

基于滑模观测器的人员自动升降机双向传动控制方法

王道煜[†] 胡伟 郑明亮

(十堰巨能电力集团有限责任公司, 十堰 442000)

摘要 为提升人员自动升降机双向传动冲突下的换向运行稳定控制效果,提出基于滑模观测器的人员自动升降机双向传动控制方法.该方法首先构建双向传动动力学模型,得到二阶矩阵形式的人员自动升降机运动方程;然后设计滑模观测器,实现人员自动升降机双向传动状态的准确估计,以冲击度、能耗、响应速度作为优化控制目标构建优化控制函数,结合滑模观测器状态估计结果设计反馈控制律,实现人员自动升降机双向传动控制.实验结果表明,该方法在不同工况下的控制指令切换能够有效抑制人员自动升降机抖振,降低运行冲击度至 6 m/s^2 以下,并提升响应速度和运行舒适性,具有良好的控制效果.

关键词 滑模观测器, 自动升降机, 双向传动, 释放时序, 控制方法

中图分类号:TH211

文献标志码:A

Bidirectional Transmission Control Method for Personnel Automatic Elevators Based on Sliding Mode Observer

Wang Daoyu[†] Hu Wei Zheng Mingliang

(Shiyan Jinneng Electric Power Group Co., Ltd., Shiyan 442000, China)

Abstract To improve the stability control effect of directional operation under the conflict of bidirectional transmission in personnel automatic elevators, a sliding mode observer based bidirectional transmission control method for personnel automatic elevators is proposed. This method first constructs a bidirectional transmission dynamic model and obtains the second-order matrix form of the motion equation of the personnel automatic elevator; Then, a sliding mode observer is designed to achieve accurate estimation of the bidirectional transmission state of the personnel automatic elevator. The optimization control function is constructed with impact degree, energy consumption, and response speed as the optimization control objectives. Based on the state estimation results of the sliding mode observer, a feedback control law is designed to achieve bidirectional transmission control of the personnel automatic elevator. The experimental results show that the control command switching of this method can effectively suppress the shaking of the personnel automatic elevator under different working conditions, reduce the operating impact to below 6 m/s^2 , and improve the response speed and operating comfort, with good control effect.

Key words sliding mode observer, automatic elevator, bidirectional transmission, release timing, control method

引言

现代大型公共场所人员持续增长,对人员自动升降机的需求越来越大,其高效平稳运行已成为行业内重点研究课题^[1].人员自动升降机双向传动系统在机场、车站及大型商超等场所中应用广泛,但需注意各场所的具体应用场景可能存在差异,人员升降机传动单元运行时会出现冲突现象,导致运行效率差、能耗过高等情况出现,无法满足多场景人员运输需求^[2,3].目前已有许多学者研究利用电机控制方式实现升降机的时序控制,如卢宁等人^[4]提出升降机多电机同步控制方法,该方法以主电机设定参数为基准,从电机通过编码器、电流传感器实时采集运行数据,经控制器对比主从偏差后,通过变频调速或矢量控制调节从电机输出,动态修正转速、扭矩差异,确保多电机出力一致,实现升降机的电梯控制.但该方法对主电机依赖性强,若主电机发生故障或出现参数漂移,将导致整个系统同步失效.霍士翔等人^[5]提出同步电机电流控制方法,将定子电流分解为励磁分量和转矩分量,通过比例-积分(PID)调节器独立控制励磁分量和转矩分量,再经逆变换生成脉冲宽度调制(PWM)信号驱动功率模块,实现电机控制.直接转矩控制的转矩脉动较大,开关频率不固定,需要高频采样才能保证控制精度,对应用环境要求极高,因而该方法适用性不佳.贺明智等人^[6]提出独立充放时序单电感多输出(SIDO)开关变换器电流型变频控制方法,首先对各输出支路的电容电流及输出电压进行实时检测.通过将检测到的电容电流信号进行加法运算,输出电压信号与预设基准值送入误差放大器,产生相应控制信号.这些信号再经脉冲信号产生器、触发器处理,生成精确控制主开关管与支路开关管导通和关断的脉冲信号,从而实现对各输出支路的独立精准调节.但在负载突变等动态工况下,控制的实时响应速度可能不足,难以快速调整输出以满足负载需求,导致输出电压出现较大瞬态变化,影响用电设备正常工作.吴春等人^[7]提出永磁同步电机有限时间速度控制方法,该方法设计包含幂次项的滑模面,使系统状态在有限时间内收敛至滑模面.控制律引入快速终端滑模项与扰动补偿项,通过观测器实时估算负载扰动与参数摄动,生成 q 轴电流指令,经电流环跟踪实现速度闭环调节.但有限时间控制律的非线性特性使系统稳定性分析复杂化,需

通过 Lyapunov 函数严格证明,工程化应用难度较高.

滑模观测器是一种状态估计工具,通过连续的控制律,使控制目标的状态保持在特定超平面上滑动,实现控制目标状态的连续准确感知.滑模观测器对观测系统的多参数干扰和外部干扰具备较强的抑制能力^[8,9].在此以滑模观测器为基础,研究基于滑模观测器的人员自动升降机双向传动控制方法,实时感知升降机负载和系统状态变化,并据此动态优化双向传动系统中制动器释放与电机转矩施加的关键时序点,其最终目标是实现升降机在换向过程中无冲击、平滑、快速、节能且高度鲁棒的运行.

