

级联多电平变频器低转速频率控制系统设计

崔岩巍

(长治市工业信息化研究中心, 山西 长治 046000)

摘要: 针对级联多电平变频器在低速阶段因电磁转矩与机械转矩不平衡导致的转速频率波动较大问题, 设计并开发了一种低转速频率控制系统; 通过改装转速频率采样元件和多电平变频器工作信号处理器, 加设多重移相变压器, 优化转速频率控制器的内部结构, 并在传统系统电路中添加驱动电路和保护电路, 实现了多硬件元件的连接与多挡转速频率控制硬件系统的优化; 在系统软件部分, 采用 MT 测速法精准检测低速阶段转速频率初始值; 通过转速频率控制目标与转速频率初始值之间的对比, 结合多重移相变压器计算电机转速和变频器工作频率的控制量; 根据控制量生成频率控制指令, 通过阶梯波控制方式执行频率控制指令, 实现变频器低速阶段的多挡转速频率控制功能; 系统测试实验表明, 所设计系统的频率控制偏差显著降低, 调速精度和调速范围均得到明显提升, 验证了所设计系统具有更优的控制性能。

关键词: 级联变频器; 多电平变频器; 低速阶段; 多挡转速; 频率控制系统

Design of Low-Speed Frequency Control System of Cascade Multilevel Inverter

CUI Yanwei

(Changzhi Industrial Information Research Center, Changzhi 046000, China)

Abstract: To address the issue of significant speed frequency fluctuations in cascade multilevel inverters during low-speed operation caused by the imbalance between electromagnetic torque and mechanical torque, a low-speed frequency control system was designed and developed. By modifying the speed frequency sampling components and multilevel inverter signal processor, adding multiple phase-shifting transformers, optimizing the internal structure of the speed frequency controller, and incorporating drive and protection circuits into the traditional system, a multi-hardware component connection and multi-speed frequency control hardware system were achieved. In the system software, the MT speed measurement method was used to accurately detect the initial value of the speed and frequency during the low-speed operation. By comparing the speed frequency control target with the initial speed frequency value and combining the calculations from multiple phase-shifting transformers, the control quantity for the motor speed and operating frequency of the inverter were determined. Frequency control commands were generated based on control variables, and executed through a step-wave control method, achieving the multi-speed frequency control of the inverter during low-speed operation. System testing experiments demonstrate that the designed system significantly reduce frequency control deviations and improve speed regulation accuracy and range, validating its superior control performance.

Keywords: cascade-frequency converter; multi level frequency converter; low speed stage; multi speed rotation; frequency control system

0 引言

级联多电平变频器通过将多个单电平的功率单元级联起来, 形成一个电平数较多的高压变频器^[1]。由于各个电平之间是级联的, 因此通过控制各个电平的输出电压比例来实现更高的输出电压和更低的谐波含量。这种

变频器在电力、石化及冶金等高压大功率应用场合中具有广泛的应用前景。在需要高精度和低转速控制的场合中, 级联多电平变频器的低速阶段, 在平稳性、谐波抑制等方面具有明显优势。然而, 在实际工业应用中, 例如高端装备制造、精密加工等领域, 低速控制仍然面临诸多挑战。在低速阶段, 级联多电平变频器的控制难题

收稿日期:2025-02-18; 修回日期:2025-03-25。

作者简介:崔岩巍(1983-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:崔岩巍. 级联多电平变频器低转速频率控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8):169-178.

主要体现在以下几个方面：首先，由于电磁转矩与机械转矩的不平衡，容易导致转速频率波动较大，影响系统的稳定性和精度；其次，低速运行时电压敏感性较高，微小的电压波动会导致显著的转速变化；此外，低速阶段还存在谐波抑制难度大、动态响应速度慢等技术瓶颈。这些问题在高端装备制造和精密加工等对转速控制精度要求极高的场合尤为突出。例如，在数控机床加工过程中，低速阶段的转速波动会直接影响加工精度和表面质量；在风力发电机组中，低速控制的不稳定性可能导致发电效率下降和机械磨损加剧。

为了能够满足不同的应用场景和工艺过程对电机转速的需求，保持变频器的稳定性和可靠性，设计并开发了级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制系统。转速频率控制是一种通过设定目标频率并利用转速反馈频率信号来调节电动机运行速度，确保其稳定运行的过程。目前发展较为成熟的研究成果中，文献 [2] 提出的针对风速不确定性的系统频率调节自适应控制系统针对机组调频的不确定性，在模型预测控制的框架下，以最小化储能前端调频功率偏差为目标，对储能调频的输出功率进行优化，并采用改进的 Whale 优化算法求解，通过对功率的调整，实现对频率的调节与控制。然而上述系统以风电储能系统作为控制对象，该系统与级联多电平变频器在工作原理和组成结构等方面均存在较大差异，因此将该控制系统应用到变频器控制工作中，无法保证能够达到预期控制效果。文献 [3] 提出的基于 SVPWM 的变频器控制调节系统在中性线控制的情境下，从理论上分析了 SVPWM 策略应用于不同扇区时，中点电位调节能力的极限边界，在边界条件约束下，对变频器的电位进行调节，进而实现对变频器工作参数的控制。上述方法在运行过程中，SVPWM 算法涉及较多的扇区判断、三角函数计算和平方根运算，导致算法的执行极易受到外界环境的干扰，进而影响系统的控制功能执行结果。文献 [4] 提出的基于电机参数失配的转速控制系统鉴于传递函数及 Lyapunov 理论存在的限制，利用状态空间方程的稳定性分析方法，用于模型预测转速控制。上述系统在运行过程中，参数失配会直接影响转速控制系统的动态响应性能，参数失配可能导致系统响应迟缓或过度调节，从而降低系统的控制效果。文献 [5] 提出的基于偏差耦合结构的转速同步控制系统基于传统偏差耦合结构中的固定增益转速补偿器，设计采用最小转速原则的新型同步转速补偿器，引入了一种优化的非线性函数，开发改进一阶自抗扰控制速度环控制器，在硬件设备支持下，执行相应的控制任务。偏差耦合结构的核心在于通过比较各电机间的转速偏差来调整控制指令，以实现同步控制。然而，在实际应用中，由于通信延迟、传感器误差等因素，可能导致系统难以精

确捕捉并响应转速偏差，进而影响转速频率控制结果。综上所述，传统转速频率控制系统均存在控制效果不佳的问题，为此以处于低速阶段的级联多电平变频器作为控制对象，优化设计多挡转速频率控制系统，以期能够达到预期的转速频率控制效果。

