

3.0T MRI 相位对比法对流体模型的定量测量研究

王荣品, 刘辉, 梁长虹, 黄美萍

【摘要】 目的:通过流体模型,检验 3.0T 磁共振相位对比法(3.0T PC-MRI)速度编码值(Venc)、编码方向的选择及其对流体动力学定量测量的准确性和稳定性。方法:固定流速和 Venc,检验不同编码方向下的流体信息;固定 Venc 和编码方向,检验 PC-MRI 对不同注射流率(0~5 ml/s)所测流速值与标准流速的差别,采用配对样本 *t* 检验以检验二者差异性。结果:只有选择 SLICE 或 SI 编码方向才能正确反映质子流动的方向;在 Venc 适当大于实际流速时,不同注射流率 PC-MRI 流速测量值与流速真实值之间差异无统计学意义($t = -0.861, P > 0.05$),二者呈显著正相关关系($r = 0.999, P < 0.001$)。结论:选择正确的 Venc 和编码方向是准确测量流体动力学的前提,3.0T PC-MRI 能客观、准确地测量流体模型的动力学信息,可用于临床血流定量测量研究。

【关键词】 定量测量; 磁共振成像; 血液动力学; 模型, 结构

【中图分类号】 R445.2; R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2010)05-0474-04

Study of quantitative measurement of a flow phantom by using phase-contrast MR imaging with 3.0T scanner WANG Rong-pin, LIU Hui, LIANG Chang-hong, et al. Department of Radiology, Guangdong Provincial People's Hospital, Guangdong Academy of Medical Sciences, South China Hospital Affiliated to Southern Medical University, Guangzhou 510080, P. R. China

【Abstract】 Objective: To investigate the selection of velocity encoding (Venc) and encoding direction with phase-contrast 3.0T MR imaging (3.0T PC-MRI) using a flow phantom, and to assess the accuracy and stability of the quantitative measurement of hydrokinetics. **Methods:** Firstly, holding the values of flow velocity and Venc, fluid dynamic information under different encoding directions were examined. Secondly, holding the values of Venc and encoding direction, the flow velocities measured by PC-MRI under different flow rates (0~5ml/s) were compared with standard flow velocities. Paired sample *t* test was employed to assess their statistical differences. **Results:** The direction of proton flow could only be correctly detected by selecting the encoding directions as SLICE or SI. Providing the value of Venc was appropriately greater than the actual flow velocity, no significant differences were existed between the measurements of flow velocity of PC-MRI with different flow rates and the corresponding actual flow velocities ($t = -0.861, P = 0.405$), a significant positive correlation ($r = 0.999, P < 0.001$) was existed. **Conclusion:** Selecting a correct values of Venc and encoding direction is the premise of accurate measurement of hydrokinetics, 3.0T PC-MRI proved to be an accurate and objective technique in providing the dynamic information of the flow phantom study and could be used in the clinical quantitative study of blood flow.

【Key words】 Quantitative measurement; Magnetic resonance imaging; Hemodynamics; Models, structural

相位对比磁共振成像(phase-contrast MR imaging, PC-MRI)利用流动质子产生的相位变化测量流速,是一种既能显示血管解剖结构,又能提供血流方向、血流速度及流量等血流动力学信息的磁共振技术。其测量结果的准确性受许多因素(包括扫描硬件如双极梯度场激励的间隔时间、梯度场面积,扫描参数,编码选择及后处理软件等)的影响,临床应用时需综合考虑这些影响因素并检验每一机型的准确性。迄今为止,多数血流动力学研究采用的是 1.5T MRI^[1-6],对于 3.0T MRI 的测量结果还未见系统研究。本研究通过流体模型,验证 3.0T PC-MRI 对血流动力学信息的反映能力,包括流向信息,流速测量的稳定性及准确

性,优化选择正确的速度编码(velocity encoding, Venc),旨在为心血管疾病 MRI 血流动力学检查的临床应用提供实验依据。

材料与方 法

1. 材料

扫描设备:3.0T 超导型磁共振仪(Signa Excite, GE Medical Systems)。ZOOM 模式:梯度场强 50 mT/m,切换率 150 mT/m/ms。专用 8 通道心脏相控阵线圈。磁共振兼容呼吸门控、心电门控及相关设备材料。磁共振兼容高压注射器 1 台。

