

载荷变化条件下自动化旋转设备平衡控制技术研究

窦玉琛¹ 周佳华²

1. 中交天津港湾工程设计院有限公司, 天津 300356

2. 天津麒麟祥和服饰有限公司, 天津 300000

[摘要] 自动化旋转设备在运行过程中经常会出现由于载荷发生变化而产生的不平衡现象, 传统的固定角度补偿方法不能满足精密定位的要求。文中以无人机机库中的转盘式转动装置为研究对象, 提出一种基于力矩平衡的载荷自适应平衡控制方法。该方法利用实时检测各个承载部件的装载状态和旋转角度来建立重力力矩和机械约束力矩的目标函数, 用迭代优化算法求解修正角度, 驱动伺服电机完成精准补偿。

[关键词] 载荷变化; 自动化旋转设备; 平衡控制

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20347

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on Balance Control Technology of Automated Rotating Equipment under Load Variation Conditions

DOU Yuchen¹, ZHOU Jiahua²

1. CCCC Tianjin Port Engineering Design Institute Co., Ltd., Tianjin, 300356, China

2. Tianjin Qilin Xianghe Clothing Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract: During the operation of automated rotating equipment, imbalance often occurs due to changes in load, and traditional fixed angle compensation methods cannot meet the requirements of precise positioning. A load adaptive balancing control method based on torque balance is proposed in this paper, taking the turntable type rotating device in the unmanned aerial vehicle hangar as the research object. This method utilizes real-time detection of the loading status and rotation angle of each load-bearing component to establish the objective functions of gravity torque and mechanical constraint torque. The iterative optimization algorithm is used to solve the correction angle and drive the servo motor to achieve precise compensation.

Keywords: load variation; automated rotating equipment; balance control

引言

旋转设备动平衡控制属于机械工程领域长久以来所重视的基本问题。转子自动平衡系统可以消除运行中由于随机产生的动不平衡, 还可以有效地延长设备的使用寿命, 降低维修成本。传统的平衡控制大多依靠机械硬限位来固定角度, 例如控制齿轮回退一个齿距, 但是当载荷发生变化的时候, 这种方法很难适应, 很容易造成补偿不足或者过度补偿。载荷变化属于自动化旋转设备在实际工况下普遍存在的问题。以无人机机库中转盘式转动装置为例, 该装置承载的灭火弹在不同的作业阶段存在装载和卸载的状态变化, 造成转动装置的重力分布发生变化, 从而影响到旋转到位精度。但是对于载荷变化条件下的自适应平衡控制, 特别是怎样在不需要机械硬限位的情况下实现准确的修正, 还没有形成系统的工程解决办法。

1 载荷变化条件下平衡控制的需求与难点

自动化旋转设备平衡控制有两个问题。第一, 设备自身重力分布随旋转角度的变化而不断改变; 第二, 外部载荷的变化又会加重这种不平衡。无人机机库转动装置为正五边形转盘结构, 四个边装有弹舱, 装有灭火弹, 中间一边装有平板, 与承载面配合形成无人机起降平台。设备运行时转动装置要完成两个基本任务, 即把指定弹舱转到取弹位置供无人机取弹, 把平板复位到槽口位置恢复承载平面的完整性。这两项任务都存在由于载荷变化而产生的平衡控制问题。取弹工况下, 当某一个弹舱转到取弹位置时, 由于各个弹舱的装载状态不一样, 整个转盘的重力分布不均匀, 使目标弹舱所在侧边不能和承载平面保持平行。复位工况下, 无人机取走灭火弹之后, 对应的弹舱重量变轻, 平板在复位时不能和槽口完全契合, 与承载平面形成夹角。

这两种情况的本质是一样的,即转动装置的重力分布由于载荷的变化而发生变化,从而造成旋转到位精度降低。

传统的方案是用固定的补偿角度,机械限位或者齿距回退来修正误差。但是这种方法有明显的不足之处,补偿量是固定的,而由于载荷的变化所引起的偏差量是随机的、时变的。当载荷变化幅度较小时,固定补偿会过多;当载荷变化幅度较大时,固定补偿就会过少。因此需要一种可以实时感知载荷状态、动态计算补偿量的自适应平衡控制方法。