1 多电平变频器低速转速频率控制系统设计

1.1 系统硬件设计

级联多电平变频器在低速阶段实现多挡转速频率控制，主要依赖于其先进的载波调制技术和控制策略。这种变频器通常由多个 H 桥单元级联构成，每个 H 桥单元由 4 个开关管组成，通过控制这些开关管的通断，可以实现不同电平的输出电压。在不同电平电压驱动下，实现对电机频率的控制，进而控制电机转速及稳定性在级联多电平变频器的低速阶段多挡转速频率控制系统中，各个组件通过紧密的硬件连接和逻辑协同工作，共同实现精确的转速频率控制。系统通过 E6B2-CWZ6C 旋转光电编码器采集电机转速信号，并将旋转角度转化为脉冲电信号输出；该信号经过 HCPL-2630 高速光耦隔离和 74HC14 施密特触发器整形后，输入到 TI TMS320F28335 DSP 芯片中。DSP 芯片通过 ADS8568 模数转换器采集电流、电压信号，并结合 DRV8301 PWM 模块生成控制指令。同时，MPS-3000 多重移相变压器对输入电压进行相位调整，产生多组相位错开的电压信号，供给 INV-200 逆变器转换为电机所需的交流电。ADS8866 转速频率控制器通过 SPI 接口与外部 EEPROM 通信，存储控制参数，并通过 CAN 总线与上位机实时交互数据，实现多挡转速频率控制。

1.1.1 转速频率采样元件

为了获取级联多电平变频器^[6]的初始工作数据，从而确定转速频率控制的初始值，需对电机控制对象的当前转速以及工作电源频率进行采样。其中转速参数采用分辨率为 1024 PPR 的 E6B2-CWZ6C 型号的旋转光电编码器作为核心采样元件，通过测量被测物体的旋转角度并将测量到的旋转角度转化为脉冲电信号输出。旋转光电编码器能精准且有效地满足获取级联多电平变频器初始工作数据以确定转速频率控制初始值的需求，可通过测量被测物体的旋转角度，将这一物理量转化为脉冲电信号输出。这种转化方式不仅能直观反映电机的旋转状态，而且脉冲信号便于后续的数字化处理和分析。在级联多电平变频器的应用场景中，准确获取电机当前转速对于确定合适的转速频率控制初始值至关重要，旋转光电编码器凭借其高精度的角度测量能力以及稳定可靠的信号转换输出，能够为系统提供精确的转速数据。优化设计系统使用转速频率采样元件中转速参数的采样原理，如图 1 所示。

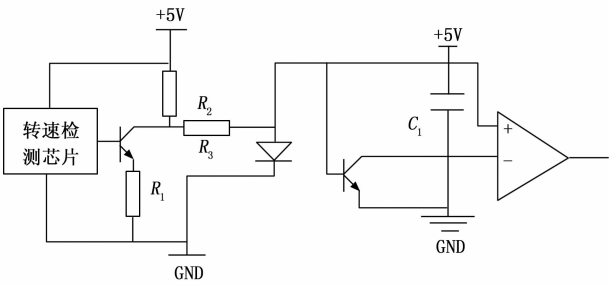


图 1 转速采样原理图

转速频率采样元件中的转速采样模块共包含 3 个输出信号，分别为转速脉冲信号和位置信号，所有输出信号均以 NPN 型集电极开路方式输出。在转速模块的集电极开路输出端加设一个 10 kΩ 的上拉电阻，生成转速脉冲序列。通过 HCPL-2630 型号的高速光耦隔离与 74HC14 型号的施密特触发器整形，输出控制器可直接读取的脉冲信号。根据电机电流和电压的频率特征，结合电流、电压频率与转速频率之间的关系，实现转速频率的采样。为保证电流和电压信号的采样质量，在传统采样设备基础上，在电流和电压采样模块中，分别加设截止频率为 1 kHz 的低通滤波电路和增益为 10 倍的信号调理电路，以提高采样信号的质量。

1.1.2 多电平变频器工作信号处理器

多电平变频器^[7]工作信号处理器负责处理来自采样设备的实时输出信号，并过滤初始信号中的干扰信号，达到提升信号质量的目的。同时，要求优化设计的信号处理器能够执行信号分析、控制量计算以及控制指令生成等工作。

信号处理器的核心为 TI TMS320F28335 型号的 DSP 芯片，其主频为 150 MHz，内存为 256 kB Flash 和 34 kB RAM。该芯片通过增加并行处理单元，实现多任务并行运行，保证处理器能够同步执行多个处理任务。DSP 芯片具备强大的数据处理能力和高速运算速度，能够快速处理电机转速反馈、电源频率监测等实时数据，满足系统对实时性的严格要求。此外，处理器中加设高通滤波器，避免运行过程中引入新的干扰信号。多电平变频器工作信号处理器的电路设计如图 2 所示。

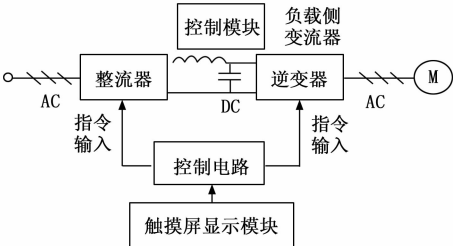


图 2 多电平变频器工作信号处理器电路图

核心部分为 DSP 芯片，通过扩展采样率为 500 kSPS、输入电压范围为 ±10 V 的 ADS8568 型号 ADC 模数转换器，以及输出频率 100 kHz、输出电流 2.5 A 的 DRV8301 型号 PWM 脉冲宽度调制模块，实现采样信号和控制信号的导入与输出。高通滤波器与 DSP 芯片集成，用于滤除高频干扰信号，确保信号处理的准确性。

通过增加并行处理单元，DSP 芯片可实现多任务并行运行，保证处理器能够同步执行多个处理任务，有效提升系统的整体性能和运行效率。根据多电平变频器的控制需求，扩展采样率为 500 kSPS、输入电压范围为 ±10 V 的 ADS8568 型号 ADC 模数转换器、输出频率 100 kHz、输出电流 2.5 A 的 DRV8301 型号 PWM 脉冲宽度调制模块等 DSP 芯片的外设接口，通过外设接口能够直接实现采样信号、控制信号的导入与输出。同时，在处理器中加设一个高通滤波器，避免处理器运行引入新的干扰项。

1.1.3 多重移相变压器

在低速阶段，电机的电磁转矩和机械转矩之间的不平衡会导致较大的转矩波动，而固定幅值和相位的输出电压无法灵活调整，难以满足低速时对转速精细控制的需求，从而导致转速频率波动较大，影响系统稳定性和控制精度。而多重移相变压器通过相位调整技术，能够生成多组相位错开的电压信号。其核心设计原理如下：

