

文章编号:1004-7220(2013)05-0496-06

基于 PIV 技术的人体上呼吸道流场 测量实验装置的构建

李福生^{1,2}, 徐新喜², 孙 栋³, 赵秀国², 刘志国², 谭树林²

(1. 解放军第291医院, 内蒙古 包头 014040; 2. 军事医学科学院 卫生装备研究所, 国家生物防护装备工程技术研究中心, 天津 300161; 3. 总后勤部军交运输研究所, 天津 300161)

摘要: **目的** 针对人体上呼吸道气流运动形成涡结构、流动分流、二次流等特点, 研制基于粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术的人体上呼吸道流场测量实验装置, 为开展人体上呼吸道流场特性实验研究提供平台。 **方法** 基于完整人体上呼吸道医学扫描图像制备透明的实物模型, 通过选择合适的气路系统, 结合二维 PIV 系统搭建整套实验装置, 并利用该装置对人体上呼吸道流场速度进行初步实验, 将实验结果和数值仿真结果进行对比。 **结果** 呼吸流量为 30 L/min 稳态呼吸模式下, 实验装置测得的气流在口腔上部有涡结构的形成, 口腔下部贴近舌苔上部及口腔中部的气流速度较高, 其他部位气流速度较低, 与数值仿真结果较为一致。 **结论** 基于 PIV 技术的人体上呼吸道流场测量实验装置合理可行, 运行可靠, 可用于人体上呼吸道内气流组织形式和流量分布等测量, 并能够实现数值仿真的验证。

关键词: 粒子图像测速; 人体上呼吸道; 流场; 涡结构; 数值仿真

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Experimental apparatus for measuring flow field of human upper respiratory tract with PIV technology

LI Fu-sheng^{1,2}, XU Xin-xi², SUN Dong³, ZHAO Xiu-guo², LIU Zhi-guo², TAN Shu-lin²

(1. The PLA's No. 291 Hospital, Baotou 014040, Inner Mongolia, China; 2. National Biological Protection Engineering Center, Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medicine Sciences, Tianjin 300161, China; 3. Institute of Military Transportation of the General Logistics, Tianjin 300161, China)

Abstract: Objective To develop a measurement device and provide a platform for researching the characteristics of human upper respiratory tract flow field based on PIV (particle image velocimetry) technology with respect to the characteristics that human upper respiratory tract flow may form the vortex structure, flow shunt and secondary flow. **Methods** A transparent physical model of human upper respiratory tract was prepared based on the completely scanned medical images. By means of selecting appropriate air pressure system, combined with two-dimensional PIV system, a complete experimental apparatus was established. Based on the apparatus, preliminary experiment on air velocity in human upper respiratory tract flow field was conducted, and the experiment result was compared with the numerical simulation result. **Results** Under the steady breathing pattern at respiratory flow of 30 L/min, respiratory air flow measured by the experimental apparatus led to the formation of vortex structure in the front part of oral cavity. Air velocity was relatively higher both in the lower part of oral cavity near the upper tongue and in the middle part of oral cavity, while the velocity was relatively lower in the other parts of oral cavity. The results were in accordance with numerical simulation. **Conclusions** The experimental apparatus for human upper respiratory tract flow measurement based on PIV technology is practical and reliable, which can be applied in the measurement of airflow organization patterns and vorticity distributions in human upper respiratory tract.

收稿日期:2012-11-19; 修回日期:2012-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31070832)。

通信作者:徐新喜, 研究员, 博士研究生导师, E-mail: xuxxl@sohu.com。

ry tract, and realize the verification of numerical simulation results.

Key words: Particle image velocimetry (PIV); Human upper respiratory tract; Flow field; Vortex structure; Numerical simulation

人体呼吸系统的主要生理机能是在大气和血液之间交换氧气和二氧化碳,维持体内各级组织进行新陈代谢所需要的气体环境。人体上呼吸道是人体呼吸系统的门户,是人体与外界环境进行气体交换的重要通道。对人体上呼吸道内的流场特性进行研究,可以深入了解大气环境状况等因素对人体健康的影响,并且对于认识气溶胶颗粒在人体上呼吸道内的沉积特点、探索有毒气溶胶对人体的危害和吸入药物气溶胶的治疗效果、研究呼吸系统的发病机理、优化和控制气溶胶的输运与沉积等具有非常重要的意义。