自制流体模型:水模一个,内充满硫酸铜液体。敞口容器一只,用来盛装塑胶管排出的生理盐水。直径 1.8 mm(管道面积 0.025 cm²),长 2 m 塑胶管两根。0.9%生理盐水 2000 ml。把塑胶管两根对接,其中一根 U 形固定于水膜表面,直行部分两侧平行放置,塑胶管一端固定于敞口容器内,用于回收生理盐水,另外

作者单位:510080 广州,广东省人民医院,广东省医学科学院,南方医科大学附属华南医院放射科(第一作者现工作单位:550002 贵阳,贵州省人民医院放射科)

作者简介:王荣品(1970—),男,贵州人,南方医科大学博士研究生,副主任医师,主要从事心血管疾病影像诊断工作。

通信作者:梁长虹, E-mail: dr_liang62@hotmail.com

基金项目:广东省科技攻关基金资助项目(2006B36030026),广州市科技攻关基金资助项目(2006Z3-E0241)

一端接高压注射器。

2. 实验步骤和方法

将流体模型中心置于线圈中心,平行放置的塑胶管与磁体长轴一致,将线圈周围空余空间用海绵充填。通过高压注射器将塑胶管内充满生理盐水,并排净气泡。扫描序列为三平面定位图,横断面 2D 快速电影 PC 序列,扫描参数为 TR/TE=自动选择最小重复时间/最小回波时间,翻转角 20° ,视野 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,矩阵 256×256 ,ETL:1,激励次数 1,带宽 31.25 kHz。扫描层厚 5.0 mm,扫描时相 30。采用一健康志愿者心率作为该序列的模拟心率(平均为 73 次/分),心电触发方式为回顾性门控,触发延迟时间为最短。

第一组:固定流率 2 ml/s,固定 Venc 为 100 cm/s。Venc 方向分别选择 Slice(层面选择),All(各方向),AP(前后),RL(右左),SI(上下)。共扫描得到 5 组数据。

第二组:固定 Venc 150 cm/s,固定 Venc 方向为 Slice。注射流率选择 1~5 ml/s 逐渐递增,间隔为 0.5 ml/s。随后进行了注射流率为 0 ml/s 的 MRI 扫描,共得到 10 组数据。

3. 图像处理

将所得图像(相位图、幅度图)数据传到独立电脑,使用 segment 软件进行数据分析。对流体模型进行流速测量,在图像放大率(6 倍)一致的情况下,前向及反向血流 ROI 保持一致,均为 4 个像素。所得到数据转

存入 Excel 表,并把一个心动周期内所有时相的数据排序,以时间为横坐标,可得到一个心动周期的时间-流速曲线。

4. 统计分析

应用 SPSS 13.0 统计软件包做分析处理。不同注射流率 PC-MRI 测得的流速值与相应注射流率对应流速真实值之间的比较采用配对样本 t 检验,并用 Pearson 相关分析以检验二者相关性,计算相关系数 r ,取 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

由于塑胶管采用 U 形放置,因此一次 PC-MRI 扫描得到的相位图可提供前向及反向流动两组数据。前向流动在 Venc 设置适当的情况下表现为低信号,反向流动表现为高信号。同时可得到相应层面的幅度图。

1. 速度编码方向与流体信息的关系

SLICE 能正确反映液体流动方向信息,包括前向流动为低信号,反向流动为高信号。而 Venc 方向为 ALL 者,前向及反向液体流动均显示为高信号改变,不能正确反映血流信息。Venc 方向为 AP 和 RL 者,相位图像上无模拟血管显示。Venc 方向为 SI 者,显示结果与 SLICE 一致(图 1)。