多重移相变压器采用多重化技术，通过调整输入电压的相位关系，生成多组相位错开的电压信号。其核心部分为 RT-250 型号整流变压器，原边采用星形连接，三组二次绕组彼此相位差 20°，分别通过星形与延边三角形连接方式为三相系统中的九个功率单元供给交流电。这种设计不仅能够有效减小网侧电流谐波，还能通过灵活调整相位设置，实现输出电压幅值和相位的精确控制，从而缓解低速阶段的转矩波动问题。多重移相变压器的工作电路如图 3 所示。

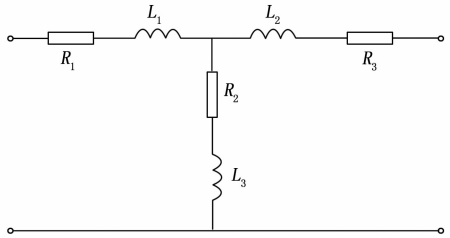


图 3 多重移相变压器工作电路图

图 3 的输入电压为三相 380 V ± 10%，输出电压为三相 220 V ± 5%。整流变压器的二次绕组通过多重化技术连接，每组绕组相位差 20°，分别供给逆变器的功率单元。INV-200 型号逆变器利用这些相位错开的电压

信号,通过内部高频开关器件将其转换为电机所需的交流电。整流变压器通过其二次绕组将相位错开的电压信号传输给多重移相变压器。多重移相变压器将调整后的电压信号供给 INV-200 逆变器,逆变器通过其内部开关器件将电压转换为电机所需的交流电^[8]。TMS320F28335 型号 DSP 芯片通过 DRV8301 型号 PWM 模块生成控制指令,调节多重移相变压器的相位设置,实现多挡转速频率控制。

通过上述设计,多重移相变压器能够灵活调整输出电压的幅值和相位,精确划分多个转速频率档位,使得变频器在低速阶段也能实现平滑且稳定的转速调节,从而满足不同负载特性和工艺需求^[9]。

1.1.4 转速频率控制器

为执行变频器低速阶段多挡转速频率控制指令,在转速频率硬件控制系统中对控制器元件进行优化,优化后转速频率控制器的内部组成结构如图 4 所示。

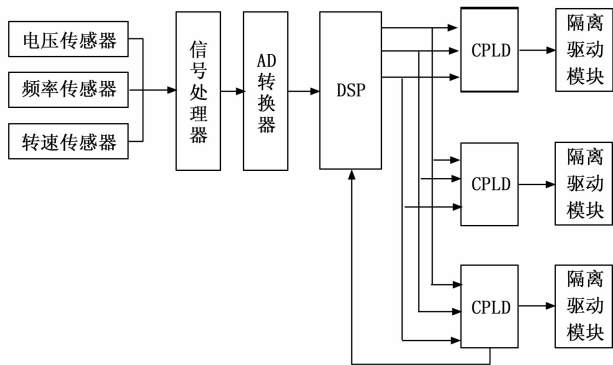


图 4 转速频率控制器组成结构图

优化的转速频率控制器采用增强哈佛结构,其主频为 200 MHz,内部具有 6 条独立的总线,包括程序存储器总线和数据存储器总线,支持并程序和操作数寻址,最大处理能力为 400 MIPS。ADS8866 型号控制器配备 16 位高精度,采样率为 1 MSPS,输入电压范围为 $\pm 10\text{ V}$,确保实时采集电机转速和频率信号;同时集成 DRV8305 型号 12 路 PWM 输出模块,输出频率范围为 $1\text{ Hz}\sim 100\text{ kHz}$,分辨率为 150 ps,用于精确驱动逆变器功率开关器件。控制器通过 SPI 接口与外部 EEPROM 通信,存储控制参数和算法程序,并通过波特率 1 Mbps 的 CAN 总线与上位机实时交互数据。优化的控制器能够在低速阶段实现 10 挡转速频率控制,每挡频率间隔 0.5 Hz,控制精度达到 $\pm 0.01\text{ Hz}$,响应时间 $< 1\text{ ms}$,确保变频器输出符合频率和幅值要求的电压波形,驱动级联多电平变频器和电机设备稳定运行。

1.1.5 系统电路设计

为保证级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制硬件系统中的所有组成元件均处于同步工作状态,并

根据转速频率反馈信号实现多硬件元件的同步驱动,在系统主电路中添加一个 IR2110 型号驱动电路^[10]。在级联多电平变频器的电机转速频率控制过程可能会产生泵升电压,影响控制效果,因此还需在主电路中添加一个保护电路。系统中驱动和保护电路的设计情况,如图 5 所示。

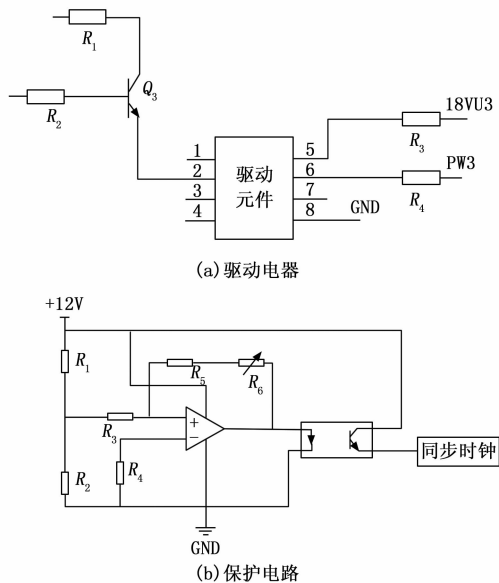


图 5 系统电路设计图

为应对电机转速频率控制过程中产生的泵升电压,在主电路中设计了一个 LM5050 型号保护电路,其过压检测阈值为 400 V,当检测到泵升电压超过设定值时,立即接通 RHR-50 能耗电阻吸收多余能量,将泵升电压幅度控制在安全范围内,保护硬件系统及内部元件。驱动电路通过频率 20 kHz,分辨率 12 位的 PWM 信号与控制器实时通信,确保电机驱动信号放大到足够的功率^[11],实现平滑且稳定的转速调节,满足低速阶段多挡转速频率控制的需求。

1.2 系统软件设计

在硬件系统支持下,对系统的软件功能进行优化设计,优化后转速频率的控制原理为:对电机的多个档位进行划分,确定不同档位下的标准转速以及频率,综合考虑当前的档位与负载需求,选择低速阶段需要切换的档位,由此确定转速频率控制目标^[12]。利用转速频率采样元件获取当前电机的实际转速以及变压器的输出电压与频率,以此作为初始控制数据。通过分析变频器输出电压与频率调节之间的关系,确定级联多电平变频器在电压、转速、频率等方面的控制量^[13]。根据变频器的工作原理可以看出,变频器主要通过改变电源的频率和电压来驱动电机,因此在转速频率控制过程中,主要对变频器的输出电压进行直接控制,进而实现对电机频率以及转速的控制。以控制量计算结果为内容,生成控

