

# ST260426 人形机器人关节模组深度科普



报告名称：《人形机器人关节模组深度科普》

发布机构：机友圈儿

发布时间：2026 年 4 月

本期解读：机友圈儿首席搞机头子--少女心的老阿姨，原北京发那科营销主管（10 年）+ 用友网络市场总监（5 年），微信号见报告尾图二维码

## 目录

- 附录：核心术语速查
- 前言：为什么从关节模组开始
- 第一部分：关节模组的「解剖课」——五个核心模块
- 第二部分：三条技术路线的交叉——不只看「旋转 vs 线性」
- 第三部分：同一模块的路线对决
- 第四部分：2026 产业棋局——成本、量产与格局
- 启示：四类机友的生存手册
- 结语：关节是机器人的骨头，也是产业的命门

## 附录：核心术语速查

术语	含义
无框力矩电机	无外壳和轴承的电机，定转子直接嵌入关节结构件
谐波减速器	利用柔轮弹性变形实现大减速比传动的精密减速器
行星减速器	通过多个行星轮分担载荷的高效减速器
RV减速器	两级传动、刚性高的高负载精密减速器
准直驱（QDD）	低减速比+大电机方案，力矩透明度高
双编码器	电机端+输出端两个编码器，用于力矩估计
FOC	磁场定向控制，电机驱动核心算法
中空走线	电机轴中心开孔，线缆从关节内部穿过
齿槽转矩	电机固有的力矩波动，影响运动平顺性
背隙	减速器输入输出之间的间隙，影响定位精度

## 前言：为什么从关节模组开始

搞人形机器人和机器狗，算法是灵魂，关节模组是肉体。人形机器人的关节模组，是整机成本与技术难度最为集中的子系统。一个双足人形机器人身上有三四十个关节，每一个都决定了它能不能站稳、走顺、执行功能。更关键的是，**关节模组的成本占到人形整机硬件成本的 40%-50%**。特斯拉 Optimus 想卖两万美元，关节模组不降到千元级别就是做梦。换句话说，关节模组是整机降本的第一战场，也是机器人硬件技术壁垒最高的「拦路虎」。

从系统层视角看，关节模组不只是机电器件，而是整机「数据-力-热」的三重接口：它采集关节角度与力矩信息（数据接口），将电机转矩转化为关节角速度（力接口），并在持续作业中成为整机最大的热源之一（热接口）。这三个接口的性能上限，共同构成了全身控制算法能否落地的硬件天花板。如果你刚进入这个行业不久，我建议先把这句话印在脑子里——**关节模组不是「零件」，而是一个把扭矩密度、功率密度、响应速度、控制精度、热稳定性和制造成本全部压缩到一起的系统级载体。**

这个认知的差异，决定了你是「会背参数的人」还是「懂系统集成的人」。

2025 年全球人形机器人出货量接近 1.8 万台，同比增长 508%。2026 年，特斯拉 Optimus Gen3 将在夏季启动生产，Figure 03 已经在真实家庭环境中全自主完成家务。表面上是算法和 AI 在驱动，但真正决定这些机器人能不能走出实验室、能不能把成本压下来的，是那些藏在机器人身体里的几十个关节模组。**关节模组降一半，整机成本就能降一半——这不是夸张，是产业共识！**



少女心的老阿姨

机友圈儿首席搞机头子

**关节模组降一半，整机成本就能降一半  
这不是夸张，是产业共识**

● 找到一起干成事儿的好机友

扫码交流  
GET IN TOUCH



本文将从**五大核心模块、三条技术路线、路线间对决和产业趋势四个维度**，搞机头子带你建立起对关节模组的系统性认知，读完这篇，再遇到人形机器人你就知道该问什么、该看什么、该做什么！

## 第一部分：关节模组的「解剖课」——五个核心模块

一个完整的关节模组，通常由电机、减速器、编码器、驱动器、热管理与结构集成五大模块构成。行业内常见的「四合一」集成模组，是指将前四者高度集成在一个紧凑的金属壳体内，而热管理与结构集成则作为贯穿全系统的「隐性骨架」。

## 1. 电机：动力的源头

电机是整个关节的「肌肉」。目前人形机器人关节中，主流电机方案是**无框力矩电机**——它没有传统电机的外壳和轴承，定子和转子直接嵌入关节结构件中，实现最大程度的轻量化和紧凑化。

为什么是无框力矩电机？因为它解决了人形关节最核心的痛点：**在极度受限的体积和重量下输出足够大的扭矩**。行业领先的关节模组扭矩密度要求 $\geq 100\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}$ ，电机峰值功率密度 $\geq 5\text{KW}/\text{kg}$ 。

