

《中国健康成人超声心动图数据分析与生
理性变异矫正的数学方法》
项目结题报告

指导老师：曾雪迎

项目成员：李璇、宋晓菲、王静、朱甲文、孙菊颐

目录

摘要.....	3
1. 引言.....	3
1.1 研究背景及意义.....	3
1.1.1 研究背景.....	3
1.1.2 研究意义.....	4
1.2 国内外研究现状.....	4
1.3 研究内容与研究方法.....	5
1.3.1 研究内容.....	5
1.3.2 研究方法.....	5
1.4 数据介绍.....	6
2. 研究过程.....	6
2.1 年龄拐点分析.....	6
2.1.1 数据预处理.....	6
2.1.2 相关性分析.....	7
2.1.2 计算校正值.....	8
2.1.3 超声心动图指标与年龄的局部线性回归.....	8
2.1.4 超声心动图指标的聚类分析.....	10
2.1.5 求解年龄拐点.....	11
2.2 利用神经网络校正超声心动图指标值.....	14
2.2.1 数据预处理.....	14
2.2.2 多层感知机模型.....	14
2.2.5 存在的问题与不足.....	19
3. 总结与展望.....	20
4. 参考文献.....	20
附录.....	22

摘要

超声心动图的参数正常值是判断人体心脏的心室，心壁，瓣膜等健康程度的重要指标。但是目前我国大多还在采用根据欧美所提供的标准，不能很好地适用于中国人群的临床诊断。本文基于一千二百余位中国健康成人的超声心动图指标的数据，利用 Python 多层感知机模型训练年龄、身高、体重、性别等自变量与超声心动图指标的关系，36 个指标成功校正 34 个指标，但与传统的回归拟合相比，神经网络中多层感知机的非线性回归结果并未体现出优势，因此神经网络用于医学数据的回归预测可靠性还需进一步验证。对数据进行初步分析得出大部分指标与年龄有显著相关关系，进而推测存在关键年龄点使得超声心动图功能性参数指标值在此点前后有较大差别，为了寻找年龄关键点，本文利用校正的思想将指标值关于身高、体重、性别的影响进行消除，从而放大年龄对指标值的影响。本文分别利用滑动窗口的回归分析法与滑动窗口的秩和检验法寻找关键年龄点，最终确定男性 40 岁、55 岁和女性 45 岁、60 岁为关键年龄点，并分析了其实际意义。

关键词：多层感知机模型，校正，滑动窗口，关键年龄点

1. 引言

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

近年来，心血管疾病的致死率在不断的提高，已逐渐成为人群中的常见病。正确判断心血管功能是否为生理性衰老在临床医学上具有重要的意义。多普勒超声心动图可以为临床上对心血管疾病的诊断和治疗提供心脏和大血管解剖与功能的大量丰富的可视化信息，现在已经成为临床心脏病学优先选用的影像学方法。多普勒超声心动图的参数正常值是判断人体心脏的心室，心壁，瓣膜等健康程度的重要指标，因此对于多普勒超声心动图的研究显得尤其重要。

但是目前多普勒超声心动图的参数我国大多还在采用根据欧美所提供的标准，其正常参考值是根据对西方健康成人的研究而得，由于饮食习惯、生长环境等的不同，欧美国家与我国的健康人的身体指标并不完全相同，不能完全代表我国的健康成人的参数标准，所以仅仅采用欧美指标在临床上并不能很好的判断病人的健康程度。另外，虽然我国在八十年代对超声心动图参考值相关问题进行过研究，并得到了一套基于我国健康成年人的多普勒超声心动图参数标准，但是由于当时选取的样本量并不充足，设备也比较落后，加上由于总体生活水平提高，我国人口的身体素质不断提高，过去的标准并非适用于现在我国健康人群。如今，

虽然在我国某些地区已经有针对某一地区的超声心动图的正常指标范围,但其并未得到广泛的认可。此外,基于我国国内已测量的成年人多普勒超声心动图参数,探究是否具有实际的功能参数间的年龄相关性拐点,在目前临床上尚处于空白,并未有研究表明具体的年龄拐点。

1.1.2 研究意义

基于我国关于超声心动图的正常参考值的研究来看,目前还并没有针对汉族健康成年人的完备的超声心动图的正确指标体系,缺少超声心动图的功能性参数随年龄变化的相关变化规律,同时急需探寻具有代表性的有研究意义的年龄关键点。所以研究并找出中国健康成人超声心动图数据分析与生理性变异校正的数学方法,建立起比较完备且对我国健康成人具有针对性的超声心动图正确指标就显得尤为重要与迫切。本项目着重探索年龄对心动图各项功能参数的影响,研究分析参数随着年龄增大而发生的变化,从而找出参数产生变化的关键年龄拐点。本项目也尝试利用神经网络和深度学习的方法,在大量数据的基础上使用机器训练数据从而达到一个比较理想的拟合效果,分析各个指标与基础变量相关性,从而找到对医学上有利有价值的关系。简而言之,本项目通过数学统计上的分析给医学上超声心动图指标的检测提供有价值的参考。

1.2 国内外研究现状

国内外对于胎儿、新生儿以及儿童的超声心动图的正常参考值的研究比较多,并且取得了许多成果。

(一)国内:

(1)伍文霞、温莎洛等人探究了怀孕中晚期的正常胎儿的静脉导管多普勒血流参数正常值参考范围^[1]。

(2)李嘉铃和彭炳蔚等人着重研究了健康婴幼儿经颅多普勒超声各参数正常值^[2]。

(3)上世纪八十年代,孙静平等对中国健康成年人超声心动图各个切面腔径的正常值及其与性别、年龄、体重、体表面积的关系进行了研究,建立起各切面腔径的线性回归方程^[3]。

(4)吴培华、于超等的《成人超声心动图基本测量参数正常参考值的初步研究》探讨正常成人超声心动图各基本测量参数的正常参数值,并与性别及年龄等因素进行相关性分析^[4]。

(5)张义连的《成人超声心动图的正常值测量及其影响因素》研究发现性别、年龄等与超声心动图测量结果服从正态分布,并且成人的超声心动图的正常值测量不仅会受到年龄、性别、体重、收缩压、及心律等自身因素的影响,还会受观察人员操作上失误的影响^[5]。

(二) 国际：

(1) 通过 EMINCA 研究及国外同类研究结果显示，超声心动图参数正常值受性别、年龄和体型等生物学特征变量的显著影响，如果忽视不同性别、年龄和体型对超声心动图测量值所造成的生理性差异，全部采用一个标准，则必将导致心腔大小及心脏功能正常与否的误判和误诊。

(2) 齐鲁医院姚桂华教授、中国海洋大学曾雪迎副教授等在张运院士的指导下，提出了优化的多变量非等距模型^[6]，最终成功地对 34 个二维超声心动图参数进行了多变量非线性校正，消除了年龄、性别、身高、体重所产生的生理性影响，验证该模型的校正成功率达 100%。相关研究论文在国际超声影像学领域的顶级杂志《Journal of the American Society of Echocardiography》上发表，不仅表明超声心动图正常值的“中国标准”得到了国内外同行的广泛肯定，而且成功解决了长期困扰血管影像学领域的关于超声心动图测值生理性变异校正的方法学难题，填补了该研究领域的国内外空白。

1.3 研究内容与研究方法

1.3.1 研究内容

本项目研究内容主要有两个方面：

1. 探寻年龄因素影响超声心动图各功能参数的客观规律，针对数据的实际情况对数据进行了预处理工作，补全缺失值和剔除离群值。分析性别，年龄与指标之间的相关性，进而找出年龄与各项指标之间显著相关的指标，建立回归方程得到修正值并检验修正值的正确性和回归方程的合理性，绘制趋势图，对数据进行平滑性处理，分析关键的年龄拐点，探寻中国健康成年人生命周期中多普勒功能性变量指标的基本变化趋势和年龄的关键点，寻找医学上有利用价值的关系，对临床检测检查和疾病诊断的重点人群给出相应建议，使之更好地服务于临床。

2. 基于临床实验数据，尝试利用神经网络与深度学习中的模型来挖掘生理性指标影响超声心动图数据的具体量化关系，并探索生理性变异的校正方法，为医学上对于心血管疾病的诊断和成年人多普勒超声心动图的指标异常判断提供参考。

1.3.2 研究方法

我们首先对原始数据进行预处理，通过取前后共 20 个数据的平均值来补全缺失值，剔除离群值，之后利用 SPSS26.0 中的独立 T 检验方法分析性别对指标的影响，寻找与性别有关的指标。我们再利用 SPSS26.0 中的相关性分析方法，得到与年龄有显著关系的指标，同

时利用 MATLAB 对 70%组别的数据进行多元线性回归，建立回归方程并得到修正值，利用 30%组别的数据检验回归方程的合理性，利用回归方程绘制出年龄与指标的关系图，利用局部加权回归方法对曲线进行非参数拟合，利用欧氏距离对指标进行聚类分析，最后利用滑动窗口分析寻找年龄关键点。

我们利用基于 Python 的神经网络等方法，利用 70%的校正值数据进行训练，得到更为精确的回归方程，对超声心动图的生理性变异进行校正，最终找到符合中国健康成人的超声心动图正常值的参考指标。

1.4 数据介绍

本文所用数据是 43 家三甲医院严格按照一定标准筛选出的 18 岁至 79 岁健康成年人通过严格的医学技术测量得到的超声心动图各项指标值，共计 1224 个样本，其中男性样本 579 个，女性样本 645 个，每个样本测量 6 个生理特征变量：性别、年龄、身高、体重、体重指数、体表面积，以及 36 个超声心动图功能性参数：E、A、EA、DT、Aduration、ArDuration、IVRT、IVST、LVET、Ems、Ams、EmAms、EEms、Sms、EmI、AmI、SmI、EmAmI、EEml、Emmean、Ammean、Smmean、EmAmmean、Eemmean、ETV、ATV、EATV、EmTV、AmTV、SmTV、EmAmTV、EEemTV、AVV、LOVTV、PVV、RVOTV。

