

人形機器人關節選型與發展研究報告重點整理

一、關節選型核心邏輯

1. 旋轉驅動器 vs. 直線驅動器

- 旋轉驅動器：
 - 應用場景：高扭矩關節（如腕部、肩部、腰部、髖部）。
 - 方案：電機+減速器（諧波、行星、RV減速器）。
 - 優勢：體積小、扭矩密度高，適配大範圍轉動需求。
- 直線驅動器：
 - 應用場景：高負載、小轉動幅度位置（如雙腿、雙臂）。
 - 方案：電機+絲杠（滾柱/滾珠絲杠）。
 - 優勢：剛性強、負載能力高，提升整機穩定性。

二、旋轉驅動器技術方案對比

2. 減速器選型

類型	特點	適用場景
諧波減速器	減速比高、體積小、精度高	輕負載高精度關節（Optimus主要方案）
行星減速器	經濟性好、抗衝擊性強	大負載經濟型關節（國內主機廠首選）
RV減速器	耐重載、抗衝擊性優	高性能機器人腰部、髖部

2. 驅動器方案分類

- 剛性驅動器：諧波/RV減速器+力矩感測器，體積小但成本高（特斯拉Optimus方案）。
- 彈性驅動器：串聯彈性體，柔順性好但控制複雜。

- **準直驅方案**：低減速比減速器（行星），成本低但扭矩密度受限（MIT四足機器人應用）。

三、直線驅動器技術路徑

3. 絲杠選型

類型	特點	適用場景
滾柱絲杠	高負載、高精度、壽命長	大負載關節（Optimus下肢）
滾珠絲杠	性價比高、精度適中	中小負載關節（量產降本）
T型絲杠	自鎖性強但精度低	特定自鎖場景（應用較少）

2. 趨勢：

- 滾珠絲杠憑藉低成本優勢，有望替代部分滾柱絲杠（單機成本降幅達91%）。
- 自鎖需求低，更關注運動可逆性，滾珠/滾柱絲杠通過電機自鎖滿足需求。

四、Optimus關節設計分析

- 3. **旋轉關節**：14個自由度，採用諧波減速器+力矩感測器，未來或引入RV減速器適配高負載部位。
- 4. **直線關節**：下肢採用滾柱絲杠方案，負載能力達8000N，兼顧精度與穩定性。
- 5. **升級方向**：Gen2增加自由度（30個），優化質心分佈，提升動態性能。

五、國內市場策略

- 1. **國內主機廠**：優必選、智元等採用準直驅方案（行星減速器+電流環控制），兼顧成本與動態響應。
- 2. **技術路線未固化**：硬體降本驅動下，諧波+行星組合或成主流。

六、受益標的

領域	核心企業	優勢
主機廠	特斯拉、優必選	技術領先，量產能力突出
關節總成	三花智控、拓普集團	機電一體化佈局，全球化產能
減速器	綠的諧波、中大力德、雙環傳動	諧波/RV/行星全品類覆蓋，國產替代加速
絲杠	恆立液壓、貝斯特	滾珠/滾柱絲杠國產化突破
材料	恆工精密	球墨鑄鐵低成本輕量化，適配減速器部件

七、風險提示

- 1. 人工智慧技術突破不及預期。
- 2. 人形機器人商業化進程緩慢。
- 3. 核心零部件（如諧波減速器、六維力感測器）成本過高。
- 4. 政策支持力度減弱或行業測算偏差。

總結：人形機器人關節設計需平衡扭矩、負載、成本與動態性能，**諧波減速器+滾柱絲杠**是當前Optimus的核心方案，國內廠商則以**行星減速器+滾珠絲杠**為主攻方向。未來隨著量產降本，**機電一體化與材料創新**（如球墨鑄鐵）將成為競爭焦點，具備技術突破和國產替代能力的廠商有望顯著受益。