

# 基于模糊 PID 前馈控制的 VRV 空调控制方法研究

郭兆明, 李树江, 张俊

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 变制冷剂流量 (VRV) 空调系统由于其舒适性、环保性和节能性得到了广泛的应用, 但其系统具有多变量、非线性、强耦合等特点; 对于这个问题, 在 VRV 空调系统房间模型基础上, 应用仿真实验以及数学建模的方式建立蒸发器过热度、制冷剂质量流量以及电子膨胀阀的数学关系, 设计了带有前馈补偿的模糊 PID 控制器, 以过热度的偏差及其变化率作为输入, 通过模糊推理在线整定的 PID 控制器参数, 解决蒸发器过热度控制的不确定性、非线性和时变性问题, 实现了对本房间过热度的精准控制; 其次, 针对不同房间负荷变化产生相互影响的耦合现象, 将本房间以外的制冷剂总流量的变化及其变化率作为输入, 设计了基于模糊控制的前馈补偿器, 修正电子膨胀阀开度; 然后, 对所设计的控制方法进行仿真验证, 模拟了多种 VRV 中央空调系统在不同房间的工况和负荷改变时的仿真实验, 结果表明过热度控制方法可行、有效, 可以针对存在耦合的房间进行精准的过热度调节。

**关键词:** VRV 空调; 模糊 PID; 前馈补偿; 过热度

## A Study on Control Method of VRV Air Conditioner Based on Fuzzy PID Feedforward Control

Guo Zhaoming, Li Shujiang, Zhang Jun

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Variable refrigerant volume (VRV) air-conditioning system with its comfort environmental protection and energy saving characteristics have been a wider range of applications, but the system has features of multivariable, nonlinear and strong coupling. Based on the VRV room model, the mathematical relations of evaporator superheat refrigerant mass flow and electronic expansion valve are established by means of simulation experiment and mathematical modeling. Designing a fuzzy PID controller with feedforward compensation, considers the degree of superheat and its difference value as input, through fuzzy reasoning setting PID controller parameters online, solves the problems of evaporator superheat degree controlling uncertainty, nonlinear and time-varying, realizes controlling precision to the room; Secondly, the coupling phenomenon of mutual influence is produced according to the change of room load, considering the change of total refrigerant flow outside of this room and its rate of change rate as input, the feedforward compensator is designed based on fuzzy control, the electronic expansion valve opening is fixed. Then, the control method is verified by simulation, and the variation of operating condition and load in different rooms of VRV central air conditioning system are simulated. The results show that the degree of superheat control method is feasible and effective, and it can be used for adjusting the degree of superheat in coupling rooms accurately.

**Keywords:** VRV air conditioning system; fuzzy PID; feedforward compensation; degree of superheat

## 0 引言

VRV 空调系统由于具有较强的舒适性、节能性以及高效性, 在中国市场中的应用也越来越广泛, 近年来我国对于 VRV 空调控制研究也取得了较大的进展。由于一拖多 VRV 空调系统含有多个蒸发器、风扇、和电子膨胀阀<sup>[1]</sup>, 其共用一台压缩机和冷凝器 (见图 1), 能源消耗较低<sup>[2]</sup>,

当房间负荷改变时, 直接影响到其它房间蒸发器出口过热度的稳定特性, 因此这就要求设计者必须考虑不同蒸发器之间的耦合关系以及制冷剂流量的分配问题。在 VRV 空调系统中, 通过调节电子膨胀阀的开度<sup>[3]</sup>可以实现对于空调系统内制冷剂质量流量的控制, 进而达到控制房间过热度的目的, 而且相对于传统的热力膨胀阀, 电子膨胀阀的控制精度也更高<sup>[4]</sup>。近些年来关于电子膨胀阀在 VRV 空调系统中应用的研究<sup>[5]</sup>也越来越多, 但是其大多局限于对单一房间的温度控制。此外, 电子膨胀阀的控制算法大多为模糊控制<sup>[6]</sup>, 且蒸发器之间的耦合影响使得研究人员难以建立精确的数学模型<sup>[7]</sup>, 因此笔者采用模糊算法与 PID 算法相结合的复合算法作为系统的控制方法。

