

# 一种供氧面罩防窒息活门测试系统的设计研究

顾 昭, 于立华, 温冬青, 薛利豪, 施维茹, 王桂友

(空军军医大学 空军特色医学中心, 北京 100142)

**摘要:** 针对供氧面罩防窒息活门性能检测, 及其对人体呼吸模式影响的研究需求, 研制了多参数采集、分析及统计于一体的供氧面罩防窒息活门测试系统; 该系统基于 CompactDAQ 平台, 以面罩压、通气流量信号采集为基础, 采用 LabVIEW 软件开发, 可对开启压力、吸气阻力、通气流量峰值、潮气量、呼吸频率等参数进行分析统计; 通过实验验证, 该系统具备了对防窒息活门主要性能检测, 及人体呼吸参数分析统计的能力; 该系统便于携带, 扩展性强, 人机界面友好, 运行可靠, 较好地满足了防窒息活门检测、研究的需求, 同时该系统的设计方法为供氧面罩其他性能参数的检测提供了一种思路。

**关键词:** 供氧面罩; 防窒息活门; 面罩压; LabVIEW

## Design of an Anti-suffocation Valve on Mask Testing System

Gu Zhao, Yu Lihua, Wen Dongqing, Xue Lihao, Shi Weiru, Wang Guiyou

(Air Force Characteristic Medical Center, Air Force Military Medical University, Beijing 100142, China)

**Abstract:** According to the requirement of the performance test of the anti-suffocation valve on mask and the research of its effect on the breathing mode of human body, a multi parameter collection, analysis and statistics integrated test system was developed. The system is based on CompactDAQ platform, collecting of mask pressure and ventilation flow signals, and developed by LabVIEW software. The parameters such as opening pressure, suction resistance, ventilation flow peak value, tidal volume and respiratory frequency can be analyzed and counted. According to the experiment, the system has the ability to test the main performance of the anti-suffocation valve and analyze the respiratory parameters of human body. The system is portable, extensible, friendly human-machine interface and reliable operation possessed. It can meet the needs of test and research of anti-suffocation valve. At the same time, the design method of the system provides a way for the test of other performance parameters on oxygen mask.

**Keywords:** mask; anti-suffocation valve; mask pressure; LabVIEW

## 0 引言

航空供氧面罩是飞行员的主要个体防护装具之一, 是供氧防护人机界面的关键交接点, 在实际飞行中使用频率最高, 其性能对飞行员供氧及救生具有极重要的影响<sup>[1]</sup>。弹射跳伞已经拯救上万名飞行员的生命, 但弹射伤的发生率仍高达 50%~90%, 据报道两名参加夜间训练飞行员弹射离机后都出现意识丧失, 坠海后自行清醒, 并吞服大量海水<sup>[2]</sup>。飞行员弹射离机后出现昏迷或上肢受伤等情况, 当伞氧耗尽后无法自行取下面罩时, 会导致飞行员窒息或溺水死亡<sup>[3]</sup>。供氧面罩增加防窒息活门, 在应急情况它可给飞行员供给周围环境中的空气, 防止其窒息或溺水。美国海军在面罩上都备有防窒息活门, 当吸气阻力增加到一定阈值 (2 kPa) 时, 防窒息活门便开启<sup>[4]</sup>。LSS (Life Support System) 是波音公司为第四代战斗机 F-22 研制的生保系统, 具有全面的综合防护能力, 并且较好地兼顾了飞行员的视野、舒适性、活动性等, 其供氧面罩也采用了防窒息/溺亡活门结构<sup>[4]</sup>。开展防窒息活门相关研究, 是提高飞行员供氧安全必不可少的步

骤。供氧面罩防窒息活门测试系统是研究防窒息活门特性及对人体影响不可缺少的手段。

## 1 系统结构及原理

### 1.1 系统结构

参考外军同类防窒息活门主要技术参数, 防窒息活门测试装置应当可完成面罩压、通气流量及开启压力的测量。防窒息活门通常安装于供氧面罩壳体下端, 属于在特定压力下开启的吸气活门, 为保证正常供氧不受干扰, 其吸气阻力相对较高。过高的吸气阻力增加会引起代偿性呼吸频率和幅度的增加, 导致飞行员出现过度换气, 过度换气达到一定程度时, 机体出现呼吸性酸中毒<sup>[5]</sup>。为研究防窒息活门对人体呼吸模式影响, 防窒息活门测试装置还应可完成吸气阻力、通气流量、通气流量峰值、潮气量、呼吸频率等的分析统计。臧斌等人研制的 KYCC-2007 低压舱氧气装备供氧参数测试系统, 可完成面罩压及呼吸流量的测量<sup>[6]</sup>。但无法完成防窒息活门开启压力等主要指标检测, 同时其采用 PLC 可编程控制器开发, 体积大, 不便于在海上等外场环境应用。针对以上不足, 文中防窒息活门参数测试系统采用 CompactDAQ 平台, 采用 LabVIEW 软件开发了对面罩压、通气流量及开启压力等的测试系统, 以满足防窒息活门特殊测量使用需求。

