

员牵头对管口方位与法兰等级、随箱备件与专用工具、配套电仪接口、现场基础条件及二次灌浆要求进行清单化核验,并对偏差项要求供方在发运前完成整改或提交可执行的处理方案与替代件交付计划,同时保留图纸、纪要、照片与签证记录作为收货放行条件,确保缺陷不带入现场导致停工等待与返工签证。

3.3 合同履约管控与价格锁定安排

针对煤化工工厂建设项目采购环节中合同边界不清与价格波动叠加的风险,履约管控应以条款落地、节点受控和证据闭合为主线推进。第一,合同签订后由采购牵头开展合同交底并形成清单化台账,逐条明确交货期起算口径、变更指令签发权限、到货地点与卸车责任、验收方式及不合格处置时限,同时对图纸版本、技术偏差审批、随机资料与备件范围进行一致性确认,交底纪要由计划、质量、仓储和现场共同签认,确保后续执行不出现口径分裂。第二,对钢材、管材、电缆、耐火材料与催化剂等价格敏感物资,采购人员应在询价阶段识别原料、加工费与运费占比,评估报价有效期与供需周期,择机确定锁价窗口并在合同中写明基准价来源、调价触发阈值、取证要求与计算公式,必要时设置阶段锁价、限幅条款或等价替代规则,避免后期争议仅凭解释协商。第三,发运与付款实行节点前置核验,采购人员应将监造记录、出厂检验报告、材质证明、装箱清单等材料逐项收集归档,做到资料齐全后再办理入库与支付申请,并将发运批次与到货数量、发票金额和付款比例一一对应,发现缺件、错发或分包供货时及时形成差异单并追踪关闭。第四,发生延期或质量缺陷时同步启动索赔准备与整改闭环,采购人员应在合同约定期限内发出书面通知,明确整改要求与复验节点,留存停工影响、替代采购、返工返修等费用台账,并将关键往来函件、到货照片与复检记录编号归档,与现场、监理共同取证签认,按扣款与索赔条款计算金额并在月度对账中落实^[4]。

3.4 交付协同推进与验收前置机制

为避免煤化工装置建设中到货不成套与资料不闭合引发的工序等待、返工和质量争议,采购管理应以交付协同推进与验收前置为主线。第一,采购部门应以WBS和安装包为单位编制交付里程碑,将合同交货期细化到分批发运、到场窗口、缺件清单和开箱日期,并与土建交安、吊装、试压及单机试车节点滚动对齐,对长周期设备建立催交台账与周

协调机制,明确供方关键工序完成时间与责任人,对预警物资提前启动拆分交付、替代供货或现场临时保供。第二,大件设备与特材材料应实施发运前检查和装运条件确认,重点核对防潮防震包装、吊点与重心标识、随机备件封存、随车文件装订,以及运输路线限高限重、进场道路转弯半径与卸车机具能力,对超限件提前办理进场许可并准备垫木、索具和临时堆场,避免到场滞留、二次倒运和外观损伤。第三,到货验收应实行资料先行与问题单闭环,仓储与质检在开箱前按入库验收标准逐项核对材质证明、热号炉号、检验报告、合格证、装箱清单及追溯标识,缺项即隔离并冻结入库,明确补齐时限与复验要求,开箱后同步核对数量规格、密封面防护、涂装及缺陷记录,必要时发出不符合项并保全索赔证据。第四,关键设备采取联动验收与成套确认,采购人员应在发运前收齐安装指导、试车配合、专项检验与随机图纸资料,并与现场管理共同清点备件、专用工具、润滑油和维护说明,按接口清单完成交接签认,随后将履约与资料闭合情况纳入供应商业绩评价,并依据危险化学品企业安全生产标准化通用规范要求,对采购物资按入库验收标准实施检验或验收,定期评价并调整供应商。

4 结语

煤化工工厂建设项目采购管理的风险治理,应从识别清单入手,把供应商履约、技术边界、合同条款与交付验收四类常见风险转化为可核对的关键点,并在项目执行中形成持续更新的管理节奏。采购团队需要将评审、澄清、交底、验收等环节落实到具体记录与可追溯证据上,避免风险在现场集中暴露后被动处置。通过将控制动作嵌入合同执行与现场协同过程,项目能够在不确定性条件下保持交付稳定性,并为后续结算关闭与投运准备创造可操作的管理条件。

参考文献

- [1] 王先绪.浅析煤化工工厂建设项目危害识别,风险评估及其控制措施[J].石油化工建设, 2024, 46(S1):70-72.
- [2] 徐志宏.煤化工工厂建设项目采购风险控制[J].中文科技期刊数据库(全文版)经济管理, 2021(7):2.
- [3] 孙大伟.国际贸易中煤化工设备采购的风险管理与策略研究[J].中国化工贸易, 2023(31).
- [4] 葛庆瑞.试析大型煤化工工厂建设项目物资采购管理策略[J].石油石化物资采购, 2023(14):10-12.