2 平衡控制方案设计

2.1 控制目标与性能指标

平衡控制的核心目标就是,在转动装置完成一次旋转操作之后,如果目标部件的角度朝向不在设定的角度区间内,那么就进行二次角度的调节,使目标部件的角度朝向进入设定的角度区间内。具体的控制目标可以分成三个层次。第一层就是状态感知,即实时获取转动装置上各个承载部件的装载情况以及旋转角度^[1]。第二层就是偏差计算,根据感知信息来确定当前的旋转角度和目标角度之间存在的偏差量,也就是修正角度。第三层就是执行驱动,根据修正角度来驱动伺服电机完成角度的调节。性能指标分为两大部分。定位精度方面要使修正后的目标部件角度在设定的角度区间之内。响应速度上要保证修正过程在有限的迭代次数内完成,不能过长地占用设备工作时间。

2.2 控制方式与执行机构选择

控制方式为闭环反馈控制。系统在转动装置完成旋转之后,用检测目标部件的角度朝向是否合格来判断是否需要修正。如果达不到标准,就启动修正程序,采集各个承载部件的状态信息,计算出修正角度,驱动执行机构进行调整。执行机构用伺服电机加减速机的方式。伺服电机安装在转动装置的中心轴线上,由减速机带动转盘做轴向转动。伺服电机额定扭矩和减速比一起决定电机有效力矩。减速机的齿数决定减速机预紧力矩。机械机构之间摩擦系数决定着机械摩擦扭矩。这三种力矩一起组成约束力矩总和,是平衡控制计算中重要的参数。该方案优点是伺服电机具有较好的调速性能和定位精度,可以满足精密角度调整的要求;减速机能提供足够的扭矩输出来克服转动装置的重力力矩。

3 关键技术实现

3.1 载荷变化信号检测与处理

载荷变化信号检测的主要工作就是确定各个承载部件的装载情况以及实际重量。无人机机库应用场合下,承载部件分为两类,一类是有容纳腔体的弹舱,用来装灭火

弹,另一类是平板部件,与承载平面配合使用。对弹舱类承载件在每个弹舱上安装传感器来检测装载情况。传感器的输出信号经过处理之后,就可以知道这个弹舱里是不是装有灭火弹。当弹舱装载有物体的时候,弹舱的状态标记为1;当弹舱没有装载物体的时候,弹舱的状态标记为0。根据装载情况和单枚灭火弹的重量,可以求出每个弹舱的实际重量。对于平板部件来说,它的重量是固定的,并且不会出现装载状态的变化,所以可以直接用它的固有重量来参与计算。

角度信号的检测也不能忽视。转动装置完成一次旋转操作之后,需要得到每一个参考承载部件相对于参考标志物所产生的实际旋转角度,也就是第二旋转角度。第二旋转角度有两种方式可以得到,一种是用角度测量传感器直接测量,另一种是根据第一旋转指令所确定的理论旋转角度和待求的修正角度来构建。后一种方式更常用,因为修正角度本身就是未知量,用第二旋转角度表示第一旋转角度和修正角度之和,便于后续力矩平衡计算。

3.2 不平衡量实时估算

不平衡量的实时估算是整个平衡控制方法的关键部分。其基本思想就是根据各个承载部件的实际重量以及旋转角度来计算转动装置旋转中心点所受的重力力矩总和,然后将物理机械机构所产生的约束力矩总和代入到力矩平衡方程中,从而求得修正角度。

重力力矩总和要分清两种承载部件。根据每个参考承载部件的实际重量、对应的第二旋转角度和转动半径来生成第一重力力矩总和。根据平板部件的重量、对应的第三旋转角度和转动半径来计算第二重力力矩总和。两类力矩相加就得到了多个承载部件对转动装置旋转中心点的重力力矩总和。

约束力矩总和由三部分组成,即伺服电机额定扭矩与减速比所决定的电机有效力矩、机械机构摩擦系数所决定的机械摩擦扭矩、减速机齿数所决定的齿轮预紧扭矩^[2]。这三种力矩都是由物理机械机构本身的固有特性所决定的,并且与载荷的变化没有关系,在平衡控制计算中必须加以考虑。

得到重力力矩总和和约束力矩总和之后,建立目标函数。该目标函数为转动装置旋转中心力矩。理论上当转动装置处于平衡状态的时候,合力矩应该为0。由于实际计算中无法达到绝对归零,用合力矩无限趋近于零作为迭代的目标,对目标函数进行迭代更新。

