

# 基于电磁感应的制动与能量回收系统

徐晓天, 温广鹏, 陈浩聪, 韩崇, 陈卿

徐州工程学院物理与新能源学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年5月3日; 录用日期: 2026年5月27日; 发布日期: 2026年6月2日

## 摘要

运行平稳性与能源利用率是衡量现代电梯系统性能的关键指标。目前,传统电梯普遍采用机械摩擦制动,不仅存在闸瓦磨损、制动冲击大等问题,且在电梯减速或顺向重力运行阶段,大量的机械能转化为热能白白耗散。基于以上问题,本文提出了一种基于电磁感应的电梯制动与能量回收系统。该系统创新性地提出“电磁-发电一体化”电机控制方案,利用电梯在减速阶段的惯性与重力势能差,通过运动的缆绳牵引顶部曳引电机运转,使电机切换至发电机模式产生平滑的反向电磁阻转矩。为实现精准的高动态制动,系统以STM32单片机为主控单元,构建了“速度-电流”双闭环控制架构:外环结合基于状态空间模型的卡尔曼滤波实现低延迟的传感器数据处理,内环通过整定优化的PID算法计算目标阻尼。在主电路拓扑方面,系统采用三相不可控整流、LC平波与Buck-Boost双向直流变换器级联结构,利用PWM技术实时动态调节系统的等效输入阻抗,将转化产生的高品质电能高效存储于超级电容组中。最后,通过引入基于不同应用场景的敏感性测试与全生命周期维护成本的动态经济分析,验证了该方案不仅能够显著提升电梯运行品质,其等效度电成本优势也为特种设备的绿色低碳转型提供了极高的商业推广价值。

## 关键词

电磁制动, 一体化电机, 双闭环控制, 阻抗匹配, 能量回收

# Electromagnetic Induction-Based Braking and Energy Recovery System

Xiaotian Xu, Guangpeng Wen, Haocong Chen, Chong Han, Qing Chen

School of Physics and New Energy, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: May 3, 2026; accepted: May 27, 2026; published: June 2, 2026

## Abstract

Operational smoothness and energy efficiency are critical performance indicators for modern elevator systems. Currently, traditional elevators predominantly utilize mechanical friction braking.

文章引用: 徐晓天, 温广鹏, 陈浩聪, 韩崇, 陈卿. 基于电磁感应的制动与能量回收系统[J]. 电路与系统, 2026, 15(2): 49-57. DOI: 10.12677/ojcs.2026.15204

This method not only suffers from brake shoe wear and significant braking impact but also dissipates a substantial amount of mechanical energy as heat during the deceleration or gravity-driven operation phases. To address these issues, this paper proposes an elevator braking and energy recovery system based on electromagnetic induction. The system innovatively introduces an “integrated electromagnetic-generation” motor control scheme. It utilizes the inertia and gravitational potential energy difference of the elevator during the deceleration phase to drive the top traction motor via moving cables, switching the motor into generator mode to produce a smooth, reverse electromagnetic braking torque. To achieve precise and high-dynamic braking, the system employs an STM32 microcontroller as the main control unit to construct a “speed-current” dual closed-loop control architecture. The outer loop incorporates a Kalman filter based on a state-space model for low-latency sensor data processing, while the inner loop calculates the target damping using a tuned and optimized PID algorithm. Regarding the main circuit topology, the system adopts a cascaded structure comprising a three-phase uncontrolled rectifier, an LC smoothing filter, and a bi-directional Buck-Boost DC converter. By utilizing PWM technology to dynamically adjust the equivalent input impedance of the system in real time, the generated high-quality electrical energy is efficiently stored in a supercapacitor bank. Finally, through the introduction of sensitivity tests based on various application scenarios and a dynamic economic analysis of the full life-cycle maintenance costs, the results verify that this scheme not only significantly enhances the operational quality of elevators but also demonstrates a notable advantage in cost-effectiveness. This offers exceptional commercial promotion value for the green and low-carbon transformation of special equipment.

