

[变频控制]

基于多目标优化的风机变频器控制技术研究

文/任大智
国家能源（山东）新能源有限公司

针对风机变频器控制技术展开研究，重点分析如何通过多目标优化方法提高风机系统的运行效率、可靠性和稳定性。提出一种基于多目标优化的控制方法，将能耗、风机性能和运行寿命作为优化目标，通过先进的算法实现风机变频器的最优控制。实验结果表明，该方法能够显著降低能耗，优化风机运行性能，并延长设备使用寿命，为风机变频控制领域提供新的解决方案。

近年来，随着工业智能化的发展，多目标优化方法逐渐引入风机控制领域，为解决多种性能指标之间的冲突提供全新的思路^[1-2]。通过多目标优化，可以综合考虑风机运行中的能耗最小化、性能优化和设备寿命延长等多个关键目标，从而显著提升控制系统的综合性能。同时，先进优化算法（如遗传算法、粒子群优化算法等）的发展，为风机变频器的多目标优化控制提供技术保障^[3-4]。

基于多目标优化的风机变频器控制数据处理

风机变频器控制中的多目标优化需要以大量准确的数据为基础，包括风机运行状态、环境条件和控制参数等。这些数据不仅是优化模型输入的关键，还能为实时控制提供支持^[5]。数据处理的核心任务是从采集到的原始数据中提取关键特征并建模，通过高效计算实现多目标优化控制。数据处理过程主要包括数据采集、预处理、特征提取和优化建模。

在多目标优化控制中，风机运行数据通过传感器进行实时采集，包括电气参数（如电压、电流及功率）、机械参数（如转速、振动及温度）、流体参数（如风量、风压）以及环境参数（如湿度、气

温等）。传感器阵列以高频率记录这些关键参数，通过工业通信协议（如Modbus、CAN总线等）传输至中央控制系统。数据采集的频率需要权衡实时性和系统处理能力，通常设置为1~10 Hz，以确保数据更新速度能够满足控制需求。

原始数据往往伴随着噪声或异常值，需要经过预处理以提高数据质量并确保优化模型的可靠性。首先，通过低通滤波器消除高频噪声，使信号更平滑，滤波后的信号可以表示为

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

式中， $x(t)$ 为输入信号； $h(t)$ 为滤波器的脉冲响应函数； $y(t)$ 为处理后的信号。

其次，为检测数据中的异常点，可以采用基于标准差的方法，若某数据点偏离均值超过 3σ ，则视为异常值并剔除。公式为

$$|x_i - \mu| > 3\sigma$$

式中， μ 为均值； σ 为标准差； x_i 为当前数据点。

此外，对于因传感器故障或信号丢失造成的数据缺失，通过插值算法补全，确保数据的连续性。最后，经过归一化处理后，数据标准化为[0, 1]区间。公式为

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

这种归一化方法消除了量纲差异，使数据更加适用于优化模型。

为支持多目标优化，预处理后的数据需要进行特征提取，提取的特征主要与能耗、性能和寿命目标相关。在能耗特征方面，通过风机的功率 P 和流量 Q 计算单位能耗，公式为

$$E = \frac{P}{Q} \quad (3)$$

式中， E 为单位能耗，表示风机在单位流量下的能耗水平。

在性能特征方面，可以通过风压 P_f 和流量 Q 计算风机效率

$$\eta = \frac{P_f Q}{P} \quad (4)$$

式中， η 为风机效率； $P_f \cdot Q$ 为输出功率。

在寿命特征方面，利用振动信号的能量特性来评估机械稳定性，振动能量可以表示为

$$E_v = \int_0^T v(t)^2 dt \quad (5)$$

式中， $v(t)^2$ 为振动信号； T 为测量时间段。

通过特征提取，能够从高维数据中提炼出对优化目标最为关键的变量。

在特征提取完成后，为提高优化效率，本文对特征数据进行降维处理，通过主成分分析（PCA）减少冗余变量。降维后的数据可以用主成分表示为

$$z_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \quad (6)$$

式中， Z_i 为降维后的主成分； x_j 为原始特征； w_{ij} 为权重矩阵元素。

PCA能够有效降低模型复杂性，同时保留数据的主要信息。

基于处理后的数据，可构建多目标优化模型。风机变频器的控制优化问题可以表述为以下数学模型

$$\text{minimize } \{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\}, g_i(x) \leq 0 \text{ 和 } h_j(x) = 0 \quad (7)$$