2. 研究过程

2.1 年龄拐点分析

为了寻找引起指标变化的年龄关键点，本文将身高、体重、性别对指标的影响进行消除，放大年龄对指标值的影响效果，再利用校正值进行年龄拐点的寻找。年龄拐点寻找时，男性和女性的指标分别进行聚类，分别分为 5 类，每类指标通过滑动窗口分析得到年龄拐点。

2.1.1 数据预处理

首先对样本中的某些指标的缺失值，我们采取平均值替代的方法处理，若使用样本整体的指标均值代替，会出现不符合该样本年龄指标值的情况，因此我们用该样本年龄前后 20 个样本的均值代替，男性数据补充缺失值 62 个，女性数据补充缺失值 75 个，由于个别样本缺失值过多，因此将样本排除，男性去除样本 2 个，女性去除样本 1 个，最终样本剩 1221 个。

其次对样本中某些指标的离群值，我们通过筛选得到与指标值在数量级有明显不同的数据，采取平均值替代或移动小数点的方法，对于普通的离群值，那有可能成为寻找年龄拐点

时的重要数据，因此并未修改，以最大程度保证数据的原始性和真实性。

2.1.2 相关性分析

对各个指标进行独立 T 检验，检验性别对各个指标是否显著相关，得到与性别有关的指标：E、A、EA、Aduration、LVET、Ams、EmAms、EEms、Sms、Sml、EmAml、E/Eml、Ammean、Smmean、EmAmmean、Eemmean、ETV、EATV、EmTV、SmTV、EmAmTV、AVV、PVV，检验结果如附录表 1。

有些指标与性别有显著关系，说明男性与女性的指标数据分布不相同，是否与年龄有显著相关关系也会有所差别，对于此类指标我们将男性与女性分开分析，而对与性别无显著关系的指标，我们将男性与女性合并分析，以增加样本量使结果更可靠。通过各指标与年龄的相关性分析，我们得到与年龄有显著相关关系的指标：男性：E、A、EA、Ams、EmAms、EEms、Sms、Sml、E/Eml、EmAml、Ammean、Smmean、EmAmmean、Eemmean、ETV、EATV、EmTV、EmAmTV、AVV；女性：E、A、EA、Ams、EmAms、EEms、Sms、Sml、E/Eml、EmAml、Ammean、Smmean、EmAmmean、Eemmean、ETV、EATV、EmTV、SmTV、EmAmTV、AVV；男女合并：DT、ArDuration、IVRT、IVST、Ems、Eml、Aml、Emmean、ATV、AmTV、EEemTV、LOVTV、RVOTV，检验结果如附录表 2、表 3、表 4。

本文只研究与年龄显著相关的指标的年龄拐点，而与年龄无关的指标研究年龄拐点无实际意义。根据相关性分析结果，最终男性排除了 4 个指标，女性排除了 3 个指标。

此外，我们做了各个自变量、指标之间的相关性分析，初步确定各自变量、指标彼此的相关关系，结果如图 1。

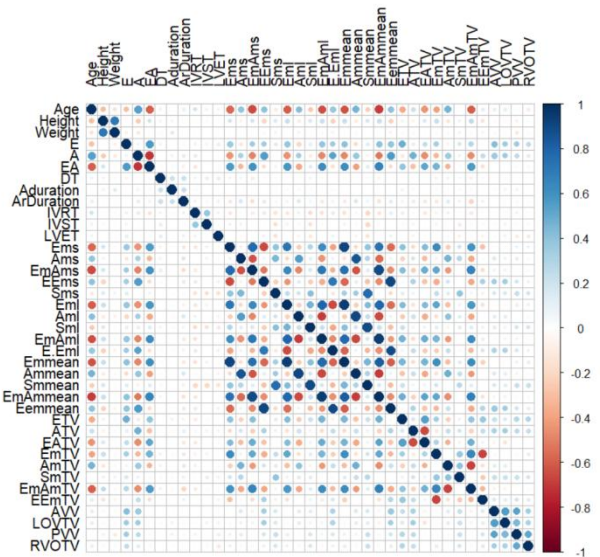


图 1 年龄、身高、体重、超声心动图各指标之间的相关关系

2.1.2 计算校正值

我们将总样本的 70% 做身高、体重、性别的回归拟合，根据姚桂华等人的研究^[6]，将身高 $Height$ 、体重 $Weight$ 对数化，利用对数化后的自变量与各指标进行线性回归，得到回归系数，写出回归方程（附录表 5）：

$$Y_p = e^{a+dSex} Height^b Weight^c,$$

则 Y_p 表示预测方程，将身高、体重、性别数值带入预测方程中得到指标值的预测值，由于 Y_p 是根据身高、体重、性别预测出的，预测值必然与身高、体重、性别有关，而原始指标值 Y_u 与年龄、身高、体重、性别等变量相关，取比值：

$$Y_c = \frac{Y_u}{Y_p},$$

可知 Y_c 应消除了身高、体重、性别的影响，即 Y_c 与年龄有显著相关关系，与身高、体重、性别无显著相关关系。除此之外， Y_c 应与原始指标值有显著相关关系。按照此标准，我们判断校正是否成功，相关性分析结果如附录表 6。

利用 30% 的样本检验回归方程的可靠性，类似上面的方法，将 30% 样本的自变量身高、体重、性别带入回归方程，得到预测值，取比值：

$$Y_c = \frac{Y_u}{Y_p},$$

按照上述校正值检验标准分析，利用 SPSS 得到校正值检验结果如附录表 7。

由上述检验结果可知，各指标的校正较为成功，在与年龄的相关性分析中，有些指标校正之后与年龄并不显著相关，与年龄不显著相关的原因可能是原始指标值与年龄的相关性较弱，在消除身高、体重、性别影响时对年龄的相关性产生了干扰，导致弱显著相关性变为不显著相关。校正值一定程度上消除了身高、体重、性别的影响，因此年龄对指标值的影响更为突出，从而起到了放大年龄对指标的影响的效果。

2.1.3 超声心动图指标与年龄的局部线性回归

Lehallier 等对血浆蛋白水平进行了 z-score 标准化，并用局部加权线性回归方法绘制出 LOESS 曲线，估计了 2925 个血浆蛋白的运动轨迹。通过蛋白质轨迹的聚类识别出了衰老过程中的线性和非线性变化。同时根据全局轨迹的相似性进行分组聚类，较粗的线代表每个聚类的平均轨迹^[9]。本论文中，我们采用局部加权线性回归绘制出年龄与指标关系的 LOWESS 曲线，并用滑动窗口法识别出年龄拐点。

利用数据预处理后的全部样本的校正值数据，做各个指标与年龄的局部线性回归。由于线性回归可能存在欠拟合现象，而局部线性回归是将预测点左右区域进行拟合，即分段线性

拟合，再组合成一条拟合曲线，从而使拟合效果优化，拟合优度如下表 1.

指标	男性拟合优度 (R^2)	女性拟合优度 (R^2)
DT	0.0127	0.0249
ArDuration	0.0152	0.0148
IVRT	0.0493	0.0232
IVRT	0.0165	0.0072
Ems	0.2508	0.2595
Em1	0.2853	0.3191
Aml	0.1414	0.0770
Emmean	0.3192	0.3370
ATV	0.0489	0.0287
AmTV	0.1862	0.2111
EEmTV	0.0096	0.0343
LOVTV	0.0250	0.0255
RVOTV	0.0129	0.0132
E	0.0913	0.0724
A	0.2527	0.1931
EA	0.2851	0.2594
Ams	0.1352	0.1159
EmAms	0.3464	0.3222
EEms	0.1283	0.1092
Sms	0.0147	0.0236
Sm1	0.0558	0.0647
EmAml	0.3335	0.3004
EEm1	0.1136	0.1219
Ammean	0.1893	0.1113
Smmean	0.0470	0.0565
EmAmmean	0.3939	0.3524
Eemmean	0.1276	0.1289
ETV	0.1208	0.1160
EATV	0.1536	0.1345
EmTV	0.1083	0.1462
EmAmTV	0.2756	0.3171
AVV	0.0288	0.0150
SmTV	--	0.0045

表 1 各指标局部线性回归拟合优度

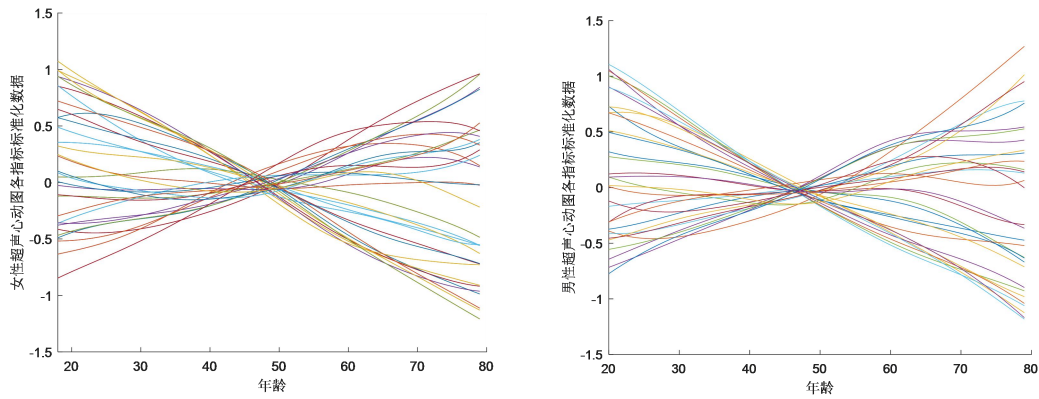


图 2 局部线性回归图像

2.1.4 超声心动图指标的聚类分析

由于部分指标之间存在一定的关联，相关联的指标的年龄拐点应该相近，因此我们将各指标进行聚类分析，对每一类求年龄拐点。由于与性别不显著相关的指标只有 13 个，在聚类分析之后每一类指标都较少，故将校正值数据分为男性和女性，其中男性指标 32 个，女性指标 33 个。男性和女性指标分别聚类并分为两类，男性聚类为两类，每个类别 16 个指标，如图 3 左、图 4；女性聚类为两类，类一包含 16 个指标，类二包含 17 个指标，如图 3 右、图 5。