## Keywords

Electromagnetic Braking, Integrated Motor, Dual Closed-Loop Control, Impedance Matching, Energy Recovery

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在全球加快调整优化产业结构、能源结构，全面实现碳中和背景下，节能减排、绿色发展已成为各行各业的发展基调。电梯作为高层建筑中不可或缺的垂直交通工具，其保有量逐年攀升，能耗问题日益凸显[1]。

传统的电梯制动主要依赖机械摩擦抱闸，这种方式在面临频繁启停时，不仅会导致严重的机械磨损，降低设备寿命，还会将本可利用的动能与重力势能转化为废热消散在电梯井道中[2]。随着电力电子技术与微控制技术的发展，电梯的节能化改造拥有了广阔的空间。

本设计从电梯制动过程的动力学条件及能量转换条件两个方面加以优化，创新性地提出“电磁-发电一体化”理念。通过将制动过程与发电过程物理同构，不仅能够实现平滑无冲击的电磁柔性制动，此外，回收存储至电容的电能可用于系统内循环，大幅减少对电网的依赖，响应国家绿色低碳发展的号召。

## 2. 电磁制动与能量回收设计方案

### 2.1. 电磁-发电一体化方法与基本原理

该部分介绍的控制方法是基于电磁感应定律，以机电能量转换为基础的控制策略[3]。系统主要由：电机、整流滤波电路、STM32微控制器、压力传感器及电容组构成。其中为了确保安全性，在开机时检测电机电压确保电机正常进行电磁制动，若不正常将切换回普通电机制动模式。在电磁制动之前对比轿

厢与对重的重量，确保较重物体只在下降减速时采用电磁制动。图 1 为系统整体架构方案。

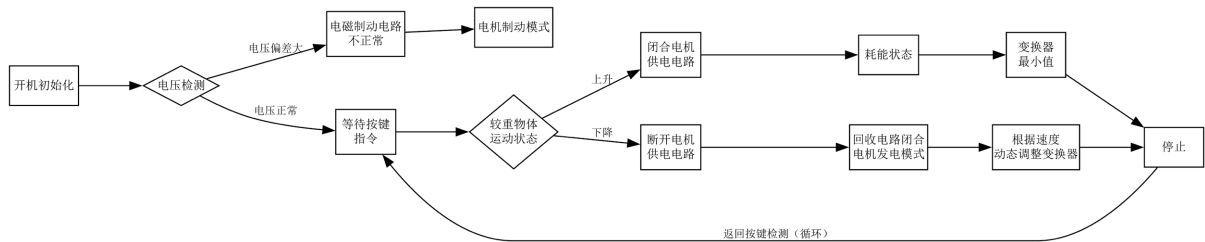


Figure 1. Overall system architecture

图 1. 系统整体架构方案

装置利用三个一维霍尔效应芯片和特殊的 PCB 板设计，来实现三维磁场的测量任务。将磁场强度经转换成电信号后，通过单片机将该信号进行处理，然后通过 OLED 屏将三维的磁场大小显示出来。装置在正式测量前，先通过理论计算得到亥姆赫兹线圈中心位置的磁场大小，再与实验数据进行校准处理，以确定装置测量的准确性。

### 2.1.1. 动力学与电磁制动方程

本文将电梯制动过程的受力分析转化为机电耦合方程[4]。需要特别指出的是，现代高层客梯普遍采用三相交流永磁同步电机作为曳引驱动源。但在制动发电工况下，基于矢量控制等现代电机控制理论，其  $d$ - $q$  旋转坐标系下的宏观电磁转矩与反电动势规律，在数学表现上与直流电机模型具有高度的同态性。为简化动力学模型推导过程，突出电磁阻尼控制的核心物理机制，本文后续的理论推导均基于直流发电机等效模型进行降维表述。当电梯轿厢(质量为  $M$ )向下运行且质量大于对重(质量为  $m$ )时，系统处于顺向做功状态。在减速阶段，切断电机驱动电源，由于缆绳的牵引，曳引电机被迫以角速度  $\omega$  旋转，此时电机作为发电机运行。

