

外骨骼伺服驱动器效率提升策略与方法研究

张南

(北京海至自动化有限公司, 北京 100095)

摘要:外骨骼机器人作为辅助人体运动的重要装备, 在医疗康复、工业生产和军事后勤等领域具有广阔应用前景。然而, 以电机驱动为动力源的外骨骼系统受限于电池容量, 续航能力不足成为制约其实用化的关键瓶颈。伺服驱动器作为能量转换与运动控制的核心环节, 其效率直接决定系统整体能效。本文系统梳理了外骨骼伺服驱动器能量损耗的物理机理, 指出开关损耗、铜损铁损、机械传动损耗及制动能耗是主要损耗来源。在此基础上, 从调制策略优化、电机本体设计、传动系统匹配和能量回收管理四个维度, 构建了效率提升的技术体系。重点分析了不连续脉宽调制 (DPWM) 在重载条件下降低开关损耗的有效性, 探讨了串联弹性致动器 (SEA)、并联弹性致动器 (PEA)、离合弹性致动器 (CEA) 及准直驱 (QDD) 技术在能量循环利用与低阻抗传动方面的优势与局限, 并提出了基于数字孪生的自适应能效管理架构。研究表明, 多策略协同优化可使驱动器效率提升10%–15%, 系统续航延长20%以上。本文为高能效外骨骼伺服驱动系统的设计提供了理论依据与技术参考。

关键词:外骨骼; 伺服驱动器; 效率提升; 不连续脉宽调制; 弹性致动; 能量回收; 准直驱

Research on Strategies and Methods for Improving the Efficiency of Exoskeleton Servo Drives

ZHANG Nan

(Beijing Haizhi Automation Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: Exoskeleton robots, as key assistive devices for human motion, hold broad application prospects in fields such as medical rehabilitation, industrial production, and military logistics. However, exoskeleton systems powered by electric motors are limited by battery capacity, making insufficient endurance a critical bottleneck hindering their practical implementation. As the core component responsible for energy conversion and motion control, the efficiency of servo drives directly determines the overall system energy efficiency. This paper systematically reviews the physical mechanisms behind energy losses in exoskeleton servo drives, identifying switching losses, copper and iron losses, mechanical transmission losses, and braking energy consumption as the primary sources of inefficiency. Based on this analysis, a comprehensive technical framework for improving efficiency is established from four dimensions: modulation strategy optimization, motor design, transmission system matching, and energy recovery management. The study particularly examines the effectiveness of discontinuous pulse width modulation (DPWM) in reducing switching losses under heavy-load conditions, evaluates the advantages and limitations of serial elastic actuators (SEA), parallel elastic actuators (PEA), clutch elastic actuators (CEA), and quasi-direct drive (QDD) technologies in terms of energy recycling and low-impedance transmission, and proposes an adaptive energy-efficiency management architecture based on digital twin technology. Results show that coordinated multi-strategy optimization can improve drive efficiency by 10% – 15% and extend system endurance by over 20%. This work provides theoretical foundations and technical references for designing high-efficiency exoskeleton servo drive systems.

Key words: Exoskeleton; servo driver; efficiency enhancement; discontinuous pulse width modulation; compliant actuation; energy recovery; quasi-direct drive

1 引言

1.1 研究背景

外骨骼机器人是一种穿戴于人体外部、能够增强或辅助肢体运动功能的机电一体化系统。自20世纪60年代美国通用电气公司研制出首台动力外骨骼Hardiman以来, 经过半个多世纪的发展, 外骨骼技术已从科幻构想走向工程实践。当前, 外骨骼在医疗康复领域帮助脊髓损伤患者重新站立行走, 在工业领域减轻工人搬运劳动强度, 在军事领域增强单兵负重能力, 展现出巨大的社会价值与经济潜

力。

电机驱动是外骨骼主流的动力方案, 具有控制精度高、响应速度快、清洁无污染等优点。伺服驱动器作为外骨骼系统的核心电子部件, 其功能类似于人体的关节组织——既要负责精确执行位置、速度或电流指令, 又要承担一定的感知能力, 实现对外界力的反馈和柔性控制。伺服驱动器的性能直接影响外骨骼的运动精度、动力输出和整体能效。然而, 能量供应始终是制约电机驱动外骨骼发展的核心瓶颈。典型下肢外骨骼的功耗在100 – 500瓦

量级,而当前高能量密度锂电池的比能约为200-300 Wh/kg,这意味着仅1公斤电池即可支撑系统工作0.5-2小时。对于需要全天候使用的康复患者或执行长时间任务的军事人员而言,这一续航能力远不能满足需求。单纯增大电池容量又会带来重量增加、用户负担加重的新问题。因此,在电池技术取得革命性突破之前,提升伺服驱动系统的能量转换效率成为延长外骨骼续航时间的最现实路径。[1,2]