由于在一拖多空调系统中各个房间的蒸发器存在耦合关系, 这就导致系统的控制方式比较复杂, 为此需要分析房间负荷以及各个蒸发器之间如何相互影响, 再采用合适的控制方式消除各个房间之间的影响。虽然目前关于 VRV

收稿日期: 2020-03-07; 修回日期: 2020-03-26。

基金项目: 辽宁省教育厅青年科技人才“育苗”项目 (LQGD20-19012)。

作者简介: 郭兆明 (1993-), 男, 辽宁锦州人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式控制系统应用方向的研究。

李树江 (1966-), 男, 辽宁北镇人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制技术等方面的研究。

张俊 (1986-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事运行优化控制算法等方面的研究。

空调技术的研究较多,但是其主要集中于性能分析以及机理建模<sup>[8]</sup>,对于蒸发器之间的耦合性研究较少。基于此,本文以一拖多 VRV 空调系统为例,分析了各个蒸发器之间的耦合关系,建立了电子膨胀阀和蒸发器的数学模型,提出了基于前馈模糊控制的策略,最后通过 Matlab 仿真分析证明了加入前馈控制器后可以有效减小其它蒸发器对于被控房间的影响。

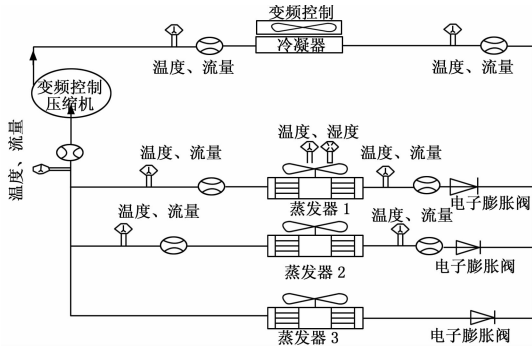


图 1 VRV 空调系统原理图

### 1 VRV 空调系统数学模型

在建立蒸发器的动态模型时,可以利用质量方程<sup>[9]</sup>进行稳态求解,这种计算方式不仅不会影响计算精度,同时还可以省去求解质量方程的过程,由于一拖多空调系统各蒸发器流出的制冷剂需要共同汇集到压缩机入口,因此压缩机入口处的制冷剂质量流量等于各蒸发器出口制冷剂流量之和,又因为蒸发器内部的制冷剂干度呈线性分布,因此基于制冷剂气、液两相流质量守恒方程可以得出各蒸发器出口的制冷剂质量总和不变。

$$\frac{d}{dz} [\alpha \rho_v u h_v + (1 - \alpha) \rho_l u h_l] = \frac{\pi d}{A} q \quad (1)$$

其中:  $z$  为轴向长度,  $v$  为汽相制冷剂,  $l$  为液相制冷剂,  $\alpha$  为两相流空泡系数,  $\rho$  为介质密度,  $u$  为流速,  $h$  为介质焓,  $d$  为管径,  $A$  为管内截面积,  $q$  为热流密度。

设蒸发器 1 出口的制冷剂质量为  $m_1$ , 蒸发器 2 出口的制冷剂质量为  $m_2$ , 蒸发器  $n$  出口的制冷剂质量为  $m_n$  ( $n > 0$ ), 压缩机入口处的制冷剂质量为  $m$ , 则可得出:

$$m_1 + m_2 + \dots + m_n = m \quad (2)$$

在压缩机转速一定的情况下,各蒸发器的制冷剂质量流量分布可近似看做抛物线状。各蒸发器出口的压力可用  $P_{out}$  表示,蒸发器入口压力则与负荷有关,因此需要研究者确定房间负荷。

#### 1.1 负荷关系

由于制冷剂流量分配与房间负荷系数分配存在关联,因而可以通过确定负荷关系得出其它房间负荷变化<sup>[10]</sup>对于被控房间的影响。因蒸发器所在房间的负荷与其负荷系数呈线性关系,而负荷又与电子膨胀阀的开度和制冷剂流量分配有关,以两个房间为例,具体负荷关系如式(3)所示:

$$N_2 = -lN_1^2 + n \quad (3)$$

其中:  $N_1$ 、 $N_2$  分别表示两个房间的负荷系数,  $n$  和  $l$  为待定系数,  $n$  与压缩机转速  $N$  呈线性关系,  $l$  与制冷量与压缩机频率有关,由此可得两个房间的负荷系数关系为:

$$N = N_2 + \frac{\sqrt{N_2^2 + 4M^2 N_1^2}}{2f} \quad (4)$$

通过负荷关系也可得出压缩机的转速,根据 VRV 空调系统特性和模糊量化关系可令  $f=0.775$ ,  $M=1$ 。

由于负荷条件不同,制冷剂质量流量也不同,对于一拖多系统,可将其余几个房间看做一个整体共同分析负荷系数的变化情况,利用制冷剂流量计测得制冷剂流量值,再通过质量守恒定律得出各房间的制冷剂流量变化情况,调节电子膨胀阀开度等系统可调节的因素,使其处于最佳匹配状态,进而通过前馈控制消除其它房间的耦合影响。对于一拖多系统,当调节到一定范围后即可忽略其影响,不再调节。

#### 1.2 房间热力学模型

考虑到房间体积、环境温度以及墙体性质需要对蒸发器所在房间进行系统<sup>[11]</sup>建模:

$$(C_0 + \rho C_p V) \frac{dT}{dt} = \alpha_w A_w (T_2 - T_1) + Q_{indoor} - Q_0 \quad (5)$$

其中:  $C_0$  为房间物体热容,  $\rho$  为空气密度,  $C_p$  为空气的定压比热,  $V$  为实际房间体积,  $\alpha_w$  为墙体综合换热系数,  $A_w$  为墙体换热面积,  $T_2$  为室外环境温度,  $T_1$  为室内环境温度,  $Q_{indoor}$  为房间内部热负荷,  $Q_0$  为制冷量。

#### 1.3 蒸发器热力学模型

由于蒸发器内的制冷剂干度呈线性分布,因此在进行蒸发器热力学模型建模时可以忽略蒸发器内的阻力,假定空间参数只随时间变化而变化,房间蒸发器模型热力学模型<sup>[12]</sup>为:

$$\frac{dh_2}{dt} = [\dot{m}_c (h_b - h_d) + \dot{Q}_0] \frac{1}{m_2} \quad (6)$$

$$\dot{Q}_0 = \alpha_2 A_2 (T_1 - T_2) \quad (7)$$

其中:  $h_2$  为蒸发器空间平均比焓,  $m_c$  为膨胀阀质量流量,  $h_b$  为蒸发器(冷凝器)入口比焓,  $h_d$  为蒸发器出口比焓,  $m_2$  为蒸发器内部制冷剂质量。

#### 1.4 电子膨胀阀热力学模型

本文所采用的 VRV 空调系统电子膨胀阀建模方法为孔板方程,通过孔板方程和电子膨胀阀的动量方程<sup>[13]</sup>可以得出制冷剂流量与电子膨胀阀开度的关系,进而建立出蒸发器与电子膨胀阀之间的关系。

$$\dot{m}_c = A_v \delta \sqrt{\frac{(\rho_i - P_{out})}{v_b}} \quad (8)$$

其中:  $A_v$  为电子膨胀阀的开度,  $\delta$  为流量系数,  $\rho_i$  为电子膨胀阀前压力,  $P_{out}$  为电子膨胀阀出口压力。

电子膨胀阀动量方程为:

$$G_r = C_D A_{(z)} \sqrt{2\rho_m (P_{in} - P_{out})} \quad (9)$$

其中:  $G_r$  为制冷剂质量流量,  $C_D$  为电子膨胀阀开度系数,  $A_{(z)}$  为开度对应的截面积,  $\rho_m$  为阀入口介质密度,  $P_{in}$  为



设被控房间为 A，模糊补偿器的输入为  $m$ 、 $mc$ ，分别表示其它房间制冷剂质量流量的总增量及其变化率，输出  $\Delta u$  表示 A 房间电子膨胀阀的开度控制信号的修正量， $m$  和  $\Delta u$  的论域均为  $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ， $mc$  的论域为  $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$ ，模糊子集均为  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ 。当制冷剂质量流量为正且其变化率为正小时，说明其它房间的制冷剂质量流量总和增加且变化率还在缓慢增加，此时 A 房间会受到其它房间的耦合影响，其制冷剂质量流量会减小，因此应增大房间 A 的电子膨胀阀开度，通过归纳得到模糊规则如表 2 所示。

