个体化呼气末正压降低患者术中机械通气的机械功率：一项随机对照研究数据的二次分析

刘　旭，马晓婧，马利彬，付云柯，王天竹，朴香美，米卫东，张昌盛
解放军总医院第一医学中心麻醉科，北京　100853

摘要：背景　机械功率(mechanical power，MP)作为评估机械通气(mechanical ventilation，MV)对肺部呼吸力学影响的一个新兴综合指标，可反映MV过程中总体能量传递，且与肺损伤的发生及患者预后关系密切。**目的**　观察电阻抗断层成像(electrical impedance tomography，EIT)指导下的个体化呼气末正压(positive end-expiratory pressure，PEEP)对机器人辅助腹腔镜手术患者所受MP的影响。**方法**　对前期一项72例肝胆胰机器人手术患者随机对照研究资料进行二次分析。对采用EIT指导($PEEP_{EIT}$组)与传统方法($PEEP_{5cmH2O}$组)进行手术患者的PEEP设置进行研究，在诱导后10 min、气腹过程中(PEEP滴定后60 min)、气腹结束后10 min采集潮气量(tidal volume，Vt)、呼吸频率(respiratory rate，f)、气道峰压(peak airway pressure，P_{peak})、平台压(plateau pressure，P_{plat})、呼吸系统顺应性(respiratory compliance，Crs)、驱动压(driving pressure，DP)等指标，计算两组患者不同时间点呼吸系统所接受的MP并进行比较。**结果**　$PEEP_{EIT}$组48例，男性26例，女性22例，平均年龄(53.7±14.0)岁；$PEEP_{5cmH2O}$组24例，男性10例，女性14例，平均年龄(57.3±14.5)岁。两组年龄、性别差异无统计学意义($P>0.05$)。$PEEP_{EIT}$组MP在气腹前[(4.54±1.53) J/min *vs* (5.49±1.23) J/min]、气腹中[(6.68±2.35) J/min *vs* (7.81±2.23) J/min]和气腹后[(5.24±1.70) J/min *vs* (6.09±1.55) J/min]均显著低于$PEEP_{5cmH2O}$组($P<0.05$)；$PEEP_{EIT}$组Crs在气腹中[(44.27±11.33) mL/cmH_2O *vs* (31.88±6.58) mL/cmH_2O]和气腹后[(63.56±13.06) mL/cmH_2O *vs* (48.13±10.59) mL/cmH_2O]均高于$PEEP_{5cmH2O}$组($P<0.05$)；$PEEP_{EIT}$组DP在气腹中[(11.50±2.08) cmH_2O *vs* (13.96±2.37) cmH_2O]和气腹后[(7.60±1.92) cmH_2O *vs* (9.75±2.17) cmH_2O]均低于$PEEP_{5cmH2O}$组($P<0.05$)。**结论**　在肝胆胰机器人手术患者中，采用EIT指导的个体化PEEP可降低MP，其原因可能与改善Crs、降低DP有关。

关键词：腹腔镜；呼气末正压；机械功率；肺顺应性；驱动压
中图分类号：R614　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-5227(2025)06-0554-06
DOI：10.12435/j.issn.2095-5227.25010702
引用本文：刘旭，马晓婧，马利彬，等.个体化呼气末正压降低患者术中机械通气的机械功率：一项随机对照研究数据的二次分析［J］.解放军医学院学报，2025，46（6）：554-559.

Individualized positive end-expiratory pressure reduces mechanical power during mechanical ventilation in patients undergoing surgery: A secondary analysis of data from a randomized controlled trial

LIU Xu, MA Xiaojing, MA Libin, FU Yunke, WANG Tianzhu, PIAO Xiangmei, MI Weidong, ZHANG Changsheng
Department of Anesthesia, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China
Corresponding author: ZHANG Changsheng. Email: powerzcs@126.com

