

文章编号: 1671-251X(2024)S1-0169-06

矿用压风机组优化控制方法研究

王磊

(山西天地王坡煤业有限公司, 山西 晋城 048012)

摘要:针对矿用压风机组存在能耗巨大、风量控制不准确、转速控制不稳定等问题,提出一种基于扩展积分快速终端滑模扰动观测器(EIFTSMDO)和新型无模型积分分段双幂次滑模控制(IMFNSMC)的压风机组电动机转速控制方法。该方法基于表贴式永磁同步电机(SPMSM)转速环的新型超局部模型,结合无模型控制和新型滑模控制的优点,设计了改进的无模型新型趋近率滑模控制器;同时结合积分滑模滑模和快速终端滑模的优点,设计了积分项快速终端滑模扰动观测器,实时精准估计新型超局部模型的未知部分;通过对控制器进行前馈补偿,提高了电动机控制系统的鲁棒性和抗干扰能。仿真和半实物实验结果表明,与滑模控制和新型滑模控制方法相比,基于 IMFNSMC+EIFTSMDO 的控制方法的超调减少了 15%,响应速度加快了 0.1 s,抗干扰能力加强了 10%,验证了该方法的有效性和优越性。

关键词:压风机;永磁同步电动机;节能控制;电动机调速系统;无模型积分分段双幂次滑模控制;扩展积分快速终端滑模扰动观测器

中图分类号:TD637

文献标志码:A

Research on optimal control method of mine air pressure unit

WANG Lei

(Shanxi Tiandi Wangpo Coal Industry Co., Ltd., Jincheng 048012, China)

0 引言

矿用压风机组是煤矿井下如风镐、风钻等生产设备的动力来源,是保证矿井生产作业的关键设备之一。目前,矿用压风机存在恒定转速运行时能耗较大的问题,因此,压风机组成为煤矿节能降耗、高效开采主要优化的目标之一^[1-3]。采用电动机节电器或变频调速的方式可以达到一定的节能效果^[4-6],但其所控制的交流异步电动机存在启动性能差、调速效率低、能耗高的缺陷,无法实现对压风机运转速度的控制,使其不能够根据实际需求对转速进行控制以使其气量满足要求,经常需要工作人员进行手动调节与控制。

针对交流异步电动机的局限性,表贴式永磁同步电动机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)更适用于煤矿压风系统的按需启动与调速^[7-9]。一般情况下,传统的双 PI 闭环控制系统(转速外环-电流内环)就可以对 PMSM 产生较好的控制效果,但因其积分饱和等局限性,使其在控制性能要求较高的情况下,容易出现受未知扰动、参

数摄动等不确定因素影响。

为了解决 PMSM 非线性、多耦合的被控特征,如滑模控制^[10,11]、智能控制^[12,13]、无模型控制^[14-17]等先进的控制方法被应用到 PMSM 的调速系统中。其中,无模型控制方法对于存在未知参数与复杂耦合结构的系统具有良好的鲁棒性^[14],使更多的学者以该模型为基础开展后续的优化,进一步提高系统的综合性能。文献[15]通过对无模型控制中的超局部模型进行分析,提出了一种自适应无模型控制,采用自适应律对参数进行在线整定,减少了相关参数整定的工作量,但该策略过于复杂,难以在工程中实现。文献[16]通过设计无模型电流控制器来消除 PMSM 系统参数变化产生的影响。文献[17]提出了基于滑模的无模型控制方法,利用滑模观测器估计超局部模型中的未知量,实验证明了该方法对电动机调速系统具有良好的鲁棒性,但需要选取非常合适的控制器与扰动观测器,才可以避免抖振和相位延时,以解决系统受扰动时所需切换增益较大的问题。文献[18]和文献[19]分别采用基于有限集预测控制技术和扩展滑模扰动观测器,来估计超局

