

面向智能机器人的紧凑型电动执行机构设计

王伟, 王衡

(西安航空制动科技有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 设计了一种由无边框力矩电机、行星滚柱丝杠、缸体、电磁刹车和编码器等组成直行程电动执行机构, 采用了空间复用形式大大缩减了执行机构的尺寸和重量, 采用无框力矩电机与行星滚柱丝杠的直接驱动方案。通过集成 23 位多圈绝对值编码器和电磁-机械双模式制动系统, 具有精密的重复定位精度, 在 22mm 有效行程内可输出 3.5kN 额定推力, 最大运行速度 25mm/s。通过优化各部件设计并采用国产化组件, 该机构可以在 -40°C ~ 85°C 温度范围内稳定运行。该执行机构在性能指标上完全满足工业自动化领域的严苛要求。本文详细阐述了该执行机构的工作原理、结构设计、性能特点及环境适应性, 为同类产品的研发提供了技术参考。

关键词: 无边框力矩电机; 行星滚柱丝杠; 空间复用; 制动

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A

Design of Compact Electric Actuators for Smart Robots

WANG Wei, WANG Heng

(Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: A direct-travel electric actuator was designed, which is composed of a frameless torque motor, planetary roller screw, cylinder, electromagnetic brake and encoder, etc. The spatial multiplexing form was adopted to significantly reduce the size and weight of the actuator. The direct drive scheme of frameless torque motor and planetary roller screw was adopted. By integrating a 23-bit multi-turn absolute value encoder and electromagnetic-mechanical dual-mode braking system, it has precise repeat positioning accuracy, and can output a rated thrust of 3.5kN within an effective stroke of 22mm, with a maximum operating speed of 25mm/s. Through optimizing the design of each component and using domestic components, the actuator can operate stably within the temperature range of -40°C to 85°C . The performance indicators of this actuator fully meet the strict requirements of the industrial automation field. This paper elaborates in detail the working principle, structural design, performance characteristics and environmental adaptability of the actuator, providing technical references for the research and development of similar products.

Keywords: frameless torque motor; planetary roller screw; spatial multiplexing; braking

1 引言

电动执行机构是航空、航天、航海和核工业等领域自动化过程控制中重要的执行单元, 主要应用于工业中流体的位移、压力、流量控制等。随着过程工业对产品质量要求的提高, 对执行机构的执行精度要求也越来越高, 市场需求量也越来越大^[1-2]。与此同时, 以智能机器

人为代表的先进制造、服务与特种应用领域正蓬勃发展。智能机器人的核心功能的实现高度依赖于高性能的关节驱动与末端执行机构。这些机构同样面临着高精度、高动态响应、结构紧凑、轻量化、低噪声、高可靠性及环境适应性等核心挑战。为了满足工业生产的需要, 并契合智能机器人等新兴领域对高性能执行单元的技术诉求,

同时也为了打破国外在这方面的垄断地位，研制拥有自主知识产权的高精度电动执行机构势在必行。

为了加快响应速度、提高控制精度，通过调研国外和国内电动执行机构产品，在其基础上根据电动执行机构工作原理设计一种一体化复用空间的高精度电动执行机构。按照相关技术要求进行了整体设计^[3-5]，该产品由力矩电机、轴承、丝杆、缸体、电磁刹车和编码器等组成，力矩电机通过带动丝杆螺母转动，从而将丝杆螺母的旋转运动转换为丝杆的直线运动。组成部件满足国产化指标要求，该产品具有结构紧凑、重量轻、低噪声、运行平稳和自锁功能的优点，满足环境使用条件。本研究旨在为过程工业自动化及智能机器人关节驱动、精密操作等应用场景提供一种高性能、国产化的核心执行单元解决方案。

2 技术要求

- 1) 电动缸有效行程不小于 22mm；
- 2) 电动缸额定推力不小于 3kN；
- 3) 电动缸额定速率不小于 22mm/s；
- 4) 电动缸带刹车，带多圈绝对值编码器；
- 5) 定位精度 0.2mm；
- 6) 通过电机抱闸能够在任意位置锁死；
- 7) 具有结构紧凑、惯量小、响应快等特点；
- 8) 运行噪声不高于 80dB（距离 1m 处）。

3 技术方案

引入了无边框力矩电机作为驱动方案，其具有以下核心优势。

1) 结构紧凑与轻量化。省去传统电机外壳和轴承，直接集成到设备机械结构中，体积减小 30% 以上；采用大裂比设计和中空结构，可利用中空结构减小执行机构尺寸，同时由于自身功率密度大而减小了自身尺寸。

