•机械工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500486

本刊网刊

人行过街天桥直梯装置新型电液混合驱动系统能量转换研究

吴子英，晁国强，王婧楠，吴海涛，张禹轩

(西安理工大学 机械工程学院，陕西 西安 710048)

摘　要：为了提高载客效率，首先，本文将常规电梯一侧配重改为同等质量轿厢，提出了用于人行过街天桥的双轿厢型直梯装置。然后，利用液压泵/马达的机械能/液压能转换功能，将轿厢中乘客下行时的重力势能转化为液压能存储至低压蓄能器，实现重力势能的二次再利用。接着，在传统电梯驱动结构的基础上，再引入周转轮系，提出了用于人行过街天桥直梯装置的新型电液混合驱动系统。最后，在天桥的顶面铺设光伏发电装置，将太阳能直接转化为电液混合驱动系统的高压液压能，实现了新型电液混合驱动系统的二次补能。本文综合建立了光伏发电系统、蓄能器、液压泵/马达、曳引轮机械传动系统的数学模型。采用AMESim仿真软件，分别完成了3种典型工况下直梯系统的运动仿真，即高压蓄能器释放压力能（轿厢上行）工况、低压蓄能器存储重力势能（轿厢下行）工况以及系统压力能不足下异步电机–液压马达混合驱动工况。仿真结果表明，3种典型工况下轿厢运行速度符合要求，液压系统各部件运行正常，重力势能存储再利用率约为24%，引入光伏发电补能后，直梯装置的新型混合驱动系统的节能率可达75%。研究结论可为人行过街天桥直梯装置的驱动装置创新设计和节能措施提供研究参考。

关键词：人行过街天桥；光伏发电；周转轮系；电液混合；重力势能

中图分类号：TH137；TH111　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3246（2026）06-0316-12

人行过街天桥是现代化都市中协助行人安全穿越道路的空中建筑设施，通过分离行人与车辆保障交通通畅[1]。国内90%以上的城市没有为人行过街天桥配置无障碍直梯装置，传统直梯24 h待命，能耗高是其一大短板[2]。

国内外学者在电梯节能方面做了一些典型研究，可从5个方面进行总结[3–5]：1）在电能回馈电网技术研究方面，刘航等[6]提出了基于PWM整流器的电梯能馈控制系统，基于Matlab/Simulink模块搭建仿真模型，验证了电梯能馈系统直流侧能量回馈电网的可行性。Wan等[7]针对电梯制动能量回馈电网控制复杂等问题设计了一种节能单元，该单元通过超级电容储存再生能量，并且再生能量无需回馈电网，可直接就地使用。Plangklang等[8]用Matlab/Simulink软件建立了永磁电机电梯的能量再生系统（ERU），研究表明，该系统可将电梯曳引机处于发电状态产生的直流电转换为交流电反馈回电网。2）在蓄电池储能节能技术研究方面，古川实等[9]在其发明专利“电力再生装置及电力再生方法、蓄电系统及蓄电方法、以及高频波装置”中提出了将镍氢电池作为电梯的备用电源并和电动机配合使用的方法。Tominaga等[10]通过Buck-boost型拓扑结构的双向DC/DC变换器将镍氢电池直接与直流母线并联，曳引机处于发电状态时，处于降压模式的双向DC/DC变换器给镍氢电池充电；曳引机处于电动状态时，镍氢电池放电使双向DC/DC变换器处于升压模式。3）在超级电容储能节能技术研究方面，牟耀荣等[11]提出了超级电容储能装置的参数设计方法。齐冠然等[12]设计一种基于蓄能器储能的曳引电梯液压节能系统，通过电容吸收能量，降低电梯系统的能耗。常晓清等[13]采用变频器+独立能量回馈装置技术降低了电梯的能耗，节电率达到了30%。Dalala等[14]分析了4种再生能量回收技术的特性，方案采用发电电机采集电梯轿厢的动能与势能，回收的电能经由DC/DC功率变换器存储至储能装置，所储存的能量可在轿厢重载上行阶段回馈利用；该能量回收构想不仅高效实现了电梯轿厢运行过程中余散能量的优化利用，

收稿日期：2025－06－26　　**修回日期：**2025－11－03　　**网络出版日期：**2025－11－17

基金项目：陕西省自然科学基础研究计划项目（2026JC–YBMS–0585）

作者简介：吴子英（1975—），男，副教授，博士．研究方向：机电系统动力学理论及控制．E-mail：ziyingwu@163.com

同时兼顾了储能方案的设计。4）在电梯群节能技术研究方面，王素娟等[15]将状态事件分析方法应用于多智能体系建立的电梯群控系统模型，进行了电梯群控系统调度算法研究。欧哲[16]采用蚁群算法调度策略，建立目标能量函数，进行了群控调度优化研究。5）在液压蓄能器储能技术研究方面，液压蓄能器技术成熟，在车辆的节能中应用较为常见[17–19]，蓄能器技术也逐渐应用到电梯驱动装置中[20–21]。张杰等[22]设计了一种采用变量泵/马达的液压驱动曳引电梯节能系统，在电梯下行时用曳引机带动永磁同步电机工作，当系统处于发电状态时，利用变量泵将发电过程中产生的能量储存在蓄能器中；当电梯处于电动状态时，蓄能器能量释放，辅助曳引机驱动，节能可达到10%～40%。Fateh等[23]设计了一种位置误差与速度误差双输入PD型Mamdani模糊控制器，此种控制方式可以克服不确定性，保证系统稳定性，并提供良好的速度跟踪性能。Celik[24]以变频调速液压电梯为研究对象，采用一个常规控制阀、逆变器，以及一个复杂的液压软件模块，设计了一种新的无传感器负载补偿方案，获得了较好的控制效果。

综合来看，上述电梯节能的研究虽也取得了较好的效果，但仍存在一些不足之处，如：电能回馈电网方法中，电梯所能回馈的电量很小，基本属于垃圾电；如果采用蓄电池或超级电容存储，成本过高，电梯群控技术不适用于分散的人行过街天桥直梯装置。相比之下，液压蓄能器技术存在一定的优势。鉴于此，本文在含蓄能器的液压驱动电梯研究的基础上[25]，引入两自由度周转轮系和光伏发电装置，将传统电梯驱动结构改进为异步电机+液压驱动的电液混合驱动结构；引入两种类型蓄能器进行储能，高压蓄能器存储太阳能转化的液压能，低压蓄能器存储乘客下行的重力势能；提出了一种新型的电液混合驱动系统，不仅实现了乘客下行重力势能的回收再利用，而且实现了电液混合驱动系统持续补能，最大程度减少对外部电网的依赖。

1　新型混合驱动液压传动系统设计

直梯装置由太阳能发电系统、液压传动系统和机械传动系统组成。其中，太阳能发电系统使用光伏发电板将太阳能转化为液压能存储，液压传动系统实现行人重力势能的回收和再利用，机械传动系统采用两自由度周转轮系实现电液混合驱动。直梯装置安装在人行过街天桥的两侧，采用液压传动和机械传动相结合来驱动曳引轮转动，从而实现载客轿厢的上下运动，其结构简图和安装位置如图1所示。

所设计的电液混合驱动的传动原理图如图2所示。

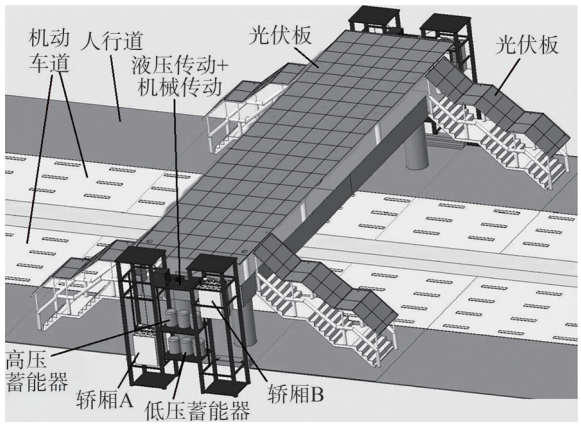
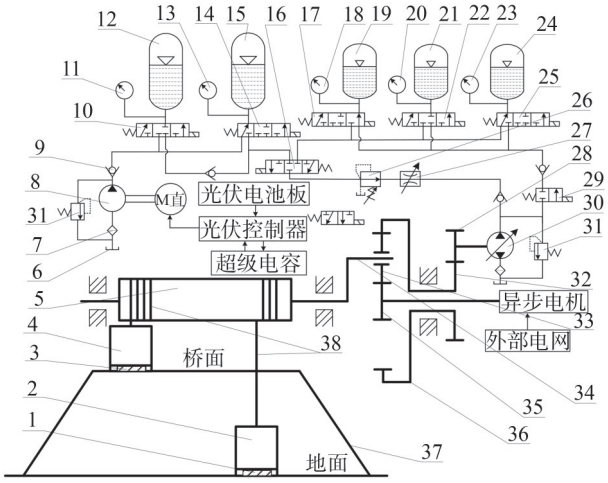


