

基于交流变频调速的浮式起重机负载均衡控制

黄利锋

上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海 200125

[摘要]海上浮式起重机,在作业过程中随着环境因素的影响,比如风向、洋流、浪涌等变化,导致起重机在吊载过程中出现负载不平衡的趋势,引起吊载安全的问题,同时也引起整体配电的突变的情况,为了决以上问题,提出了一种基于变速的船用起重机货物平衡检测方法。根据交流调速的基本原理,对交流调速技术进行了分析,对变频器的输出进行了校正,进一步控制起重机的执行机构来弥补作业过程中的负载变化,使得达到根据负载变化而变化的均衡控制。采用负载均衡算法在对变频器控制的之间形成逻辑链接,实现对变频驱动系统输出能量达到均衡控制的目的;通过对起重机执行机构对应变频器的主从(D2D)控制,对比试验验证了控制方法的合理性,实验结果表明,该控制方法能有效达到负载均衡控制的效果,能够满足实际作业要求。根据起重船的PID控制策略,阐述了基于原始载荷结构的PID控制方法,并进行了系统仿真,结果表明控制效率满足技术要求,对保证升级过程的安全起到了重要作用。

[关键词]交流变频调速;浮式起重机;负载平衡;PID控制;变频器的主从控制

DOI: 10.33142/aem.v4i12.7571

中图分类号: U664.43

文献标识码: A

Load Balancing Control of Floating Crane Based on AC Variable Frequency Speed Regulation

HUANG Lifeng

Shanghai Zhenhua Port Machinery Company Limited, Shanghai, 200125, China

Abstract: With the influence of environmental factors, such as wind direction, current, surge, etc., during the operation of offshore floating cranes, the trend of load imbalance in the process of crane lifting is caused, which causes the problem of lifting safety, and also causes the sudden change of overall power distribution. In order to solve the above problems, a cargo balance detection method for marine cranes based on variable speed is proposed. According to the basic principle of AC speed regulation, the AC speed regulation technology is analyzed, the output of the frequency converter is corrected, and the executive mechanism of the crane is further controlled to compensate for the load change in the operation process, so as to achieve balanced control that changes according to the load change. The load balancing algorithm is used to form a logical link between the inverters to achieve balanced control of the output energy of the variable frequency drive system; Through the master-slave (D2D) control of the corresponding frequency converter of the crane actuator, the comparison test verifies the rationality of the control method. The experimental results show that the control method can effectively achieve the effect of load balancing control and meet the actual operation requirements. According to the PID control strategy of the crane ship, the PID control method based on the original load structure is described, and the system simulation is carried out. The results show that the control efficiency meets the technical requirements and plays an important role in ensuring the safety of the upgrade process.

Keywords: AC variable frequency speed regulation; floating crane; load balancing; PID control; master and slave control of frequency converter

引言

由于浮式起重机在海洋环境中作业,在风浪的影响下波动较大,不仅降低了作业的定位精度,而且还增加了起重作业的风险;这也会对系统造成额外的电力负担,甚至造成设备损坏和损失。因此,有效控制吊载过程中的波动,对提升过程的安全至关重要。海上船用起重机电驱变频系统的广泛应用,大大提高了起重机的工作效率。其性能特点主要表现在于频繁起停条件下,系统稳定、冲击小、控制精度高。一般来说,负载平衡主要包含有两方面,一是对于船体配电系统来讲,如何实现整船能量平衡,其主要的问题需解决的是当负载发生机械能转化成动能时(比如起重机的起升机构的下降动作),这时变频电机处于发电

和制动的状态,而当所有的机械能都可以被保留时,就能达到能量平衡的目的,从而达到整体能量系统的均衡控制。随着船舶电子信息的广泛应用,通过数据中心处理的所有海洋数据都可以传输到总部,以获得更准确的数据,分布式数据处理技术可以相互作用。在大数据模式下,通常可以通过建立模型,编辑相应程序来处理预计和规划后续负载动作驱势来提高资源利用的效率。然而,由于传统浮式起重机的常规设计,没有有效捕捉风浪波动的数据分析,所以对于负载有效平衡的控制提出来很高的要求,这就引出了负载平衡的第二个方面,那就是在产生负载变化的初始端,如何有效将起重机吊载状态发生变化时,使得起重机所受负载的不平衡趋势能被控制系统有效地均衡控