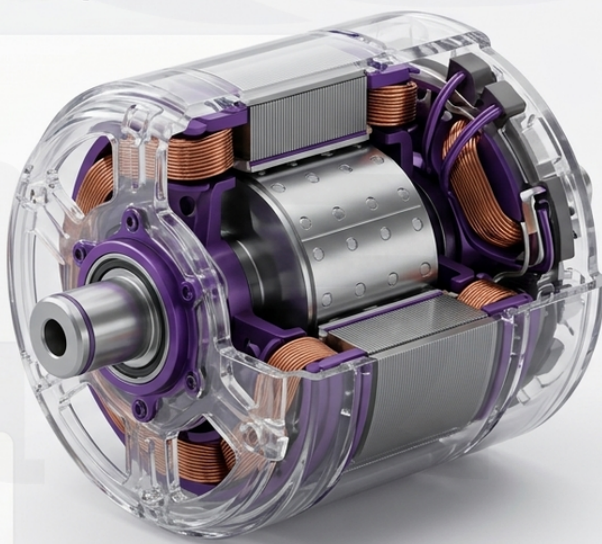
**技术要点：**无框力矩电机有内转子和外转子两种构型。人形关节多采用内转子方案（转子在内、定子在外），配合谐波减速器使用。关键工程约束是齿槽转矩（cogging torque），电机的齿槽转矩是影响运动平顺性的关键指标——齿槽转矩越小，低速运动越平稳，**齿槽转矩若控制不佳，会在低速精细操作中产生抖动，直接影响手部抓取与步态平滑性**。这一指标在营销规格中几乎不被标注，但它是区分「演示样机能用」与「工厂班次可用」的关键分界线。

# 人形机器人无框力矩电机架构

## 高端运动控制系统 (Premium Motion Control System)

行业领先的关节模组  
扭矩密度要求  
 $\geq 100\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}$ ，  
电机峰值功率密度  
 $\geq 5\text{KW}/\text{kg}$

实现最大程度的  
轻量化和紧凑化



无框力矩电机  
技术构型：  
内转子构型  
与  
外转子构型



内转子构型



外转子构型

注：所有配图为 Gemini 制作，仅作为联想和示意使用，非零部件实际结构图

## 2. 减速器：扭矩的放大器

减速器是关节模组中最复杂、技术壁垒最高、价值量最大的零部件。它的核心功能很简单：降低电机的高转速、放大输出扭矩，让机器人的关节动作更平稳、更有力。减速器路线之争是人形机器人关节领域讨论最多、误解也最多的议题。本文不做「谁胜谁负的二元判断」，而是给出一张「部位-减速器选型矩阵」，因为不同部位的负载特性决定了不同减速器路线的适用性。

精密减速器主要分为谐波减速器、行星减速器、RV 减速器和摆线针轮减速器四大类。

- **谐波减速器**：由波发生器、柔轮和刚轮组成。核心原理是利用柔轮的弹性变形实现大减速比传动，单级传动比大、体积小、质量轻、精度高。它是最适合人形机器人上肢和躯干关节的方案。
- **行星减速器**：由太阳轮、行星轮、内齿圈和行星架组成，通过多个行星轮分担载荷，实现高效动力传递。结构简单、成本较低、刚性更好。
- **RV 减速器**：由渐开线行星传动和摆线针轮传动两级组成，刚性强、承载能力大，主要用于重负载场景。
- **摆线针轮减速器**：利用摆线针轮啮合原理，通过偏心运动实现传动，刚性好但精度略低于谐波。

减速器类型	核心优势	核心约束	适用部位	代表供应商
谐波减速器	近零背隙、高减速比（80-320:1）、体积紧凑	效率偏低（58-70%）、大冲击载荷下疲劳寿命有限	腕部、肘部、小负载精密关节	哈默纳科（日）、绿的谐波、来福谐波（国）
行星减速器	效率高（95-98%）、刚性强、承载大	背隙较大（1-5 弧分）、噪声相对偏高	腰部、肩部等中大负载关节	纽卡（国）、Neugart（德）
RV 减速器	多接触点分散载荷、寿命长、低磨损、刚性强	体积与重量较大、装配精度要求高、成本高	髋部、膝部等重负载旋转关节	纳博特斯克（日）；双环传动、中大力德（国）
摆线针轮减速器	多接触点分散载荷、寿命长、低磨损	装配精度要求高、体积稍大	腿部旋转关节、大负载关节	Nabtesco（日）；国内起步