1.2 国内外研究现状

外骨骼伺服驱动系统的效率问题近年来受到学术界与工业界的广泛关注。研究主要沿着以下几个方向展开。

在调制策略层面,马宇等对永磁同步电机的脉宽调制策略进行了系统对比,提出基于不连续脉宽调制(DPWM)的效率优化控制策略,通过在特定扇区内保持开关管不动作来降低开关损耗,实验表明重载条件下驱动器效率显著提升。这一方法在不增加硬件成本的前提下挖掘了逆变器的节能潜力。

在电机本体层面,高转矩密度电机成为外骨骼应用的研究热点。基于不同拓扑结构的永磁同步电机研究聚焦于转矩密度提升、转矩脉动抑制、效率改善和热管理等方面,以优化电机性能。永磁同步电机(PMSM)和直流无刷电机(BLDC)是目前主流选择,而轴向磁通电机、游标电机等新兴拓扑有望突破传统径向磁通电机的转矩密度极限。

在传动构型层面,Laschowski和McPhee系统回顾了串联弹性致动(SEA)与高反驱性(backdrivability)两种能效设计原则,指出人体步态中存在负功时段,可利用弹性元件储能并回收,从而降低电机峰值功率和能耗;同时,高转矩密度电机配合低减速比传动的准直驱(QDD)方案可在保持反驱性的同时支持能量再生。与此相关的弹性致动技术还包括并联弹性致动器(PEA)和离合弹性致动器(CEA),前者通过在驱动元件旁并联弹性元件实现能量存储与释放,后者通过离合装置控制弹性元件开合,在特定时段内储存或释放能量,从而大幅提升能量效率。[3]

在系统层面,数字孪生技术与智能控制算法的融合被探索用于外骨骼的能效优化。通过实时监控和自适应调整控制参数,系统能量效率可得到显著提升。同时,外骨骼伺服驱动器的选型还需综合考虑可靠性、功耗、发热、体积和成本等多重约束。

2 伺服驱动器能量损耗机理分析

2.1 驱动器系统结构与损耗分布

典型外骨骼伺服驱动系统由电池、逆变器、永磁同步电机、减速器及控制器构成。能量从电池流向逆变器,经功率开关器件调制后驱动电机旋转,再通过减速器放大转矩后输出至关节。在这一能量传递链上,每一环节均存在不同程度的损耗。

逆变器环节的损耗主要包括开关损耗和导通损耗。开关损耗产生于功率器件(IGBT或MOSFET)在导通与关断瞬态过程中电压电流交叠,其大小与开关频率、母线电

压、导通电流及器件本身的开通关断时间相关。导通损耗则源于器件导通时的饱和压降与电流乘积,在重载条件下尤为显著。

电机环节的损耗涵盖铜损(定子绕组电阻发热)、铁损(铁芯中的磁滞与涡流损耗)、机械损耗(轴承摩擦与风阻)以及杂散损耗。其中铜损与电流平方成正比,铁损与频率和磁通密度的平方成正比,两者构成电机损耗的主要部分。

传动环节的损耗来自齿轮啮合摩擦、轴承摩擦及润滑黏滞。外骨骼传统上采用高减速比电机-传动系统,但此类设计对人体的被动动力学特性利用不足,导致效率低下,需要较大容量的电池供电。谐波减速器效率可达80%-85%,但高速重载条件下效率会进一步下降。

此外,在制动或减速过程中,传统方案将动能以热的形式耗散在制动电阻上,这构成一种隐性的能量浪费。若能将此部分能量回收,将显著提升系统能效。研究表明,步行过程中存在负关节机械功时段,利用这些时段进行能量回收可以提升效率。[4]

2.2 损耗的数学表征

逆变器开关损耗可近似表示为:

$$P_{sw}=12V_{dc}I_L(\tau_{on}+\tau_{off})f_{sw}$$

其中, V_{dc} 为母线电压, I_L 为负载电流, τ_{on} 和 τ_{off} 为开关管的开通与关断时间, f_{sw} 为开关频率。由式可见,开关损耗与开关频率直接成正比,降低开关频率可线性减少损耗,但会带来电流纹波增大和THD恶化的问题。

电机铜损与铁损分别表示为:

$$P_{cu}=3I_s^2R_s \quad (1)$$

$$P_{fe}=k_hfB^\alpha+k_e f^2B^2 \quad (2)$$

式中, I_s 为定子相电流, R_s 为相电阻, k_h 、 k_e 分别为磁滞和涡流损耗系数, f 为磁场交变频率, B 为磁通密度, α 为斯坦梅茨常数(通常1.5-2.5)。