3.3 平衡执行机构驱动控制

求得修正角度之后,就要把修正角度转化为执行机构

的驱动指令。伺服电机收到角度指令之后,经由减速机带动转动装置完成角度的调节工作。

驱动控制的关键就是保证调整过程的平滑性。伺服电机启动、运行、停止时不能产生冲击、振动,否则会损坏转动装置上所承载的物体。减速机齿轮啮合要保证传动的连续性,防止由于齿隙造成的定位误差。

伺服电机的驱动控制可以采用位置闭环的方式。将修正角度设为位置给定值,用编码器反馈实际转动角度,构成闭环调节。当实际转动角度达到给定值的时候,伺服电机停止运转,完成角度调整。

3.4 控制参数整定与切换逻辑

控制参数整定影响平衡控制的精度和效率。目标函数迭代更新过程中参数主要有迭代步长、终止条件。

迭代步长的选取既要考虑收敛速度,也要考虑计算精度。步长太大容易造成迭代过程振荡或者发散,步长太小又会增大迭代次数,延长计算时间。根据转动装置的惯性特性以及可以计算的时间,通过试验来确定合适的步长范围。

终止条件的确定也很重要。文章用两种终止条件,即迭代得到的合力矩小于预设力矩阈值和相邻两次迭代得到的修正角度差值小于预设角度阈值。任一条件满足就停止迭代。双重终止条件的设计既可以保证计算精度,又不

会出现无效迭代的情况。

切换逻辑就是各个工况之间控制模式的转换。取弹工况和复位工况之间切换的时候,系统要重新检测各个承载部件的装载情况。因为取弹会改变弹舱的装载情况,从而会影响重力分布。切换逻辑要保证在新的工况下重新执行完整的平衡控制流程,不能使用上一次计算的结果。

4 系统实现与试验验证

4.1 硬件平台与传感器配置

硬件平台以正五边形转盘式转动装置为基,转盘的五个边各对应四个弹舱和一个平板。伺服电机安装在转盘中心轴线上,用减速机带动转盘转动。传感器分为两类。一类是检测弹舱装载情况的传感器,装在每个弹舱内,输出信号显示弹舱内有无灭火弹。另一类是检测旋转角度的传感器,可以采用编码器或者角度测量传感器,安装在转动装置的旋转轴上。控制器选型要考虑计算能力、实时性要求。目标函数的迭代求解需要三角函数运算以及循环迭代,对于控制器的运算速度有一定的要求。可以采用工业级嵌入式控制器或者可编程逻辑控制器做为运算中心。

4.2 软件流程与安全防护

软件流程如图1所示。

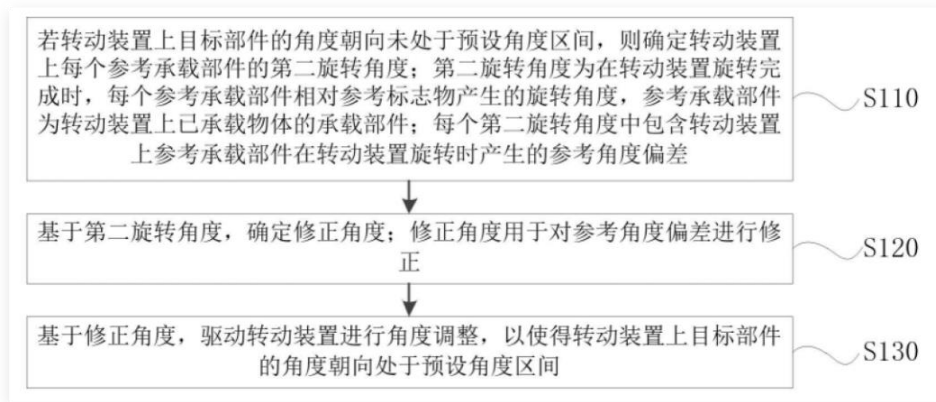


图1 平衡控制方法流程图示意图

软件流程可以分为三大部分。第一阶段为状态检测和判断,在转动装置转到某一角度时,检测目标部件的角度朝向是否在设定的角度范围内。如果在区间内,就结束流程;否则进入第二阶段。第二阶段为修正角度计算,确定各个参考承载部件的第二旋转角度,用力矩平衡建立目标函数,迭代求解得到修正角度^[3]。第三阶段为角度调整执行,根据修正角度驱动伺服电机做角度调整,调整完成后重新检测目标部件的角度朝向。安全防护机制有两个方面。