MIR 预计 2025-2030 年中国减速器在人形机器人上出货量 CAGR 约 86.1%。

# 减速器：扭矩的放大器

## 精密减速器主要分类

谐波减速器



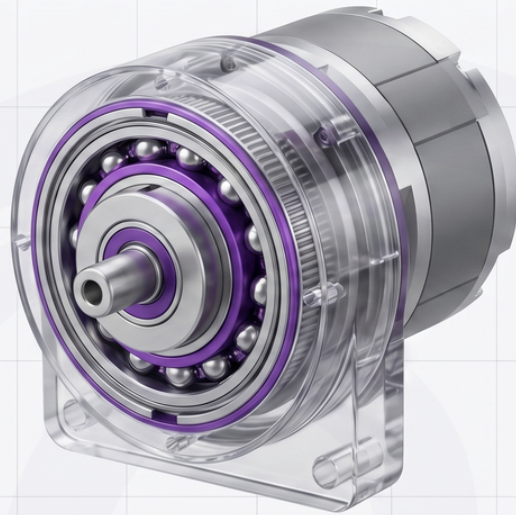
行星减速器



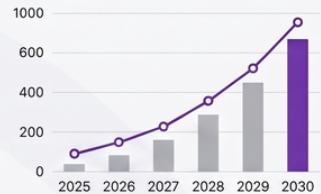
RV 减速器



摆线针轮减速器



## 中国人形机器人减速器出货量 (2025-2030)



MIR预计 2025-2030 年中国减速器在人形机器人上出货量 CAGR 约 86.1%

## 极简力传导路径



## 减速器的作用

降低电机转速，按比例放大输出扭矩



## 3. 编码器：精度的守护者

**编码器是关节的「眼睛」，是关节位置与速度反馈的核心传感器**，可以实时感知电机转子的角度、位置和速度，反馈给驱动器形成闭环控制。没有高精度编码器，再好的电机和减速器也发挥不出来。

**主流关节模组采用双编码器架构**：电机端（输入端）编码器+关节输出端编码器。双编码器方案的最大价值在于——通过对比输入和输出的角度差，可以间接测量关节承受的扭矩，实现力矩闭环控制，无需额外安装昂贵的力矩传感器。

目前编码器主流精度达到 18Bit 分辨率（262,144 脉冲/转），控制频率可达 25kHz。值得注意的是，**高分辨率的价值不只在「位置精确」，更在于：高采样频率允许 FOC（磁场定向控制）在更细粒度上调节力矩**，从而在力控制带宽上获得 3-5 倍提升——这正是全身动态控制算法所需要的。

编码器的工程评价维度通常被简化为分辨率，但实际上更关键的是「单圈精度」（absolute accuracy）而非理论分辨率，以及在振动、温变环境下的精度漂移。**2026 年量产方向上，多圈绝对值编码器（Multiturn Absolute Encoder）正在逐步取代增量式编码器，以避免断电后的零点丢失问题。**

# 人形机器人编码器架构

## PRECISION ENCODER TOPOLOGY (PE-A/B)

### 核心机制 (CORE MECHANISM)



### 工程定律 (AXIOMS)

关节力控精度组合精度 combination

$$J_{Precision} = f(E_{In}, E_{Out})$$

### 力控带宽提升

Concept → 3-5倍提升 concept.

### 执行标准

执行标准  
QC/T 1022

### 可视验证 (VERIFICATION)

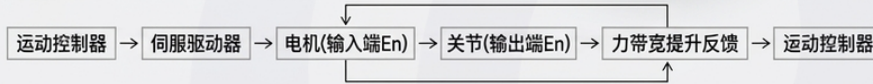
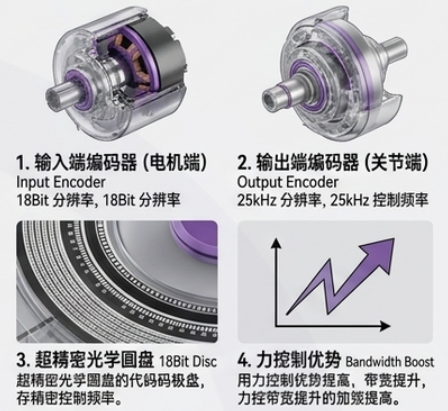