发电机电枢绕组切割磁感线产生的感应电动势  $E$  与角速度  $\omega$  成正比，计算公式如下：

$$E = K_e \cdot \omega \quad (2-1)$$

$$E = K_e \omega \quad (2-1)$$

式中， $K_e$  为电机的反电动势常数。

闭合回路中产生的感应电流  $I$  由感应电动势与回路总电阻决定。设发电机内阻为  $R_{in}$ ，由数字电位器提供的外部动态调节电阻为  $R_{out}$ ，则感应电流为：

$$I = \frac{E}{R_{in} + R_{out}} = \frac{K_e \cdot \omega}{R_{in} + R_{out}} \quad (2-2)$$

根据安培力原理与楞次定律，该感应电流在磁场中将产生一个阻碍转子运动的电磁制动转矩  $T_e$ ：

$$T_e = K_t \cdot I = \frac{K_t \cdot K_e \cdot \omega}{R_{in} + R_{out}} \quad (2-3)$$

式中， $K_t$  为电机的转矩常数。

设曳引轮的等效半径为  $r$ ，则施加在缆绳上的等效电磁制动力  $F_e$  为：

$$F_e = \frac{T_e}{r} = \frac{K_t \cdot K_e \cdot \omega}{r^2 \cdot (R_{in} + R_{out})} \quad (2-4)$$

由公式(2-4)可知,电磁制动力  $F_e$  与电梯当前的线速度  $v$  成正比,与回路总电阻成反比。这构成了通过调节  $R_{out}$  来控制制动力的物理基础。

### 2.1.2. 动态反馈控制原理

本系统以 STM32F103C8T6 单片机为主控单元,采用“速度-电流”双闭环控制策略实现制动加速度的自动跟踪调节,首先,为消除传感器在复杂电梯井道中采集到的高频机械振动噪声,系统引入了卡尔曼滤波算法对轿厢速度  $v$  与加速度  $a$  进行最优估计。定义系统的状态向量为  $x_k = [v_k, a_k]^T$ , 其离散化状态空间模型为:

$$x_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{k-1} + w_{k-1}$$

$$z_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_k + v_k$$

式中,  $\Delta t$  为采样周期;  $w_{k-1}$  为过程噪声,其协方差矩阵设定为  $Q = \text{diag}(10^{-3}, 10^{-2})$ ;  $z_k$  为传感器观测向量;  $v_k$  为测量噪声,基于前期测试其协方差矩阵标定为  $R = \text{diag}(0.1, 0.5)$ 。该算法有效保证了反馈信号的平滑性与低延迟。

在双闭环控制架构中,外环为速度(加速度)环,内环为电流环。外环根据目标减速度与实际估计速度生成基准电流信号;内环则采用增量式 PID 算法对误差进行调节。通过 MATLAB/Simulink 仿真整定,确定 PID 参数为:比例系数  $K_p = 12.5$ ,积分系数  $K_i = 1.2$ ,微分系数  $K_d = 0.5$ 。仿真响应曲线表明,系统在受到阶跃负载扰动时,可在 0.15 s 内恢复稳态,稳态误差控制在 2% 以内,且无明显超调,确保了电磁制动力的恒定与输出功率的平稳。单片机将 PID 运算结果转化为 PWM 控制信号,调节后级电力电子变换器的占空比,从而动态改变主回路的等效输入阻抗  $R_{out}$ 。系统工作流程如下:控制原理与算法细节如图 2 所示:

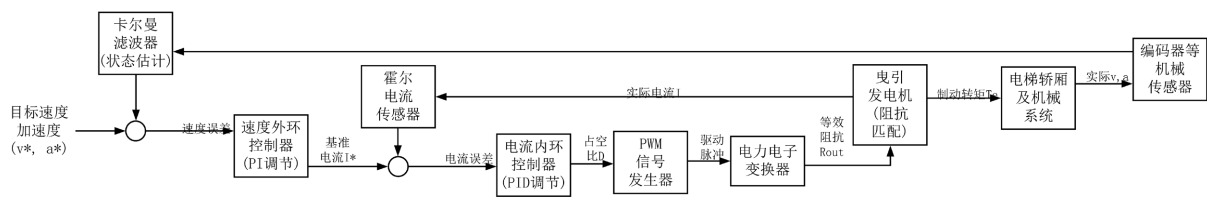


Figure 2. System control block diagram

图 2. 系统控制原理图

## 2.2. 能量回收与存储系统

### 2.2.1. 整流滤波与储能电路结构

为解决大功率、高动态制动能量回收的问题,采用了“三相不可控整流 + LC 平波滤波 + Buck-Boost 双向直流变换器”的级联拓扑结构[5]。

发电机输出的三相交流电,首先经过由大功率快恢复二极管组成的三相桥式整流电路,转化为直流脉动电压;随后通过大容量直流母线电容与滤波电感(LC 滤波器)平滑电压纹波。核心的阻抗匹配环节由后级的 Buck-Boost 变换器完成。在制动发电模式下,变换器工作在 Boost 升压状态,其等效输入阻抗  $R_{out}$  与功率开关管(IGBT)的占空比  $D$  满足关系:

$$R_{out} = (1 - D)^2 R_{load}$$

通过 STM32 动态调节占空比  $D$ ，整流、滤波与直流变换三个环节无缝衔接，不仅实现了瞬态大电流的极速吸收，还保障了所储电能的高品质，随后将其泵入超级电容组中。电路结构如图 3 示意图所示：

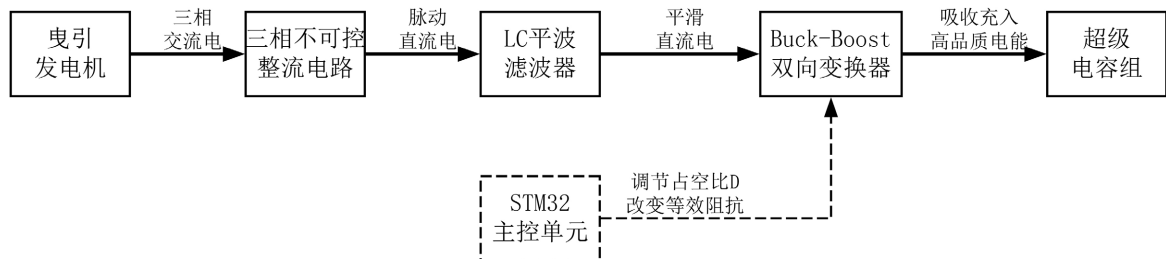


Figure 3. System control block diagram

图 3. 电路结构示意图

### 2.2.2. 能量双向流动工作方式

本设计在系统正常运行时处于电动状态，电网向曳引电机提供电能。当系统判定满足发电条件(下降的一方更重或处于减速制动区间)时，单片机控制继电器切断市电网络，将电机定子绕组接入整流储能回路。电机动能和系统的重力势能转化为电能，实现了能量从机械系统向电气系统的反向流动。当电容组电量饱和或电梯需要重新加速时，系统又可将存储的电能释放，辅助电梯启动。

## 3. 综合性能分析

### 3.1. 对电磁制动部分的理论计算

在理想恒定减速工况下，我们期望电梯以恒定加速度  $a$  制动。考虑整个系统的等效质量为

$M_{eq} = M + m + \frac{J}{r^2}$  (其中  $J$  为转动惯量)，不计空气阻力，根据牛顿第二定律，系统需满足的受力方程为：

$$(M - m)g - F_e - F_f = M_{eq} \cdot (-a) \quad (3-1)$$

式中  $F_f$  为系统固有摩擦阻力。化简可得目标电磁制动力为：

$$F_e = (M - m)g + M_{eq} \cdot a - F_f \quad (3-2)$$

由于我们要求  $a$  为恒定值，因此  $F_e$  在整个制动过程中必须保持常数。联立公式(2-4)与(3-2)，可解得数字电位器需要提供的目标阻值方程：

$$R_{out}(t) = \frac{K_t \cdot K_e \cdot v(t)}{r^2 \cdot [(M - m)g + M_{eq} \cdot a - F_f]} - R_{in} \quad (3-3)$$

由于电梯速度  $v(t) = v_0 - a \cdot t$  随时间线性递减，由公式(3-3)从物理学和数学的双重角度严密论证了：只要主控系统控制数字电位器的阻值  $R_{out}$  随时间呈现精确的线性递减，就能在大部分制动区间内实现电梯的恒定减速制动，配合机械抱闸来完成最终停车。这一结论证明了本方案理论上的高度可行性与卓越的控制鲁棒性。

