

文章编号 :1006 - 2106( 2006 )08 - 0076 - 04

# 冻土隧道施工通风模糊控制系统的研究<sup>\*</sup>

温少芳<sup>\*\*</sup> 刘海宁 王 军 赖涤泉

( 石家庄铁道学院 , 石家庄 050043 )

**摘要** :研究目的 本文结合高海拔、高寒区铁路隧道施工的特点 ,介绍了冻土隧道施工通风控制的问题 ,提出了一种基于模糊理论的隧道施工通风新的控制系统。

**研究方法** :采用两级模糊控制器 ,分别控制风量和风温两个被控参数。为了评价其实施效果 ,运用仿真技术 ,把设计控制方法和传统的控制方法进行比较。

**研究结论** :该模糊控制系统不仅提高了隧道施工通风控制性能和自动化水平 ,而且节能效果非常显著。

**关键词** :模糊控制 ;冻土 ;隧道施工 ;仿真

**中图分类号** :U45 **文献标识码** :A

## Research on Frozen Soil Tunnel Construction Ventilation System Based On Fuzzy Control Theory

WEN Shao - Fang ,LIU Hai Ning ,WANG Jun ,LAI Di - quan

( Shijiazhuang Railway Institute , Shijiazhuang , Hebei 050043 , China )

**Abstract :Research purposes** : This paper combines the characteristics of railroad tunnel construction at high elevations , high and cold areas , introduces the problem of ventilation control of frozen earth tunnel construction and proposes one kind of new ventilation control system of tunnel construction based on the fuzzy theory.

**Research methods** :This paper uses two levels fuzzy controllers to respectively control two parameters of air volume and air temperature. In order to appraise its implementation effect , simulation technology was used to compare the design control method and the traditional control method.

**Research conclusions** :The result indicates that this fuzzy control system enhanced remarkably the ventilated control performance and automated level of tunnel construction and the energy conservation effect is very good.

**Key words** :fuzzy control ;frozen soil ;tunnel construction ;simulation

通风是隧道施工中不可缺少的一部分 ,在隧道施工过程中会产生各种有害气体如 CO 等 ,所以必须源源不断地将外界空气输送到隧道内部的工作面 ,保证人员正常呼吸 ,稀释并排除有害气体和灰尘 ,保证隧道中的空气质量。而在高海拔、高寒区冻土隧道施工中 ,为了开挖的安全 ,保护冻土 ,又能在冬季进行混凝土工程作业 ,通风系统的功能除排烟降尘外 ,还必须具有控制施工环境的功能( 即保证施工温度

在  $-5 \sim 5$   $^{\circ}\text{C}$  之间 )。

目前 ,在国内外 ,隧道施工通风的自动控制水平还不够高 ,人们还要投入大量的人力物力去解决隧道施工通风问题。为此 ,应用智能控制理论 ,建立一个隧道施工环境微型计算机控制系统 ,对风量和风温进行实时自动控制成为研究的重点问题。隧道施工通风系统是一个非线性多变量控制系统 ,由于干扰因素多、有关参数变化范围较大等原因 ,难以建立温度场和有害气

\* 收稿日期 2006 - 05 - 31

\*\* 作者简介 :温少芳 ,1979 年出生 ,女 ,助教。

体含量的精确模型。基于上述原因,本文避开传统经典控制理论数学建模的思路,建立了一种基于模糊理论的高原隧道施工通风控制方法,将施工通风系统复杂的特性用微妙的人类语言来描述,最终用控制规则来实现自动控制。

## 1 控制方案

高海拔高寒区隧道施工通风系统本身是一个多输入多输出的大干扰、强耦合的系统,所以需首先考虑解耦的问题。通风要保证两方面的施工要求:一是施工中有害物浓度的控制,二是温度符合施工要求。施工工作面的温度受初始条件、围岩温度、通风量、风流温度等影响,而人为可以改变的就是通风量和风流温度;在实际情况不变的条件下,施工工作面的有害物浓度的变化只受通风量的影响。因此:

第一,要保证有害物浓度不超过卫生标准规定的最高允许浓度,应该通过测定工作面空间有害物浓度来决定通风量的大小,本文利用变频器达到无级调速,输出相应的通风量。

通风过程中,要求保证工作面人员每分钟人均约  $4 \text{ m}^3$  的新鲜空气和施工工作面的最低风速不低于  $0.15 \text{ m/s}$ ,因此需确定隧道施工工作面的最低供风量,进而确定在这种条件下变频器所对应的输入电压值。