收稿日期:2024-01-25;责任编辑:王晖。

作者简介:王磊(1989—),男,河南新蔡人,高级工程师,主要从事煤矿智能化建设相关工作,E-mail:453351361@qq.com。

部模型的未知部分,有效抑制参数摄动下的电流脉动,提升了控制系统的鲁棒性,但观测器的高增益会导致系统出现振荡和超调。

针对上述问题,提出一种新型的压风机组电动机转速控制方法。该方法以 PMSM 转速环的新型超局部模型为基础^[20],结合无模型控制和新型滑模控制的优点,设计了无模型非奇异快速终端滑模控制器(IMFNSMC);同时结合积分滑模和快速终端滑模的优点,设计了扩展积分快速终端滑模扰动观测器(EIETSMDO),实时精准估计新型超局部模型的未知部分;并通过对控制器进行前馈补偿,有效提高了电动机控制系统的鲁棒性和抗干扰能。通过仿真和半实物实验,与滑模控制和新型滑模控制方法进行综合对比,验证了所提方法的有效性和优越性,对压风机组优化控制具有一定的参考价值。

1 控制方法与节能

压风机工作过程中,压风机风量 q 与转速 n 存在正比例关联:

$$q = nV \tag{1}$$

式中 V 为压风机排量。

因此,通过调控转速便能够实现对风量的调控。电动机的运行机理为

$$T_e = J \frac{d2\pi n}{dt} + T_L + B2\pi n \tag{2}$$

式中: T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数。

压风机风压 f 与转矩 T_e 存在正比例关联:

$$f = 2\pi \frac{T_e}{V} = 2\pi \frac{J \frac{d2\pi n}{dt} + T_L + B2\pi n}{V} \tag{3}$$

电动机运行功率为

$$P = \frac{qf}{60\mu} = \frac{nVf}{60\mu} = \frac{\pi n}{30\mu} T_e \tag{4}$$

式中 μ 为系统效率。

分析式(4)可知,若风压保持稳定,则通过调节运行功率便能实现对转速的调节。

$$i^* = \frac{-Gn - F + n^* + \frac{1}{(c_2 - h)}[\epsilon_1 |s|^{\rho_1} \text{sign}(s) + \epsilon_2 |s|^{\rho_2} \text{sign}(s) + c_1 e]}{b} \tag{12}$$

为了证明控制器的稳定性运用 Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \tag{13}$$

对 V 求导可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(-\epsilon_1 |s|^{\rho_1} \text{sign}(s) - \epsilon_2 |s|^{\rho_2} \text{sign}(s)) < 0 = -\epsilon_1 |s|^{\rho_1} \text{sign}(s) - \epsilon_2 |s|^{\rho_2} \text{sign}(s) < 0 \tag{14}$$

由此可知,在压风机气缸容积不变的前提下,可以通过控制压风机的电动机转速,实现对压风机流量的控制。

2 PMSM 速度控制器设计

2.1 改进的无模型积分分段双幂次滑模控制器

根据矿用压风机的研究背景及控制需求,设计的转速环基于新型超局部模型的 PMSM 无模型滑模控制律表示为

$$i^* = \frac{-Gn - F + n^* + u_c}{b} \tag{5}$$

式中: n^* 为电动机参考转速; u_c 为待设计的无模型滑模控制输入项; F 为系统未建模部分; b 为实际误差系数。

根据式(5)可得

$$n^* - n + u_c = 0 \tag{6}$$

定义跟踪误差为

$$e = n^* - n \tag{7}$$

选取一种含有误差积分项的新型积分滑模面减小系统稳态误差:

$$s = c_1 \int e dt + (c_2 - h)e \tag{8}$$

式中 c_1 和 c_2 为大于 0 的可调参数。同时定义 h 为

$$h = -r \exp(-\alpha e^2) \tag{9}$$

式中 r 和 α 为任意常数。

由于在跟踪误差变化过程中 h 在 0 和 $-r$ 之间取值,所以通过确定 c_1 和 c_2 可以使误差及其导数趋近于 0。

设计新型趋近率为

$$\dot{s} = -\epsilon_1 |s|^{\rho_1} \text{sign}(s) - \epsilon_2 |s|^{\rho_2} \text{sign}(s) \tag{10}$$

式中: $0 < \rho_1 < 1$; $0 < \rho_2 < 1$; ϵ_1, ϵ_2 为可调参数。

对式(8)求导数,并代入式(10)可得:

$$u_c = \frac{1}{(c_2 - h)}[\epsilon_1 |s|^{\rho_1} \text{sign}(s) + \epsilon_2 |s|^{\rho_2} \text{sign}(s) + c_1 e] \tag{11}$$

将式(11)代入式(5)中:

分析式(14)可知,滑模控制器渐进稳定,满足设计条件要求。

2.2 扩展积分快速终端滑模扰动观测器

为了实现对系统未知部分 F 的精确估计,设计一种滑模扰动观测器,将估计的扰动项对前馈部分进行补偿,将 F 扩展成状态变量。

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = Gn + F + bi^* \\ \frac{dF}{dt} = b \end{cases} \quad (15)$$

构建滑模扰动观测器系统:

$$\begin{cases} \dot{\bar{n}} = G\bar{n} + \bar{F} + bi^* + u_{smo} \\ \dot{\bar{F}} = gu_{smo} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\dot{\bar{n}}$ 为 $\bar{n}$ 的估计值; $\dot{\bar{F}}$ 为 $\bar{F}$ 的估计值; g 为观测器增益; u_{smo} 为待设计的滑模控制律。

将式(15)、式(16)整理可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_s = e_d + Ge_s - u_{smo} \\ \dot{e}_d = b - gu_{smo} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $e_s = n - \bar{n}$; $e_d = F - \bar{F}$, 为扰动量。

设计一个积分项快速终端滑模面:

$$s_s = e_s + \beta \int_0^t e_s dt \quad (18)$$

式中 β 为常数。

选取趋近律:

$$\dot{s}_s = -k_2 \text{sign}(s_s) - k_3 s_s \quad (19)$$

式中 k_2, k_3 为常数。

对式(18)求导, 并与式(17)、式(19)结合, 得:

$$u_{smo} = Ge_s + \beta e_s + k_2 \text{sign}(s_s) + k_3 s_s \quad (20)$$

同时, 为了证明系统误差 e_s 在有限时间内收敛到零, 选取:

$$V_0 = \frac{1}{2} s_s^2 \quad (21)$$

对 V_0 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= s_s \dot{s}_s = s_s (e_d - k_2 \text{sign}(s_s) - k_3 s_s) = e_d s_s - \\ &k_2 |s_s| - k_3 s_s^2 \leq |e_d| |s_s| - k_2 |s_s| - k_3 s_s^2 \leq \\ &|e_d| |s_s| - k_2 |s_s| = |s_s| (|e_d| - k_2) \end{aligned} \quad (22)$$

若要保证 $\dot{V}_0 < 0$, 则须 $k_2 > |e_d|$, 且 $k_3 > 0$, k_2 满足上述条件, 则观测器稳定。

3 多电动机系统优化控制

图 1 为多电动机驱动多台压风机流程。

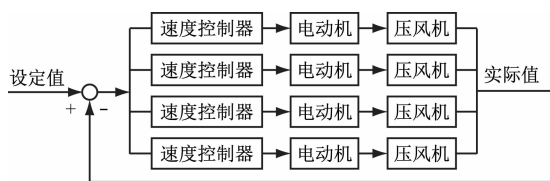


图 1 多电动机驱动多台压风机流程

假设系统的总转矩 T_{et} 为定值, 每台电动机的转速相等, 为 n , 每台电动机输出转矩为总转矩的一部分 T_{ei} , m 为功率系数, 得到转矩与转速的能耗表达式:

$$P_t = k3T_{et}n \sum_{i=1}^l \frac{T_{ei}}{T_{et}} \frac{1}{m(T_{ei})} = P_0 \sum_{i=1}^l \theta_i \frac{1}{\mu(T_{ei}\theta_i)} \quad (23)$$

由于 T_{et} 和 n 是恒定不变的, 电动机的运行效率只与转矩有关系, 考虑总功耗最小化问题:

$$\begin{cases} \min P_t \\ s. t > 0, \theta_i = 1, 2, \dots, l \\ \sum_{i=1}^l \theta_i = 1 \end{cases} \quad (24)$$

假设压风机组由 4 台电动机驱动, 即系统有 4 个变量, 可表示为

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 1 \quad \theta, \theta_2, \theta_3, \theta_4 > 0 \quad (25)$$