图1　直梯装置结构简图及安装位置

Fig. 1　Structral schematic diagram and installation position of the vertical elevator device



注：1. 轿厢A的重量传感器A；2. 轿厢A；3. 轿厢B的重量传感器B；4. 轿厢B；5. 曳引轮；6. 液压油箱；7. 过滤器；8. 定量泵；9. 单向阀；10. 三位三通阀A；11. 压力变送器A；12. 高压蓄能器A；13. 压力变送器B；14. 三位三通阀B；15. 高压蓄能器B；16. 三位三通阀C；17. 三位三通阀D；18. 压力变送器C；19. 低压蓄能器A；20. 压力变送器D；21. 低压蓄能器B；22. 三位三通阀E；23. 压力变送器E；24. 低压蓄能器C；25. 三位三通阀F；26. 减压阀；27. 调速阀；28. 齿轮Z_5；29. 二位二通阀；30. 变量泵/马达；31. 溢流阀；32. 齿轮Z_4；33. 行星齿轮Z_2；34. 系杆X；35. 小太阳轮Z_1；36. 齿圈Z_3；37. 人行过街天桥的一侧；38. 钢丝绳。

图2　电液混合驱动的传动原理图

Fig. 2　Schematic diagram of electro-hydraulic hybrid drive

本文直梯装置的工作过程包括高压蓄能器储能与释能、低压蓄能器储能与释能、液压马达与异步电机混合驱动、异步电机单独驱动。

1.1　高压蓄能器储能与释能的过程

在日照充足的白天，光伏电池板将太阳能转化为电能，在光伏控制器的作用下，光伏电能为直流电机M直供电从而驱动定量泵_8（其中，8表示图2中编号8，下同）工作，多余的电能存储到超级电容。定量泵_8转动后，液压油从油箱_6经过过滤器_7和单向阀_9到达三位三通阀A_10或者三位三通阀B_14。高压蓄

能器储能与释能的过程分析具体如下。

1.1.1 高压蓄能器A_12、B_15储能过程分析

1)在高压蓄能器A_12和B_15中压力均未达到额定压力的情况下,三位三通阀A_10的阀芯位于中间位置时,高压蓄能器A_12储能关闭,同时三位三通阀_14的阀芯位于左端位置,定量泵_8将液压油压入高压蓄能器B_15中,实现光能到电能再到压力能的存储。当压力变送器B_13检测到高压蓄能器B_15的压力达到额定值时,三位三通阀B_14的阀芯运动到中间位置,高压蓄能器B_15的储能动作关闭。同时三位三通阀A_10的阀芯运动到左端位置,来自定量泵_8的高压油进入高压蓄能器A_12,当压力变送器A_11检测到高压蓄能器A_12的压力达到额定值时,三位三通阀A_10的阀芯运动到中间位置,高压蓄能器A_12的储能动作关闭。

2)在高压蓄能器B_15达到额定压力、高压蓄能器A_12未达到额定压力的情况下,三位三通阀A_10的阀芯运动到左端位置,液压油进入高压蓄能器A_12实现储能,此时三位三通阀B_14的阀芯位于中间位置,高压蓄能器B_15储能关闭。

3)在高压蓄能器A_12达到额定压力、高压蓄能器B_15未达到额定压力的情况下,三位三通阀B_14的阀芯运动到左端位置,液压油进入高压蓄能器B_15实现储能,此时三位三通阀_10的阀芯位于中间位置,高压蓄能器A_12储能关闭。

4)在高压蓄能器A_12、B_15均达到额定压力的情况下,三位三通阀B_14和三位三通阀A_10的阀芯均位于中间位置,关闭高压蓄能器A_12和高压蓄能器B_15的储能动作,定量泵_8排出的高压油经溢流阀_31回流到油箱_6。

1.1.2 高压蓄能器A_12、B_15释能过程分析

轿厢A_2的乘客重量大于轿厢B_4时(位置见图1轿厢A、B),三位三通阀C_16的阀芯移动至左端位置,来自低压蓄能器的油路处于关闭状态,此时三位三通阀A_10或者三位三通阀B_14的阀芯移动至右端位置,与该三位三通阀相连的高压蓄能器释放存储的压力油,压力油经过减压阀_26和调速阀_27进入变量泵/马达_30,变量泵/马达_30处于马达工作状态,来自蓄能器的压力油经过变量泵/马达_30后将压力能转换为驱动齿轮Z_5_28转动的机械能,齿轮Z_5_28与齿轮Z_4_32啮合,齿轮Z_4_32带动齿圈Z_3_36转动,如果压力能足够的话,异步电机处于制动状态,齿圈Z_3_36转动与行星齿轮Z_2_33啮合,从而带动系杆X_34转动,系杆X_34带动曳引轮转动,实现轿厢A_2上行,同时轿厢B_4下行。曳引轮的转速为:

$$n_{yl}=\frac{Z_3}{Z_1+Z_3}\cdot\frac{Z_4}{Z_5}n_{bd} \tag{1}$$

式中,n_{yl}为曳引轮的转速,n_{bd}为变量泵/马达的转速,Z_1、Z_3、Z_4和Z_5分别为小太阳轮Z_1_35、齿圈Z_3_36、齿轮Z_4_32和齿轮Z_5_28的齿数。

1.2 低压蓄能器的储能与释能的过程

无论是白天还是黑夜,当三位三通阀C_16的阀芯处于中间位置时,高压蓄能器的储能过程与低压蓄能器的储能过程相互独立。低压蓄能器储能与释能的过程分析具体如下。

1.2.1 低压蓄能器A_19、B_21、C_24储能过程分析

以轿厢A_2和轿厢B_4(位置见图1轿厢A、B)为例进行说明,如果此时轿厢B_4中乘客重量大于轿厢A_2中乘客重量,在轿厢B_4下行与轿厢A_2上行过程中,很明显轿厢B_4从桥面到达地面过程中产生的重力势能大于轿厢A_2从地面上升至桥面位置时的重力势能,剩余的重力势能在绳索_38的作用下使曳引轮_5转动,曳引轮_5带动系杆X_34转动,此时异步电机制动不动,系杆X_34通过行星齿轮Z_2_33,行星齿轮Z_2_33与齿圈Z_3_36啮合,齿圈Z_3_36与齿轮Z_5_28啮合,然后驱动变量泵/马达_30以液压泵的方式运转,从而将液压油从油箱吸出,通过二位二通阀_29进入三位三通阀D_17、E_22、F_25的进油口。控制器通过轿厢A_2与轿厢B_4重量差计算出重力势能可转化的压力能的大小,根据低压蓄能器A_19、B_21、C_24所连接的压力变送器C_18、D_20、E_23反馈的压力值,将重力势能转化的压力能就近存储到低压蓄能器中,例如,在转化的压力能为0.1 MPa,低压蓄能器A_19、B_21、C_24中压力分别为0.08、0.20、0.38 MPa的情况下,将0.1 MPa存储到低压蓄能器A_19中。

1.2.2 低压蓄能器A_19、B_21、C_24释能过程分析

随着重力势能转化的压力能不断存入3个低压蓄能器,控制器实时将轿厢A_2和轿厢B_4的重量差与3个低压蓄能器中压力能对比,当满足某一个低压蓄能器的压力能使用要求后,与蓄能器对应的三位三通阀的阀芯移至左端,然后三位三通阀_C16的阀芯移至右端,来自高压蓄能器的液压油关闭,来自低压蓄能器的液压油经过减速阀_26、调速阀_27进入到变量泵/马达_30的进油口,变量泵/马达_30处于马达工作状态,从而驱动齿轮Z_5_28、齿轮Z_4_32、齿圈Z_3_36、行星齿轮Z_2_33、系杆X_34和曳引轮_5转动,实现了轿厢的轿厢A_2或者轿厢B_4的上行。

1.3 液压马达与异步电机混合驱动过程

当高压蓄能器或者低压蓄能器的压力能不足时,

变量泵/马达_30的输出力矩不足，为了实现人行过街天桥直梯的正常使用功能以及节能运行，外部电网为异步电机供电，异步电机驱动小太阳轮Z_1_35转动，变量泵/马达驱动齿轮Z_5_28、齿轮Z_4_32和齿圈Z_3_36转动，在小太阳轮Z_1_35、齿圈Z_3_36、行星齿轮Z_2_33、系杆X_34的共同作用下，形成了液压马达动力与异步电机动力的混合驱动模式，此时曳引轮的转速为：

$$n_{yl}=\frac{Z_3}{Z_1+Z_3}\left(n_{yd}+\frac{Z_3Z_4}{Z_1Z_5}n_{bd}\right) \tag{2}$$