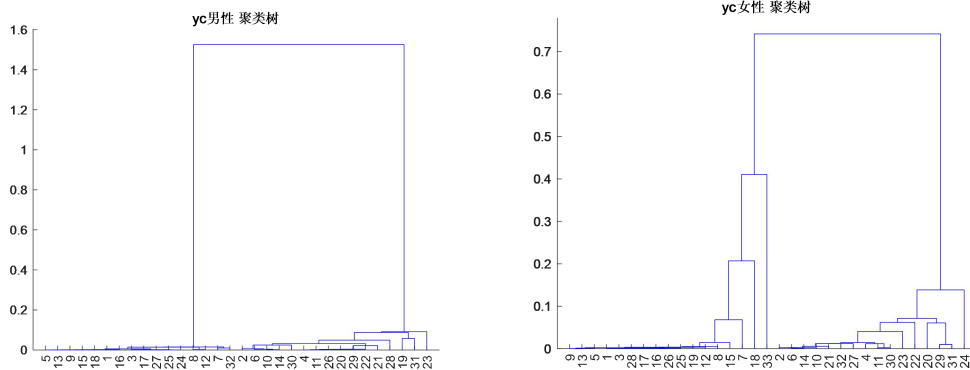


图 3 各指标聚类分析

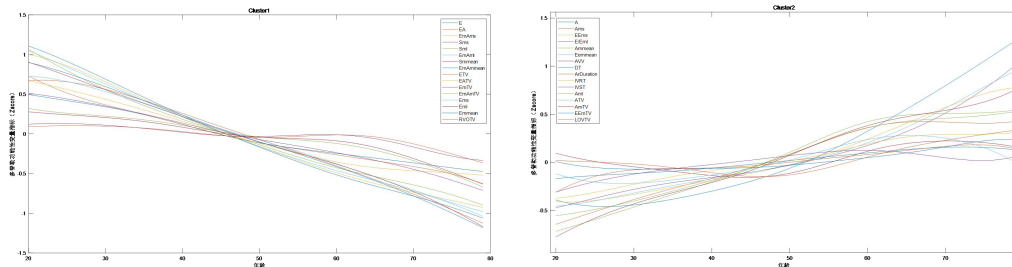


图 4 男性指标二聚类图像

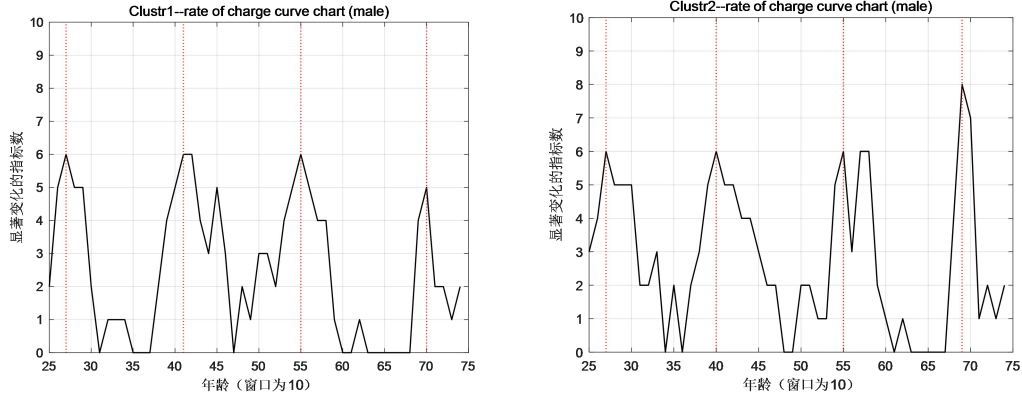


图6 男性两类指标年龄拐点

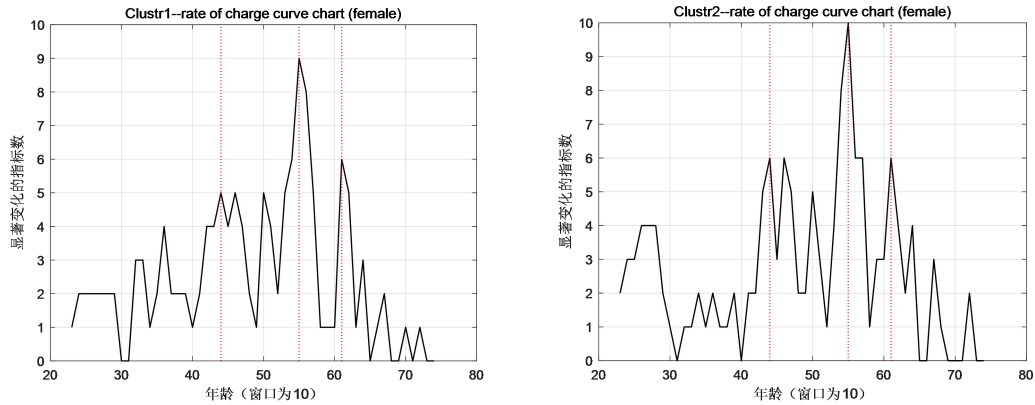


图7 女性两类指标年龄拐点

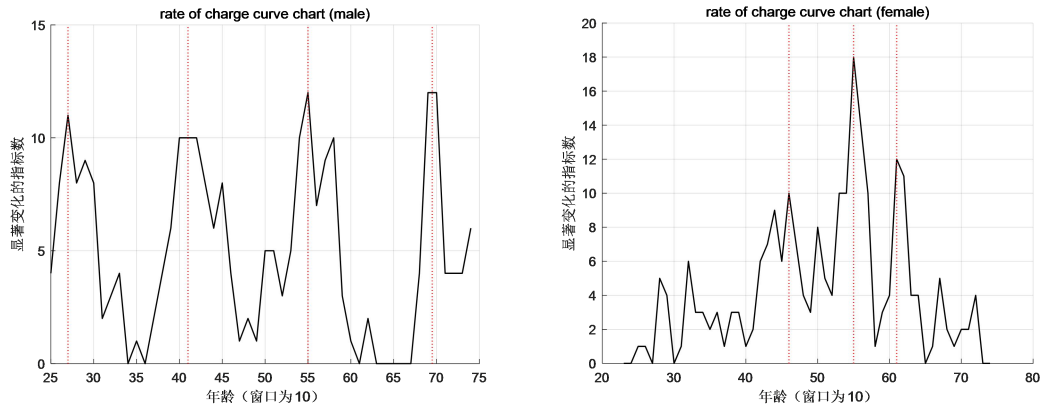


图8 男性和女性年龄拐点

基于滑动窗口的秩和检验法

秩和检验是一种非参数检验，用于检验两组数据是否服从同一个分布。陈小龙等在分析食管动力生理性退化的年龄拐点的研究中应用秩和检验得到了两个可能的年龄拐点^[8]。因此本文也利用秩和检验来探究影响超声心动图参数发生显著变化的年龄关键点。虽然秩和检验不要求两组数据的样本数相同，但若两组数据的样本数差别过大，秩和检验结果并不可靠，为了控制秩和检验的两组数据的样本数相近，我们采用滑动窗口下的秩和检验的方法，即取某个要考察的年龄点前后各5岁为一个窗口，对该年龄点前5岁的样本与后5岁的样本数据进行秩和检验，若分布有显著差异，则对该年龄点标记一次，其他指标类似处理，将每个指

标记的年龄点可视化（图 9 左），其中黄色为标记点，蓝色为未标记点。最后可视化各个年龄点有标记的指标个数（图 9 右），图中可以明显看到三个明显的断带，从波峰来看，39 岁、54 岁、56 岁为最明显的波峰，这与滑动窗口下的回归分析法波峰有所重合，即 40 岁、55 岁左右是男性需要关注的年龄点。

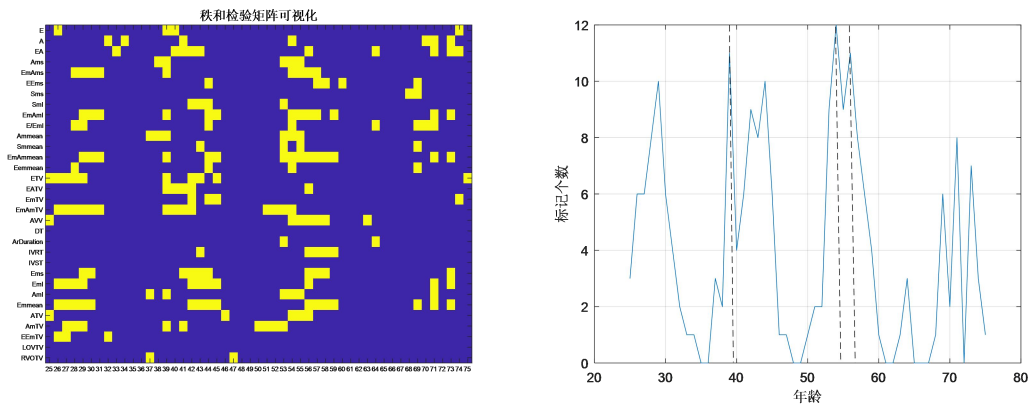


图 9 男性指标秩和检验与年龄拐点

女性指标类似处理，得到秩和检验的可视化矩阵（图 10 左），其中黄色为标记点，蓝色为未标记点。最后可视化各个年龄点有标记的指标个数（图 10 右），可以看到几处明显的波峰，即 44 岁、58 岁、60 岁，同样与滑动窗口下的回归分析结果相近，即 45 岁、60 岁左右是女性需要关注的年龄点。