Abstract: Background　Mechanical power (MP), as a new comprehensive index to evaluate the effect of mechanical ventilation (MV) on pulmonary respiratory mechanics, can reflect the overall energy transfer in the process of MV, and is closely related to the occurrence of lung injury and the prognosis of patients. **Objective**　To examine the impact of individualized positive end-expiratory pressure (PEEP) guided by electrical impedance tomography (EIT) on the MP in patients undergoing robot-assisted laparoscopic surgery. **Methods**　A secondary analysis of a previous randomized controlled study of 72 patients undergoing robotic hepatobiliary and pancreatic surgery was performed. PEEP settings of patients undergoing surgery were respectively conducted using EIT guidance ($PEEP_{EIT}$ group) and conventional methods ($PEEP_{5cmH2O}$ group). Respiratory parameters of patients 10 minutes after induction, 60 minutes after PEEP titration with pneumoperitoneum and 10 minutes after deflation were screened from the data, including tidal volume (Vt), respiratory rate (f), peak airway pressure (Ppeak), plateau pressure (Pplat), respiratory compliance (Crs), driving pressure (DP), etc. MP and mechanical energy per breath ($ME_{per\ breath}$) received by the respiratory system at different time points of both groups were calculated and compared. **Results**　There were 48 cases in the $PEEP_{EIT}$ group, including 26 males and 22 females, with the mean age of 53.7±14.0 years, in the $PEEP_{5cmH2O}$ group, there were 24 cases, including 10 males and 14 females,

收稿日期：2025-01-07
第一作者：刘旭，硕士，医师。Email: liuxu199103@163.com
通信作者：张昌盛，博士，副主任医师，副教授。Email: powerzcs@126.com

with the mean age of 57.3±14.5 years. No significant difference was found in age and gender between the two groups ($P>0.05$). The $PEEP_{EIT}$ group exhibited significantly lower MP than the $PEEP_{5cmH_2O}$ group at all time points: before pneumoperitoneum ([4.54±1.53] J/min *vs* [5.49±1.23] J/min), during pneumoperitoneum ([6.68±2.35] J/min *vs* [7.81±2.23] J/min), and after pneumoperitoneum ([5.24±1.70] J/min *vs* [6.09±1.55] J/min) (all $P<0.05$). Crs was significantly higher in the $PEEP_{EIT}$ group compared to the $PEEP_{5\ cmH_2O}$ group during pneumoperitoneum ([44.27±11.33] mL/cmH_2O *vs* [31.88±6.58] mL/cmH_2O) and after pneumoperitoneum ([63.56±13.06] mL/cmH_2O *vs* [48.13±10.59] mL/cmH_2O, both $P<0.05$). DP was significantly lower in the $PEEP_{EIT}$ group during pneumoperitoneum ([11.50±2.08] cmH_2O *vs* [13.96±2.37] cmH_2O) and after pneumoperitoneum ([7.60±1.92] cmH_2O *vs* [9.75±2.17] cmH_2O) (both $P<0.05$). **Conclusion** Individualized PEEP guided by EIT can reduce MP in patients undergoing robotic-assisted hepatobiliary and pancreatic surgery, which may be related to the optimization of Crs and DP.

Keywords: laparoscopy; positive end-expiratory pressure; mechanical power; lung compliance; driving pressure

Cited as: Liu X, Ma XJ, Ma LB, et al. Individualized positive end-expiratory pressure reduces mechanical power during mechanical ventilation in patients undergoing surgery: A secondary analysis of data from a randomized controlled trial[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(6): 554-559.

机器人腹腔镜手术是一种微创手术，具有精度高、创伤小、恢复快、预后好等特点，在临床治疗中得到广泛应用。此类手术中，患者通常需要接受机械通气(mechanical ventilation，MV)，而正压通气的过程势必会对肺部造成一定的损伤[1]。个体化呼气末正压(positive end-expiratory pressure，PEEP)作为机械通气中的一个重要参数，在维持肺泡开放、改善氧合以及预防肺不张等方面起着重要的作用。根据患者的生理特点和手术情况变化所设定的个体化PEEP，可优化通气策略，减少呼吸机相关肺损伤(ventilator-induced lung injury，VILI)[2-4]。机械功率(mechanical power，MP)作为评估MV对肺部呼吸力学影响的一个新兴指标，可反映MV过程中总体能量传递，与肺损伤的发生以及患者预后关系密切[5-6]。尽管已有研究分析了PEEP对MP的影响，但针对个体化PEEP对MP影响的研究仍有限[7]。因此，本研究旨在探讨机器人腹腔镜手术中EIT指导的个体化PEEP调整对MP的影响，为MV过程中更为完善的呼吸力学提供理论基础，以期优化通气管理策略，进一步改善患者预后。