传动系统效率可建模为:

$$\eta_{gear}=\frac{T_{out}\omega_{out}}{T_{in}\omega_{in}}=\frac{T_{out}}{T_{in}}\approx 1-P_{loss,gea} \quad (3)$$

其中 i 为减速比, $P_{loss,gea}$ 为齿轮啮合与轴承摩擦损耗功率。

系统总效率为各环节效率的乘积:

$$\eta_{sys}=\eta_{inv}\eta_{motor}\eta_{gear} \quad (4)$$

考虑到外骨骼工作在频繁启停、变负载的瞬态工况,稳态效率指标难以全面反映实际能效。因此,需引入任务周期内的能量效率评价指标:

$$\eta_{task}=\frac{\int P_{out}dt}{\int P_{ind}dt}=\frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (5)$$

2.3 外骨骼典型工况对效率的影响

外骨骼的工作工况具有鲜明的周期性、冲击性与不对称性特征。以步态周期为例,单侧下肢在一个步态周期(约1-1.5秒)内经历支撑相(约60%)和摆动相(约40%)。支撑相需要提供较大的关节力矩(髋、膝关节峰值力矩可达1-2 Nm/kg),而摆动相所需力矩较小。这种力矩需求的不均衡导致电机工作在频繁的加/减速状态,逆变器开关频率恒定带来的损耗与输出功率之间形成"错配

"——轻载时开关损耗占比相对增大，效率显著下降。

此外，人体运动中的负功阶段（如足跟着地时的能量吸收、摆动后期制动）占总能量的15% - 25%。这些能量若被制动电阻白白耗散，将进一步降低系统效率。因此，外骨骼伺服驱动器的效率优化不能照搬工业伺服系统的恒定负载设计方法，必须针对其变负载、周期性、含负功的特点进行定制化策略设计。[5-7]

3 基于调制策略的效率优化

3.1 传统SPWM与SVPWM的开关损耗分析

正弦脉宽调制（SPWM）和空间矢量脉宽调制（SVPWM）是工业伺服系统中最成熟的两类调制策略。SPWM通过调制波与载波比较生成开关信号，实现简单，但直流电压利用率较低（仅0.866）。SVPWM通过合成目标电压矢量，将直流母线利用率提升至1.0，且具有更优的谐波特性，因此在交流电机驱动中获得广泛应用。

然而，SVPWM在每个开关周期内，三相桥臂均发生一次开关动作，开关次数固定为6次/周期（每相2次）。这意味着即使在轻载或电机静止限位工况下，开关损耗依然维持较高水平。对于外骨骼这类负载率变化剧烈的应用场景，SVPWM的"固定开关动作"特性导致轻载效率欠佳。[8]

3.2 不连续脉宽调制（DPWM）原理与实现

不连续脉宽调制（DPWM）的核心思想是在调制波幅值接近直流母线电压极值的特定区间内，将某一相钳位至正母线或负母线，使该相开关管在该区间内保持常通或常断状态，从而减少开关次数，降低开关损耗。

DPWM的实现可采用零序分量注入法。在传统SVPWM中，零序分量 V_z 被添加至三相调制波 V_a^*, V_b^*, V_c^* ，使得最终的调制波为：

$$V_a^{**}=V_a^*+V_z, V_b^{**}=V_b^*+V_z, V_c^{**}=V_c^*+V_z$$

通过调整零序分量的波形，可以在不同调制模式间切换。对于DPWM， V_z 的设计使得某一相调制波在特定的60°或120°区间内达到饱和（即等于 $V_{dc}/2$ 或 $-V_{dc}/2$ ），该相开关管在此期间保持恒定状态。常用的DPWM变体包括DPWM0（每相每周期间钳位60°）、DPWM1（钳位120°）和DPWM2（不对称钳位）等，其选择取决于功率因数和负载条件。采用零序分量注入方法可实现调制策略的归一化生成，便于在不同DPWM变体之间平滑切换。[9,10]

开关次数的减少量取决于钳位角度。以DPWM0为例，每相每基波周期有120°区间处于钳位状态，开关次数相比SVPWM减少约33%。开关损耗相应降低，但代价是电流纹波和电压THD略有增加，需根据应用需求权衡选择。

3.3 DPWM在外骨骼驱动中的应用效果

马宇等的实验研究表明，在外骨骼伺服驱动器中采用DPWM策略，重载条件下（输出转矩>额定值50%）逆变器效率可显著提升。这是因为重载时导通损耗本身已占较大比重，开关损耗的降低对总损耗的边际贡献更为显著。轻载条件下，开关损耗占比高但绝对值小，DPWM的效果相

对有限，且可能因THD增大导致电机铁损略有上升，需结合工况进行调制策略的在线切换。

因此，理想的调制策略应具有负载自适应性：轻载时采用SVPWM以保证电流波形质量，重载时切换至DPWM以降低开关损耗，形成混合调制模式。这一思路已在部分高端伺服驱动器中获得初步应用。[11,12]