近年来,国内外许多研究人员通过数值仿真和模拟实验的方法对人体上呼吸道内的气流组织形式进行研究^[1-11]。但是目前研究也存在不足:一是计算机仿真研究较多,而实验研究相对较少;二是使用的模型大多数都为简化模型;三是实验研究多数局限在单一口喉模型、鼻腔模型或者支气管模型,缺乏对包括口腔到前3级支气管在内的完整人体上呼吸道模型的研究。

人体上呼吸道内气流运动为等温、不可压缩流动,多数情况下是层流或者低雷诺数的湍流流动。同时,涡结构特征及其演化形式是上呼吸道气流运动现象的显著特点,呼吸气流运动受呼吸模式、呼吸道结构特点等多因素的影响,经历由层流向湍流过渡以及由大尺度涡结构向小尺度涡结构过渡的湍流转捩过程,在湍流转捩过程中形成涡结构、流动分离、二次流等较为复杂的气流运动形式^[12-14],其内部流场极为复杂。粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术作为研究各种复杂流场的一种基本手段,因其具有全场、瞬时、无干扰等优点已广泛应用于各种流动测量与显示中,国外已经有很多学者将这一测量技术应用于通风领域的研究^[15-17]。从定常到非定常、低速到高速、单相到多相^[18],在同一时刻记录整个测量平面的有关信息,从而获得流动的瞬时速度场、脉动速度场、涡量场和雷诺应力分布等,很适合研究涡流、湍流等复杂流动结构的流场测量^[18-20]。根据以上特点,本文通过建立从口腔到

前3级支气管在内较为完整的真实人体上呼吸道实物模型,结合PIV流场可视化技术,搭建人体上呼吸道流场测量的实验装置,该装置可用于人体上呼吸道内气流组织形式和涡量分布等测量。

1 PIV 技术原理

PIV 技术的原理(见图1)比较简单:首先在流场中撒播跟随性和散光性良好且密度与流体相当的示踪粒子,并用激光产生的片光源照射流场待测区域,使用 CCD 相机以垂直片光源的方向对准该区域进行拍摄,通过连续两次或者多次曝光,即可得到两帧整个待测区域的粒子图像。然后采用互/自相关算法对图像进行处理,从而得到全流场的二维速度分布。实际上,PIV 就是通过测量某一示踪粒子的连续两次曝光图像之间的距离 $\Delta x = x_2 - x_1$ 测得速度,因而要求 CCD 相机在连续两次曝光之间的时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 足够小。根据粒子的位移与时间间隔相除,即可得到粒子的 Lagrange 速度,当时间间隔趋近于 0,可以近似认为等于 Euler 速度。若在整个测试区域得到各点的速度矢量,就获得了整场的流动信息。通过图像处理技术和计算分析软件等获取流场中一个切面内各点的速度、涡量、剪应力等流场特性。