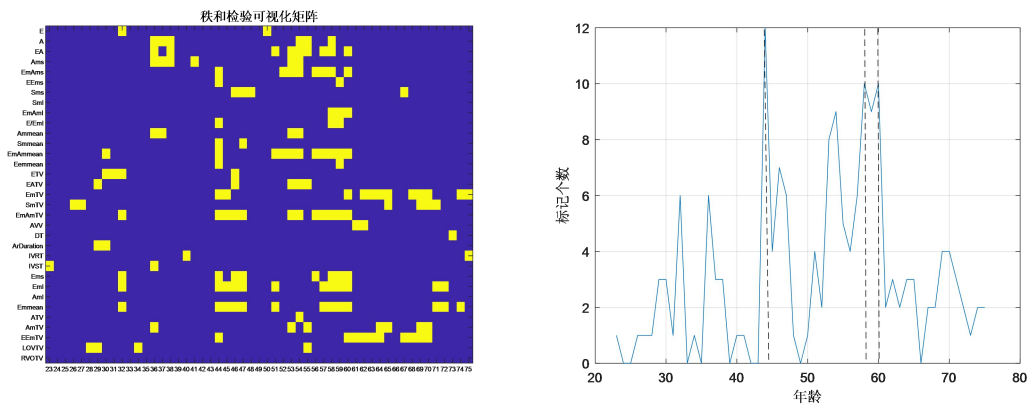


图 10 女性指标秩和检验与年龄拐点

但由于不同年龄的样本数不同，个别年龄点的样本数存在较大不同，因此秩和检验过程中仍有两组数据样本量差别过大的情况，因此需要剔除这样的年龄拐点，我们对此类年龄点的标记个数进行修正，即标记个数减为原标记个数的一半，从而避免此类年龄点成为波峰。修正后年龄拐点并未发生变化（图 11），三个波峰对应的年龄并没有发生变化，但是波峰更加明显。

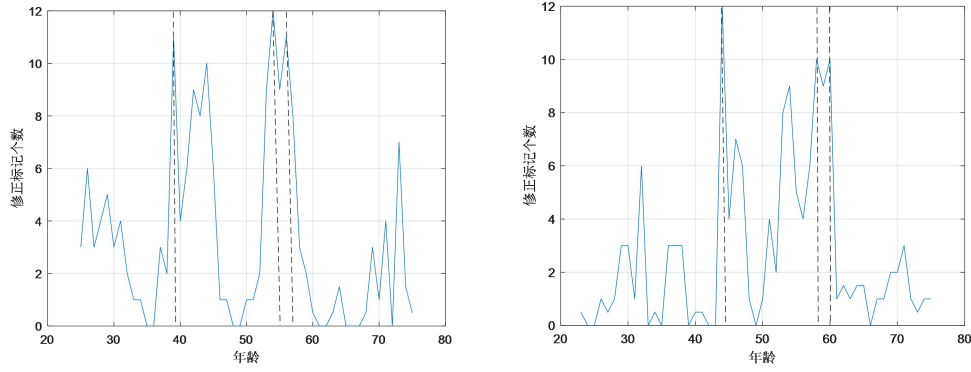


图 11 男性与女性年龄拐点修正

男性 55 岁、女性 60 岁是心脏病高发的年龄点，这与本文的研究结果相吻合，而男性 40 岁、女性 45 岁出现波峰有可能与男性与女性的青壮年到老年的过渡有关。

2.2 利用神经网络校正超声心动图指标值

2.2.1 数据预处理

在数据进行神经网络训练之前，需要对数据进行预处理。与寻找年龄拐点时的数据预处理类似，我们将数据中的缺失值与离群值进行样本平均值替代。在神经网络训练中，对预测结果影响较大的是数据归一化，由于年龄、身高、体重和性别以及指标的数量级有所差别，因此在训练之前有必要对年龄、身高、体重、性别进行数据归一化，本文采取的是最大最小归一化方法，即将原始数据线性化方法转化到 $[-1, 1]$ 之间，转换函数如下：

$$x^* = \frac{x - x_{mean}}{x_{max} - x_{min}}.$$

参与神经网络训练的数据集为男性与女性全体的 70%，而检验数据集为男性与女性全体的 30%。

2.2.2 多层感知机模型

多层感知机（MLP）是一种前馈的人工神经网络模型，其将输入的多个数据集映射到单一的输出的数据集上。MLP 至少包含三个节点层，输入层、隐藏层和输出层（图 12）。除输入节点外，每个节点都是使用非线性激活函数的神经元。输入层用来输入数据，设为向量 X ，隐藏层与输入层是全连接的，即隐藏层的每个节点都是所有的输入数据的加权和与激活函数作用的结果，即 $f(W_1 \cdot X + b_1)$ ，式中 W_1 为权重， b_1 为偏置， f 为激活函数，激活函数可以选择 tanh 函数、Sigmoid 函数、Relu 函数等。输出层为隐藏层节点的加权。系统通过训练不断调整每一层的权重和偏置，使损失达到最小。

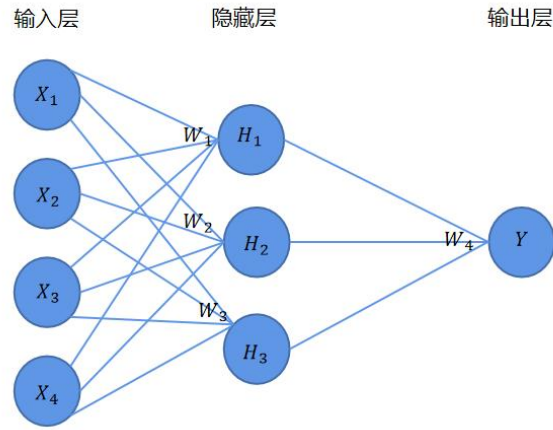


图 12 多层感知器模型

在本文中，我们利用多层感知机模型 MLP 函数，设置隐藏层数为 1，输入层输入年龄、身高、体重、性别的归一化数据，使用 Relu 激活函数，隐藏层节点在 3-5 个不等。从训练结果来看，对与性别有显著相关关系的指标，神经网络预测结果有明显的男性与女性指标的差异（图 13），这与性别对指标的显著相关性一致。分别对 70%的训练数据训练并用 30%的检验数据检验，按照年龄拐点中检验校正值的检验方法检验神经网络训练效果。

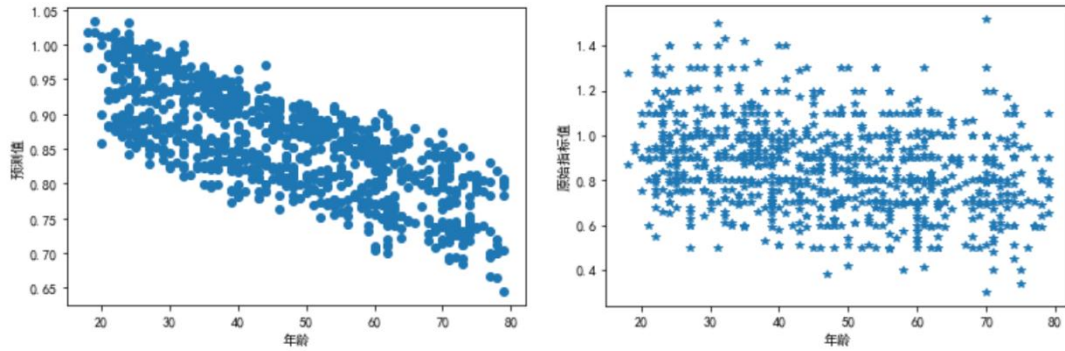


图 13 指标 E 神经网络预测

2.2.3 70%数据训练结果

Parameters 70%	Correlations with corrected values($r_{p-value}$)				
	Original values	Sex	Age	Height	Weight
E	0.921	0.009	-0.001	-0.011	-0.012
	<0.001	0.801	0.978	0.743	0.730
A	0.798	-0.016	-0.027	0.014	0.007
	<0.001	0.647	0.436	0.674	0.835
EA	0.747	0.003	0.021	-0.013	-0.010
	<0.001	0.921	0.532	0.708	0.774

DT	0.986	-0.002	0.002	0.004	-0.004
	<0.001	0.959	0.955	0.903	0.912
Aduration	0.988	-0.001	0.002	-0.006	0.001
	<0.001	0.987	0.956	0.872	0.985
ArDuration	0.988	-0.004	0.003	-0.001	0.005
	<0.001	0.915	0.939	0.967	0.892
IVRT	0.982	0.002	0.003	0.003	-0.003
	<0.001	0.962	0.938	0.936	0.927
IVST	0.995	<0.001	0.001	<0.001	-0.003
	<0.001	0.999	0.968	0.989	0.931
LVET	0.993	<0.001	0.001	0.001	-0.001
	<0.001	0.985	0.969	0.980	0.978
Ems	0.781	-0.006	-0.001	0.003	-0.006
	<0.001	0.856	0.978	0.923	0.847
Ams	0.905	0.004	0.007	-0.006	-0.005
	<0.001	0.903	0.846	0.857	0.853
EmAms	0.650	0.009	0.025	-0.014	-0.018
	<0.001	0.793	0.473	0.681	0.596
EEms	0.877	-0.004	-0.015	-0.004	0.003
	<0.001	0.918	0.665	0.911	0.938
Sms	0.967	0.002	0.004	-0.002	-0.005
	<0.001	0.949	0.916	0.951	0.874
Em1	0.753	0.014	0.004	-0.016	-0.023
	<0.001	0.679	0.900	0.640	0.506
Am1	0.915	0.013	<0.001	-0.010	-0.011
	<0.001	0.713	0.994	0.777	0.742
Sml	0.947	-0.002	<0.001	0.003	-0.003
	<0.001	0.961	0.994	0.924	0.932
EmAm1	0.739	-0.015	-0.022	0.019	0.001
	<0.001	0.667	0.509	0.582	0.965
E/Em1	0.883	-0.014	-0.014	0.008	0.008
	<0.001	0.673	0.692	0.815	0.805
Emmean	0.735	-0.011	-0.001	0.011	0.006
	<0.001	0.742	0.971	0.754	0.864
Ammean	0.889	0.008	0.014	-0.009	-0.008
	<0.001	0.821	0.685	0.777	0.814
Smmean	0.946	-0.015	0.001	0.011	0.008
	<0.001	0.658	0.987	0.747	0.821
EmAmmean	0.651	0.027	0.013	-0.016	-0.029
	<0.001	0.429	0.701	0.641	0.390
Eemmean	0.878	<0.001	-0.021	-0.006	-0.012
	<0.001	0.993	0.532	0.869	0.729
ETV	0.877	0.015	<0.001	0.054	0.066
	<0.001	0.652	0.987	0.112	0.053

