实验为四台电机分别施加10Nm、20Nm、30Nm和40Nm的负载转矩，来对真实工作环境进行模拟，电机在不同负载下启动时，其整体转速的变动情况并不完全同步，但从1.6秒开始，转速的一致性逐渐增强，并且最终稳定在994~996r/min范围内。

因此，经过对储缆绞车四电机联合控制系统在两种不同情景下的模拟实验分析，结果显示各电机展现出迅速的响应速度和优良的启动同步性。面对突发负荷增加，电机的转速有所下降，且其他电机的转速降幅呈现同步性，说明偏差耦合控制有效实现了电机运动状态的同步，显著提升了储缆绞车四个驱动电机的协同性能^[5]。

六、结束语

本研究主要分析了交流变频驱动海洋绞车的多电机同步控制技术，针对重载低速、柔性连接和工况多变等原因，构建了四电机共同驱动系统，在分析异步电机矢量控制原理的基础上，运用偏差耦合控制策略，利用各电机速度误差的交叉反馈补偿，以提高系统的同步协调能力和抗扰动性能。Matlab和Simulink仿真结果说明，该策略在空载和变负载工况下都可以让电机转速快速收敛并且达到高精度同步，验证了控制方案的有效性，为提高海洋绞车在复杂海况下作业可靠性和自动化水平提供了更多参考和借鉴。