

文章编号: 2095-2163(2024)02-0090-07

中图分类号: TP391

文献标志码: A

面向气腹系统的气源管道恒压算法

李玮嘉¹, 陈庆奎¹, 黄 陈²

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程, 上海 200093; 2 上海市第一人民医院, 上海 201620)

摘要: 腹腔镜手术过程中, 恒压手术单元需要经常调节腹压, 而多台手术同时进行腹压调节时, 可能造成腹腔恒压系统供压不足, 降低腹腔恒压系统工作的稳定性。为解决该问题, 本文分析了腹腔恒压系统的充气、放气模型, 以及多手术单元情况下的调节过程, 提出了一种气源管道内的恒压算法, 从而提高腹腔恒压系统的稳定性。实验结果表明, 本算法在多台手术单元工作时, 相比于比例微分积分控制(PID)算法可以更好地维持气源管道内压强的恒定。

关键词: 腹腔镜手术; 恒压算法; PID; 充气模型; 树莓派

A constant pressure algorithm of air source pipeline for pneumoperitoneum system

LI Weijia¹, CHEN Qingkui¹, HUANG Chen²

(1 School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Shanghai General Hospital, Shanghai 201620, China)

Abstract: In the process of abdominal surgery, the constant pressure operating unit needs to adjust abdominal pressure frequently. When multiple operations are performed at the same time, the pressure supply of the abdominal constant pressure system may be insufficient, reducing the stability of the abdominal constant pressure system. In order to solve this problem, this paper analyzes the inflation and deflation models of the constant pressure system of the abdominal cavity and the adjustment process in the case of multiple operating units, and proposes a constant pressure algorithm for air source pipeline to improve the stability of the constant pressure system of the abdominal cavity. Experiments show that this algorithm can better maintain the constant pressure in the air supply pipeline than Proportional differential integral control(PID) algorithm when working in multiple surgical units.

Key words: laparoscopic surgery; constant pressure algorithm; PID; inflation model; Raspberry Pi

0 引言

1981年, 法国医生 Mouret P. 完成了世界上第一例腹腔镜手术, 而中国在1991年完成了国内第一例腹腔镜胆囊切除手术^[1]。腹腔镜手术相比于开腹手术的创伤面积更小, 因此在治疗中是首选。二氧化碳(CO₂)是腹腔镜手术时常用的气体, 用于在病人腹腔内形成更加开阔的视野。手术过程中通常使用气腹机将加压的CO₂通过管道送入病人腹腔中^[2], 这个过程称为建立气腹。然而传统的电子式气腹机的使用存在一些弊端, 如: 不能精确控制腹腔压力, 且非常依赖医生的经验, 经常需要医生手动调控。因此, 黄陈等^[3-4]自主研究了一种腹腔恒压系

统, 能够针对不同病人状态建立手术腹压模型, 根据手术情况动态调节病人腹压。然而在多台手术同时进行, 仍存在一些问题。

腹腔恒压系统主要分为恒压手术云和恒压手术单元两部分。在恒压手术云上, 通常连接有多个手术室的恒压手术单元设备, 当需要调节腹腔气压时, 恒压手术单元设备会向恒压手术云获取预测压强值, 之后通过改变阀门开度来控制CO₂充入速率。然而, 由于腹腔恒压系统的气源往往是恒定供压, 当多个设备同时调节腹腔气压时, 会造成腹腔恒压系统压力不足, 进而造成所有设备的充气效率低下。因此, 需要研究一种恒压算法, 稳定气源管道内的压力。

基金项目: 国家自然科学基金(61572325); 上海重点科技攻关项目(19DZ1208903); 上海交通大学医学院医工交叉项目。

作者简介: 李玮嘉(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 物联网、医工交叉; 黄 陈(1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 普通外科基础与临床研究。

通讯作者: 陈庆奎(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF会员, 主要研究方向: 计算机集群、并行数据库、并行理论等。Email: chenqingkui@usst.edu.cn