将2个子系统的输出电压进行比较,取较大值的作为变频器的输入电压。

第二,在通风量一定的条件下,经传感器测得工作面的温度,与给定值进行比较得到温度误差值,确定风机出口处风流温度。

经传感器测得室外的环境温度,与求得的风机出口风量及风流温度共同确定蒸汽调节阀的开度,工作面的风温就得到改变。

这样也就可以将这个复杂的通风系统成功解耦。具体的系统结构框图如图1。根据控制要求,在隧道施工中至少需要设有3个检测装置分别为:工作面流场的CO浓度的检测装置、工作面环境温度的检测装置、室外环境温度的检测装置。

## 2 仿真模型建立

2.1 根据能量守恒定律对隧道施工工作面温度建立数学模型如下:

$$q_{mg}(h_n - h_w) + \sum Q_M = \alpha(t_g - t_{rm})S_g \quad (1)$$

式中  $q_{mg}$ ——工作面空气质量流量( $\text{kg/s}$ );  
 $t_g$ ——工作面风筒外(即工作面)风流温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$\alpha$ ——工作面风流与围岩的对流换热系数

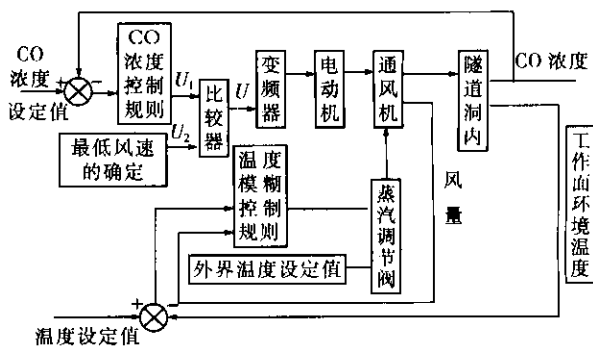


图1 基于变频调速和模糊控制的系统框图

( $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ );

$t_{rm}$ ——原始岩温( $^{\circ}\text{C}$ );

$S_g$ ——工作面围岩总暴露面积( $\text{m}^2$ );

$h_w$ ——流出工作面风筒外空气的焓值( $\text{kJ/kg}$ );

$h_n$ ——流进工作面风筒内空气的焓值( $\text{kJ/kg}$ );

$\sum Q_M$ ——工作空间内各类绝对热源之和( $\text{kW}$ ),即 $\sum Q_M = Q_w + Q_{w0} + Q_p$ 。

2.2 根据能量守恒定律对隧道沿程风管内、风管外建立温度场的数学模型:

风管内的温度场模型的建立:

$$\frac{dt_n}{dx} = [-K_p U_p (t_n - t_w)] / (q_m c_p) \quad (2)$$

风管外温度场模型的建立:

$$\frac{dt_w}{dx} = [k U_p (t_n - t_w) + \alpha U_l (t_{rm} - t_w)] / (q_m c_p) \quad (3)$$

式中  $q_m$ ——风流的质量流量( $\text{kg/s}$ );

$c_p$ ——空气的定压质量比热( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ );

$t_1, t_2$ ——分别为控制体在  $x_1$  和  $x_2$  处风流的风温( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_n$ ——风管内控制体微段的风流温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$K_p$ ——风管的传热系数( $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ );

$t_w$ ——风管外控制体微段的风流温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$dx$ ——所取的微段长度( $\text{m}$ );

$\alpha$ ——工作面风流与围岩的对流换热系数( $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ );

$U_t$ ——隧道断面的周长( $\text{m}$ );

$k_p$ ——风管的传热系数( $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ )。

2.3 根据工作面得到的有害物量与工作面排出的有害物量之差应等于整个工作空间内增加(或减少)的有害物量,建立隧道施工工作面污染物浓度的数学模型:

$$\frac{dy}{d\tau} = (x + Qy_0 - Qy) / V_f \quad (4)$$

式中  $V_f$ ——隧道开挖工作空间体积(  $\text{m}^3$  );  
 $x$ ——有害物散发量( 包括人员的呼吸和机械设备的污染 )(  $\text{g/s}$  );  
 $Q$ ——全面通风量(  $\text{m}^3/\text{s}$  );  
 $y_0$ ——送风空气中有害物浓度(  $\text{g}/\text{m}^3$  );  
 $y$ ——在某一时刻开挖工作空间内空气中的有害物浓度(  $\text{g}/\text{m}^3$  );  
 $d\tau$ ——在某一段无限小的时间间隔(  $\text{s}$  );  
 $dy$ ——在  $d\tau$  时间内开挖工作空间内有害物浓度的增量(  $\text{g}/\text{m}^3$  )。