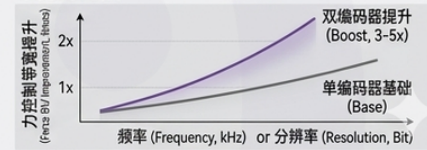
Figure 1.0



### 深度解剖 (DECONSTRUCTION)



### 带宽对比图



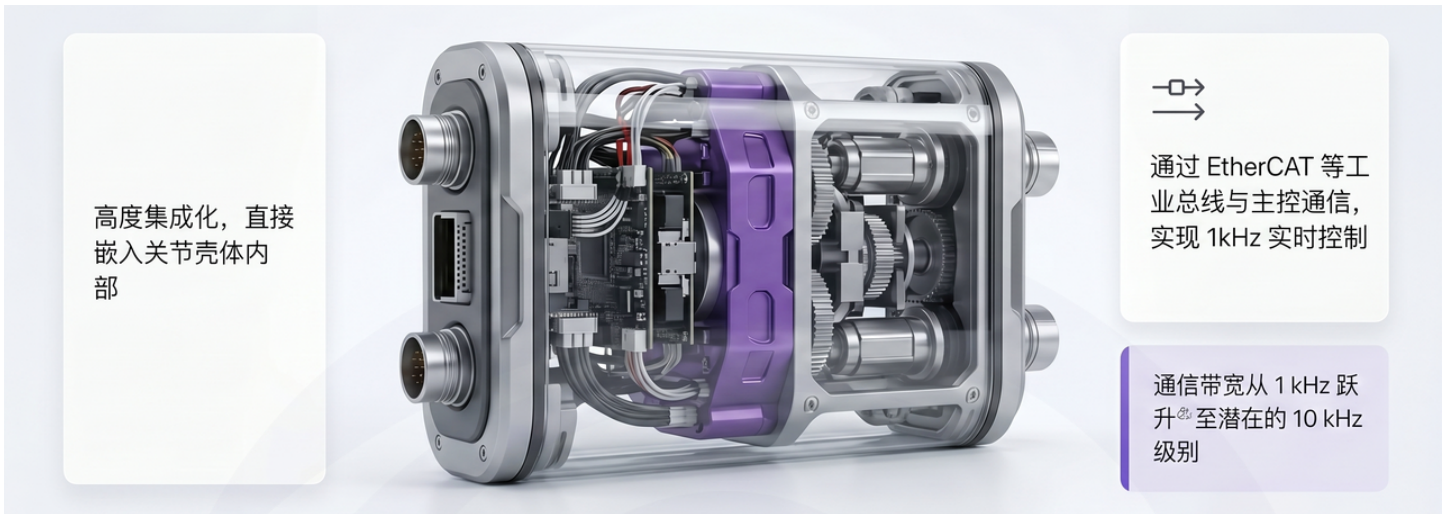
## 4. 驱动器：智能的大脑

**驱动器接收控制指令，通过电流控制驱动电机运转。**早期人形机器人关节模组中，驱动控制器 (Driver + Controller) 与电机是分离的——驱动板集中安置于机身躯干内，通过 EtherCAT 总线 (1 kHz 刷新率) 与各关节通信。这一架构的优点是散热集中，缺点是布线复杂、通信延迟难以进一步压缩，且驱动板成为整机体积的重要占用者。

**驱动器的核心算法是 FOC (磁场定向控制)，实现电机电流的精确矢量控制。**先进的驱动方案还集成了热模型算法——根据绕组温度动态计算最大安全电流边界，在保护电机的同时释放极限性能。

现代关节模组的驱动器已高度集成化，直接嵌入关节壳体内部，通过 EtherCAT 等工业总线与主控通信，实现 1kHz 实时控制。**2026 年的主流趋势是「驱控一体化」(Integrated Drive + Controller)：**将驱动电路与 FOC 控制器集成于关节模组内部，直接通过单线 EtherCAT 串联所有关节，主控只需发送目标力矩指令。**这一架构使通信带宽从 1 kHz 跃升至潜在的 10 kHz 级别，是全身控制算法在物理层的「最后一公里优化」。**

ROBOCREW



## 5. 热管理与结构集成：看不见的战场

**热管理是关节模组科普中最容易被略过的环节，却是决定关节模组[持续作业时间]与[量产可靠性]的最终约束。**研究显示，高转矩执行器在无有效散热的情况下，可在数分钟内达到 150°C 以上，产生火灾风险和机械损坏。对于以 10 小时班次为目标的工业部署场景，这是不可接受的。

关节模组在高负载运行时发热严重，温升需控制在 30°C 以下。**当前关节级热管理方案分为三档：**

- 被动散热（热传导至外壳），适用于低占空比轻载关节
- 主动风冷（微型风扇），适用于中等负载
- 液冷微流道（Microfluidic Cooling），适用于持续高负载关节