1 人员自动升降机双向传动控制

1.1 人员自动升降机双向传动动力学建模

针对人员自动升降机双向传动场景,构建其双向传动动力学模型示意图如图1所示,明确核心传动部件及参数.

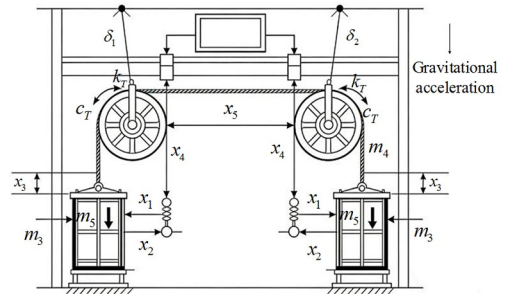


图1 人员自动升降机双向传动理论模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the theoretical model for bidirectional transmission in personnel automatic elevators

图1中,轿厢及轿厢侧补偿链和随行电缆总质量为 m_4 ;轿厢及载重总质量为 m_5 ,是系统主要负载.弹性与阻尼元件:曳引系统抗扭刚度 k_T 、等效转动阻尼 c_T ,反映曳引轮等传动部件抗扭变形及能量耗散特性;曳引机底座橡胶刚度 k_{10} 、阻尼 c_{10} ,用于缓冲曳引机振动;曳引轮:质量 m_1 、转动惯量 Γ_1 、转动半径 ζ_1 ,是动力传递关键部件,实现旋转运动与轿厢直线运动的转换.导向轮:质量 m_2 、转动惯量 Γ_2 、转动半径 ζ_2 ,用于辅助曳引绳导向,调整传动方向.位移与运动变量: $x_1 \sim x_5$ 分别描述各部件直线运动位移; δ_1 、 δ_2 对应曳引轮、导向轮的角位移,反映旋转部件转动情况.对重端:对重及对重侧补偿链总质量 m_3 ,其运动影响系统动态特性.曳引轮与导向轮间曳引绳刚度 k_{11} 、阻尼 c_{11} ,体现

曳引绳弹性及阻尼;导向轮承重梁刚度 k_2 、阻尼 c_2 ,对导向轮振动起约束与耗能作用;轿厢底部减振橡胶刚度 k_5 、阻尼 c_5 ,这些元件共同影响系统振动与能量传递.采用拉格朗日方程构建 $\varphi_1 \sim \varphi_2$ 动力学关系,其基本形式为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\epsilon}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \epsilon_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\epsilon}_i} + \frac{\partial U}{\partial \epsilon_i} = E_i \quad (1)$$

式中, T 为系统总动能,涵盖惯性元件(如曳引轮、导向轮、轿厢、对重等)的动能,以及曳引绳运动产生的动能,反映系统运动的能量储备; D 是耗散函数,描述系统因阻尼、摩擦等因素导致的能量耗散,体现能量损失特性. U 代表总势能,包含弹性元件(如曳引绳、绳头弹簧、减振橡胶等)变形产生的弹性势能^[10],以及各部件重力势能,反映系统势能存储与转化; ϵ_i 为第 i 自由度的广义位移,用于统一描述系统各部件的独立运动状态, $\dot{\epsilon}_i$ 为第 i 自由度的广义位移线速度; E_i 是对应广义位移的广义外力,包含电机驱动力、重力等外力作用.

基于公式(1)的拉格朗日元件广义位移 ϵ_i ,公式(2)进一步针对轿厢侧曳引绳的微元段运动进行建模.假设绳长 l_1 ,在距轿厢 y 处,考虑曳引绳与轿厢、曳引轮的运动关联,将曳引绳上任意点的广义位移 ϵ_i 细化为轿厢位移 x_4 、曳引轮位移 x_1 和角位移 δ_1 ,计算曳引绳与系统主要部件的运动耦合位移与速度,为动能计算提供空间分布参数:

$$\begin{cases} x_{1,y} = x_4 + \frac{y(x_1 + \zeta_1 \delta_1 - x_4)}{l_1} \\ \dot{x}_{1,y} = \dot{x}_4 + \frac{y(\dot{x}_1 + \zeta_1 \dot{\delta}_1 - \dot{x}_4)}{l_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\dot{x}_{1,y}$ 为轿厢侧曳引绳上距离轿厢 y 处微元段的线速度; \dot{x}_4 为轿厢的线速度; \dot{x}_1 为曳引轮的线速度; $\dot{\delta}_1$ 为曳引轮的角速度.

利用公式(2)的曳引绳速度,考虑绳的线密度 ρ ,积分计算轿厢侧动能 Φ_{11} .

$$\Phi_{11} = \frac{\rho l_1 (\dot{x}_4^2 + \dot{x}_4 \dot{x}_{1,y} + \dot{x}_4 \zeta_1 \dot{\delta}_1 + \dot{x}_1^2 + 2\dot{x}_{1,y} \zeta_1 \dot{\delta}_1 + \zeta_1^2 \dot{\delta}_1^2)}{2 \dot{x}_{1,y}} \quad (3)$$

其中,将公式(2)的分布质量动能集中表达,凸显了曳引绳动能与系统平动和转动速度的二次关系,是总动能的重要组成部分.

同理,推导曳引轮与导向轮间曳引绳(长度 l_2)、对重侧曳引绳(长度 l_3)的动能 Φ_{12} 、 Φ_{13} .

