

## 虚拟现实下空军飞行员心理旋转测试方法及正常参考值的研究

张梦迪<sup>1,2</sup>, 王蒙<sup>1</sup>, 徐先荣<sup>1</sup>, 熊巍<sup>1</sup>, 翟丽红<sup>1</sup>, 金占国<sup>1</sup>

<sup>1</sup>空军特色医学中心眩晕诊疗研究中心, 北京 100142; <sup>2</sup>苏州大学附属第二医院耳鼻咽喉科, 江苏苏州 215000

**摘要:** **背景** 近年来虚拟现实的发展为了解人类空间认知能力提供了新的技术手段。**目的** 建立空军飞行员虚拟现实下心理旋转测试方法及正常参考值范围, 为评估空军飞行员空间视觉化能力提供新方法。**方法** 选取2022年3-10月在空军特色医学中心进行体检的空军飞行员, 进行虚拟现实下字母R的旋转测试。采用飞行员技术水平评定量表作为测量效标, 记录测试的反应时间, 并以95% CI建立其正常参考值范围。同时按年龄、飞行时间及机型进行分组, 比较不同组别反应时间。**结果** 131例飞行员均为男性, 年龄(30.52 ± 6.84)岁。R字母旋转测试反应时间的参考值范围为14.00~29.00 s。22~28岁年龄组飞行员的反应时间显著低于35岁以上年龄组飞行员( $P < 0.05$ )。飞行时间 < 1 000 h组飞行员的反应时间显著低于飞行时间1 000~2 000 h组及 > 2 000 h组的飞行员( $P < 0.05$ )。不同机型飞行员的反应时间差异无统计学意义( $P = 0.675$ )。相关性分析显示, 全部受试者飞行技术水平量表得分与反应时间呈弱负相关( $r = -0.242, P = 0.005$ ); 全部受试者年龄、飞行时间与反应时间呈弱正相关( $r = 0.282, P = 0.001; r = 0.324, P < 0.001$ )。**结论** 本研究建立了一种新的心理旋转测试方法及正常参考值范围, 为评估飞行员空间视觉化能力及航空医学鉴定提供了客观参考依据。

**关键词:** 虚拟现实; 飞行员; 视觉化; 心理旋转; R字母旋转测试

中图分类号: R853

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2023)12-1320-06

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.2023.138

**引用本文:** 张梦迪, 王蒙, 徐先荣, 等. 虚拟现实下空军飞行员心理旋转测试方法及正常参考值的研究 [J]. 解放军医学院学报, 2023, 44 (12): 1320-1325.

### Establishment of reference values of mental rotation test for air force pilots based on virtual reality

ZHANG Mengdi<sup>1,2</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, XU Xianrong<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, ZHAI Lihong<sup>1</sup>, JIN Zhanguo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vertigo Clinic/Research Center of Aerospace Medicine, Air Force Specialized Medical Center, PLA, Beijing 100142, China;

<sup>2</sup>Department of Otorhinolaryngology, the Second Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu Province, China

Corresponding author: JIN Zhanguo. Email: ccjzg@126.com

**Abstract: Background** In recent years, the developments of virtual reality technology have provided a new technological tool for understanding human spatial cognitive abilities. **Objective** To establish reference values of mental rotation test for air force pilots based on virtual reality and provide a new method for evaluating their spatial visualization ability. **Methods** Air force pilots who underwent medical examination in Air Force Specialized Medical Center from March to October in 2022 were selected. They received R letter rotation test based on virtual reality. The pilot flight ability evaluation scale was used as a criterion of test validity. Their reaction time was recorded and the normal reference range was defined as 95% CI. And the difference in reaction time was compared between different age groups, different flight time groups and different air force pilot types. **Results** Totally 131 male pilots aged (30.52 ± 6.84) years old were enrolled. The reference range of reaction time in R letter rotation test was 14 to 29 seconds. Pilots in 22 - 28 years old age group had significantly slower reaction time than those in more than 35 years old group ( $P < 0.05$ ). Pilots with less than 1 000 hours of flight time had significantly slower reaction time than those in the other two groups ( $P = 0.015; P = 0.002$ ). There was no significant difference in reaction time between different air force pilot types ( $P = 0.675$ ). Pilots' scale scores were negatively correlated with their reaction time ( $r = -0.242, P = 0.005$ ), while their age and flight time were positively correlated with their reaction time ( $r = 0.282, P = 0.001; r = 0.324, P < 0.001$ ). **Conclusion** This study establishes a new test method and reference range for mental rotation test, which provides an objective reference for spatial visualization ability and medical assessment.