4 基于电机本体设计的效率优化

4.1 高转矩密度电机选型

外骨骼对驱动电机的要求可概括为"三高一低"：高转矩密度、高效率、高响应带宽、低质量。传统工业伺服电机按此标准普遍"超重"，直接应用于外骨骼会造成用户负担过大。

针对高转矩密度关节的需求，永磁同步电机因其结构紧凑、输出强劲而得到迅速发展。基于不同拓扑结构，研究者从转矩密度提升、转矩脉动抑制、效率改善和热管理等方面持续优化电机性能。低减速比传动方案要求电机本身具备较高的转矩密度，这也推动了高转矩密度电机技术的进步。[13,14]

对现有电机拓扑的对比分析表明，主流方案及其性能边界如表1所示：

表1 电机拓扑

电机类型	转矩密度 (Nm/kg)	典型效率	适用场景
直流有刷电机	1 - 3	75% - 80%	低成本、低要求场景
BLDC（带减速器）	5 - 15	80% - 88%	当前主流方案
PMSM（带减速器）	8 - 20	85% - 92%	高性能要求场景
轴向磁通电机	15 - 30	90% - 95%	扁平空间、高转矩需求
游标电机（Vernier）	25 - 45	92% - 96%	直接驱动、大转矩场景
磁齿轮电机	30 - 50	88% - 93%	极高转矩密度需求

综合来看，采用永磁同步电机（PMSM）配合适减速比传动是当前外骨骼驱动的主流选择，其效率可达到90% - 95%以上。面向未来，轴向磁通和游标电机等新型拓扑有望在保持高效率的同时进一步提升转矩密度，缩小电机包络尺寸。

4.2 铜损与铁损的平衡设计

电机设计中的一组核心矛盾是铜损与铁损的权衡。增大绕组线径可降低电阻、减少铜损，但会占用更多槽面积，可能导致齿部磁通密度上升、铁损增加。提高永磁体牌号可增大气隙磁密、提升转矩密度，但同时加剧铁芯饱和、增加铁损和附加损耗。

对于外骨骼应用，运行速度相对较低（通常数百至一千余rpm），基频不高（几十至数百赫兹），铁损占比相对小于铜损。因此，设计上可适当偏向降低铜损——选用大线径绕组、优化槽满率、采用低电阻率导体材料。同时，采用薄硅钢片（0.2 - 0.3 mm）和低损耗磁性材料可有

效抑制铁损。[15]

优化目标可表述为在给定转矩、转速和体积约束下，最小化总损耗：[16]

$$\min P_{\text{loss}} = P_{\text{cu}}(I_s, R_s) + P_{\text{fe}}(f, B) + P_{\text{mechmin}} \quad (6)$$

4.3 新型电机拓扑的应用潜力

轴向磁通永磁电机（AFPM）因其扁平结构和高转矩密度，在关节集成方面具有天然优势。与径向磁通电机相比，AFPM的磁路长度更短、磁通路径更直接，可有效降低铁损，且散热条件更优。然而，其制造工艺复杂、气隙调整困难，目前成本仍较高。

游标电机（Vernier machine）利用磁场调制原理实现低速大转矩输出，其转矩密度可比传统PMSM提高30% - 50%，且可在较低转速下直接驱动负载，省去减速器环节，从而避免传动损耗。但游标电机的功率因数较低、转矩脉动较大，控制策略需相应复杂化，这些技术挑战有待进一步突破。[17]

5 基于传动构型的效率优化

5.1 串联弹性致动器（SEA）的能量循环机制

串联弹性致动器（Series Elastic Actuator, SEA）通过在电机与负载之间串联弹性元件（弹簧），利用弹簧的形变来传递力和力矩。SEA最初是为了提高力控制的精度和柔顺性而提出，但其能量特性同样值得关注。

人体运动中，关节在部分时段做负功（即外界对关节做功），如步行中脚跟着地时的能量吸收、摆动末期膝关节的制动。在传统刚性传动系统中，这部分负功以热的形式耗散；而在SEA中，负功使弹簧压缩储能，并在随后的正功阶段释放弹性势能助力电机驱动，实现了能量的“暂存—释放”循环。[18]

这一机制带来的效率收益体现在两个层面：一方面，弹簧储能可降低电机的峰值功率需求，使电机更多工作在高效区间；另一方面，能量回收减少了制动电阻的热耗散，延长了电池单次充电的工作时间。Laschowski等的逆动力学仿真表明，步行中负功时段约占步态周期的15% - 25%，若能回收其中部分能量，系统能耗可显著降低。

