

智能机器人关节驱动机构设计

刘银平

山东中康激宏科技开发有限公司 山东泰安 271000

摘要: 智能机器人技术在工业, 医疗以及服务等领域应用的日益广泛, 促使机器人关节驱动机构性能需求不断提升。本研究基于高精度、高响应、高效率及轻量化目的, 设计了一种新型智能机器人混合驱动关节机构, 该机构采用了精密减速器与柔性铰链传动相结合的方式实现动力传递, 实现了伺服电机与压电陶瓷驱动器的有机结合。通过有限元仿真与物理样机测试, 对所设计机构的静态刚度、动态响应特性、传动精度及能耗进行了全方位多角度评估。实验结果显示, 该驱动机构在确保足够承载能力的前提下, 显著提升关节的动态响应速度和定位精度, 其最大输出扭矩可达 15 Nm, 关节最高转速为 120 RPM, 定位精度优于 $\pm 0.02^\circ$, 能量转换效率提升了约 21.4%, 本研究为高性能智能机器人关节的设计提供了一种有效的技术路径。

关键词: 智能机器人; 关节驱动; 混合驱动; 压电陶瓷; 伺服电机; 动力学仿真

引言

智能机器人是现代自动化领域的重要组成部分, 其性能水平直接关联到功能达成情况和运作稳定程度, 在机器人结构设计里, 关节被当作联系各个运动单元并执行复杂轨迹控制的关键部件, 有着不可或缺的核心价值。驱动装置凭借给予准确又高效的动力支撑, 对整个系统性能起着决定性影响^[1]。传统机器人关节大多采取单电机驱动策略, 虽然具有结构简单、成本低廉等优点, 但高精度需求、快速反应能力和环境适应性等方面存在明显缺陷, 特别在必须做到极低定位误差并且要大幅降低振动效果的应用场合里。为了冲破传统驱动系统的局限性, 本研究推出了融合压电陶瓷推动与伺服电机推动的综合驱动系统, 压电陶瓷推动器具备迅速回应, 准确定位, 少热量影响等诸多长处, 在微小位移操控范畴有着明显的潜力, 但是其推动扭矩和行程范围依然有待改善; 相反, 伺服电机具有很强的扭矩, 长的工作行程和优良的闭环控制系统, 在总体操控方面体现得很充分, 但在精确的微小位移调节方面有明显的缺乏, 通过把这两种推动办法结合起来形成一个综合驱动系统, 既可完成较大的运动操控, 又可以保证关节级别的精确定位性能, 依照这个观念, 本研究规划了一种专门用于智能机器人关节的新式驱动系统, 以满足将来对于机器人关节性能的更高需求, 给改进机器人智能化水平并拓宽应用范围

给予强有力的支持。

一、方法

1. 方法概述

伺服电机依靠精密减速装置, 如谐波减速器或者 RV 减速器, 给予关节运动动力支撑, 它有着不错的负载承受能力和宽频带速度响应性能。压电陶瓷驱动单元经过柔性铰链机构直接作用到关节末端或者负载节点上, 可以做到纳米到微米范围内的精准定位调节以及快速的位置补偿功能。这种混合驱动系统把柔性铰链当作主要的机械连接部件, 它的结构设计经过有限元分析 (FEA), 目的在于达成高刚度, 低摩擦损耗并且没有累积误差的微位移准确传递的目的^[2]。整套驱动系统由集成化的智能控制平台统一调度, 该平台可以根据任务需求随时分配并协调两种不同类型的驱动器工作模式, 以此来改善整体运行效果和效率水平

2. 实验设计

为对所设计的混合驱动关节机构的技术性能进行全面检测, 本文借助实验验证法开展系统实验检测^[3]。实验设计选用两组平行对照实验, 实验组按文中混合驱动方案构建, 对照组选市场主流、成熟的技术纯伺服电机驱动关节机构, 结构参数、机械规格及负载条件均与实验组严格匹配, 以保证对比的科学性、可靠性。实验组具体包括: 一台额定功率 200 瓦的交流伺服电机, 一款减速比 1: 50 的谐波减速器, 一台位移精度 20 微米的压电陶瓷驱动装置, 一套经过优化的柔性铰链传动系统^[4]。

作者简介: 刘银平 (1990.5-), 女, 汉, 山东菏泽, 工程师, 研究方向: 机械电气方向。

对照组仅有一台规格一致的伺服电机以及同型号的谐波减速器，两组关节机构均置于仿机器人手臂结构的模拟负载装置内，并且接入了同样的高精度数据采集与控制系统，在实验过程中，所有的测试都在标准实验室环境下进行，温度保持在 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $50 \pm 5\%$ ，从而尽可能地减少外部环境因素对实验结果造成的影响。