2) 高动态性能。低转子惯量实现毫秒级响应（阶跃响应 < 100ms），适合高频启停 > 100 次 / s，直接驱动负载，消除齿轮传动间隙，定位精度高。

3) 高效能与热管理。真空灌胶工艺配合高导热材料，温升较传统电机降低。无铁芯设计减少涡流损耗，系统效率达 95% 以上，同时为了提高电动执行机构的可靠性，采用了模块化设计方法，在满足需求的技术指标同时，同时满足电动执行机构的安装刚度和强度、安全性和可

靠性、使用的便利性和维护的简易性。

3.1 参数分析选型

(1) 总体设计

根据设计负载和性能指标要求，确定电动缸的机械性能和电机性能要求，进而根据实时性、安全性及其他动态性能要求选择驱动器和控制方式，同时满足用户的接口控制要求。本方案要求具有非常高的可靠性，所以在电动缸上采用力矩电机和驱动器。

(2) 机械结构设计

机械结构设计包括电动缸本体和电动缸安装附件的设计。使用建模分析软件，根据电动缸负载分析各电动缸及关键连接件的受力情况，对电动缸的各个关键部件做应力分析，从而确定电动缸和安装附件的选型依据。同时根据电动缸外形接口尺寸和运动范围，结合寿命、刚度、强度和振动等要求，设计安装结构和安装附件的尺寸。本方案考虑了电动缸的高可靠性和长寿命免维护等特点，在传动要素上选择了行星滚柱丝杆 + 电机直驱的方式，可以满足电动缸的结构紧凑性要求。

(3) 驱动电机的选型

根据电动缸的指标要求，综合考虑了电动缸的使用寿命、运行精度和运行噪声等因素，电动缸在选项设计时按推力 3kN，电动缸额定速率不小于 22mm/s 选型设计。

初步选定 8 × 1 的滚柱丝杆作为电动缸的传动元件。

根据以下公式：

$$T = \frac{FL}{2\pi\eta R} \quad (1)$$

式中， F 是电动缸输出力，单位为 kN； T 是电机输出扭矩，单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$ ； R 是减速比，取值 1； L 是丝杆导程，取值 1mm； η 是效率（轴承的效率取值 0.99，丝杆的传动效率取值 0.83，考虑其余传动部分的效率，电动缸的总效率取值 0.8）。

额定出力为 3kN 时，

$$T_{\text{额定}} = \frac{3 \times 1}{0.8 \times 2\pi \times 1} = 0.59 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (2)$$

根据电动缸的额定速度不小于 22mm/s，电机的额定转速为

$$N = \frac{60FR}{L} \quad (3)$$

式中， N 是伺服电机的额定转速，单位为 r/min； V 是电

动缸的额定速度，为 22mm/s； R 是减速比，取值 1； L 是丝杆导程，取值 1mm。

$$N = \frac{22 \times 60 \times 1}{1} = 1\,320 \text{ r/min} \tag{4}$$

根据以上计算，选用的驱动电机需要满足：输出扭矩 $\geq 0.59\text{N}\cdot\text{m}$ ，额定转速 $\geq 1\,320\text{r/min}$ 。

根据以上计算，通过对电机的选择，考虑到该电动缸的使用工况，选定电机参数见表 1。

表 1 电机参数

电机参数	数值
额定电压 /V	DC28
极数	14
额定功率 /W	110
额定转速 / (r/min)	1500
额定转矩 /N·m	1.4
峰值电流 /Arms	16.7 (REF)
线反电动势 / (V/k·min ⁻¹)	6.2
绝缘等级	F 级 (155℃)
重量 /kg	1.4
使用条件	封闭、自冷却、间歇使用 环境空气温度：-55℃ ~ +75℃ 环境湿度：相对湿度 ≤ 90% (不结露) 1 000m 海拔以下

根据选定的电机参数，电动缸的额定出力为

$$F_{\text{额定}} = \frac{2\pi\eta RT_{\text{额定}}}{L} \tag{5}$$

式中， F 是电动缸输出力，单位为 kN； T 是电机输出扭矩，单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$ ； R 是减速比，取值 1； L 是丝杆导程，取值 1mm； η 是效率（轴承的效率取值 0.99，丝杆的传动效率取值 0.83，考虑其余传动部分的效率，电动缸的总效率取值 0.8）。

$$F_{\text{额定}} = \frac{0.7 \times 0.8 \times 2 \times 3.14 \times 1}{1} = 3.5\text{kN} \tag{6}$$