制信号以及控制电压波形，进而得出电机多挡转速频率控制结果。

1.2.1 选择级联多电平变频器挡位与转速频率控制目标

低速阶段电机运行特性复杂，不同的工作场景和负载条件对电机转速有多样化要求，精准控制转速频率能确保电机输出合适的动力，满足实际工况，如在精密加工设备中，稳定的低速运转对产品质量至关重要。同时，多挡转速设置可灵活适配不同任务需求，扩大变频器的应用范围^[14]。而且，级联多电平变频器本身的特性决定了挡位与转速频率控制的必要性，通过合理控制挡位和转速频率，能优化其输出电压和电流波形，降低谐波含量，提高电能质量，减少对电机和其他设备的不良影响，保障系统稳定高效运行，提升整体性能和可靠性。低速阶段变频器挡位可以划分为启动挡、低速运行挡和过度挡 3 个部分，3 个挡位标准频率区间分别为 [0 Hz, 5 Hz]、[5 Hz, 15 Hz] 和 [15 Hz, 30 Hz]，根据电压与频率之间的关系，可以将变频器的多挡位电压波动区间表示为：

$$\begin{cases} 0 \leq U_{\text{start}} \leq U_{\text{start-max}} \\ U_{\text{start-max}} \leq U_{\text{low}} \leq U_{\text{low-max}} \\ U_{\text{low-max}} \leq U_{\text{trans}} \leq U_{\text{trans-max}} \end{cases} \quad (1)$$

其中： $U_{\text{start-max}}$ 、 $U_{\text{low-max}}$ 和 $U_{\text{trans-max}}$ 分别为 3 个变频器挡位的最高频率，该变量的具体取值为：

$$\begin{cases} U_{\text{start-max}} = \frac{f_{\text{start}}}{f_e} \times U_e \\ U_{\text{low-max}} = \frac{f_{\text{low}}}{f_e} \times U_e \\ U_{\text{trans-max}} = \frac{f_{\text{trans}}}{f_e} \times U_e \end{cases} \quad (2)$$

式中， f_{start} 、 f_{low} 和 f_{trans} 分别为不同挡位频率区间中值， U_e 为变频器的额定工作电压。在此基础上，根据频率与转速之间的关系，确定转速控制目标为：

$$\begin{cases} v_{\text{start}} = \frac{60f_{\text{start}}}{p} \\ v_{\text{low}} = \frac{60f_{\text{low}}}{p} \\ v_{\text{trans}} = \frac{60f_{\text{trans}}}{p} \end{cases} \quad (3)$$

其中： p 为电机的极对数。在实际的级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制过程中，根据电机负载情况选择电机挡位，并确定对应电压、转速频率控制目标，最终控制目标的选择结果为：

$$\chi = \{v_\chi, U_\chi, f_\chi\}, \chi = \text{start, low, trans} \quad (4)$$

1.2.2 检测级联多电平变频器低速阶段转速频率初始值

低速阶段电机特性复杂且变频器输出存在诸多干扰因素，准确的初始值是后续精准控制的基础。只有获取

精确的转速频率初始值，才能依据实际情况合理设置控制参数，确保电机在不同转速挡位平稳启动和运行^[15-16]。否则，控制算法可能因初始值偏差而无法有效调节，导致电机转速波动、转矩输出不稳定，影响设备正常运行，甚至引发故障。因此，检测初始值是实现级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率精确控制、保障系统可靠稳定运行的关键前提^[17]。在转速频率采样元件支持下，利用 MT 测速法对电机转速和变频器的频率、电压进行检测，其中电机转速的检测原理如图 6 所示。

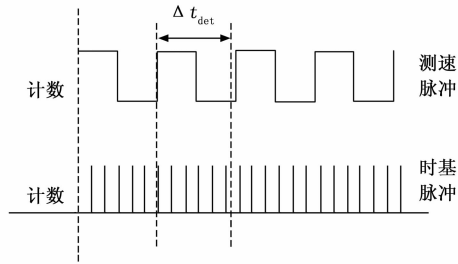


图 6 级联多电平变频器转速检测原理图

按照图 6 原理，同时测量检测时间并在该时段内对光电编码器产生的旋转脉冲信号个数进行容积，进而得出电机转速的检测结果，即：

$$\omega'_0 = \frac{60}{M \cdot \Delta t_{\text{det}}} \quad (5)$$

其中： M 和 Δt_{det} 分别为采样元件每旋转一周输出的脉冲数量以及转速检测时段。为保证工作参数检测质量，减少参数检测过程中环境干扰对检测结果产生的影响，需要对初始检测结果进行调整，调整过程可以量化表示为：

$$v_0 = v'_0 + \Delta v \quad (6)$$

式中， Δv 为电机转速环境补偿量。在实际的检测数据精度调整过程中，利用硬件设备对环境干扰进行感知，确定环境干扰量的具体取值。环境补偿量与环境干扰量大小相同，方向相反，由此确定变量 Δv 的具体取值，将相关数据代入公式 (7) 中，即可得出无环境干扰下的变频器转速参数检测结果。另外，变频器工作频率和电压初始值的检测结果为：

$$\begin{cases} f_0 = \frac{U_{\text{max}}(i) - U_{\text{max}}(i+1)}{t_i - t_{i+1}} + \Delta f \\ U_0 = U_{\text{in}} \times \delta + \Delta U \end{cases} \quad (7)$$

式中， $U_{\text{max}}(i)$ 和 $U_{\text{max}}(i+1)$ 分别为连续两个相邻的电压峰值， t_i 和 t_{i+1} 分别为电压峰值对应的检测时间， U_{in} 和 δ 为变频器的输入电压和电压变换比， Δf 和 ΔU 为干扰环境下对检测频率和电压数据的补偿量。按照上述方式，即可得出当前级联多电平变频器低速阶段转速频率初始值的检测结果。