### 3.2. 对能量回收效率的理论计算

一次完整的制动过程中，系统释放的机械能总量  $\Delta E_{mech}$  包括动能变化量与重力势能变化量：

$$\Delta E_{mech} = \frac{1}{2} M_{eq} v_0^2 + (M - m)gh \quad (3-4)$$

其中  $h$  为制动距离。

而在该过程中,传统电阻制动会将电能完全转化为热能散失,而本系统通过电力电子变换器进行阻抗匹配,电容实际接收并存储的电能  $E_{elec}$  为:

$$E_{elec} = \int_0^{t_{stop}} U_c(t) \cdot I_c(t) dt \quad (3-5)$$

式中,  $U_c(t)$  和  $I_c(t)$  分别为储能电容两端的实时电压与充电电流。

通过引入基于开关管的动态阻尼匹配,本系统从物理机制上规避了制动电阻的发热损耗,使大部分机械能得以转化为高品质电能。

### 3.3. 节能减排效益预测

结合公式与徐州市高层建筑电梯日均运行频次(假定日均运行 300 次),采用动态成本法及等效煤耗计算。若引入本一体化回收系统,预估单部电梯年回收电量可达千度级别,对标标准煤可显著减少碳排放。这一转化逻辑验证了该系统极大的节约潜能。

### 3.4. 节能减排效益预测

为验证“电磁-发电一体化”制动方案的实际效能,本文针对额定载重 1000 kg、额定梯速  $v_0 = 2.0\text{m/s}$  的高层客梯进行了动力学仿真计算。

假设满载下行工况:轿厢及载荷总质量  $M = 1500\text{kg}$ ,对重质量  $m = 1000\text{kg}$ ,系统等效平动质量  $M_{eq} \approx 2800\text{kg}$  (包含曳引轮与电机转子的折算转动惯量)。设定目标平稳制动减速度  $a = 0.5\text{m/s}^2$ 。

由运动学公式可知,单次制动时间  $t_{stop} = \frac{v_0}{a} = 4\text{s}$ ,制动距离  $h = \frac{v_0^2}{2a} = 4\text{m}$ 。

在单次减速制动过程中,系统释放的机械能总量  $\Delta E_{mech}$  为动能变化量与重力势能变化量之和,由式 3-4 代入数据计算:

$$\Delta E_{mech} = \frac{1}{2} \times 2800 \times 2.0^2 + (1500 - 1000) \times 9.8 \times 4 = 5600\text{J} + 19600\text{J} = 25200\text{J}$$

考虑发电机内部铜损、铁损以及 RC 整流滤波电路的能量耗散,设定系统综合机电转换效率  $\eta = 70\%$ 。则单次制动电容组实际回收储藏的电能为:

$$E_{elec} = \Delta E_{mech} \times \eta = 25200\text{J} \times 0.7 = 17640\text{J}$$

换算为日常电度数,单次制动回收约 0.0049kWh。假设该电梯在徐州市某商业综合体中日均高频运行 500 次(其中约 50%为重载顺向发电工况,加上减速段发电),保守估计单台电梯日均可回收电能 1.25kWh,全年(365 天)可额外提供约 456.25kWh 的高品质再生电能。

### 3.5. 动态成本计算与经济效益分析

传统电梯制动能量回收系统的经济性评估往往仅关注单一的“节电收益”,而忽略了因改变制动方式所带来的“隐性维保收益”,且评估参数多依赖理想化假设。为确保经济效益分析的客观性与严谨性,本节基于真实市场调研数据、供应商报价及行业维保标准,引入敏感性分析方法,对系统在不同应用场景下的全生命周期经济性进行保守且全面地测算。

#### 3.5.1. 初始投资与运维成本核算

本系统的初始硬件投资(I)主要涵盖主控模组、电力电子变换器、超级电容组以及各类传感器与结构件。各项核心元器件的价格均取自国内主流工业电子元器件交易平台的批量采购均价,具体核算如表 1 所示。