Optimization Strategy for the Structure of Lightweight Compact Servo Motors

Yonghong Chen

Guizhou Aerospace Control Technology Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550009, China

Abstract

Servo actuators are precision control components widely used in unmanned aerial vehicles (UAVs), small robots, and other fields. Small servo actuators are the core control mechanisms of UAVs, small robots, and other equipment, and their weight and volume directly affect the endurance, maneuverability, and integration level of the equipment. Only by achieving lightweight design for small servo actuators can we “reduce weight, enhance performance, lower costs, and expand application scenarios”, thereby promoting the development of UAVs, small robots and related industries. Currently, lightweight design of small servo actuators has become the core direction of its technological development. This article will analyze the bottlenecks and engineering application value of lightweight design for small servo actuators, and propose optimization strategies from the perspectives of structural innovation, technology integration, and material upgrading.

Keywords

Small servo motor; Lightweight design; Structural optimization

基于轻量化设计的小型舵机结构优化策略

陈永红

贵州航天控制技术有限公司, 中国·贵州 贵阳 550009

摘要

舵机是一种精密的执行元件, 广泛应用于无人机、小型机器人等领域。小型舵机是无人机、小型机器人等装备的核心执行机构, 其重量与体积会直接影响到装备的续航能力、机动性能和集成度等。只有做好小型舵机的轻量化设计, 才能够“减重、提能、降本、拓场景”, 进而推动无人机、小型机器人等相关行业的发展。当前, 小型舵机轻量化设计已成为其技术发展的核心方向。下文将分析小型舵机在轻量化设计方面的瓶颈和工程应用价值, 并从结构创新、技术融合和材料升级等方向提出优化策略。

关键词

小型舵机; 轻量化设计; 结构优化

1 引言

近年来, 下游装备正朝着长续航、小体积、高度集成的方向发展, 传统小型舵机体积偏大、空间利用率低等问题日益突出, 已成为制约装备性能提升的重要因素。当前, 小型舵机的轻量化研究一般局限于单一的部件减重, 很少从整体进行系统性优化, 存在“减重即降性能”的问题。基于此, 本文系统性梳理小型舵机结构的轻量化设计策略是非常有必要的。能够确保舵机在整体轻量化的同时性能不衰减, 为相关产品设计升级提供参考思路。

2 小型舵机结构的轻量化设计瓶颈

2.1 减速传动结构的体积和性能失衡

减速传动模块作为小型舵机重量与体积的主要承载部分, 必须同时满足大减速比、高传动强度以及高效率的需求。就传统设计情况来看, 难以实现三者平衡。例如: 传统等模数圆柱齿轮组要想实现大减速比, 就需从增加齿轮级数和数量入手。某 SG90 型舵机使用的是八级等模数齿轮, 轴向尺寸占比为整机的 45%, 体积冗余问题十分突出。如果使用谐波齿轮, 虽然体积较小且可以实现大减速比, 但传动效率较低、能量损耗大, 只能实现轻量化, 达不到高效率的需求。此外, 传统齿轮一般为实心轮毂、等厚度设计, 结构上存在冗余, 这也加大了轻量化设计难度。

2.2 核心部件集成度低、布局不合理

传统小型舵机的内部一般为轴向线性布局, 电机、减速机构、传感器、控制电路等按照轴向依次排列, 空间利用

【作者简介】陈永红(1977-), 男, 中国重庆人, 硕士, 高级工程师, 从事伺服产品研究。

率低导致整体体积较大。例如：传统的单层控制电路板一般放置传统小型舵机底部，这会占用 20% 的轴向空间。如果缩小电路板的面积又限制电子元件布局，进而影响电路功能；外接式霍尔传感器需要额外安装基座，这会增加体积，同时传感器和输出轴间的连接间隙还会影响检测精度；电机和减速机构间的法兰式连接不仅提升了装配部件的重量，还会增加轴向尺寸。这是因为各部件独立布局，没有进行集成设计。

2.3 材料难以兼顾轻质和高性能的需求

材料是小型舵机轻量化设计的基础，一些传统小型舵机在选取材料时缺少针对性，没有根据各部件的受力特点和功能需求合理选材。这会出现“轻质则降性能、高性能则重量较大”的情况。例如：壳体一般是普通铸铝，重量偏大。如果替换为普通的 ABS 工程塑料，虽然能大幅度减重，但也会降低壳体刚性。在高频振动下壳体很容易变形，这会影响到内部部件的精度；减速齿轮一般是普通碳素钢，强度高密度大。如果替换成普通铝合金，虽然能够大幅度减重，但会降低齿轮的耐磨性，缩短齿轮使用寿命。