收稿日期: 2023-03-28

目前,恒压控制算法更多地采用比例微积分控制(PID)^[5-7],该算法是一种自适应的反馈调节,PID 算法^[8]通过计算积分(I)、比例(P)和微分(D)的误差,来反映过去、现在和未来的误差。因此,仅仅通过一个简单的策略就可以实现非常好的调节效果。PID 控制已广泛应用于各个领域。段铁群等^[9]在恒压供气系统中使用模糊 PID 算法进行控制,达到了较好的控制水平;姜兴忠等^[10]讲解了 PID 算法在调节恒压供水系统中的应用,分析了其控制机理;Zheng J M^[11]使用 PID 模糊控制直流驱动的伺服液压机,通过模糊自整定 PID 方法抑制外部干扰,有效地提高了伺服系统的位置跟踪能力。牛丹等^[12]在碳化硅微粉恒压供水系统中,使用 PLC 控制器实现模糊 PID 算法完成恒压控制。

除了 PID 控制方法,数学建模也是一种解决方法。路波等^[13]设计了一种恒定气压控制系统,用于解决模拟零重力环境时的气动悬挂装置的控制。其采用了数学建模思想,通过分析无摩擦气缸泄漏的流量模型,来实现高精度的恒压控制。毛君等^[14]对直动式溢流阀、蓄能器以及伺服阀进行建模,通过建立的传递函数与 PID 控制相结合,对喷嘴入口压力进行了有效的恒压调节。

在腹腔恒压系统中,腹压调节造成气源管道压强下降发生的次数与时间无法确定,属于非强线性系统,而传统的线性 PID 控制方法不适用于非强线性系统,需要使用非线性控制 PID 算法校正参数,

如 Tang K S^[15]、Zhang Y^[16]、Liu H^[17]等研究人员使用模糊控制、神经网络、支持向量机进行校正 PID 算法参数。由于非线性控制参数调节需要大量的经验且情况较为复杂,易受多因素影响,在多手术云的情况下,无法满足医院的手术环境。

1 腹腔镜手术辅助系统

1.1 腹腔镜手术辅助系统工作原理

腹腔恒压系统整体结构如图 1 所示。CO₂气源内部含有压力高达100 MPa的 CO₂气体,由于高压气体难以直接调节,且发生意外时容易造成严重的安全事故,因此一般放置于医院室外,CO₂气体经过过滤器过滤、加热装置后进入减压阀,将压强降到 0.2 MPa,同时减压阀上配有压力传感器接入手术云中。气体通过减压阀,流经安全阀后进入医院室内,安全阀可以将超过预定压力的气体释放,从而避免减压阀故障造成高压的气体流入室内。

室内存在多个手术室,每个手术室都存在一个分支管道,分支管道接在 CO₂主管道上并装有可以调节的电动阀门。恒压手术云具有预测功能,可以根据病人所划分的类别预测病人在手术过程中所需要的压强^[4],在手术过程中,恒压手术单元会与恒压手术云进行通信,获取预测的气压值,根据算法控制阀门开度大小,调节 CO₂气体流量达到调节腹腔压强的目的。

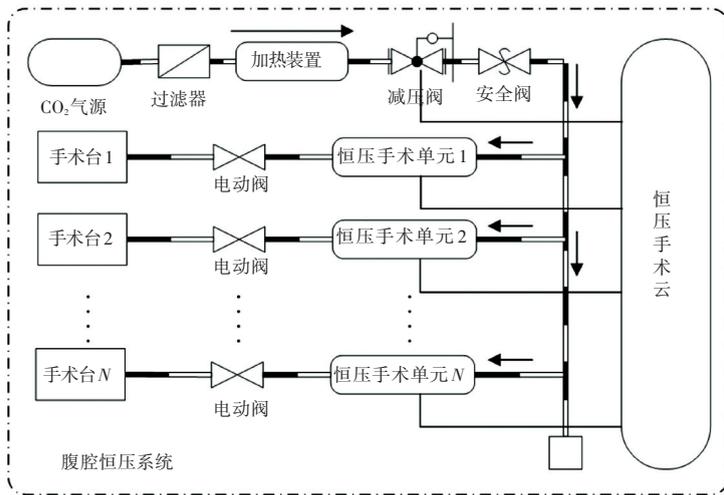


图 1 腹腔恒压系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of abdominal constant pressure system