1 对象与方法

1.1 资料来源

本研究是一项前瞻性随机对照研究数据[4]的二次分析，原研究观察了EIT指导的个体化PEEP设置对行机器人肝胆胰手术的患者围术期呼吸力学及术后肺不张的影响。研究对象为2021年4—10月在解放军总医院第一医学中心麻醉科择期行全麻下机器人肝胆胰手术的成年患者。纳入标准：(1)年龄＞18岁；(2)预计手术持续时间超过180 min；(3) ASA分级Ⅰ～Ⅱ级；(4)体质量指数(body mass index，BMI)为18～35 kg/m^2。排除标准：(1)孕妇；(2)已参与其他研究；(3)术前30 d内肺炎；(4)肺纤维化；(5)肺大疱及存在既往肺部手术史。该研究已获得医院伦理委员会批准(编号：S2020-458-01)，并在中国临床试验注册中心注册(ChiCTR2100045166)，所有入组患者或委托人均签署知情同意书。

1.2 分组与处理

原研究为患者单盲设计，随机化采用计算机生成的随机序列，将72例入选患者以2∶1的比例随机分配至$PEEP_{EIT}$组或$PEEP_{5cmH2O}$组。根据PEEP设定方式的不同，将患者分为采用EIT指导个体化PEEP的$PEEP_{EIT}$组和采用传统PEEP设定方案(5 cmH_2O)的$PEEP_{5cmH2O}$组。此外，每组随机选择6例患者进行了食管压测定，于患者食管中下段放置测压导管，在每个时间点估算跨肺驱动压(transpulmonary driving pressure，DP_{tp})和单纯肺部受到的机械功率(mechanical power to the lung，MP_L)。

1.3 评估指标与协变量

提取患者人口学及诊疗相关信息，包括年龄、性别、身高、体质量、体质量指数、美国麻醉医师学会(American Society of Anesthesiologists，ASA)分级、吸烟史等。

研究主要指标为患者气腹前(诱导后10 min)、气腹中(气腹开始后60 min)、气腹后(气腹结束后10 min)的MP；次要指标为各时点的呼吸力学参数，包括潮气量(tidal volume，Vt)、呼吸频率(respiratory rate，f)、气道峰压(peak airway pressure，P_{peak})、平台压(plateau pressure，P_{plat})、PEEP、呼吸系统顺应性(respiratory compliance，Crs)、驱动压(driving pressure，DP)，以及亚组患者的DP_{tp}和MP_L等。

1.4　MP的计算

机械能(mechanical energy，ME)是MV过程中呼吸机对呼吸系统传递的能量，等于吸气压力与Vt的乘积，即压力-容积曲线的曲线下面积(area under curve，AUC)，MP即为单次通气的ME与呼吸频率的乘积。但该“几何法”并不便于临床应用，学者们通过将压力与Vt的积分公式简化后，获得便于临床应用的MP计算公式。本研究采用下列公式进行MP的计算：

$$MP(J/min) = 0.098 \times f \times Vt \times [\frac{P_{plat} - PEEP}{2} + (P_{peak} - P_{plat})]$$[8]。

1.5　统计学分析

1.5.1　样本量计算　本次研究的样本量计算采用主要结局指标：气腹过程中的MP，采用双侧检验设定，检验功效设定为0.8，显著性水平设为0.05，样本分配比例参数R=0.5进行组间配比，监测差异值为1.13，重复测量时点为3次，单个观测值的标准差依据原研究数据设为2.31。计算得出$PEEP_{EIT}$组34例，$PEEP_{5cmH2O}$组17例，共计51例。

1.5.2　统计学方法　采用SPSS 25.0进行统计学分析，PASS 15.0进行样本量计算。对计量资料进行正态性检验，正态分布的参数以$\bar{x}\pm s$表示，两组基线资料比较使用独立样本t检验；非正态分布的参数以$M(IQR)$表示。依时间变化资料采用广义估计方程分析组间差异、时间效应及组别×时间的交互作用。P<0.05为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　两组一般情况比较

$PEEP_{EIT}$组48例，男性26例，女性22例，平均年龄(53.7±14.0)岁，BMI为(23.9±3.0) kg/m^2。$PEEP_{5cmH2O}$组24例，男性10例，女性14例，平均年龄(57.3±14.5)岁，BMI为(24.2±3.1) kg/m^2。两组的年龄、性别、BMI、出入量、手术时间、麻醉时长及气腹持续时间等一般资料均无统计学差异(P>0.05)。见表1。

