

苏诺人形机器人v2方案技术可行性研究分析报告

目录

- 一、引言
- 二、液压驱动与仿生肌肉结构
- 三、双足行走模式与平衡控制
- 四、轮滑模式及其实现
- 五、电液混合驱动与系统效率
- 六、结论

引言

苏诺（SUNO）人形机器人v2方案是一种大胆创新的设计理念，旨在通过仿生结构和多模态运动，赋予机器人卓越的移动能力和操作灵活性。该方案提出，在双足模式下，机器人的手臂和腿脚采用**液压伸缩杆**作为驱动元件，模拟人体肌肉的收缩机制来控制运动；同时引入**电动机辅助动力**，以提升系统的响应速度和控制精度。更为独特的是，机器人的足部设计为可更换模块：既可采用双足直立行走模式，也可在脚底安装**动力轮滑鞋**，切换至轮滑模式进行高速移动。本报告将基于现有文献和技术资料，对苏诺v2方案的技术可行性进行深入分析，重点探讨其

仿生驱动结构、双足行走与轮滑移动的实现原理，以及该方案在控制、系统集成和能源管理等方面所面临的挑战与机遇。

液压驱动与仿生肌肉结构

液压驱动的优势与仿生原理：苏诺v2方案的核心在于采用液压伸缩杆作为机器人的“肌肉”，以模拟人类肌肉的收缩来驱动关节运动。液压驱动系统因其**高功率密度、快速响应和高抗冲击能力**，被认为是实现高性能动态关节驱动的理想选择。与传统的电动机驱动相比，液压系统能够提供更大的力矩输出，并具有出色的缓冲性能，可有效吸收运动过程中的冲击和振动，这对于关节保护至关重要。此外，液压系统不需要复杂的齿轮传动机构，这意味着在承受大负载冲击时，系统具备更高的**刚度和带宽**。这些特性使得液压驱动在需要高动态运动的机器人领域（如足式机器人）中占据重要地位。

苏诺方案中的液压伸缩杆设计灵感来源于对**人体肌肉**的模仿。传统上，人工肌肉技术主要包括**气动人工肌肉（PAM）**和**液压人工肌肉（HAM）**两大类。其中，气动人工肌肉（如经典的McKibben肌肉）通过充气膨胀产生收缩力，具有柔性、轻质和低成本等优点，但其输出力相对有限，且需要外部气源。液压人工肌肉则利用液体（如油液）作为工作介质，在保持柔性驱动优势的同时，大幅提升了**力输出能力和响应速度**。研究表明，当系统压力超过约3.5 MPa时，液压系统的功率密度将明显高于电动机驱动系统。因此，液压驱动非常适合需要**爆发力和耐冲击**的仿生机器人应用。

仿生肌肉设计与性能提升：苏诺方案提出，将液压伸缩杆按照人体肌肉的构型进行布置，以提高驱动效率和负载能力。这一设想与最新的研究趋势高度吻合。例如，Bai等人（2022）开发了一种仿生液压驱动器，其结构包含单一动力源和多个柱塞活塞，旨在模仿人类肌肉的配置。该驱动器通过**调整参与工作的活塞数量和尺寸**，来适应负载的变化，从而确保在**最大输出力与负载力相匹配**。这种“按需投入”的工作方式类似于人体在运动时根据需要调动不同肌纤维参与收缩，从而提高了系统的整体效率。实验证明，这种仿生驱动器能够通过**改变参与工作的运动单元组合**来调整系统的输入流量，实现与负载变化相匹配的输出力调整，展现出良好的可控性。更重要的是，**将仿生原理应用于机器人驱动器设计，能够显著提高系统的效率和整体性能**。这一发现对苏诺v2方案是一个有力支撑，表明其

液压肌肉驱动结构在理论上具有可行性，并且有望在提升机器人的负载能力和运动效率方面取得突破。

液压人工肌肉的技术实现：实际上，液压人工肌肉（HAM）已经在一些研究中得到验证。例如，有研究将传统的气动McKibben肌肉的工作介质改为液体，构建了液压人工肌肉。这类HAM保留了McKibben肌肉的编织结构和柔性特性，同时通过液体介质实现了更高的**输出力和刚度**。测试表明，液压人工肌肉在静态输出特性上与气动肌肉相似，但其刚度会随着肌肉的收缩而线性增加，这意味着在运动过程中，关节可以获得更大的阻尼和稳定性。此外，液压驱动由于可以使用不同粘度和密度的液体，因此能够**调节肌肉的刚度特性**，以适应不同应用需求。例如，对于外骨骼机器人，可以通过改变工作液体的粘度来调节辅助肌的硬度，提高佩戴舒适度。