**Keywords:** virtual reality; pilots; visualization; mental rotation; R letter rotation test

**Cited as:** Zhang MD, Wang M, Xu XR, et al. Establishment of reference values of mental rotation test for air force pilots based on virtual reality [J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2023, 44 (12): 1320-1325.

收稿日期: 2023-02-13

基金项目: 军队课题 (BKJ23WS1J002)

作者简介: 张梦迪, 女, 硕士。研究方向: 飞行人员空间认知功能评价。Email: mengdd018@163.com

通信作者: 金占国, 男, 博士, 副主任医师, 硕士生导师。Email: ccjzg@126.com

空间视觉化能力描述了对空间信息的各种复杂心理操作, 如想象平面图案的折叠或展开、描绘物体的旋转以及物体相对位置改变的能力, 是空间认知能力的重要组成部分之一<sup>[1]</sup>。心理旋转是

一种连续的空间转换认知过程，衡量个体对以某种角度旋转或呈镜像翻转的空间物体进行心理表征和旋转的能力，是空间视觉化能力的主要维度之一<sup>[2]</sup>。心理旋转能力对于飞行员获得空间复杂技能、物体识别、问题解决和行动规划等能力非常重要<sup>[3]</sup>。研究心理旋转的目的是为了评价个体的视觉空间能力，并探索视觉想象和空间认知过程<sup>[4-5]</sup>。最常用的测试心理旋转能力的范式之一是由 Cooper 和 Shepard<sup>[6]</sup> 于 1973 年提出的基于字母或数字的旋转测试，在这个测试中，受试者被指示判断一个倾斜的字母或数字是以其正常形式出现，还是以其镜像方式出现。

随着虚拟现实 (virtual reality, VR) 技术的发展，新的空间能力测验方法也应运而生，使得空间能力的测验内容更具真实感<sup>[7]</sup>。国内相关报道大多基于计算机的非沉浸式、物理实验来进行研究，没有将虚拟现实技术彻底融入空间认知的应用评估中。本研究将虚拟现实技术与心理学空间认知能力测试相结合，完善分析指标，建立了一种新的心理旋转能力测试方法及正常参考值范围。通过探讨各组飞行员在 R 字母旋转测试中反应时间的差异以及飞行员的年龄、飞行时间、机型对心理旋转能力的影响，为评估飞行员空间视觉化能力及航空医学鉴定提供了客观的参考依据。

### 对象与方法

**1 研究对象** 选取 2022 年 3 - 10 月来空军特色医学中心进行体检的空军飞行员。纳入标准：(1) 本科学历；(2) 右利手且视力正常；(3) 能熟练操作手柄；(4) 戴上头盔没有眩晕感；(5) 听从测试安排，态度端正，积极配合完成各项测验；(6) 自愿参加测试并签署知情同意书。本研究已通过空

军特色医学中心伦理委员会审批，批件号：空特(新技术)第 2022-16-SL02。

根据先前的研究经验<sup>[8]</sup>，将受试者按年龄分为 3 组：22 ~ 28 岁组 (62 例)，29 ~ 35 岁组 (27 例)，> 35 岁 (42 例)；根据飞行时间分为 3 组：< 1 000 h 组 (62 例)，1 000 ~ 2 000 h 组 (31 例)，> 2 000 h 组 (38 例)；根据驾驶机型分为第二代空军飞行员组 (83 例) 和第三代空军飞行员组 (48 例)。

**2 实验设备** 使用 HTC VIVE 虚拟现实设备结合 Unity3D 引擎开发的 R 字母旋转测试系统。该测试软件符合人体工程学的设计，可调节镜头距离和瞳孔距离、可调节头盔和耳机。通过两个传感器将一个测试环境变成三维空间，在虚拟场景中受试者操作遥控手柄与测试环境进行精密的互动以及沉浸式的交流与体验。