2.2　两组机械功率比较

$PEEP_{EIT}$组MP在气腹前[(4.54±1.53) J/min *vs* (5.49±1.23) J/min，P<0.01]、气腹中[(6.68±2.35) J/min *vs* (7.81±2.23) J/min，P<0.01]和气腹后[(5.24±1.70) J/min *vs* (6.09±1.55) J/min，P<0.05]显著降低，差异有统计学意义。广义估计方程分析显示，组间差异有统计学意义(Wald $\chi^2_{组间}$=9.00，P<0.01)，时间差异有统计学意义(Wald $\chi^2_{时间}$=63.49，P<0.01)，时间与分组的交互作用无统计学意义(Wald $\chi^2_{组间\cdot时间}$=0.27，P=0.88)。见表2。

表1　两组肝胆胰手术患者一般情况比较

Tab. 1 Comparison of general characteristics of hepatobiliary and pancreatic surgery patients between the two groups

指标	$PEEP_{EIT}$ (n=48)	$PEEP_{5cmH2O}$ (n=24)	t/χ^2值	P值
年龄/(岁，$\bar{x}\pm s$)	53.71±13.95	57.25±14.52	-1.00	0.32
性别(男/女)/例	22/26	14/10	1.00	
身高/(cm，$\bar{x}\pm s$)	165.00±7.54	165.83±7.43	-0.44	0.66
体质量/(kg，$\bar{x}\pm s$)	65.33±11.48	66.38±9.94	-0.38	0.70
BMI/(kg/m^2，$\bar{x}\pm s$)	23.95±2.95	24.16±3.11	-0.39	0.70
ASA分级/(Ⅰ/Ⅱ，例)	19/29	11/13	0.26	
既往史/(例，%)				
无吸烟史	27(56)	13(54)	0.00	
有吸烟史，已戒烟	6(13)	3(13)	0.13	
有吸烟史，未戒烟	15(31)	8(33)	1.52	
高血压	17(35)	8(33)	1.89	
糖尿病	7(15)	5(21)	3.45	
出入量/(mL，$\bar{x}\pm s$)				
晶体液	1 831.25±501.98	2 066.77±634.97	-1.71	0.09
胶体液	394.79±267.42	455.83±287.78	-0.89	0.38
出血量	87.50±85.61	85.83±58.75	0.09	0.93
尿量	235.42±216.34	283.75±270.33	-0.82	0.41
手术持续时间/(min，$\bar{x}\pm s$)	214.69±49.36	227.96±48.74	-1.08	0.28
麻醉持续时间/(min，$\bar{x}\pm s$)	251.58±52.10	273.17±47.47	-1.71	0.09
气腹持续时间/(min，$\bar{x}\pm s$)	185.88±46.52	199.67±43.83	-1.21	0.23
食管压监测患者数量/例	5	6		

ASA：美国麻醉医师协会；EIT：电阻抗断层成像；PEEP：呼气末正压。

表2　两组不同阶段的机械功率比较(J/min，$\bar{x}\pm s$)

Tab. 2　Comparison of MP between the two groups (J/min, $\bar{x}\pm s$)

时间点	$PEEP_{EIT}$ (n=48)	$PEEP_{5cmH2O}$ (n=24)	整体比较	两组比较
气腹前	4.54±1.53	5.49±1.23	组间：Wald χ^2=9.00，P<0.01；时间：Wald χ^2=63.49，P<0.01；交互：Wald χ^2=0.27，P=0.88	P<0.01
气腹中	6.68±2.35	7.81±2.23		P<0.05
气腹后	5.24±1.70	6.09±1.55		P<0.01