1.1.1 恒压手术云

恒压手术云是各个手术单元的核心控制器,主

要负责存储病人信息,预测手术过程中需要的腹压,并且处理手术单元的请求,其流程如图 2 所示。手

术开始时,恒压手术单元会与云进行通信,发送病人的基础信息,手术云根据手术过程使用模型计算出需要的腹压值,手术单元收到后进行调节腹压;手术

结束后,手术单元将所有的过程数据发送给手术云,手术云收到过程数据后进行数据集更新,优化模型。

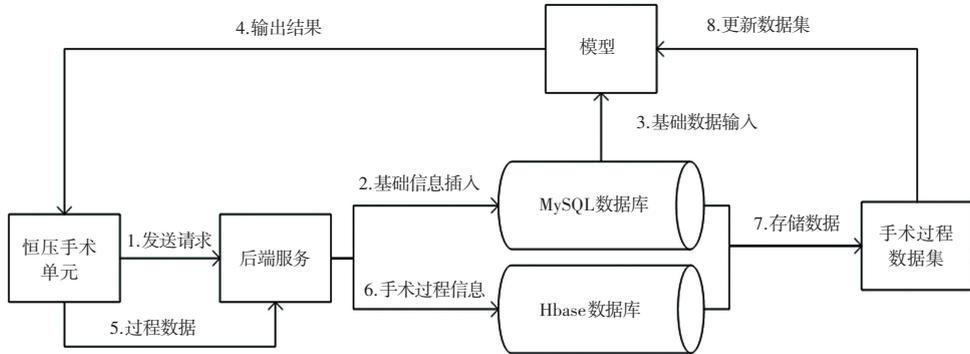


图2 恒压手术云流程图

Fig. 2 Flow chart of constant pressure operation cloud

1.1.2 恒压手术单元

医院中包含有多个手术室,每个手术室中都存在恒压手术单元,所有的恒压手术单元组成了恒压手术单元集群。每个恒压手术单元主要包含 Linux 计算机 (Raspberry Pi)、穿刺刀以及电动阀门。Raspberry Pi 为基于 ARM 架构的 Linux 单板计算机,是恒压手术单元的核心运算单元。穿刺刀上含

有气压传感器和接入 CO₂ 气源的橡胶管,以及吸引废气与废液的橡胶管。穿刺刀在手术进行中需要穿刺进入病人腹腔中,另一端接在电动阀门上。Raspberry Pi 每隔一段时间与恒压手术云通信,发送病人当前腹腔的压强并获取预测压强,通过阀门控制算法调节电动阀门的开度,使腹腔内压强达到预测压强,其基本原理如图3所示。