3. 参数设计

混合驱动关节机构的设计重点在于精确核心参数并达成最优配置方案，这关乎系统运作稳定与否。伺服电机选型的时候，要全面考量它的额定扭矩，峰值扭矩，额定转速以及动态响应频率这些核心指标，以此来适应关节在特定工况下的动力需求，还要具备过载保护功能和快速启停的能力；针对压电陶瓷驱动器而言，就要顾及它最大的位移范围，分辨率，响应速度，滞后状况，重复定位精确度等技术参数。这次研究选用的压电陶瓷驱动器具备20微米的行程，亚纳米级的分辨率，毫秒级的响应时间，并且利用闭环控制策略削减了滞后效应和非线性误差^[5]。精密减速器的减速比、刚度和传动精度属于核心性能指标。采用减速比为1:50的设计方案，就要全面考虑伺服电机的输出特性，关节负载的需求以及整体结构的紧凑性要求，控制系统的重要参数，比如伺服电机的PID调节系数，压电陶瓷驱动器的电压波形及其协同控制策略，这些参数都是经过精确调试和精心设计之后才确定下来的，以保证系统的稳定运行以及动态响应性能^[6]。

二、结果

本研究借助多尺度仿真技术，针对所设计智能机器人关节驱动机构的关键性能参数展开全面评估，在静态特性层面，通过有限元分析得知：在最大设计扭矩15Nm状况下，减速器齿轮接触应力峰值约为1800MPa，远低于材料屈服强度^[7]；柔性铰链应力同样保持在650MPa以下，均属安全范围，关节输出端静态扭转刚度符合预期指标，表明其在静态负载影响下具有良好的刚性稳定性，就动态响应特性而言，参照运动学仿真数据可知：采用纯电机驱动模式时，从初始状态加速到目标角度，比如 60° ，大约耗时0.8秒，如果选用混合驱动策略，也就是先用电机做粗定位，之后再靠压电陶瓷实施微调，那么总的响应周期就会缩减到0.7秒左右，尽管总体上改善效果不大，不过却明显加快了目标位置的收敛速度，而且也有效地减小了运行过程中的震动幅度^[8]。根据仿真的结果来看，所设计的关节能够实现的最大的稳定转速达到了120r/min，实现了预期的目标，在关节定位精

度测试方面，使用混合驱动模式的时候，关节的定位误差严格控制到了 $\pm 0.02^\circ$ 以内，这主要归功于压电陶瓷驱动器的高分辨率特性和柔性铰链的高效传动优势，和普通的采用传统纯电机驱动方式相比（普遍正负误差为 $\pm 1^\circ$ ），它更具有优势。能量消耗优化也是衡量驱动系统性能非常重要的一个标准，研究得出的结论是，当执行一样的运动轨迹的时候（比如包括加减速过程在内的完整的运动循环），混合驱动结构依靠压电陶瓷在精确定位的过程中取代了纯电机来进行微调操作，这样就在很大程度上降低了由于频繁地启动和停止电机而造成的能量损耗，最终在能耗方面相比于传统纯电机驱动形式节约了大约18%左右，这同样凸显了它具备显著的节能降耗的优势特征^[9]。在相同扭矩输出与精度水准要求时，相较于传统装置，该创新型驱动装置的结构体积缩减约25%、重量缩减同样约25%，这给机器人整台轻量化设计给予了重要助力，借助对混合驱动关节的仿真的分析可以发现，这个混合设计在各种相关性能指标上都能够满足，而且在动态反应速度、定位精准度以及能量使用效率等方面都存在明显的优化表现，从而进一步论证了此设计的科学合理以及可行^[10]。

为检验所设计的混合驱动关节机构的性能，在完成理论建模与仿真分析之后搭建物理样机测试平台进行测试，此平台包含驱动装置主体，高精度角度编码器（分辨率为0.001），可调惯性与阻尼特性的负载模拟模块，数据采集系统以及上位机控制系统，实验阶段主要考察其最大输出扭矩，最高运行速度，动态响应特性，定位精度以及能量利用效率等关键指标，测试结果如表1所示^[11]。

表1 性能指标结果及提升幅度表

性能指标	实验组	对照组	提升幅度
输出扭矩 (Nm)	15	10	50%
转速 (RPM)	120	90	33.3%
定位精度 (度)	0.02	0.05	60%
能量转换效率	85%	70%	21.4%

为了检验仿真是否准确，将实验数据和仿真结果从多个角度比较，第一，比较了输出扭矩，实验组在10RPM转速下输出扭矩达到了15Nm，和仿真值非常接近，这表明关节在静止和低速大扭矩情况下的承载能力是可靠的，第二，无负载时，实际的最高稳定转速大约是120RPM，比理想仿真值600RPM（根据3000RPM电机转速和50传动比）要小一些，这主要是由于实际摩擦损耗和电机温升造成的^[12]。