ATV	0.974	0.001	-0.030	0.011	-0.012
	<0.001	0.964	0.371	0.739	0.731
EATV	0.849	-0.015	0.010	0.001	-0.002
	<0.001	0.668	0.763	0.974	0.952
EmTV	0.854	0.003	0.002	-0.006	-0.009
	<0.001	0.917	0.946	0.857	0.793
AmTV	0.863	<0.001	0.015	-0.010	0.006
	<0.001	0.990	0.656	0.759	0.851
SmTV	0.989	-0.013	0.004	0.012	0.015
	<0.001	0.710	0.911	0.717	0.666
EmAmTV	0.680	-0.009	0.052	-0.004	-0.003
	<0.001	0.799	0.129	0.899	0.940
EEEmTV	0.975	-0.018	-0.004	0.018	0.015
	<0.001	0.601	0.897	0.591	0.655
AVV	0.972	-0.003	-0.002	0.003	0.009
	<0.001	0.937	0.963	0.929	0.790
LOTV	0.974	-0.015	-0.017	0.001	0.018
	<0.001	0.650	0.614	0.975	0.604
PVV	0.976	<0.001	-0.003	0.001	0.009
	<0.001	0.996	0.933	0.971	0.760
RVOTV	0.982	0.010	0.006	-0.010	-0.011
	<0.001	0.767	0.869	0.762	0.752

表 2 70%数据训练结果

2.2.4 30%数据预测结果

Parameters 30%	Correlations with corrected values($p - \overset{r}{value}$)				
	Original values	Sex	Age	Height	Weight
E	0.926	0.008	-0.010	0.004	0.013
	<0.001	0.777	0.723	0.869	0.665
A	0.803	0.009	-0.010	0.015	-0.003
	<0.001	0.753	0.701	0.594	0.908
EA	0.761	-0.021	-0.006	-0.003	0.015
	<0.001	0.464	0.824	0.910	0.606
DT	0.987	-0.001	-0.008	0.011	0.016
	<0.001	0.976	0.782	0.699	0.566
Aduration	0.987	0.045	0.019	-0.042	-0.029
	<0.001	0.117	0.499	0.143	0.308
ArDuration	0.989	0.056	-0.004	-0.048	-0.026
	<0.001	0.049	0.881	0.094	0.369
IVRT	0.982	0.005	0.003	-0.002	-0.030
	<0.001	0.861	0.903	0.477	0.292
IVST	0.979	0.054	-0.108	-0.045	-0.077

	<0.001	0.060	<0.001	0.114	0.007
LVET	0.993	0.033	-0.029	-0.004	-0.014
	<0.001	0.247	0.312	0.873	0.622
Ems	0.774	-0.041	-0.009	0.023	0.009
	<0.001	0.155	0.733	0.413	0.742
Ams	0.905	0.020	0.005	-0.008	-0.013
	<0.001	0.479	0.848	0.769	0.646
EmAms	0.655	-0.039	0.019	0.011	0.014
	<0.001	0.175	0.497	0.704	0.632
EEms	0.877	0.022	-0.009	-0.004	0.007
	<0.001	0.452	0.746	0.877	0.810
Sms	0.968	0.025	-0.008	-0.017	-0.024
	<0.001	0.377	0.780	0.545	0.412
Em1	0.748	0.005	-0.008	0.006	-0.007
	<0.001	0.848	0.784	0.842	0.794
Am1	0.919	0.023	0.006	0.002	0.002
	<0.001	0.423	0.826	0.946	0.927
Sm1	0.944	0.008	-0.027	0.012	0.009
	<0.001	0.782	0.346	0.664	0.751
EmAm1	0.742	-0.028	-0.046	0.028	0.006
	<0.001	0.330	0.109	0.330	0.821
E/Em1	0.885	-0.019	-0.008	0.012	0.024
	<0.001	0.515	0.766	0.663	0.399
Emmean	0.729	-0.034	-0.016	0.035	0.024
	<0.001	0.236	0.576	0.217	0.411
Ammean	0.894	0.023	0.017	-0.003	-0.004
	<0.001	0.416	0.560	0.903	0.876
Smmean	0.946	0.005	-0.026	0.008	0.004
	<0.001	0.850	0.359	0.782	0.891
EmAmmean	0.658	0.001	-0.004	-0.006	-0.019
	<0.001	0.977	0.885	0.834	0.497
Eemmean	0.878	0.017	-0.015	-0.012	-0.009
	<0.001	0.561	0.595	0.664	0.756
ETV	0.871	-0.017	0.023	0.075	0.091
	<0.001	0.539	0.412	0.009	0.001
ATV	0.973	0.005	-0.015	0.015	-0.015
	<0.001	0.846	0.610	0.592	0.581
EATV	0.847	-0.050	0.029	0.009	0.012
	<0.001	0.081	0.310	0.743	0.669
EmTV	0.849	-0.023	-0.017	0.025	0.028
	<0.001	0.426	0.561	0.390	0.328
AmTV	0.855	0.012	-0.009	-0.009	0.022
	<0.001	0.683	0.748	0.742	0.437
SmTV	0.991	-0.022	0.010	0.027	0.034

	<0.001	0.441	0.723	0.344	0.239
EmAmTV	0.679	-0.032	0.049	0.016	0.007
	<0.001	0.267	0.089	0.567	0.809
EEEmTV	0.976	-0.026	0.024	0.015	0.010
	<0.001	0.373	0.394	0.606	0.737
AVV	0.973	0.007	0.022	0.010	0.004
	<0.001	0.816	0.448	0.734	0.888
LOTV	0.976	-0.005	-0.031	0.010	0.026
	<0.001	0.866	0.279	0.719	0.366
PVV	0.977	0.013	-0.004	-0.002	0.018
	<0.001	0.661	0.894	0.933	0.523
RVOTV	0.984	0.009	0.006	-0.011	0.003
	<0.001	0.739	0.822	0.697	0.910

表 3 30%数据预测结果

2.2.5 存在的问题与不足

在上文中，相比传统方法，多层感知机在求解回归方程方面存在着一些不足。在训练中，我们发现利用多层感知机模型来求解回归方程存在着以下几点不足：

- （1）训练时间长：MLP 模型训练时间较长，特别是当网络层数较多或数据集较大时，训练时间会更长。
- （2）容易陷入局部最优解：MLP 训练时容易陷入局部最优解，而无法得到全局最优解。
- （3）容易受到噪声的干扰：MLP 容易受到数据中的噪声的干扰，可能会导致模型性能下降。
- （4）对数据的分布敏感：MLP 对数据分布的敏感度较高，如果数据不是均匀分布或存在离群点，可能会导致模型性能下降。
- （5）模型随机初始化：许多神经网络模型，包括多层感知机（MLP），都是基于随机初始化的权重和偏置来训练的。因此，不同的随机初始化可能导致不同的训练结果。训练效果较差主要体现在对数据的分布敏感和模型随机初始化问题上，这就导致了在多次训练中，同一个模型呈现除了不同的训练结果。在图 10 中可以看出，多次训练的结果具有一定的随机性。

```
1.17665975 0.55890622 0.89424994 0.95359127 0.93656822 0.96564196
1.24052182 0.94285972 1.15259313 0.89262094 1.40225235 0.94066328
0.91183386 0.8531351 1.38255911 1.10531264 1.04018631]
Yc与性别的皮尔逊相关系数为：0.02814，P值为：0.41066
Yc与年龄的皮尔逊相关系数为：-0.00835，P值为：0.80720
Yc与身高的皮尔逊相关系数为：-0.03858，P值为：0.25930
Yc与体重的皮尔逊相关系数为：-0.04358，P值为：0.20250
```

```
1.16468238 0.55523401 0.88837441 0.94079897 0.93296834 0.95332154
1.23292808 0.92484769 1.14143177 0.88128894 1.3803445 0.94012421
0.9090934 0.84047804 1.35624365 1.09283255 1.03327058]
Yc与性别的皮尔逊相关系数为: 0.00146, P值为: 0.96597
Yc与年龄的皮尔逊相关系数为: -0.01056, P值为: 0.75752
Yc与身高的皮尔逊相关系数为: 0.00361, P值为: 0.91599
Yc与体重的皮尔逊相关系数为: -0.00261, P值为: 0.93917
```

图 10 多次训练结果的随机性

因此, MLP 的主要问题在于, 它导致了训练结果的不确定性。即使使用相同的数据集和相同的训练参数, 在不同的随机初始化下, 模型的性能也会有所不同。这会导致训练结果的不稳定性, 使得模型难以复现, 并降低了模型的可靠性。同时模型随机初始化还会影响模型的训练速度。在训练过程中, 模型的初始值会影响反向传播算法的效率, 因为初始值可能导致梯度消失或梯度爆炸等问题。这将导致训练过程变得缓慢, 甚至无法收敛到最优解。