表 2  $\Delta u$  模糊规则表

		MC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
M	NB	PB	PB	PB	PS	ZE
	NS	PB	PS	PS	ZE	ZE
	ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
	PS	ZE	ZE	NS	NS	NB
	PB	ZE	NS	NB	NB	NB

### 3 仿真结果与分析

要保证系统安全稳定运行，达到快速准确调节房间温度的目的，就要使制冷剂在蒸发器出口处具有稳定的过热度来保证效率，因此笔者通过设定过热度与实际过热度的差值以及模糊补偿算法来调节室内机的电子膨胀阀开度，保证蒸发器过热度维持在设定值，以下为实验仿真。

由于被控对象模型在受到如太阳光照射强度、空气湿度变化、设备使用情况以及人员流动等因素的影响时，负荷会发生改变<sup>[15]</sup>。当室内温度升高时，换热量就会随之增加，进而导致制冷剂干度增加，因此为了检验前馈模糊控制的精度以及适应性，笔者对控制系统进行了仿真实验，分别考虑在一拖多 VRV 空调系统和一拖二 VRV 空调系统制冷剂流量增加情况下，过热度变化情况。对于一拖多 VRV 空调系统，其他房间负荷系数的变化会导致房间过热度改变，而当流入其他蒸发器的制冷剂质量流量发生变化时，由于制冷剂总量不变，即使设定房间各项系数均未发生变化，流入该房间蒸发器的制冷剂质量流量也会发生改变，为此本文设计了模糊前馈控制器来抵消其他房间对于设定房间制冷剂流量的扰动影响。为此，针对同一工况下的 VRV 中央空调系统，即各属性参数均相同的一拖多 VRV 中央空调系统，当其他房间制冷剂流量总量减少时，流入设定房间的制冷剂流量增加，此时设定房间的过热度将降低。

#### 3.1 PID 参数及主控制回路

不失一般性，根据机理模型分析可得系统的控制信号与电子膨胀阀制冷剂流量在某一工作点可以用线性模型表示，其传递函数模型为  $k/s$ ，过热度与制冷剂流量的传递函数模型为  $k_1/k_1s^2 + k_2s + k_3$ 。为了提高系统的动态性能，设定模糊控制器的采样周期为 10 s，设定被控房间 A 的过热度为 5℃，相比于传统 PID 控制算法，模糊 PID 复合控制方法可以减小超调量，加快系统响应速度，缩短调节时间。

#### 3.2 前馈控制回路仿真

由图 3 可以看出，假设某一房间在 650 s 关闭空调减少负荷，被控房间制冷剂流量增加，过热度减小。在扰动作用增加之前，模糊 PID 控制方法相比于传统 PID 控制方法具有更好的调节性能，在系统趋于稳定之后加入了其他房间制冷剂流量变化的扰动量，增加模糊前馈控制环节可以使系统更快地趋于稳定，而应用传统 PID 控制方法系统最终虽然也趋于稳定，但响应时间相比模糊前馈控制长，系统超调量也更大，由此可以证明本文所提出的方法的可行性以及模糊前馈控制方法的优越性。