在苏诺v2方案中，液压伸缩杆将作为关节的“拮抗肌对”（类似于人体的肱二头肌和肱三头肌）来布置，以实现关节的双向驱动。这种设计需要解决液压系统的**双向控制**问题。传统的单作用液压缸只能单向伸缩，而仿生肌肉通常需要成对使用才能实现关节的双向运动。为此，研究提出了多种方案，例如在**液压肌肉中引入静电离合器等机制**，使不可伸长的肌肉（如McKibben类型）在收缩和伸长两种状态之间切换，从而在拮抗配置中实现完整的关节运动范围。苏诺方案若采用类似技术，其每条腿上的液压伸缩杆将通过精密的阀门控制，实现对关节的**双向驱动**。这在技术上是可行的，但增加了系统的复杂性和控制难度。

双足行走模式与平衡控制

双足行走的动力学与挑战：在双足直立模式下，苏诺机器人的运动学模型可简化为“**双足倒立摆**”模型。该模型将机器人视为一个倒立的单摆，其质心在重力作用下具有摆动的趋势，需要通过不断调整步态来保持动态平衡。双足行走的**动态平衡**主要取决于**零力矩点（ZMP）**是否始终落在支撑多边形内。ZMP定义在地面上的一点，该点处所有地面反力的力矩之和为零。当机器人的ZMP位于其足端与地面接触形成的支撑区域内时，机器人能够保持稳定不倒。若ZMP超出支撑区域，机器人将失去平衡而倾倒。因此，双足行走的控制目标就是**将ZMP控制在支撑多边形内**。

然而，双足行走对控制系统提出了极高要求。相比四足行走，双足行走的支撑基底更小，固有稳定性更差，需要更精细的控制策略。此外，在每步着地瞬间，机器人都会经历一次地面冲击，这种冲击可能导致关节承受巨大瞬时载荷，并产生明显的振动。因此，如何降低着地冲击并实现平滑的步态，是双足机器人设计的核心挑战之一。

平衡控制策略：为实现稳定的双足行走，苏诺机器人的控制系统需要综合运用多种先进的控制算法。常见且有效的控制策略包括：

- **模型预测控制 (MPC)：**通过建立机器人的动力学模型，预测未来一段时间内的运动状态，并优化控制输入（如关节力矩或地面反力），使ZMP跟踪期望轨迹。MPC能够有效处理复杂动力学和外部扰动，但需要准确的模型和较高的计算资源。
- **零力矩点 (ZMP) 预览控制：**这是一种经典方法，通过预先规划未来几步的ZMP轨迹，并将实际ZMP锁定在该轨迹上，从而保证稳定性。例如，Kajita等人提出的ZMP预览控制算法，将机器人简化为“小车-桌子”模型，通过预览控制生成平滑的质心 (COM) 轨迹，确保ZMP始终稳定。该方法直观且有效，但需要对模型参数进行精确辨识。
- **混合零动力学 (HZD) 控制：**HZD控制将机器人动力学划分为“内动态”和“外动态”两部分，通过部分反馈线性化，实现对内动态的周期性运动控制，同时通过外动态保证ZMP稳定。这种方法在保证稳定性的同时，提高了对模型误差和外部扰动的鲁棒性。
- **步态规划与调整：**除了上述算法外，双足机器人通常采用基于步态的规划方法，例如通过调整步长、步频和脚着陆点来主动改变ZMP位置。当检测到不平衡时，可以缩短步长或调整迈步方向，将ZMP拉回安全区域。

苏诺机器人在双足模式下，需要综合运用上述控制策略来实现稳定行走。特别是由于机器人由液压驱动改造而来，其质心高度、转动惯量等参数可能与原生双足机器人有所不同，因此需要针对其动力学特性对控制算法进行专门优化。此外，传感器系统（如高精度IMU、地面接触力传感器等）的精度和实时性对于保证双足稳定也至关重要。