3. 总结与展望

本文中, 我们主要进行了两个任务, 一是通过探索不同指标与年龄的关系, 利用不同的方法找出指标值发生显著变化的关键年龄点; 二是利用多层感知机模型得到年龄、身高、体重、性别引起指标变化的规律, 并对原始指标值进行校正。寻找关键年龄点我们分别采用了滑动窗口回归的方法和滑动窗口秩和检验的方法, 最终两个方法得到的关键年龄点在一定程度上有所重合, 确定了男性 40 岁、55 岁和女性 45 岁、60 岁为超声心动图功能性指标变化的关键年龄点, 但能否确定此关键年龄点还需实践来检验。利用神经网络对医学数据进行校正, 最终 36 各指标成功校正 34 各指标, 但从训练与预测结果看, 神经网络对非线性回归的拟合与预测具有不确定性, 对于较为严谨的医学数据是严重的缺陷, 因此神经网络对医学数据的拟合与预测是否可靠需要进一步探索。

4. 参考文献

- [1]伍文霞, 温莎洛, 熊德庆, 徐永莲, 申俊玲, 陈花, 李红. 中晚孕正常胎儿静脉导管多普勒血流参数正常值参考范围研究[J]. 四川医学, 2016, 37 (05).
- [2]李嘉铃, 彭炳蔚, 宁书尧, 杨思达, 梁秀琼, 汤曙丹, 健康婴幼儿经颅多普勒超声各参数正常值研究[J]. 广东医学, 2016, 37 (08).
- [3]吴培华, 于超, 朱天刚. 成人超声心动图基本测量参数正常参考值的初步研[J] . 中华全科医师杂志, 2016, 15 (4): 274-280. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7368.2016.04.009

- [4]孙静平. 中国成年人二维超声心动图各个切面腔径的正常值及其相关因素[J]. 中国超声医学杂志, 1989(02): 45-49.
- [5]张义连. 成人超声心动图的正常值测量及其影响因素[J]. 临床医学研究与实践, 2017. 2(29): 39-40.
- [6]Guihua Yao,Xiangyun Chen,Wenjing Yang,Qing Zhang,Jing Liu,Huan Liang,Hui Sun,Yao Xu,Li Wang,Jinfeng Xu,Cheng Zhang,Fengrong Sun,Mei Zhang,Xueying Zeng,Yun Zhang. Correction of Left Ventricular Doppler Echocardiographic Measurements for Physiological Variances Using a Novel Optimized Multivariable Allometric Model in Healthy Chinese Han Adults[J]. Engineering, 2022, 16(09): 115-122.
- [7]杨小龙, 陈梅香, 陈婷等. 41 例无咽喉症状志愿者的食管测压结果和年龄拐点分析[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2021, 35(02): 164-168. DOI:10.13201/j.issn.2096-7993.2021.02.016.
- [9]Lehallier Benoit, Gate David, Schaum Nicholas, Nanasi Tibor, Lee Song Eun, Yousef Hanadie, Moran Losada Patricia, Berdnik Daniela, Keller Andreas, Vergheze Joe, Sathyan Sanish, Franceschi Claudio, Milman Sofiya, Barzilai Nir, Wyss-Coray Tony. Undulating changes in human plasma proteome profiles across the lifespan. [J]. Nature medicine, 2019, 25(12).

附录

parameters	Men (n=577)	Women (n=644)	Levene 检验 p-value	t 检验 p-value
E	0.816±0.192	0.902±0.201	0.617	<0.001
A	0.672±0.202	0.712±0.228	0.057	0.001
EA	1.319±0.471	1.384±0.505	0.169	0.021
DT	170.553±46.029	167.360±43.697	0.346	0.214
Aduration	148.742±44.417	156.502±55.301	0.003	0.007
ArDuration	110.539±24.375	111.405±22.801	0.537	0.522
IVRT	74.398±19.225	74.398±19.225	0.992	0.953
IVST	68.667±18.361	70.330±16.051	0.153	0.092
LVET	288.985±30.019	297.217±29.753	0.716	<0.001
Ems	10.047±3.111	10.329±3.273	0.118	0.124
Ams	9.409±2.145	8.766±2.085	0.886	<0.001
EmAms	1.136±0.458	1.260±0.522	0.001	<0.001
EEms	8.711±2.805	9.447±3.269	0.008	<0.001
Sms	8.831±1.780	8.425±1.639	0.22	<0.001
EmI	13.140±3.885	13.422±4.094	0.199	0.218
AmI	9.818±2.617	9.661±2.837	0.157	0.316
SmI	10.895±2.609	10.463±2.513	0.367	0.003
EmAmI	1.458±0.641	1.534±0.694	0.047	0.045
E/EmI	6.635±2.197	7.266±2.576	0.003	<0.001
Emmean	11.594±3.253	11.877±3.458	0.275	0.141
Ammean	9.613±2.104	9.213±2.128	0.443	0.001
Smmean	9.859±1.859	9.431±1.723	0.364	<0.001
EmAmmean	1.294±0.515	1.396±0.573	0.029	0.001
Eemmean	7.628±2.316	8.322±2.838	0.001	<0.001
ETV	0.560±0.127	0.598±0.140	0.066	<0.001
ATV	0.417±0.115	0.425±0.123	0.052	0.274
EATV	1.421±0.430	1.497±0.464	0.111	0.003
EmTV	11.993±3.326	12.934±3.704	0.009	<0.001
AmTV	12.917±4.024	12.935±3.726	0.08	0.933
SmTV	13.084±2.439	12.779±2.356	0.197	0.027
EmAmTV	1.022±0.440	1.099±0.491	0.045	0.004
EEmTV	4.968±1.600	4.907±1.518	0.704	0.495
AVV	1.221±0.218	1.283±0.233	0.179	<0.001
LOVTV	0.992±0.215	1.004±0.228	0.11	0.34
PVV	1.002±0.191	0.970±0.176	0.159	0.002
RVOTV	0.749±0.174	0.739±0.159	0.581	0.314

表 1 独立 t 检验结果

Parameters	Men	
	Pearson	P-value
E	-0.294**	<0.001
A	0.548**	<0.001
EA	-0.590**	<0.001
Aduration	0.005	0.896
LVET	0.070	0.092
Ams	0.390**	<0.001
EmAms	-0.651**	<0.001
EEms	0.409**	<0.001
Sms	-0.128**	0.002
Sm1	-0.266**	<0.001
EmAm1	-0.641**	<0.001
E/Em1	0.378**	<0.001
Ammean	0.462**	<0.001
Smmean	-0.249**	<0.001
EmAmmean	-0.694**	<0.001
Eemmean	0.406**	<0.001
ETV	-0.374**	<0.001
EATV	-0.447**	<0.001
EmTV	-0.401**	<0.001
SmTV	0.003	0.945
EmAmTV	-0.594**	<0.001
AVV	0.116**	0.005
PVV	-0.017	0.680

表 2 年龄与男性各指标相关性检验

Parameters	Women	
	Pearson	P-value
E	-0.309**	<0.001
A	0.548**	<0.001
EA	-0.619**	<0.001
Aduration	0.017	0.662
LVET	-0.060	0.126
Ams	0.387**	<0.001

EmAms	-0.691**	<0.001
EEms	0.429**	<0.001
Sms	-0.181**	<0.001
Sm1	-0.342**	<0.001
EmAm1	-0.655**	<0.001
E/Em1	0.424**	<0.001
Ammean	0.420**	<0.001
Smmean	-0.324**	<0.001
EmAmmean	-0.720**	<0.001
Eemmean	0.430**	<0.001
ETV	-0.429**	<0.001
EATV	-0.459**	<0.001
EmTV	-0.512**	<0.001
SmTV	-0.090*	0.023
EmAmTV	-0.674**	<0.001
AVV	0.174**	<0.001
PVV	0.056	0.154

表 3 年龄与女性各指标相关性检验

Parameters	Men&Women	
	Pearson	P-value
DT	0.115**	<0.001
ArDuration	0.114**	<0.001
IVRT	0.163**	<0.001
IVST	0.063*	0.028
Ems	-0.596**	<0.001
Em1	-0.633**	<0.001
Am1	0.381**	<0.001
Emmean	-0.660**	<0.001
ATV	0.188**	<0.001
AmTV	0.494**	<0.001
EEmTV	0.169**	<0.001
LOVTV	0.155**	<0.001
RVOTV	-0.080**	0.005