1.2.3 计算级联多电平变频器低速阶段转速频率控制量

低速阶段对转速频率的控制精度要求较高,传统固定输出无法满足需求。通过计算转速频率控制量,可以根据实际工况动态调整电压幅值和相位,实现更精细的控制。级联多电平变频器通过控制各个 H 桥单元的开关状态,生成电压波形。因此,在低速阶段,通过结合多重移相变压器计算转速频率控制量,可以优化输出电压和电流波形,降低谐波含量,提高电能质量。不仅能确保电机在不同转速挡位下都能稳定运行,避免出现转速波动、转矩不均等问题,还能有效提升电机的运行效率,降低能耗^[18]。因此,本节通过转速频率控制目标与转速频率初始值之间的对比,直接计算电机转速和变频器工作频率控制量,其中电机转速控制量计算结果为:

$$K_v = v_m - v_0 \quad (8)$$

另外变频器工作频率控制量的计算公式如下:

$$K_f = f_m - f_0 \quad (9)$$

将转速和工作频率的初始值检测结果与挡位控制目标选择值代入到上述公式中,即可得出控制量的计算结果,并根据控制量的正负属性确定控制方向。级联多电平变频器中的多个载波信号被层叠在一起,并与一个共同的调制波进行比较。每个载波信号对应一个电平,当调制波高于载波信号时,相应的开关器件导通,输出高电平;反之,则输出低电平。通过调整调制波的幅值和频率,可以控制输出电压的幅值和频率。变频器电压控制量 $K_U(j)$ 的计算结果为:

$$K_U(j) = \frac{2j - n_{\text{level}} - 1}{n_{\text{level}}} \cdot (U_m - U_0) \cdot \delta \quad (10)$$

其中: j 为电平索引, n_{level} 为变频器中包含的级联电平数量。将电压初始值与控制值的检测结果输入到公式(9)中,即可得出变频器工作电压控制量的计算结果。

1.2.4 实现系统变频器低速阶段多挡转速频率控制任务

根据级联多电平变频器低速阶段转速频率控制量的计算结果,生成频率控制指令,采用阶梯波控制方式执行频率控制指令,通过对级联多电平变频器输出电压的控制,实现对变频器频率的控制,进而控制电机转速。系统变频器低速阶段多挡转速频率控制原理如图 7 所示。

按照图 7 所示的原理,在实际控制过程中,系统会根据预设的转速频率挡位和当前的负载需求,选定合适的转速挡位,并计算相应的电压、转速等参数控制量。级联多电平变频器的输出电压是由所有电平的输出电压相加得到的^[19-20]。电平数指的是输出波形中,从正的最大值到负的最大值之间所包含的阶梯数。通过控制每个

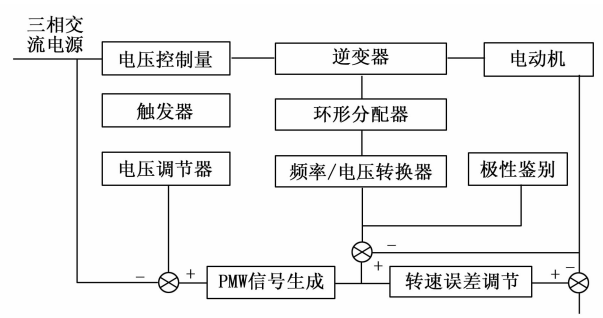


图 7 系统变频器低速阶段多挡转速频率控制原理图

H 桥单元的开关管,可以实现多个电平的输出电压,级联多电平变频器中电平索引下任意电平电压控制指令的生成结果 $H_U(j)$ 为:

$$H_U(j) = \sigma K_U(j) \sin(f_{\text{Fund}} t - \beta) \quad (11)$$

其中: σ 为调制比, f_{Fund} 和 β 分别为基波频率和贝赛尔函数。则作用到级联多电平变频器上的电压控制指令为:

$$H_U = \sum_{j=1}^{n_{\text{level}}} H_U(j) \quad (12)$$

式中, n_{level} 为变频器中包含的级联电平数量。在此基础上,在低速阶段,为了精确控制转速和频率,级联多电平变频器采用了载波移相的控制策略。在每个功率单元内,采用同一个三角载波和一对反相的正弦调制波进行比较,以产生 PWM 脉冲,产生控制脉冲信号为:

$$M = H_U(B_{\text{tri}} - B_{\text{sine}}) \quad (13)$$

式中, B_{tri} 和 B_{sine} 分别为生成的三角载波信号和正弦调制信号,对于级联多电平变频器,同一相的功率单元使用同一对调制波,并按照全周期移相,使 3 个载波分别错开 120° 。同时,三相同一位置的功率单元采用同一个载波,但调制波对错开 120° 。在计算出控制信号后,这些信号会被发送到变频器的功率单元,通过级联多电平结构精确生成所需的输出电压波形。在电压 PWM 脉冲作用下,系统变频器低速阶段多挡转速频率控制任务的执行结果可以量化表示为:

$$\begin{cases} U_{\text{control}} = M \otimes U_0 \\ f_{\text{control}} = U_{\text{control}} \times f_0 (1 + K_f) \times \kappa_{f/U} \\ \omega_{\text{control}} = \frac{60 f_{\text{control}}}{p} + K_\omega \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\kappa_{f/U}$ 为频率和电压之间的关系系数。根据电压、频率以及转速之间的相互关系,确定各个变量的具体取值,实现相应的多挡转速频率控制任务。在系统控制过程中,系统会持续监测变频器和电机的实际转速和运行状态,确保电机能够稳定运行于所选的转速挡位。若检测到转速偏差或异常情况,系统会立即调整控制信号,以实现对电机转速的精确控制。

2 系统测试

以测试优化设计级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制系统的控制功能为目的，设计系统测试实验，此次实验的基本原理为：以级联多电平变频器为控制对象，将其调整至低速阶段，并划分成空载和负载两种工况。生成多个转速频率控制任务，在系统硬件和软件部分的协同工作下，实现系统的转速频率控制任务，并将控制系统作用下电机的实际工作频率和转速值设定的控制目标进行对比，得出反映控制功能的测试结果。

2.1 准备级联多电平变频器控制对象

此次实验选择 GH150 型号的 H 桥级联型多电平变频器作为控制对象，该变频器采用单元串联的结构设计，通过 H 桥级联技术，实现高电压及大容量输出。该变频器内部具有自动单元旁路和单元冗余设计，确保在单元故障时，系统仍能满载正常运行。将准备的级联多电平变频器安装到电网环境中，并与电机相连，将电网的电源接到变频器的输入端，确保接线正确无误。

将电机与变频器相连，用于测试转速频率控制效果。在电机轴上安装速度传感器，用于实时监测电机转速。将信号处理器与速度传感器相连，以处理转速信号。使用数据采集卡实时采集变频器和电机的电压、频率和转速数据。使用示波器观察变频器输出电压波形，确保波形符合预期。根据变频器的控制要求，连接控制电路。使用屏蔽线或双绞线，确保与主回路分开布线，同时按照变频器的接地要求，将变频器和电机分别接地。