液压驱动下的平衡控制挑战：液压驱动虽然提供了强大的输出力，但其非线性、时变性也给控制带来了挑战。液压系统的响应受到阀门开启特性、流体惯性和摩擦等多种因素影响，这使得精确控制液压缸的输出力矩变得复杂。为解决这一问

题，苏诺方案引入了**电动机辅助动力**，即在每个液压驱动关节处并联一个电动机驱动器。这种电液混合驱动方案旨在结合**电动机的精确控制能力**和**液压驱动的高爆发力**，通过两者的协同工作来提升系统的整体性能。例如，在需要快速响应和精确调整时，电动机可以提供主要的控制输入；而在需要大爆发力或承受冲击时，液压系统介入，提供额外的力矩输出。这类似于人类在运动时，小肌肉群负责精细动作，大肌肉群负责发力。通过合理的控制策略，电液混合驱动有望实现**高动态且高精度**的关节运动。

然而，实现电液混合驱动系统的协同控制并非易事。它要求控制算法能够同时考虑**液压执行器和电动机**的动态特性，并设计合理的控制策略（例如，何时由电机主导，何时由液压介入）。此外，混合驱动系统在**传感器融合**方面也提出了更高要求，需要同时获取液压和电机子系统的状态信息，并进行统一的状态估计和控制决策。尽管存在这些挑战，电液混合驱动在学术和工业界已被视为提高机器人性能的重要方向之一。例如，有研究提出采用**电液静压驱动（EHA）**技术，通过将液压泵、阀门等集成在关节附近，以提高系统的响应速度和能量效率。苏诺方案的思路与之类似，都是通过驱动系统的创新，来突破单一驱动方式的局限。

轮滑模式及其实现

轮滑模式的优势：苏诺v2方案最具创新性的特点之一，是其足部可在双足和轮滑两种模式间切换。在需要高速、高效率移动的平坦地面上，机器人可在脚底安装**动力轮滑鞋**，切换至轮滑模式进行滑行。轮滑移动作为一种**低冲击的运动模式**，具有独特的优势。研究指出，轮滑运动产生的关节冲击力仅约为跑步时的50%，其平滑的滑行显著减少了膝关节、髌关节和踝关节的载荷。这意味着轮滑模式能够**大幅降低关节磨损**，并**提高能源利用效率**。对于双足机器人而言，在平坦道路上采用轮滑模式，不仅可以获得接近轮式移动的高效率，还能保持双足机器人在复杂环境下的越障能力，实现真正的**全地形移动**。

实际上，**足式机器人与轮式移动的结合**是当前机器人领域的一个重要研究方向。这种结合旨在**兼顾高地形适应性和高移动效率**，以满足不同场景下的需求。例如，一些轮腿混合机器人通过在腿部安装可伸缩的轮子，实现了在不平坦地形上行走、在平坦地面上滑行的模式切换。苏诺方案的独特之处在于，其轮滑模式并非采用主动驱动轮，而是通过在**足底安装动力轮滑鞋**来实现。这意味着轮滑鞋本

身可能包含动力（如小功率电机）来驱动滚轮，但机器人本体的液压肌肉主要提供平衡和姿态控制。这种设计类似于人类穿着旱冰鞋移动：双脚提供稳定的支撑平台，而滚轮提供前进的动力。

轮滑行走的实现原理：轮滑模式的实现依赖于**仿生轮滑步态**的设计与控制。与传统轮式机器人不同，轮滑行走的轮子并非始终与地面保持接触，而是类似于行走时的步态，存在**支撑相和摆动相**。在支撑相，一只脚的轮子着地并承担大部分体重，同时通过蹬伸动作产生推进力；在摆动相，另一只脚的轮子离地并向前摆动。这种**交替支撑**的轮滑步态类似于跑步机的“跑滑”动作，因此被称为“swizzle”步态。