式中， $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 分别为能耗、性能和寿命的目标函数； $g_i(x)$ 、 $h_j(x)$ 分别为约束条件和等式条件。

在具体实现中，能耗目标函数可以表示为风机功率的最小化为

$$f_1(x) = P = \frac{Tn}{\eta} \quad (8)$$

式中， T 为扭矩； n 为转速； η 为风机效率。

性能目标函数通过最大化效率表示为负值

$$f_2(x) = -\eta = -\frac{P_f Q}{P} \quad (9)$$

寿命目标函数通过最小化振动能量表示

$$f_3(x) = \int_0^T v(t)^2 dt \quad (10)$$

通过上述步骤，得到处理后的风机数据，并能够构建出相应的多目标优化模型。

基于多目标优化的风机变频器控制模型

1. 控制优先级计算

在风机变频器的多目标优化控制中，能耗、性能和寿命三个目标的权重需要根据运行条件的变化动态调整，以实现控制策略的灵活性和自适应性。优先级的计算是这一过程的核心，通过对实时监测的数据进行分析，动态评估各目标的重要性，从而分配适当的权重用于优化控制。

在实际运行中，风机的负载条件、运行状态和环境因素都会影响控制目标的优先级。例如，当风机运行在低负载或高效区时，降低能耗是主要目标；而在运行负载较重或环境复杂（如高温或高振动）时，设备的稳定性和寿命保护则更为重要。因此，优先级的计算方法需要根据实时数据对各优化目标的重要性进行量化评估，并输出对应的权重值。

优先级的计算可以通过基于实时监测数据的加权因子方法来实现。假设优化目标包括能耗优化（ f_1 ）、性能优化（ f_2 ）和寿命优化（ f_3 ），其优先级权重分别为 w_1 、 w_2 、 w_3 ，满足以下条件

$$\sum_{i=1}^3 w_i = 1 \quad (11)$$

式中， $w_i > 0$ 。

权重的分配依据是实时监测到的运行状态参数（如负载系数 L 、效率偏差 $\Delta\eta$ 和振动幅值 v ），这些参数反映了当前风机的运行需求。优先级权重的计算公式为

$$w_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^3 S_i} \quad (12)$$

式中， S_i 为每个目标的优先因子。以实时监测的运行数据为输入，优先因子被动态计算并归一化后，生成各目标的优先级权重。最终的权重分配结果使

得优化模型能够根据运行条件灵活调整控制策略。这种动态权重分配机制确保了优化模型的灵活性，使风机变频器能够自适应运行条件的变化，实现能耗、性能和寿命目标的综合优化。

2. 考虑优先级的多目标优化控制

在风机变频器的多目标优化控制中，由于不同目标（如能耗、性能及寿命）的优化需求在不同工况下具有差异性，因此需要动态调整目标的重要性。通过引入动态优先级计算，将实时工况数据与优化策略相结合，可以根据运行条件的变化调整控制目标的权重，从而实现多目标的综合优化。基于此，多目标优化控制模型被构建为一个加权综合目标函数，用于描述能耗、性能和寿命的动态平衡，其数学形式为

$$J(x) = \sum_{i=1}^3 w_i f_i(x) \quad (13)$$

式中， $J(x)$ 为综合目标函数； $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 分别为能耗、性能和寿命目标函数； w_1 、 w_2 、 w_3 为目标权重，满足 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ 。

优先级的分配通过运行状态的实时评估实现，例如，负载系数、效率偏差以及振动信号幅值等关键参数。权重调整的动态机制使优化模型能够将运行策略的重点转移到当前最需要关注的方向。

在负载较轻的情况下，权重 w_1 增大，优化策略会优先减少功率消耗，从而实现能耗优化。当运行工况较为复杂（如振动信号超出安全阈值）时，权重 w_3 增大，优化模型则会优先减少振动冲击以保护设备。这种动态调整的特性使得风机变频器的控制策略能够灵活应对复杂的运行条件。

优化过程通过智能算法实现，在迭代过程中不断调整权重分配，并以综合目标函数为适应度函数，寻找最优解。这种基于动态优先级的优化控制策略，不仅提升了风机系统的能效，还在性能优化和设备寿命延长方面展现出显著优势。通过实时响应运行状态的变化，优化模型能够有效地平衡多个目标，实现系统的整体性能提升。