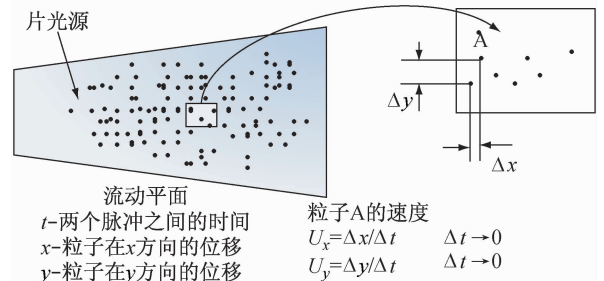


图1 PIV 技术原理

Fig. 1 Principle of PIV technology

2 实验装置的构建

该套实验装置的原理图如图2所示,主要由真实人体上呼吸道模型、气路系统和PIV系统3部分组成。

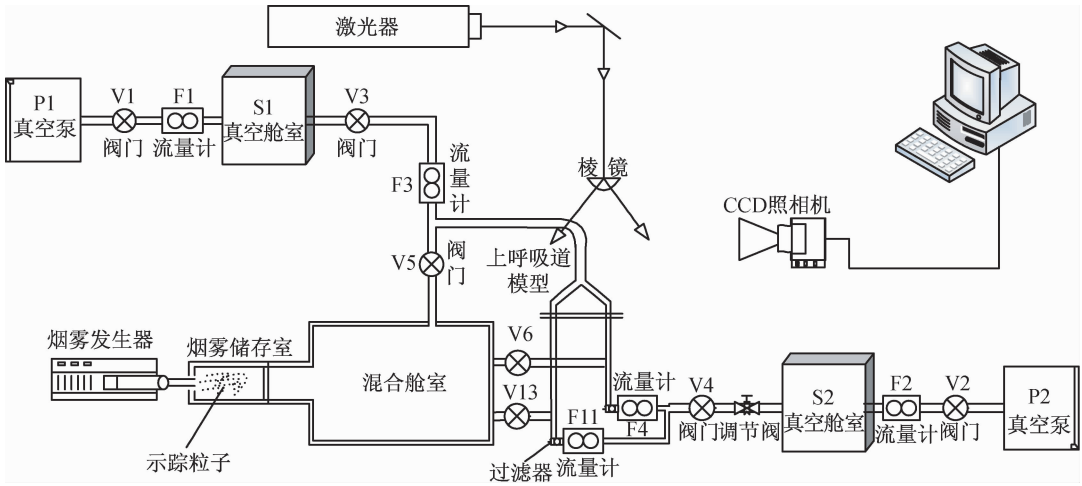


图2 人体上呼吸道流场 PIV 测量实验装置原理图

Fig.2 Principle of human upper respiratory tract flow field PIV measurement device

2.1 真实人体上呼吸道实验模型

基于正常人体上呼吸道 CT 扫描图像,运用高级图像处理技术三维重构人体上呼吸道模型并进行规范化处理,将规范化的真实人体上呼吸道模型数据输入到 SPS600 快速成型机,采用激光快速成型技术和树脂材料,制作透明的树脂真实人体上呼吸道实验模型,以便利用 PIV 进行测量。如图 3 所示,真实人体上呼吸道模型包括口腔、悬雍垂、咽部、会厌、喉部、声门、梨状窝、气管和前 3 级支气管;模型口腔进口简化为圆形,口腔腔体为拱形,口腔的进口沿水平方向,舌后区高度 33.55 mm;悬雍垂在口腔上壁靠近咽部前壁处,高为 6.14 mm;咽部形状不规则,矢状位大于冠状位,咽部和口腔底部平滑连接;模型喉部下方有声门开口,会厌在咽的内部突起,会厌



图3 真实人体上呼吸道实验模型

Fig.3 Experimental model of real human upper respiratory tract

与声门通过管型连接,会厌后区高度41.92 mm;梨状窝位于喉部底端两侧;声门与气管平滑连接;主气管分别连接两个 2 级支气管,2 级支气管分别连接长度和数目不同的 3 级支气管,主气管长 134.69 mm,各级支气管长短不一。上述气管平滑连接而成,支气管相对于主气管非对称分布。

2.2 气路系统

气路系统包括真空泵、真空舱室、电磁阀、调节阀、流量计以及烟雾混合舱室。第 1 真空气路包括第 1 真空泵和第 1 真空舱室,第 1 真空泵与第 1 真空舱室之间连接第 1 电磁阀和第 1 通过流量计,第 1 真空舱室通过依次设置第 1 电磁阀和第 1 流量计的管路分别与烟雾混合舱室和真实人体上呼吸道模型入口连接。第 2 真空气路包括第 2 真空泵和第 2 真空舱室,第 2 真空泵与第 2 真空舱室之间连接第 2 电磁阀和第 2 通过流量计,第 2 真空舱室通过依次设置调节阀、第 2 电磁阀和第 2 流量计的管路分别与 3 级支气管末端连接(图 2 中仅标出两个 3 级支气管)。各器件通过软管连接,连接处加装宝塔接头和喉箍,并用热熔胶进行密封,保证整个气路具有良好的气密性。考虑到施放示踪粒子方便和实验环境,供气系统采用负压方式,即在管路系统末端采用真空泵抽吸形成负压。真空舱室 S2 用来模仿人体肺部,电磁阀为常闭型控制气路开关,调节阀用来调节流量,流量计用以观测流量,烟雾混合舱室用以存储示踪粒子并起缓冲作用。