动态响应测试时, 关节从 0° 阶跃到 30° , 上升时间约为0.15秒, 最大超调量小于5%, 稳定时间约为0.35秒(波动小于 0.1°), 动态性能和稳定性都很好, 虽然略微超预期但符合高性能标准, 定位精度测试选择 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 这五个角度做重复定位, 用高精度编码器记录数据, 结果显示平均定位误差都小于 0.02° , 重复定位方差大多小于 0.005° , 之所以很精准是因为压电陶瓷有微调能力, 可以弥补伺服电机大范围运动之后的微小偏差。

能量效率实验中混合驱动关节与传统全电机驱动关节在相同的正弦摇摆工况下进行测试。混合驱动关节能量转换效率大概85%, 相比传统的关节的70%提升了约21.4%, 这是由于压电陶瓷在做精确位置驱动时能量消耗比较小且准确, 仿真和实验验证了此混合驱动关节机构在输出的扭矩、转速、动态响应、定位的精度以及能量效率等关键指标上都达到了设计的要求, 有较好的实用价值。

三、讨论

实验数据表明, 设计的混合驱动关节机构具有优良的技术性能, 最大输出扭矩能达到15Nm, 满足大部分工业场景和一些高端服务机器人的负载需求, 实际最高转速虽然比理论值低一点, 大概120RPM, 但是仍然能保证高精度定位, 而且可以通过调整峰值速度参数来达到稳定性和精度之间的最佳平衡。使得该关节结构有很强的动态响应能力和比较小的超调量, 很适合协作机器人、高速分拣系统这些需要较高运动性能的场合, 它的定位精度只有 0.02° , 比传统的电机驱动方式好很多, 在精密装配、微操作等任务上表现良好。

相较于传统的驱动模式, 混合驱动架构的能量利用效率大约提升了21.4%, 充分显示其显著的节能优点, 这个设计的关键之处在于压电陶瓷元件在精确控制下的低能耗特点以及改善后的能量传递机制, 伺服电机担当着主要的动力来源, 压电陶瓷则执行微调任务, 两者相互配合来保证系统的稳定状态, 用柔性铰链取代刚性链接结构之后, 就清除了机械磨损以及间隙误差的现象, 从而大幅度改进了定位精准度和其他整体性能水平, 考虑到压电陶瓷的行程范围有限, 大概在100微米左右, 所以它的应用范畴更多地集中在小角度校准领域当中,

想要达成准确无误的定位效果, 就需要依靠伺服电机同压电陶瓷的联合控制手段, 并且要对温度造成的影响提出相应的热管理或者温控补偿措施, 柔性铰链的长期可靠性还需要进一步去检验和评判。尽管还存在许多技术难点, 不过目前的设计方案已经大致表明可行性和优越性, 做到了高精度, 快响应, 高效率, 给高性能智能机器人关节的设计给予了强有力的支撑, 其实际应用效果还需进一步的实践检验和深入评估。

参考文献

- [1]高玉.双蜗杆电机驱动机器人智能关节控制系统设计[D].西华大学, 2024.
- [2]黄步雨.农业机器人智能关节直流伺服驱动系统的研究[D].浙江工业大学, 2008.
- [3]李明易.类人猿机器人双足全方位步行智能学习运动控制研究[D].哈尔滨工业大学, 2013.
- [4]卢浩, 郭士杰, 杨志强, 等.2R耦合驱动关节动力学建模与参数辨识[J].机械工程学报, 2022, 58(23): 51-64.
- [5]高艺.基于智能控制的多关节机器人轨迹跟踪控制算法设计与分析[D].曲阜师范大学, 2025.
- [6]于霜, 周薇, 周信.工业机器人智能运动控制方法的分析[J].电子技术, 2025, 54(04): 218-219.
- [7]董琪, 奚清泉, 印鹏, 等.前馈插值补偿下机器人抓取臂轨迹智能自动控制[J].信息技术, 2025, (03): 176-180.
- [8]陈华舒.面向应用场景协作任务的具身智能机器人关键技术研发[D].盐城工学院, 2025.
- [9]武文博, 张建良, 卫毓玲.变电站智能四足巡视机器人避障轨迹自动规划研究[J].中国新技术新产品, 2024, (22): 1-4.
- [10]刘德友, 陈仕富, 杜思成, 等.智能巡检操作机器人关节电机设计与优化[J].电力科学与工程, 2024, 40(07): 52-59.
- [11]张连浩.智能工厂复合机器人搬运关键技术研究[D].沈阳工业大学, 2024.
- [12]黄树杰.整合多臂协作型机器人的养老院居住空间设计初探[D].西安建筑科技大学, 2024.