制是关键,目前应用比较多的,就是变频驱动系统的PID控制和变频器的主从控制。

1 浮式起重机的功能及组成

浮式起重机,是以浮体、船体等作为起重载体的一种水上起重机,是目前海上工程类作业的重要设备。被广泛应用于港口水利、造船、桥梁建设、水下救援及各种水上或者岸边设施的吊载作业,起重船与普通船在线性性能、基础尺寸和承载能力方面存在显著差异。由于甲板上安装了起重机,起重机船舶的重心明显高于普通船舶,重心与设计的关系约为基线的1.5,起重船的尺寸主要取决于起重机整体的设计要求和其对稳定性的要求,另外还必须取决于码头、河床、闸门宽度,世界主要航区的大型桥梁高度等因素,综合考量,合理设计。

浮式起重机按其结构形式的不同,可大体上分为固定臂架式浮式起重机、全回转臂架式浮式起重机以及浮趸式起桥式起重机。固定臂架式浮式起重机的结构简单,成本相对较低,生产周期相对较短,但是抗风能力较弱(见下图1),比较多应用于岸基,离码头较近海域,海况情况不复杂的场景和地点较多;全回转臂架式浮式起重机,其结构相对复杂,可以适应较恶劣工况及远洋深海区域作业,作业灵活性高,但成本相对也较高,生产周期相对较长(见下图2);浮趸式桥式起重机适用于水位落差较大的内河港口,岸壁式码头无法停靠船舶,难以进行装卸作业。

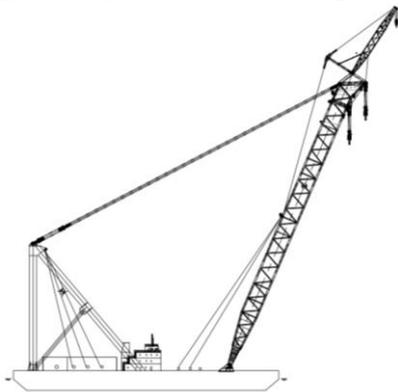


图1 固定臂架式起重机

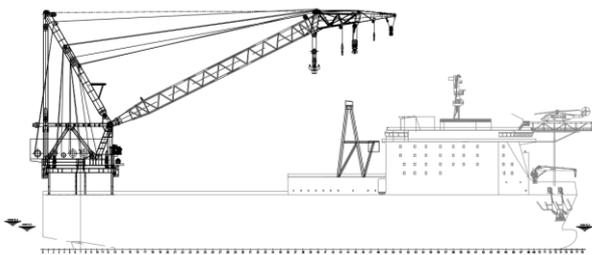


图2 全回转臂架式起重机

浮式起重机起的主要部件和系统由以下几大部分组成:

(1)金属结构:主要是指组成起重机主要机械部件,筒体结构,回转底盘结构,桁架结构,人字架结构,臂

架结构和臂架搁架结构。(所下图3示)

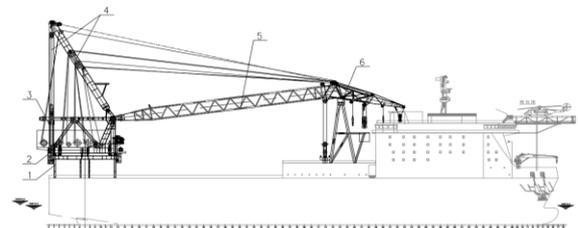
(2)机构和缠绕系统:机构主要是完成吊载工作的起升部件,包含有起升机构(交流变频电机,传动装置,存放缠绕系统的钢丝绳用的卷筒装置,制动装置组成),缠绕系统主要是指钢丝绳及滑轮装置。

(3)附加装置和特殊功能装置:主要是应用于一些特殊工况需求时所设计的起重机起的附加装置,比如打桩锤装置,顶升装置,人字架系固装置,人字架放倒装置等。

(4)电气驱动及控制系统:浮式起重机上配置有完善的电控系统,用来实现检测、执行、控制以及故障诊断等地功能,主要包含电机驱动系统,PLC逻辑控制系统;起重机状态监测系统;配电系统;外围检测传感器系统;力矩限制系统等。