2.3 PIV 系统

PIV 系统采用美国 TSI 公司产品。主要包括成像系统、图像采集系统、图像分析及显示系统、示踪粒子添加系统 4 大部分组成。成像系统主要包括连续或脉冲激光器、片光源镜头组;图像采集系统包括跨帧 CCD 相机、帧抓取器和同步控制器;图像分析

及显示系统包括图像分析显示软件;示踪粒子添加系统包括气溶胶发生器和烟雾储存室。按照原理进行测量,通过采用专用软件(Insight)对粒子对进行处理,并用 Tecplot 软件进行图像后处理,即可得到测试区域的速度、涡量等。具体性能参数见表 1。

表 1 PIV 系统性能参数表

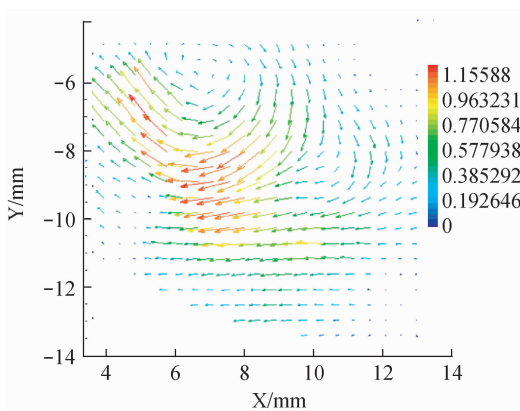
Tab.1 Parameters of PIV system

PIV 系统	设备	工作方式	性能指标
	双谐振 Solo PIV Nd: YAG 激光器	同步器控制 Q-switch 触发	工作频率:15 Hz;单个脉冲能量:120 mJ; 脉宽:6 ns;波长:532 nm。
成像系统	柱面镜		-15 mm
	球面镜		500 mm
	片光源		厚度约为 1 mm
图像采集系统	PowerView™2M 互相关 CCD 相机	同步器控制	分辨率 1 600 × 1 192 pixel;以 1 024 级灰度识别
	610034 型同步器	计算机 Insight 6.0 界面 控制	图像采集速度最大可达 30 帧/s;两帧最小时间 间隔为 200 ns
图像分析及显示系统	Insight 3G 软件 Tecplot 10.0 软件		互相关算法(cross-correlation)进行 3 次二维 FFT 运算
示踪粒子添加系统	Roscol700 烟雾发生器 乙二醇液体		使粒径范围分布在 0.5 ~ 50 μm

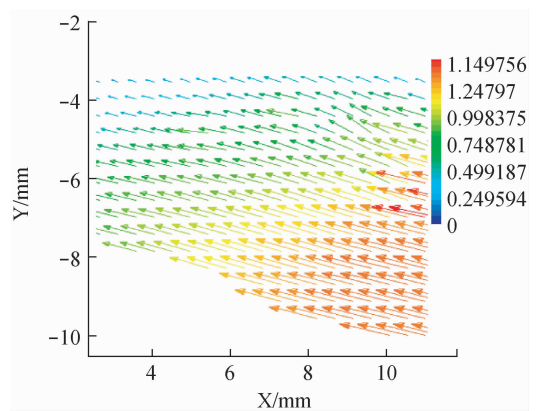
3 仿真实验与初步口腔测量实验

利用搭建的实验装置对人体上呼吸道实验模型

进行实验测量,图 4 所示为呼吸流量为 30 L/min 稳态呼吸模式下口腔部位的测量结果。此外,运用大涡模拟方法在相同条件下对人体上呼吸道数值仿真



(a) 口腔上部

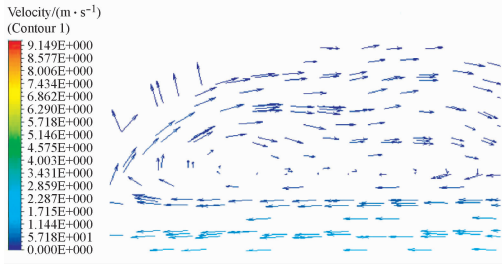


(b) 口腔下部

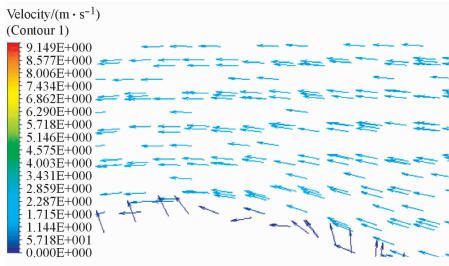
图 4 人体上呼吸道内口腔气流速度 PIV 实验测量结果

Fig.4 PIV measuring results of velocity in human upper respiratory tract (a) In front part of oral cavity, (b) In bottom part of oral cavity