**3 测试软件** 基于 Cooper 和 Shepard<sup>[6]</sup> 的 R 字符表象旋转实验，本研究测验模型使用专业建模软件 3DMAX，创建 1 个三维的 R 字母模型。测试环境的背景为灰色 (RGB: 75, 75, 75)，R 字母模型的大小比例为现实空间 20 cm。双眼的视角距离为 1 m。R 字母模型分为正像和镜像，正像模型和镜像模型均有 6 种旋转角度 (0°、60°、120°、180°、240°和 300°)，见图 1。测试中每次随机呈现一个刺激模型，要求被试者判断该字母是正像的 R，还是镜像的 R，在保持高正确率的同时，尽快做出判断。总共有 12 题，要求被试者在看到呈现的 R 字母后，不管其具体方位和旋转角度如何，尽快判断该 R 字母是正像还是镜像，并迅速按键。方法是右手按 VR 手柄扳机键 (表示“是”，即正像)，或用左手按 VR 手柄扳机键 (表示“否”，即镜像)。测试过程中判断正确得 1 分，判断错误

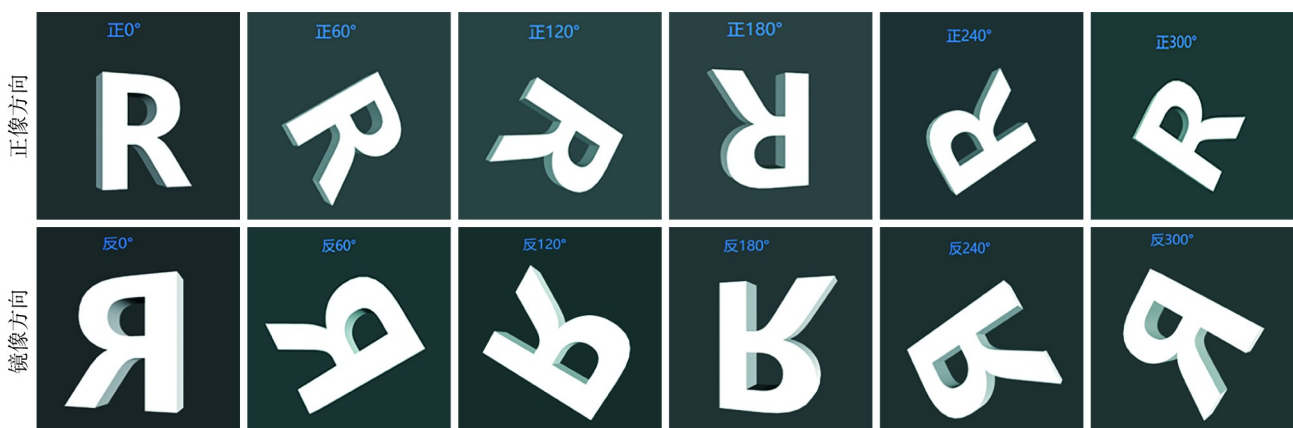


图 1 字母“R”在其正像和镜像方向上的不同方位角度

Fig.1 The letter “R” at various orientation angles in both its normal and mirror-image orientations

则将题目放置到余下的题目中,进行随机抽取提问。测试场景如图2所示。

**4 R字母旋转测试** 本研究在安静的房间内进行:(1)准备阶段:受试者进入房间,熟悉测试环境和设备;告知被试研究的目的、操作流程、可能出现的风险、预防措施及终止测试的情况,并签署知情同意书。受试者阅读纸质指导语,明确本次实验任务。(2)学习阶段:受试者佩戴VR头盔观看引导教程,跟随指令完成相应手柄按键操作,通过操作手柄自行选择进入下一阶段或再次学习。(3)练习阶段:完成约2 min与正式实验相似测试,要求被试者在保证正确的前提下尽可能地做出反应,即判断虚拟场景中的R字母是正像还是镜像;练习阶段确保受试者在进入正式实验之前已经熟练掌握按键操作。(4)正式测试阶段:共12个题目,要求受试者满足准确率至少85%(即答对题数 $\geq 10$ 题)的标准<sup>[9]</sup>,记录此时的答题时间和错误次数。心理旋转任务中的反应时间由识别刺激的运动前反应时间、从识别刺激到肌肉活动开始的运动反应时间、从手臂开始移动到按下按键的运动时间组成。本研究中反应时间以秒为单位。

**5 飞行能力评估** 采用《飞行员技术水平自评评定量表》作为本次研究的测量效标<sup>[10]</sup>。该量表共计23个条目,采用五级评分制,旨在尽可能客观地评定飞行人员的实际飞行能力。由受试者根据平时的实际技术水平为依据,客观准确地填写自评量表。由于最后2个条目为开放性问题,故不