(5)液压系统:电驱浮式起重机的液压系统主要为运行机构的低速制动系统提供相应能量及简单的控制阀组。

(6)辅助系统:浮式起重机上主要滑轮组的润滑系统,照明系统,通讯系统等。



1-筒体结构; 2-回转底盘结构; 3-桁架结构; 4-人字架结构; 5-臂架结构; 6-臂架搁架结构

图3 全回转浮式起重机结构总图

2 浮式起重机负载均衡控制

2.1 交流变频调速技术

由电机学可知,对于交流异步电机作为驱动的执行元件时,主要有变压变频、改变电机的极对数以及改变电机转差率的方式。如下所示:

交流异步电动机的转速公式如下:

$$n = \frac{60f_1}{p_n} (1-s)$$

式中: P_n ——电动机定子绕组的磁极对数;

f_1 ——电动机定子电压供电频率;

s ——电动机的转差率。

从式中可以看出,调节交流异步电动机的转速有三种方案,即为改变电机的磁极对数、改变定子的供电频率以及改变转差率。其中改变电机的磁极对数不能形成连续调速的目的;改变转差率的方法,在低速时转差率 S 较大,从而使电机在低速时转差功率较大,从而影响整个系统的功率因数下降,增加生产成本。

所以综上公式可得知,当异步电动机的磁极对数和转差率一定时,改变定子绕组的供电频率就可以达到调速的目的,与此同时由于电动机的转速 n 基本上与电源的频率

f_1 成正比, 因此, 平滑地调节供电电源的频率, 就能平滑而且是无级地调节异步电动机的转速。并且变频调速其起动更能显著改善交流电动机的起动性能, 大幅度降低电动机的起动电流, 增加起动转矩。变频调速是交流电动机的理想调速方案。它具有较完美的机械性能, 其良好的起制动性能实现了浮式起重机起升机构的快速起停, 准确定位, 从而提高了整机的运行效率, 使得控制系统大为简化, 可靠性得到很大的提高。目前针对浮式起重机交流变频调速的调速也是以变频调速为主。

2.2 变速控制系统的能量反馈

安装开关和变频时, 发动机处于制动状态。必须充分考虑能量回收屏障的处理。变频器的总体分布如下: 变频器的功能分布在制动电阻上, 直流电路用于变频器的并联供电; 所有能量都返回网络以完成反馈。如果发动机处于反向制动模式, 产生的能量由变频器转换为直流电。直流电用于将母线上的电能传输到逆变器, 对逆变器进行处理, 产生三相交流电并返回网络, 实现整船电能负载平衡的目的。

2.3 起重机负载平衡算法

针对于船舶电网的负载平衡, 在整船的信息负载平衡条件下, 则需要运行负载均衡中心和系统处理中心。它主要负责每个系统的资源规划, 将电子设备逻辑划分为等效的调度字段, 并在算法和调度之间建立逻辑关系。请求管理器的虚拟处理: 在将平衡下载分配给管理字段之前, 通过虚拟资源虚拟地分配需求。当 crane 执行不同任务的虚拟化时, 它必须支持不同程序的解耦, 设置程序开始时间, 并将程序停止时间设置为结束时间。虚拟任务的数量与任务执行的准确性相对应。要设置虚拟任务的格式, 请将间隔设置为 $[0, t]$, 并将其均匀分布。每次接收的持续时间为 1, 因此接收总次数 $n=t/1$ 为。在虚拟任务规划之前, 资源应用程序指定处理时间和传输持续时间: 运行时间+请求到达时间。在搜索虚拟资源的过程中, 必须评估算法。如果是, 则需要更新物理资源信息并更改排序顺序; 如果发生错误, 则必须拒绝虚拟请求并将其从队列中删除。最后, 需要计算和更新实时收集船舶信息过程中收集的数据总量。

