

基于模糊 PID 的风机风量控制系统

徐巍¹, 葛启发^{1,2}, 张维国¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

[摘要] 通风管理是矿山安全生产过程中的重要组成部分,为保障井下有足够的新鲜空气,做好矿山通风安全工作是非常必要的。在矿山生产过程中,人员的移动和设备的运行状态都会造成矿井局部需风情况的改变,而现有技术中的通风方案仅用于解决局部通风或通风网络监控的优化,不能实现矿井的各个作业点通风调整,即不能实现全矿各个作业点的按需通风。本文针对矿井风量控制系统,在常规 PID 控制基础上,运用模糊控制方法,设计了一套模糊 PID 控制器,可以根据设定的需风量控制电机运转。通过对常规 PID 控制器和模糊 PID 控制器进行仿真对比分析,结果表明,模糊 PID 控制系统响应更快,且超调量小,控制效果比传统 PID 更理想。该风量控制系统对井下通风自动化和生产率的提高产生积极作用,且具有工程实用价值。

[关键词] 通风控制; PID 控制; 按需通风; 模糊 PID

[中图分类号] TP29 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2022)02-0009-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.02.003

0 前言

通风系统对于矿山的运行非常关键,不仅保障矿山生产的正常开展,也为井下工作人员提供优良的环境^[1]。在矿井通风系统当中,积极应用自动化技术可以实现自动化管理和控制,通过自动化控制,有效地监控井下的通风状况,从而让矿井通风的应变能力得到提升,更好地适应环境变化,同时节约通风成本。即便发生事故,也可以及时对通风进行调节,避免出现事故^[2]。因此,通过结合矿山的实际情况,系统、科学地做好矿山通风安全工作是非常必要的,并且对于矿山安全生产意义重大^[3]。

随着对矿山生产的信息化与精细化管理,高效合理、节能环保和安全可靠的科学生产方案亟待建立^[4]。矿山通风机是矿山通风系统的关键设备,其不间断运行能为矿山生产持续输送新鲜空气,进而直接调节井下温湿度环境,降低 CO、氮氧化物和粉尘等有害物质浓度^[5]。然而,传统矿山通风机监控系统功能单一,受通风网络阻力特性、矿山产能等因

素影响,无法动态调控实际输出功率,不间断运行过程中存在严重的能耗问题^[6]。基于 PLC 和变频器的矿山通风机监控系统改造能按实际的产能和污染物浓度动态调控输出功率,有助于提高通风机的运行效率,但对于多变量、非线性和强耦合的通风控制过程,变频调速仍有待于进一步改善^[7]。

对于自动化控制技术的应用而言,优势主要在于实现精准的控制和高效的操作,将其应用到矿山通风系统中,可以有效提高通风系统的工作效率^[8]。当前投入使用的矿山通风系统均存在着较为明显的系统短板,自动化程度较低,且操作控制较为复杂^[9]。

模糊控制利用模糊集合理论将专家的经验转化为机器可识别的语言,实现对复杂系统的精确控制^[10]。在智能控制技术发展尚未成熟时,大多数简单的被控对象通过建立精确的数学模型控制^[11]。随着一些难以建立精确数学模型的被控对象出现,传统的控制方法已难以对此类复杂系统进行控制^[12]。在局部通风机风量智能调控系统中,风量的变化是非线性的、纯滞后、多耦合的,所以无法建立精确的数学模型,利用模糊控制系统来实现对风量的实时调节^[13]。因此,为进一步优化矿山通风机的输出,本文在风机变频器硬件平台上应用模糊 PID 算法,设计了模糊 PID 风机风量控制系统,可以提高

[收稿日期] 2021-10-12

[作者简介] 徐巍(1981—),男,河北霸州人,工程师,博士,主要从事数学建模、嵌入式软硬件设计等工作。

[引用格式] 徐巍,葛启发,张维国.基于模糊 PID 的风机风量控制系统[J].有色设备,2022,36(2):9-13.