然而，SEA也存在明显局限：弹簧的引入降低了系统带宽（力控响应频率通常受限在10 - 30 Hz），对需要快速响应的高动态任务（如跑动、跳跃）力不从心；同时，弹簧本身增加质量和体积，结构复杂性提升，输出转矩能力也可能降低。

5.2 并联弹性致动器（PEA）与变刚度方案

并联弹性致动器（Parallel Elastic Actuator, PEA）将弹簧与电机并联布置，弹簧承受关节的部分静力矩，电机只需提供动态力矩和力矩波动的补偿部分。在外骨骼髋、膝关节中，人体重力矩占主导且呈周期性变化，PEA可有效“卸掉”这部分静载荷，使电机主要工作在轻载工况，效率显著提升。

研究显示，在机械臂中加入设计合理的并联弹簧元件，可将电机峰值转矩降低约50%，能耗降低25%。在双

足机器人腿部应用PEA可有效减少能量损耗，在上肢外骨骼中的应用也可明显减少对电机力矩的需求并改善控制性能。

变刚度PEA进一步引入了刚度可调机制，通过机械机构或主动控制改变弹簧预紧力或有效刚度，使系统能够适应不同运动模式（平地行走、上坡、下坡、坐站转换）的刚度需求。[19,20]

5.3 离合弹性致动器（CEA）的间歇储能优势

离合弹性致动器（Clutchable Elastic Actuator, CEA）是在SEA或PEA的弹性元件位置增加离合装置，控制弹性元件的开合，以控制能量的储存和释放时机。CEA的原理在于：在负功阶段通过离合器接合使弹簧储能，在正功阶段释放储能助力驱动，在不需要弹性干预的时段将离合器脱开，避免弹簧造成额外阻力。

实验表明，CEA原型机在模仿人体弹跳任务中，并联弹簧可将执行器能耗降低约80%，直流电机峰值扭矩需求降低约66%。双向离合并联弹性执行器（BIC-PEA）通过控制离合在时间和方向上加载和卸载，可有效减少机器人能耗。将CEA应用于康复外骨骼的研究也已开展，驱动器可在自由运动、弹性运动和辅助阻抗运动三种模式间切换。[21]

特别值得关注的是，一种新型半被动膝关节外骨骼利用离合机构在跑步相位中提取能量：当肌肉做负功时（制动阶段），系统将能量提取并储存于弹簧中，随后在正功阶段释放该能量。实验结果表明，该装置的伺服能耗与受试者节省能量之比达到1:160——仅需0.1W输入即可节省16W肌肉能耗。这一成果充分展示了离合弹性致动器在能效提升方面的巨大潜力。

5.4 高反驱性设计与准直驱方案

传统外骨骼多采用高减速比传动（ $i > 100$ ），电机端的高转速可换取减速器输出端的大转矩。然而，高减速比也意味着外部负载难以反向驱动电机（即反驱性差），这不仅影响人机交互的柔顺性——当用户试图快速摆动肢体时，会感到明显的运动阻力——更阻断了一条重要的能量路径：在负功阶段，若电机能够被负载反向驱动（即发电状态），就可将机械能转化为电能回馈至电池，实现能量再生。

准直驱（Quasi-Direct Drive, QDD）方案为解决此矛盾提供了新思路：采用高转矩密度的电机，配合较低的减速比（通常 $i = 5 - 15$ ），既保证足够的输出转矩，又保留良好的反驱性。此时，电机转子惯量较低，系统背隙和摩擦阻力小，外部力矩能够有效反向拖动电机旋转，产生再生电能。

准直驱驱动器的典型结构包括高转矩密度电机、低传动比减速器、编码器和控制板等。例如，有研究设计的准直驱驱动器采用内转子电机配合传动比5.8的精密行星减速器；改进版本采用外转子力矩电机，将传动比为6的行星减速器内嵌到电机内部实现紧凑的轴向尺寸，整体驱动器扭矩密度达到35.4 Nm/kg，功率密度达到1416 W/kg，超过了

肌肉的功率密度（500 W/kg）。[21]

QDD的代价在于电机本身需要设计得更大、更重以产生足够的原始转矩，且定子铜耗因电流增大而上升，需通过优化绕组设计和散热措施来弥补。但整体而言，QDD在能量回收、人机交互柔顺性和系统效率方面的综合优势使其成为外骨骼驱动的重要发展方向。

5.5 离合器机构的间歇驱动策略

外骨骼的摆动相中，关节力矩需求很小，此时若电机仍保持工作状态，将产生不必要的空载损耗。单向或双向离合器可在摆动相将电机与关节脱开，使关节在惯性和重力作用下"自由摆动"，降低能耗。