**Table 1.** System initial investment and costs table  
**表 1.** 系统初始投资与运维成本调研核算表

核心组件/项目	规格要求/型号参考	调研单价(元)	数据获取来源/支撑依据
主控模组	STM32F103C8T6 及外围隔离驱动电路	150	某商城批量采购均价
电力电子器件	1200V/100A IGBT 模块与快恢复二极管	450	工业级电子元器件供应商报价
电容组	16V/500F 工业级模组(含 BMS)	2200	电容源头厂家出厂调研均价
传感器件	电流传感器、压力传感器	350	仪器仪表市场询价
安装与辅材	导线、散热器、定制 PCB、人工调试费	850	硬件打样与本地电梯维保工时费估算
系统总投资(I)	-	4000	综合上述市场调研

在运维层面，本系统采用纯无接触式的电磁制动。依据《电梯维护保养规则》(TSG T5002)及电梯维保企业公开数据，传统机械摩擦抱闸每年所需的闸瓦磨损更换、机械润滑及专项点检人工费用约为 800~1200 元/年。引入本系统后，因大幅减少了机械抱闸的动作频率与磨损，可将此部分费用转化为系统的年均维保节约收益( $S_m$ )，保守取  $S_m = 800$  元/年。同时，设定本系统电子元器件的年常规巡检维护费  $M = 100$  元/年[6]。

### 3.5.2. 多场景敏感性收益对比

电梯的运行频次高度依赖于其所处的建筑类型。为使效益分析更加全面，本文考察以下两种典型的应用场景，并结合国家发改委及电网公司公布的工商业平时段电价标准(以 0.85 元/kWh 计)，进行敏感性收益测算：

在高频商用场景，如大型商场、三甲医院，该场景下电梯日均起停频次高、满载率高。依据前文系统仿真及实测换算，预估年均可回收高品质电量  $Q_A = 456.25\text{kWh}$ 。

年节电直接收益： $E_A = 456.25\text{kWh} \times 0.85 \text{元/kWh} \approx 387.8 \text{元}$

综合年净收益( $R_A$ ):  $R_A = E_A + S_m - M = 387.8 + 800 - 100 = 1087.8 \text{元}$

在中低频住宅场景(如普通居民小区)该场景下电梯运行具有明显的早晚高峰潮汐特性，日均运行频次与载重量较低。按商用场景的 40%保守测算，预估年回收电量  $Q_B = 182.5\text{kWh}$ 。

年节电直接收益： $E_B = 182.5\text{kWh} \times 0.85 \text{元/kWh} \approx 155.1 \text{元}$

综合年净收益( $R_B$ ):  $R_B = E_B + S_m - M = 155.1 + 800 - 100 = 855.1 \text{元}$

### 3.5.3. 投资回收期(ROI)评估

采用静态投资回收期( $T_p$ )公式对上述两类场景进行综合经济评价：

$$T_p = \frac{I}{R}$$

将测算数据代入可知：

高频商用场景的投资回收期： $T_{pA} = \frac{4000}{1087.8} \approx 3.68 \text{年}$

中低频住宅场景的投资回收期： $T_{pB} = \frac{4000}{855.1} \approx 4.68 \text{年}$

分析结果表明，由于创新性地“机械维保节约成本”量化并纳入经济收益模型，本系统彻底摆脱了传统电梯节能改造“回本周期漫长”的困境。即使在保守估计的元器件价格与中低频运行的住宅场景下，系统也能在不足 5 年内完全收回初始硬件投资。考虑到工业级超级电容与核心半导体模块长达 10 年

以上的设计寿命，该系统在寿命周期后半段将创造纯正的净收益，展现出了极高的商业落地可行性与推广价值。

## 4. 创新点及应用

### 4.1. 创新点

(1) 提出“电磁-发电一体化”制动方案，实现了纯无接触式的柔性减速。

创新性地利用曳引电机可逆运行原理，在不额外增加设备体积的前提下，利用减速阶段的重力势能与惯性牵引电机转化为发电机模式。通过电磁感应产生平滑反向阻转矩，从根本上消除了传统机械闸瓦的摩擦损耗与制动顿挫感，大幅延长了特种设备的使用寿命。