表 4 年龄与男女全体各指标相关性检验

Parameters	regression
E (men)	$y = e^{-1.617} \text{height}^{0.561} \text{weight}^{-0.358}$
E (women)	$y = e^{-3.230} \text{height}^{0.818} \text{weight}^{-0.262}$
A (men)	$y = e^{14.994} \text{height}^{-3.421} \text{weight}^{0.518}$
A (women)	$y = e^{17.044} \text{height}^{-4.023} \text{weight}^{0.744}$
EA (men)	$y = e^{-16.421} \text{height}^{3.949} \text{weight}^{-0.880}$
EA (women)	$y = e^{-20.026} \text{height}^{4.797} \text{weight}^{-1.012}$
DT	$y = e^{3.377-0.005*\text{sex}} \text{height}^{0.386} \text{weight}^{-0.060}$
Aduration (men)	$y = e^{6.679} \text{height}^{-0.650} \text{weight}^{0.392}$
Aduration (women)	$y = e^{4.908} \text{height}^{-0.353} \text{weight}^{0.468}$
ArDuration	$y = e^{5.780-0.003*\text{sex}} \text{height}^{-0.373} \text{weight}^{0.200}$
IVRT	$y = e^{3.178+0.028*\text{sex}} \text{height}^{0.084} \text{weight}^{0.155}$
IVST	$y = e^{2.557+0.054*\text{sex}} \text{height}^{0.269} \text{weight}^{0.050}$
LVET (men)	$y = e^{6.416} \text{height}^{-0.182} \text{weight}^{0.044}$
LVET (women)	$y = e^{6.345} \text{height}^{-0.162} \text{weight}^{0.041}$
Ems	$y = e^{-16.107+0.157*\text{sex}} \text{height}^{4.338} \text{weight}^{0.982}$
Ams (men)	$y = e^{7.369} \text{height}^{-1.196} \text{weight}^{0.242}$
Ams (women)	$y = e^{8.839} \text{height}^{-1.573} \text{weight}^{0.322}$
EmAms (men)	$y = e^{-20.766} \text{height}^{4.989} \text{weight}^{-1.163}$
EmAms (women)	$y = e^{-25.917} \text{height}^{6.176} \text{weight}^{-1.316}$
EEms (men)	$y = e^{16.882} \text{height}^{-3.329} \text{weight}^{0.565}$
EEms (women)	$y = e^{19.375} \text{height}^{-3.942} \text{weight}^{0.703}$
Sms (men)	$y = e^{-1.568} \text{height}^{0.789} \text{weight}^{-0.078}$
Sms (women)	$y = e^{-2.317} \text{height}^{0.958} \text{weight}^{-0.109}$
Eml	$y = e^{-13.284+0.127*\text{sex}} \text{height}^{3.710} \text{weight}^{-0.810}$
Aml	$y = e^{10.874-0.101*\text{sex}} \text{height}^{-1.940} \text{weight}^{0.347}$
Sml (men)	$y = e^{-5.263} \text{height}^{1.970} \text{weight}^{-0.600}$
Sml (women)	$y = e^{-5.938} \text{height}^{1.900} \text{weight}^{-0.346}$
EmAml (men)	$y = e^{-20.323} \text{height}^{4.789} \text{weight}^{-0.961}$
EmAml (women)	$y = e^{-26.255} \text{height}^{6.238} \text{weight}^{-1.265}$
E/Eml (men)	$y = e^{15.979} \text{height}^{-3.157} \text{weight}^{0.503}$
E/Eml (women)	$y = e^{14.712} \text{height}^{-2.915} \text{weight}^{0.502}$
Ammean (men)	$y = e^{7.275} \text{height}^{-1.118} \text{weight}^{0.172}$
Ammean (women)	$y = e^{10.907} \text{height}^{-2.028} \text{weight}^{0.393}$
Smmean (men)	$y = e^{-4.137} \text{height}^{1.552} \text{weight}^{-0.375}$
Smmean (women)	$y = e^{-4.437} \text{height}^{1.498} \text{weight}^{-0.235}$
EmAmmean (men)	$y = e^{-20.939} \text{height}^{4.961} \text{weight}^{1.053}$
EmAmmean (women)	$y = e^{-28.089} \text{height}^{6.639} \text{weight}^{-1.336}$
Eemmean (men)	$y = e^{15.961} \text{height}^{-3.160} \text{weight}^{0.546}$
Eemmean (women)	$y = e^{14.737} \text{height}^{-2.946} \text{weight}^{0.568}$
ETV (men)	$y = e^{-5.916} \text{height}^{1.310} \text{weight}^{-0.342}$
ETV (women)	$y = e^{-9.484} \text{height}^{2.140} \text{weight}^{-0.476}$
EATV (men)	$y = e^{-10.93} \text{height}^{2.608} \text{weight}^{-0.524}$

EATV (women)	$y = e^{-12.672} \text{height}^{3.130} \text{weight}^{-0.712}$
EmTV (men)	$y = e^{-11.495} \text{height}^{3.252} \text{weight}^{-0.669}$
EmTV (women)	$y = e^{-15.674} \text{height}^{4.189} \text{weight}^{-0.765}$
SmTV (women)	$y = e^{-1.202} \text{height}^{0.889} \text{weight}^{-0.194}$
EmAmTV (men)	$y = e^{-21.579} \text{height}^{4.864} \text{weight}^{-0.840}$
EmAmTV (women)	$y = e^{-28.716} \text{height}^{6.715} \text{weight}^{-1.337}$
AVV (men)	$y = e^{2.378} \text{height}^{-0.465} \text{weight}^{0.047}$
AVV (women)	$y = e^{6.298} \text{height}^{-1.379} \text{weight}^{0.232}$
Emmean	$y = e^{-14.481+0.140\text{sex}} \text{height}^{3.974} \text{weight}^{-0.882}$
ATV	$y = e^{4.131-0.030\text{sex}} \text{height}^{-1.140} \text{weight}^{0.206}$
AmTV	$y = e^{12.192-0.076\text{sex}} \text{height}^{-2.204} \text{weight}^{0.413}$
EEmTV	$y = e^{10.533-0.085\text{sex}} \text{height}^{-1.978} \text{weight}^{0.307}$
LOTV	$y = e^{3.967-0.039\text{sex}} \text{height}^{-0.853} \text{weight}^{0.103}$
RVOTV	$y = e^{-3.949+0.003\text{sex}} \text{height}^{0.930} \text{weight}^{-0.275}$

表 5 各指标与身高、体重、性别的回归方程

Parameters	Corrected values	Correlations with corrected values($p - \overset{r}{value}$)			
		Original values	Age	Height	Weight
E	1.02771 ± 0.23605	0.992**	-0.283**	-0.027	-0.025
(men)		<0.001	<0.001	0.583	0.612
E	1.02491 ± 0.22368	0.992**	-0.278**	-0.027	-0.012
(women)		<0.001	<0.001	0.573	0.804
A	1.04106 ± 0.29959	0.953**	0.487**	-0.001	-0.006
(men)		<0.001	<0.001	0.988	0.900
A	1.04043 ± 0.30243	0.925**	0.410**	-0.001	-0.005
(women)		<0.001	<0.001	0.987	0.909
EA	1.06015 ± 0.35977	0.956**	-0.531**	-0.007	-0.007
(men)		<0.001	<0.001	0.894	0.888
EA	1.05685 ± 0.35517	0.920**	-0.502**	-0.019	-0.004
(women)		<0.001	<0.001	0.693	0.930
Ams	1.02387 ± 0.22891	0.991**	0.380**	0.006	-0.004
(men)		<0.001	<0.001	0.902	0.931
Ams	1.02822 ± 0.24875	0.982**	0.298**	0.010	-0.012
(women)		<0.001	<0.001	0.827	0.795
EmAms	1.07622 ± 0.40708	0.944**	-0.618**	-0.003	-0.016
(men)		<0.001	<0.001	0.947	0.748
EmAms	1.07698 ± 0.41024	0.895**	-0.559**	-0.009	0.000
(women)		<0.001	<0.001	0.852	0.998
EEms	1.04756 ± 0.32807	0.961**	0.368**	-0.014	-0.006
(men)		<0.001	<0.001	0.786	0.905
EEms	1.04975 ± 0.33114	0.939**	0.297**	-0.009	0.004

(women)		<0.001	<0.001	0.851	0.934
Sms	1.02888 ± 0.20471	0.994**	-0.073	0.032	0.021
(men)		<0.001	0.142	0.521	0.570
Sms	1.01769 ± 0.18731	0.988**	-0.131**	0.015	-0.002
(women)		<0.001	0.005	0.758	0.974
Sml	1.02944 ± 0.24844	0.976**	-0.168**	0.006	0.004
(men)		<0.001	0.001	0.901	0.939
Sml	1.02671 ± 0.24266	0.974**	-0.254**	0.006	-0.007
(women)		<0.001	<0.001	0.901	0.886
EmAml	1.09479 ± 0.47031	0.955**	-0.561**	-0.015	-0.012
(men)		<0.001	<0.001	0.763	0.813
EmAml	1.09586 ± 0.46299	0.916**	-0.531**	-0.011	0.005
(women)		<0.001	<0.001	0.811	0.900
E/Em1	1.04530 ± 0.32617	0.965**	0.346**	-0.029	-0.024
(men)		<0.001	<0.001	0.568	0.627
E/Em1	1.05346 ± 0.35372	0.968**	0.327**	0.002	0.018
(women)		<0.001	<0.001	0.972	0.702
Ammean	1.02108 ± 0.21460	0.990**	0.438**	0.01	-0.002
(men)		<0.001	<0.001	0.844	0.976
Ammean	1.02473 ± 0.23141	0.965**	0.326**	0.012	-0.008
(women)		<0.001	<0.001	0.802	0.862
Smmean	1.01674 ± 0.18977	0.978**	-0.151**	0.004	0.005
(men)		<0.001	0.002	0.936	0.915
Smmean	1.01529 ± 0.17224	0.970**	-0.235**	0.007	0
(women)		<0.001	<0.001	0.877	1
EmAmmean	1.07867 ± 0.41367	0.944**	-0.623**	-0.015	-0.016
(men)		<0.001	<0.001	0.771	0.749
EmAmmean	1.07717 ± 0.40493	0.882**	-0.589**	-0.023	0.003
(women)		<0.001	<0.001	0.625	0.942
Eemmean	1.04117 ± 0.30502	0.961**	0.373**	-0.02	-0.015
(men)		<0.001	<0.001	0.693	0.765
Eemmean	1.04966 ± 0.33839	0.966**	0.321**	-0.01	0.018
(women)		<0.001	<0.001	0.834	0.701
ETV	1.02558 ± 0.23479	0.989**	-0.354**	-0.016	-0.019
(men)		<0.001	<0.001	0.75	0.702
ETV	1.02624 ± 0.23715	0.966**	-0.352**	-0.001	-0.009
(women)		<0.001	<0.001	0.976	0.857
EATV	1.04462 ± 0.30437	0.973**	-0.411**	0.016	0.025
(men)		<0.001	<0.001	0.748	0.615
EATV	1.04588 ± 0.31043	0.956**	-0.378**	0.001	-0.01
(women)		<0.001	<0.001	0.981	0.829
EmTV	1.03890 ± 0.27978	0.954**	-0.323**	-0.018	-0.014
(men)		<0.001	<0.001	0.721	0.786
EmTV	1.03730 ± 0.28143	0.911**	-0.349**	-0.009	-0.007