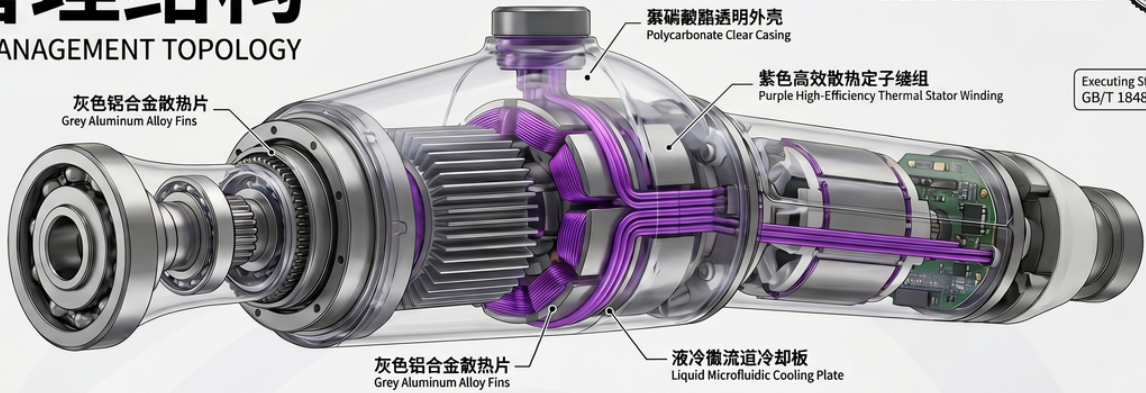
研究显示仿生微流道设计可将热阻降低 50% 以上。此外，AI 驱动预测散热算法（根据规划动作提前调节冷却强度）正在兴起，早期实验数据显示可带来 25–35% 的能效提升。

机友圈  
ROBOCREW

# 热管理结构

THERMAL MANAGEMENT TOPOLOGY

Continuous numbering



Executing Standards  
GB/T 18488-202X

## 热设计准则

THERMAL DESIGN AXIOMS

Simplified heat equation

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

负载类型 → 散热模式选择

↓  
 $R_{th}$  优化

## 深度解构

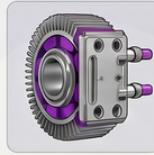
DECONSTRUCTION



1. 被动散热  
被动散热。适用于受约束类，适用于低速轻载关节。



2. 主动风冷  
主动风冷。微型风扇，适用于中等负载。



3. 液冷微流道  
Microfluidic Cooling  
适用于持续重载关节。

## 核心机制

CORE MECHANISM



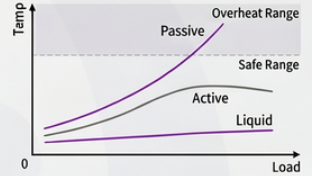
Passive Mode  
被动模式



Active Mode  
主动风式



Liquid Mode  
液冷模式



## 散热模式判定流程 (Verification)



@XUEMO\_JNBN @xuemoto xuemo\_jangnan

## 6. 小结：参数口径是比较的前提

当前人形机器人关节模组的技术参数讨论中，最大的陷阱是「无口径比较」——不同厂商的数据来自不同测试工况，却被放在同一张表格里直接比较，导致结论失真！

工程建议：评价关节模组时，可以强制要求厂商提供以下三张曲线，缺少任何一张，参数就不具备工程可比性：

- 转矩-转速-效率三维图
- 热稳态持续转矩（连续 1 小时后的可持续转矩）
- 编码器精度-温度曲线

## 第二部分：三条技术路线的交叉——不只看「旋转 vs 线性」

很多刚入行的人会把关节模组的分类简化为「旋转关节」和「线性关节」。这个分类没错，但不够。产业实践中，真正决定产品定位的是三个维度的交叉：

### 维度一：运动形式

- **旋转关节**：实现绕轴转动，用于肩、髋、腕等回转部位。特斯拉 Optimus 有 14 个旋转关节。

- **线性关节**：实现直线推拉，用于肘、膝、踝等摆动部位。特斯拉 Optimus 有 14 个线性关节，采用无框电机+行星滚柱丝杠方案，力矩分为 500N/3900N/8000N 三档。

## 维度二：传动架构（这个才是真正的「灵魂」）

这是体现专业深度的分类维度：

- **高减速比路线（TSA，传统刚性驱动器）**：电机+高减速比减速器（谐波或 RV）。优点是可以用小电机输出大扭矩、精度高；缺点是力矩透明度低，需要额外加力矩传感器，反向驱动能力差。特斯拉 Optimus Gen1 采用此方案。
- **准直驱路线（QDD）**：电机+低减速比减速器（通常 $\leq 10:1$ ）。减速比低，电机本身要更大，但力矩剪明度高——通过测量电流就可以推算输出扭矩，省去了昂贵的力矩传感器。这是 2026 年旋转关节的主流技术方向，力控精度目标 $\pm 0.5\%$  FS。
- **直驱路线（DD）**：电机直接驱动负载，无减速器。精度最高、响应最快，但扭矩密度受限，目前仅用于手指等轻载场景。