2. 不同注射流率与流速及速度编码的关系

当注射流率 1.0~3.5 ml/s 时(实际流速从 39.3~137.6 cm/s),均可正确显示前向流动液体低信

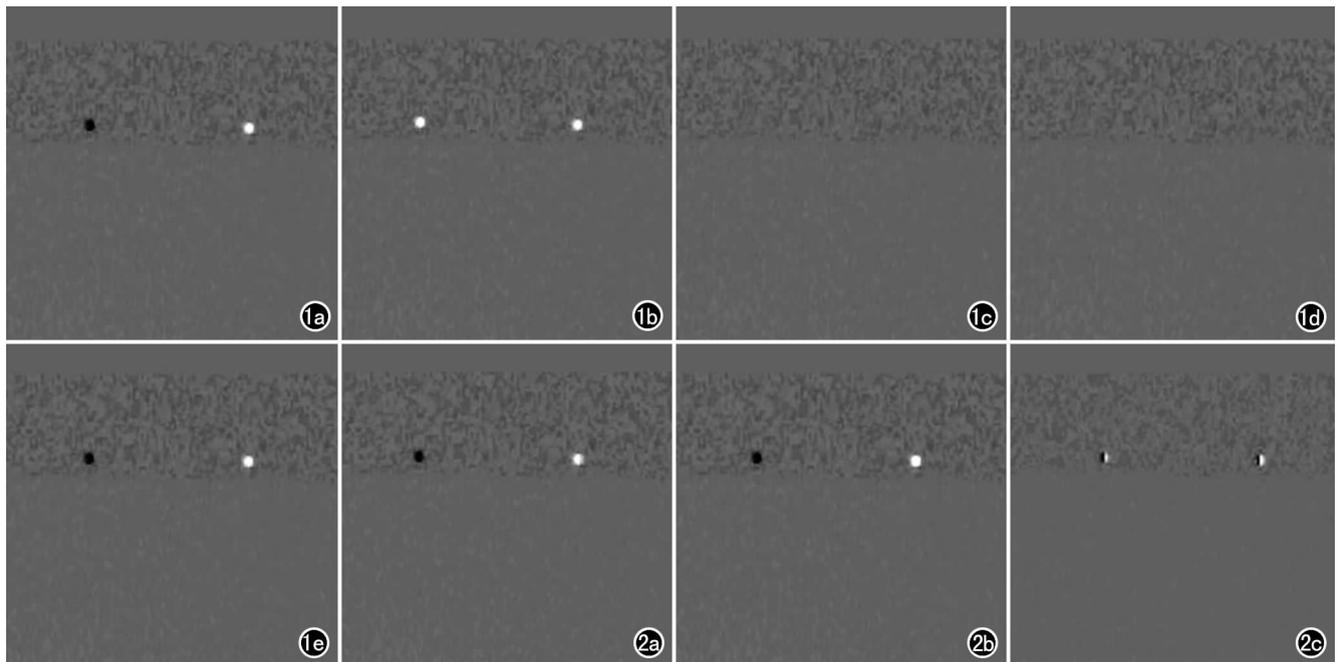


图 1 注射流率 2 ml/s, Venc 为 100 cm/s, Venc 方向分别为 Slice, All, AP, RL 及 SI 扫描得到的同一层面的相位图。a) Slice 相位图显示前向流动为低信号,反向流动为高信号; b) All 相位图显示前向及反向均为高信号; c) AP 相位图,无流动信息显示; d) RL 相位图,无流动信息显示; e) SI 相位图与 Slice 相位图类似。图 2 不同注射流率与 Venc(150 cm/s)的关系。a) 流率为 1 ml/s 能正确显示前向流动液体低信号及反向流动高信号; b) 流率为 2 ml/s,也可正确显示前向流动液体低信号及反向流动高信号; c) 流率为 4 ml/s(实际流速为 157.3 cm/s,超过 Venc 值 150 cm/s),可见明显相位混淆伪影。

号及反向流动高信号(图 2a、b)。注射流率在 4~5 ml/s(实际流速从 157.3~196.6 cm/s),超过 V_{enc} 值 150 cm/s,前向及反向流动均显示有不同程度相位混淆伪影,表现为前向流动低信号内出现不同程度高信号,而反向流动高信号中出现不同程度低信号(图 2c),实际流速超过 V_{enc} 值愈大,相位混淆伪影愈明显,未进行血流分析。注射流率分别为 0、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 和 3.5 ml/s 时,前向及反向流速测量值见表 1,所得一个心动周期的时间-流速曲线见图 3。