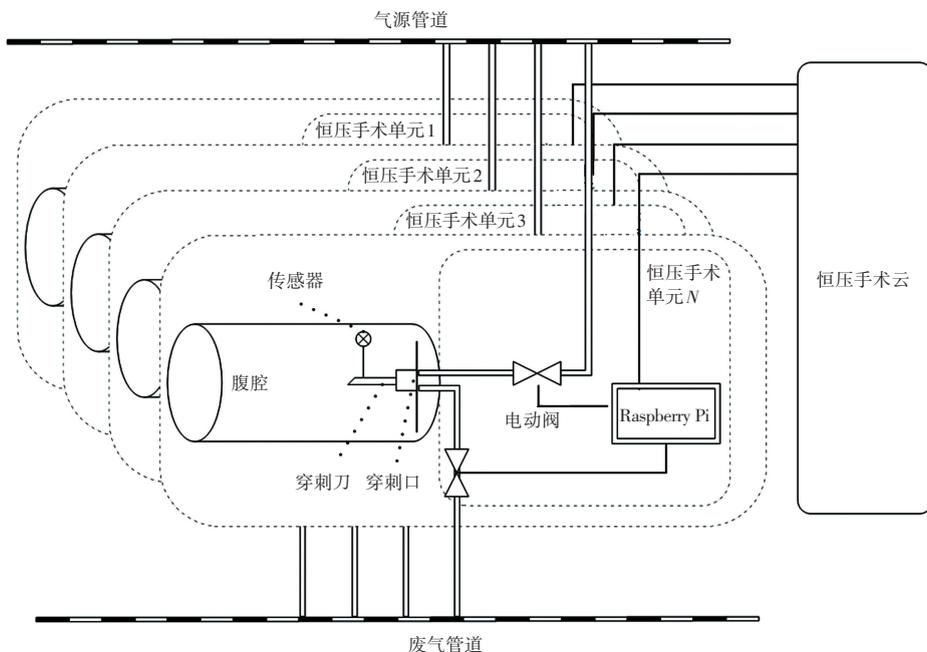


图3 恒压手术单元原理图

Fig. 3 Schematic diagram of constant pressure operation unit

1.2 研究内容

当多台手术单元同时进行增压操作时,会导致主管道内压强下降过快,因此维持管道内压强恒定尤为重要。主管道上减压阀预设值可由手术云调

节,然而所需量却难以确定,本文主要研究手术单元调节腹压时,在保证管道内压强恒定的情况下减压阀的预设值,进而保证手术顺利进行。目标公式如式(1)所示:

$$\sum_{i=0}^n p_i + p_{\text{add}} = p_{\text{target}} \quad (1)$$

其中, p_{target} 表示管道内压强恒定值, 一般为 0.2 MPa; p_i 表示第 i 个手术单元调节导致管道内的压强下降值; p_{add} 表示维持管道内压强恒定所需的增加值。

2 调节过程研究与分析

由公式(1)可以看出, p_{target} 为恒定值, 故 p_{add} 值仅与 p_i 有关, 因此需要对调节过程进行分析。在手术过程中, 可以将模型抽象为从减压阀向主管道的充气过程, 以及主管道向腹腔增压放气两个过程。

2.1 充气过程分析

容器充气过程是指, 在容器内气体体积保持不变的情况下, 使用恒定的气源向容器内注入气体。该过程会导致容器内压强的增加, 并在很多领域中存在应用。在航空领域中, 随着飞机高度的升高, 大气压会逐渐减小, 如果没有进行气压管理, 那么乘客会在高空中感到不适。因此, 一般飞机在起飞的过程中需要进行增压, 增压的过程通常是由飞机的加压时间进行计算与仿真^[18]进行验证的, 可以抽象为定容容器的充气过程^[19]。

室内主管道内压力一般恒定为 0.2 MPa, 手术单元的增压操作会使得管道内压力下降, 气体便会从减压阀向主管道充气, 使得管道内压强重新达到 0.2 MPa。然而, 充气过程需要一定的时间, 当手术单元数量较多时, 充气时间可能比增压时间更长, 导致管道压力不足, 因此应将减压阀的阈值调节到更高数值, 使得充气时间与腹腔增压时间相等。

向管道内充气的过程可以看作是向定容容器充气模型^[20], 充气时间为:

$$t = \begin{cases} \frac{p - p_1}{p_s} \cdot \tau, & p \leq 0.528 p_s \\ \left[\left(0.528 - \frac{p_1}{p_s} \right) + (1 - 0.528) \left(\sin^{-1} \frac{p/p_s - 0.528}{1 - 0.528} \right) \right] \cdot \tau, & p > 0.528 p_s \end{cases} \quad (2)$$

其中, p 为减压阀设置的目标压强 (MPa), p_s 为气源压强 (MPa)。

为简化模型计算, 假设气源恒定, 即 $p_s = 100$ MPa, p_1 为管道内初始压强 (MPa), 一般恒定为 0.2 MPa, 由于手术过程中会发生波动, 因此该值应由压力传感器测得, τ 为充气时间常数 (s), 其表达式为

$$\tau = 5.217 \times 10^{-3} \times \frac{v}{k \cdot S \sqrt{\frac{273.16}{T_s}}} \quad (3)$$

其中, v 为管道的体积 (m^3); S 为充气有效截面积 (mm^2); T_s 为气源温度 (K), 这里假设温度恒定在 25 摄氏度下, 即 $T_s = 298.15$ K; k 为等熵指数, 其值为 1.4。