综合各惯性部件(曳引轮、导向轮、轿厢、对重等)的动能^[11],以及公式(3)计算出的曳引绳动能 Φ_{11} 、 Φ_{12} 、 Φ_{13} ,计算人员自动升降机总动能整合系统总动能 Φ :

$$\Phi = \sum_{i=1}^5 \frac{m_i \dot{x}_i^2}{2} + \frac{\Gamma_1 \dot{\delta}_1^2}{2} + \frac{\Gamma_2 \dot{\delta}_2^2}{2} + \Phi_{11} + \Phi_{12} + \Phi_{13} \quad (4)$$

其中, $m_i \dot{x}_i^2/2$ 是各直线运动部件 $m_1 \sim m_5$ 的平动动能, $\Gamma_1 \dot{\delta}_1^2/2$ 、 $\Gamma_2 \dot{\delta}_2^2/2$ 分别是曳引轮、导向轮的转动动能.

公式(4)的总动能为理想动能,未考虑实际运动中的损失,因此为了量化系统在运动过程中的动能损失机制,将公式(1)中的耗散函数 D 表示为曳引系统阻尼、底座橡胶阻尼、曳引绳阻尼等能量耗散项与对应速度乘积的积分形式,表达公式如下:

$$D = \frac{c_T \dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{c_{10} \dot{x}_1^2}{2} + \frac{c_{11} [(\dot{x}_1 + \zeta_1 \dot{\delta}_1) - (\dot{x}_4 + \zeta_1 \dot{\delta}_1)]^2}{2} + \dots + \frac{c_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2}{2} \quad (5)$$

式中,每一项对应一个阻尼元件的能量耗散,体现阻尼力与相对速度的关联,反映系统能量损失.

在升降机动能之外,曳引绳、弹簧等元件的变形以及各部件质量与高度,共同构成了势能.因此用总势能 U 综合弹性势能和重力势能两部分.其中弹性势能由曳引绳、绳头弹簧、减振橡胶等弹性元件变形产生^[12-14],重力势能由各部件(曳引轮、导向轮、轿厢、对重、载重等)的位置高度决定,与质量、重力加速度及位置坐标相关.总势能 U 为:

$$U = \frac{k_T \delta_1^2}{2} + \frac{k_{10} x_1^2}{2} + \frac{k_{11} [(x_1 + \zeta_1 \delta_1) - (x_4 + \zeta_1 \delta_1)]^2}{2} + \dots + \frac{k_5 (x_5 - x_4)^2}{2} + \sum m_i g x_i \quad (6)$$

式中, $\sum m_i g x_i$ 为人员自动升降机重力势能, g 为重力加速度.

将公式(4)~(6)代入公式(1),经过整理可得到二阶矩阵形式的人员自动升降机运动方程:

$$\mathbf{M} \ddot{\boldsymbol{\epsilon}} + \mathbf{C} \dot{\boldsymbol{\epsilon}} + \mathbf{K} \boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{E} \quad (7)$$

式中, \mathbf{M} 为广义质量矩阵,反映系统各部件惯性特性对运动的影响,由各部件质量、转动惯量及曳引

绳分布质量等因素决定,反映系统惯性力与加速度的关系。 \mathbf{C} 是广义阻尼矩阵,描述系统因阻尼导致的能量耗散特性,与各阻尼元件的阻尼系数相关,反映阻尼力与速度的关系。 \mathbf{K} 为广义刚度矩阵,描述弹性元件的弹性恢复力特性,由各弹性元件的刚度系数决定,反映弹性力与位移的关系。 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是广义位移向量,具体为 $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \delta_1, \delta_2\}^T$,反映系统各部件的独立位移状态。 \mathbf{E} 为广义外力向量,包含电机施加的驱动力、各部件所受重力等外力作用,是系统运动的外力激励源; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 分别为广义加速度矩阵和广义速度矩阵。公式(7)所示的动力学运动方程,能够反映人员自动升降机双向传动过程中,曳引轮、导向轮、轿厢、对重等部件的多自由度耦合运动特性,明晰质量、阻尼、刚度与运动响应及外力之间的内在关联,可为后续滑模观测器设计、最优释放时序控制提供了关键的动力学理论依据。

1.2 滑模观测器构建

人员自动升降机双向动力系统里,并非所有状态都能直接测量,如轿厢/对重的瞬时加速度、曳引轮动态角速度等,很难用传感器直接高精度采集,而在最优释放时序控制时,需要人员自动升降机完整的状态反馈(位移、速度、加速度),因此构建滑模观测器,以 1.1 小节的人员自动升降机动力学方程公式(7)为基础,对人员自动升降机状态进行观测,用于后续自动升降机双向传动最优释放时序控制实时反馈。

将公式(7)中的广义位移向量 $\boldsymbol{\varepsilon} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \delta_1, \delta_2]^T$ 作为实际人员自动升降机输入状态,将观测器输出的估计位移向量 $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 作为观测器估计状态,则人员自动升降机状态误差向量 \mathbf{e}_ε 表达公式为:

$$\mathbf{e}_\varepsilon = \boldsymbol{\varepsilon} - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (8)$$

通过公式(8)的状态人员自动升降机误差向量,可表征观测值与真实值的偏差。

以公式(7)为基础,构建人员自动升降机滑模观测器的状态方程,表达公式如下:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{E} + \mathbf{K}_s \cdot \text{sign}(\mathbf{e}_\varepsilon) \quad (9)$$

式中, \mathbf{K}_s 为滑模切换增益矩阵; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数,强制误差沿滑模面收敛。