2.2 低速阶段设定级联多电平变频器工况

在低速阶段，对级联多电平变频器的工作转速进行设定，要求变频器的转速值不高于 1 000 r/min。将电网环境中的级联多电平变频器划分成空载和负载两种工况，在空载工况下，变频器的输出频率为 5 Hz，输出电压为额定电压的 30%，而在负载工况下，变频器的输出频率和电压分别为 5 Hz 以及额定电压的 50 %。两种工况下，级联多电平变频器的输出电压如图 8 所示。

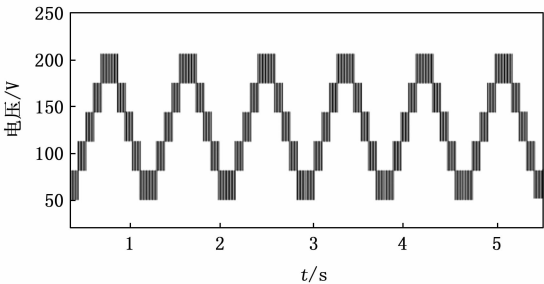


图 8 级联多电平变频器输出电压波形图

在工况设定过程中，要确保变频器的额定功率、输出电压和电流等参数与电机的额定参数相匹配，以避免过载运行和损坏设备。

2.3 生成多挡转速频率控制任务

从变频器输出电压、输出频率以及电机工作转速等方面，生成多个多挡转速频率控制任务，明确变频器和电机的初始值和控制目标。部分多挡转速频率控制任务的生成情况，如表 1 所示。

表 1 多挡转速频率控制任务表

控制任务编号	初始电压/V	初始频率/Hz	初始转速/(r/min)	电压控制目标/V	频率控制目标/Hz	转速控制目标/(r/min)
1	220	0	0	380	10	300
2	220	10	300	380	20	500
3	220	20	500	380	35	600
4	220	35	700	380	50	800
5	220	50	900	380	60	1 000

表 1 中的控制目标即为验证系统控制效果的比对标准。

2.4 安装并调试转速频率控制系统硬件元件过程概述

根据级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制硬件系统的优化设计结果，将相关的硬件元件安装到实验环境中。将速度传感器安装在电机轴上或附近，连接传感器到信号处理器的输入端，连接多重移相变压器的输入输出端，并将信号处理器与控制器相连。根据电机的特性和系统需求，设置硬件元件的工作参数，在空载条件下，测试系统的启动、停止和转速调节功能是否正常，并在负载条件下，观察电机在不同转速下的运行状态，确保系统能够稳定运行并满足应用需求。

2.5 描述系统测试实验过程

优化设计级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制系统的软件部分使用 Matlab/Simulink 工具进行开发，该工具能够提供断点调试、变量监视、内存查看等调试功能，同时能够模拟系统的实际运行情况。设定控制系统的基波频率为 60 Hz，频率和电压之间的关系系数为 0.4。根据生成的多挡转速频率控制任务，对级联多电平变频器和电机的初始运行数据进行设定，连接系统的硬件部分，在硬件和软件部分的协同工作下，得出级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制任务的执行结果，如图 9 所示。

按照上述方式可以重复执行系统的多挡转速频率控制任务，得出空载和负载工况下，得出相应的转速频率控制结果，并在控制系统运行过程中收集变频器和电机的实时工作数据，将其作为控制系统的实验测试结果数据。实验设置引言中文献 [3] 提出的基于 SVPWM 的变频器控制调节系统和文献 [5] 提出的基于偏差耦合

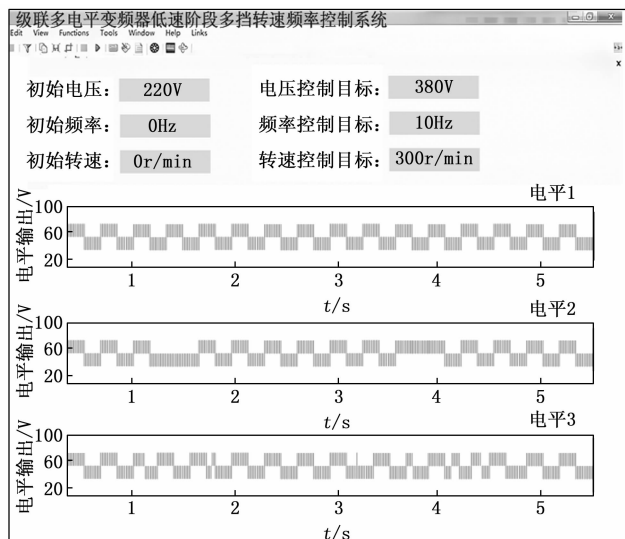


图 9 级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制结果

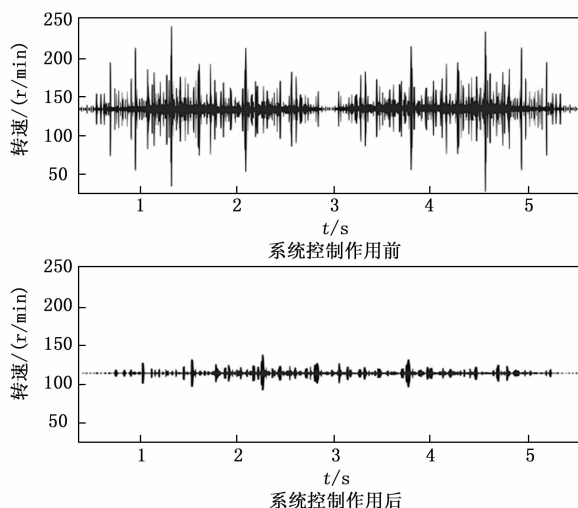


图 10 系统控制前后多挡转速频率波形图

结构的转速同步控制系统作为实验对比,在控制系统开发过程中,利用 Matlab/Simulink 工具搭建了级联多电平变频器的仿真模型,并基于仿真结果对控制算法进行了优化设计和验证。将优化后的控制算法通过代码生成工具 Matlab Coder 转换为嵌入式 C 代码,并下载到实际变频器的 DSP 控制单元中。通过实验平台将变频器与电机连接,验证了控制算法在实际硬件环境中的性能表现。

2.6 设置系统控制功能测试指标

为对级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制系统控制功能的量化测试,分别从频率和转速两个方面设置系统控制功能的量化测试指标,其中频率控制功能的测试指标为频率控制偏差,该指标的测试结果为:

$$\epsilon_f = |f_{\text{control}} - f_m| \quad (15)$$

其中: f_{control} 和 f_m 分别为级联多电平变频器输出频率的实际控制值和控制目标值。转速控制指标为调速精度和调速范围,调速精度的测试结果为:

$$\epsilon_\omega = \frac{1}{|\omega_{\text{control}} - \omega_m|} \quad (16)$$

式中, ω_{control} 和 ω_m 为电机转速的控制值和控制目标。系统调速范围的测试结果如下:

$$S = |\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}| \quad (17)$$

式中, ω_{max} 和 ω_{min} 分别为控制系统作用下电机的最大转速和最小转速。最终计算出频率控制偏差越小,调速精度和调速范围取值越大,证明对应系统的控制功能越优。