实验研究

为了验证本文提出的风机变频器多目标优化控制模型的实际效果，与传统控制方法进行了对比实验。实验主要针对不同控制方法在能耗、性能和振

动幅值三个关键指标上的表现进行评估。

表1 风机变频器能耗对比结果

实验次数/次	本文方法能耗/kW	传统方法能耗/kW
1	3.1	3.6
2	3.15	3.65
3	3.08	3.7
4	3.2	3.55
5	3.12	3.62
6	3.18	3.68
7	3.11	3.58
8	3.09	3.64
9	3.14	3.66
10	3.13	3.61

从表1可以看出，本文提出的方法在能耗方面表现出了显著优势。实验结果显示，本文方法的平均能耗为3.13 kW，显著低于传统方法的3.63 kW，表明本文方法在降低能耗方面更加高效。在所有实验次数中，本文方法的能耗均低于传统方法，最低能耗仅为3.08 kW，而传统方法的最低能耗仍高达3.55 kW。这一结果表明，基于多目标优化的风机变频器控制模型在节能性能上具有显著优势，能够在多变的工况下有效降低风机运行的功率消耗，为工业节能提供了更优的解决方案。

此外，为进一步分析本文方法在不同负载条件下的表现，对效率和振动幅度的实验结果进行了可视化分析，结果如图1、图2所示。

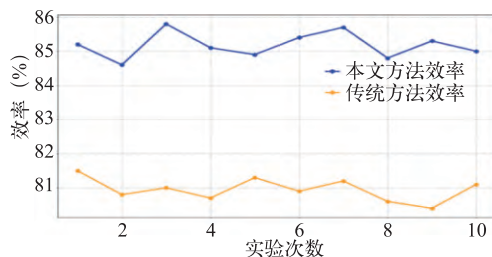


图1 风机变频器效率对比结果

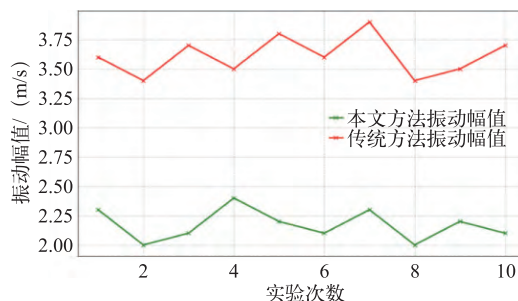


图2 风机变频器振动幅度对比结果

根据图1和图2可知,本文方法在风机变频器的效率提升和振动幅值控制方面均表现出显著优势。

在效率方面(见图1),本文方法的运行效率始终保持在较高的区间(约84.6%~85.8%),波动幅度较小,表现出良好的稳定性和一致性。而传统方法的效率较低,通常在80.4%~81.5%,且波动幅度较大,说明传统方法在面对不同运行工况时效率表现不够稳定,容易受到运行条件变化的影响。相比之下,本文方法能够更好地适应不同负载条件,在效率提升方面具有显著优势。

在振动幅值方面(见图2),本文方法的振动幅值始终保持在较低区间(约2.0~2.4 mm/s),波动较小,表明其在机械冲击的抑制和设备保护方面具有良好的效果。而传统方法的振动幅值较高,通常在3.4~3.9 mm/s之间,且波动较大,这反映出传统方法在复杂工况下难以有效控制机械振动,可能导致设备运行的不稳定性和寿命缩短。相比之下,本文方法在振动控制方面显著优于传统方法,有效降低了机械冲击,为设备的长期稳定运行提供了保障。

结束语

本文围绕风机变频器控制技术,提出一种基于

多目标优化的控制策略,并通过实验验证其在能耗优化、性能提升和振动控制方面的显著效果。研究结果表明,该方法能够根据不同工况动态调整优化目标的优先级,有效降低能耗,提高运行效率,并显著降低振动幅值,从而延长设备的使用寿命。**EA**

(收稿日期:2025-06-30)

参考文献

- [1] 朱海军,李晨,刘彬.矿用不间断电源风机变频器DC/DC设计与研究[J].煤矿机械,2022,43(10):6-9.
- [2] 刘其辉,洪诚程,樊双婕,等.一种基于二重移相变换的大容量海上直流风机及控制技术[J].中国电机工程学报,2023,43(2):507-519.
- [3] 崔文豪,冯建军,朱国俊,等.基于叶片载荷分布的离心风机多目标优化设计[J].工程热物理学报,2024,45(7):1949-1959.
- [4] 宋子秋,冯翰宇,余照国,等.基于模型预测控制的半潜漂浮式风机协调控制方法研究[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4330-4339.
- [5] 薛飞,李宏强,李旭涛,等.基于LSTM神经网络的双馈风机控制参数辨识方法[J].中国电力,2023,56(6):31-39.