结合公式(8)的误差和误差导数,设计人员自动升降机滑模观测器滑模面,其表达公式如下:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}}_\varepsilon + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e}_\varepsilon \quad (10)$$

式中, \mathbf{s} 为滑模面向量; $\dot{\mathbf{e}}_\varepsilon$ 为人员自动升降机状态误差速度; $\boldsymbol{\Lambda}$ 为定对角矩阵。利用该滑模面约束公式(8)人员自动升降机状态误差收敛方向,让观测误差按预设规律减小。滑模观测器借助滑模切换增益矩阵,对模型不确定性、参数摄动和外部扰动具有极强的抑制能力。一旦人员自动升降机状态误差轨迹被驱至滑模面上,其后续运动将由滑模面方程完全决定,而不再受升降机系统内部参数变化或外部扰动的影响,只要这些扰动的上界包含在切换增益的设计范围内。即使在实际系统中质量 m_5 、阻尼 c_T 、刚度 k_T 等参数因时变因素而偏离其标称值,滑模观测器仍能保持对升降机位移、速度、加速度状态的准确估计,为后续控制提供可靠的反馈信息。

1.3 双向传动切换控制实现

人员自动升降机“释放时序”指双向传动切换时的关键动作时机,如上升→下降时,制动器释放、电机驱动力反向的时刻,需通过优化算法确定最优时刻^[15],以平衡冲击、响应及能耗。

以“上升→下降”切换为例,定义关键时序参数,令 t_1 表示电机驱动力开始减小的时刻; t_2 表示制动器开始预紧的时刻(避免冲击); t_3 为电机驱动力反向的时刻; t_4 为制动器完全释放的时刻(允许下降)。

设置人员自动升降机释放时序约束,表达公式为:

$$t_1 < t_2 < t_3 < t_4 \quad (11)$$

设置人员自动升降机释放时序的间隔为:

$$t_{i+1} - t_i \geq \tau_{\min} \quad (12)$$

式中, $i = 1, 2, 3, 4$; τ_{\min} 为机械响应最小时间阈值。

以公式(11)和(12)约束下的时序参数作为人员自动升降机释放时序优化变量,建立加权多目标最优释放时序优化函数 $J(t)$:

$$J(t) = \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 + \omega_3 J_3 \quad (13)$$

$$J_1 = \int_{t_1}^{t_4} (\boldsymbol{\varepsilon})^2 dt \quad (14)$$

$$J_2 = \int_{t_1}^{t_4} |u(t)| \cdot |\boldsymbol{\varepsilon}(t)| dt \quad (15)$$

$$J_3 = t_4 - t_1 \quad (16)$$

式中, $t = t_1, t_2, t_3, t_4$; J_1 为冲击度最小子目标函数; J_2 为能耗最低子目标函数; J_3 为响应最快子目标函数; $u(t)$ 为电机驱动力。

通过求解公式(13)能够得到人员自动升降机双向传动最优释放时序,然后结合1.2小节人员自动升降机滑模观测器的状态方程公式(10),设计人员自动升降机双向传动反馈控制律 $\{u\}$,表达式如下:

$$\{u\} = M\ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\text{ref}} + C\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\text{ref}} + K\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ref}} - K_s \cdot \text{sign}(\boldsymbol{\varepsilon} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) + \left(\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}\right)^T \quad (17)$$

式中, $\ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\text{ref}}$ 、 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\text{ref}}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ref}}$ 分别为多目标优化后的参考加速度、参考速度、参考位移向量; $\partial J / \partial \boldsymbol{\varepsilon}$ 为目标优化函数 J 对广义位移 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的梯度.公式(17)的最优控制律引入了基于滑模观测器状态的反馈项,实时补偿时变非线性因素下的模型失配和外部扰动引起的状态偏差,将升降机实际运动轨迹恢复至理想轨迹.引入优化目标的梯度项,通过优化冲击度、能耗等目标,约束了控制动作的幅值与变化率,避免了为追求快速跟踪而可能引发的控制量变化,从而平滑地克服非线性特性带来的控制误差,提升了控制鲁棒性.

然后将 $\{u\}$ 作为人员自动升降机电机转矩指令,将滑模反馈项输出作为人员自动升降机制动力矩/电流指令,实现人员自动升降机最优释放时序控制,能够有效应对升降机电载重变化、曳引绳刚度的时变特性和制动器静摩擦—动摩擦切换、电机转矩饱和等非线性因素.

2 实验

2.1 实验设置

以型号为XO-STAR的曳引式人员自动升降机作为实验对象,如图2所示,升降机详细参数如表1所示.



图2 曳引式人员自动升降机

Fig. 2 Traction-type automatic personnel lift

表1 XO-STAR曳引式人员自动升降机参数
Table 1 Parameters of XO-STAR traction personnel automatic elevator

Parameter name	Parameter values
Nominal load	800 kg
Nominal rated speed	1.5 m/s
Car size (width×depth×height)	1100 mm×1400 mm×2300 mm
Door opening size (width×height)	800 mm×2100 mm
Cableway dimensions (width×depth)	1700 mm×2000 mm
Top level height	4200 mm
Depth of pit	1600 mm
Power of the light guide	7.5 kW
Source	380 V/50 Hz

该人员自动升降机由于运行时间长、乘坐人员较多,在多用户场景中为合理规划其运行节奏,提升整体运行效率,且严格遵循“开门—上客—关门—运行”的载人升降机运行流程.使用本文方法对其双向传动最优释放时序展开控制.