综上该电机的选型满足额定推力不小于 3kN 的设计要求。电动缸的额定速度为

$$V_{\text{额定}} = \frac{NL}{60R} \tag{7}$$

式中， N 是伺服电机的额定转速，单位为 r/min； V 是电动缸的额定速度，单位为 mm/s； R 是减速比，取值 1； L

是丝杆导程，单位为 mm，取值 1mm。

$$V_{\text{额定}} = \frac{1\,500 \times 1}{60 \times 1} = 25\text{mm/s} \tag{8}$$

综上电动缸速度满足不小于 22mm/s 的速度要求。

(4) 丝杆的选型

通过上面的计算数值和丝杆刚度参数表，本项目采用 8×1 滚柱丝杆，如图 1 所示。

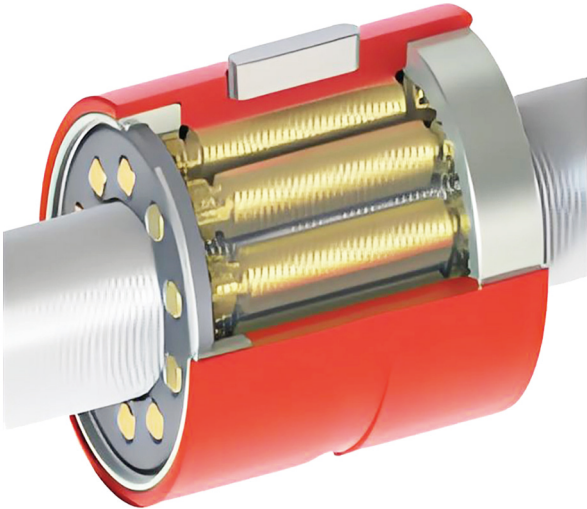


图 1 精密滚柱丝杆

3.2 紧凑型电动执行机构参数

紧凑型电动执行机构参数表见表 2。

表 2 紧凑型电动执行机构参数表

电动执行机构参数	数值
有效行程 /mm	22
丝杆导程 /mm	8×1
额定出力 /kN	3.5
额定速度 / (mm/s)	25
电机功率 /W	110
电机额定转速 / (r/min)	1 500
编码器类型	多圈绝对值
内部防转机构	有
重量 /kg	1.4
定位精度 /mm	0.5
温度范围 /℃	- 55 ~ +75
安装方式	前法兰

3.3 紧凑型电动执行机构总体结构

设计的一体化复用空间的高精度电动执行机构，是由无边框力矩电机、轴承、丝杆、缸体、电磁刹车和编码器等组成，力矩电机通过带动丝杆螺母转动，从而将丝杆螺母的旋转运动转换为丝杆的直线运动。组成部件满足国产化指标要求，该产品具有结构紧凑、重量轻、低噪声、运行平稳和自锁功能的优点，满足环境使用条件。紧凑型电动执行机构外形图如图 2 所示。