在实验中为防止面罩腔意外进水导致志愿者溺水, 系统应配置应急阀门等执行机构。其在面罩压超过特定值后

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-06-17。

**作者简介:** 顾 昭 (1979-), 男, 青海大通人, 大学本科, 工程师, 主要从事航空供氧防护装备方向的研究。

**通讯作者:** 王桂友 (1982-), 男, 河北秦皇岛人, 硕士, 工程师, 主要从事航空供氧防护技术方向的研究。

开启, 为志愿者提供额外的供气通道。

## 1.2 测量原理

面罩压、通气流量等可通过直接测量获得, 但呼吸气阻力测量较为复杂。表达外加吸气阻力大小比较规范的方法是: 用维持空气单位时间流率的压力值来表示阻力值的大小, 例如记作  $\text{cmH}_2\text{O} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{S}^{[7]}$ 。马瑞山等人报道呼吸阻力感觉与面罩压波动密切相关<sup>[8]</sup>。即评价防窒息活门对人体呼吸的影响时, 吸气阻力可通过测量面罩压替代。通气流量峰值、通气量及潮气量可使用通气流量信号分析统计获得; 吸气相面罩压峰值、呼吸频率通过面罩压呼吸波动分析统计获得; 额外呼吸功通过面罩压及通气流量计算获得。

## 1.3 主要设计指标

各参数测量、统计范围及精度如下:

1) 面罩压 ( $P$ ,  $\text{mmH}_2\text{O}$ ): 测量范围  $-10 \sim 1$  kPa, 测量精度  $0.5\%$ FS, 介质空气;

2) 流量 ( $L$ ,  $\text{L}/\text{min}$ ): 测量范围  $0 \sim 150$   $\text{L}/\text{min}$ , 测量精度  $1\%$ FS, 介质空气;

3) 流量峰值 ( $V_{\text{Imax}}$ ,  $\text{L}/\text{min}$ ): 每吸气相流量的极值, 通过截取每吸气相流量信号, 并求得极值, 统计范围  $0 \sim 150$   $\text{L}/\text{min}$ ;

4) 潮气量 ( $V_{\text{T1}}$ ,  $\text{L}$ ): 每次呼吸吸入的气量, 通过截取吸气相流量信号, 并对其积分, 求得吸气相潮气量, 统计范围  $0 \sim 10$   $\text{L}$ ;

5) 呼吸频率 ( $f$ ,  $\text{次}/\text{min}$ ): 每分钟呼吸次数, 通过分析面罩压呼吸波动获得, 动统计范围  $0 \sim 60$   $\text{次}/\text{min}$ ;

6) 通气量 ( $MV$ ,  $\text{L}/\text{min}$ ): 每分钟呼吸吸入气量, 通过  $1$   $\text{min}$  内的流量积分值获得, 统计范围  $0 \sim 100$   $\text{L}/\text{min}$ ;

7) 吸气相面罩压峰值 ( $P_{\text{Imax}}$ ,  $\text{mmH}_2\text{O}$ ): 每吸气相面罩压的极值, 通过截取每吸气相面罩压信号, 并求得极值, 统计范围  $0 \sim 150$   $\text{L}/\text{min}$ ;

8) 额外呼吸功 ( $\text{cmH}_2\text{O} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{S}$ ), 附加阻力带来的呼吸功, 统计范围  $0 \sim 150$   $\text{cmH}_2\text{O} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{S}$ , 在额外呼吸功的计算中:

$$W = F \times L$$

$$F = P \times S$$

$$W = P \times S \times L = P \times V = P \times \int Q \times dt$$

其中:  $W$  为额外呼吸功;  $F$  为附加阻力;  $L$  为距离;  $P$  为面罩压 (口腔压, 面罩阻力);  $S$  为面积;  $V$  为体积;  $Q$  为流量。

即可用压力与瞬时流量对时间的积分求得额外呼吸功;

9) 开启压力 ( $P_{\text{or}}$ ,  $\text{mmH}_2\text{O}$ ): 当通过防窒息活门气体流量达到规定值时, 当前面罩压, 即为开启压力统计范围  $0 \sim -300$   $\text{mmH}_2\text{O}$ 。

