

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415418

高海拔潮气量双环PID控制系统研究*

王慧泉^{1,2} 魏志鹏^{2,3} 马欣⁴ 邢海英³

(1. 天津工业大学生命科学学院 天津 300387; 2. 天津市医疗器械质控与评价技术重点实验室 天津 300387;
3. 天津工业大学电子与信息工程学院 天津 300387; 4. 天津工业大学计算机科学与技术学院 天津 300387)

摘要: 为解决高海拔地区气压降低导致急救呼吸机潮气量控制精度下降的问题,提出了双环PID潮气量控制系统。该系统采用气压补偿型PID控制器调整风机转速,并辅以积分分离式PID控制器,以实现对流速度的精确控制。在实际海拔4370 m、大气压59 kPa的环境中,系统性能测试表明,相较于单环PID控制,双环控制系统在高海拔条件下表现出快速响应和无超调的卓越性能。平均气流速度输出误差为3.19%,最大误差为4.1%,优于现有临床设备的准确性。这一技术突破不仅提供了高海拔急救呼吸机潮气量控制的有效解决方案,也为特殊环境下的通气控制技术发展贡献了重要参考。

关键词: 高海拔地区;低气压;急救呼吸机;潮气量控制;气压补偿;双环PID

中图分类号: R197.39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Research on dual-loop PID control system for tidal volume at high-altitude areas

Wang Huiquan^{1,2} Wei Zhipeng^{2,3} Ma Xin⁴ Xing Haiying³

(1. School of Life Sciences, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Quality Control and Evaluation Technology for Medical Devices, Tianjin 300387, China;

3. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

4. School of Computer Science and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To solve the problem of low control accuracy of the tidal volume emergency ventilation for lower air pressure at high altitudes, we propose a dual-loop PID tidal volume control system, which utilizes a pressure-compensated PID controller to adjust fan speed, supplemented by an integral-separate PID controller in order to achieve precise control of airflow velocity. Compared with single-loop PID control, the rapid response and no overshooting are observed in the performance tests of the dual-loop control system at an altitude of 4370 m and atmospheric pressure of 59 kPa, in addition, the output error of the average airflow velocity decrease to 3.19% (the maximum error is 4.1%), which is superior to that of current clinical equipment. Our work offers an effective solution for high-altitude emergency ventilator tidal volume control, and contributes important insights to the development of ventilation control technology in special environments.

Keywords: high-altitude area; low air pressure; emergency ventilators; tidal volume control; pressure compensation; dual-loop PID

0 引言

急救呼吸机在处理呼吸衰竭、麻醉后呼吸抑制以及心脏骤停等急救情况中发挥着关键的生命支持作用^[1-2]。通过提供机械通气支持来维持呼吸功能,然而,在这一过程中,确保精准的潮气量控制显得至关重要^[3]。研究表明,潮

气量过高会引起肺过度扩张,导致患者诱发的肺损伤,甚至对患者的生命构成严重威胁^[4-6]。在高海拔地区,由于气压低和空气密度小等因素,急救呼吸机潮气量的控制精度下降,从而影响了患者的救治效果^[7-8]。目前针对高海拔地区急救呼吸机潮气量控制的研究相对有限,因此,在高海拔地区如何实现急救呼吸机潮气量的精准控制成为亟待解决

收稿日期:2024-01-24

* 基金项目:国家重点研发计划(2023YFC301180)项目资助

的关键问题。潮气量是气流速与通气时间的乘积,其优化取决于对气流速的准确调控。

临床急救呼吸机主要分为气动气控型(气囊供气)、气动电控呼吸机(压缩机供气)和电动电控呼吸机(涡轮风机供气)三类,其中电动电控呼吸机因结构简单、控制精度高而广泛应用。该呼吸机主要采用单环比例积分微分控制(proportional-integral-derivative control, PID)技术,包括主控器、涡轮风机、流量传感器等基本控制结构^[9]。其控制过程分为3步:1)主控器设定气流速,驱动涡轮风机;2)流量传感器在涡轮风机输出口监测实际气流速,反馈至主控器;3)主控器计算气流速设定值与实际值的偏差,微调涡轮风机转速,确保设定气流速稳定输出。尽管该方案具有结构简单、高实时性的优点,但在复杂环境下,鲁棒性不足,容易出现超调、滞后等现象,影响急救呼吸机的气流速控制精度。