当压风机型号相同时, 可以得到:

$$P_t = P_0 \sum_{i=1}^4 \theta_i \frac{1}{\mu(T_{ei}\theta_i)} \quad (26)$$

式中 P_0 为单台压风机的运行功率。

首先, 假定 θ_1 是最优点, 那么系统中的 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 为变量, 可得 $1 - \theta_1 = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = \text{常数}$ 。随后, 再在 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 中将 θ_2 视作最优点, 可以得到, 常数 $-\theta_2 = \theta_3 + \theta_4$, 此时可知 $\theta_3 = \theta_4$ 。同理, 假定 θ_2 是最优点, $\theta_1, \theta_3, \theta_4$ 是变量, 即 $1 - \theta_2 = \theta_1 + \theta_3 + \theta_4 = \text{常数}$, 再在 $\theta_1, \theta_3, \theta_4$ 中将 θ_3 视作最优点, 得到常数 $-\theta_3 = \theta_1 + \theta_4$, 根据上面的结论可知 $\theta_1 = \theta_4$ 。以此类推, 假定 θ_3 是最优点, 并将变量中的 θ_4 视为最优点, 可得 $\theta_1 = \theta_2$ 。

因此, 最优点为

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \frac{1}{l} = \frac{1}{4} \quad (27)$$

$$T_{e1} = T_{e2} = T_{e3} = T_{e4} = \frac{T_{et}}{l} = \frac{T_{et}}{4} \quad (28)$$

总功耗最小值为

$$\min P_t = \frac{4P_0}{\mu T_{et}} \quad (29)$$

4 仿真实验

4.1 仿真验证

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略, 基于扰动观测器的 PMSM 控制系统结构如图 2 所示。

仿真用 PMSM 参数见表 1。

为了验证新型趋近律的有效性, 将本文的 IMFNSMC 与新型滑模控制 (NSMC)、滑模控制 (SMC) 的性能进行仿真对比, 电流环均采用相同参数的 PI 控制器。图 3 为电动机升速转速波形, 该过程从电动机静止开始, 最开始以 300 r/min 给定转速运行, 并在 0.5 s 时下达切换到 500 r/min 的切换操作, 直到最后稳定运行。

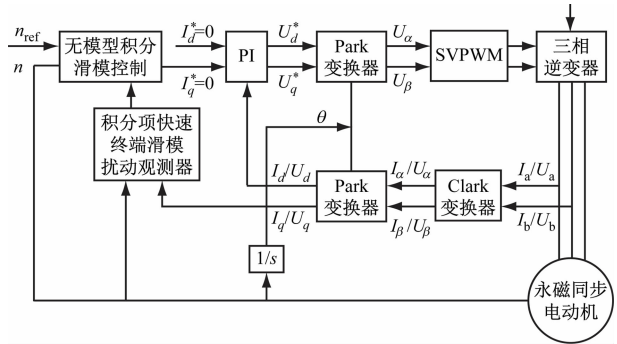


图 2 基于扰动控制器的 PMSM 控制系统结构

表 1 PMSM 参数

参数	值
定子电阻/Ω	0.346
定子电感/mH	0.007 8
阻尼系数	0.005
转动惯量/(km·m ²)	0.089
磁链参数/Wb	0.518 25
磁极对数	2
额定功率/kW	10
额定电压/V	260

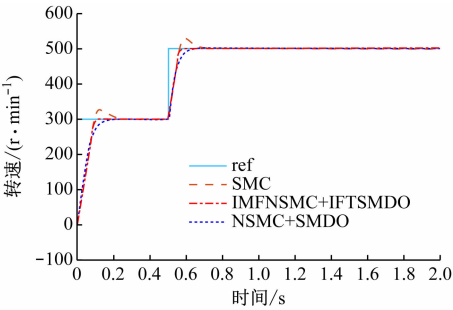


图 3 电动机升速转速波形

由图 3 可知,NSMC 的上升时间为 0.2 s,传统的 SMC 因为存在超调,其转速切换时间为 0.4 s,IMFNSMC 的上升时间为 0.1 s 并且瞬间稳定无超调,说明 IMFNSMC 提高了调速系统的速度和鲁棒性。

图 4 为突加(减)载时电动机转速波形,在突增或突减负载后,SMC 产生了大约 10% 的超调,虽然 NSMC+SMDO 和 IMFNSMC+EFTSMDO 方法的超调均为 0。但是,IMFNSMC+EFTSMDO 的波动小并可以在较短时间内恢复到原转速后保持稳定的运行状态,综合抗扰动能力远远强于前两者。