MP：机械功率。本表数据采用广义估计方程分析。

2.3　两组呼吸力学指标比较

在呼吸力学相关指标中，Crs在气腹中[(44.27±11.33)mL/cmH_2O *vs* (31.88±6.60)mL/cmH_2O,

$P<0.01$]和气腹后[(63.56±13.06) mL/cmH_2O *vs* (48.13±10.59) mL/cmH_2O，$P<0.01$]显著升高，组间差异、时点差异及时间与分组的交互作用均有统计学意义(Wald $\chi^2_{组间}$=16.70，$P<0.01$；Wald $\chi^2_{时间}$=259.21，$P<0.01$；Wald $\chi^2_{组间\cdot时间}$=35.06，$P<0.01$)。$PEEP_{EIT}$组的DP在气腹中[(11.50±2.08) cmH_2O *vs* (13.96±2.37) cmH_2O，$P<0.01$]和气腹后[(7.60±1.92) cmH_2O *vs* (9.75±2.17) cmH_2O，$P<0.01$]显著降低，组间差异、时点差异及时间与分组的交互作用均有统计学意义(Wald $\chi^2_{组间}$=11.56，$P<0.01$；Wald $\chi^2_{时间}$=172.06，$P<0.01$；Wald $\chi^2_{组间\cdot时间}$=29.57，$P<0.01$)。PEEP滴定和第2次复张手法后，$PEEP_{EIT}$组的PEEP保持在滴定水平，因此在气腹期间，$PEEP_{EIT}$组的PEEP和P_{plat}更高($P<0.01$)。见表3。

2.4　食管压监测患者跨肺驱动压、肺部受到的机械功率及每次呼吸的机械能比较

在有食管压监测的患者中，测量了围气腹期患者吸气末和呼气末的食管压力，并计算跨肺驱动压(transpulmonary driving pressure，DP_{tp})，进而得出肺部在MV过程中所受到的MP_L。与$PEEP_{5cmH2O}$组相比，$PEEP_{EIT}$组吸气末MP_L在气腹中[(2.72±1.16) J/min *vs* (4.41±0.87) J/min，$P<0.01$]及气腹后[(1.40±0.59) J/min *vs* (3.50±1.66) J/min，$P<0.01$]显著降低，组间及时间差异有统计学意义，组间与时间交互作用无统计学意义(Wald $\chi^2_{组间}$=9.14，$P<0.01$；Wald $\chi^2_{时间}$=8.25，$P<0.05$；Wald $\chi^2_{组间\cdot时间}$=4.01，P=0.14)；$PEEP_{EIT}$组DP_{tp}在气腹中[(4.80±1.92) cmH_2O *vs* (7.83±1.72) cmH_2O，$P<0.01$]和气腹后[(2.40±0.89 cmH_2O *vs* (6.00±2.97) cmH_2O，$P<0.01$]显著降低，组间和时间差异有统计学意义，组间与时间交互作用无统计学意义(Wald $\chi^2_{组间}$=6.30，$P<0.05$；Wald $\chi^2_{时间}$=9.28，$P<0.05$；Wald $\chi^2_{组间\cdot时间}$=3.79，P=0.15)。尽管采用了头高脚低位，$PEEP_{5cmH2O}$组在整个麻醉期间的呼气末跨肺压(transpulmonary pressure，Ptp)保持在0以下，$PEEP_{EIT}$组在PEEP滴定后呼气末Ptp转向正值[气腹中(1.0±2.1) cmH_2O，气腹后(1.2±2.4) cmH_2O]。见表4。

3　讨论

机械通气作为危重症患者以及行全麻手术患者呼吸支持的必要手段，在临床治疗过程中发挥

表3　两组不同阶段呼吸力学指标比较($\bar{x}\pm s$)

Tab. 3　Comparison of respiratory parameters between the two groups ($\bar{x}\pm s$)