3 PID 控制

3.1 PID 介绍

PID 控制通过外部传感器检测起重机各部分执行元件的状态信息, 比如电机的电气参数, 速度及力矩参数, 钢丝绳的受力信息等; 来收集当前情况下的起重机各状态信息, 通过起重机配置的 PLC 控制系统来规划当前状态下需要变频驱动系统如何调整电机的输出力矩, 转速等参数, 用于减少负载变化而引起的系统振动。计算机仿真结果表明, 当钢丝绳长度固定, 起重机吊装、旋转、吊装时, 载荷变化明显, 达到最大值。振荡到程序设定值时, 表明 PID 控制器不能有效地降低负载振动。PLC 控制系统需将收集的运动方面的反馈信号经过设计的 PID 程序块按设计的规则变量进行调整, 并将控制信号传输给变频器系统, 以实现对于变频电机的输入端的可调整, 这种 PID 的控制

方式能有效地抑制了负载波动。多数情况下起重机理论的 PID 程度控制块的设计, 在实际应用中, 其运行指标需根据特定作业环境以及实际吊载负载的不同而需做出相应的现场实际调整。在此技术背景下, 结合起重机货物运动的特点、驾驶员经验和专家 PID 控制理论, 利用人工智能方面的设计将操作员的经验存储至可调整参数项内, PLC 控制系统可以根据这些参数的变化自动改变 PID 设置, 从而达到符合实际作业需求的控制逻辑。这种基于控制规则的控制方法可以模拟操作人员在长期实践中获得的经验和知识, 参数用于优化 PID 原始设计的过程, 能有效提高实际 PID 控制的精度和效果。

3.2 PID 控制方法

波浪上起重货物的动力学系统具有很强的非线性, 许多科学家对此进行了深入的研究。一个由大量刚性缆绳和集中粒子组成的平面摆模型, 用于分析弹簧的振动, 介绍了船用起重机系统的三维非线性模型, 通过该模型检查了起重机的动态反应, 并在箭头末端直接触发外部激励, 还研究了起重船在波浪中的动力反作用力, 并对货物交换系统进行了数值模拟。本文在总结前人工作的基础上, 研究了大型船用起重机系统的控制理论, 建立了多体动态阀体与起重机的耦合模型, 避免了理论方法固有的问题。与项目密切相关的经典 PID 控制方法用于控制起重机的提升、振幅和转向, 这不仅与机器实践有关, 而且满足构成进一步产品开发和可行性研究基础的要求。由于本文主要讨论如何引入有效的建议控制, 忽略单个构件弹性变形的影响, 采用刚体建立船舶护层模型。控制器是最早设计的控制策略之一, 因为它具有简单的控制结构, 更易于在实际中实现, 这就是它在工业过程管理中应用最广泛的原因。我们在控制器的开发和应用方面有多年的经验。控制中使用的大多数控制为 PID 控制。控制的 PID 参数有自己的功能, 特别是比例连接 K 显示控制系统的解耦信号。如果出现偏差, 控制器立即控制偏差, 以减少偏差; 积分连杆 K 主要用于消除静态误差。整合周期越长, 整合效应越弱; K 的差动连接反映了偏差信号的变化规律, 可以加快系统的运动速度, 缩短调整时间。

4 变频器主从控制 (D2D) 下的负载均衡

4.1 主从控制的介绍

本文介绍的变频器主从控制是基于 ABB 变频器为多传动应用而设计的功能, 此功能在其他品牌的变频器系统中也有类似的功能设计。浮式起重机的起升机构由于可能存在某一机构需要多套变频器共同驱动, 电机通过传动齿轮等共同负载相互耦合在一起。负载可以通过变频器主从控制方式, 均匀地分配在传动单元之间, 使得负载得到均衡控制。起重机也可以在负载突发变化时, 可以在较短的时间内做到重新均衡变频器的控制输出。下图简单表示了主从控制下的应用:

当主从控制下的两个电机通过齿轮或者链条等刚性连接时 (上图左示意), 相应变频器的主从控制主要应用从机跟随主机的转矩给定信号的方式来实现, 当电机通过

传送带等柔性连接时（上图右示意），相应变频器的主从控制主要是通过从机跟随主机的速度给定的方式来实现。除些之外，也有从机采用转矩加速度控制的方式，同时开启视窗控制功能，转矩选项将速度调节的输出加到转矩给定中，正常的运行范围内从机以转矩控制方式进行，当从机转矩未跟随至主机转矩时，将由视窗功能来调节。