矿山通风机的运行效率^[14]。

1 模糊控制系统

1.1 基本原理

模糊控制是以人的模糊推理和决策为依据,通过人为设计相对应的模糊规则,模糊化处理外界采集的信息,将其作为输入信号,在控制器中完成推理

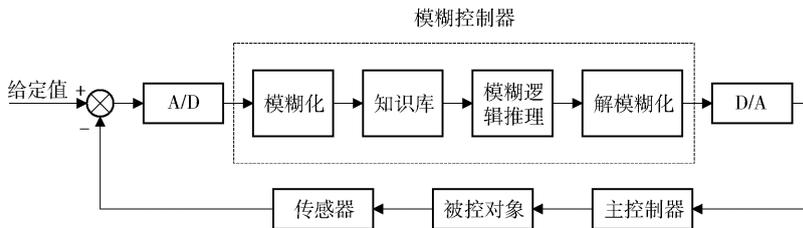


图1 模糊控制基本原理图

模糊化过程是将精确的测量值转化为模糊语言的过程,也是模糊控制器设计的首要步骤^[18]。系统采集输入变量的值,并将输入量转化为模糊子集,并由隶属度函数来定义^[19]。用取值于(0,1)的隶属度函数 $A(x)$ 表征 x 属于 A 的程度高低。隶属度函数 $A(x)$ 越接近于1,表示 x 属于 A 的程度越高,反之则越低^[20]。

知识库主要包含数据和规则,其中数据库提供逻辑推理模糊化过程和解模糊化等相关数据,规则库包含模糊逻辑推理的控制规则^[21]。

模糊推理是采用推理的方法,将初始时刻的输入值和模糊控制规则相结合得出模糊PID控制器的精确输出^[22]。模糊推理规则算法与模糊蕴涵规则、模糊合成规则、模糊推理条件等有关联。

由模糊推理所得的结果是一个隶属度函数或模糊集合,但在模糊控制系统中,控制或驱动执行机构必须是一个确定的值,这个过程就是解模糊化,也称为逆模糊化。解模糊化计算过程采用不同的方法可以得到不同的结果,常用的解模糊化计算方法是重心法^[23]。

该风机风量控制系统在工作时,会将传感器检测到的风量与系统设定的风量进行对比,最终得出风机风量的差值及偏差变化率,再根据模糊化模块得出模糊控制变量,将变量输入到知识库、模糊逻辑推理模块后,可以得到最终的模糊变量^[24]。对该模糊变量进行解模糊化操作后,就可以得到精确的控制量。

并将结果录入执行部件,最后得到理想的控制效果^[15]。结合矿山通风管理的实际需要和模块控制的基本原理,风量模糊控制系统主要由模糊PID控制器、传感器、A/D和D/A转换、被控对象等部分组成,原理图如图1所示^[16],按照模块划分,模糊控制系统由模糊化、知识库、模糊推理和解模糊化四个模块组成^[17]。

1.2 控制器设计

本风机风量控制系统的模糊控制器采用了二维模糊控制,将巷道的所需风量作为控制器的设定值,与传感器所采集回来的风量进行实时比对,将风量的误差和误差的变化量作为模糊系统的输入,进而来控制风机转速,实现增大或减小风量的自动控制效果^[25]。

典型的二维模糊控制器输入变量通常为系统的误差和误差的变化,模糊规则一般有以下形式^[23]:

R_1 :如果 e 是 E_1 且 de 是 DE_1 ,则 u 是 U_1 ;

R_2 :如果 e 是 E_2 且 de 是 DE_2 ,则 u 是 U_2 ;

……

R_n :如果 e 是 E_n 且 de 是 DE_n ,则 u 是 U_n ;

其中 $E_1, E_2, \dots, E_n, DE_1, DE_2, \dots, DE_n$ 和 U_1, U_2, \dots, U_n 均为输入输出论域上的模糊子集。

因此,在本风机风量控制系统中,模糊控制器的输入为系统风量误差 e 和风量误差的变化 de ,输出为系统控制值 u ,设计模糊控制器的过程为:先将风量误差模糊化后变为模糊量,利用模糊推理算法得出控制器的输出精确量,最后解模糊化计算得到系统精确的输出值来控制被控对象^[26]。控制器结构图如图2所示。

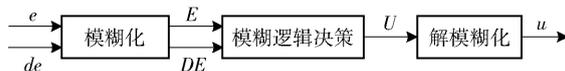


图2 模糊控制器结构图

对于 n 条模糊控制规则,系统总的模糊关系矩

阵为:

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

则对于任意的系统误差 e_i 和系统误差变化 de_i 所对应的模糊控制器输出 u_{ij} 为:

$$u_{ij} = (e_i \times de_i \cdot R) \quad (2)$$

根据得到的模糊控制量 u_{ij} 再进行精确化计算, 就可以去控制被控对象了。

在模糊控制器设计中常用的方法是查表法。查表法是通过离线计算获得一个模糊控制表, 并将其嵌入在主控制器的数据寄存器中。当模糊控制器工作时, 只要根据传感器采集得到误差和误差变化的量化值, 就可以在表中寻找出当前时刻输出的量化值, 再将此量化值与比例因子相乘得到被控对象输出控制量。如图 3 所示, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为输入输出的量化因子和比例因子。

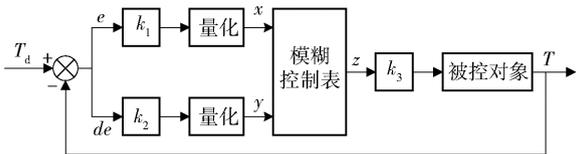


图 3 模糊逻辑控制器结构图

2 模糊 PID 控制器设计

2.1 PID 原理

PID 控制具有操作简单、稳定性好、可靠性高等优点, 是工业领域中应用最广泛的控制算法之一。PID 控制是比例微分积分控制, 从反馈机制获得偏差 $e(t)$, 通过比例、微分、积分对输出量 $y(t)$ 和给定值 $r(t)$ 的偏差 $e(t)$ 进行控制, 数学表达式如下:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

其中, K_p 表示比例系数, T_i 表示积分常数, T_D 表示微分常数。为了方便表示, 定义 $K_i = K_p/T_i$ 、 $K_d = K_p/T_D$ 。在 PID 控制中, K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数的选取决定了控制算法的实际效果, K_p 可以使系统快

速响应, 迅速调节误差; K_i 用来消除系统在进入稳态时产生的稳态误差; K_d 用于抑制调节过程中产生的振荡, 属于超前调节。

2.2 模糊 PID 设计

PID 的控制效果对于大多数控制对象来说是很有效的, 控制的效果也取决于 PID 控制中多个参数的优化。PD 控制器优点在于有较好的系统动态特性, 缺点是无法消除被控系统的静态误差; PI 控制器可以消除系统的静态误差, 但是降低了响应速度, 因此提出了模糊 PID 控制器的方法。

本风机风量控制系统结构如图 4 所示, 主要由核心模糊 PID 控制器、执行机构变频器和被控对象风机组成。

假设风机需要向巷道工作面输送的风量为 Q_0 , 此时由传感器采集到实时风量为 Q , 将风量的误差和误差的变化作为模糊 PID 控制器的输入, 输出为 PID 控制所需参数的修正量, 与初始参数相加后实现对变频器进行控制, 电机在得到控制信号后开始调节转速从而实现风量的自动调节。在模糊 PID 控制器设计中, 要先确定 K_p 、 K_i 、 K_d , 与 e 、 de 之间的模糊关系, 通过模糊逻辑推理和解模糊化得到修正后的参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。

2.3 输入输出变量模糊化

在本风机风量控制系统的模糊 PID 控制器中, 设输入与输出语言变量的基本模糊论域的量化区间均为 $[-6, 6]$, 论域内模糊子集均被划分为 7 个, 即 $\{PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB\}$, 其含义分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。输入变量误差 e 的基本论域为 $[-500, 500]$, 误差变化 de 的基本论域为 $[-150, 150]$, 输出变量中, 比例参数 ΔK_p 的基本论域为 $[-0.1, 0.1]$, 积分参数 ΔK_i 的基本论域为 $[-0.08, 0.08]$, 微分参数 ΔK_d 的基本论域为 $[-0.04, 0.04]$ 。