纳入此次评定内容。

**6 数据处理与分析** 使用SPSS 23.0统计软件对本研究中的相关数据进行统计分析。符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示。非正态分布的计量资料以 $Med(IQR)$ 表示,并以95%CI建立正常参考值范围。采用Mann-Whitney  $U$ 检验对两组间的非正态分布计量资料进行分析。采用Kruskal-Wallis检验对三组间的非正态分布计量资料进行分析。同时采用Spearman检验分析R字母旋转测试的反应时间与飞行技术水平量表得分、年龄、飞行时间之间的相关性。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 结果

**1 研究对象一般资料** 本研究131例飞行员均为男性,年龄22~47( $30.52 \pm 6.84$ )岁,飞行时间为260~4 500( $1 342.2 \pm 999.1$ )h。

**2 R字母旋转测试反应时间参考值** 本研究131例健康男性飞行人员在使用R字母旋转测试进行测试后,中位反应时间为19.00(IQR: 17.00~21.00)s,正常参考值范围18.85~20.16。见表1。

**3 不同年龄组别飞行员R字母旋转测试反应时间比较** 如图3所示,本研究中22~28岁组、29~35岁组及35岁以上年龄组的飞行员反应时间差异有统计学意义( $H=10.89, P=0.004$ )。其中,22~28岁年龄组飞行员的反应时间低于35岁以上年龄组飞行员[18.00(IQR: 16.00~20.00)s vs 19.50(IQR: 18.00~24.00)s,  $Z=-3.205, P=0.001$ ]。见表1。

**4 不同类型飞行员R字母旋转测试反应时间比较** 如图3所示,本研究中第二代空军飞行员与第三代空军飞行员的反应时间差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。见表1。

**5 不同飞行时间组别飞行员R字母旋转测试反应时间比较** 如图3所示,本研究中飞行时间 $< 1 000$ h组、1 000~2 000h组及飞行时间 $> 2 000$ h组的飞行员反应时间差异有统计学意义( $H=11.44, P=0.003$ )。其中,飞行时间 $< 1 000$ h组的反应时间显著低于飞行时间1 000~2 000h组及 $> 2 000$ h组[18.00(IQR: 16.00~20.00)s vs 19.00(IQR: 17.00~22.00)s、19.00(IQR: 17.75~24.00)s;  $Z=-2.441, P=0.015; Z=-3.049, P=0.002$ ]。见表1。

**6 相关性分析** 本研究中的131例受试者飞行技术水平量表总得分与反应时间呈弱负相关( $r=-0.242, P=0.005$ );全部受试者年龄、飞行时间与R字母旋转测试中的反应时间呈弱正相关( $r=0.282, P=0.001; r=0.324, P < 0.001$ )。见图4。

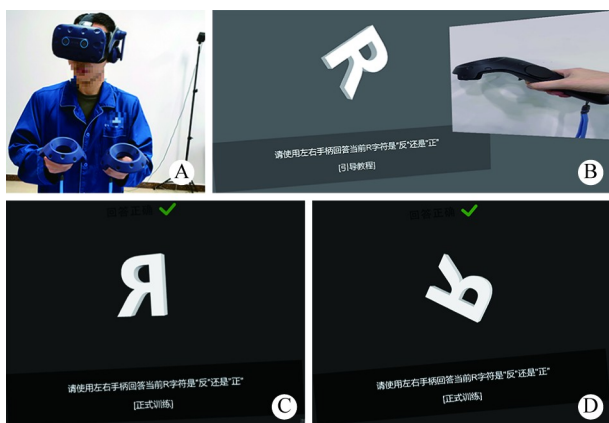


图2 R字母旋转测试场景

A: 头戴HTV VIVE显示器和操作图; B: R字母旋转测试的引导教程截图; C~D: 不同角度R字母的答题过程屏幕截图

Fig.2 Practical demonstration of R letter rotation test

A: An example of using handle and head-mounted display for testing; B: Screenshot of undergoing tutorial for R letter rotation test; C-D: Screenshot of the answer process with different angles of the letter R

表 1 R 字母旋转测试反应时间参考值及与年龄、机型、飞行时间的关系

Tab. 1 References for letter R rotation test reaction time and the relation to age, machine type and flight time