4.2 半实物仿真

为验证 IMFNSMC+EFTSMDO 控制理论的正确性及有效性,搭建了如图 5 所示的半实物仿真平台,并进行了仿真验证,其中的电动机参数与表 1 一致。

通过半实物仿真可以得到 3 种不同方法在电动

机启动时的转速曲线,并在运行过程中突加(减) 10 N·m 的负载,分别如图 6—图 8 所示。

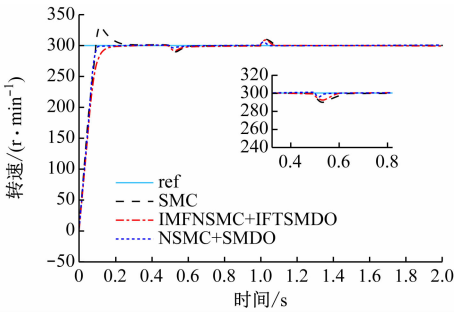


图 4 突加(减)载时电动机转速波形

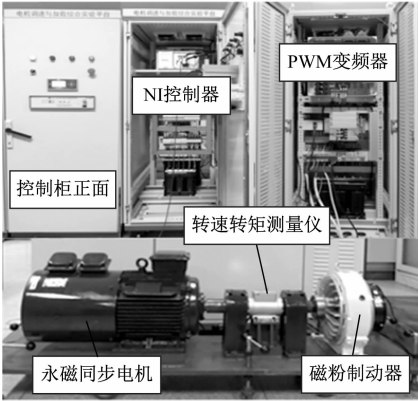


图 5 电动机实验调速与加载综合实验平台

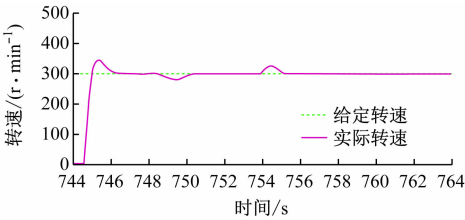


图 6 传统 SMC 下电动机突增(减)负载曲线

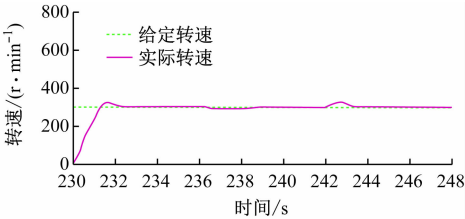


图 7 NSMC 下电动机突增(减)负载曲线

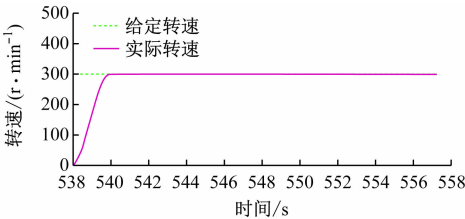


图 8 IMFNSMC 下电动机突增(减)负载曲线

如图 6 所示,传统 SMC 作用下的电动机启动过程缓慢,启动至转速稳定持续了约 2.5 s,而且当受到负载扰动时,使转速产生约 15% 的畸变幅度。

相比之下,NSMC 作用下的电动机启动更加灵敏,在面对负载变化时转速波动小且调节时间快,但

仍然有约 8% 的超调。

在同样的实验条件下,IMFNSMC 方法无论是启动速度还是负载时转速的波动都近乎为零,具有较优的鲁棒性。

为了进一步验证控制算法的性能,电动机以 300 r/min 的速度启动并平稳运行后,进行转速指令增加至 400 r/min 然后再降低回 300 r/min 的切换,结果如图 9—图 11 所示。