本系统的隶属度函数采用三角形与高斯形相结合的方式, 在函数两端采用高斯形, 在中间部分采用

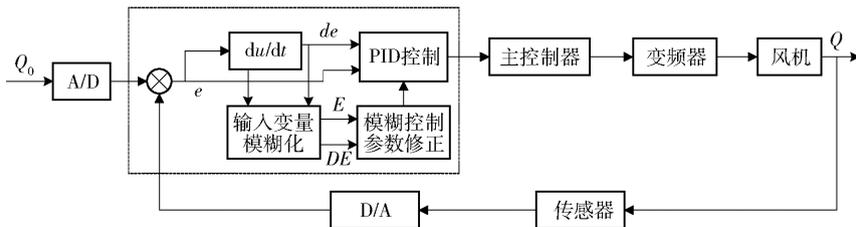


图 4 风机风量控制系统结构图

三角形,以比例参数 ΔK_p 为例,所设计的隶属度函数如图 5 所示。

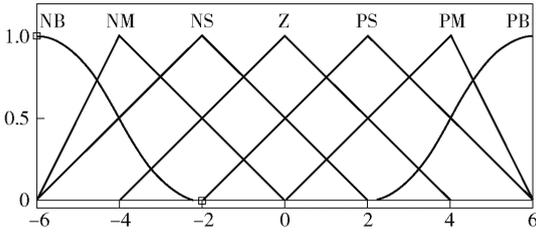


图 5 比例参数 ΔK_p 的隶属度函数

由于现场通风控制系统的自动化程度比较低,风机长期处于全频率工作状态,造成电力资源的极大浪费,同时无法根据井下情况进行风量的适时调整。分析控制规则,可得比例参数 ΔK_p 的模糊规则控制库如表 1 所示。

表 1 比例参数 ΔK_p 的模糊规则控制库

de	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NS
PS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NS	NB	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NB	NB	NB

3 常规 PID 与模糊 PID 仿真对比分析

在风机风量控制系统中,电机的转速是由变频

器直接控制的,根据前面的分析,风量控制系统的传递函数选取一个二阶惯性系统较为合适,变频器与电机的近似模型为:

$$G(s) = \frac{1}{100s + 1} \cdot \frac{1}{s + 1}$$

根据模型可利用 Simulink 模块搭建常规 PID 控制和模糊 PID 控制系统仿真图,常规 PID 和模糊 PID 分别如图 6、图 7 所示,输入为阶跃信号。可见模糊 PID 控制系统中,由模糊控制器产生 PID 参数,输入到 PID 控制器中,进而对风机变频器做出控制。

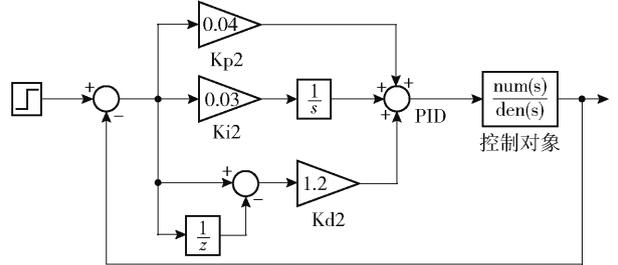


图 6 常规 PID 控制系统仿真图

设置好初始参数后进行仿真,对常规 PID 和模糊 PID 进行仿真分析,结果如图 8 所示。可以看出,模糊 PID 控制器在约 60 s 时达到稳定,而常规 PID 的控制响应在经过长时间的振荡后,在 500 s 时才能达到稳定状态。

由此可知,模糊 PID 控制系统响应更快,达到稳定时所需时间更短,控制效果更好。在矿井通风系统中,可以将不同场合的输入信号调频成所需的阶跃信号进行模拟仿真,因此可知模糊 PID 控制要优于常规 PID 控制。