滑模观测器参数:轿厢及额定载重总质量为1450 kg;对重总质量为1050 kg;曳引轮转动惯量为0.25 m;增益矩取值为diag([150, 120, 100, 200, 180, 80, 60]);滑模面参数矩阵取值为diag([15, 15, 15, 20, 20, 10, 10]);最优释放时序控制参数:根据国际标准(如ISO 18738-1中对升降机振动与冲击的限制)和电梯制造商的内部安全规范下的优先级设置体现安全性的冲击度权重 $\omega_1=0.6$ 、能耗权重 $\omega_2=0.25$ 、响应速度权重 $\omega_3=0.15$.机械响应最小时间阈值为0.15 s. PID控制参数:比例增益 $K_p=280$;积分增益 $K_i=35$;微分增益 $K_d=8$.

实验数据来源于加速度传感器采集的轿厢运动加速度实测值,以及基于动力学模型计算所得数值;同时记录电机驱动力指令、制动器电流指令、滑模补偿修正量等控制参数.实验数据处理采用时域对比分析法,将模型输出与传感器测量值进行同步比对,以验证动力学模型的准确性.实验数据覆盖空载、满载、匀速稳定换向、运行中紧急制动与反向、对重失衡以及曳引绳刚度波动等多种工况,确保测试内容的全面性.

实验硬件配置包括安装于轿厢的压电式加速度传感器(量程 $\pm 50 \text{ m/s}^2$,精度 $\pm 0.5\%$)、电机驱动控制器及制动器电流调控模块.实验软件基于Matlab/Simulink平台构建滑模观测器与最优释放

时序控制算法,采样频率设置为 1000 Hz,控制周期为 5 ms.

测试方案重点考察双向传动换向过程中冲击度、速度跟踪误差及能量消耗等关键指标,通过多工况重复试验验证所提方法的鲁棒性与适应性.

2.2 实验结果分析

2.2.1 升降机双向传动动力学建模效果测试

本文方法构建人员自动升降机双向传动动力学模型,通过该模型获取人员自动升降机轿厢运动加速度.用加速度传感器同步采集该人员自动升降机轿厢的运动加速度,验证本文方法构建人员自动升降机双向传动动力学模型能力,测试结果如图 3 所示.

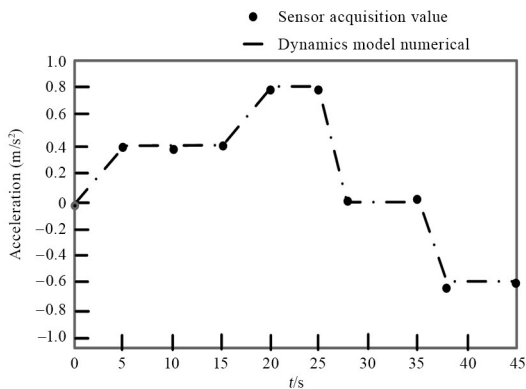


图3 人员自动升降机轿厢运动加速度建模结果

Fig. 3 Modeling results of motion acceleration of personnel automatic elevator car

分析图 3 内曲线可知,人员自动升降机双向传动动力学模型在计算人员自动升降机轿厢运动加速度时,其获得的加速度曲线与加速度传感器采集的实测数据展现出高度的时域同步性和幅值一致性,该结果说明了人员自动升降机双向传动动力学模型对“最大动力输出、负载响应”的耦合关系刻画精准,有力地佐证了该动力学模型在核心层面具有卓越的模型保真度,对人员自动升降机传动系统的反作用力之间复杂动态耦合关系的精准数学刻画与物理机制表征能力较为卓越.

2.2.2 滑模观测器状态估计性能测试

为了验证本文研究的滑模观测器的稳定性能,通过收敛性分析系统参数扰动时观测器的状态估计误差及收敛时间(误差保持在 $\pm 5\%$ 稳态值范围内的时间),结果如表 2 所示.

由表 2 可知,在所有实验参数下,观测器状态估计误差均能在 0.5 s 左右收敛至稳态,稳态误差

保持在 0.023 以下的较低水平,证明了滑模观测器本身具有快速收敛和准确估计的特性.这得益于滑模面设计和切换项的强鲁棒性,能够驱动系统状态轨迹在有限时间内到达并保持在滑模面上.

表 2 滑模观测器参数扰动实验收敛性能结果

Table 2 Convergence performance results of sliding mode observer parameters perturbation experiments

Perturbation parameter	Amplitude of motion	Collapse time/s	Steady-state error
Total mass of the vehicle body and load	+20%	0.45	0.018
	nominal value (0%)	0.48	0.015
	-20%	0.52	0.022
Torsional stiffness of the system	+20%	0.49	0.016
	nominal value (0%)	0.48	0.015
	-20%	0.47	0.017
Equivalent rotational damping	+20%	0.44	0.014
	nominal value (0%)	0.48	0.015
	-20%	0.51	0.019

2.2.3 双向传动控制效果测试

为验证本文的方法在时变及非线性因素影响下的最优释放时序控制鲁棒性,实验在多种典型且包含显著不确定性的工况下进行测试.这些工况模拟了实际运行中常见的时变因素载重突变、对重失衡和紧急制动带来的强非线性扰动、曳引绳刚度波动等非线性因素.使用本文方法对不同工况下的双向传动最优释放时序进行控制,输出的电机驱动力指令、制动器电流指令及关键的滑模补偿修正量如表 3 所示.