项目	反应时间/s				
	$\bar{x} \pm s$	<i>Md</i> (IQR)	95% <i>CI</i>	<i>H/Z</i> 值	<i>P</i> 值
R字母旋转测试(n=131)	18.50 ± 3.78	19.00(17.00 ~ 21.00)	18.85 ~ 20.16		
年龄				10.890	0.004
22 ~ 28岁(n=62)	18.39 ± 3.14	18.00(16.00 ~ 20.00)	17.59 ~ 19.18		
29 ~ 35岁(n=27)	19.67 ± 3.40	19.00(17.00 ~ 21.00)	18.32 ~ 21.01		
>35岁(n=42)	21.05 ± 4.35	19.50(18.00 ~ 24.00)	19.69 ~ 22.40		
机型				-0.419	0.675
二代机(n=83)	19.47 ± 3.67	19.00(17.00 ~ 21.00)	18.67 ~ 20.27		
三代机(n=48)	19.56 ± 3.99	19.00(17.00 ~ 21.00)	18.40 ~ 20.72		
飞行时间				11.440	0.003
<1 000 h (n=62)	18.23 ± 2.83	18.00(16.00 ~ 20.00)	17.51 ~ 18.94		
1 000 ~ 2 000 h (n=31)	20.39 ± 3.97	19.00(17.00 ~ 22.00)	18.93 ~ 21.84		
>2 000 h (n=38)	20.87 ± 4.34	19.00(17.75 ~ 24.00)	19.44 ~ 22.29		

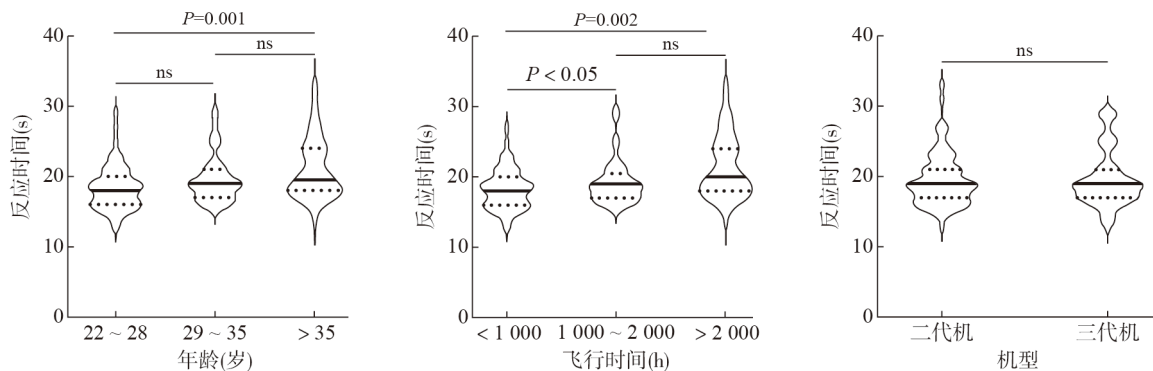


图 3 不同组别中 R 字母旋转测试的反应时间比较

Fig.3 Comparison of reaction time for R letter rotation test in different groups

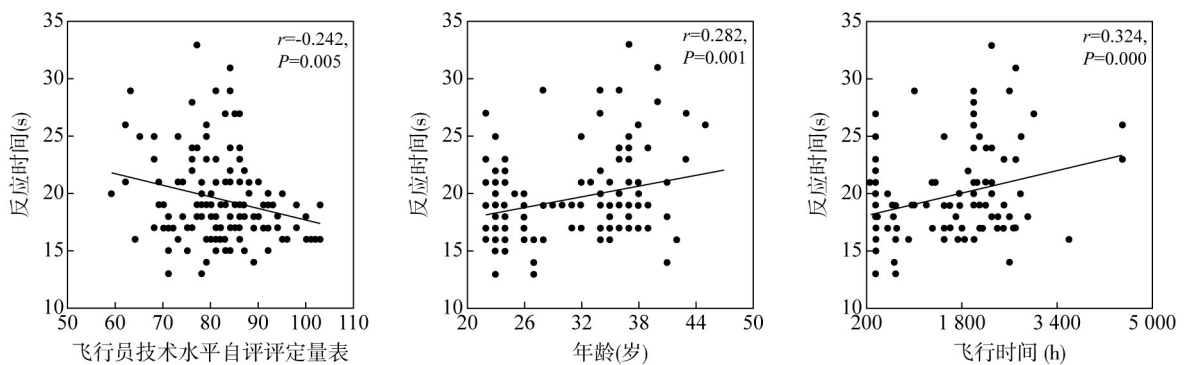


图 4 131 例飞行员 R 字母旋转测试的反应时间与量表分数、年龄、飞行时间之间的相关性

Fig.4 Correlation between the reaction time of R letter rotation test and scale scores, age or flight time in 131 pilots