式中，n_{yd}为异步电机的转速。

1.4　异步电机单独驱动过程

当夜间或长期阴天时，高/低压蓄能器中压力能过低不能利用，变量泵/马达处于制动模式，异步电机为人行过街天桥直梯装置的唯一动力源，此时人行过街天桥直梯转变为传统的电机驱动电梯装置，直接采用外部电网给异步电机供电，异步电机驱动小太阳轮Z_1_35转动，小太阳轮Z_1_35与行星齿轮Z_2_33啮合，此时齿圈Z_3_36静止不动，行星齿轮Z_2_33的转动带动系杆X_34和曳引轮_5转动，完成乘客的上行和下行。此时曳引轮的转速为：

$$n_{yl}=\frac{Z_3}{Z_1+Z_3}n_{yd} \tag{3}$$

2　数学模型

2.1　光伏发电系统模型

标准光照强度S_{ref}=1 000 W/m^2，光伏电池温度为25 ℃。考虑到温度和光照的因素，光伏电池单体的最佳功率点电流I_m和电压U_m为[26]：

$$I_m=I_{m0}\frac{S}{S_{ref}}(1+\alpha(T-T_{ref})) \tag{4}$$

$$U_m=U_{m0}(1-\gamma(T-T_{ref}))\ln\left(e+\beta\left(\frac{S}{S_{ref}}-1\right)\right) \tag{5}$$

$$C_1=\left(1-\frac{I_m}{I_{sc}}\right)e^{-\frac{U_m}{C_2U_{oc}}} \tag{6}$$

$$C_2=\left(\frac{U_m}{U_{oc}}-1\right)\Big/\ln\left(1-\frac{I_m}{I_{sc}}\right) \tag{7}$$

$$T=T_{air}+HS \tag{8}$$

式(4)～(8)中：I_{m0}为参考条件下的最大功率点电流；U_{m0}为参考条件下的最大功率点电压；I_{sc}为参考条件下的短路电流；U_{oc}为参考条件下的开路电压；T为电池温度；T_{ref}为标准电池温度；T_{air}为环境温度；S为日射强度；α、β、γ为补偿系数，α=0.002 5 ℃，β=0.000 5 W/m^2，γ=0.002 88 ℃；C_1、C_2为与电流和电压相关的修正系数；H为与S相关的系数，由实验测定的$H(S)$直线的斜率确定，一般可取H=0.03 ℃·m^2/W。

当短路电流、开路电压以及最大功率点电流、电压给定后，可得到一个在日射强度S和温度T_{air}变化下的光伏阵列的输出功率$P_{PV}(S,T_{air})$：

$$P_{PV}(S,T_{air})=N_{PV}U_mI_m \tag{9}$$

式中，N_{PV}为级联数量。

2.2　蓄能器模型

蓄能器模型由气体压力模型、蓄能器能量模型和蓄能器流量连续方程组成。

2.2.1　气体压力模型

蓄能器蓄能阶段，气体容积减小，压力升高，其气体状态变化方程为[27]：

$$P_{a2}V_2^n=P_a(V_2-\Delta V_a)^n=P_a(V_2-\int_0^t q_a\mathrm{d}t)^n \tag{10}$$

$$P_a=\frac{P_{a2}V_2^n}{(V_2-\int_0^t q_a\mathrm{d}t)^n} \tag{11}$$

蓄能器释能阶段，气体容积增大，压力降低，其气体状态变化方程为：

$$P_{a1}V_1^n=P_a(V_1+\Delta V_a)^n=P_a(V_1+\int_0^t q_a\mathrm{d}t)^n \tag{12}$$

$$P_a=\frac{P_{a1}V_1^n}{(V_1+\int_0^t q_a\mathrm{d}t)^n} \tag{13}$$

式(10)～(13)中：ΔV_a为蓄能器中的气体变化量；P_a为蓄能器气体压力；P_{a1}、P_{a2}分别为电梯左侧轿厢在一、二层时蓄能器气体压力；V_1、V_2分别为电梯左侧轿厢在一、二层时蓄能器气体容积；t为液压泵/马达中流体流过时间；q_a为蓄能器处于蓄能阶段时，时间t内流入蓄能器的油液体积；n为气体多变指数（绝热过程n取1.4）。

2.2.2　蓄能器能量模型

液压蓄能器贮存或释放的能量可以通过式(14)描述，即：

$$E=\pm\int_{V_{a2}}^{V_{a1}}P_a\mathrm{d}V_r=\pm\int_{V_{a2}}^{V_{a1}}P_0\left(\frac{V_0}{V_r}\right)^n\mathrm{d}V_r \tag{14}$$

式中："+"代表蓄能器对外做功，"–"代表蓄能器吸收能量；E为蓄能器释放或吸收的能量；V_r为积分用变量；V_{a1}为蓄能器工作过程开始状态下对应的气囊体积；V_{a2}为蓄能器工作过程结束状态下对应的气囊体积；P_0为蓄能器的预充气体压力；V_0为蓄能器预充状态下的气体体积。

2.2.3　蓄能器流量连续方程

蓄能器内气体遵循多变气体定律[28]，即：

$$PV^n=C \tag{15}$$

式中，P为蓄能器气囊中瞬时气体绝对压力，V为蓄能器气囊中瞬时气体体积，C为常数。

对式(15)两边同时求导，得到：

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}=-n\cdot\frac{P}{V}\cdot\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} \tag{16}$$

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{out}}}{\mathrm{d}t}=-n\cdot\frac{P_{\mathrm{out}}+P_{\mathrm{atm}}}{V_{\mathrm{gas}}}\cdot\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{gas}}}{\mathrm{d}t} \tag{17}$$

由于$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{gas}}}{\mathrm{d}t}=-q_{\mathrm{out}}$，则：

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{out}}}{\mathrm{d}t}=n\cdot\frac{P_{\mathrm{out}}+P_{\mathrm{atm}}}{V_{\mathrm{gas}}}\cdot q_{\mathrm{out}} \tag{18}$$

根据气体波义耳定律有：

$$(P_0+P_{\mathrm{atm}})V_0^n=(P_{\mathrm{gas}}+P_{\mathrm{atm}})V_{\mathrm{gas}}^n \tag{19}$$

$$V_{\mathrm{gas}}=V_0\left(\frac{P_0+P_{\mathrm{atm}}}{P_{\mathrm{gas}}+P_{\mathrm{atm}}}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{20}$$

式(16)～(20)中，P_0为蓄能器预充气气体压力，P_{gas}为蓄能器气体压力，V_{gas}为蓄能器气体容积，q_{out}为液压泵/马达的输出流量，P_{out}为蓄能器出口压力($P_{\mathrm{out}}=P_{\mathrm{gas}}$)，$P_{\mathrm{atm}}$为标准大气压力。

2.3 液压泵/马达流量连续性方程

柱塞泵/马达在工作时存在内泄漏和外泄漏两部分泄漏现象，实际流量通常低于理论流量，在计算时必须综合考虑内泄漏、外泄漏以及机械损失等因素。液压泵/马达输入和输出口间的流量关系式为：

$$q_{\mathrm{va}}=V_{\mathrm{p}}n_{\mathrm{bd}}-q_{\mathrm{n}}-q_{\mathrm{w}} \tag{21}$$

式中，V_{p}为液压泵/马达的排量，q_{w}为主液压泵/马达处产生的外泄漏流量，q_{va}为蓄能器一侧减压阀到液压泵/马达间的管路压力区对泵/马达的输出流量，q_{n}为主液压泵/马达处产生的内泄漏流量(从泵的高压油口泄漏到低压油口的流量，不影响闭式油路中液压油的容积)。

液压泵/马达内部间隙导致液压油从高压区向低压区泄漏，内泄漏流量q_{n}数学表达为：

$$q_{\mathrm{n}}=C_{\mathrm{n}}\Delta P \tag{22}$$

式中，C_{n}为主液压泵马达内泄漏流量系数，ΔP为高压和低压间的压力差。

由于密封不严，液压油泄漏到外部环境，外泄漏流量q_{w}计算式为：

$$q_{\mathrm{w}}=C_{\mathrm{w}}\Delta P \tag{23}$$

式中，C_{w}为主液压泵马达外泄漏流量系数。

2.4 曳引轮力矩平衡方程

根据曳引轮的受力力矩平衡，机械系统的整体力矩平衡方程为[29]：

$$T_{\mathrm{a}}+T_{\mathrm{b}}+T_{\mathrm{c}}=0 \tag{24}$$

式中，T_{a}、T_{b}、T_{c}分别为齿圈Z_3_36、小太阳轮Z_1_35、系杆X_34的转矩。

功率平衡方程为：

$$T_{\mathrm{a}}n_{\mathrm{a}}+T_{\mathrm{b}}n_{\mathrm{b}}+T_{\mathrm{c}}n_{\mathrm{c}}=0 \tag{25}$$