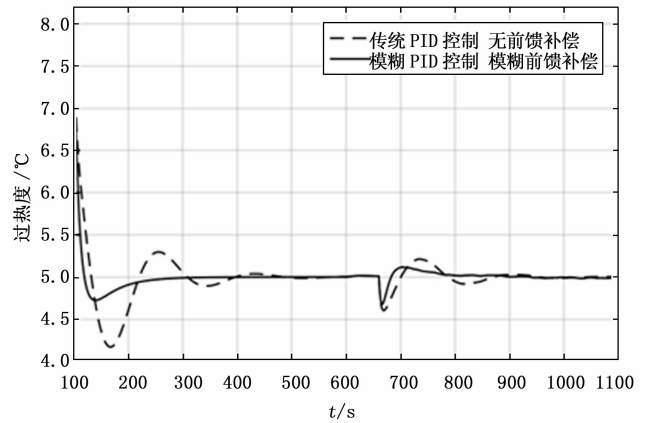


图 3 一拖多系统过热度仿真曲线

对于一拖多 VRV 中央空调控制系统而言，蒸发器数量越多，彼此之间制冷剂流量的耦合影响越小，而一拖二系统中的两蒸发器之间的耦合影响效果最强。为此本文对一拖二中央空调控制系统进行了仿真实验。由图 4 可以看出，在初始阶段，即两个房间的设定过热度均为 5℃时，采用模糊前馈补偿的模糊 PID 控制方法的系统最大超调量约为 0.2℃，系统于 300 s 时趋于稳定。采用传统模糊 PID 控制方法的系统最大超调量为 0.8℃，于 500 s 时趋于稳定。假设另一房间在 650 s 关闭空调减小负荷，则流经该房间的制冷剂流量减少，进而另一房间的制冷剂流量就会增加，过热度则会降低，在图 4 可以看出在 650 s 时，系统过热度突然由 5℃降低至 2.5℃，此时系统则会进行调节。应用增加模糊前馈的模糊 PID 控制方法时系统可以很快趋于稳定，响应时间约为 250 s，超调量较小。而应用传统 PID 控制方法超调量较大，且响应时间也趋近于 450 s，由此可以证明增加模糊前馈控制环节可以有效处理一拖二系统蒸发器之间的耦合影响，使各蒸发器可以迅速达到各自的设定值，保证空调系统具有良好的调节性能。以下为两种工况下实验仿真曲线。

### 4 结束语

本文采用模糊 PID 控制建立被控房间过热度与电子膨胀阀开度的关系，通过建立一拖多空调系统电子膨胀阀与蒸发器的控制模型分析了各蒸发器的耦合关系，根据蒸发器出口的制冷剂质量流量总和不变建立了目标房间蒸发器与电子膨胀阀的控制模型。依据 VRV 空调系统的有关特

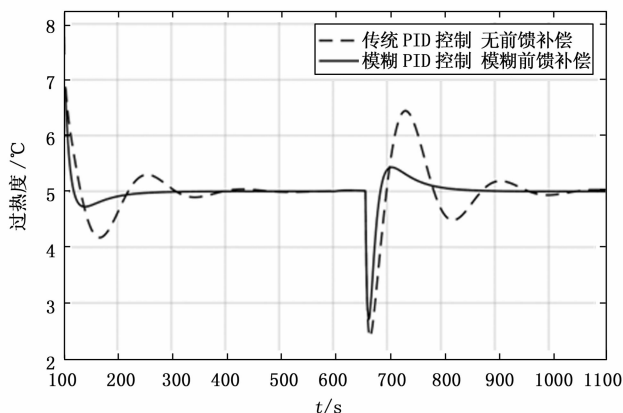


图 4 一拖二系统过热度仿真曲线

性, 设计了带有模糊前馈补偿器的模糊 PID 控制系统, 通过过热度的偏差和偏差变化率, 采用模糊推理方法实现 PID 参数的在线校正, 解决了过热度控制的非线性、不确定性问题, 采用其它房间制冷剂流量变化和变化趋势, 通过模糊推理对调节自身电子膨胀阀的开度进行前馈补偿, 实现了过热度的精准控制, 最后在不同工况, 不同扰动情况下, 做了仿真实验, 证明本文采用的控制方法具备良好的动态性能和稳态性能。

#### 参考文献:

- [1] Yan H, Deng S, Chan M. Operating characteristics of a three-evaporator air conditioning (TEAC) system [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 883-891.
- [2] Zhao D, Zhong M, Zhang X, et al. Energy consumption predicting model of VRV (Variable refrigerant volume) system in office buildings based on data mining [J]. Energy, 2016, 102: 660-668.

(上接第 64 页)

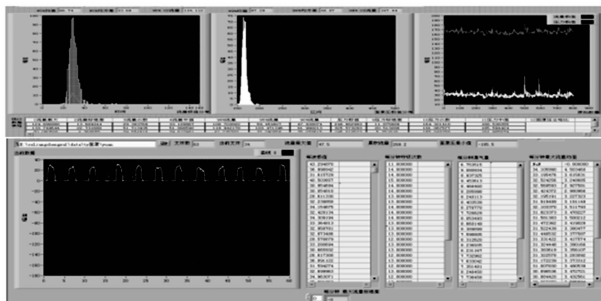


图 5 数据读取及统计

能, 缩小体积、重量, 加强防水设计, 提高漂浮性能; 改进供电模式, 达到机场安检要求。

#### 参考文献:

- [1] 肖华军. 飞行员氧气面罩的发展趋势 [J]. 中华航空航天医学杂志, 1999 (3): 59-61.
- [2] 柯孔良, 李文放, 欧崇阳, 等. 飞行员海上弹射跳伞致伤 2 例分析 [J]. 第二军医大学学报, 2014, 35 (4): 460-461.
- [3] 肖华军. 未来战斗机飞行员供氧呼吸防护装备发展及其生理研究趋势 [J]. 中华航空航天医学杂志, 2010 (4): 305-309.
- [4] 张立辉. 国外飞行员多功能及一体化个体防护装备研究进展