苏诺机器人在轮滑模式下，其控制系统需要解决以下关键问题：

- **非完整约束与运动学：**轮滑运动涉及复杂的非完整约束，即轮子只能沿特定方向滚动，不能侧向滑动。这引入了额外的运动学复杂性，要求控制系统能够处理非完整约束下的运动规划和控制。
- **支撑脚滑动与稳定平衡：**轮滑模式下，支撑脚与地面之间存在**持续的滑动**，这违反了传统双足行走控制中支撑脚与地面保持静态接触的基本假设。持续的滑动会**严重影响系统稳定性**，使得平衡控制变得极其困难。控制系统必须在**不稳定的支撑条件下**，通过不断调整身体姿态和滑行策略来保持平衡。
- **全身协调与动力分配：**轮滑运动要求**精确协调质心动力学、腿部摆动和滚轮滑动**三者之间的关系。这意味着控制器需要综合考虑身体的前倾、后倾和侧倾，以及每条腿的蹬伸时机和力度，来实现平滑且稳定的滑行。

尽管存在上述挑战，轮滑模式在技术上是可行的，并且已经通过实验得到了验证。**SKATER**项目是这方面的先驱性研究之一。SKATER是一个新开发的人形机器人平台，每只脚的足底安装了一排四个**被动式直排轮**，能够进行轮滑运动。该研究团队开发了一种**深度强化学习（DRL）控制框架**，专门用于训练机器人的“swizzle”步态。在仿真环境中，机器人通过学习掌握了利用全身惯性进行高效滑行的策略，并成功将控制策略部署到实物机器人上。实验结果表明，与传统的**双足行走步态**相比，轮滑步态在**冲击强度**和**移动能耗**两个关键指标上均有显著降低：冲击强度降低了约75.86%，能耗（以CoT衡量）降低了约63.34%。这证明了轮滑模式作为提高能源效率和延长关节寿命的一种运动方式的巨大潜力。

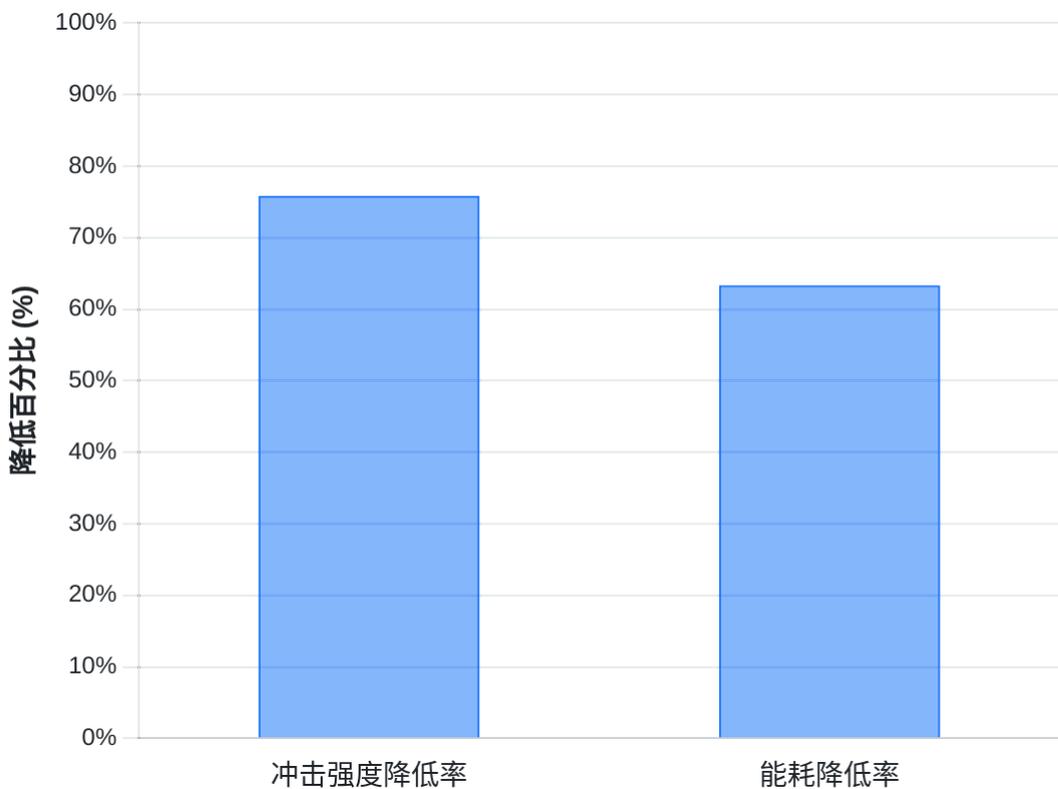


图1: 轮滑步态相对于传统双足步态的性能提升对比 数据来源:

需要指出的是，SKATER机器人采用的是**被动轮**，其推进力完全依赖于腿部蹬伸动作对轮子产生的切向力。而苏诺方案提出的是**动力轮滑鞋**，这意味着轮子本身具备驱动力矩。这类似于将轮子视为小的“主动关节”，在需要加速或克服阻力时提供额外的推力。这种设计可以进一步简化控制策略，因为机器人不再完全依赖蹬伸来获得推进力，而可以通过控制轮子的转速来调整前进速度。然而，这也引入了新的控制问题：如何**协调轮子驱动和腿部蹬伸**，以确保运动的一致性和稳定性。例如，在起步加速阶段，可能需要轮子提供较大扭矩；在匀速滑行阶段，则主要依赖惯性滑行；在减速或转向时，则需要精确控制轮子的制动力矩和方向。这些都对控制算法提出了更高要求。

总体而言，苏诺v2方案的轮滑模式在技术上是可行的，并且有望赋予机器人在平坦地面上**接近轮式机器人的高效移动能力**，同时保持双足机器人在复杂环境下的灵活性和稳定性。通过借鉴SKATER等研究的成果，并结合动力轮滑鞋的设计，苏诺机器人有望实现真正的“**双足-轮滑**”**双模态移动**，在不同场景下切换最优的运动方式。

电液混合驱动与系统效率

电液混合驱动的必要性： 苏诺v2方案的核心技术之一是**电液混合驱动**。在关节处同时采用电动机和液压驱动，旨在结合两者的优势，以克服单一驱动方式的局限。纯电动机驱动的优点在于控制精确、响应迅速、技术成熟，但其**输出力矩和抗冲击能力相对有限**，在承受大负载或冲击时性能不足。纯液压驱动的优势在于高功率密度和高抗冲击性，但其**能源效率较低**，系统庞大且复杂，需要泵站、阀门等辅助设备。电液混合驱动的目标是在保证足够输出力和抗冲击性的同时，提高系统的整体效率和可控性。

效率优化与压力管理： 在电液混合驱动系统中，**能源效率**是至关重要的考量因素。液压系统的一个固有问题是：为了保持高响应特性，系统需要持续维持高压，即使执行器输出力很小时，泵站仍需以最高压力供油，这会导致巨大的节流损失和能量浪费，从而降低系统效率并产生大量热量。为解决这一问题，研究者提出了多种优化策略，其中**压力优化**是关键方向之一。

一项针对**液压-电动混合双足机器人**的研究表明，通过优化液压动力单元中的蓄能器压力，可以显著提高系统效率。该研究以浙江实验室的双足机器人为原型，建立了液压驱动系统和机械结构的模型，分析了行走过程中的动力学特性和负载力。他们提出一个反映液压系统能耗的代价函数，并将**蓄能器压力**作为控制参数，通过遗传算法优化该参数，以使代价函数最小化，从而降低液压驱动系统的能耗。仿真结果显示，采用该优化算法后，系统效率提高了约3.49%。尽管提升幅度看似不大，但对于功率消耗巨大的液压系统而言，3.5%的效率提升意味着**显著的能源节省和热耗降低**，具有重要的工程价值。

除了蓄能器压力优化外，电液混合系统还可以通过**智能分配驱动任务**来提升整体效率。例如，在负载较轻的运动阶段，主要由电动机承担驱动任务，液压系统处于低功率待机状态；而在需要大爆发力的阶段，再激活液压系统提供辅助推力。这种**按需激活**的策略类似于仿生肌肉按需投入工作的原理，可以避免液压系统长时间满负荷运行，从而减少无效的功率损耗。此外，采用**电液静压驱动（EHA）**技术也是提高效率的有效途径。EHA通过将液压泵和阀门等集成在关节附近，减少了长管路传输带来的压力损失和延迟，并可以利用电机的精确控制来调节液压输出，从而实现更高的能量效率。