## 2 测试系统硬件设计

为完成以上测量需求, 系统主要由压力、流量变送器、数据采集卡、无线信号传输模块、上位计算机组成。

根据系统的技术和功能要求, 为降低干扰, 面罩压测

量采用了电流型压力变送器, 输出电流  $4 \sim 20$   $\text{mA}$ 。

因系统流量检测条件类似呼吸机, 流量传感器的选择依据以下原则:

- 1) 对流过传感器的空气应有灵敏和快速的反应;
- 2) 为测量开启压力, 在小流量下有较高的准确性;
- 3) 为测量通气量, 同时具有在大流量下良好的重复性<sup>[9]</sup>。

系统选用了 Siargo Ltd 的 FS105CL 系列质量流量传感器。其具有灵敏度高使动流量极小、量程比大、零点稳定度高、响应快等优点, 且设计使用环境为医疗设备兼容环境。

信号采集本系统采用了基于 NI CompactDAQ 的 8 槽以太网机箱。CompactDAQ 机箱专为小型便携式传感器测量系统而设计, 可满足恶劣环境下的高速采集需求, 并可灵活地与 CompactDAQ I/O 模块配置使用, 快速建立数据采集系统。系统配置 NI-9263 8 通道电流采样模块采集压力传感器电流信号, 配置 NI-9215 4 通道电压同步采样模块采集 FS105CL 系列质量流量传感器电压信号及系统移动电源电压; 配置 NI-9203 4 通道模拟信号输出模块, 控制两路应急阀门, 在面罩压超标时迅速打开, 防止溺水, 如图 1 所示。本系统机箱采用通过无线模块建立 802.11 无线网络, 连接到上位机, 实现了低成本的无线监测。

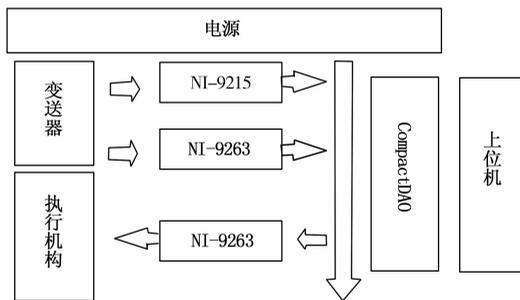


图 1 硬件总体结构

## 3 测试系统软件设计

测试系统的开发设计在 LabVIEW2010 平台下进行。包含 DAQ 采集, 并使用选项卡控件区分零位设置、开启压力测量、检测数据、历史数据回顾及统计几个功能。根据使用需求, 软件总体流程如图 2 所示。首先系统进行自检, 确认硬件配置正确, 并开启系统电源监控。对部分信号进行调零设置, 并根据任务需要选择测试项目, 配置测试参数。开始测量任务后, 可实时显示各路信号, 进行呼吸频率、通气量、面罩压峰值、开启压力等的在线分析。

### 3.1 DAQ 采集、输出

DAQ 采集输出模块完成了主要信号的转换, 由 NI-9215、NI-9263 完成 AD 转换, NI-9203 完成 DA 转换。软件采用 NI 提供的 DAQ 软件包驱动模块来实现。通过 Express 任务完成所需输入输出通道设置, 包括采集模式、待读取采样、采样频率及换算等。之后对输出信号进行拆分, 针对流量信号及压力信号不同干扰特征分别进行数字滤波。数字滤波指输入、输出均为数字信号, 通过运算改变输入信号所含频率成分, 或滤除某些频率成分, 与模拟

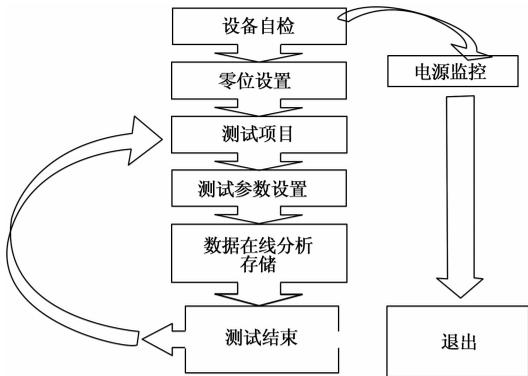


图 2 软件总体流程

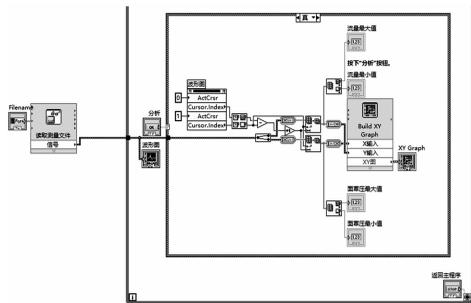


图 3 历史数据回顾

滤波器相比数字滤波器具有准确、稳定、易改变等优点<sup>[10]</sup>。LabVIEW 数字滤波器可完成低通、高通、带通、带阻和平滑等模式的滤波，比传统方式节省大量的开发时间，并可将其作为子程序在不同程序中调用，具有很强的通用性<sup>[11]</sup>。系统通过过滤 Express VI 进行了数字滤波的配置，针对工频干扰等采用低通无限长冲激响应 (IIR) 滤波器，Butterworth 拓扑结构，3 阶设置，完成信号滤波。