联立式(2)、式(3)可得目标压强 p , 管道内充气所需的时间为

$$t_{\text{add}} = 3.567 \times 10^{-6} \times \frac{(p - p_1) v}{S} \quad (4)$$

2.2 放气过程分析

手术过程中, 恒压手术单元的增压操作会调节电动阀门, 为病人腹腔充气, 该过程将导致主管道压强下降。对于主管道而言, 这一过程可以抽象为定容容器的放气过程。

由理想气体状态方程^[15]可以求得主管道压降为

$$\Delta p = \frac{\Delta p_1 v_1}{v} \quad (5)$$

其中, Δp_1 为腹腔增加压强 (MPa), 由恒压手术云给出; v_1 为病人腹腔容积 (m^3), 由预测算法分类得出; v 为管道的体积 (m^3)。

定容容器的放气时间^[15]为

$$t_1 = \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_1}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - 1 \right] + 0.945 \left(\frac{p_1}{0.1013} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right\} \tau \quad (6)$$

其中, p_1 为主管道内初始压强 (MPa); p^* 为放气临界压强 (MPa); 一般取 $p^* = 0.192$ MPa; τ 为放气时间常数。

由于公式(6)用于计算主管道内初始压强降到大气压强所需时间, 而手术过程中只需要计算腹腔降到目标压强时, 主管道所对应的压强 p 即可, 因此还需要计算出由 p_1 降到 p 所需时间。

当腹腔压强降到目标压强时, 主管道对应的压强为

$$p = p_1 - \Delta p \quad (7)$$

由 p 降到标准大气压强时间为

$$t_2 = \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - 1 \right] + 0.945 \left(\frac{p}{0.1013} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right\} \tau \quad (8)$$

p_1 降到 p 所需时间为

$$t_{\text{sub}} = t_1 - t_2 \quad (9)$$

联立式(5)–式(9), 整理可得腹腔增压 Δp_1 所需时间为

$$t_{sub} = \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_1}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - \left(\frac{p_1 - \frac{\Delta p_1 v_1}{v}}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] + 0.945 \left[\left(\frac{p_1}{0.1013} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - \left(\frac{p_1 - \frac{\Delta p_1 v_1}{v}}{0.1013} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \right\} \tau \quad (10)$$

考虑到在调节过程中电动阀门开度会随时间变化,因此对于放气常数 τ 需要单独建模。恒压手术单元中采用的控制算法为渐变式阀门控制策略,其控制函数与手术过程时间有关,在此给出阀门开度随时间的变化公式为:

$$L = \begin{cases} t, & t \in (0, t^\tau) \\ L_{val}, & t \in (t^\tau, t^\tau + t_{dur}) \\ -t, & t \in (t^\tau + t_{dur}, 2t^\tau + t_{dur}) \end{cases} \quad (11)$$

其中, t^τ 为某时间节点, t_{dur} 为手术时间片段。

由于开度 L 与流通面积正相关,结合式(3)、式(11)可得放气时间常数为

$$\tau = 5.217 \times 10^{-3} \times \frac{v}{k \cdot m \cdot L} \sqrt{\frac{273.16}{T_s}} \quad (12)$$

其中, m 为开度与流通面积比,取 $k = 1.4$, $T_s = 298.15$ K。整理得

$$\tau = 3.567 \times 10^{-3} \times \frac{v}{m \cdot L} \quad (13)$$

2.3 多手术单元下恒压算法

手术单元数量为1时,联立式(4)、式(10)、式(13),整理得减压阀预设压强为

$$p = \frac{10^3 s}{m \cdot L} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_1}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - \left(\frac{p_1 - \frac{\Delta p_1 v_1}{v}}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] + 0.945 \left[\left(\frac{p_1}{0.1013} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - \left(\frac{p_1 - \frac{\Delta p_1 v_1}{v}}{0.1013} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \right\} + p_1 \quad (14)$$

其中, p_1 为管道内压强, Δp_1 为病人腹腔增加压强。

然而,在多手术单元的情况下,每个手术单元请求时间不确定,且每个请求调节的时间也不同,在同一时刻中存在不同的手术单元的请求。因此,需要一种在线算法计算实时数据。

针对这类问题,本文提出了一种多手术单元下的恒压算法。将整个过程分为若干个时间点,每个时间点中记录正在进行的请求数据,对每个时间点

中的数据分别计算需要预设的值,即: $TimeSeq = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, \dots, t_k\}$ 。