表 1 PC-MRI 测量的前向及反向流速与实际流速的比较

注射流率 (ml/s)	PC-MRI 测量流速 (cm/s)	实际流速 (cm/s)
0	0	0
1.0	-40.6*	-39.3
1.5	-61.2	-59.0
2.0	-79.1	-78.6
2.5	-97.2	-98.3
3.0	-126.7	-117.9
3.5	-142.3	-137.6
0	0	0
1.0	41.6	39.3
1.5	60.2	59.0
2.0	77.3	78.6
2.5	95.9	98.3
3.0	125.5	117.9
3.5	134.7	137.6

注:负值表示为前向流速,正值表示为反向流速。

结果显示,不同注射流率 PC-MRI 流速测量值与流速真实值之间差异无统计学差异($t = -0.861, P = 0.405 > 0.05$),PC-MRI 测量流速与实际流速呈显著正相关关系($r = 0.999, P < 0.001$)。

讨论

1. PC-MRI 的技术原理

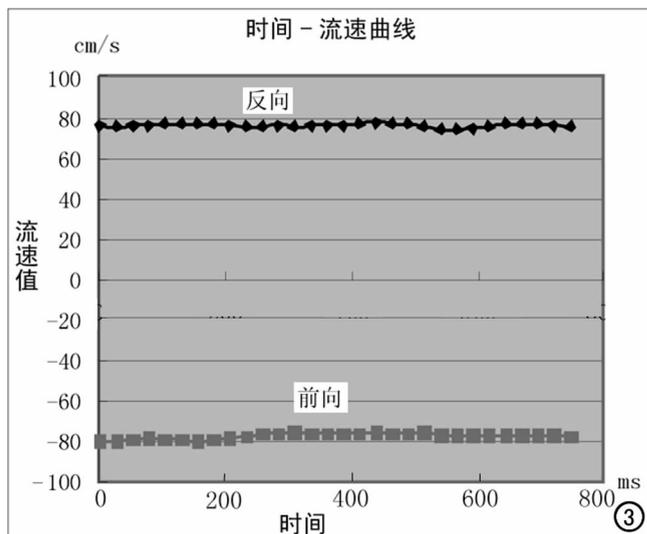


图 3 注射流率为 2 ml/s, V_{enc} 方向为 Slice, V_{enc} 值为 150 cm/s 所得一个完整心动周期的时间-流速曲线,包括前向及反向血流。横坐标表示一个心动周期的时间(约 750 ms),纵坐标表示一个心动周期内 30 个时相对应的流速值。

PC-MRI 是利用流动所致的宏观横向磁化矢量的相位变化来抑制背景、突出血管信号的一种方法^[7]。相位编码采用双极梯度场对流动质子进行编码,即在射频脉冲激发后,于层面选择梯度和读出梯度之间施加两个大小、持续时间完全相同,但方向相反的梯度场。当应用第一个梯度场时,静止和运动组织的质子都开始累积 M_{xy} 相位变化,随即应用第二个梯度场,静止质子群由于位置没有变化,两极梯度场造成的相位差异得到抵消;而流动质子群由于位置发生移动,因此相位变化不能得到抵消而保留了相位差,利用这种差别即形成相位对比。流动质子群的相位变化与流速有关,流速越快,相位变化越明显。通过对 V_{enc} 梯度场的调整,观察流动质子的相位变化,可检测出流动质子的运动方向、流速和流量等血流动力学信息。PC-MRI 扫描后可得到两组相对应的图像:幅度图像及相位图像。幅度图像的信号强度仅与流速有关,一般用作提供解剖信息,不具有血流方向信息,不能进行定量测量。相位图像上血流信号强度与流速有关,并可提供流速的定量及方向信息,用作血流动力学信息分析。