式中，n_{a}、n_{b}、n_{c}分别为齿圈Z_3_36、小太阳轮Z_1_35、系杆X_34的转速。

转速之间的关系为：

$$\begin{cases}n_{\mathrm{a}}=i_{\mathrm{ab}}^{\mathrm{c}}n_{\mathrm{b}}+i_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{b}}n_{\mathrm{c}},\\ n_{\mathrm{b}}=i_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{c}}n_{\mathrm{a}}+i_{\mathrm{bc}}^{\mathrm{a}}n_{\mathrm{c}},\\ n_{\mathrm{c}}=i_{\mathrm{ca}}^{\mathrm{b}}n_{\mathrm{a}}+i_{\mathrm{cb}}^{\mathrm{a}}n_{\mathrm{b}}\end{cases} \tag{26}$$

式中，$i_{\mathrm{ab}}^{\mathrm{c}}$为齿圈$Z_3$_36(由下标a标识)与系杆X_34(由上标c标识)的转速差和小太阳轮Z_1_35(由下标b标识)与系杆X_34(由上标c标识)的转速差的比值，其表达式如式(27)所示，$i_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{b}}$、$i_{\mathrm{ba}}^{\mathrm{c}}$、$i_{\mathrm{bc}}^{\mathrm{a}}$、$i_{\mathrm{ca}}^{\mathrm{b}}$、$i_{\mathrm{cb}}^{\mathrm{a}}$的定义类似，不再赘述。

$$i_{\mathrm{ab}}^{\mathrm{c}}=\frac{n_{\mathrm{a}}-n_{\mathrm{c}}}{n_{\mathrm{b}}-n_{\mathrm{c}}}=-\frac{Z_1}{Z_3}=-\frac{4}{9} \tag{27}$$

可以推导出曳引轮(系杆X_34)的输出转速为：

$$n_{\mathrm{c}}=\frac{9n_{\mathrm{a}}+4n_{\mathrm{b}}}{13} \tag{28}$$

行星架转速的两种特殊情况：1)内齿圈固定时($n_{\mathrm{a}}=0$)，$n_{\mathrm{c}}=\frac{4}{13}n_{\mathrm{b}}$，行星架转速为太阳轮转速的4/13；2)太阳轮固定时($n_{\mathrm{b}}=0$)，$n_{\mathrm{c}}=\frac{9}{13}n_{\mathrm{a}}$，行星架转速为内齿圈转速的9/13。

令$i_{\mathrm{ab}}^{\mathrm{c}}=K$，取内齿圈$Z_3$_36相对于自身的转速$n_{\mathrm{a}}^{\mathrm{a}}=0$，则

$$T_{\mathrm{b}}n_{\mathrm{b}}^{\mathrm{a}}+T_{\mathrm{c}}n_{\mathrm{c}}^{\mathrm{a}}=0 \tag{29}$$

$$\frac{T_{\mathrm{b}}}{T_{\mathrm{c}}}=-\frac{n_{\mathrm{c}}^{\mathrm{a}}}{n_{\mathrm{b}}^{\mathrm{a}}}=-\frac{1}{i_{\mathrm{bc}}^{\mathrm{a}}}=\frac{K}{1-K} \tag{30}$$

$$\frac{T_{\mathrm{b}}}{T_{\mathrm{c}}}=\frac{K}{K-1} \tag{31}$$

式(29)～(31)中，$n_{\mathrm{b}}^{\mathrm{a}}$、$n_{\mathrm{c}}^{\mathrm{a}}$分别为小太阳轮$Z_1$_35、系杆X_34相对于齿圈$Z_3$_36的转速，同理，

$$\frac{T_{\mathrm{a}}}{T_{\mathrm{c}}}=-\frac{1}{i_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{b}}}=\frac{1}{K-1} \tag{32}$$

在差动轮系中，转矩分配比例由齿数和传动比决定，故最终转矩分配比例为：

$$T_a:T_{\mathrm{b}}:T_{\mathrm{c}}=1:(-K):(K-1)=9:4:(-13) \tag{33}$$

式中，负号表示转矩方向相反。

2.4.1 蓄能工况

在电梯的蓄能过程中，当轿厢A的重量G_{A}大于轿厢B的重量G_{B}时，轿厢A在重力作用下下行，并带动曳引轮转动。曳引轮的转动通过齿轮传动系统将力矩传递到液压泵/马达中，然后，液压泵/马达将机械能转化为液压能，并储存到蓄能器中，完成能量的存储。

蓄能过程($G_{\mathrm{A}}>G_{\mathrm{B}}$)，即当曳引轮为动力输入，且

只有液压泵/马达为输出时，其力矩平衡方程如下（固定太阳轮b，转矩T_b为外部支撑反力）：

$$J_m\frac{d\omega}{dt}=T_c-(6T_{va}+T_b+T_f) \tag{34}$$

式中，J_m为轴的总转动惯量，ω为行星架的角速度，T_{va}为蓄能器一侧液压油作用于泵/马达产生转矩，T_f为机械摩擦阻力矩。

蓄能器一侧液压油作用于泵/马达所产生的转矩T_{va}可表示为：

$$T_{va}=\frac{P_{va}V_p}{2\pi} \tag{35}$$

轿厢由于势能差距自动运行时对行星架产生的转矩T_c为：

$$T_c=(F_A-F_B)R_C \tag{36}$$

式(35)、(36)中，F_A为轿厢A的重力，F_B为轿厢B的重力，R_C为曳引轮半径，P_{va}为液压泵/马达—蓄能器一侧油口压力，V_p为液压泵/马达排量。

2.4.2　释能工况

释能过程工况1（$G_A<G_B$），即当液压泵/马达为动力输入且只有曳引轮为输出时，其力矩平衡方程为（固定太阳轮b，转矩T_b为外部支撑反力）：

$$J_m\cdot\frac{d\omega}{dt}=6T_{va}-T_b-T_c-T_f \tag{37}$$

释能过程工况2（$G_A<G_B$），即当外部电机为动力输入且只有曳引轮为输出时，其力矩平衡方程为：

$$J_m\cdot\frac{d\omega}{dt}=T_b-T_c-T_f \tag{38}$$

释能过程工况3（$G_A<G_B$），即当液压泵/马达与外部电机转矩混合作为动力输入、曳引轮为输出时，其力矩平衡方程为：

$$J_m\cdot\frac{d\omega}{dt}=T_b+6T_{va}-T_c-T_f \tag{39}$$

3　仿真计算

本文轿厢满载载荷设置为2 000 kg，人行过街天桥桥面距离地面为5 m，为提高节能效率，直梯系统的液压能根据载荷的不同分别设置2个高压蓄能器，额定压力为10 MPa。3个不同压力级别的低压蓄能器用于回收重力势能，额定压力分别为3、5和7 MPa，分别与不同轿厢载荷相对应，即：1）两侧轿厢重力差在500 kg以内；2）两侧轿厢重力差在500～1 000 kg；3）两侧轿厢重力差在1 000～2 000 kg。为了节省篇幅，仅给出了轿厢满载2 000 kg的计算结果。

AMESim软件是一款多学科领域复杂系统建模与仿真平台，能够有效支持液压电梯仿真中系统的动态特性分析和能耗分析。本文使用AMESim搭建了电液混合驱动系统仿真模型，如图3所示。

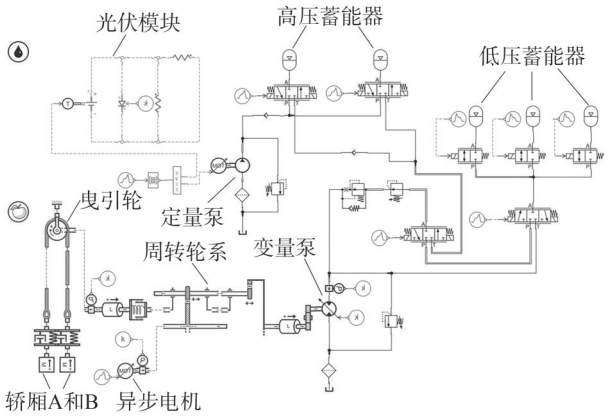


图3　AMESim仿真模型

Fig. 3　Simulation model establshed in AMESim

其他系统参数设置如下：定量泵转速为1 000 r/min，定量泵排量为100 cm^3/r，直流电机转速为1 000 r/min，高压蓄能器容积为200 L，额定最大压力为10 MPa，高压蓄能器预充压力6.5 MPa，低压蓄能器容积为100 L，最大压力7 MPa，预充压力2 MPa，变量泵/马达排量为700 cm^3/r，溢流阀开启压力15 MPa。

高压蓄能器释放压力能的仿真过程简要如下：首先进行仿真模型初始化，高压蓄能器充压至10 MPa，左侧轿厢静止于底部（位移为0）；仿真运行过程中，当t=52.0 s时，换向阀发送开启信号，在t=53.0 s时至100%开度，当t为53.0～57.3 s时，蓄能器释放压力能驱动轿厢上行，t=57.3 s时，换向阀发送关闭信号，在t=58.3 s时，阀门完全关闭，此部分仿真结束。

低压蓄能器释放压力能的仿真过程简要如下：当轿厢满载下行时，初始化低压蓄能器充压至2 MPa，左侧轿厢静止于顶部（位移为5 m）；在仿真运行阶段，t在0到1.0 s内，换向阀发送开启信号，t=1.0 s时至100%开度，在t为1.0～4.7 s期间，左侧轿厢下行蓄能器收集重力势能，t=4.7 s时，换向阀发送关闭信号，在t=5.3 s时阀门完全关闭，仿真结束。