每个时间点记录在该时刻保存所有手术单元请求的信息,其中包括手术单元设备编号 id 、病人腹腔请求增压值 p 、病人腹腔容积 v :

$$t_i = \begin{pmatrix} id_1 & p_1 & v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ id_k & p_k & v_k \end{pmatrix}$$

手术过程中,当时间点 dt 足够小时,可以认为不会出现新增增压请求或某一增压请求结束的情况。所有病人可以抽象为单一手术模型,使用公式

(14)计算减压阀的预设值,其中 $\Delta p_1 = \sum_{i=0}^n p$, $v_1 = \sum_{i=0}^n v$ 。算法流程如图4所示:

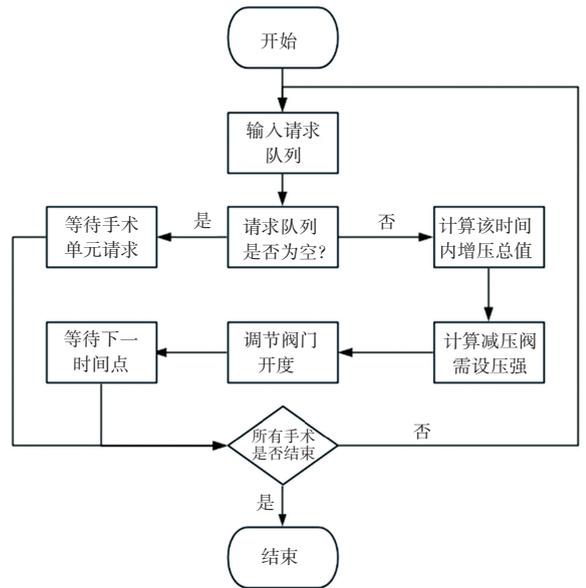


图4 多手术单元下的恒压算法流程图

Fig. 4 Flow chart of constant pressure algorithm under multiple surgical units

在实际算法中,可以使用队列来保存每个请求,队列中保存每个请求的 id 、 p 、 v ,以及调节结束时间 t_{end} ,在每轮循环中移出结束的请求。

3 实验结果分析

3.1 实验环境

实验环境基于仿真实验进行搭建,恒压手术云使用3台Linux服务器,用于搭建预测、存储以及调度所需的集群环境;使用8台恒压手术单元,模拟不同数量规模手术下的实验,每个恒压手术单元主要包含Raspberry 3B、BMP180压强传感器、电动阀门

以及模拟腹腔所用的气囊。Raspberry 3B 是一种 64 位 4 核的 ARM 架构微型计算机,且配有 40 个 GPIO 引脚,可以通过通用 IO 接口控制电动阀门,以及获取压强传感器数据等。

腹腔模拟材料选取不同材质、不同大小的气囊,并且将压强传感器埋入气囊中,使用 CO₂ 钢瓶模拟稳定的气源,与气囊间使用一个 1L 的塑料瓶模拟主管道,塑料瓶使用多根较粗的橡胶管连接气囊。

3.2 实验评价指标

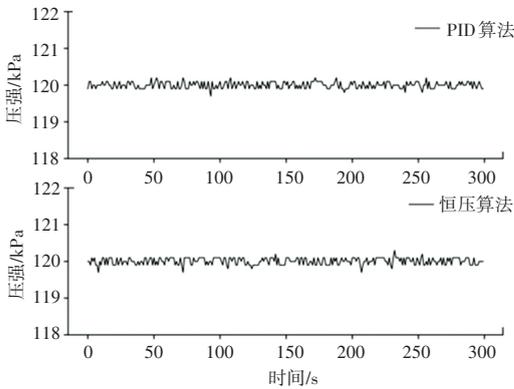
实验主要目的是验证该算法能否在多台手术调节的情况下,腹腔恒压系统主管道中压强能否维持恒定。针对手术场景,提出以下 3 个评价指标:

(1) 管道平均压强 (AveragePressure)