4.2 主从控制的具体方法

以 ABB 变频器 ASC880 为例其主从控制主要是通过其 XD2D 端子来实现，连接主机相应 XD2D 端子的链路，形成主从控制的通讯网络，可以实现一台主机和多台从机的主从通讯通道，如下图所示：

主/从链接的电缆连接方式

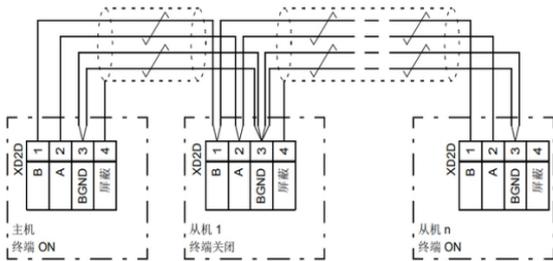


图5 主从控制（XD2D 端子）接线示意

通过对 ASC880 变频器 60 组、61 组和 62 组参数设置相应主从机参数，部分参数组如下图 6 所示：

60 MASTER/FOLLOWER	主/从应用。更多信息，请参见 93 页的 <i>主/从传动单元的使用（必须使用 EXT2 部分和手册《主/从机应用指南（3ABD0009807）【中文】》</i>	
60.01 MASTER LINK MODE	定义主/从连接上，本传动单元的角色。主从连接必须使用 EXT2 注意： 一条总线不允许连接两个主站。如果一个站通过参数的设定转变为主站（反之亦然），为了确保主/从连接能够正常工作，RMIO 板必须重启。	
NOT IN USE	主/从连接无效。	1
MASTER	主传动。	2
FOLLOWER 1	从传动。	3
FOLLOWER 2	从传动。	4
FOLLOWER 3	从传动。	5
FOLLOWER 4	从传动。	6
STANDBY	从传动通过一个现场总线接口读取控制信号，而不是从主/从连接中读取。	7
60.02 TORQUE SELECTOR	选择用于电机转矩控制的给定值。通常，该值只在从传动中需要修改。该参数只有在主从连接有效时才可见（参见参数 60.01）。	
ZERO	该选项强制转矩选择器的输出为 0。	1
SPEED	从机的速度控制输出用作电机转矩控制的给定值。ACS 800 为速度控制状态。这时 SPEED 值在低速情况下可应用于主机和从机。 - 主机和从机的电机轴为柔性连接（主机和从机的速度可以有微小的差别）。 - 使用降速率（参见参数 60.06）。	2
TORQUE	ACS 800 为转矩控制。主机和从机的电机轴彼此用高转、链条或其它机械传动方式刚性耦合时，使用该选项。对于该选项，不允许存在速度差异。 注意： 如选择 TORQUE，只要在参数 20.07 和 20.02 定义的范围之内，ACS 800 就不会限定速度变量。另外，如果需要更多的速度监控，则选择 ADD，而不选 TORQUE。参数 11.02 应该为 EXT 2。	3
MINIMUM	转矩选择器对转矩给定值和速度控制器的输出值进行对比，其中较小的值作为电机转矩控制的给定值。该选项仅用在一些特殊的场合中，参数 11.02 应该为 EXT 2。速度给定应该连接到 EXT 1 而转矩给定则为 EXT 2。	4
MAXIMUM	转矩选择器对转矩给定值和速度控制器的输出值进行对比，其中较大的值作为电机转矩控制的给定值。该选项仅用在一些特殊的场合中，参数 11.02 应该为 EXT 2。速度给定应该连接到 EXT 1 而转矩给定则为 EXT 2。	5
ADD	转矩选择器将速度控制器的输出值加到转矩给定值上。ACS 800 在正常运行范围之内为转矩控制模式。ADD 选项与窗口控制选项一起为一个由转矩控制的从机提供速度监控功能。参见参数 60.03。参数 11.02 应该为 EXT 2。速度给定应该连接到 EXT 1 而转矩给定则为 EXT 2。	6
60.03 WINDOW SEL ON	激活窗口控制功能。窗口控制选项与参数 60.02 中的 ADD 选项一起为一个由转矩控制的从机提供速度监控功能。该参数只有在主从连接有效时才可见（参见参数 60.01）。外部控制地 2 (EXT2) 必须允许窗口控制功能。	
NO	窗口控制功能无效。	0
YES	窗口控制功能有效。选项 YES 仅在参数 60.02 的值为 ADD 时使用。窗口控制会监控速度偏差值（速度给定值-实际速度值），在正常运行范围内，窗口控制功能保持速度控制器的输入信号为 0。速度控制器在下列情况下被唤醒： - 速度偏差值超过了参数 60.04 的值，或 - 负速度偏差的绝对值超过了参数 60.05 的值。 当速度偏差超出窗口后，偏差值的超出部分输送至速度控制器。速度控制器产生一个与速度控制器输入和增益（参数 23.01）相关的给定，而转矩选择器将其加入转矩给定，其结果就是 ACS 800 的内部转矩给定。 例如： 当负载消失时，变频器的内部转矩给定值将减少以防止电机过速。如果未使用窗口控制功能，那么电机将一直加速到 ACS 800 的速度极限。	65535
60.04 WINDOW WIDTH POS	定义在速度给定值上方的监控窗口宽度。参见参数 60.03。该参数只有在主从连接有效时才可见（参见参数 60.01）。	
0 ... 1500 rpm	窗口宽度（正值）。	0... 20000
60.05 WINDOW WIDTH NEG	定义在速度给定值下方的监控窗口宽度。参见参数 60.03。该参数只有在主从连接有效时才可见（参见参数 60.01）。	
0 ... 1500 rpm	窗口宽度（负值）。	0... 20000