指标	时间点	$PEEP_{EIT}$ (n=48)	$PEEP_{5cmH2O}$ (n=24)	整体比较	两组比较
Vt/mL	气腹前	396.35±44.66	395.83±42.14	组间：Wald χ^2=0.75，P=0.39；	P=0.96
	气腹中	420.83±49.20	406.25±46.19	时间：Wald χ^2=29.53，$P<0.01$；	P=0.21
	气腹后	419.44±44.57	407.71±45.83	交互：Wald χ^2=3.99，P=0.14	P=0.29
f/(次/min)	气腹前	13.60±1.16	14.67±1.27	组间：Wald χ^2=4.01，$P<0.05$；	$P<0.01$
	气腹中	15.10±1.56	15.33±1.61	时间：Wald χ^2=32.98，$P<0.01$；	P=0.56
	气腹后	14.92±1.14	15.17±1.20	交互：Wald χ^2=5.96，P=0.051	P=0.39
PEEP/cmH_2O	气腹前	5.00	5.00	组间：Wald χ^2=985.57，$P<0.01$；	-
	气腹中	14.83±1.97	5.00	时间：Wald χ^2=1351.80，$P<0.01$；	$P<0.01$
	气腹后	9.25±2.39	5.00	交互：Wald χ^2=1351.80，$P<0.01$	$P<0.01$
P_{peak}/cmH_2O	气腹前	18.48±2.87	19.63±2.48	组间：Wald χ^2=16.77，$P<0.01$；	P=0.08
	气腹中	31.06±3.04	24.58±2.65	时间：Wald χ^2=702.61，$P<0.01$；	$P<0.01$
	气腹后	21.42±4.03	19.83±2.44	交互：Wald χ^2=130.39，$P<0.01$	$P<0.05$
Crs/(mL/cmH_2O)	气腹前	49.96±11.15	49.04±13.71	组间：Wald χ^2=16.70，$P<0.01$；	P=0.77
	气腹中	44.27±11.33	31.88±6.58	时间：Wald χ^2=259.21，$P<0.01$；	$P<0.01$
	气腹后	63.56±13.06	48.13±10.59	交互：Wald χ^2=35.06，$P<0.01$	$P<0.01$
P_{plat}/cmH_2O	气腹前	15.06±2.17	15.00±2.50	组间：Wald χ^2=41.29，$P<0.01$；	P=0.92
	气腹中	26.33±2.57	18.96±2.37	时间：Wald χ^2=776.93，$P<0.01$；	$P<0.01$
	气腹后	16.85±3.66	14.75±2.17	交互：Wald χ^2=180.87，$P<0.01$	$P<0.01$
DP/cmH_2O	气腹前	10.04±2.17	10.00±2.50	组间：Wald χ^2=11.56，$P<0.01$；	P=0.94
	气腹中	11.50±2.08	13.96±2.37	时间：Wald χ^2=172.06，$P<0.01$；	$P<0.01$
	气腹后	7.60±1.92	9.75±2.17	交互：Wald χ^2=29.57，$P<0.01$	$P<0.01$

Vt：潮气量；f：呼吸频率；P_{peak}：气道峰压；P_{plat}：平台压；Crs：呼吸系统顺应性；DP：驱动压。本表数据采用广义估计方程分析。

表 4　食管压监测患者肺受到的机械功率和跨肺驱动压比较($\bar{x}\pm s$)

Tab. 4　Comparison of transpulmonary driving pressure, MP_L, and $ME_{L\ per\ breath}$ in patients with esophageal manometry ($\bar{x}\pm s$)

指标	时间点	$PEEP_{EIT}$ (n=48)	$PEEP_{5cmH2O}$ (n=24)	整体比较	两组比较
MP_L/(J/min)	气腹前	2.99±1.72	2.70±1.58	组间：Wald χ^2=9.14，P<0.01；	P=0.74
	气腹中	2.72±1.16	4.41±0.87	时间：Wald χ^2=8.25，P<0.05；	P<0.01
	气腹后	1.40±0.59	3.50±1.66	交互：Wald χ^2=4.01，P=0.14	P<0.01
DP_{tp}/cmH_2O	气腹前	5.80±3.27	5.17±3.37	组间：Wald χ^2=6.30，P<0.05；	P=0.73
	气腹中	4.80±1.92	7.83±1.72	时间：Wald χ^2=9.28，P<0.05；	P<0.01
	气腹后	2.40±0.89	6.00±2.97	交互：Wald χ^2=3.79，P=0.15	P<0.01

DP_{tp}：跨肺驱动压；MP_L：肺受到的机械功率。本表数据采用广义估计方程分析。

重要作用的同时，其潜在的呼吸机相关肺损伤风险始终是临床关注的焦点。机械功率整合机械通气过程中的压力、容积、流速等因素，为VILI的研究提供了新视角。本研究结果显示，在气腹期间，机器人肝胆胰手术患者采用EIT指导下的个体化PEEP可显著降低气腹中和气腹后机械通气过程中的机械功率；机械功率的降低与驱动压和跨肺驱动压的降低密切相关。