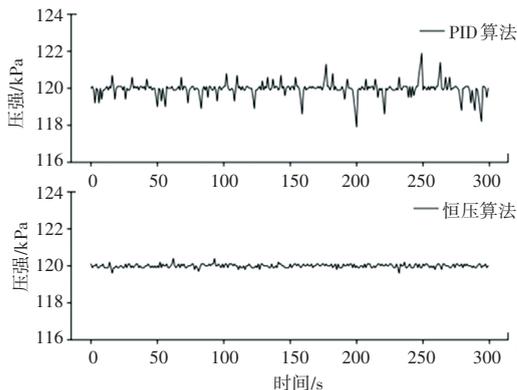
管道平均压强是指在所有手术结束前,管道内平均压强值,该值与预设的管道恒压差距不易过大,是评价算法优劣的重要指标,具体公式为

$$AveragePressure = \frac{\sum_{i=0}^n P_i}{n} \quad (15)$$

其中, p_i 表示第 i 个时间点管道内压强。



(a) 手术单元数量为 1



(c) 手术单元数量为 4

(2) 压强均方误差 (PressureMSE)

均方误差可以反应压强误差的累计值,其值越小,表示实验结果越好,对应的算法越好。具体公式为

$$PressureMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (p_i - \hat{p})^2 \quad (16)$$

其中, p_i 表示第 i 个时间点管道内压强, \hat{p} 表示预设的管道恒压值。

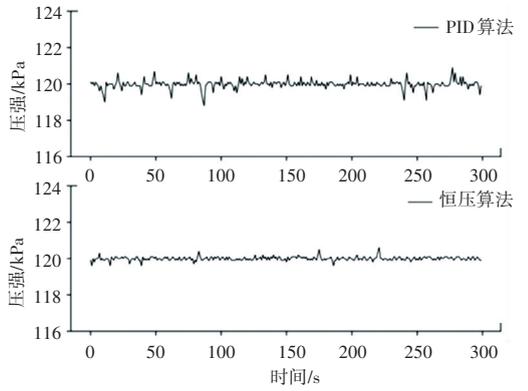
(3) 压强稳定率 (StableRate)

稳定率是指整个过程中,管道内压强稳定的时间占所有时间的比例。定义稳定时间为 ST ,所有时间为 AT ,具体公式为

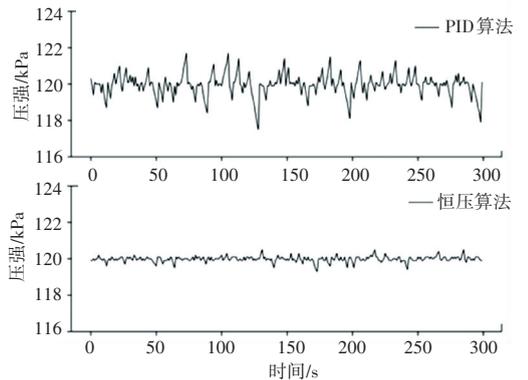
$$StableRate = \frac{ST}{AT} * 100\% \quad (17)$$

3.3 结果分析

实验主要采用对比法和控制变量法进行,使用 1、2、4、8 台恒压手术单元,分别使用 PID 算法控制和本文提出的恒压算法进行对比实验。设置管道压强恒压为 120 kPa,每组实验时常 5 min,观察管道内的压强变化,实验结果如图 5 所示。



(b) 手术单元数量为 2



(d) 手术单元数量为 8

图 5 不同手术单元数量下的 PID 算法与恒压算法

Fig. 5 PID algorithm and constant pressure algorithm under different numbers of surgical units

观察图5可以得出,手术单元数量为1时,由于不存在并发的情况,PID算法与恒压算法基本将压强维持在120 kPa;手术单元数量为2时,此时发生部分同时调节的情况,PID算法与恒压算法出现上下波动情况,二者相差无几;手术单元数量为4、8时,恒压算法明显优于PID算法。

表1 恒压算法评价指标

Table 1 Evaluation index of constant pressure algorithm

手术单元数量	平均压强/ kPa	均方误差 MSE	稳定率 StableRate/ %
1	120.01	0.009	100
2	119.98	0.013	97.33
4	119.99	0.010	98.66
8	119.98	0.025	94.00

表2 PID算法评价指标

Table 2 Evaluation index of PID algorithm

手术单元数量	平均压强/ kPa	均方误差 MSE	稳定率 StableRate/ %
1	119.99	0.007	100
2	119.98	0.056	83.33
4	119.95	0.174	78.33
8	119.27	0.362	53.66