为提高呼吸机的气流速控制精度,Acharya等^[10]、Mehedi等^[11]、王宏民等^[12]、刘景康等^[13]团队采用模糊PID控制方法,将模糊控制与PID控制进行融合,提高了系统的适应性和鲁棒性,然而参数调节复杂,计算量大,对规则库依赖性高,且在处理不确定性方面有限制。为提高系统性能,齐亚洲^[14]利用遗传算法优化PID参数,但该方法计算量大耗时长,容易陷入局部最优解,尤其是在复杂的非线性系统中。张森^[15]采用分数阶PID控制器优化算法,增强了系统的稳定性和鲁棒性,但参数调节较复杂,引入了系统理论复杂度。于瑶等^[16]通过优化PID中的积分算法改进了传统PID控制器的不足,提高了系统的抗干扰能力和跟踪性能,但该系统因频繁地调节参数,影响了系统的稳定性和准确性。虽然上述工作在PID控制器中引入新的控制策略,改善了单环PID算法的控制性能,但整体结构仍保持着PID的基本单环控制框架。在高海拔地区,由于大气压降低和空气密度减小,涡轮风机的风阻相应减小,从而导致其性能下降。在相同转速下,涡轮风机输出的气流量变化较大,增加了气流速控制系统的非线性。然而,单环PID控制结构固定,对于非线性系统的适应性相对有限,难以及时、精准调整,容易导致系统响应时滞。同时,由于呼吸机输出管路固有的气密性和顺应性,导致涡轮风机输出气流速不可避免地会发生气损。但是单环PID控制器无法精确跟踪控制信号,因此难以实现对气流速的精准控制。

为解决上述问题,本研究提出了结合气压补偿型内环PID和积分分离式外环PID的双环潮气量控制系统。该系统中,内环PID通过迅速调整涡轮风机转速,以快速达到设定的气流速;外环PID通过调整内环输出,将气流速稳定在设定值。同时,气压补偿机制通过引入气压信息,修正内环的通气参数,减小了低气压环境对系统的影响。外环采用积分分离式结构,降低系统的超调和振荡,提高系统的鲁棒性,从而实现急救呼吸机对气流速的精确控制。

1 系统结构及其工作原理

1.1 气路结构

为提升急救呼吸机通气控制系统性能,本研究搭建了机械通气高海拔自适应闭环控制平台,其气路结构示意图如图1所示。在该结构中,大气压传感器置于涡轮风机入口处,实时采集涡轮风机工作环境的大气压。气流传感器置于涡轮风机出口处,实时采集涡轮风机输出的气流速。压差传感器置于呼吸管路末端,实时采集呼吸机输出的气流速。气压传感器置于呼吸管路末端,实时采集呼吸机输出的气道压。急救呼吸机主控器通过风机控制器实现对涡轮风机的精准控制。