既往研究表明，高驱动压显著增加术后肺部并发症(postoperative pulmonary complications，PPCs)的发生率[9]。在机器人腹腔镜手术过程中，随着气腹压的升高，膈肌向头侧移位，胸腔空间被压缩，胸廓弹性阻力显著上升，肺顺应性下降，导致驱动压升高[10]。本研究结果显示，与传统PEEP方案(5 cmH_2O)相比，EIT指导的个体化PEEP可显著改善肺的顺应性，降低机械通气过程中的驱动压和跨肺驱动压，其中EIT组的跨肺驱动压下降了近40%，显著降低了肺组织在机械通气过程中的应力。其原因可能与更高水平的个体化PEEP可有效对抗气腹压所致的膈肌上抬、缓解肺泡塌陷有关[11]。

机械功率概念由Gattinoni等[12]首次提出，是通过将单次呼吸施加到呼吸系统的能量(J)乘以呼吸频率(f)来计算的，以确定总功率(J/min)。既往研究表明，机械功率与危重患者的死亡率与其他不良结果相关[13-14]。然而，在机械功率的计算中包含PEEP一直存在很大争议[8, 15]。PEEP只在设定后最初会导致肺泡膨胀体积改变，但在后续的机械通气过程中，并不继续直接导致肺泡容积改变，理论上讲，PEEP并不做功。不同水平PEEP条件下的机械功率不同，并不是因为PEEP做功不同所致，而是不同的PEEP水平下呼吸系统的顺应性存在差异，最终导致机械功率不同。在传统的机械功率公式中，PEEP会线性增加或减少机械功率，这表明PEEP值越低越好，该结论与既往研究相悖，其忽略了PEEP对呼吸力学的影响，同时在气腹压的作用下，该影响更加复杂化，这也是我们探讨研究个体化PEEP的意义所在[16]。事实上，PEEP对呼吸力学的影响并没有那么简单。受肺泡表面的活性物质对肺顺应性的调节等因素影响，PEEP对呼吸力学的影响应该是抛物线形的，过低或过高的PEEP都会导致肺顺应性降低。本研究的计算结果显示，EIT指导的个体化PEEP降低了术中机械功率，这可能得益于呼吸系统顺应性和驱动压的显著改善。

此外，我们对11例患者跨肺压(跨肺压=气道压-食管压)进行了统计分析。结果表明，呼气末跨肺压介于0～10 cmH_2O可减轻周期性肺泡塌陷，将吸气末跨肺压维持在≤25 cmH_2O可避免肺泡过度扩张[17]。本研究中，传统PEEP下的呼气末跨肺压为负值，无法维持肺泡的开放状态，而滴定后个体化PEEP的跨肺压为正值，能够更好地维持肺泡开放状态，改善呼吸系统顺应性，从而降低机械功率。

目前，关于机械通气过程中机械功率的安全阈值尚无定论。动物研究表明，当机械功率大于12 J/min时，所有参与实验的健康猪均发生了肺水肿[18]。另有研究表明，当机械功率超过6.9 J/min时，可显著增加患者PPCs的风险[19]。在本研究中，两组患者在气腹前及气腹后，机械功率均未超过6.9 J/min，而气腹期间，$PEEP_{EIT}$组[(6.68±0.34) J/min]尚在该数值以下，而$PEEP_{5cmH2O}$组[(7.81±0.45) J/min]已经超过该数值，提示个体化PEEP可能带来更为安全的机械功率，从而降低患者的PPCs风险。

本研究存在一定的不足之处：(1)单中心回顾性研究，限制了研究结果的代表性；(2)研究对象均为肝胆胰手术患者，可能无法推广到所有手术

患者中；(3)研究中应用了MP的简化计算公式，数值只能接近真实的结果，且不同公式的选择尚存在一定争议。此外，保护性肺通气过程中MP的阈值也值得大样本和更广泛人群的进一步研究。

综上所述，在机器人肝胆胰手术过程中，应用EIT指导的个体化PEEP通气策略，可显著降低患者机械通气过程中的MP，对肺保护具有一定的支持作用。

作者贡献 刘旭、马晓婧、马利彬：研究设计，论文撰写；付云柯、王天竹、朴香美：审读和修订；米卫东：监督指导；张昌盛：指导，审读和修订。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

数据共享声明 本论文相关数据可依据合理理由从作者处获取，Email：liuxu199103@163.com。

参考文献

1 Silva PL，Ball L，Rocco PRM，et al. Physiological and pathophysiological consequences of mechanical ventilation［J］. Semin Respir Crit Care Med，2022，43（3）：321-334.