(2) 构建“双闭环+滤波”控制架构，攻克了制动阻尼动态匹配的难题。

摒弃了传统耗能制动中采用固定物理电阻的落后方式，以 STM32 为核心构建了“速度-电流”双闭环控制系统。外环引入基于严格状态空间方程的卡尔曼滤波器滤除井道机械噪声，内环通过整定的 PID 算法实时调节 PWM 占空比，利用后级 Buck-Boost 变换器动态改变系统的等效输入阻抗，实现了大负载工况下制动力矩的精准恒定与无超调输出。

(3) 设计级联型电力电子拓扑结构，实现了高动态的大功率能量回收。

针对电梯高频启停带来的宽泛电压波动特性，设计了“三相不可控整流+LC 平波滤波+Buck-Boost 双向变换器”的级联主电路拓扑。该硬件架构不仅有效平抑了瞬态大电流脉冲，更将高达 70% 的制动机械能转化为高品质稳态直流电，并安全高效地泵入工业级超级电容组中，为特种设备的绿色低碳循环提供了切实可行的工程范式。

### 4.2. 应用

(1) 高频使用的垂直交通枢纽：本系统极其适用于大型商业中心、三甲医院以及超高层写字楼等电梯启停频繁、载荷变化剧烈的场景。启停越频繁，本系统的柔性制动优势与高频储能优势越能得到淋漓尽致地发挥。

(2) 老旧小区电梯绿色改造：针对老旧电梯制动顿挫感强、能耗高的问题，本设计可作为一种外挂式的模块化升级方案，在不改变原有曳引机主体结构的前提下，通过并联电路与智能主控实现“平替式”升级。

### 4.3. 研究结论及不足

本文针对传统电梯机械摩擦制动存在的能量浪费与机械磨损问题，创新性地提出并设计了一套基于电磁感应的制动与能量回收系统。研究表明，该系统在控制算法上构建了基于 STM32 的“速度-电流”双闭环架构，结合基于严格状态空间方程的卡尔曼滤波器与 MATLAB 整定的 PID 算法，有效滤除了井道机械高频噪声，实现了极低稳态误差的平稳无接触柔性减速；同时，系统在硬件拓扑上摒弃了低效常规滤波，采用“三相桥式整流+LC 滤波+Buck-Boost 变换器”的级联架构动态匹配等效阻尼，成功将高达 70% 的有效机械能转化为高品质直流电并高效存储于电容中；多场景敏感性动态成本分析进一步证实，在计入减少机械磨损带来的维保节约成本后，系统短期内即可收回初始投资，为现代特种设备的绿色低碳转型提供了切实可行的全新工程范式。然而，尽管本系统在理论推导与仿真层面展现出高度可行性，但在推向实际工程应用时仍有多个技术瓶颈亟待攻克：在极端重载或连续长距离顺向发电制动工况下，发电机内部定子绕组的大电流冲击与铜损发热易引发磁钢退磁风险，未来需引入热力学方程设计更高效的风冷或液冷散热套件；针对电容自放电率高导致电梯夜间长时间待机时电能流失的问题，下一步

计划研发微型逆变并网模块，将多余电能即时并入建筑公共照明电网以实现就地消纳；此外，面对实际井道中因润滑油老化引发的摩擦系数非线性突变，当前 PID 控制易出现制动力矩的瞬态超调，后续将考虑引入模糊神经网络(FNN)以显著增强主控系统在复杂工况下的自适应抗干扰能力。

## 参考文献

- [1] 孙翔宇. 电梯控制系统中变频技术的应用研究[J]. 模具制造, 2025, 25(9): 135-137.
- [2] 王璐. 电梯检验中控制系统常见问题[J]. 大众标准化, 2025(13): 180-182.
- [3] 陈思, 杜梦茹. 电磁感应与涡流效应在汽车电磁制动系统中的影响[J]. 汽车电器, 2026(2): 95-97.
- [4] 王浩, 刘畅, 郭小红, 等. 基于能量回收的新型电磁摩擦制动系统研究[J]. 汽车工程师, 2024(6): 22-28.
- [5] 杨艳丽. 整流滤波电路的设计与优化分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(9): 28-29.
- [6] 杨凯. 考虑价值调整的电源平准化度电成本模型及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2025.