2.7 实验结果与分析

级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制系统控制下前后转速频率的实际变化情况,如图 10 所示。

通过级联多电平变频器实时输出频率数据的统计,得出基于 SVPWM 的变频器控制调节系统、基于偏差耦合结构的转速同步控制系统与所构建的级联多电平变频器低速频率控制系统作用下频率控制偏差的测试结果,如图 11 所示。

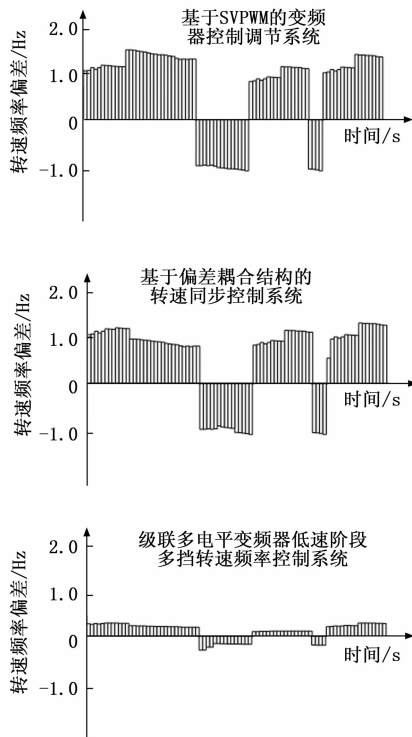


图 11 级联多电平变频器频率控制偏差测试结果

从图 11 中可以直观看出,在低速阶段,优化设计系统的频率控制偏差显著减小,工作频率更接近目标值。通过公式 (15) 计算,偏差值明显低于传统系统,表明其在低速下的控制精度更高。基于 SVPWM 的变

变频器控制调节系统在低速阶段的频率控制偏差较大，尤其是在多挡转速切换时，偏差波动明显，导致频率控制不够稳定，难以精确跟踪目标频率。基于偏差耦合结构的转速同步控制系统虽然该系统在部分转速点表现较好，但在低速阶段的频率控制偏差仍然较大，尤其是在低转速下，偏差波动较为频繁，控制效果不如优化设计系统。

在数据支持下，通过公式（16）和（17）的计算，得出级联多电平变频器低速阶段多挡转速频率控制系统调速精度和调速范围的测试结果，如图 12 所示。

从图 12 可以看出，优化设计系统在低速阶段的调速精度显著提升。通过对变频器实时工作参数的精准检测，系统能够更精确地控制电机转速，减少了转速波动，使实际转速更接近目标值。有效扩大了调速范围，能够稳定运行在更低的转速区间，同时在高转速区间也能保持较好的控制性能。而基于 SVPWM 的变频器控制调节系统与基于偏差耦合结构的转速同步控制系统调速精度较低，调速范围较窄，实际转速与目标转速之间存在明显偏差，难以稳定运行在极低转速区间，限制了其应用场景。

为验证优化设计系统在不同负载类型下的性能表现，增强实验结果的普适性和可靠性。通过引入谐波失真率，以评估系统性能。不同负载类型的谐波失真率如表 2 所示。

表 2 不同负载类型的谐波失真率 %

不同负载类型	级联多电平变频器低转速频率控制系统	基于 SVPWM 的变频器控制调节系统	基于偏差耦合结构的转速同步控制系统
空载	2.5	4.8	3.6
恒转矩负载	2.8	5.2	4.0
风机泵类负载	3.0	5.5	4.5

实验结果表明，优化设计的级联多电平变频器低转速频率控制系统在不同负载类型下均表现出更低的谐波失真率，显著优于基于 SVPWM 的变频器控制调节系统和基于偏差耦合结构的转速同步控制系统。这一结果验证了优化设计系统在多种负载条件下的性能优越性和稳定性，表明其具有更高的控制精度和更低的谐波干扰，增强了实验结果的普适性和可靠性，为系统在实际工业应用中的广泛适用性提供了有力支持。

3 结束语

在此次研究中，级联多电平变频器在低速阶段的多挡转速频率控制系统的优化设计旨在克服传统变频调速系统在低速运行时面临的效率下降、控制效果不佳等挑战。通过多挡转速频率控制系统的优化设计，不仅明确了控制系统在确保电机稳定运行、提升能源利用效率方面的核心目的，还深刻体现了其在促进工业自动化升级、节能减排方面的重大意义。通过精细