### 讨论

心理旋转是快速准确地旋转二维或三维图形的心理表征能力<sup>[1]</sup>。已有研究表明，在进行以字母为测试材料的心理旋转能力时，男性与女性没有差异<sup>[12]</sup>。由于开始时无法确定最终纳入男性飞行员和女性飞行员的例数，为确保每组之间的男性和女性参与人数差异不会影响各组的结果，本

研究选择了字母 R 作为本研究的测试材料。本研究中，在虚拟环境下使用正常或镜像的不同角度呈现的字母 R 为测试材料，以随机方式呈现 12 次，得到平均反应时间为 (18.50 ± 3.775) s。在 Baarbé 等<sup>[13]</sup>的一项心理旋转任务中，使用计算机随机为 13 例健康被试呈现了不同角度 (0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°) 的字母 R (以正常或镜像)，每个角度呈现 5 次 (共 80 次)，得到

平均反应时间为  $(99.44 \pm 21.19)$  s。与本研究结果相差约 0.156 s。陈琼等<sup>[14]</sup>使用计算机呈现的正像或镜像 R 字母 ( $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $240^\circ$ 、 $300^\circ$ )，对 15 例健康男性空军飞行员进行空间心理旋转任务，共呈现 60 次，得到平均反应时间为  $(84.49 \pm 22.90)$  s。与本研究结果相差 0.061 s。我们还发现飞行员的反应时间与飞行技术水平评定量表总分呈显著负相关 ( $r=-0.242$ ,  $P=0.005$ )，与年龄、飞行时间呈显著正相关 ( $r=0.282$ ,  $P=0.001$ ;  $r=0.324$ ,  $P<0.001$ )。这表明虚拟现实技术下的 R 字母旋转测试可以作为一种可靠的工具来评估不同飞行能力水平、不同年龄段、不同飞行时间飞行员的心理旋转能力，虚拟现实技术是空间视觉化能力测试扩展到常规临床使用的有前途的领域。

既往对于复杂的认知测试结果多用准确率来表示，如三维立方体旋转测试，而对于简单的空间认知测试只用反应时间来衡量，如字母旋转测试。本研究要求全部受试者在 R 字母旋转测试中的正确率要达到 85% 以上，因此本研究只考虑反应时间作为衡量心理旋转能力的标准，并且讨论了此群体中可能存在的年龄、飞行时间及机型对测试结果的影响。普遍认为，成年人的认知能力在达到最佳水平之后会呈现随年龄增长而逐渐下降的趋势<sup>[15-16]</sup>。而在飞行员 (具有高空间认知能力) 中，经验因素可能会发挥作用。已有研究发现，航空领域专业知识改善了与年龄效应相关的认知空间加工速度减慢的状况<sup>[17-19]</sup>。即使是年长的飞行员，利用其积累的航空知识和飞行技能仍可以保持飞行控制性能和航空决策质量。有研究报告，飞行员认知能力随着年龄增长也会下降<sup>[20]</sup>。这些能力对飞行定向至关重要，如心理旋转能力、信息处理速度的能力、与工作记忆及注意力相关的能力。已有研究证明，由于与年龄相关的认知能力变化，年长的飞行员在双重任务测试中的表现总体上比年轻的飞行员差，特别是当任务要求高度注意与精确控制时<sup>[21-22]</sup>。本研究结果也表明，随着年龄增长，飞行员的心理旋转能力呈现下降的趋势，这可能与我们的测试要求有关。在 R 字母旋转测试中，我们要求飞行员在保证正确的前提下尽可能快地做出判断，这需要高度集中注意力并快速加工、处理识别到的信息；结果显示，不同年龄组飞行员的反应时间有统计学差异 ( $H=10.89$ ,  $P=0.004$ )，22 ~ 28 岁年龄组飞行员的反应时间显著低于 35 岁以上年龄组 ( $Z=-3.205$ ,  $P=0.001$ )。