电液混合驱动仿真简要如下：初始化对将低压蓄能器充压至7 MPa（充满），左侧轿厢静止于底部（位移为0）；在仿真运行阶段，t=40.0 s时换向阀发送开启信号，在t=41.0 s时至100%开度，与此同时异步电机开始运转至额定值，在t为41.0～45.0 s期间，蓄能器释放的压力能与电机提供的动力合成后驱动轿厢上行，t=45.0 s时，换向阀发送关闭信号，在t=46.0 s时，阀门完全关闭同时异步电机亦停止转动，仿真结束。

值得注意的是，在t为40.0 s～41.0 s的阀门开启阶段，系统优先通过电机（太阳轮）独立驱动差动轮系，使其功率和转速逐步提升至额定值，而液压马达（内齿圈）的功率、转速及流量在此阶段保持为0。这一控制策略的设定源于两方面核心机制：系统动力学协

调需求与动力源特性适配。差动轮系对输入端的功率耦合具有高度敏感性，若电机与液压马达同时启动，两者的瞬时扭矩差异可能引发行星架输出突变，导致机械振动甚至部件损伤。由于电机可通过电气控制系统实现高精度转速与扭矩调节，其快速响应特性（毫秒级动态）使其能够高效承担初始动力加载任务，从而确保系统平稳过渡至稳定工况；而液压马达因依赖油压建立和流量调节（响应延迟显著），需在电机达到额定状态后逐步介入，既避免了多变量同步控制的复杂性，又减少了液压系统空载阶段的能量损耗与整体响应延迟。此分阶段协同策略本质上是基于动力源动态特性差异与系统稳定性需求的最优解。

3.1 满载上行工况下高压蓄能器释能分析

当高压侧蓄能器能量足以单独驱动电梯工作时，系统开始使用高压侧蓄能器单独驱动的工作方式。轿厢的运行速度曲线、周转轮系扭矩曲线、周转轮系转速曲线、液压马达输出功率曲线、液压马达流量曲线，以及高压蓄能器压力和气体容积变化如图4所示。

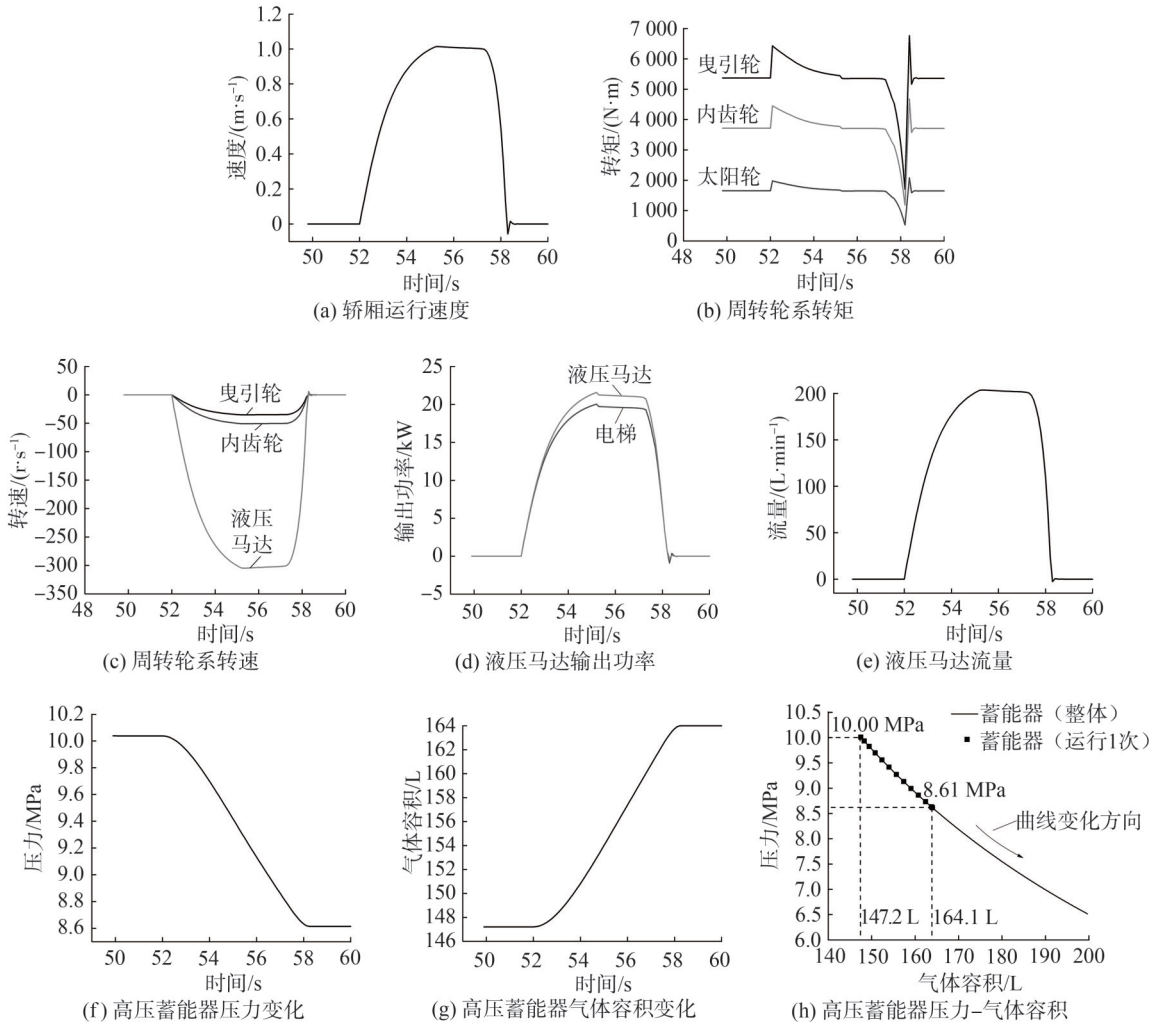


图4 高压蓄能器释放压力能仿真结果

Fig. 4 Simulation results under the condition of high pressure accumulator releases pressure energy

从图4可以看出：

1）电梯启动以后（图4(a)），从52.0～53.0 s，阀门开启，电梯速度慢慢上升；从53.0～57.3 s，电梯速度逐渐上升至额定速度并稳定在1 m/s；从57.3～58.3 s，阀门关闭，电梯运行速度顺势下降至0，之后电梯速度有小幅度的波动，对电梯运行并无大的影响，在可接受范围内。而且电梯在整个5 m的上升过程中基本保持匀速运动，表明驱动系统控制较为精准。

2）在电梯加速至1 m/s期间（图4(b)、(c)和(d)），其转矩（与加速度成正比）相比匀速运行时要高，且可以看出电梯运行的加速度逐渐降低至0；而在电梯刹车时（减速运行），其转矩骤降，可看出电梯的负加速度较大，电梯停下后，静转矩保持平衡状态，曳引轮、太阳轮、内齿轮的转矩分别为5 372、2 066、3 719 N·m，符合转矩分配比例。从52.0～53.0 s，阀门打开，液压马达的输出功率逐渐增大；从53.0～57.3 s，随着液压系统的高压与高流量共同作用，液压马达的输出功率逐渐上升并稳定在21.0 kW；从57.3～58.3 s，阀门关闭，液压马达的

输出功率随之降为0。当电梯运行速度为1 m/s时，其输出功率一直保持在19.7 kW左右，符合2 000 kg载重运行所需功率，其中，电梯的输出功率曲线与液压马达的输出功率曲线始终保持一致变化，且由于功率损耗低于马达输出功率，符合实际情况。

3）在52.0～58.3 s的电梯运行周期内，高压蓄能器的压力从最高值10.00 MPa匀速平稳下降至8.61 MPa（图4(f)），未出现明显压力波动，表明能量释放过程稳定可控。与此同步，图4(g)显示，囊内气体容积从初始的147.2 L匀速增加至164.1 L，容积变化曲线与压力下降曲线呈严格的线性对应关系。图4(h)中，高压蓄能器中压力与气体容量变化关系呈现非线性，满载轿厢上行一次耗能（图4(h)中以实心小方块表示）约占额定储能（图4(h)中以实线表示）的1/3左右，即一个高压蓄能器可供满载轿厢上行3次。

3.2　满载下行工况下低压蓄能器储能分析

当轿厢满载下行时，系统开始采用低压蓄能器将载客的重力势能转换为压力能存储。

轿厢的运行速度曲线、周转轮系扭矩曲线、周转轮系转速曲线、液压马达输出功率曲线、液压马达流量曲线，以及高压蓄能器压力和气体容积变化如图5所示，运行速度的负值代表轿厢向下运动。