4 结论

本风机风量控制系统以风量为研究对象,分析

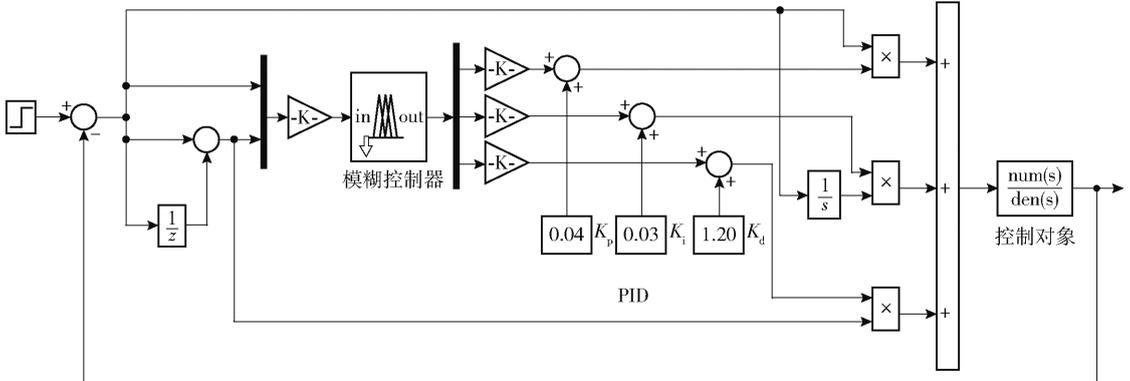


图 7 模糊 PID 控制系统仿真图

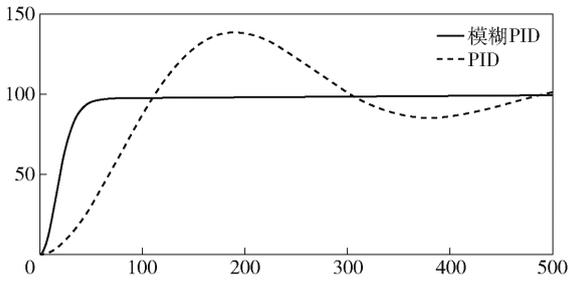


图8 模糊PID和常规PID仿真结果比较

了模糊控制理论,同时将PID控制与模糊算法相结合,并在常规PID控制器的基础上,运用模糊控制的方法,从变量的模糊化、模糊规则确定和控制效果仿真分析等方面设计了一套模糊PID控制器。由最后的仿真结果可知,模糊PID控制系统响应更快,达到稳定时所需时间更短,控制效果比传统PID更好,能够有效改善矿井通风控制系统的性能。

[参考文献]