## 维度三：集成深度

- **分立式**：客户分别采购电机、减速器、编码器、驱动器，自己组装。成本低但集成难度大、一致性差。
- **半集成模组**：电机+减速器+编码器集成为一体，驱动器外置。
- **全集成模组**：「四合一」——电机、减速器、编码器、驱动器全部封装在一个壳体内。宇树 G1 小腿处关节就是「电机-两极行星减速器-编码器-驱动器」四合一方案，直径约 60mm，高度 70mm，重量仅 525g。

这三个维度的交叉，才是你面对客户时需要快速判断的东西：客户要的是旋转还是线性？要的是高精度（谐波）还是低成本（行星）？要全集成模组还是自己组装？

## 第三部分：同一模块的路线对决

### 1. 谐波减速器 vs 行星减速器

这是关节模组领域最核心的路线之争，没有之一。

谐波减速器——上肢和精密场景的「王者」：

谐波减速器凭借极致轻量化和高精度，牢牢占据灵巧关节的份额。单级传动比可达 30-320，背隙可控制在 1 弧分以内，重复定位精度 7 弧秒。但它的短板也很明显：柔轮材料寿命是量产瓶颈——特斯拉 Optimus Gen2 就因减速器耐用性问题经历了方案重做。

全球市场格局：日本哈默纳科凭借近五十年技术积累占据全球 58% 的市场份额，国内绿的谐波以 15% 跻身国际前列，来福、大族、同川等企业市场份额在 1%-5% 区间。绿的谐波自研 Y 齿形技术，产品寿命突破 1 万小时，精度达 5 弧秒，已批量供货国内头部厂商。

### 行星减速器——下肢和重载场景的「实干家」：

行星减速器的传动效率高达 95%-98%，远高于谐波的 70%-85%。结构简单、刚性好、成本低。在宇树 G1 的成本结构中，小关节行星减速器仅 300 元/件，大关节 400 元/件。

但行星减速器的精度不如谐波，背隙通常在 3-8 弧分，主要用于下肢等高负载场景。

### 产业趋势：混合方案成为共识

特斯拉 Optimus Gen3 给出的答案是：谐波减速器用于上肢和躯干关节，行星减速器用于下肢等高负载场景，超高负载工况则测试摆线与 RV 减速器。这不是妥协，而是工程最优解。

## 2. 轴向磁通电机 vs 径向磁通电机

### 这是电机领域的「未来之战」。

**径向磁通电机（当前主流）**：采用「内外嵌套」的圆柱形结构，定子铁芯环绕中心的转子，磁力线沿半径方向穿过气隙。技术成熟、成本可控，是目前绝大多数关节模组的选择。

**轴向磁通电机（未来趋势）**：采用扁平的盘式拓扑结构，盘状转子位于定子侧面，气隙磁场方向与电机轴线平行。相比径向磁通，轴向磁通重量减轻 50%、轴向尺寸缩减 50%、高效 (>90%) 面积达 90% 以上，扭矩密度和功率密度大幅提升。

富临精工研发的轴向磁通电关节技术已实现扭矩密度和动态控制的协同优化。国内的青龙人形机器人关节已应用轴向磁通电机。科德数控计划 2026 年初推出轴向磁通电机样机。

但轴向磁通电机也有痛点：散热困难（双转子结构中间定子散热难）、单价仍然较高（2024 年平均单价约 3400 美元）。东方证券研报判断，轴向磁通电机有望在机器人腿关节等重载场景率先广泛应用，

再拓展至全身关节。

### 3. 光学编码器 vs 磁编码器

编码器的选择看似技术细节，实则影响成本和可靠性。

**光学编码器**精度最高（可达 20Bit 以上），但怕灰尘、怕震动、成本高。

**磁编码器**抗污染能力强、成本低，但精度略逊（通常 14-18Bit）。人形机器人关节主流采用磁编码器，配合双编码器架构实现力矩估计。

## 第四部分：2026 产业棋局——成本、量产与格局

### 1. 成本是唯一的「第一性原理」

关节模组的成本是行业真正的「命门」所在。一台机器人能否走出实验室，取决于这些精密模组能否在保持性能的同时，把价格从三四千元降到一千元级别。特斯拉 Optimus 给行业画出的「生死线」是整机两万美元，倒推下来单个关节模组的价格甚至可能要被压到一千元以内。