模型进行数值模拟,入口边界假定速度均匀分布,支气管出口采用压力边界条件,出口相对压力为0,其余量梯度为0,仿真结果如图5所示。



(a) 口腔上部



(b) 口腔下部

图5 人体上呼吸道内口腔气流速度数值仿真结果

Fig.5 Simulation results of velocity in human upper respiratory tract (a) In front part of oral cavity, (b) In bottom part of oral cavity

气流进入口腔后,与硬腭部位气体发生搓挤,在口腔上部产生涡结构(见图4(a));口腔下部气流撞击舌苔表面,致使舌苔上部及口腔中部的气流速度较高,而口腔内气流速度较低(见图4(b))。对比图4、5可以看出,仿真结果和实验测量结果较为吻合,说明 PIV 技术不仅能够测量出人体上呼吸道内的气流组织形式,同时能够对仿真结果进行验证。

4 结语

本文研制的基于 PIV 技术的人体上呼吸道流场测量实验装置,设计合理、运行可靠、操作简便,可以实现对人体上呼吸道内速度场、涡量场等流场特性进行测量。既为验证数值仿真的准确性和可靠性提供手段,也为通过实验方法认识气流在人体上呼吸道内运动形式提供途径,同时为人们深入了解呼吸道内的气流及气溶胶颗粒的运动和沉积规律、有效防治呼吸道疾病提供科学依据。

参考文献:

- [1] Cui XG, Guthel E. Large eddy simulation of the unsteady flow-field in an idealized human mouth-throat configuration [J]. *J Biomech*, 2011, 44(16): 2768-2774.
- [2] 徐新喜, 赵秀国, 谭树林, 等. 人体上呼吸道内气流运动特性的数值模拟分析[J]. *计算力学学报*, 2010, 27(5): 881-886.
- [3] Lee JH, Yang N, Kim SK, *et al.* Unsteady flow characteristics through a human nasal airway [J]. *Resp Physiol Neurobi*, 2010, 172(3): 136-146.
- [4] Powell NB, Mihaescu M, Mylavarapu G, *et al.* Patterns in pharyngeal airflow associated with sleep-disordered breathing [J]. *Sleep Med*, 2011, 12(10): 966-974.
- [5] Mihaescu M, Mylavarapu G, Gutmark EJ, *et al.* Large eddy simulation of the pharyngeal airflow associated with obstructive sleep apnea syndrome at pre and post-surgical treatment [J]. *J Biomech*, 2011, 44(12): 2221-2228.
- [6] Brücker CH, Schroder W. Flow visualization in a model of the bronchial tree in the human lung airways via 3-D PIV [C]//*Proceedings of PSFVIP-4*. Chamonix, France: [s. n.], 2003.
- [7] Ramuzat A, Richard H, Riethmuller ML. PIV investigation of unsteady flows within lung bifurcations [C]// *Proceedings of 7th International Conference Laser Anemometry Advances and Applications*. Rome, Italy: [s. n.], 1999: 181-188.
- [8] Doorly D, Taylor DJ, Franke P, *et al.* Experimental investigation of nasal airflow [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2008, 222(4): 439-453.
- [9] Kelly JT, Prasad AK, Wexler AS. Detailed flow patterns in the nasal cavity [J]. *J Appl Physiol*, 2000, 89(1): 323-337.
- [10] Berg EJ, Weisman JL, Oldham MJ, *et al.* Flow field analysis in a compliant acinus replica model using particle image velocimetry (PIV) [J]. *J Biomech*, 2010, 43(6): 1039-1047.
- [11] 赵秀国, 徐新喜, 谭树林, 等. 人体上呼吸道内稳态气流运动特性的 PIV 初步试验研究[J]. *实验流体力学*, 2009, 23(4): 60-64.
- [12] Nagels MA, Cater JE. Large eddy simulation of high frequency oscillating flow in an asymmetric branching airway model [J]. *Med Eng Phys*, 2009, 31(9): 1148-1153.
- [13] Kleinstreuer C, Zhang Z. Airflow and particle transport in the human respiratory system [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 2010, 42: 301-334.
- [14] Luo HY, Liu Y. Modeling the bifurcating flow in a CT-scanned human lung airway [J]. *J Biomech*, 2008, 41