图6 ABB-ACS880 系列变频器相关参数

主从控制的广泛应用，使得浮式起重机在海上作业时，由于负载不平衡的情况得到有效的控制，使得执行机构始终能根据设定达到转矩和速度的平衡。

5 结束语

交流调速技术的应用使得浮式起重机能更好地应对日益增长地市场需求，而对于整船电能负载平衡的智能化，也为浮式起重机的高效作业，成本控制方面提供了更多的应用可能性。通过负载均衡实现资源的均衡分配，验证算法的可靠性，大大提高控制效率。而通过在浮式起重机运行过程中引入更为有效的 PID 控制方法，使得对于浮式起重机在终端控制方面做到更为有效的控制和闭环参数匹配，能大大地提高浮式起重机操作的精度、更高的适应性、控制的高效性。主从控制（D2D）的应用对浮式起重机在吊载过程的负载平衡起到了关键作用，变压器参数的不断优化，也为主从控制提供了更为有效和调整的可能性，使得浮式起重机应对不同海况和环境变化时，变得更为安全和可靠。由于外部干扰，不可能完全消除和最小化振荡，主从控制和 PID 控制的应用可以将负载波动降低到起重机能够正常工作并按预定轨道工作的水平，具有良好的适应性。

[参考文献]

- [1] 王寅. 起重设备控制中变频器和 PLC 的应用[J]. 科技传播, 2021(21): 178-179.
 - [2] 林建钦. 基于 PLC 及变频器的行车控制系统改造[J]. 福建冶金, 2021, 50(3): 4.
 - [3] 邝湘宁, 邱法聚, 胡群威, 等. 一种应用于港口起重机的无现场控制点测量系统[J]. 起重运输机械, 2021(15): 5.
 - [4] 闫洪猛. 交流变频调速技术下船舶起重机械负载均衡处理[J]. 舰船科学技术, 2019(18): 3.
 - [5] 郭晶. PLC 控制交流变频调速控制系统在电梯中的运用[J]. 设备管理与维修, 2021(8): 96-97.
 - [6] 朱建红, 瞿畅. 基于交流变频调速的二维平面定位控制设计[J]. 物流技术, 2017, 36(8): 104-107.
- 作者简介：黄利锋（1985.12-），男，所学专业：机电一体化，职称：工程师，学历本科，职务：电气工程师。