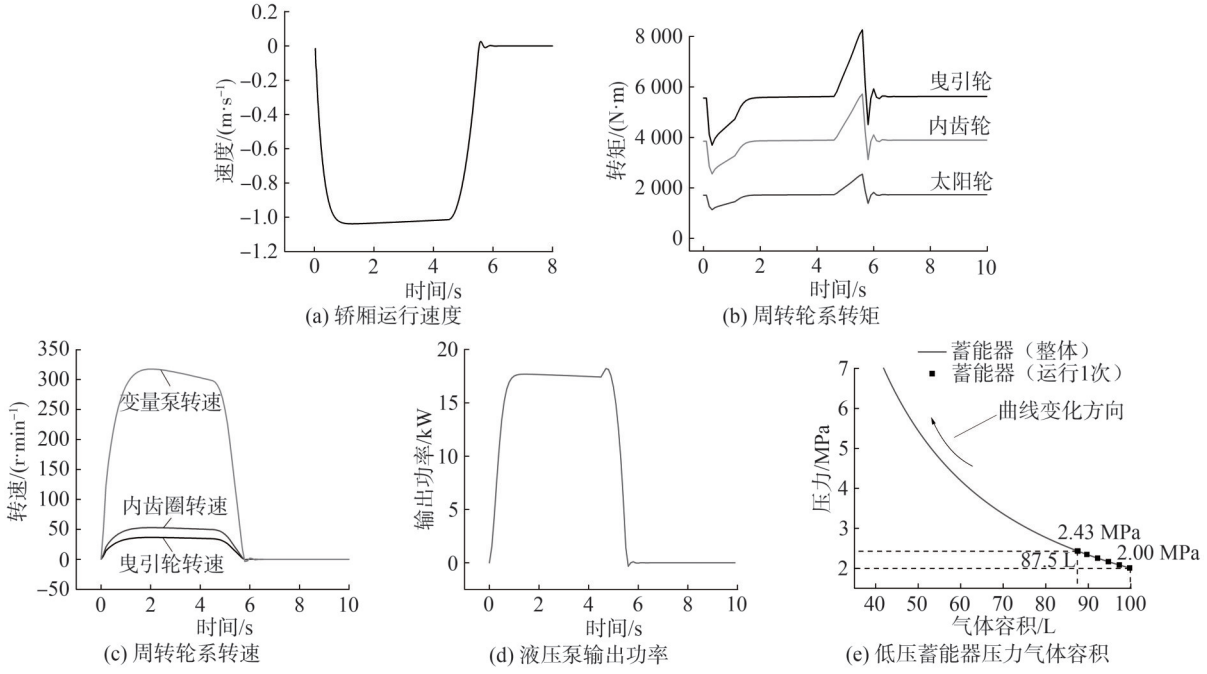


图5　低压蓄能器存储重力势能仿真结果

Fig. 5　Simulation results under the condition of low pressure accumulator storage gravitational potential energy

从图5可以看出：1）轿厢处于下行状态时，一旦液压系统控制阀开启，轿厢立刻从静止状态进入到1 m/s的平稳速度运行，从静止到稳定速度的过渡时间相对轿厢上行的过渡时间小很多，也侧面表明下行速度的启动加速度较大，对乘坐的舒适性有影响。2）周转轮系中各部件运行速度较为平稳，转速稳定后，惯性力矩消失，系统转矩逐渐上升至理论平衡值；而当电梯减速期间，行星架转矩从平衡值开始增大，以克服惯性力矩和负载；电梯停下后，静转矩保持平衡状态，曳引轮、太阳轮、内齿轮的转矩分别为5 618、1 728、3 889 N·m，符合转矩分配比例。3）低压蓄能器工作性能曲线与轿厢工作状态一致。4）回收的重力势能约占总储能的1/6，即可存储6次满载2 000 kg轿厢的重力势能。

3.3　电液混合驱动

当高压侧蓄能器能量不足以单独驱动电梯工作时，系统开始采用低压侧蓄能器与外部电机混合驱动的工作方式。轿厢的运行速度曲线、周转轮系转矩曲线、周转轮系转速曲线、周转轮系功率变化曲线，以及低压蓄能器压力和气体容积变化曲线如图6所示。

从图6可以看出，在两轿厢质量差为2 000 kg的工况下，天桥直梯系统运行稳定。

1）电梯启动后（图6(a)），阀门于40.0～41.0 s期间开启，电梯速度平稳上升，随后在41.0～45.0 s阶段，电梯逐渐达到额定速度并维持1 m/s匀速运行，至45.0～46.3 s阀门关闭阶段，电梯速度随之归零，全程5 m提升运动轨迹平滑，仅阀门关闭后出现微量可控波动。同步监测数据显示（图6(e)和(f)），蓄能器在6.3 s运行周期内压力从7.00 MPa降至5.62 MPa，囊内气体容积同步由41.9 L逐渐扩展至48.9 L，与其压力–容积变化曲线关系符合，符合PVT气体状态方程揭示的蓄能器气体膨胀规律。

2）在41.0～45.0 s期间，图6(d)中液压马达的功

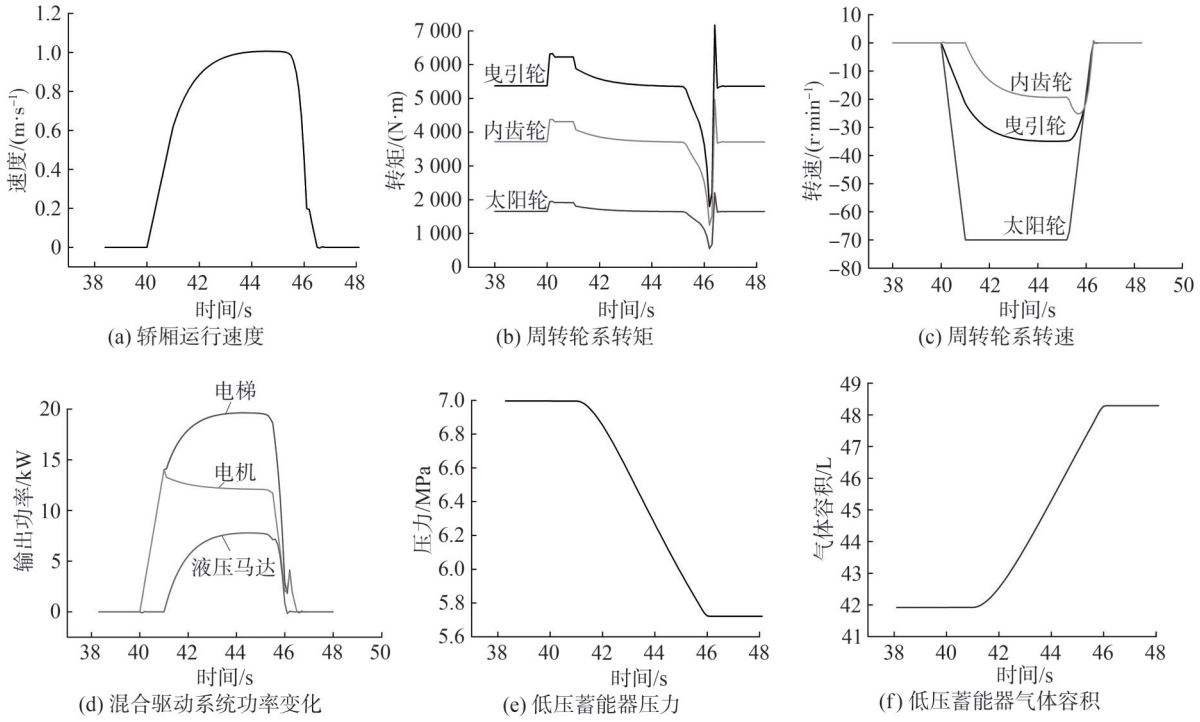


图6 电液混合驱动仿真结果

Fig. 6 Simulation results of electro-hydraulic hybrid drive

率随着系统流量变化逐渐增大并稳定在额定值7.7 kW,与电机额定输出功率12.3 kW合成后输出至电梯,在此期间差动轮系转矩、转速和系统工作压力等均符合功率输出曲线;在45.0～46.3 s期间,液压系统阀门逐渐关闭,同时外部电机也慢慢停转,此时系统整体功率缓缓降低至0,但液压马达功率有一下突变,与其流量和工作压力相符,这是由于阀门关闭时,流道截面积减小导致局部流速剧增(流量冲击),根据伯努利原理,流速上升会引发压力骤降(低压瞬态);随后,因流量受阻,系统背压升高,压力反弹至新平衡点。

3.4 光伏发电分析

天桥直梯系统的光伏能量回收部分主要是在人行过街天桥顶部铺设光伏电池板,充分吸收白天的太阳能并转换为直流电能,随后,通过DC/DC功率转换模块进行电压适配,确保系统电压稳定在所需范围内。转换后的电能可根据系统需求进行灵活分配:一方面,可直接驱动直流电机运行,满足实时负载需求;另一方面,可将富余能量存储至超级电容器组中,实现能量的缓冲与储备。