由表 3 可知,本文方法在面对不同类型的扰动时,均展现出强大的鲁棒稳定性.应对时变负载,在满载一下降 \rightarrow 上升与空载一上升 \rightarrow 下降的切换中,时变因素载重发生了剧烈变化,本文方法通过滑模观测器实时感知此变化,并动态调整控制指令.电机驱动力指令在满载工况下幅值大于空载工况,且滑模补偿修正量也随之增大,这表明观测器准确捕捉了负载惯性的变化,并通过反馈律进行了有效补偿,确保了换向过程的平稳性.在运行中紧急制动与反向这一极端非线性工况下,升降机控制面临制动器摩擦特性突变、动量急剧变化等强非线性挑战.此时,本文方法输出了大幅变化的电机指令 900 N \rightarrow -1500 N 和制动器电流 0 \rightarrow 5.0 A,同时产生了高达 20%的滑模补偿修正量,通过滑模控制的切换项抑制由非线性扰动引起的状态偏差,使升

升降机动态轨迹快速收敛至期望的滑模面上,从而避免了失稳.对重失衡和曳引绳刚度波动工况体现了系统参数的不确定性.在这些工况下,控制指令并未出现剧烈跳变,而是通过对电机指令进行 $\pm 80\text{ N}$ 的小幅双向调整,使制动电流稳定在 1.8 A ,并采用滑模补偿以抵消参数摄动的影响,其优化时序与滑模反馈机制能够自适应地维持系统性能.本文研究的基于滑模观测器的最优释放时序控制方法能够有效感知并补偿由时变负载、非线性扰动及参数不确定性带来的影响,通过动态调整控制指令,确保系统在各种复杂工况下均能保持稳定、平滑的运行,具有高度的鲁棒性.

表3 人员自动升降机双向传动最优释放时序控制指令

Table 3 Control instructions for the optimal release timing of bidirectional transmission in personnel elevators

Condition type	Motor drive command/N	Brake current command/A	Sliding mode compensation correction
No-load-rise \rightarrow fall	+800 \rightarrow -300	0 \rightarrow 2.5	5%
Full load-drop up	-1200 \rightarrow +500	3.0 \rightarrow 1.0	12%
Uniform speed and steady commutation	+600 \rightarrow -600	2.0 \rightarrow 0	0%
Emergency braking and reverse operation	900 \rightarrow -1500	0 \rightarrow 5.0	20%
Counterweight unbalance (12% deviation)	± 80	1.8	8%
Stiffness fluctuation of the draw rope	± 50	1.5	15%
Standard load cycle	+700 \rightarrow 0 \rightarrow -700	0 \rightarrow 2.0 \rightarrow 0	0%
Random mixing of multiple operating conditions	$\pm 100\sim\pm 1000$	0.5 \sim 4.5	5% \sim 18%

注:上表内“ \rightarrow ”表示时序切换过程中的数值变化(如“800 \rightarrow -300”指从 800 N 过渡到 -300 N);“ \pm ”表示双向数值范围(如“ ± 80 ”指 $\pm 80\text{ N}$).

以该人员自动升降机在双向传动过程中不同时序阶段作为实验对象,使用本文方法对其最优释放时序进行控制,控制结果如图4所示.

分析图4可知,本文方法对该人员自动升降机双向传动最优释放时序控制时,在初始阶段该最优释放时序时间为 0 s ,然后立即启动制动器,制动器在驱动阶段释放时序时间为 1.0 s ,随后开启制动器预紧阶段,在该阶段可以规避升降机上升带来的冲击,随机准确衔接驱动力反向阶段,实现人员自动升降机的运行方向转换,每个时序阶段均预留一定时间供制动器反应,各阶段时序相互嵌套构建起从初始动作触发到稳定运行的完整时序链条,通过

该完整时序链条,实现人员自动升降机双向传动最优释放时序控制.这本质是通过滑模观测器的鲁棒状态感知与多目标优化的时序调控,协调驱动力与制动力切换节奏,抑制切换时的动量突变与惯性力冲击,既体现多学科融合,又实现双向传动最优释放时序控制,提升乘坐舒适性与工况适应性.

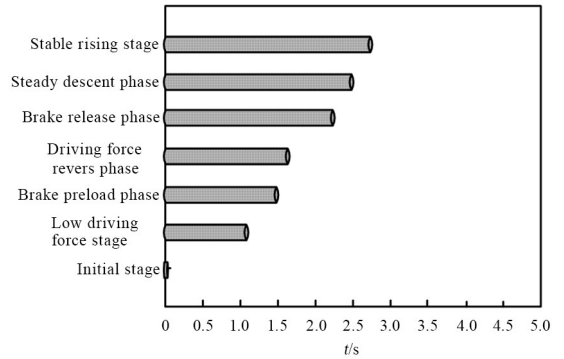


图4 不同时序阶段最优释放时序时间

Fig. 4 Optimal release timing across different temporal phases

以升降机额定速度 1.5 m/s 为目标,对比本文方法与传统PID控制方法的速度响应过程,通过速度响应曲线直观呈现两种控制策略的动态特性差异,得到速度控制响应曲线对比图,如图5所示.