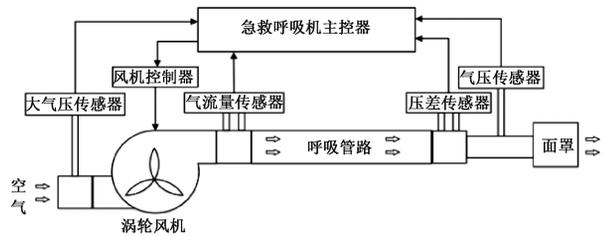


图1 气路结构示意图

1.2 工作原理

整个系统的通气控制可概括为6个步骤,

- 1)急救呼吸机主控器预设潮气量,获取气流速目标值,即预设值,配置内环气流速目标值,启动涡轮风机,使呼吸机按照设定气流速值输出气体;
- 2)大气压传感器采集涡轮风机工作环境的实际大气压值,通气气压补偿算法,获取气压补偿系数;
- 3)急救呼吸机主控器以气压补偿系数修正气流量传感器测量数据,输入内环PID控制器快速调整涡轮风机转速,实现气流速迅速达到目标值;
- 4)急救呼吸机主控器通过压差传感器测量呼吸机输出气流速实际值,输入外环PID控制器调整内环PID气流速目标值,以保持气流速稳定在预设值;
- 5)急救呼吸机主控器设定急停阈值;
- 6)气压传感器采集呼吸管路末端输出混合气体的气道压,将其与急停阈值比较。若超压,即触发紧急停止模式,控制涡轮风机停止工作,以防止呼吸管道内气道压异常上升,确保患者通气安全。整个控制流程如图2所示。

2 双环PID潮气量控制器设计

2.1 内环气压补偿型PID控制器设计

单环PID控制是一种反馈控制方案,其根据当前状态与目标状态之间的偏差,并据此计算控制量调整控制系统的输出,通过不断调整输出信号使系统的输出与期望值更接近^[17]。

为有效应对高海拔地区气压降低对通气系统的影响,

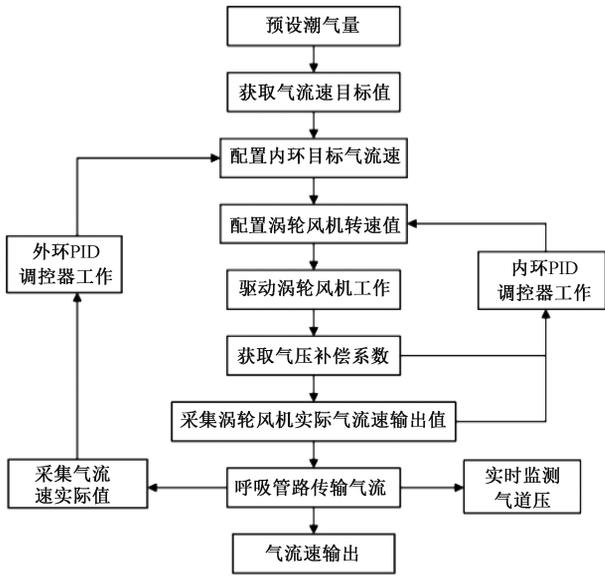


图 2 系统控制流程图

本研究在单环 PID 控制技术的基础上,引入气压补偿机制,提出了气压补偿型 PID 控制方案。根据理想气体定律可知,在气体的摩尔、气体常数和气体的绝对温度维持不变的情况下,气体压力与体积成反比,其规律如式(1)^[18]。

$$pV = nRT \quad (1)$$

式中: p 为气体气压值; V 为气体体积; n 为气体的摩尔; R 为气体常数; T 为气体的绝对温度。本研究以标准大气压值与实际大气压值的比值作为补偿系数修正 PID 控制算法中的实际值,以减小外界大气压变化对系统控制精度的影响。气压补偿型 PID 控制方案的控制规律如式(2)。

$$\begin{cases} u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t) dt + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \\ e(t) = r(t) - k(t) \times c(t) \\ k(t) = \frac{P_{(标准)}}{p(t)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 为控制器输出值; $r(t)$ 为设定值; $c(t)$ 为实际值; $e(t)$ 为实际值与设定值的偏差值; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数; $k(t)$ 为气压补偿系数; $p(t)$ 为实际大气压值; $P_{(标准)}$ 为标准大气压值(101.325 kPa)。