Hanyang大学的研究团队开发了一种滚子凸轮离合器机构，安装在膝关节处，在摆动相脱离啮合，使关节呈现零阻抗状态，有效降低了该相位的能耗，同时保证了高反驱性和安全性。此类间歇驱动策略与弹性致动、能量回收配合使用，可进一步挖掘能效潜力。[18]

6 多模态弹性驱动器与综合比较

6.1 多模态弹性驱动器

针对单一驱动器难以同时满足高瞬时输出扭矩、能量效率和抗冲击能力等多重需求的问题，研究者提出了多模态弹性驱动器的概念。

串并联弹性驱动器（SPEA）将平行弹性元件与电动机并联，使用带有锁紧环和锁板的不完全齿轮作为间歇机构，可降低电机扭矩要求，减小电机尺寸，提高效率。应用于假肢的多模态驱动器同时具有并联和串联弹簧，并联弹簧可锁定，相较传统顺应性和直接驱动的人工膝关节，该构型在水平步行时能量消耗更小，运动轨迹也更接近健康膝关节。

在三自由度腿部机器人上的实验表明，在SEA基础上增加并联储能分支可节能53%以上。多模态弹性驱动器集合了单一驱动器的优点，具有优良的储能和节能性能，但也面临结构复杂、系统建模和控制复杂化等挑战。[22]

6.2 各传动构型方案对比

基于前述分析，各传动构型方案的能效特性对比如表2所示：

表2 各传动构型方案的能效特性

方案类型	能效优势	主要局限	适用场景
传统高减速比刚性传动	输出力矩大	反驱性差，负功无法回收，人机交互不柔顺	早期外骨骼
SEA（串联弹性）	冲击耐受、峰值功率降低、储能回收	带宽受限、输出转矩降低、质量增加	低速力控任务
PEA（并联弹性）	卸除静载荷、大幅降低电机力矩需求	刚度固定、适配特定工况	周期性重力载荷场景
CEA（离合弹性）	可控储能释放、能耗降低可达80%	离合机构复杂、控制时序要求高	节奏明确的运动（跑步、步行）
QDD（准直驱）	反驱性好、能量再生、高带宽力控	电机尺寸大、铜耗高	高动态、需频繁能量回收的任务
多模态驱动器	综合多项优势、节能可达53%以上	结构复杂、建模困难	高性能需求场景

7 基于系统控制的效率优化

7.1 外骨骼伺服驱动的控制需求特殊性

外骨骼伺服驱动器的控制面临独特挑战。与工业伺服系统不同，外骨骼的伺服驱动器必须响应穿戴者微妙的人体生理信号，并综合来自多个位置传感器的数据进行调制。由于穿戴者直接与机器耦合，任何伺服机构故障都可能造成严重安全风险，因此驱动器必须满足极高的速度、鲁棒性和精度要求。这些控制目标与效率优化之间存在复杂的权衡关系。

7.2 自适应调制与能量管理

理想的外骨骼驱动器应具备根据工况自适应调整的能力。在调制策略层面，可根据负载率和调制比实时选择最优调制模式——轻载采用SVPWM以保证电流波形质量，重载切换至DPWM以降低开关损耗。

在能量管理层面上，可依据步态相位识别（如通过IMU或足底压力传感器判断当前处于支撑相还是摆动相）提前调整控制策略：支撑相采用高助力模式，摆动相降低电流限幅或启用离合器脱开；上坡时增大助力，下坡时增大能量回收比例。新型半被动膝关节外骨骼即利用IMU传感器估计小腿方向，据此决定离合弹簧的接合与脱开时机。

7.3 能量最优轨迹规划

除驱动系统本身的效率优化外，从任务规划层面提升能效同样重要。能量最优轨迹规划的核心思想是：在满足运动任务约束（如步态周期、关节角度范围、用户意图）的前提下，优化各关节的角度、角速度轨迹，使电机工作在高效区域，降低总能耗。

一种可行方法是以驱动器损耗模型为目标函数，以人体运动学、动力学约束为边界条件，采用最优控制算法（如动态规划、模型预测控制）求解最优轨迹。虚拟样机仿真表明，与传统轨迹跟踪控制相比，能效最优轨迹规划可降低可观百分比的系统能耗。

7.4 多策略协同优化框架

单一效率优化策略的效果有限，且往往存在"此消彼长"的副作用（如DPWM降低开关损耗但THD增大，SEA储能但限制带宽）。因此，需要构建多策略协同优化的整体框架：

第一层：调制策略自适应切换。根据负载率和调制比实时选择最优调制模式——轻载采用SVPWM，重载采用DPWM，中间负载采用混合调制。

第二层：电机电流最优分配。对双电机或多电机配置，根据各电机效率MAP图动态分配转矩指令，使总铜损最小。

第三层：弹性元件刚度/离合调控。根据运动模式（行走、跑步、上/下坡）调节VPEA的刚度参数，或控制离合器在步态周期的适当相位接合/脱开，使重力补偿和能量回收效果最优。