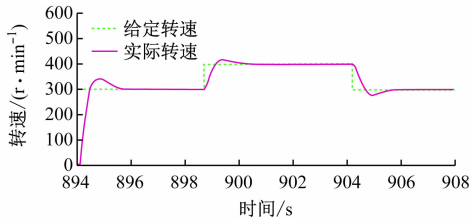


图 9 SMC 作用下电动机升降速运行曲线

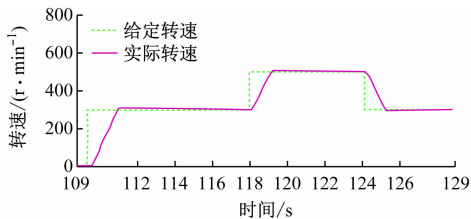


图 10 NSMC 控制作用下电动机升降速运行曲线

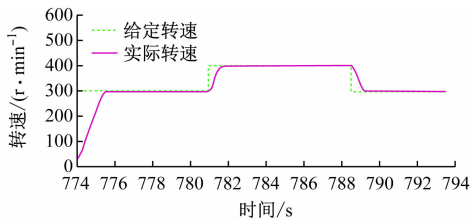


图 11 IMFNSMC 作用下电动机升降速运行曲线

通过分析图 9—图 11 可知,当平稳运行并改变电动机给定转速时,SMC 作用下的电动机转速超调在 15% 左右;相比之下,NSMC 作用下则使电动机平稳安全地完成速度的切换,且没有出现明显的转速超调,但切换速度的过程仍然有一些慢;IMFNSMC 不仅使电动机平稳安全地完成转速的改变,且速度的切换过程平缓持续时间较短。说明基于 IMFNSMC+EIFTSMDO 方法的 PMSM 调速系统具有更强的鲁棒性以及安全性。

5 结论

1) 通过与传统 SMC 和 NSMC 对比,IMFNSMC 的超调近乎为 0,远远强于 SMC 和 NSMC。IMFNSMC 的响应速度更快,只需 0.1 s 就能达到稳定状态,比 NSMC 的 0.2 s 和 SMC 的 0.25 s 更快。

2) 在面对扰动时,IMFNSMC 的波动更小,只有 1% 的变化,比 SMC 和 NSMC 的 10% 和 5% 变化更小,并且 IMFNSMC 只用 0.01 s 就适应扰动恢复

到原来的状态,比 NSMC 的 0.1 s 和 NSMC 的 0.15 s 恢复更快。

3) 针对多电动机系统的动态模型和静态模型难以确立的问题,固定总负荷量,假设每台工作的电机负荷率大于 0,给出了相同电动机组成的多电动机系统能耗的最小值和全局最优,其最优的控制方法就是保持各个电动机的负荷率相同。

参考文献:

[1] 郭红霞. 煤矿井上压风机集控系统研究[J]. 自动化应用,2023,64(11):119-121,125.

[2] 陈威廷,李标. 自动化综合管理平台在煤矿的应用与研究[J]. 煤矿机械,2023,44(7):172-174.

[3] 张磊. 压风机自动控制系统研究[J]. 机械管理开发,2022,37(10):234-235,238.

[4] 杨如坤. 煤矿压风机远程自动控制系统的的设计[J]. 机械管理开发,2022,37(11):255-257.

[5] 周超. 变频调速技术在自动控制中的应用[J]. 集成电路应用,2023,40(3):41-43.

[6] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等. 大容量海上风电机组发展现状 & 关键技术[J]. 电力系统自动化,2021,45(21):33-47.

[7] 刘寅迪,曾翔君,骆一萍,等. 基于 MPPMSG 的混合高压直流风电系统故障穿越技术[J]. 电力系统自动化,2020,44(8):133-140.

[8] 高锋阳,齐晓东,李晓峰,等. 部分分段 Halbach 永磁同步电机优化设计[J]. 电工技术学报,2021,36(4):787-800.

[9] 孙斌,王海霞,苏涛,等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报,2020,40(20):6715-6726.

[10] 李蕴倬,侯利民,王巍,等. 基于 NDOB 滑模速度调节 PMSM 的 NSEF 电流控制[J]. 控制工程,2021,28(6):1093-1099.

[11] LIU J, LI H W, DENG Y T. Torque ripple minimization of PMSM based on robust ILC via adaptive sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(4):3655-3671.

[12] YU J P, SHI P, DONG W J, et al. Neural network-based adaptive dynamic surface control for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(3):640-645.

[13] 彭熙伟,高瀚林. 永磁同步电机的改进对角递归神经网络 PI 控制策略[J]. 电机与控制学报,2019,23(4):126-132.

[14] FLIESS M, JOIN C. Model-free control [J]. International Journal of Control, 2013, 86(12):2228-2252.