宇树 G1 的成本控制给出了一个参考基准：小关节（外径约 60mm）单件成本 1000 元，大关节（外径约 80mm）单件成本 1500 元。这已经是量产水平下极具竞争力的成本结构。

### 2. 量产能力决定生死

「2023 年以后成立的公司，在量产上会非常吃力。」意优科技创始人孙则诘给出了这个略显残酷的判断。全球首条自动化关节模组产线年产能已达 10 万台，意优 2026 年关节出货量预计突破 40 万台。

整机厂对关节模组的精度要求已经到了「死磕万分之一良率」的程度。行业普遍的千分之一故障率在规模化量产面前意味着售后成本的几何级爆炸。量产能力不仅是能不能做出来的问题，更是能不能以一致性做出来的问题。

### 3. 竞争格局：窗口期正在收窄

全球人形机器人关节模组市场预计从 2025 年的 1 亿美元增长至 2031 年的 3.72 亿美元，CAGR 为 24.5%。当前关节模组的核心器件供应格局是典型的“国际寡头 + 国产追赶”双轨并行结构。减速器、电机、编码器、驱动器各细分赛道均在快速洗牌：

- **谐波减速器**：日系龙头份额收缩，国产「一超多强」格局初现
- **无框力矩电机**：科尔摩根仍为高端标杆，但国产替代因成本压力正在加速
- **一体化模组**：意优、同川等国产品牌出货量快速增长，窗口期正在收窄

## 启示：四类机友的生存手册

以下内容不教你讲漂亮话，只讲产业里真正正在发生的逻辑。

### 1. 给创业者 / 产品负责人

你们在这场游戏里压力最大的人。

- **技术路线选择上，不要追求「最优解」，要追求「最先量产的次优解」**。轴向磁通扭矩密度高、谐波精度高，但如果你的供应链连交付一千套一致性的柔轮都吃力，那个技术优势等于零。宇树 G1 在腿上用的是两级行星减速器而非谐波，为什么？因为成本可控且能稳定供货。实验室里漂亮的数据到了产线上可能全是坑。
- **产品定位上，想清楚你要做「关节厂」还是「方案商」**。做关节厂，你的对手是绿的谐波、意优科技、科尔摩根，拼的是极致的性价比和一致性。做方案商，你赚的是帮整机厂选型、集成、调参的服务费。后者的毛利率更高，但规模化难。别两头都想吃。
- **市场机会窗口就在 2026-2027 这两年**。特斯拉 Optimus 一旦在 2027 年逼近两万美元目标价，国产整机厂会全部扑向供应链。如果你的关节模组现在还没进到至少两家的验证流程里，三年后你大概率是看客。
- **风险提示第一条：别被「人形机器人」四个字绑架**。关节模组的技术完全可以降维到协作机械臂、外骨骼、AGV 舵轮上。在真正的人形订单规模化到来之前，先活下来比什么都重要。第二条风险：创始团队如果只有电机专家而没有做量产工艺的人，要出大问题。

### 2. 给投资人

- **赛道价值：关节模组是人形机器人产业链上确定性最高的「卖水人」**。不管最后哪家整机厂跑出来，他们都需要买关节。谐波减速器、无框力矩电机、一体化模组的头部供应商，在 2030 年之前大概率会跑出 3-5 家百亿级市值的公司。
- **标的筛选逻辑要变**。不要只盯着毛利率和专利数量。问创始人三个问题：你的产线一小时能下线多少个一致性达标的产品？你的供应商名单里有没有二级甚至三级的替代方案？你的交付周期从接到订单到发货是多少天？能流畅回答这三个问题的团队，比只会讲技术参数的靠谱十倍。

- **风险提示：警惕「伪国产替代」。**有些企业说自己做的是谐波减速器，柔轮材料和热处理工艺全依赖日本进口。这叫组装，不叫替代。一旦供应链被卡，立刻停摆。另一个风险是估值泡沫——现在一级市场上做关节模组的企业估值已经严重分化，头部的贵到离谱，腰部的接不住订单。
- **供应链分析上，关注三个「卡脖子」点：**柔轮材料（目前最好的还是日系和瑞典系）、编码器芯片（高端光学芯片仍以 IC-Haus、雷尼绍为主）、高精度轴承。这三个方向上能做真正国产替代的企业，值得下重注。