2 Thornton LT，Kummer RL，Marini JJ. The place of positive end expiratory pressure in ventilator-induced lung injury generation［J］. Curr Opin Crit Care，2024，30（1）：4-9.

3 Albert RK. Constant vt ventilation and surfactant dysfunction：an overlooked cause of ventilator-induced lung injury［J］. Am J Respir Crit Care Med，2022，205（2）：152-160.

4 Ma XJ，Fu YK，Piao XM，et al. Individualised positive end-expiratory pressure titrated intra-operatively by electrical impedance tomography optimises pulmonary mechanics and reduces postoperative atelectasis：a randomised controlled trial［J］. Eur J Anaesthesiol，2023，40（11）：805-816.

5 Costa ELV，Slutsky AS，Brochard LJ，et al. Ventilatory variables and mechanical power in patients with acute respiratory distress syndrome［J］. Am J Respir Crit Care Med，2021，204（3）：303-311.

6 Marini JJ，Rocco PRM，Gattinoni L. Static and dynamic contributors to ventilator-induced lung injury in clinical practice. pressure，energy，and power［J］. Am J Respir Crit Care Med，2020，201（7）：767-774.

7 Collino F，Rapetti F，Vasques F，et al. Positive end-expiratory pressure and mechanical power［J］. Anesthesiology，2019，130（1）：119-130.

8 Baedorf Kassis EN，Hu S，Lu MY，et al. Titration of ventilator settings to target driving pressure and mechanical power［J］. Respir Care，2023，68（2）：199-207.

9 Tonna JE，Peltan I，Brown SM，et al. Mechanical power and driving pressure as predictors of mortality among patients with ARDS［J］. Intensive Care Med，2020，46（10）：1941-1943.

10 Li JL，Ma SX，Chang XJ，et al. Effect of pressure-controlled ventilation-volume guaranteed mode combined with individualized positive end-expiratory pressure on respiratory mechanics，oxygenation and lung injury in patients undergoing laparoscopic surgery in Trendelenburg position［J］. J Clin Monit Comput，2022，36（4）：1155-1164.

11 Zhou L，Li HM，Li MJ，et al. Individualized positive end-expiratory pressure guided by respiratory mechanics during anesthesia for the prevention of postoperative pulmonary complications：a systematic review and meta-analysis［J］. J Clin Monit Comput，2023，37（2）：365-377.

12 Gattinoni L，Tonetti T，Cressoni M，et al. Ventilator-related causes of lung injury：the mechanical power［J］. Intensive Care Med，2016，42（10）：1567-1575.

13 Elefterion B，Cirenei C，Kipnis E，et al. Intraoperative mechanical power and postoperative pulmonary complications in noncardiothoracic elective surgery patients：a 10-year retrospective cohort study［J］. Anesthesiology，2024，140（3）：399-408.

14 Hong YC，Chen L，Pan Q，et al. Individualized Mechanical power-based ventilation strategy for acute respiratory failure formalized by finite mixture modeling and dynamic treatment regimen［J］. EClinicalMedicine，2021，36：100898.

15 Schaefer MS，Loring SH，Talmor D，et al. Comparison of mechanical power estimations in mechanically ventilated patients with ARDS：a secondary data analysis from the EPVent study［J］. Intensive Care Med，2021，47（1）：130-132.

16 Chiumello D，Coppola S，Fratti I，et al. Ventilation strategy during urological and gynaecological robotic-assisted surgery：a narrative review［J］. Br J Anaesth，2023，131（4）：764-774.

17 Talmor D，Sarge T，Malhotra A，et al. Mechanical ventilation guided by esophageal pressure in acute lung injury［J］. N Engl J Med，2008，359（20）：2095-2104.

18 Cressoni M，Gotti M，Chiurazzi C，et al. Mechanical power and development of ventilator-induced lung injury［J］. Anesthesiology，2016，124（5）：1100-1108.

19 Yoon S，Nam JS，Blank RS，et al. Association of mechanical energy and power with postoperative pulmonary complications in lung resection surgery：a post hoc analysis of randomized clinical trial data［J］. Anesthesiology，2024，140（5）：920-934.

（责任编辑：潘越，施晓亚）