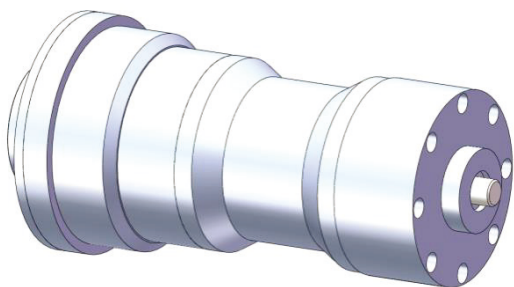


图 2 紧凑型电动执行机构外形图

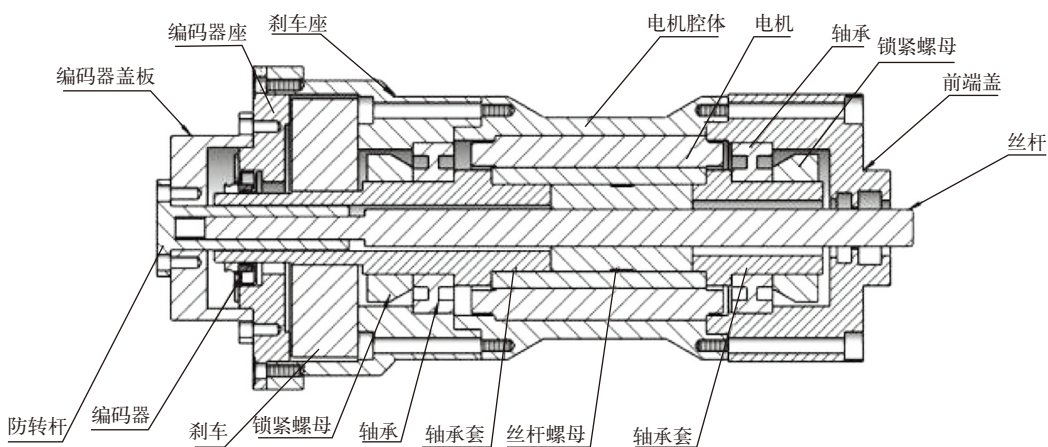


图 3 紧凑型电动执行机构剖视图

5) 安全保护：当系统检测到过载、堵转等异常情况时，电磁刹车立即动作锁定机构位置，同时切断电机电源，避免设备损坏。

这种直接驱动方式省去了传统执行机构中的减速器，消除了齿轮间隙带来的回差问题，使系统响应更快、控制更精确。实测表明，从接收到控制信号到完成位置调整的全过程响应时间得以加速，大幅提升了自动化系统的动态性能。

紧凑型电动执行机构剖视图如图 3 所示。

其中采用了中空的无边框力矩电机，丝杆可以穿过，故而可以使得丝杆完全利用到中空编码盘、刹车座、电机腔体和锁紧螺母的内部空间，较常规传动机构尺寸大大减小。

该直行程电动执行机构的工作过程可分为以下几个阶段。

1) 信号接收与处理：执行机构接收来自控制系统的 4~20mA 或 0~10mA 标准电信号，内置控制器将信号转换为电机驱动指令。

2) 动力转换：无边框力矩电机根据指令输出相应转矩，直接驱动丝杆螺母旋转。由于螺母通过键槽与缸体固定，旋转的螺母迫使丝杆产生轴向位移。

3) 运动传递：丝杆的直线运动通过输出杆传递至外部负载，实现位移或者压力的调节。

4) 位置反馈：高精度编码器实时监测丝杆位置，将信号反馈至控制器形成闭环控制，确保定位精度达到要求。

(1) 无边框力矩电机

无边框力矩电机是一种特殊设计的永磁电机，它以输出扭矩为关键性能指标，通过电磁场相互作用直接驱动负载，无需传统机械传动部件。以下从结构组成、工作原理、控制方法和典型应用四个方面进行全面解析。

1) 基本结构与核心部件。无边框力矩电机摒弃了传统电机的壳体、轴承和输出轴结构，仅由两大核心部件

组成：

定子组件采用高密度绕组设计，通常以环形结构直接嵌入设备本体（如机械臂关节外壳），由多个铜绕组线圈绕在钢片上并固定在机械结构上集成高精度温度传感器，实时监控热状态以保障运行稳定性。

转子组件由永磁体旋转钢圆环组件组成，直接安装在负载轴上支持定制化磁极排布，适应不同扭矩 - 转速需求省去传统传动链，消除背隙和弹性形变。

安装特点：定子与转子的气隙需通过精密机械加工保证依赖宿主设备的结构刚性实现精准定位，采用真空灌胶工艺，使电机散热更优越，温升更低。

2) 工作原理与电磁场机制：无边框力矩电机的工作原理基于电磁学基本原理，具体过程如下。

电磁场生成：驱动器控制 UVW 三相电形成旋转电磁场，定子绕组通电后产生交变磁场，转子永磁体建立恒定磁场。

转矩产生：转子的永磁体磁场与定子旋转磁场相互作用，磁场相互作用产生电磁转矩（洛伦兹力原理），转矩大小与电流强度成正比。

运动控制：通过改变三相电流的幅值和相位调整磁场特性，磁场变化导致转矩变化，从而控制转速和转向，基本原理与无刷电机类似，但结构更简化。

技术特性：采用多级多槽方案实现高转矩密度和低齿槽转矩，磁钢正弦化设计使电机反电动势更加正弦化，最小定转子气隙可达 0.25mm。

3) 控制方法与高精度实现：无边框力矩电机通过先进控制策略实现高精度运动控制。

反馈系统：通过霍尔元件或编码器获取转子位置信号，高分辨率编码器可实现 0.001° 级角度检测。

控制方式：方波控制简单经济，但转矩波动较大；正弦波控制（SVPWM）转矩平稳，电流谐波小。FOC 控制是磁场定向控制，实现 d-q 轴电流解耦；闭环控制驱动器比较反馈信号与目标值，实时调整三相电流输出，实现位置、速度和力矩的精确控制，直接驱动消除传动间隙和弹性变形，高动态响应，带宽可达数百赫兹，转矩控制精度可达 ±1% 以内。