光伏发电量与光伏电池板的铺设面积、光伏板效率、日照标准小时数和系统损耗有关,城市中常规人行过街天桥占地面积一般为100～300 m^2。这类天桥通常能满足基本的行人过街需求,桥面宽度为3～5 m,长度为30～60 m,桥面面积为90～300 m^2。本文以西安市内的一座铺设光伏面积为150 m^2的人行过街天桥为例计算其日发电量。光伏组件装机容量为:

$$P_s = AP_1 \tag{40}$$

式中:P_s为光伏组件总功率;A为光伏电池板铺设面积,A=150 m^2;P_1为常见光伏组件的功率密度,约为100～150 W/m^2,本文P_1=120 W/m^2。

日理论发电量计算式为:

$$E_s = P_s H_h (1-\mu) \tag{41}$$

式中:E_s为光伏系统发电量;H_h为日标准小时数,西安日均峰值日照时数约为3.8 h/d;μ为系统损耗,包括逆变器效率(约95%)、线损(3%)、灰尘遮挡(5%)等,综合损耗按20%计算。

该光伏系统的日发电量为54.72 kW·h,但是在光伏发电系统中,DC/DC功率转换模块和超级电容器的能量存储过程会产生一定损耗,由超级电容器为电机提供能量给高压蓄能器补能,也会有部分损耗,故天桥直梯系统实际可使用能量为:

$$E_{eff} = P_s \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \tag{42}$$

式中:E_{eff}为补充到高压蓄能器之后的总能量;η_1为DC/DC功率转换模块效率,η_1=0.95;η_2为直流电机效率,η_2=0.85;η_3为定量泵效率,η_3=0.75;η_4为管路及阀门损耗,η_4=0.95。由式(42)可计算出每日天桥直梯系统实际可使用能量(实际补充到蓄能器的能量)为31.48 kW·h。

结合仿真结果可知,释能状况下电梯满载2 000 kg

上行一趟高压蓄能器释放能量为156.00 kJ，而蓄能工况下电梯满载下行一趟低压蓄能器回收能量约为38.71 kJ；假设在10 min内，该天桥直梯共计满载上行与下行各10趟，那么其消耗能量与回收能量分别为1560.00 kJ和387.10 kJ，天桥直梯系统回收重力势能的节能率为24.8%，假定直梯此时处于光照下（平均光照时间为3.8 h/d），在10 min内光伏系统平均为高压蓄能器补充的能量为0.219 kW·h，也就是788.40 kJ，天桥直梯系统光伏部分为系统提供的节能率为75.3%，有效节省了电梯运行所需能量，如果将3.8 h的光伏能量平均到直梯运行的24.0 h内，节能率也会大大降低，因此，比较合理的计算方法应该按照往年季节的光照数据进行计算。上述研究数据均为理论计算，如果投入使用，不仅需在储能方面引入控制方法（如增加低压蓄能器的数量和设定不同的额定压力，以及时存储少数乘客产生的重力势能），还需进行不同载荷工况的实验研究工作。

4　结　论

本文从将乘客下行过程中的重力势能回收再利用的角度出发，提出了一种融合太阳能补能的、电液混合驱动的新型直梯传动系统，进行了动力学建模和仿真计算，主要结论如下：

1）新型直梯系统在轿厢满载2 000 kg时，在高压蓄能器释放压力能（轿厢上行）工况、低压蓄能器存储重力势能（轿厢满载下行）工况下，一个高压蓄能器可供满载2 000 kg轿厢上行约3次，额定7 MPa的低压蓄能器可存储约6次2 000 kg轿厢下行产生的重力势能。

2）蓄能器单独供能和电液混合驱动工况下，在启停过程中，轿厢的位移和速度曲线过渡良好，稳定运行速度基本保持在1 m/s左右。电液混合驱动模式下，电机功率始终大于液压马达功率，运行过程中电机输出功率逐渐减小，液压马达输出功率逐渐增加，稳定运行阶段，电机输出功率与液压马达输出功率比值为6∶4。

3）仅使用高压蓄能器供能的情况下，本系统中重力势能的有效回收效率达到了24.8%；电液混合驱动模式下系统的节能率约为40.0%；如果计入每日光伏发电，本文的新型直梯系统的节能率提升至75.5%。

参考文献：

[1] Kavianpour S,Haghighi F,Sheykhfard A,et al.Assessing the risk of pedestrian crossing behavior on suburban roads using structural equation model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition), 2024, 11(5): 853–866.

[2] Ding Bao, Zhang Yongming, Peng Xiyuan, et al. A hybrid approach for the analysis and prediction of elevator passenger flow in an office building[J]. Automation in Construction,2013,35:69–78.

[3] Ang Jiahui, Yusup Y, Ahmad–Zaki S, et al. Comprehensive energy consumption of elevator systems based on hybrid approach of measurement and calculation in low- and high-rise buildings of tropical climate towards energy efficiency[J].Sustainability,2022,14(8):4779.

[4] Maamir M,Charrouf O,Betka A,et al.Neural network power management for hybrid electric elevator application[J]. Mathematics and Computers in Simulation,2020,167:155–175.

[5] Zhao Bin,Quan Zhongyi,Li Yunwei,et al.A hybrid-driven elevator system with energy regeneration and safety enhancement[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020,67(9):7715–7726.

[6] Liu Hang, Lang Baohua. Design of the elevator feeding control system based on PWM rectifier[J].Ship Electronic Engineering,2019,39(1):60–64.[刘航,郎宝华.基于PWM整流器的电梯能馈控制系统的设计仿真[J].舰船电子工程,2019,39(1):60–64.]

[7] Wan Jianru,Han Weiwei,Huang Shaolun,et al.Research and application to super-capacitor for elevator energy-saving[J].Electric Machines & Control,2015,19(6):55–60.

[8] Plangklang B,Kantawong S.Study of power generation for permanent magnet motor elevator by energy regenerative unit(EERU)[J].Energy Procedia,2014,56:591–597.

[9] 古川实,白土正.电力再生装置及电力再生方法、蓄电系统及蓄电方法、以及高频波装置:CN201080048960.5[P].2012–09–12.

[10] Tominaga S,Suga I,Araki H,et al.Development of energy-saving elevator using regenerated power storage system [C]//Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002.Osaka:IEEE,2002:890–895.

[11] Mou Yaorong, Shi Rongliang, Huang Ji, et al. Application and analysis of supercapacitor energy storage device in elevator energy saving[J].China Elevator,2023,34(3):13–16.[牟耀荣,石荣亮,黄冀,等.超级电容储能装置在电梯节能中的应用与分析[J].中国电梯,2023,34(3):13–16.]

[12] Qi Guanran,Yang Shuzhen,Li Min,et al.Study on traction elevator accumulator energy storage hydraulic energy saving system and capacitor energy consumption[J].Machine Tool & Hydraulics,2023,51(3):146–150.[齐冠然,杨淑贞,李民,等.曳引电梯蓄能器储能液压节能系统及电容能耗研究[J].机床与液压,2023,51(3):146–150.]

[13] Chang Xiaoqing,Feng Shuangchang.Research on energy-saving application of elevator energy feedback device[J]. Hoisting and Conveying Machinery,2022(17):74–77.[常晓清,冯双昌.电梯能量回馈装置的节能应用研究[J].起重