- (12): 2681-2688.
- [15] Posner JD, Buchanan CR, Dunn-Rankin D. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room [J]. *Energy Building*, 2003, 35: 515-526.
- [16] David M, Tanveer K, Mark G, et al. On particle image velocimetry (PIV) measurements in the breathing zone of a thermal breathing manikin [J]. *Ashrae Trans*, 2005, 111(2): 299-305.
- [17] Mo H, Hosni MH, Jones BW. Application of particle image velocimetry for the measurement of the airflow characteristics in an aircraft cabin [J]. *Ashrae Trans*, 2003, 109(2): 101-110.
- [18] 石惠娴, 王勤辉, 骆仲浚. PIV 应用于气固多相流动的研究现状[J]. *动力工程*, 2002, 22(1): 1589-1593.
- [19] 刘宝杰, 王光华, 高歌. PIV 在低速风洞中的应用[J]. *流体力学实验与测量*, 1998, 12(2): 55-63.
- [20] 梁爱国, 龙新平, 何培杰. 应用 PIV 技术测量射流泵内部流场[J]. *水泵技术*, 2004, 1(1): 10-14.

· 致读者 ·

论文写作中的注意事项

论文的写作前言主要概述研究的背景、目的、研究思路、理论依据等。有些研究还应说明该研究开始的具体时间。前方必须开门见、简要、清楚,切忌套话、空话、牵涉面过宽、详述历史过程或复习文献过多等。不要涉及本研究中的数据或结论。不要与摘要雷同。未经检索,前言中不可写“国内外未曾报道”等字样,也不可自我评价达到“xx 水平”或“填补 xx 空白”等。前言通常不需要标题。论著文稿的前言一般不超过 250 字;比较短的论文可以只用小段文字起前言作用。

方法主要介绍研究对象(人或实验动物,包括对照组)的选择及其基本情况,以及研究所采用的方法及观察指标。常用标题有“材料与方法”、“对象与方法”、“资料与方法”等。

临床研究需交代病例和对照者的来源、选择标准及研究对象的年龄、性别和其他重要特征等,并注明参与研究者是否知情同意。临床随机对照组研究应交代干预方法(随机方法)和所采用的盲法。实验研究需注明动物的名称、种系、等级、数量、来源、性别、年龄、体重、饲养条件和健康状况等。

个人创造的方法应详细说明“方法”的细节,以备他人重复。改进的方法应详述改进之外,并以引用文献的方式给出原方法的出处。原封不动地使用他人方法,应以引用文献的方式给出方法的出处,无须展开描述。

药品、试剂应使用化学名,并注明剂量、单位、纯度、批号、生产单位和生产时间。仪器、设备应注明名称、型号、规格、生产单位、精密度或误差范围。无须描述其工作原理。

统计学处理项应说明统计分析方法及其选择依据。

结果的叙述应客观真实、简洁明了、重点突出、层次分明、合乎逻辑,不应与讨论内容混淆。若文稿设有图表,则正文不需重述其全数据,只需摘述其主要发现或数据。若使用文字描述,内容冗长烦琐不易读懂,则应改用图或表来表达数据,以收到一目了然的效果。应认真核对正文和图表的数据,达到准确、统一。统计学分析应交代统计方法、统计值,仅有 P 值不能体现重要的定量信息。

讨论应着重讨论研究中的新发现及从中得出的结论,包括发现的意义及其限度,以及对进一步研究的启示。若不能导出结论,出可以进行必要的讨论,提出建议、设想、改进的意见或待解决的问题。应将研究结果与其他有关的研究相联系,并将本研究的结论与目的相关联。不必重述已在前言和结果部分详述过的数据或资料。不要过多罗列文献。避免作不成熟的主观推断。讨论中一般不应设置图或表。