效果,将煤矿安全生产培训仿真系统应用到某培训课堂当中。对系统展示的虚拟场景逼真度(是衡量虚拟场景与真实矿井场景相似度的指标)进行客观评价。采用图像处理和计算机视觉中的相似度算法,比较虚拟场景和真实场景的图像差异,从而得出逼真度的客观评价结果。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_z(i,j) - I_v(i,j))^2}{M \times N} \tag{3}$$

式中: E 为均方误差; M 为图像行数; N 为图像的列数; $I_z(i,j)$ 为真实场景中某一像素位置 (i,j) 的像素值; $I_v(i,j)$ 为虚拟场景中某一像素位置 (i,j) 的像素值。

对于图像处理和计算机视觉领域,均方误差通常用于衡量图像的像素值差异,其取值范围在 0 到 1 之间或在 0 到正无穷之间。均方误差越小,说明系统可视化展示内容与实际越相似;反之,均方误差的值越大,则说明系统可视化展示内容与实际越不相似。根据上述论述,应用上述可视化系统,针对不同的安全专题,完成煤矿安全生产培训,将得到的结果记录见表 2。可看出每个安全专题的均方误差均低于 1,说明系统所呈现的内容与实际场景的相似度极高。

表 2 可视化展示效果

安全专题	均方误差	安全专题	均方误差
3D 设备安全	0.235	3D 通风网络	0.265
3D 人员专题	0.326	3D 瓦斯分布	0.252
3D 安全活动	0.285	3D 水害分布	0.231
3D 安全隐患	0.242	3D 安全监控	0.326

4 结语

针对传统培训方式受限于场地、设备或安全因素,难以模拟出真实的煤矿环境,设计了煤矿安全生

产培训仿真系统。通过该仿真系统,可在虚拟场景中为学员呈现一个逼真的煤矿环境,使学员仿佛置身于真实的矿井之中。这种逼真的视觉效果不仅能够增强学员的沉浸感,还能让他们更加深入地理解矿井的结构、安全操作规程及应对突发状况的策略。

参考文献:

[1] 董正茂,郝守礼,葛莉瑶,等. 基于图模可视化技术的光伏发电仿真系统设计[J]. 电力学报,2023,38(5): 420-426.

[2] 刘洋,罗正平,汪悦航,等. EAST 等离子体控制仿真模拟可视化运行系统[J]. 计算机系统应用,2023, 32(10):106-114.

[3] 连远锋,张鑫,庄永琪,等. 数据结构与算法可视化调试虚拟仿真实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2023,40(5):122-129,159.

[4] 祖庆华,腾达,程健伟. 自动化仓储物流系统的可视化仿真与优化研究[J]. 物流技术与应用,2023,28(3): 132-135.

[5] 马骏. 基于 DCS 技术的机场油库可视化作业仿真系统设计[J]. 无线互联科技,2023,19(2):71-73.

[6] 赵迪,杨阳,陈立伟. 农作物生产三维可视化仿真系统设计与应用——以怀地黄为例[J]. 河南农业科学, 2022,51(10):169-180.

[7] 丁胜,林寿明,沈康,等. 基于 UE5 引擎的林草湿三维仿真可视化系统设计与实现[J]. 林业与环境科学, 2022(增刊 1):1-5.

[8] 赵为平,王男楠,赵雪莹,等. 基于地基增强系统的双座电动飞机导航定位可视化仿真[J]. 科学技术与工程,2022,22(8):3176-3182.

[9] 储艾伶. 基于新农村光伏采集的虚拟仿真与数据可视化系统设计[J]. 现代计算机,2021,27(31):117-120.

[10] 殷守斌,李明,韩燕飞. 基于 IED 与 SCD 的智能变电站二次设备仿真系统可视化设计[J]. 自动化技术与应用,2021,40(1):170-172,180.

(上接第 173 页)

[15] SAFAEI A, MAHYUDDIN M. Adaptive model-free control based on an ultra-local model with model-free parameter estimations for a generic SISO system[J]. IEEE Access,2018(6):4266-4275.

[16] ZHOU Y, LI H, YAO H. Model-free control of surface mounted PMSM drive system [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, Taipei,2016.

[17] 赵凯辉,殷童欢,张昌凡,等. 永磁同步电机无模型滑模控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018, 32(4):172-180.

[18] MOUSAVI M S, DAVARI S A, NEKOUKAR V, et al. Integral sliding mode observer-based ultra local model for finite-set model predictive current control of induction motor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2912-2922.

[19] 赵凯辉,戴旺珂,周瑞睿,等. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁同步电机新型无模型滑模控制[J]. 中国电机工程学报,2022,42(6):2375-2386.

[20] 田超,岳伟,陈焕明. 基于模糊 PI 的表贴式永磁同步电机矢量控制[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2021,36(4):8-15.

[21] 胡启宁. 基于灰色关联的锅炉引风机节能控制方法[J]. 自动化应用,2023,64(21):104-106.