运输机械,2022(17):74–77.]
[14] Dalala Z,Alwahsh T,Saadeh O.Energy recovery control in elevators with automatic rescue application[J]. Journal of Energy Storage,2021,43:103168.
[15] Wang Sujuan, Wu Xiaotao. Research on dispatching algorithm of elevator group control system[J]. Modern Electronics Technique,2022,45(11):104–107.[王素娟,吴小滔. 电梯群控系统调度算法研究[J]. 现代电子技术,2022,45(11):104–107.
[16] Ou Zhe. Analysis of energy-saving optimized dispatching control strategy for elevator group control system[J].Automation Application,2020,61(1):56–58.[欧哲. 电梯群控系统节能优化调度控制策略分析[J]. 自动化应用,2020,61(1):56–58.
[17] Yang Jian, Liu Bo, Zhang Tiezhu, et al. Application of energy conversion and integration technologies based on electro-hydraulic hybrid power systems: A review[J]. Energy Conversion and Management,2022,272:116372.
[18] Liao Junzhang,Yang Yang,Luo Ronghua,et al.Energy management strategy of four-wheel drive SUV electric-hydraulic hybrid(EHH) power system based on optimal instantaneous efficiency[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments,2022,52:102139.
[19] Fresia P,Rundo M,Padovani D,et al.Combined speed control and centralized power supply for hybrid energy-efficient mobile hydraulics[J].Automation in Construction,2022,140:104337.
[20] Zhu Xiaoming,Hua Guorong,Yang Lihong. Design of hydraulic system for telescopic jacks of hydraulic lift and its simulation research[J]. China Elevator,2022,33(15): 6–10.[朱小明,华国荣,杨丽红. 电梯多级缸液压系统的设计与仿真研究[J]. 中国电梯,2022,33(15):6–10.]
[21] Wang Wenfeng,Qin Runjie. Analysis on hydraulic control valve group of hydraulic lifts[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2020,49(11):247–249.[王文峰,秦润杰. 液压电梯液压控制阀组分析[J]. 机电工程技术,2020,49(11):247–249.]
[22] Zhang Jie, Zhao Bin, Hao Yunxiao. Research on energy-saving system of electro-hydraulic hybrid drive traction elevator based on variable displacement pump/motor[J].Chinese Hydraulics & Pneumatics,2020,44(9):153–160.[张杰,赵斌,郝云晓. 基于变排量液压泵/马达的电液混合驱动曳引电梯节能系统研究[J]. 液压与气动,2020,44(9):153–160.]
[23] Fateh M M,Amerian M.Guaranteed-stability adaptive fuzzy control of a hydraulic elevator[J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics,2013,6(3):252–271.
[24] Celik K F. A load temperature compensation method for green hydraulic lifts by means of inverters[J]. Elevator World,2013,61(2):58–71.
[25] 吴子英,户哲. 一种天桥用能量回收式电梯:CN202110853622.9[P].2023–02–10.
[26] Yang Lu. Capacity optimal configuration of hybrid energy storage system in stand-alone PV systems[J]. Journal of Kaili University,2023,41(3):13–21.[杨露. 独立光伏发电系统中混合储能系统的优化配置策略[J]. 凯里学院学报,2023,41(3):13–21.]
[27] Lin Jianjie.Hydraulic elevator of energy-saving with the closed circuits[D].Hangzhou:Zhejiang University,2005.[林建杰. 液压电梯闭式回路节能型电液控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.]
[28] Zhang Jun.Discussion on NXQ bladder accumulator[J]. Chemical Enterprise Management,2019(8):133–134.[张军. 浅谈 NXQ 型囊式蓄能器[J]. 化工管理,2019(8):133–134.]
[29] He Chang, He Lile. Design of torque-power coupling devices based on differential planetary gears[J]. Coal Mine Machinery,2015,36(5):28–30.[贺畅,贺利乐. 基于差动轮系的转矩动力合成装置的设计[J]. 煤矿机械,2015,36(5):28–30.]

Research on the Energy Conversion of New Electro-hydraulic Hybrid Drive System for the Pedestrian Overpass Elevator Device

WU Ziying, *CHAO Guoqiang*, *WANG Jingnan*, *WU Haitao*, *ZHANG Yuxuan*

(School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract:

Objective During elevator ascent, electric energy is converted into positive mechanical energy by overcoming passengers' gravitational energy in the upward cabins. During descent, electric energy is converted into negative mechanical energy to balance passengers' gravitational energy in the downward cabins. This wastes the passengers' gravitational energy and the electric energy during cabin descent. In this study, we propose a new electrohydraulic hybrid drive system for a pedestrian overpass elevator that uses high-pressure/low-pressure accumulators and a photovoltaic power generation system to recycle and reuse the passengers' gravitational energy.

Methods The proposed electrohydraulic hybrid drive system comprises a two-degree-of-freedom planetary gear train, a hydraulic drive system, an AC motor drive, and a photovoltaic power generation device. In the traction system, the planetary gear train drives the traction sheave and passenger cabins. Its two inputs are connected to the AC and hydraulic motors, and its output connects to the traction sheave. The planetary gear train

enables three driving patterns of the traction sheave: 1) driven only by an AC motor, equivalent to a conventional elevator; 2) driven only by a hydraulic motor supplied by high-pressure (recycles solar energy) and low-pressure (recycles and reuses passengers' gravitational energy) accumulators; 3) driven by an AC motor and a hydraulic motor, which operates as a hybrid drive pattern. The hydraulic drive system uses the mechanical/hydraulic energy conversion function of hydraulic pumps/motors to convert the gravitational potential energy of the descending pedestrians into pressure energy and store it in a low-pressure accumulator. Three low-pressure accumulator levels are used to store the different energy levels converted from different levels of passengers' gravitational energy. The hydraulic energy stored in the low-pressure accumulator can also be converted to mechanical energy to lift the cabins. To enhance the energy transfer and storage efficiency of gravitational potential energy, three levels of low-pressure accumulators are employed to store the transferred gravitational potential energy. The rated pressure levels of the three low-pressure accumulators are 3 MPa, 5 MPa, and 7 MPa, corresponding to passenger load ranges of 0–500 kg, 500–1 000 kg, and 1 000–2 000 kg, respectively. A photovoltaic power-generation device is installed on the top of the pedestrian overpass. The solar energy is directly converted to hydraulic energy and stored in the high-pressure accumulator, providing additional energy supplementation for the new electrohydraulic hybrid drive system. Three high-pressure accumulator levels are employed to store solar-generated energy. Comprehensive mathematical models considering the photovoltaic power generation device, accumulator, hydraulic pump/motor, and traction-wheel mechanical transmission system are established.

Results and Discussions A new electrohydraulic hybrid drive system is designed. The maximum loads of cabin A and cabin B are 2 000 kg each. The height between the overpass pavement and ground is 5 m. The rated pressure of each high-pressure accumulator is 10 MPa. The high- and low-pressure accumulator volumes are 200 L and 100 L, respectively. The fixed-displacement pump's rated speed is 1 000 r/min, and the rated revolution speed of the DC motor is 1 000 r/min. The common power density of the photovoltaic board is 100–150 W/m^2. Taking the pedestrian overpass at Xi'an University of Technology in Xi'an, China, as an example, adding a photovoltaic power board would require an area of approximately 150 m^2. The simulations are implemented using the AMESim software. Three types of working conditions are simulated using AMESim.

1) Under the high-pressure accumulator releasing pressure energy (cabin upward) condition, one high-pressure accumulator can supply the cabin with a 2 000 kg load 2–3 times. The three levels of the low-pressure accumulator are designed to accommodate different amounts of gravitational energy. A low-pressure accumulator rated at 7 MPa can store 6 times the gravitational energy caused by 2 000 kg. The cabin can move from the ground to the overpass pavement at 1 m/s in approximately 6 s, providing an acceptable transitional operating velocity.

2) Under the low-pressure accumulator storing gravity potential energy (cabin downward) condition, the cabin's transition from startup to smooth operation occurs over 0–1.0 s, and its transition from smooth operation to stopping occurs over 4.5–5.9 s. The cabin maintains a stable operating speed of 1 m/s over 1.0–4.5 s. The acceleration and deceleration curves also provide a comfortable ride for the passengers. The pressure energy converted from recycled gravitational energy is approximately one-sixth of that of a single low-pressure accumulator.

3) Under the hybrid drive condition, the cabin's operating-speed pattern is identical to that under the high-pressure accumulator drive mode, indicating that the hybrid drive mode works well. Fluctuations appear during the transitions from startup to smooth operation and from smooth operation to stopping. The AC motor's output power is approximately 12.3 kW, and it responds about 1.0 s faster than the hydraulic motor. From 40.0–41.0 s, the AC motor is 100% in the hybrid drive mode. As cabin speed increases, the AC motor's output power decreases and the hydraulic motor's output power increases. The AC motor's output power exceeds that of the hydraulic motor from 41.0–45.5 s. As cabin speed decreases, the AC motor's output power is lower than the hydraulic motor's output power from 45.5–46.5 s. The output powers of the two motors are balanced at 45.25 s.

Conclusions The main conclusions are summarized as follows: based on AMESim simulations, during high-pressure accumulator discharge of pressure energy (cabin ascent), the energy consumed to lift a cabin carrying 2 000 kg is approximately 156.00 kJ over 1.0 s. During the descent of a cabin carrying 2 000 kg, 38.71 kJ of gravitational energy is recycled over 1 s. The proposed elevator can complete 10 cycles continuously over 10 minutes. The energy conservation efficiency is 38.71/156 = 24.8%, excluding the solar energy from the photovoltaic board. The recycled solar energy converted into hydraulic pressure energy is 31.48 kW·h. Assuming the proposed elevator operates over an average sunshine duration of 3.8 h, the recycled solar energy produced over 10 minutes is 0.219 kW·h (788.4 kJ). Including the photovoltaic board's solar energy, energy conservation efficiency can reach (387.1+788.4)/1 560 = 75.3%. These results can serve as a reference for the innovative design and energy-saving operation of pedestrian overpass elevators.

Key words: pedestrian overpass; photovoltaic power generation; planetary gear train; electro-hydraulic hybrid; gravitational energy

（编辑　吴芝明）

引用格式: Wu Ziying, Chao Guoqiang, Wang Jingnan, et al. Research on the energy conversion of new electro-hydraulic hybrid drive system for the pedestrian overpass elevator device[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(6): 316–327. [吴子英，晁国强，王婧楠，等. 人行过街天桥直梯装置新型电液混合驱动系统能量转换研究[J]. 工程科学与技术，2026，58(6)：316–327.]