2. 速度编码方向的影响

正确选择 V_{enc} 方向非常重要,只有沿 V_{enc} 方向上的流动质子才会产生相位变化。如果血管垂直编码方向,PC-MRI 则不能显示血流信息。在本次选择的各个 V_{enc} 方向(SLICE, ALL, AP, RL, SI)上,只有 SLICE 方向和 SI 方向能够正确显示血流信息,而其它三种方向均不能正确显示血流信息。其原因在于 SLICE 选项是扫描层面为任意方向时, V_{enc} 方向均始终与扫描层面方向垂直;由于并行模拟血管的放置与主磁场方向一致,因此液体流动的方向与主磁场一致(前向)或相反(反向),而本研究的扫描层面为横断面,所以 V_{enc} 方向设置为 SLICE、SI 时, V_{enc} 方向与液体流动方向一致,因此能够正确反映血流信息。当血管内实际血流与 V_{enc} 方向一致时呈现为亮信号影,与 V_{enc} 方向相反时呈现为暗信号影。当血流方向与主磁场有一定角度时,SI 选项的测量结果可能错误。因此,SLICE 选项可保证 V_{enc} 方向与质子流动方向平行,能够满足大多数血流测量需要。

3. 速度编码值的影响

V_{enc} 值决定了能测量出来的最大和最小流速范围。如设定 V_{enc} 为 150 cm/s 时,所能测量的质子流速在 ± 150 cm/s 之间,其相位变化在 180° 内。而对于流速在该范围以外的流动质子,其相位变化也超过了 180° ,将被误认为是相位的反向变化,从而造成反向血流的假象,称为相位混淆。相位混淆一旦没有得到认识和校正,则引起流速测量值错误,甚至引起流动方向识别错误。本研究表明, V_{enc} 设置为 150 cm/s 时,注

射流率 1.0~3.5 ml/s 时(实际流速从 39.3~137.6 cm/s)均可正确显示前向流动液体低信号及反向流动高信号,PC-MRI 测量流速值与实际流速值有较好的一致性(图 2a、b)。当流率为 4 ml/s (实际流速为 157.3 cm/s,仅略大于 Venc 值)时,前向及反向流动均出现不同程度相位混淆(图 2c)。

因此,选择适当大的 Venc 可以减少相位混淆的发生概率。尽管有研究认为,设置大的 Venc 可导致流速-噪声比下降^[8],即噪声对测量结果的影响增大。本研究发现,Venc 值在大于实际流速约 10%~80% (如本实验流率 1.0~3.5 ml/s 所对应的实际流速)范围内,前向及反向流体的边缘均能清楚显示,PC-MRI 流速测量值与实际流速较为接近,较大的 Venc 值并没有对测量结果产生明显影响,与 Greil 等^[9]的研究结果接近。在流速测量准确的条件下,如能准确勾画出兴趣区的横断面积,即可准确测量流量(流量=流速×血管截面积)。由于心血管系统血流动力学复杂,在病理状态下流速变化范围较大,测量前也较难估计,因此临床应用时选择更高一些的 Venc 值有利于避免相位混淆和减少测量误差。但需要注意的是,过高的 Venc 值会降低对慢血流的检出能力。

4. 其他因素的影响

PC-MRI 血流测量还受设备因素(包括扫描硬件,扫描参数及后处理软件等)的影响,利用体外模型对这些影响因素进行分析是简便、切实可行的方法。本研究采用双梯度线圈的 ZOOM 模式,比普通的 WHOLE 模式能获得在更小的视野范围内高的梯度切换率和优质的图像,从而保证对管径小至 2 mm 管道测量的准确性。为了使基础实验中的数据能够应用于临床,扫描参数设置也以模拟临床应用(视野选择较临床应用小,其他参数均为临床应用参数)为主。目前,多数研究是在 1.5T MRI 设备上完成的^[9-12],把实验模拟血管的人工管道放置于水模溶液(硫酸铜溶液、明胶凝胶或自来水)中^[9,13,14],创造了一种均一而稳定的血管周围环境;而实际进行人体血管血流测量时,大血管周围常存在复杂的组织界面(如气体-软组织界面,软组织-骨界面等)。在高场强(如 3.0T)情况下,局部磁场不均匀性可能会更加明显,而磁场不均匀及伴随的梯度场误差可引起假性相位位移^[9],直接影响 PC-MRI 血流测量结果的准确性。因此,笔者模拟气体-软组织界面,将塑胶管固定于水模的表面,检验在这种情况下,3.0T PC-MRI 测量血流信息的准确性。由于塑胶管采用 U 形放置,一次 PC-MRI 扫描可得到前向及反向两组数据,既减少了实验次数又节约了时间。