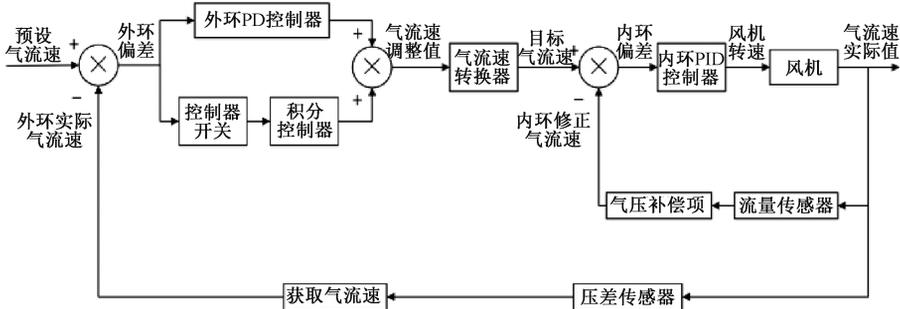


图 4 气压补偿项双环 PID 潮气量控制框图

2.2 双环 PID 潮气量控制器设计

针对单环 PID 控制系统在灵敏性低、抗干扰性差的问题,本研究提出了双环 PID 潮气量控制系统。该系统通过内外串级 PID 控制,实现对急救呼吸机气流速的精准控制,其中内环 PID 通过快速调整涡轮风机转速,将气流速迅速达到设定值;外环 PID 通过调整内环输出,将气流速稳定在设定值。

具体而言,内环 PID 以目标气流速为设定值,涡轮风机转速为输出值。通过实时采集流量传感器的气流速实际值,结合气压补偿项修正内环气流速,计算内环 PID 输入偏差,并调整涡轮风机转速,以快速实现目标值。气压补偿项通过标准大气压与大气压传感器采集值计算得出。整个内环 PID 的控制逻辑如图 3 所示。

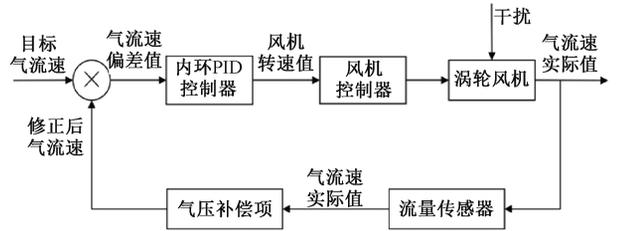


图 3 内环 PID 气流速控制框图

外环 PID 的设定值是急救呼吸机主控制器预设的气流速,以内环目标气流速调整值为控制值。通过压差传感器实时采集呼吸机输出的气流速值,计算外环 PID 的输入偏差,对内环目标值进行微调,以保持系统实际气流速值稳定在设定值。在双环 PID 潮气量控制系统中,因呼吸管路存在漏气和气阻,使涡轮风机输出气体的气流速度在传输过程中产生损失,因此采用双环 PID 控制以实现精确跟踪气流速度。同时在实际应用中由呼吸管路引起的气流速度损失远小于目标气流速度,因而传统 PID 控制中积分项的累积效应可能会引起系统超调。因此,采用积分分离式外环 PID 控制将积分控制项从整个 PID 控制器中分离,形成独立的积分控制器,并引入控制器开关器。由开关器通过判断外环偏差变化率是否超过设定阈值,实现系统根据实际需要自动决定是否使用积分控制,以有效地处理系统漂移和偏差问题,提高系统的稳定性和精度。整个双环 PID 潮气量控制逻辑如图 4 所示。

2.3 双环PID潮气量控制算法设计

为减轻急救呼吸机主控器的计算负担,借助增量式PID算法将连续系统转化为数字控制系统可处理的离散系统,以实现气压补偿型内环PID算法和积分分离式外环PID算法的设计。该方法通过增量计算将偏差增量和PID控制进行有效结合,获取当前时刻的控制增量,以减小计算的复杂度,从而降低主控器对数据存储和处理量的需求^[19]。通过将式(2)离散化可得气压补偿型内环PID算法计算式(3)。