在对比了 SQL Sever 与 LabVIEW 自带的二进制测量文件 tdm 或者 tdms 格式后，系统的数据存储选择了后者。SQL Sever 是微软公司开发的数据库管理系统，适合大数据处理及分析。在两种存储方式的对比实验中，使用 OLE DB 建立 SQL Sever 数据库连接，系统采样率在 1 K 时，直接存储数据出现不定时的数据丢失现象，在将每 100 组数据打包再进行存储时，解决了数据丢失现象。读取数据时因 SQL Sever 读取速度问题，10 min 数据约 60 万条需花费超过 130 s，不能满足实际使用需求。Tdms 文件内部核心是 segment，当程序只读取其中一个数据段时可直接获得而无需关心其他数据段的信息，其实际存储速度可达 372 MB/s<sup>[11]</sup>，远高于 SQL Sever 系统存储速度。本系统数据结构较为简单，对存储速度要求较高，采用了 Tdms 文件模式进行数据存储。测量数据按需求写入测量文件，为便于存储及后期数据处理，测量文件每分钟重命名一次，即每分钟的数据存为一个数据文件。

### 3.2 历史数据回顾及统计

历史数据回顾模块主要用于历史数据的回看及简单处理。打开所需数据后，可通过游标选择所需数据段，进行简单的查询及分析处理，如图 3 所示。

统计模块完成历史数据的统计，包括每呼吸波面罩压峰值、频率，通气量峰值、通气量均值、频率等呼吸参数。以及某段时间内的面罩压、通气量峰值的分布情况，包括最大值、众数、中值、均值标准差等。

## 4 实验结果与分析

根据上述硬、软件设计方法，建立了基于 Compact-DAQ 平台的测试系统。经计量检测，系统气体压力测量精度可达到 0.5%FS；流量标定采用 3 L 定量桶在低速、快速

推杆情况求累积流量定标，精度可达 1%FS，系统设计满足测试需求。实验对系统关键指标进行了验证，结果表明该系统运行可靠，各项指标满足设计要求。

### 4.1 防室息活门测量验证

志愿者佩戴飞行头盔、安装防室息活门的供氧面罩，无负荷，通过防室息活门呼吸。防室息活门入口端接系统流量传感器，面罩腔接面罩压力传感器，实验时长 2 h。

实验对测试系统流量、面罩压力等关键技术指标进行了验证，由图 4 可见，系统完整地记录了人体平静呼吸时的防室息活门流量、面罩压力曲线，并实时统计了通气流量峰值、潮气量、通气量及面罩压峰值等数据。

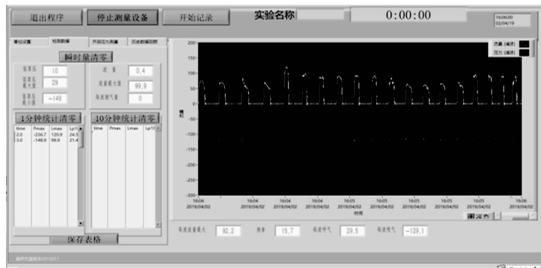


图 4 测量验证实

### 4.2 数据存储及统计验证

测量数据实时以 Tdms 形式记录，以当前日期及实验名称命名保存。系统采样率设置 1 K，两通道，每分钟数据量 1 800 KB，存储速度为 0.029 MB/s，在系统承受范围内。如图 5 所示，通过对实验数据进行读取，实验数据保存完整，流量、面罩压力曲线完整；通气流量峰值、面罩压峰值等分布，及最大值、众数、中值、均值标准差等统计完整。

## 5 结束语

该系统携带方便、界面友好、便于使用，在防室息活门测量的基础上还可以满足其他型号供氧面罩、供氧供气系统的参数测量，获得了国家发明专利。同时系统可扩展性强，适当添置 C 模块、传感器及执行机构可完成更多的工作。

系统在实际使用中暴露了不足之处，野外环境使用中存在体积、重量偏大，漂浮性能差及携行过程系统锂电池无法通过机场安检等。下步工作将针对以上问题，简化功