(women)		<0.001	<0.001	0.844	0.889
SmTV	1.01507±0.17713	0.989**	-0.065	0.013	0.006
(women)		<0.001	0.165	0.788	0.896
EmAmTV	1.08855±0.46627	0.949**	-0.507**	-0.01	-0.014
(men)		<0.001	<0.001	0.843	0.784
EmAmTV	1.08184±0.44288	0.889**	-0.553**	-0.016	-0.014
(women)		<0.001	<0.001	0.742	0.767
AVV	1.01579±0.18098	0.997**	0.096	-0.011	-0.011
(men)		<0.001	0.054	0.828	0.818
AVV	1.01494±0.17344	0.974**	0.036	-0.009	-0.013
(women)		<0.001	0.439	0.842	0.786
DT	1.03682±0.27472	0.998**	0.140**	0.008	0.002
		<0.001	<0.001	0.819	0.960
ArDuration	1.02475±0.21693	0.996**	0.111**	0.023	0.008
		<0.001	0.001	0.507	0.806
IVRT	1.03604±0.28214	0.997**	0.168**	-0.008	-0.009
		<0.001	<0.001	0.810	0.797
IVST	1.03135±0.25672	0.997**	0.081*	0.004	0.004
		<0.001	0.017	0.909	0.905
Ems	1.04581±0.31285	0.922**	-0.489**	-0.005	0.001
		<0.001	<0.001	0.881	0.986
Eml	1.04370±0.30193	0.938**	-0.531**	-0.016	-0.015
		<0.001	<0.001	0.647	0.671
Aml	1.03625±0.28474	0.979**	0.318**	0.000	-0.012
		<0.001	<0.001	0.995	0.734
Emmean	1.03856±0.28248	0.922**	-0.553**	-0.011	-0.008
		<0.001	<0.001	0.737	0.809
ATV	1.03799±0.29537	0.994**	0.0133**	-0.002	-0.003
		<0.001	<0.001	0.959	0.941
AmTV	1.04545±0.31878	0.981**	0.446**	0.01	-0.004
		<0.001	<0.001	0.764	0.896
EEmTV	1.04434±0.31923	0.983**	0.081**	-0.009	-0.005
		<0.001	0.018	0.782	0.882
LOVTV	1.02429±0.22243	0.994**	0.139**	-0.012	-0.007
		<0.001	<0.001	0.729	0.848
RVOTV	1.02305±0.22187	0.992**	-0.047	0.003	0.003
		<0.001	0.169	0.939	0.937

表 6 70%样本校正正值检验

Parameters	Corrected values	Correlations with corrected values($p - r$ value)			
		Original values	Age	Height	Weight

E	1.02381 ± 0.24529	0.991**	−0.326**	0.108	0.103
(men)		<0.001	<0.001	0.157	0.177
E	1.01870 ± 0.23974	0.993**	−0.240**	0.030	0.099
(women)		<0.001	0.001	0.676	0.170
A	1.00309 ± 0.30004	0.952**	0.450**	0.063	−0.047
(men)		<0.001	<0.001	0.577	0.536
A	1.04153 ± 0.32867	0.932**	0.455**	0.073	0.058
(women)		<0.001	<0.001	0.312	0.425
EA	1.09846 ± 0.38383	0.957**	−0.531**	0.044	0.102
(men)		<0.001	<0.001	0.569	0.182
EA	1.06741 ± 0.41062	0.931**	−0.502**	−0.094	−0.010
(women)		<0.001	<0.001	0.196	0.886
Ams	0.99308 ± 0.23657	0.991**	0.306**	0.047	−0.036
(men)		<0.001	<0.001	0.540	0.641
Ams	1.02169 ± 0.22905	0.980**	0.353**	−0.001	−0.013
(women)		<0.001	<0.001	0.992	0.861
EmAms	1.15077 ± 0.45223	0.943**	−0.520**	−0.051	−0.025
(men)		<0.001	<0.001	0.507	0.745
EmAms	1.07040 ± 0.42761	0.885**	−0.575**	−0.035	0.035
(women)		<0.001	<0.001	0.630	0.633
EEmS	1.00733 ± 0.30100	0.958**	0.299**	0.096	0.097
(men)		<0.001	<0.001	0.207	0.203
EEmS	1.05314 ± 0.35289	0.944**	0.361**	0.013	0.051
(women)		<0.001	<0.001	0.854	0.481
Sms	1.00263 ± 0.19320	0.993**	−0.151*	0.070	0.013
(men)		<0.001	0.048	0.360	0.864
Sms	1.03404 ± 0.21762	0.990**	−0.113	−0.017	−0.030
(women)		<0.001	0.118	0.819	0.683
Sml	1.02131 ± 0.21427	0.967**	−0.379**	0.192*	0.132
(men)		<0.001	<0.001	0.012	0.084
Sml	1.03912 ± 0.23648	0.970**	−0.252**	−0.007	0.046
(women)		<0.001	<0.001	0.927	0.528
EmAml	1.07841 ± 0.44618	0.953**	−0.606**	0.055	0.056
(men)		<0.001	<0.001	0.476	0.465
EmAml	1.06960 ± 0.46705	0.905**	−0.575**	−0.052	−0.080
(women)		<0.001	<0.001	0.470	0.268
E/Eml	1.04116 ± 0.34621	0.968**	0.257**	0.005	0.038
(men)		<0.001	<0.001	0.943	0.616
E/Eml	1.03483 ± 0.36142	0.971**	0.377**	−0.043	0.041
(women)		<0.001	<0.001	0.553	0.573
Ammean	1.01670 ± 0.24187	0.992**	0.396**	0.021	−0.048
(men)		<0.001	<0.001	0.781	0.531
Ammean	1.04080 ± 0.23880	0.970**	0.316**	0.087	0.104
(women)		<0.001	<0.001	0.23	0.153

Smmean		0.975**	−0.326**	0.143	0.077
(men)	1.00271 ± 0.17511	<0.001	0.002	0.061	0.317
Smmean		0.972**	−0.227**	−0.018	0.011
(women)	1.03126 ± 0.19158	<0.001	<0.001	0.801	0.881
EmAmmean		0.940**	−0.625**	0.001	0.011
(men)	1.09955 ± 0.41075	<0.001	<0.001	0.987	0.884
EmAmmean		0.875**	−0.592**	−0.071	−0.043
(women)	1.06809 ± 0.42902	<0.001	<0.001	0.327	0.551
Eemmean		0.960**	0.275**	0.046	0.056
(men)	1.01276 ± 0.29286	<0.001	<0.001	0.552	0.468
Eemmean		0.968**	0.410**	−0.063	0.03
(women)	1.04890 ± 0.34133	<0.001	<0.001	0.384	0.677
ETV		0.986**	−0.311**	0.039	−0.028
(men)	1.04890 ± 0.21803	<0.001	<0.001	0.615	0.713
ETV		0.956**	−0.270**	−0.065	0.062
(women)	1.00573 ± 0.21732	<0.001	<0.001	0.372	0.396
EATV		0.974**	−0.337**	−0.085	−0.048
(men)	1.09862 ± 0.34108	<0.001	<0.001	0.266	0.533
EATV		0.953**	−0.325**	−0.021	0.046
(women)	1.04039 ± 0.30354	<0.001	<0.001	0.769	0.527
EmTV		0.949**	−0.343**	0.058	0.062
(men)	1.08549 ± 0.27741	<0.001	<0.001	0.451	0.417
EmTV		0.890**	−0.455**	0.027	0.101
(women)	1.05557 ± 0.26166	<0.001	<0.001	0.713	0.165
SmTV		0.992**	0.03	0.078	0.116
(women)	1.00888 ± 0.20152	<0.001	0.678	0.284	0.11
EmAmTV		0.939**	−0.556**	0.066	−0.001
(men)	1.12017 ± 0.41775	<0.001	<0.001	0.387	0.994
EmAmTV		0.880**	−0.547**	−0.003	−0.002
(women)	1.07999 ± 0.42198	<0.001	<0.001	0.962	0.98
AVV		0.997**	0.087	0.112	0.002
(men)	1.01894 ± 0.18406	<0.001	0.257	0.143	0.979
AVV		0.978**	0.192**	−0.011	−0.03
(women)	1.02530 ± 0.19496	<0.001	0.008	0.884	0.682
DT		0.998**	0.106*	0.009	0.051
	1.03328 ± 0.27318	<0.001	0.043	0.859	0.329
ArDuration		0.996**	0.086	−0.142**	−0.104*
	1.02075 ± 0.21681	<0.001	0.103	0.007	0.047
IVRT		0.997**	0.185**	−0.106*	−0.122*
	1.00397 ± 0.25744	<0.001	<0.001	0.043	0.020
IVST		0.997**	0.072	−0.058	−0.088
	1.00455 ± 0.24520	<0.001	0.171	0.273	0.093
Ems		0.907**	−0.529**	0.033	0.036
	1.04976 ± 0.29380	<0.001	<0.001	0.529	0.498

Em1	1.04631±0.28578	0.935**	-0.591**	0.045	0.030
		<0.001	<0.001	0.388	0.573
Am1	1.06714±0.30780	0.983**	0.309**	0.022	0.013
		<0.001	<0.001	0.669	0.810
Emmean	1.04151±0.26409	0.913**	-0.614**	0.044	0.035
		<0.001	<0.001	0.397	0.503
ATV	1.02083±0.28283	0.992**	0.188**	0.013	-0.016
		<0.001	<0.001	0.807	0.759
AmTV	1.05017±0.28843	0.978**	0.176**	-0.001	-0.009
		<0.001	<0.001	0.978	0.857
EEmTV	1.01302±0.31295	0.983**	0.176**	-0.001	-0.009
		<0.001	0.001	0.978	0.857
LOVTV	1.01302±0.31295	0.994**	0.069	-0.001	-0.009
		<0.001	0.188	0.978	0.857
RVOTV	1.03084±0.24167	0.992**	-0.036	-0.013	0.035
		<0.001	0.487	0.805	0.499

表 7 30%样本校正值检验