$$\begin{cases} u_2(k) = u_2(k-1) + K_{p2} \times \Delta e_2(k) + K_{i2} \times \\ e_2(k) + K_{d2} \times (\Delta e_2(k) + \Delta e_2(k-1)) \\ e_2(k) = r_2(k) - k(k) \times c_2(k) \\ k(k) = \frac{P_{(\text{标准})}}{p(k)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为采样时刻; $\Delta u_2(k)$ 为控制增量; $\Delta e_2(k)$ 为偏差增量; $r_2(k)$ 为内环目标值; $c_2(k)$ 为流量传感器采集内环气流速度实际值; $u_2(k)$ 为内环控制输出值,即涡轮风机转速值; $e_2(k)$ 为内环气流速度偏差值; K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_{d2} 分别为内环比例、积分、微分系数; $k(k)$ 为气压补偿系数; $p(k)$ 为实际大气压值; $P_{(\text{标准})}$ 为标准大气压值。

为减小积分项对整个控制系统产生的负面影响,增强控制系统的可靠性和鲁棒性,外环采用积分分离式PID算法^[20]来实现外环PID控制设计,其表达式如式(4)。

$$\begin{cases} u_1(k) = u_1(k-1) + K_{p1} \times \Delta e_1(k) + \alpha \times K_{i1} \times \\ e_1(k) + K_{d1} \times (\Delta e_1(k) + \Delta e_1(k-1)) \\ e_1(k) = r_1(k) - c_1(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $r_1(k)$ 为外环目标值; $c_1(k)$ 为压差传感器采集外环气流速度实际值; $u_1(k)$ 为外环控制输出值; $e_1(k)$ 为外环气流速度偏差值; K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{d1} 分别为外环比例、积分、微分系数, α 为积分项的逻辑变量,即控制器开关,控制逻辑如式(5)。

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \left| \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \right| > \beta \\ 0, & \left| \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \right| \leq \beta \end{cases} \quad (5)$$

式中: β 为积分分离阈值; T_s 为采样时间。外环PID通过 $u_1(k)$ 调整内环目标值 $r_2(k)$,从而有效地控制内环PID,实现气流速度的精准控制,其表达式如式(6)。

$$\begin{cases} r_2(k) = u_1(k) + r_2(k-1) \\ r_2(0) = r_1(0) \\ u_1(0) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $r_2(k)$ 为内环目标值, $r_2(k-1)$ 为前一次内环目标值, $r_2(0)$ 为内环目标值初始值, $r_1(0)$ 为外环目标值,即系统设定值, $u_1(0)$ 为外环初始输出值。

3 实验结果与分析

3.1 实验设计

1) 快速性与稳定性测试实验设计

实验分别在海拔高度为5 m、大气压为101 kPa的地区和海拔高度为4 370 m、大气压为59 kPa的地区进行,选用双环PID潮气量控制系统作为实验组,并以单环PID气流速度控制系统作为对照组进行测试。实验选用40 L/min和60 L/min两个气流速度设定值进行测试,以验证双环PID潮气量控制系统在快速性和稳定性方面的优越性。实验平台为机械通气高海拔自适应闭环控制平台,其中压差传感器(采样率:100 Hz)为数据采集设备,并通过串口传输数据至上位机。

2) 准确性测试实验设计

实验在海拔高度为4 370 m、大气压为59 kPa的地区进行,选用机械通气高海拔自适应闭环控制平台作为实验组,并以国内厂家A和B呼吸机作为对照组进行测试。实验分别选用为10、40、60、70 L/min的气流速度设定值进行测试,以验证双环PID潮气量控制系统在精准性方面的提升。实验平台如图5所示,图中标注①为本文设计的机械通气高海拔自适应闭环控制平台;②为海拔仪,采用SUNROAD公司的海拔仪(海拔测试范围:-700~9 000 m,精度:1 m,气压范围:300~1 100 hPa,精度:0.1 hPa);③为流量分析仪,采用TSI公司的Certifier流量分析仪(气流速度范围:0~300 L/min,精度:2%)。