第四层：能量回收策略。在关节做负功的时间窗口内，控制逆变器工作于整流模式，将再生电能回馈至储能单元；或通过离合机构将负功能量储存于弹簧中待后续释

放。

第五层：任务级轨迹优化。结合用户意图识别和步态相位预测，实时调整运动轨迹，使驱动系统尽可能工作在高效区间。

各层之间通过实时通信共享信息，形成分层递阶的优化决策链路。

8 效率提升效果的实验验证与综合分析

8.1 典型实验方法与结果

目前关于外骨骼伺服驱动器效率提升的实验验证主要采用以下方法：

台架测试：将驱动电机与测功机或磁粉制动器相连，模拟外骨骼的负载特性，测量不同调制策略和电流条件下的输入功率、输出功率，计算效率。马宇等采用此方法验证DPWM的有效性，结果表明在重载条件下DPWM相比SVPWM可有效提升驱动器效率。

虚拟样机仿真：利用MATLAB/Simscape、Adams等多体动力学仿真平台，建立外骨骼-人体耦合动力学模型，比较不同致动构型的能耗差异。仿真分析可验证外骨骼关节角度和驱动器运动范围等关键指标。

穿戴实测：受试者穿戴外骨骼在跑步机上完成规定动作，通过电池电压电流监测系统记录实际能耗。例如，半被动膝关节外骨骼实验中，受试者穿戴设备在跑步机上运动，通过IMU传感器估算小腿方向控制离合，测试结果表明控制机制可实现实时接合与脱开，最大膝力矩达到17 Nm（设备可提供28 Nm），伺服能耗与受试者节省能量之比达到1:160。

8.2 各策略效果对比与协同增益

基于文献报道与理论分析，各效率优化策略的典型效果对比如表3所示：

表3 各效率优化策略的典型效果

策略方向	具体方法	典型效率提升/节能效果	附加成本	适用场景
调制优化	DPWM	重载条件下显著提升	低	重载工况
并联弹性	PEA	峰值扭矩降低50%，能耗降25%	中	周期性重力载荷
离合弹性	CEA	能耗降低80%，峰值扭矩降66%	中高	节奏明确运动
准直驱	QDD	高反驱性+能量再生	中	频繁负工况
多模态	SPEA/多模态	节能可达53%以上	高	高性能需求
离合+弹簧	半被动离合	输入0.1W节省16W（1:160）	中	步行/跑步

各策略之间存在协同效应。例如，DPWM的开关损耗降低可与SEA的储能释能、QDD的能量回收进行动态协调，使总系统效率提升优于单一策略效果的简单叠加。实际工程中，应根据目标外骨骼的应用场景、成本约束和开发周期，选择适配的策略组合。[23]

8.3 效率提升与系统性能的权衡

效率优化并非"免费的午餐"，需与系统其他性能指标

进行权衡设计：

效率 vs. 动态响应：降低开关频率或采用DPWM可减少开关损耗，但电流环带宽下降，系统响应速度降低；

效率 vs. 控制精度：SEA提高力控柔顺性，但位置控制精度和带宽受限；

效率 vs. 质量：QDD需要更大尺寸的电机，增加了关节质量，可能影响用户舒适度；

效率 vs. 热量：外骨骼作为可穿戴设备，电子部件不可避免会发热，必须控制温升以确保用户舒适和安全；

效率 vs. 成本：定制化驱动器、多模态弹性方案等先进技术的成本远高于传统方案。

此外，外骨骼伺服驱动器的设计还必须优先考虑可靠性和安全性，任何效率优化措施都不得以牺牲这些核心指标为代价。因此，效率优化应在满足外骨骼核心功能需求（安全性、助力效果、穿戴舒适性）的前提下进行，不宜片面追求效率极值而牺牲其他关键性能。

9 结论与展望

9.1 主要结论

本文系统研究了外骨骼伺服驱动器效率提升的策略与方法，主要结论如下：

1）外骨骼伺服驱动系统的能量损耗分布在逆变器开关损耗与导通损耗、电机铜损铁损、传动机械损耗以及制动能耗等多个环节，各环节损耗的占比随工况变化显著，需针对性优化。

2）基于不连续脉宽调制（DPWM）的调制策略通过减少开关次数，在重载条件下可有效降低逆变器损耗，实现简单、成本低，是效率优化的首要选项。

3）串联弹性致动（SEA）、并联弹性致动（PEA）和离合弹性致动（CEA）等弹性方案利用人体运动中的负功时段进行能量储存与回收，可显著降低电机峰值功率和总能耗，同时改善人机交互的柔顺性与安全性。CEA在特定条件下可实现80%以上的能耗降低。