4) 与有框力矩电机的区别：无边框力矩电机与传统有框力矩电机在工作原理上的主要差异见表 3。

表 3 对比差异

比较项	无边框力矩电机	有框力矩电机
结构	无外壳、轴承，仅定转子	完整电机结构，含外壳和轴承
集成度	直接嵌入宿主机械结构	需通过联轴器连接负载
传动效率	100% 直接驱动，无传动损耗	存在联轴器和传动链损耗
扭矩密度	更高（省去机械结构空间）	相对较低
散热性能	更好（直接接触宿主散热结构）	依赖自身散热设计

(2) 电磁刹车

电磁刹车在系统中提供快速可靠的制动控制，主要包括电磁线圈（产生磁场）、制动盘或摩擦片等。具有高响应速度，毫秒级别内完成制动操作；稳定的制动力，可根据需要调整刹车力度；高可靠性与耐久性，采用高品质材料制造；节能环保，不工作时不耗能，不产生摩擦热。

(3) 编码器

编码器是将机械运动转换为电信号的传感器，在执行机构中具有关键作用，需具备高精度、稳定性和环境适应性，可以实现闭环控制，实时监测电机输出轴的角度、转速等数据；误差修正，检测实际开度与设定值的偏差；安全保障，负载突变时可快速传递异常信号。

(4) 丝杆传动机构

丝杆作为旋转 - 直线运动转换的核心部件，其设计直接影响执行机构的精度、效率和可靠性。

材料工艺：丝杆采用 42CrMo 合金钢，经调质热处理（HRC28-32）和精密磨削，表面粗糙度 $Ra \leq 0.4\mu m$ ；螺母选用耐磨青铜 ZCuSn10P，内螺纹通过旋风铣加工而成。这种材料组合的摩擦系数稳定在 0.08~0.12 之间，既保证了传动效率（> 85%），又延长了使用寿命（额定行程寿命 > 100km）。

精度保障：丝杆轴向窜动控制在 0.01mm 以内，径向跳动 $\leq 0.02mm$ ，导程误差 $\pm 5\mu m/300mm$ 。通过预紧螺母消除轴向间隙，反向间隙控制在 0.03mm 以下，满足高精度定位要求。导向部分采用直线滚珠导轨，摩擦系数低至 0.003，显著降低了运动阻力。

4 CANOPEN 总线控制

为了对产品进行验证,通过 PLC 进行产品调试,该系统控制采用 CANOPEN 总线。在使用时,应注意:使用带屏蔽的双绞线连接,总线两端分别连接两个 120Ω 的终端匹配电阻防止信号反射;用万用表测量 CANL 和 CANH 之间的阻值可以确认现场端接电阻是否正确,正常电阻值应为 60Ω 左右(两个电阻并联);挂接设备最数量为 64 个;CAN 设备长距离通信时,需将不同 CAN 电路的公共地 GND 相互连接,以保证不同通信设备之间的参考电位相等;CAN 通信线不要和高压线或大电流功率线走一起;双绞线扭矩 D 应小于 2cm,扭矩越小抗干扰越好;短距离低速通信时,为了增加抗干扰能力可以使用双绞屏蔽线,屏蔽层双端接 PE;长距离高速通信时,不建议使用屏蔽线,因为屏蔽层和信号线之间存在较大分布电容,会导致传输信号延迟。

5 结论

本研究取得五项重大技术创新。首先,采用了中空无框电机的非对称绕组设计,提高功率密度的同时,齿槽转矩稳定性得到了保证;其次,创新的行星滚柱丝杠双向预紧机构使传动反向间隙降至 0.01mm 以下;第三,开发的电磁制动系统实现 20ms 内的精准位置锁定;第四,新型复用结构的整机轻量化设计大大减小了产品重量和尺寸。本研究成果为高端装备核心部件的自主可控提供

了重要技术支撑,在对重量、精度要求严苛的场合具有较大的推广价值,在智能机器人领域展现出广阔的应用前景。■

参考文献

- [1] 苏亚洲.高精度电动执行机构的设计研究[D].西安:陕西科技大学,2014.
- [2] 全国冶金设备标准化技术委员会.重型机械通用技术条件 第16部分:液压系统:GB/T 37400.16—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [3] 安妮.空心杯、无框力矩电机:典型企业、技术壁垒 一览[Z/OL].(2024-12-06)[2025-06-18].https://mimai.cn/article/detail?fid=1856470093&efid=h0IDMhyey2oq_4o7gjT3KQ.
- [4] 李志强.直驱永磁电机关键技术[J].电工技术学报,2024,39(3):1-10.
- [5] 佚名.中国电动执行机构行业市场运行现状及未来发展预测报告[Z/OL].(2025-07-11)[2025-07-12].<https://www.renrendoc.com/paper/440804245.html>.

作者简介:王伟(1984—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为机电一体化产品研制。

收稿日期:2025-07-22