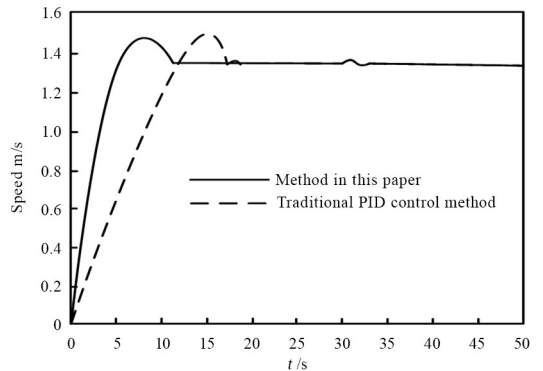


图5 升降机速度响应控制效果对比图

Fig. 5 Comparison of elevator speed response control effect

由图5可知,本文方法在约 10 s 左右速度快速上升后,最终稳定在 1.4 m/s 左右,后续速度基本保持在 1.4 m/s ,波动极小,其稳态误差为 0.05 m/s .传统PID方法在达到稳定前有明显波动,最终速度趋近于 1.4 m/s ,但在响应过程中,速度有较明显的起伏,其稳态误差为 0.1 m/s ,稳态表现略逊一筹.这是因为本文方法核心在于基于滑模观测器与多目标优化的控制机理,其结合观测状态设计反馈控制律,动态优化电机驱动力与制动器动作时序,在速度上升阶段加速响应、接近目标速度时精准抑波,将稳态误差控制在 0.05 m/s ;传统PID因参

数固定,难以适配系统时变与非线性因素,在动态工况下易超调且误差消除慢,故本文方法更优。

人员在乘坐自动升降机时,自动升降机的冲击度等于 6 m/s^2 时,人员感受是可接受冲击,在此以冲击度作为衡量人员乘坐自动升降机舒适度指标,测试本文方法对该人员升降机进行最优释放时序控制后,该人员升降机在运行过程中的冲击度,测试结果如图 6 所示。

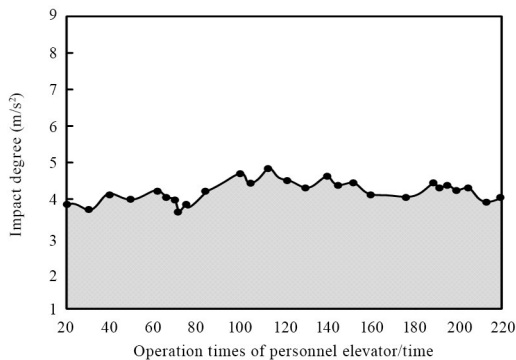


图 6 人员升降机在运行过程中的冲击度

Fig. 6 Impact degree of personnel lift during operation

由图 6 可知,本文方法对人员升降机最优释放时序控制过程中,该人员升降机在 20~220 次的运行周期内,冲击度数据呈现出围绕 $3\sim 5 \text{ m/s}^2$ 区间波动的特征,虽存在一定幅值的起伏,但其整体统计特性稳定收敛于预设的容许冲击阈值 (6 m/s^2) 之下. 这一现象显著表征了所设计的基于滑模观测器的最优释放时序控制方法的有效性. 本文方法通过对时序的精细把控,能够在机械冲击振荡产生的源头,对系统的能量传递与动力响应过程进行干预,从而削弱因动量突变及惯性力冲击而诱发的机械冲击振荡,使得冲击度数据稳定收敛于预设的容许冲击阈值之下,充分彰显了本文方法的有效性。

3 讨论

本文提出一种基于滑模观测器的人员自动升降机双向传动控制方法. 首先,通过二阶矩阵形式的动力学方程,刻画人员自动升降机多部件耦合运动特性;接着,构建滑模观测器,基于状态误差设计状态方程、切换增益矩阵和滑模面,实现对轿厢与对重的位移、速度、加速度等状态的准确观测;最后,定义上升→下降切换时的关键时序参数,建立包含冲击度、能耗、响应速度的加权多目标优化函数,结合滑模观测器状态设计反馈控制律,确定最优释放时序,以实现升降机换向过程无冲击、平滑、

快速、节能且鲁棒运行。

实验结果验证了基于滑模观测器的人员自动升降机双向传动最优释放时序控制方法的有效性. 动力学模型计算的轿厢加速度与实测数据高度一致,表明所构建的以拉格朗日方程为基础的二阶矩阵模型能够精准刻画系统多自由度耦合运动特性,为滑模观测器提供了可靠的状态估计基础,确保了后续控制策略的可行性. 这得益于最优释放时序控制中多目标优化函数对冲击度、能耗与响应速度的权衡,以及滑模观测器通过状态误差方程和滑模面约束实时补偿扰动,有效抑制了换向过程中的动量突变,提升了安全性. 不同工况下的电机驱动力和制动器电流指令分析结果表明,本文方法能够动态调整时序参数,通过滑模观测器对负载变化和外部干扰进行鲁棒感知,结合反馈控制律实时优化动作时机,避免了机械冲击振荡,增强了升降机系统的工况适应性. 速度响应对比结果中,本文方法稳态误差优于传统 PID 的波动表现,原因在于滑模观测器实现了状态连续估计,使控制律能及时响应系统非线性变化,而多目标优化确保了时序切换的平滑性,从而提高了运行效率. 时序阶段分析结果显示,制动器释放、预紧、驱动力反向等环节时序嵌套合理,初始阶段 0 s 启动,制动器释放在 1 s 完成,这通过滑模观测器状态反馈和多目标优化函数动态协调,实现了能量传递与动力响应的精细调控,证实了方法在提升双向传动协同调度与冲突规避方面的优势。

4 结论

本文聚焦人员自动升降机双向传动的协同调度、冲突规避与效率最大化问题,提出基于滑模观测器的人员自动升降机双向传动控制方法. 实验结果表明,所提方法通过动力学建模、状态估计与时序优化的有机结合,解决了升降机换向过程中的冲击、能耗与响应矛盾,为实现无冲击、平滑、快速、节能且高鲁棒运行提供了有效途径,对提升升降机输送系统的安全性具有重要实践意义。

参考文献

- [1] 阳锦刚,丁永辉,牛德军,等. 永磁同步电机位置-速度一体化有限时间控制[J]. 微特电机, 2024, 52(2): 54-58,63.