- [1] 葛启发,于润沧,朱维根,等. 按需通风技术在某矿山工程设计中的应用[J]. 中国有色冶金,2017,12(6):58-63.
- [2] 葛启发,朱维根,朱瑞军,等. 深井难采矿体开采与通风控制技术[J]. 有色金属工程,2017,7(6):86-89.
- [3] Yang C, Peng F L. Discussion on the development of underground utility tunnels in China[J]. Procedia Engineering,2016,165:540-548.
- [4] 葛启发,于润沧,翟建波,等. 基于FLUENT的进路式采场通风优化控制[J]. 矿业研究与开发,2017,37(12):111-116.
- [5] 黄康文,秦训鹏,詹军,等. 重载AGV液压转向模糊PID控制[J]. 液压与气动,2021,45(7):108-115.
- [6] Bogdan S, Birgmajer B. Model predictive fuzzy control of longitudinal ventilation system in a road tunnel. Ko REMA-Hrvatsko društvo za komunikacije, računarstvo, elektroniku, mjerenjai automatiku, 2006.
- [7] 吴亘杰,王成群,李亮,等. 基于模糊PID的桑蚕养殖物联网管理系统设计[J]. 软件导刊,2021,20(7):129-133.
- [8] 莫程凯,郇可欣,段灵芝. 基于模糊PID控制开关电源的研究[J]. 电子技术与软件工程,2021(14):231-233.
- [9] Yu F, Meng X, Cui L. Research on fuzzy PID ILC in tunnel ventilation[J]. Electronic Measurement Technology,2017.
- [10] Vardy A. Tunnel ventilation control system using real-time traffic and ventilation simulator[J]. 19th Intelligent Transport Systems World Congress,2012:116-120.
- [11] 姜文雍,黄增阳,毛方,等. 基于模糊PID技术的排气压力精确控制仿真研究[J]. 农机使用与维修,2021(7):19-22.
- [12] Wang J, Wang F, Jiang Y, et al. Application of fuzzy PID for the ventilation and air conditioning system of subway station[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 128-129:811-814.
- [13] 宋鉴麒,张禹,赵文川. 基于模糊PID算法的气动软体驱动器控制策略研究[J]. 机械工程师,2021(7):52-54.
- [14] 陈庆刚,葛启发,杨卓明,等. 某铜矿通风系统优化与改造研究[J]. 有色设备,2020,34(3):75-78.
- [15] 梅权杰,吴功平,付博,等. 带死区的PTZ摄像头模糊PID跟踪方法研究[J]. 机械设计与制造,2021(7):300-304.
- [16] Koyama T, Yoshimochi T, Watanabe T, et al. Road tunnel ventilation control based on nonlinear programming and fuzzy control[J]. Ieej Transactions on Sensors & Micromachines,2008,113(2):160-168.
- [17] 张波. PID算法在控制系统中的应用[J]. 信息记录材料,2021,22(7):197-199.
- [18] 李月全. 基于模糊PID控制的隧道通风节能系统的研究[D]. 太原:中北大学,2021.
- [19] Jiao D. Q, Wang D. H. Research on double hanging point hydraulic synchronous control system based on fuzzy PID[J]. Journal of Physics,1982(1):33-37.
- [20] 姜艳茹. 基于变论域模糊PID的四旋翼无人机控制系统研究[D]. 太原:中北大学,2021.
- [21] 张品,李长勇. 基于改进模糊PID的全向搬运机器人路径跟踪控制研究[J]. 食品与机械,2021,37(6):114-119.
- [22] 高博轩,赵弘,吴婷婷. 管内智能封堵器调速节能装置模糊PID控制方法研究[J]. 机床与液压,2021,49(12):1-5.
- [23] 张浩强,罗相巧,黄鸿滨,等. 基于智能算法的白酒发酵罐温度控制PID参数整定[J]. 机械研究与应用,2021,34(3):41-43.
- [24] 赵子龙,任晓龙,陈江义,等. 模糊神经网络PID和PSO-PID优化的荧光检测控制系统[J]. 微电机,2021,54(6):60-64.
- [25] 谢佩军. 基于免疫遗传算法与变论域模糊PID的船舶航向控制研究[J]. 工业控制计算机,2021,34(6):78-80.
- [26] 蔡玉生,朱军,石磊,等. 大口径快速反射镜的模糊自适应PID控制[J]. 红外技术,2021,43(6):523-531.

(下转第17页)

工业出版社, 2011.

工业出版社, 2013.

[5] 胡加富. 铣工(技师、高级技师)第2版[M]. 北京: 机械

40Cr Stainless Steel Positioning Rod Milling Process Analysis and Components Machining

WU Ting-you, YANG Xu

Abstract: In this paper, the spring jacket and universal dividing head are used to clamp the components, and the 40Cr stainless steel positioning rod is milled in small batch by using conventional method. Reasonable milling parameters and cutting tool materials are selected according to the milling requirements of the components to ensure the qualification rate, size requirements and surface roughness of parts, thereby successfully completing the milling task of these components. With certain practical significance, this study also provides reference for milling of similar components in the future.

Key words: 40Cr stainless steel; positioning rod; milling process; components machining ▲

(上接第 13 页)

Fan Air Volume Control System Based on Fuzzy PID

XU Wei, GE Qi-fa, ZHANG Wei-guo

Abstract: Ventilation management is a key part of mine safety production process, so mine ventilation and safety are crucial to guarantee sufficient fresh air underground. In the process of mine production, both the personnel movement and equipment operation will trigger the local wind demand change in the shaft. However, the ventilation scheme in the prior art can only be adopted to optimize local ventilation or ventilation network monitoring, while it can not realize ventilation adjustment of each operating point in the shaft, that is, it can not realize the ventilation on demand at each operating point. Targeted at the air volume control system in the shaft, this paper designs one set of fuzzy PID controller, using fuzzy control method based on conventional PID controller, to realize the control of the motor running according to the set air volume. Simulation comparison and analysis is carried out between the conventional PID controller and the fuzzy PID controller. The results show that the fuzzy PID control system features faster response and less overshoot, proving a better control effect than the conventional PID. Therefore, this air volume control system plays a positive role in the automation of underground ventilation and the improvement of productivity, with a practical engineering value.

Key words: ventilation control; PID control; ventilation on demand; fuzzy PID ▲