### 3 通风系统的模糊控制器

模糊控制系统性能的优劣主要取决于模糊控制器的结构、模糊控制规则、合成推理方法以及模糊决策的方法等因素,其中模糊控制器是模糊控制的核心。本系统中,采用两级模糊控制共同作用来实现了有害气体含量( 主要为  $\text{CO}$  )和温度的控制,均采用单输入单输出的二维模糊控制器。本文中隶属函数的曲线形状选用灵敏性较好的三角形函数,且它的数学表达和运算较简单。

#### 3.1 有害气体含量的模糊控制模块设计

隧道施工通风有害气体含量的模糊控制系统研究中,以工作面的实测的  $\text{CO}$  浓度与  $\text{CO}$  浓度的给定值的偏差  $E$  及其偏差变化率  $EC$  作为输入,输出变量是控制变频器频率的输入电压  $U$ 。

##### 3.1.1 输入变量

设计要求隧道施工中, $\text{CO}$  最高容许浓度为  $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。在特殊情况下,施工人员必须进入工作面时,浓度可为  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,但时间不得超过  $30 \text{ min}$ ,取上下偏差为  $20 \text{ mg}/\text{m}^3$ , $\text{CO}$  浓度的设定值为  $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,而偏差  $E$  的真实论域为  $[-20, 20]$ 。偏差变化率以 1 个采样时间间隔计算,其变化率的公式为  $EC = E_t - E_{t-1}$  ( $E_t, E_{t-1}$  为采样时刻  $t, t-1$  的偏差量)均取 7 个语言值:NB、NM、NS、O、PS、PM、PB。

##### 3.1.2 输出变量

输出变量  $U$  的离散论域设定为  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ ,分别对应于变频器的控制输入端,变化范围为  $0 \sim 10 \text{ V}$ ,模糊语言集选为  $\{P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6\}$ 。

##### 3.1.3 模糊控制规则

根据实际操作中总结的经验,得出相应的控制策略,本文有害气体含量的控制规则共有 21 条,举例如下:

(1) If (  $E$  is NB or NM )and(  $EC$  is NB or NM )then (  $U$  is P0 );

(2) If (  $E$  is NB or NM )and(  $EC$  is NS or Z )then (  $U$  is P0 );

(3) If (  $E$  is NB or NM )and(  $EC$  is PS )then(  $U$  is P1 );

.....

#### 3.2 温度模糊控制模块设计

##### 3.2.1 输入变量

隧道施工中,爆破瞬间要产生大量的热,工作面空间气温会突然升温,根据一次爆破产生的热量估算,为了保证在瞬间升温不会超出  $+5^\circ\text{C}$ ,所以气温误差论域范围设定为  $[-2^\circ\text{C}, +2^\circ\text{C}]$ ,气温的模糊变量取为 7 档:NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB。气温变化量  $ECT$  取 DOWN( 下降 )、OK( 正常 )、UP( 上升 )三档。

##### 3.2.2 输出变量

输出量  $FW$  是风机出口处的风温,其论域设为  $[-5^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}]$ ,风温不易过高,过高可能会导致隧道沿程地段温度超过  $+5^\circ\text{C}$ ,冻土融化。也分为如下 7 档:  $P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7$ 。

##### 3.2.3 模糊控制规则

根据隧道施工通风温度控制实际操作中总结的经验,根据系统输出误差及误差变化率的趋势来消除误差,得出如下相应的控制规则,共有 21 条,举例如下:

(1) If (  $ET$  is NS )and(  $ECT$  is DOWN )then(  $FW$  is P6 );

(2) If (  $ET$  is Z )and(  $ECT$  is DOWN )then(  $FW$  is P5 );

(3) If (  $ET$  is PS )and(  $ECT$  is DOWN )then(  $FW$  is P4 );

.....