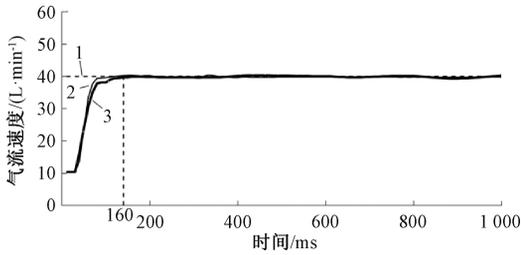
图5 实验测试平台实物图

3.2 结果分析

1) 快速性与稳定性测试实验结果与分析

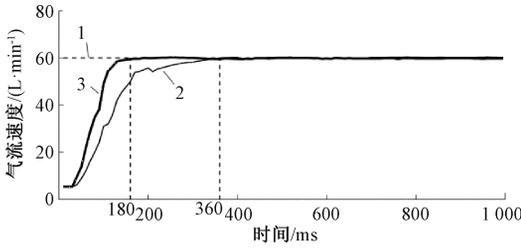
在海拔高度为5 m、大气压为101 kPa的地区和海拔高度为4 370 m、大气压为59 kPa的地区进行。通过压差传感器(采样率:100 Hz)测得气流速度分别设定为40 L/min和60 L/min时,各通气控制方案的控制效果曲线如图6、7、8和9所示,其中图6与7分别为低海拔环境下气流速度40 L/min和60 L/min的通气控制方案的控制效果曲线图,图8与9分别为高海拔环境下气流速度40 L/min和60 L/min的通气控制方案的控制效果曲线图。

在低海拔环境中,如图6所示,当设定气流速度为40 L/min时,双环PID潮气量控制系统与单环PID控制系统的上升时间相同,稳定时长均为160 ms,均无超调。如图7所示,当设定气流速度为60 L/min时,双环PID潮气量控制系统上升时间较快,无超调,稳定时长为180 ms。单环PID气



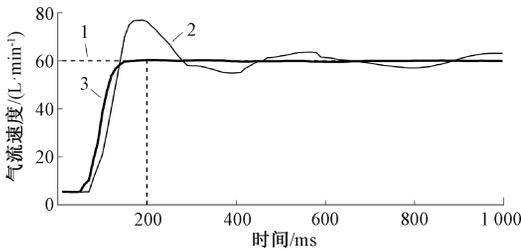
1-目标曲线;2-单环PID气流速控制曲线;
3-双环PID潮气量控制曲线

图 6 低海拔 40 L/min 气流速控制曲线图



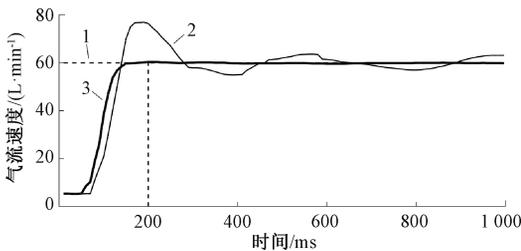
1-目标曲线;2-单环PID气流速控制曲线;
3-双环PID潮气量控制曲线

图 7 低海拔 60 L/min 气流速控制曲线图



1-目标曲线;2-单环PID气流速控制曲线;
3-双环PID潮气量控制曲线

图 8 高海拔 40 L/min 气流速控制曲线图



1-目标曲线;2-单环PID气流速控制曲线;
3-双环PID潮气量控制曲线

图 9 高海拔 60 L/min 气流速控制曲线图

流速控制系统无超调,稳定时长为 360 ms。结果表明,在低海拔环境中,当设定气流速相同时,双环PID潮气量控制系统稳定时长与单环PID气流速控制系统相近;当设定气流速增大时,单环PID气流速控制系统的稳定时间随设定气流速升高显著增加。

在高海拔环境中,如图 8 所示,当设定气流速为 40 L/min

时,双环PID潮气量控制系统无超调,稳定时长为 240 ms。单环PID气流速控制系统上升时间较快,出现超调现象,稳定时长为 800 ms。如图 9 所示,当设定气流速为 60 L/min 时,双环PID潮气量控制系统响应较快,无超调,稳定时长为 200 ms。单环PID气流速控制系统出现严重超调现象,稳定时长超过 1 000 ms。结果表明,在高海拔环境中,双环PID潮气量控制系统具有无超调量的优势,其稳定时间明显短于单环PID气流速控制系统,鲁棒性优于单环PID气流速控制系统;单环PID气流速控制系统在测试中受实验环境影响均出现了严重超调现象,鲁棒性较差,且随设定气流速升高,超调量与稳定时间显著增加。