- YANG J G, DING Y H, NIU D J, et al. Position-speed integrated finite-time control of permanent magnet synchronous motors [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2024, 52(2): 54–58, 63. (in Chinese)
- [2] 周晓萌, 李洪文, 邵蒙, 等. 基于GPIO的永磁同步电机高效非奇异快速终端滑模算法[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(9): 1407–1419.
- ZHOU X M, LI H W, SHAO M, et al. Efficient non singular fast terminal sliding mode algorithm for permanent magnet synchronous motor based on GPIO [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(9): 1407–1419. (in Chinese)
- [3] 刘庆雪, 孔祥新, 杜明阳. 基于固定时间滑模自抗扰的永磁同步电机控制[J]. *微特电机*, 2023, 51(5): 50–54, 60.
- LIU Q X, KONG X X, DU M Y. Based on fixed-time sliding mode and active disturbance rejection control of PMSM [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2023, 51(5): 50–54, 60. (in Chinese)
- [4] 卢宁, 赵秉鑫, 张昊, 等. 施工升降机多电机同步控制系统建模与仿真[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(2): 331–338.
- LU N, ZHAO B X, ZHANG H, et al. Modeling and simulation of multi-motor synchronous control system of construction lift [J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(2): 331–338. (in Chinese)
- [5] 霍士翔, 张驰, 舒鑫东, 等. 永磁同步电机单采样双更新电流控制方法研究[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(9): 162–169.
- HUO S X, ZHANG C, SHU X D, et al. Single sampling and double current update method for current control of PMSM [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(9): 162–169. (in Chinese)
- [6] 贺明智, 林润泽, 周述晗, 等. 独立充放时序 SIDO 开关变换器电流型变频控制技术[J]. *西南交通大学学报*, 2024, 59(5): 980–989.
- HE M Z, LIN R Z, ZHOU S H, et al. Current-mode variable frequency control technique for single-inductor dual-output switching converter with independent charge and discharge sequence [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2024, 59(5): 980–989. (in Chinese)
- [7] 吴春, 牛德军, 陈强. 基于标么化两相吸引律的永磁同步电机有限时间速度控制[J]. *高技术通讯*, 2024, 34(3): 282–289.
- WU C, NIU D J, CHEN Q. A finite-time control method for permanent magnet synchronous motors based on a per-unit two-phase attraction law [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2024, 34(3): 282–289. (in Chinese)
- [8] 邵欣, 胡成琳. 永磁同步电机有限时间抗扰控制方法研究[J]. *火力与指挥控制*, 2023, 48(4): 166–172.
- SHAO X, HU C L. Research on finite time disturbance rejection control method of permanent magnetic synchronous motors [J]. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(4): 166–172. (in Chinese)
- [9] 秦海鸿, 汪文璐, 谢斯璇, 等. 一种适用于 GaN 基电机驱动器的新型死区自适应控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(11): 4422–4433.
- QIN H H, WANG W L, XIE S X, et al. A novel dead-time adaptive control method for GaN-based motor drive [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(11): 4422–4433. (in Chinese)
- [10] 郭磊磊, 王朋帅, 李琰琰, 等. 一种永磁同步电机可视化双矢量调制模型预测控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(1): 159–165, 208.
- GUO L L, WANG P S, LI Y Y, et al. Visual dual-vector modulated model predictive control method for permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(1): 159–165, 208. (in Chinese)
- [11] 马俊达, 孙鹤方, 谭冲, 等. 动态约束下船舶固定时间非奇异滑模包容控制[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(4): 167–176.
- MA J D, SUN H F, TAN C, et al. Non-singular sliding mode containment control of ship fixed time under dynamic constraints [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(4): 167–176. (in Chinese)
- [12] 李耀华, 刘子焜, 王孝宇, 等. 永磁同步电机模型预测转矩控制简化控制策略[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(10): 1793–1805.
- LI Y H, LIU Z K, WANG X Y, et al. Simplified control strategies of model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(10): 1793–1805. (in Chinese)
- [13] 王震, 刘洋, 洪毅, 等. 基于固定时间终端滑模的永磁同步电机控制[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2024, 27(2): 15–20.
- WANG Z, LIU Y, HONG Y, et al. Control of permanent magnet synchronous motor based on fixed

- time terminal sliding mode [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2024, 27(2): 15–20. (in Chinese)
- [14] 张会林, 王帅, 张建平. 基于双模态有限时间滑模的永磁同步电机抗扰动控制[J]. 包装工程, 2024, 45(5): 188–196.
- ZHANG H L, WANG S, ZHANG J P. Disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor based on dual-mode finite time sliding mode [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(5): 188–196. (in Chinese)
- [15] 杜进辅, 胡亮. 纯电动汽车高速齿轮传动全工况抑振修形方法[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(10): 94–102.
- DU J F, HU L. Vibration suppression modification method of battery electric vehicle high-speed gear transmission under full working conditions [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(10): 94–102. (in Chinese)