### 4 仿真结果

为检验本控制器的有效性,利用 Matlab 仿真技术将本控制效果与定时、分级控制效果进行比较。在实际情况中,有害物的散发量与岩层物质、一次爆破的炸药量等许多因素有关,以至于难于全面地考虑到它们,所以模拟了有害物散发的任意一种情况如图 2( a )所示,根据流场和传热学理论建立仿真模型,并在同等条件下进行对比。

#### 4.1 工作面有害气体的仿真结果分析

图 2( b )表示 3 种控制方法下通风机的通风量变化情况,图 2( c )表示在 3 种控制方法下有害物浓度的分布情况。其中,单线代表模糊控制器的控制结果,点线代表恒通风量通风的结果,点划线代表分级式手动控制结果。图 2 中可以反映出模糊控制结果:有害物浓度既不超标也不过分低于允许值,通风机的风速

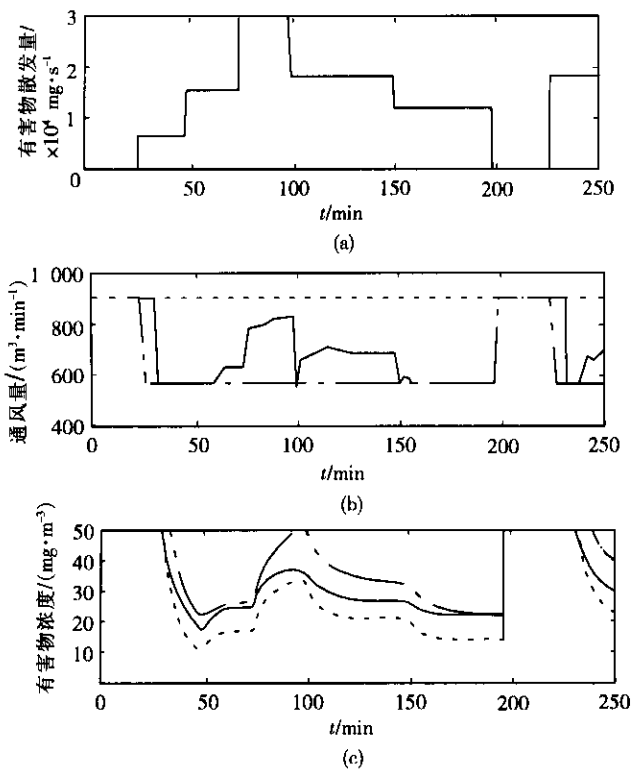


图 2 工作面有害气体含量的仿真结果

也能够达到控制要求(即始终在最低风速之上)。然而点线表示的风机的通风量曲线与横轴所围成的面积,比单线围成的面积要大得多,说明传统的恒通风量通风的控制方法比模糊控制方法消耗的能量大得多,如果将模糊控制方法应用在实际的隧道施工通风系统中,将会节约更多的电能,总费用会相应降低。

图 2(b) 中点划线所表示的风机的通风量曲线与横轴所围成的面积,比单线和点线围成的面积都小,但是从图 2(c) 中可以看出:分级式的通风控制方法中 CO 浓度明显上下波动较大,在有害物散发量较大时,CO 浓度的控制有可能超出控制范围,这说明被控制参数 CO 浓度的稳定性不好,而且分级式的控制方法不能实现自动控制,靠手动操作。而模糊控制却恰恰相反,被控参数的变化曲线相对平缓,而且充分保证了控制要求,始终小于最大值,且不过分小于最大值,能够实现自动的实时控制。

#### 4.2 温度仿真结果分析

图 3 是文中模糊控制方法下与上述通风过程相同条件下的温度控制情况。图 3(c) 中突变值为爆破产生大量热量,从仿真结果可以看出:(1) 被控对象工作面环境温度变化,始终是逐渐趋近于零附近,能够满足控制要求;(2) 可以说明本文上述隧道施工通风系统的解耦的方法是完全可行的,先由有害物浓度值来确定通风量,再由工作面的风温来决定蒸汽阀门的开度;