分析表明,双环PID潮气量控制系统在控制中,气压补偿机制的引入,有效降低了大气压变化对系统的影响,增强了系统的鲁棒性;同时通过外环灵活地调整内环的设定值,更好地实现对气流速的精确跟踪,有效抑制系统的过冲和震荡,提高了控制系统的快速性与稳定性,实现了更为精确的控制。

2) 准确性测试实验结果与分析

实验在海拔高度为 4 370 m,大气压为 59 kPa 的地区进行。通过流量分析仪测得气流速值分别设定为 10、40、60、70 L/min 各呼吸机的气流速实际输出值和其性能指标稳态误差 (steady-state errors, Ess) 以及平均误差 (mean error, ME) 已列于表 1。

表 1 高海拔地区准确性实验结果

设备	设定值/ (L/min)	实际值/ (L/min)	稳态误差 Ess/%	均值误差 ME/%
国内厂家 A 呼吸机	10	8.486	15.14	16.51
	40	33.32	16.70	
	60	49.41	17.65	
	70	58.42	16.54	
国产厂家 B 呼吸机	10	10.87	8.70	8.94
	40	37.21	6.98	
	60	54.48	9.20	
本文的自适 应闭环调控 平台	70	62.38	10.89	3.19
	10	10.28	2.80	
	40	39.03	2.43	
	60	57.94	3.43	
	70	67.13	4.10	

如表 1 中数据所示,机械通气高海拔自适应闭环调控平台的 Ess 范围在 2.43%~4.1% 之间,ME 为 3.19%。国内厂家 A 呼吸机的 Ess 范围在 15.14%~17.65% 之间,ME 为 16.51%。国产厂家 B 呼吸机的 Ess 范围在 6.98%~10.89% 之间,ME 为 8.70%。相比之下,机械通气高海拔自适应闭环调控平台的 Ess 最大仅为 4.1%,这表明机械

通气高海拔自适应闭环调控平台能够满足急救呼吸机的设计要求,且该平台的ME为3.19%,远低于国内厂家A呼吸机与国内厂家B呼吸机设备。

上述实验结果表明,机械通气高海拔自适应闭环调控平台在高海拔地区的气流速通气控制准确性优于临床设备。双环PID潮气量控制系统显著提高了急救呼吸机在高海拔地区潮气量控制的准确性。

4 结 论

为提升急救呼吸机在高海拔地区的潮气量控制精度,本研究提出了气压补偿型PID控制风机转速和积分分离式PID控制流速的双环PID潮气量控制方案,设计了适用于高海拔地区的潮气量双环PID控制系统,搭建了机械通气高海拔自适应闭环控制平台。在海拔4370m、大气压59kPa的实验条件下,对系统的快速性、稳定性和准确性三方面进行测试实验。研究表明,双环PID系统在高海拔条件下具有较短的稳定时间和无超调的特点,相较于单环PID流速控制系统,其能够更快速地达到目标值,提高了系统的鲁棒性。此外,在准确性测试方面,双环PID系统在高海拔地区表现出更低的稳态误差和均值误差,相较于国内厂家的呼吸机,具有更准确的潮气量控制能力。

综上所述,本研究的双环PID潮气量控制系统在高海拔地区展现出显著的优越性。成功降低了气压变化对急救呼吸机性能的不利影响,显著提升了系统在不同气压环境下的适应性。在高海拔低气压条件下,系统能够可靠、准确地为患者提供有效的通气支持,同时为高海拔和类似特殊环境下的通气控制研究提供了重要的参考依据。