第一是对迭代过程进行保护,设置最大的迭代次数,防止由于计算异常造成无限循环。第二是执行过程的保护,设定伺服电机最大转动范围,防止由于修正角度异常造成设备损坏。

4.3 试验工况与试验步骤

试验在无人机机库实物平台上进行。转动装置为正五边形转盘式结构,四个弹舱各装一发灭火弹,一边装有平板。试验分两种工况。工况一为取弹工况。初始状态时四

个弹舱都装有灭火弹,平板和承载平面的槽口相吻合。控制转动装置逆时针旋转,把弹舱 1 转到取弹位置。因为各个弹舱的装载状态相同,理论上重力分布是均匀的,目标部件的角度朝向应该在预设的范围内。接着模拟取弹操作,把弹舱 1 中的灭火弹取出来。再次控制转动装置转动,使平板复位到槽口位置。此时由于弹舱 1 的重量减轻,重力分布也发生了变化,平板不能准确复位。启动平衡控制程序,求出修正角度并执行调整。工况二为复位工况。在工况一的基础上,四个弹舱中弹舱 1 为空载,其余三个弹舱为满载。控制转动装置旋转,把弹舱 2 转到取弹位置。重力分布不均造成目标部件存在角度偏差。启动平衡控制程序进行修正。试验步骤如下,第一步,记录转动装置旋转之后目标部件实际的角度朝向。第二步,判断角度区间内角。第三步,在区间外就开始执行平衡控制程序。第四步,采集各个承载部件的装载情况和旋转角度。第五步,修正角度。第六步,驱动伺服电机进行角度调整。第七步,检测目标部件的角度朝向,判断是否进入设定区间。

4.4 结果分析与指标评价

试验结果的评价指标就是目标部件的最终角度是否在预设的角度区间内。工况一试验时,平板复位之后和承载平面有明显的夹角^[4]。启动平衡控制流程之后,系统检测到各个弹舱的装载状态发生了改变,根据力矩平衡计算出修正角度,驱动伺服电机进行角度调节。调整后平板和承载平面的夹角消除,平板和槽口精确匹配。

工况二的试验中弹舱 2 旋转转到取弹位置时也有着角度偏差。平衡控制流程重新计算修正角度并执行调整,使弹舱 2 所在侧边和承载平面平行。

试验结果表明,提出的方法可以对载荷变化下转动装置角度进行准确的调节。与传统的固定角度补偿方式相比,本文的方法优势在于不需要机械硬限位,可以根据实际的载荷状态来计算补偿量,使用力矩平衡的物理模型而不是

经验补偿,更具有可解释性、可重复性,迭代求解过程可以收敛到预设精度,满足精密定位的要求。

5 结束语

文章就载荷变化情况下自动化旋转设备的平衡控制问题,以无人机机库转盘式转动装置为研究对象,提出了一个完整的工程化解决办法。该方法的主要创新之处在于把平衡控制问题转为力矩平衡方程的求解问题,用实时检测载荷状态、建立包含重力力矩和约束力矩的目标函数、用迭代优化法求解修正角度来实现对旋转偏差的精确补偿。

此法不用机械硬限位,不会出现传统固定角度补偿方式固有的缺点。试验结果表明,在载荷发生变化时,可以将目标部件的角度朝向修正到设定的范围内。该方法不仅可以用于无人机机库的转动装置,还可以用于其它有类似载荷变化问题的自动化旋转设备。

[参考文献]

- [1]潘鑫,葛德宏,李薇,等.气压液式自愈调控系统性能分析与试验研究[J].流体机械,2024,52(1):1-6.
- [2]孙亚冰,陈立芳,王冬寒,等.基于两阶段鲁棒优化的对转桨扇自动平衡控制算法研究[J].推进技术,2025,46(4):248-258.
- [3]杨光,王艺东.信赖域与增广拉格朗日算法融合的光电吊舱静平衡配平优化[J].中国机械工程,2026,37(3):752-761.
- [4]王坚坚,廖与禾,杨磊,等.基于多维复向特征融合与CNN-GRU 的转子不平衡量识别方法[J].中国机械工程,2025,36(9):1905-1915.

作者简介: 窦玉琛(1992—),男,天津宝坻人,工程师,天津科技大学电子信息与自动化学院自动化专业,现就职于中交天津港湾工程设计院有限公司,从事工程机器人研发设计工作。