控制架构与系统集成：电液混合驱动系统的复杂性对控制架构提出了挑战。一个可行的解决方案是采用**分布式控制架构**，为每个关节设计专用的控制单元，实现对电机和液压执行器的协同控制。例如，有研究提出了一种实时分布式控制架构，用于电液混合驱动的人形机器人，每个关节控制器都具备一定的智能，能够根据上层指令和传感器反馈，自主决定电机和液压输出的配比。这种架构类似于人体的**分层控制**：大脑（中央控制器）发出运动指令，脊髓（关节控制器）具体协调肌肉的收缩。通过将控制下放到关节层级，可以减少中央控制器的负担，并提高系统的实时性和鲁棒性。

在软件层面，控制算法需要能够**同时处理电机和液压执行器的动态**。这可能涉及建立包含电机和液压模型的综合动力学模型，并采用模型预测控制等方法，对两者进行联合优化。此外，由于液压系统存在非线性、时变性和参数不确定性，控制算法需要具备良好的**自适应和鲁棒性**，以应对不同工况和负载变化。这可能引入**自适应控制、鲁棒控制或学习型控制**等先进技术，以提高控制性能。

能源管理与系统可靠性：电液混合驱动系统的能源管理也是设计中的关键环节。液压系统通常配备蓄能器（如蓄油箱或高压蓄能器）来储存能量，并在需要时释放能量以驱动执行器。合理的**能源管理策略**可以确保在保证性能的同时，最大化能源利用效率。例如，通过预测运动需求，提前调整蓄能器压力或控制泵的启停，来避免不必要的能源浪费。此外，由于液压系统涉及高压液体和运动部件，其**可靠性和安全性**需要特别关注。设计上应采用**冗余和容错**机制，如双泵备份、关键传感器冗余等，以避免单点故障导致系统瘫痪。同时，液压系统的密封性、冷却和防泄漏设计也至关重要，以确保长时间运行的可靠性。

尽管电液混合驱动系统在设计上更为复杂，但其**潜在优势**使其成为未来高性能机器人驱动技术的发展方向之一。通过电机和液压的有机结合，苏诺机器人有望兼具**高精度运动控制**和**强大动力输出**，在需要精细操作的任务（如抓握物体、工具操作）和需要大功率输出的任务（如奔跑、跳跃）之间取得平衡。这种能力将使机器人在更广泛的场景下发挥作用，从工业制造到灾难救援，都能提供卓越的性能。

结论

苏诺人形机器人v2方案通过**液压仿生肌肉驱动**、**双足/轮滑双模态移动**和**电液混合辅助动力**等创新设计，展现了对未来机器人技术的极具前瞻性的构想。该方案在技术上是可行的，其核心概念与当前机器人学前沿研究高度契合。例如，液压驱动在高动态关节中的应用、仿生肌肉结构对效率的提升、轮滑移动在降低冲击和提高效率方面的优势，以及电液混合驱动在提高整体性能方面的潜力，都已在学术研究和原型系统中得到验证。

然而，要实现苏诺v2方案所描绘的愿景，仍需克服诸多技术与工程挑战。在结构设计方面，如何将液压伸缩杆按照人体肌肉的拓扑进行布局，并保证其可靠性和寿命，是机械设计的难题之一。在控制方面，双足行走与轮滑模式的切换、复杂步态的生成与稳定、电液混合驱动的协调控制，都需要开发全新的控制算法和实时系统架构。在系统集成方面，能源管理、热管理、传感器融合和故障容错等也是需要重点考虑的问题。

尽管如此，苏诺v2方案为机器人技术的发展指明了一个令人兴奋的方向。它代表了“**足式机器人+轮式机器人**”的融合，以及“**仿生肌肉+传统驱动**”的结合，是追求**全地形适应**、**高移动效率**、**大负载能力**和**高操作灵活性**的终极目标的重要探索。随着相关技术的不断进步，例如先进材料的应用、控制算法的突破和能源系统的小型化，我们有理由相信，苏诺方案所构想的机器人将逐步从概念走向现实。它有望成为新一代**全能型机器人平台**，在人类生产生活的各个领域发挥不可估量的作用，为机器人技术的发展树立新的里程碑。