- [3] 赵英军. 变频空调电子膨胀阀的模糊 PID 控制 [J]. 电子技术与软件工程, 2019 (13): 60-61.
- [4] 何俊, 陶乐仁, 胡鹏荣. 变流量制冷系统中频率与电子膨胀阀开度的协同控制研究 [J]. 制冷学报, 2019, 40 (4): 95-100.
- [5] 郭晓鹏, 周大志. 电子膨胀阀控制器优化研究 [J]. 制冷技术, 2019, 39 (2): 72-75.
- [6] 赵刚, 张九根, 杨珊珊, 等. 基于改进遗传算法的模糊温度控制在空调中的应用 [J]. 科技通报, 2017, 33 (8): 156-161.
- [7] Zhu Y, Jin X, Du Z, et al. Generic simulation model of multi-evaporator variable refrigerant flow air conditioning system for control analysis [J]. international journal of refrigeration, 2013, 36 (6): 1602-1615.
- [8] 邵双全. VRV 空调系统特性与控制策略研究 (一) ——电子膨胀阀—蒸发器联合调节特性与控制策略 [A]. 中国制冷学会、中国制冷空调工业协会. 第十届全国冷 (热) 水机组与热泵技术研讨会论文集 [C]. 中国制冷学会、中国制冷空调工业协会: 中国制冷学会, 2002: 5.
- [9] 陈武, 周兴禧, 夏清, 等. 双联变频空调系统建模与控制方法仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2002 (5): 643-646.
- [10] 夏建军. VRV 空调系统优化控制研究 [D]. 清华大学, 2005.
- [11] 咎世超, 张伟, 张泽国. 变负荷下制冷系统容量调节技术研究 [J]. 制冷与空调, 2014, 14 (10): 25-28.
- [12] 陈武, 蔡振雄, 周兴禧. 一拖三变频空调系统建模方法及控制研究 [J]. 系统仿真学报, 2004 (10): 2123-2127.
- [13] 赵玲雨. VRV 变频多联空调系统室内机的仿真与控制研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [14] 罗聪. 基于嵌入式的 VRV 中央空调末端控制器的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [15] Zhao D, Zhang X, Zhong M. Variable evaporating temperature control strategy for VRV system under part load conditions in cooling mode [J]. Energy and Buildings, 2015, 91: 180-186.
- [16] 中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会、北京市海淀区人-机-环境系统工程研究会、人-机-环境系统工程创立 30 周年纪念大会暨第十一届人-机-环境系统工程大会论文集 [C]. 中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会、北京市海淀区人-机-环境系统工程研究会: 中国系统工程学会人-机-环境系统工程专业委员会, 2011: 282-285.
- [5] 肖华军. 航空供氧防护装备应用生理学 [M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2015: 259.
- [6] 臧斌. 低压舱氧气装备供氧参数测试系统的研制 [J]. 医疗卫生装备, 2009, 30 (1): 31-33.
- [7] 李兵林. 关于呼吸防护装备的呼吸阻力负荷 [J]. 军队卫生杂志, 1985 (3): 49-54.
- [8] 马瑞山. 航空供氧装备呼吸阻力容许标准的研究 [J]. 第四军医大学学报, 1993 (6): 476-480.
- [9] 林慧琼, 刘坤涛. 气体流量传感器的结构、原理及其在呼吸机中的应用 [J]. 医疗装备, 2005 (3): 24-25.
- [10] 程佩青. 数字信号处理教程 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [11] 杨大柱. 基于 LabVIEW 的数字滤波器设计 [J]. 现代机械, 2006 (6): 19-20, 69.
- [12] 丰伟伟. LabVIEW 中 TDMS 文件和 SQL 数据库数据处理速度的研究 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2011 (1): 10-12.