参考文献

- [1] LENTZ S, ROGINSKI M A, MONTRIEF T, et al. Initial emergency department mechanical ventilation strategies for COVID-19 hypoxemic respiratory failure and ARDS[J]. *The American Journal of Emergency Medicine*, 2020, 38(10): 2194-2202.
- [2] KING W P, AMOS J, AZER M, et al. Emergency ventilator for COVID-19 [J]. *PLoS One*, 2020, 15(12): e0244963.
- [3] KOOMEN E, NIJMAN J, NIEUWENSTEIN B, et al. Tidal volume in pediatric ventilation; Do you get what you see[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2021, 11(1): 98.
- [4] SERPA N A, DELIBERATO R O, JOHNSON A E W, et al. Mechanical power of ventilation is associated with mortality in critically ill patients: An analysis of patients in two observational cohorts [J]. *Intensive Care Medicine*, 2018, 44: 1914-1922.
- [5] KOOPMAN A A, DE JAGER P, BLOKPOEL R G T, et al. Ventilator-induced lung injury in children: A reality[J]. *Annals of Translational Medicine*, 2019,

7(19).

- [6] ZHAO Z, SANG L, LI Y, et al. Identification of lung overdistension caused by tidal volume and positive end-expiratory pressure increases based on electrical impedance tomography [J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2021, 126(5): e167-e170.
- [7] PÉREZ B S, GÓMEZ A D, CÓRDOVA M, et al. Performance of the masi peruvian ventilator at high altitude [C]. 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society(EMBC), IEEE, 2021: 5031-5034.
- [8] LIE S A, LOY S T, LEE C C, et al. Performance of the oxylog[®] 1000 portable ventilator in a hyperbaric environment [J]. *Diving and Hyperbaric Medicine*, 2018, 48(2): 102.
- [9] 丁伟冬.急救转运呼吸机的研究进展[J]. *生物医学工程进展*, 2023, 44(1): 89-95.
- [10] ACHARYA D, DAS D K. Design of a fuzzy-based proportional integral derivative controller with optimal membership function scaling for respiratory ventilation system[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, DOI:10.1016/j.bspc.2022.103928.
- [11] MEHEDI I M, SHAH H S M, AL-SAGGAF U M, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control of a pressure-controlled artificial ventilator[J]. *J Healthc Eng*, DOI:10.1155/2021/1926711.
- [12] 王宏民,陈毅,陈军伟,等.基于模糊-PID算法护理呼吸机压力控制的设计与实现[J]. *工程与试验*, 2021, 61(4): 68-72.
- [13] 刘景康,龙飞,赵坤,等.基于模糊PID的呼吸机流量控制系统的设计与实现[J]. *电子设计工程*, 2019, 27(2): 94-99.
- [14] 齐亚洲.基于双重控制的无创呼吸机的研制[D]. 济南:山东大学,2021.
- [15] 张森.基于分数阶PID控制器的家用无创呼吸机的研制[D]. 济南:山东大学,2019.
- [16] 于瑶,王辉.基于PID控制的积分改进算法在呼吸机中的应用[J]. *工业控制计算机*, 2013, 26(1): 1-3.
- [17] 徐托,瞿少成,王安,等.基于模糊PID的室内空气质量管理测控系统[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(7): 62-67.
- [18] 靳一超,程迪,吴坤,等.可压缩管流中真实气体效应的理论分析与数值模拟[J]. *推进技术*, 2022, 43(7): 276-285.
- [19] 余梦龙,张进朝,文豪,等.改进 PSO-BPNN 供水泵站变频恒压 PID 控制[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(17): 64-70.
- [20] 熊中刚,刘忠,霍佳波,等.基于积分分离式PID控制算法的机械自动控制系统设计[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2020, 33(1): 138-143.

作者简介

王慧泉,教授,博士,主要研究方向为生物医学信号处理。
E-mail: huiquan85@126.com

邢海英(通信作者),教授,博士,主要研究方向为光电材料与器件。

E-mail: hyxingmail@126.com