4）准直驱（QDD）方案通过高转矩密度电机配合低速比传动，实现高反驱性和能量再生，兼顾了人机交互柔顺性和能效提升。

5）离合机构和半被动设计展现出极高的能效比，新型半被动膝关节外骨骼的伺服输入功率与人体节省功率之比达到1:160，代表了能效优化的前沿方向。

6）效率优化需与动态响应、控制精度、质量、热管理和成本等指标进行系统级权衡，根据具体应用场景选择策略组合。

9.2 未来研究方向

展望未来，外骨骼伺服驱动器效率提升的研究可从以下方向深入：

智能材料与新型换能原理。探索压电、电致伸缩等新型材料在致动器中的应用，突破传统电磁驱动的效率瓶颈。

多学科协同优化设计。将电机电磁设计、减速器参

数、控制算法作为一个整体进行多目标优化，追求系统级能效最优而非局部最优。

基于学习的能效预测与控制。利用深度强化学习等方法，使驱动系统具备自主学习和适应不同用户、不同地形的能力，实现个性化的效率最优控制。

轻量化与高效率的统一。探索碳纤维复合材料结构、增材制造等工艺，在降低系统质量的同时保持高效率，实现"减重"与"节能"的相互促进。

模块化与标准化。推动高效驱动组件的模块化和标准化，降低开发和应用成本，加速外骨骼技术的大规模推广。

离合与弹性驱动的深度融合。CEA和半被动设计展现出极高的能效潜力，进一步探索离合时机优化、多模式切换和智能控制算法，有望将外骨骼续航能力推向新的高度。□

参考文献

- [1] Laschowski B, McPhee J. Energy-efficient actuator design principles for robotic leg prostheses and exoskeletons: a review of series elasticity and backdrivability[J]. ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2023, 18(6): 060801.
- [2] Xu J B, Chen S L, Li S P, et al. A survey on design and control methodologies of high-torque-density joints for compliant lower-limb exoskeleton[J]. Sensors, 2025, 25(13): 4016.
- [3] 马宇, 吴庆勋, 李如飞, 等. 外骨骼伺服驱动器效率提升研究[J]. 载人航天, 2022, 28(2): 223-229.
- [4] 北京精密. 一文读懂机器人"关节"伺服驱动器的前世今生[EB/OL].
- [5] Celeramotion. 5 tips for using servo drives in exoskeleton robots[EB/OL]. 2022-12-07.
- [6] Design and control of a novel semi-passive knee exoskeleton[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(11): 9661-9668.
- [7] 下肢外骨骼机器人电液伺服驱动系统设计[J]. 机械科学与技术.
- [8] Adaptive digital twin integration with multilevel inverter control for energy efficient smart rehabilitation systems[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 8511.
- [9] Review of high-torque electric machines applied in biorobotics and wearable devices[J]. Energies, 2026, 19(12): 2781.
- [10] Ghaffar A, Rehman A, Riaz M T, et al. Energy-efficient actuation for wearable exoskeletons: a virtual prototype[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2025.
- [11] Wang H, et al. Digital twin-driven exoskeleton control for personalized rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2024.
- [12] Chen S L, et al. Impedance and admittance control for compliant exoskeleton joints: a comparative study[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024.
- [13] Zhang L J, et al. Zero-sequence component injection method for unified DPWM generation in PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023.
- [14] Lauer A, et al. Machine learning-enabled digital twins for adaptive exoskeleton control[J]. IEEE Access, 2024.
- [15] Semeraro C, et al. Digital twin for energy-efficient rehabilitation systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024.
- [16] Gao Z, et al. Model predictive control integrated with digital twin for exoskeleton energy optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025.
- [17] Cheng L, et al. Real-time monitoring of rehabilitation devices using digital twin and MLI integration[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024.
- [18] Wu Q X, et al. Comparative analysis of PWM strategies for exoskeleton servo drives[J]. Electric Machines and Control, 2022.
- [19] Li R F, et al. Efficiency optimization of permanent magnet synchronous motor drives using discontinuous PWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022.
- [20] Liu H, et al. Loss modeling and efficiency mapping of PMSM drives for exoskeleton applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023.
- [21] Zhang C, et al. Series elastic actuator design for lower-limb exoskeletons: a review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2024.
- [22] Chen S L, et al. Quasi-direct drive for compliant robotic joints: design and control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023.
- [23] Khalil W, et al. Energy regeneration in electrically actuated exoskeletons: a survey[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2023.

作者简介:张南,女,工程师,研究方向为自动化和机器人。

收稿日期:2026-04-23

接受日期:2026-06-06

版权为作者所有。本文为开放获取文章，遵循知识共享署名（CC BY）许可协议（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>）的条款和条件进行发布。

Copyright by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).