2.4 结构设计和加工工艺协同性不足

很多小型舵机的轻量化设计图纸十分完美，但却无法与实际加工工艺有效匹配，这会加大方案的落地难度、增加制造成本等。例如：壳体的复杂镂空减重设计。如果使用传统的铸造工艺，可能会出现壁厚不均匀、应力过于集中的情况；齿轮的镂空轻量化设计。如果应用普通的切削工艺，齿根处易出现加工缺陷，这会影响到齿轮的抗疲劳性；舵机一体化结构设计。如果没有适配的高精度压铸工艺，则无法在生产时一次成型。

3 小型舵机轻量化设计的工程应用价值

小型舵机的轻量化设计并不是单纯的减重，而是在保障核心性能的同时通过系统性结构优化，实现“减重减容”。其轻量化设计可以提升下游装备的核心性能，优化无人机、小型人形机器人等装备的机动性能、续航能力以及动作精度，还可以拓展这些装备的应用场景，进而提升装备的整体性能。例如：小型人形机器人。通过关节舵机的轻量化设计可以减少机器人的负载与能量损耗。进而提升机器人的动作灵活性和精准度，方便其完成更精细的动作；该设计还能够推动舵机在结构、材料、工艺等方面的升级发展，帮助变模数齿轮、轻量化材料等顺利落地。例如：航空级铝合金、高性能工程塑料等，都能够在小型舵机中梯度应用；该设计还可以有效降低上下游产品的设计和制造成本。通过简化下游装备内部布局、优化传动结构和支撑结构的设计等方式，提升设计效率，减少整体制造成本。例如：无人机内部由于舵机体积减小，减少了内部支架的使用，能够有效降低 5% 左右的制造成本。这个过程有利于推动舵机朝着一体化和标准化设计的方向发展。这种标准化设备能够提升轻量化舵机的

可靠性，延长其使用寿命。这又能够进一步降低下游装备的运维和更换成本。

4 基于轻量化设计的小型舵机结构优化策略

4.1 减速传动机构的轻量化优化

在优化减速传动机构时，要以降体积、减重、保强度和提效率为主。通过升级加工工艺、结构创新设计等方式，平衡减速比、体积、重量与性能。

首先，要摒弃传统等模数设计，应用变模数四级同轴嵌套齿轮结构。将齿轮组按照输入端到输出端的顺序划分为多级。输入端高速低扭矩齿轮选用小模数，这样能够平稳传递动力、控制啮合精度。低输出端低速高扭矩齿轮选用大模数，这样才能提升传动强度。同时采取同轴嵌套布局，把同轴的主动齿轮和从动齿轮设计在同一轴向位置，这样能够节省占用空间。如：某 SG90 型舵机应用该结构后，可将轴向尺寸从 13mm 缩减至 6mm，体积缩减 1/2，这极大提升了空间利用率。

其次，要引入拓扑优化技术，对齿轮做好异形轻量化设计。先借助 ANSYS 仿真分析齿轮的受力分布情况。对非受力区的轮毂设计圆形镂空减重孔，替换实心轮毂。例如：钛合金齿轮设计圆形镂空减重孔后，重量可降低 30% 左右。同时齿根处进行 R0.5mm 圆弧过渡处理，防止应力集中并提升整体的抗疲劳性；还要结合受力情况做好齿宽梯度设计，从输入端开始减小受力较小的齿轮宽度，输出端受力较大的齿轮则保持宽度不变。这种“按需设计”能够避免出现强度衰减的情况。^[1]

最后，应用齿轮和输出轴一体化成型设计。让减速机构的最后一级从动齿轮和舵机输出轴通过五轴精密切削一次性加工成型。这样就能够摒弃传统的装配方式，解决键连接存在的间隙问题，这有利于提升舵机的定位精度；针对电机输出轴和第一级齿轮可以采取过盈配合连接，摒弃传统的法兰盘结构。这样既可以减小轴向尺寸、减轻重量，还可以简化装配工序，实现高效生产。

4.2 核心部件的集成和布局优化

在进行核心部件布局优化时，必须打破线性布局常规，采取“分层堆叠、同轴集成”的布局方法，高度集成动力、检测和控制模块。

首先，位置检测模块要应用微型霍尔传感器同轴集成设计。将只有传统编码器体积 1/3 的微型霍尔传感器替代传统光电编码器，这样还能够减轻重量；把传感器旋转轴和舵机输出轴进行共轴设计，采取拨叉和凹槽连接的方式。并取消外机安装基座，将传感器直接固定在壳体中部。这样可以消除安装间隙，提升检测精度及抗干扰能力。

其次，控制电路模块要进行三层堆叠式集层设计。要改变传统单层电路板设计模式，把电源电路、驱动电路和信号处理电路设置在三层铝基覆铜板上。利用 0.5mm 柔性电