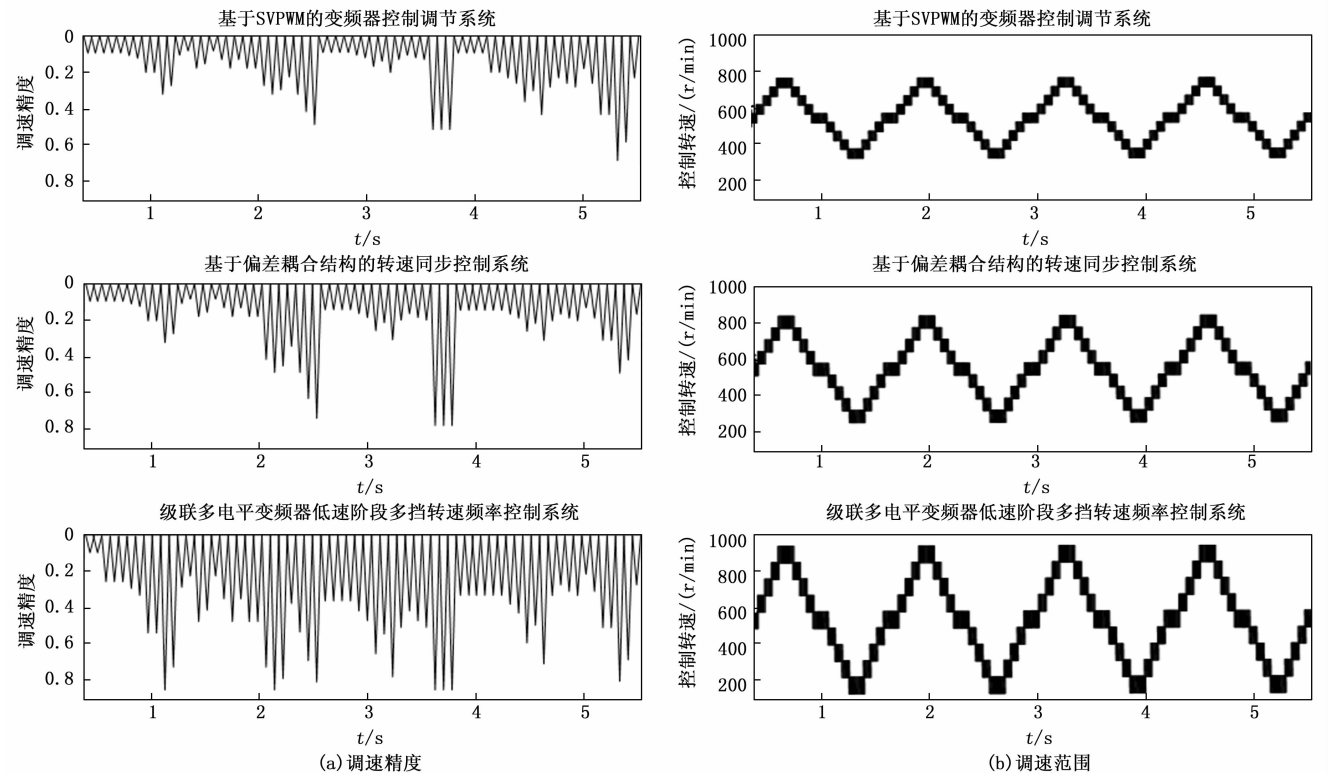


图 12 多挡转速频率控制系统调速精度和范围测试结果

化的多挡转速调控策略,系统能够有效适应不同负载条件下的转速需求,优化电机性能,减少维护成本,为高端装备制造、能源管理及精密加工等领域提供了强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 骆志伟,张敏,李昕,等.级联 H 桥变频调速系统电机端过电压抑制方案研究[J].燕山大学学报,2023,47(4):319-328.
- [2] CHEN C, LI L. Frequency regulation adaptive control strategy of wind energy storage system for wind speed uncertainty[J]. Energies (19961073), 2024, 17(11): 1-14.
- [3] 胡亮灯,吴文捷,楼徐杰,等.基于 SVPWM 的三电平变频器无中性线控制中点电位调节能力[J].海军工程大学学报,2023,35(4):20-28.
- [4] 牛峰,高禄辰,胡艳芳,等.基于电机参数失配的模型预测转速控制系统运行稳定性研究[J].电机与控制学报,2023,27(6):55-63.
- [5] 刘宗锋,杨其玺,王庆洲,等.基于偏差耦合结构的多电机转速同步控制系统[J].机械设计与制造,2023(4):34-39.
- [6] 吴小田,周宏林,蒋林,等.燃机静止启动变频器控制中的几个关键问题[J].电力电子技术,2023,57(3):53-55.
- [7] 咸粤飞,崔晓光,胡冰,等.采煤机牵引变频器功率平衡控制策略的研究[J].电力电子技术,2023,57(11):47-50.
- [8] 曹俊英,姚骏,黄森,等.基于裕度因子的多风电场站集群频率协调控制策略[J].电力自动化设备,2024,44(3):105-112.
- [9] 齐歌,胡万龙,马丁.改进电机全速域无位置传感器转速控制系统研究[J].组合机床与自动化加工技术,2024(6):110-114.
- [10] 聂永辉,刘家僮,孙斌,等.基于转子动能释放的风电并网系统非线性频率控制策略研究[J].中国电机工程学报,2023,43(23):9127-9136.
- [11] 刘军,朱世祥,柳盼攀,等.考虑系统频率安全稳定约束的风储联合频率响应控制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(1):73-84.
- [12] 连传强,郭力源,许观达,等.永磁伺服系统转速跟踪控制与数据驱动的参数设计方法[J].电工技术学报,2024,39(8):2412-2421.
- [13] 侯利民,兰晓儒,赵世杰,等.多智能体系统固定时间一致性的多永磁同步电机转速协同控制[J].电工技术学报,2024,39(20):6345-6356.
- [14] 江守其,徐亚男,李国庆,等.提升海上风电经柔直联网系统频率稳定性的协调控制策略[J].电力自动化设备,2023,43(9):194-201.
- [15] 任金霞,何明晏,姚广辉.基于改进 ESO 和分数阶滑模的 PMSM 转速控制[J].组合机床与自动化加工技术,2023(12):137-141.
- [16] 王萍.基于 FOA 优化 PID 参数的永磁同步电机转速控制[J].微特电机,2024,52(8):58-62.
- [17] 刘泓杉,刘慧博.基于径向基函数神经网络的永磁同步电机转速自适应控制策略[J].电子器件,2023,46(6):1552-1560.
- [18] 唐玉烽,杨苹,杨义.考虑频率二次跌落的风电机组频率响应控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(9):166-174.
- [19] 杨哲斌,邓峰峰,张晓军,等.基于转矩跟踪电流误差校正的压缩机转速脉动抑制算法研究[J].电机与控制学报,2024,28(7):13-23.
- [20] 付兴烨,薛玉翠,李美丽,等.电机变频调速器电压稳态 PLC 控制仿真[J].计算机仿真,2023,40(7):359-362.
- [11] 王建超,张志科,杨栋,等.基于人机协同的铁路客运安检系统研究[J].中国铁路,2023(10):104-113.
- [12] 朱燕玲,苏元芳,栾豆豆,等.基于排队论的机场安检优化研究[J].山东青年,2019(2):133-134.
- [13] 赵天可,杨栋,王椿钧,等.基于排队系统模型的铁路旅客车站安检集中判图作业模式研究[J].中国铁路,2024(11):152-158.
- [14] 姚加林,潘学成.基于排队论的高铁车站安检设备运用优化研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(8):1919-1925.
- [15] 张秋亮,唐雯,杨栋.基于智能识别技术的铁路旅客运输安全检查管理信息系统[C]//第十六届中国智能交通年会论文集,2021:264-271.
- [16] 李纯,张洪斌,李嘉毅,等.基于深度学习的 X 光安检图像识别方法[J].信息记录材料,2024,25(2):226-229.
- [17] 王乾胜,展勇忠,邹宇.基于改进 YOLOv5n 的无人机对地面军事目标识别算法[J].计算机测量与控制,2024,32(6):189-197.
- [18] 王雪秋,高焕兵,郑泽萌.改进 YOLOv8 的道路缺陷检测算法[J].计算机工程与应用,2024,60(17):179-190.
- [19] 闵浩,屈八一,谢子豪.基于改进 YOLOv8 的隧道火灾检测研究[J].计算机测量与控制,2024,32(5):38-45.
- [20] 杨烁,匡国冠,刘龙华,等.基于 YOLOv8 的裂缝检测与量化[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(3):25-31.