(3) 使用模糊控制方法进行控制的结果可以看出,此控制系统能够反映工作面的温度情况,并根据温度的误差及误差的变化率进行实时控制。

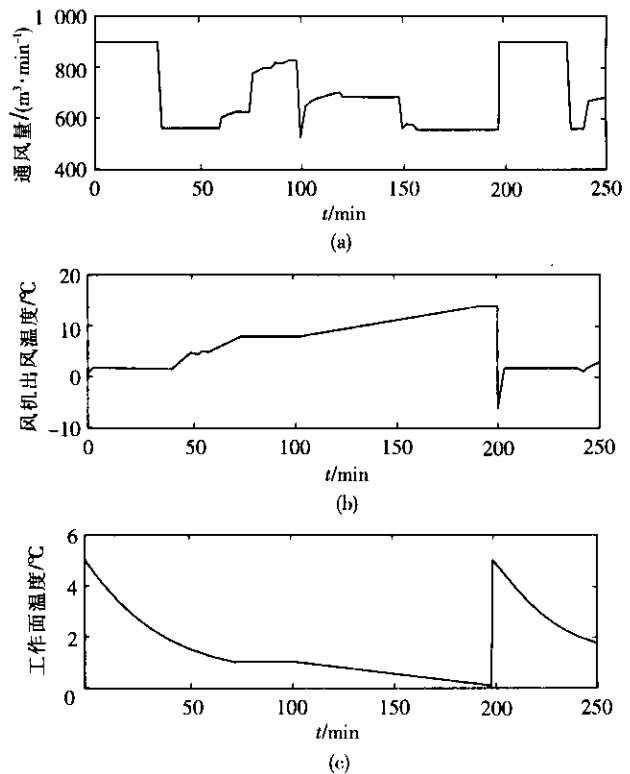


图 3 温度控制仿真结果

## 5 结束语

在冻土隧道施工通风中,应用此系统可以提高通风性能和自动化水平,可达到实时控制,与传统通风控制方法相比,节能效果十分显著,有着很好的应用前景。

在实际的应用中,本文提到的风机的最高风速和最低风速,应根据具体的环境要求来确定。

## 参考文献:

- [1] 楼顺天,胡昌华,张伟. 基于 MATLAB 的系统分析与设计·模糊系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [2] 刘曙光,魏俊民,竺志超. 模糊控制技术[M]. 北京:中国纺织出版社,2001.
- [3] 商景泰. 通风机手册[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [4] 张国枢,谭允祯,等. 通风安全学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [5] 张国良,曾静,柯熙政,等. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [6] 朱永全,赖涤泉,高原,高寒. 冻土隧道洞内施工环境控制技术鉴定文件[Z]. 石家庄:石家庄铁道学院,2003.
- [7] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Trans on Syst Man Cybern, 1985, 15(1): 116-132.

(编辑 慕成娟)

作者: [温少芳](#), [刘海宁](#), [王军](#), [赖涤泉](#), [WEN Shao-Fang](#), [LIU Hai-Ning](#), [WANG Jun](#), [LAI Di-quan](#)  
作者单位: [石家庄铁道学院, 石家庄, 050043](#)  
刊名: [铁道工程学报](#)   
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)  
年, 卷(期): 2006 (8)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(7条)

1. [楼顺天](#); [胡昌华](#); [张伟](#) [基于MATLAB的系统分析与设计—模糊系统](#) 2001
2. [刘曙光](#); [魏俊民](#); [竺志超](#) [模糊控制技术](#) 2001
3. [商景泰](#) [通风机手册](#) 1993
4. [张国枢](#); [谭允祯](#) [通风安全学](#) 2000
5. [张国良](#); [曾静](#); [柯熙政](#) [模糊控制及其MATLAB应用](#) 2002
6. [朱永全](#); [赖涤泉](#) [高原、高寒、冻土隧道洞内施工环境控制技术研究鉴定文件](#) 2003
7. [Takagi T](#); [Sugeno M](#) [Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control](#) 1985(01)

## 引证文献(1条)

1. [赵雅宁](#). [陈震威](#). [张永国](#). [陆朝荣](#) [基于模糊控制的油料洞库自然通风控制系统研究](#)[期刊论文]-[石油库与加油站](#) 2009 (3)

引用本文格式: [温少芳](#). [刘海宁](#). [王军](#). [赖涤泉](#). [WEN Shao-Fang](#). [LIU Hai-Ning](#). [WANG Jun](#). [LAI Di-quan](#) [冻土隧道施工通风模糊控制系统的研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2006 (8)