观察表1、表2可以发现,在手术单元数量较少时(1、2),由于调节次数较少,且不同手术单元同时请求调节的概率较小,PID算法与恒压算法稳定率与均方误差相差不大;当手术单元数量较多时(4、8),不同手术单元之间同时请求调节的概率大大增加,PID算法均方误差与稳定率大大下降,在手术单元数量为8时,PID算法稳定率仅有63%,恒压算法性能明显优于PID算法。

4 结束语

本文针对大规模腹腔镜手术环境下,腹腔恒压系统气源无法恒定的问题进行了分析与探讨,提出了一种恒压算法,并且对其进行了实验分析。实验表明,在多手术单元情况下,相比于传统线性PID控制算法,本算法可以更好的维持管道的恒压。运用到腹腔恒压系统后,可以进一步提高该系统的稳定性与健壮性。然而,仿真实验毕竟存在一些弊端,如材料选择能否接近真实手术情况,气密性不能得到手术级别的标准等。希望在未来能够进行更加真实的仿真实验,进一步验证调度策略的可靠性,为腹腔镜手术提供更安全的保障与便利。

参考文献

- [1] 刘国礼. 我国腹腔镜外科的现状——156820例腹腔镜手术综合报告[J]. 中华普通外科杂志, 2001, 16(9): 562-564.
- [2] LEE J Y, CHOI S H. Results of hepatic and renal function tests to different CO₂ pneumoperitoneum conditions: An experimental capnoperitoneum study in dogs [J]. Research in Veterinary Science, 2015, 101: 1-5.
- [3] 黄陈, 陈庆奎, 吴路平, 等. 协同感知腹腔镜手术恒压支持系统及其实现方法[P]. 中国, 111243725A. 2020.
- [4] 乐涛, 陈庆奎, 黄陈. 面向恒压腹腔镜手术的云控制过程模型[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(9): 10.
- [5] ANG K H, CHONG G, LI Y. PID control system analysis, design, and technology [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 13(4): 559-576.
- [6] STRM K J, HAGGLUND T. PID controllers: Theory, design and tuning [C]//Research Triangle Park; 2nd Ed. Instrumentation, Systems and Automatic Society, 1995.
- [7] RIVERA D E, MORARI M, SKOGESTAD S. Internal model control: PID controller design [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design & Development, 1986, 25(1): 2163.
- [8] ASTROM K J, HAGGLUND T. The future of PID control [J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(11): 1163-1175.
- [9] 段铁群, 王萍, 黄宇辉, 等. 基于PLC的模糊自整定PID参数控制器在变频调速恒压供气系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(4): 4.
- [10] 姜兴忠, 戴恒阳. 变频恒压供水系统的机理分析[J]. 电气传动自动化, 2002, 24(4): 9-11.
- [11] ZHENG J M, ZHAO S D, WEI S G. Application of self-tuning fuzzy PID controller for a SRM direct drive volume control hydraulic press [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(12): 1398-1404.
- [12] 牛丹, 周杏鹏, 陶连斌, 等. 模糊PID碳化硅微粉恒压供水系统[J]. 自动化仪表, 2009, 30(10): 26-29.
- [13] 路波, 陶国良, 刘昊, 等. 零重力模拟气动悬挂系统的建模及恒压控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(2): 379-385.
- [14] 毛君, 曹建南, 谢苗, 等. 喷嘴流量试验台恒压供油系统建模与仿真[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2015, 34(6): 734-739.
- [15] TANG K S, MAN K F, CHEN G, et al. An optimal fuzzy PID controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(4): 757-765.
- [16] ZHANG Y, CHEN Z, YUAN Z. Nonlinear system PID-type multi-step predictive control [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2004, 2(2): 201-204.
- [17] LIU H, LIU D. Self-tuning PID controller for a nonlinear system based on support vector machines [J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(3): 468-474.
- [18] 王鑫涛, 杜星. 飞机气压加载试验充放气时间计算与仿真[J]. 机床与液压, 2019, 47(20): 144-147.
- [19] 潘锦珊, 单鹏. 气体动力学基础. 修订本[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 30-33.
- [20] 王积伟, 许映秋, 陆鑫盛, 等. 液压与气压传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.