综上所述,选择正确的 Venc 方向是准确反映质

子流动方向的前提;正确的 Venc 值是准确测量血流动力学信息的重要保证,在一定的范围内优先选择较大的 Venc 值可避免相位混淆带来的错误信息。3.0T PC-MRI 能够在复杂组织界面准确、稳定地测量血流动力学信息,并可准确测量小至 2 mm 管径的血管。

参考文献:

- [1] de Haan MW, Kouwenhoven M, Kessels AG, et al. Renal artery blood flow: quantification with breath-hold or respiratory triggered phase-contrast MR imaging[J]. *Eur Radiol*, 2000, 10(7): 1133-1137.
- [2] Koskenvuo JW, Hartiala JJ, Knuuti J, et al. Assessing coronary sinus blood flow in patients with coronary artery disease: a comparison of phase-contrast MR imaging with positron emission tomography[J]. *AJR*, 2001, 177(5): 1161-1166.
- [3] Yildiz H, Erdogan C, Yalcin R, et al. Evaluation of communication between intracranial arachnoid cysts and cisterns with phase-contrast cine MR imaging[J]. *AJNR*, 2005, 26(1): 145-151.
- [4] Oktar SO, Yucler C, Karaosmanoglu D, et al. Blood-flow volume quantification in internal carotid and vertebral arteries: comparison of 3 different ultrasound techniques with phase-contrast MR imaging[J]. *AJNR*, 2006, 27(2): 363-369.
- [5] Pujadas S, Reddy GP, Weber O, et al. Phase contrast MR imaging to measure changes in collateral blood flow after stenting of recurrent aortic coarctation: initial experience[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2006, 24(1): 72-76.
- [6] Sankari S, Lehmann P, Gondry JC, et al. Phase-contrast MR imaging support for the diagnosis of aqueductal stenosis[J]. *AJNR*, 2009, 30(1): 209-214.
- [7] 杨正汉, 冯逢, 王霄英, 等. 磁共振成像技术指南-检查规范: 临床策略及新技术应用[M]. 北京: 人民军医出版社, 2007. 238.
- [8] Pelc NJ, Herfkens RJ, Shimakawa A, et al. Phase contrast cine magnetic resonance imaging[J]. *Magn Reson Q*, 1991, 7(4): 229-254.
- [9] Greil G, Geva T, Maier SE, et al. Effect of acquisition parameters on the accuracy of velocity encoded cine magnetic resonance imaging blood flow measurements[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2002, 15(1): 47-54.
- [10] Lethimonnier F, Bouligand B, Thouveny F, et al. Error assessment due to coronary stents in flow-encoded phase contrast MR angiography: a phantom study [J]. *J Magn Reson Imaging*, 1999, 10(5): 899-902.
- [11] Arheden H, Saeed M, Tornqvist E, et al. Accuracy of segmented MR velocity mapping to measure small vessel pulsatile flow in a phantom simulating cardiac motion[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2001, 13(5): 722-728.
- [12] Lagerstrand KM, Lehmann H, Starck G, et al. Method to correct for the effects of limited spatial resolution in phase-contrast flow MRI measurements[J]. *Magn Reson Med*, 2002, 48(5): 883-889.
- [13] 高歌军, 冯晓源, 耿道颖, 等. 液体流率 MR 测量实验研究[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2004, 10(3): 145-148.
- [14] 李彩英, 田建明, 刘辉, 等. 利用磁共振相位对比法对非搏动流体模型的定量测量研究[J]. *中国医学影像技术*, 2006, 22(4): 535-537.

(收稿日期: 2009-10-09)