### 3. 给从业工程师 / 转行者

- **学习提升路径：**如果你是电机控制出身，先把 FOC（磁场定向控制）和三环 PID 调到肌肉记忆，再把 EtherCAT 通讯协议吃透。如果你是机械出身，把谐波减速器的柔轮受力仿真、行星减速器的修形算法搞明白。如果你是跨行业来的，最快上手的方式是去拆一个宇树 G1 的关节模组（网上有详细拆解报告），把每一层怎么走线、怎么散热、怎么对轴看明白。
- **入行门槛：**硬件端的门槛在「量产工艺」，软件端的门槛在「实时控制」。能独立把一款无框力矩电机从样机调通到可以小批量出货的工程师，市场上月薪没有低于三万五的。能解决热失控问题的结构工程师，同样抢手。
- **薪资预期：**2026 年在一线城市，三年经验的关节模组控制算法工程师年薪普遍在 45-70 万之间，五年以上经验且有量产项目经历的年薪轻松过百万。机械结构方向略低，但也在 35-55 万区间。关键是——这个薪资水平预计还能维持至少三年，因为人才供给远跟不上产业扩张速度。
- **技能树优先级：**第一优先是嵌入式 C 语言和实时操作系统，第二是 MATLAB/Simulink 建模仿真，第三是 EtherCAT 和 CANopen 协议栈，第四是电磁仿真软件（如 Maxwell）。别什么都想学，先把这四项砸实了。

### 4. 给终端企业决策者

- **选型建议：先定应用场景，再定技术路线。**如果你的机器人在结构化产线上做重复性动作（如搬运），行星减速器足够，精度要求没那么高。如果是在家庭环境里给人倒水、叠衣服，谐波减速器是刚需，而且必须上双编码器做柔顺控制。不要上来就问「谐波好还是行星好」，那是工程师思维——决策者该问的是「这个关节能不能支撑我们产品定义的场景」。
- **供应商评估的三个硬指标：**一是能不能提供全生命周期的扭矩-温度曲线数据（这代表他们真的做过量产验证）；二是交付批次之间的齿槽转矩波动能不能控制在 5% 以内（这代表一致性控制能力）；三是售后响应时间——关节模组一旦出问题，整条产线要停，24 小时内能不能给到故障分析和替换方案，比价格重要得多。
- **合作模式上，强烈建议走「联合开发+阶梯采购」路线。**前 200 台用对方的标准模组，跑通整机验证；201-1000 台阶段锁定部分定制化参数；1000 台以上重新谈价格。不要一上来就签独家，给自己留切换空间。

- **试点策略：先用「非关键关节」试水。**手腕、腰部这类非承重、非高频使用的关节先用国产方案试错，积累数据和信任；肩、髋、膝等核心承重关节先用成熟方案（哪怕是进口的），等国产供应商跑通了再切。这个顺序错了，整机开发周期至少多半年。

## **结语：关节是机器人的骨头，也是产业的命门**

把整篇报告读完，你应该能理解这句话的分量了——关节模组不是什么「配件」，它是决定一台人形机器人能不能走出 PPT 的那道坎。

**电机、减速器、编码器、驱动器、热管理，五个模块环环相扣，任何一个环节掉链子，整台机器的运动性能和可靠性就崩了。**更残酷的是，这五个模块的竞争逻辑完全不同：谐波减速器拼的是材料与精密加工，无框力矩电机拼的是电磁设计与散热，编码器拼的是芯片供应链。没有一家企业能通吃，但每一家整机厂都在盯着你能不能把「性能-成本-一致性」这个三角稳住。



少女心的老阿姨

机友圈儿首席搞机头子

**电机、减速器、编码器、驱动器、热管理，五个模块环环相扣  
任何一个环节掉链子，整台机器的运动性能和可靠性就崩了**

● 找到一起干成事儿的好机友

扫码交流  
GET IN TOUCH



2026 年到 2027 年，是这个行业留给关节模组供应商的最后一段窗口期。特斯拉的量产倒计时已经启动，国产整机厂的供应商名录正在快速锁死。**这两年跑不出来的企业，三年后大概率只剩被并购的价值！**

**如果你是一个销售、工程师、创业者或者投资人，读完这篇之后，希望你记住的不是参数，而是判断框架：**遇到一个关节方案，先看传动架构是 TSA、QDD 还是 DD，再看减速器是谐波还是行星，最后问量产的一致性和散热方案。这三个问题问出来，对方就知道你不是外行。

**关节是机器人的骨头。骨头硬不硬，决定了它能站多高、走多远！**

群里聊聊你的想法和建议，或者私信告诉我你最想了解的细分领域，下次我接着给你「翻译」。



机友圈儿

# @少女心的老阿姨

具身智能交流群

职场分享 | 产业整合

同行对接 | 人脉交流



联系搞机头子

获取更多报告



微信扫码加入星球

本报告版权及知识产权归机友圈儿所有，未经许可不得商用，转载需申请，机友圈儿保留追究相关法律责任的权利！