我们发现不同飞行时间组在 R 字母旋转测试中的反应时间有统计学差异 ( $H=11.44$ ,  $P=0.003$ )。飞行时间  $<1000$  h 组的反应时间显著低于飞行时间  $1000 \sim 2000$  h 组及  $>2000$  h 组 ( $Z=-2.441$ ,  $P=0.015$ ;  $Z=-3.049$ ,  $P=0.002$ )。Verde 等<sup>[23]</sup>的一项关于心理旋转任务的研究中也出现了飞行员的飞行时间与反应时间呈现显著正相关的结果，认为反应较慢与飞行经验有关。优秀的飞行员更习惯于处理很多不同的输入，这些输入需要互通的工作记忆和注意力，如在管理速度和方向的视觉信息，以保持理想的飞行路线。本研究以不同机型进行分组时，发现两组飞行员的 R 字母旋转测试结果无统计学差异 ( $Z=-0.419$ ,  $P=0.675$ )。丹笑颖等<sup>[24]</sup>使用基本认知能力测验软件，发现高性能战斗机飞行员在工作记忆和近事记忆方面的能力比运输机飞行员更强。因此，将来进一步研究高性能战斗机飞行员与其他机型飞行员在 R 字母旋转测试中的表现，对评估个体空间视觉化能力具有十分重要的临床意义。

飞行是一项对心理能力有很大挑战性的活动，对从业人员的要求非常高，高能力及良好的心理健康状况是保证飞行质量的关键因素。作为一种新的空间视觉化能力测试方法，虚拟现实下的 R 字母旋转测试是评价心理旋转能力的可靠手段。本研究建立了心理旋转测试的正常参考值范围，为评估我军空军飞行员心理旋转能力及航空医学鉴定提供了一种新的技术手段。

**作者贡献** 张梦迪：试验设计，数据处理，文章撰写；金占国：资金获取，监督指导，审读和修订；徐先荣：审读和修订；王蒙：实验数据整理；翟丽红：资源提供。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突。

**数据共享声明** 本篇论文的相关数据暂不开放共享，如有需要，可联系本文通信作者获取，Email: ccjzg@126.com。

#### 参考文献

- 1 Tandon S, Abdul-Rahman A, Borgo R. Measuring effects of spatial visualization and domain on visualization task performance: a comparative study [J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2023, 29 (1): 668-678.
- 2 Stewart EEM, Hartmann FT, Morgenstern Y, et al. Mental object rotation based on two-dimensional visual representations [J]. *Curr Biol*, 2022, 32 (21): R1224-R1225.
- 3 Moreau D, Mansy-Dannay A, Clerc J, et al. Spatial ability and motor performance: assessing mental rotation processes in elite and novice athletes [J]. *Int J Sport Psychol*, 2011, 42: 525-547.
- 4 Ruggeri P, Nguyen N, Pegna AJ, et al. Interindividual

- differences in brain dynamics of early visual processes: impact on score accuracy in the mental rotation task [J]. *Psychophysiology*, 2020, 57 ( 11 ) : e13658.
- 5 Gunia A, Moraresku S, Vlček K. Brain mechanisms of visuospatial perspective-taking in relation to object mental rotation and the theory of mind [J]. *Behav Brain Res*, 2021, 407: 113247.
- 6 Cooper LA, Shepard RN. Chronometric studies of the rotation of mental images [M] // Chase WG. Visual Information Processing. Academic Press, 1973: 75-176.
- 7 Kurul R, Ögün MN, Neriman Narin A, et al. An alternative method for anatomy training: immersive virtual reality [J]. *Anat Sci Educ*, 2020, 13 ( 5 ) : 648-656.
- 8 武国城, 毕红哲, 姚阿庆, 等. 年龄因素对飞行员短时记忆、速算和双重作业能力的影响 [J]. *中华航空航天医学杂志*, 1998, 9 ( 4 ) : 229-230.
- 9 Searle JA, Hamm JP. Individual differences in the mixture ratio of rotation and nonrotation trials during rotated mirror/normal letter discriminations [J]. *Mem Cognit*, 2012, 40 ( 4 ) : 594-613.
- 10 苗丹民, 胡文东, 游旭群, 等. 飞行技术水平多效标评价系统与 Sternberg 双重任务测验效度分析 [J]. *中华航空航天医学杂志*, 1997, 8 ( 3 ) : 149-153.
- 11 Moen KC, Beck MR, Saltzman SM, et al. Strengthening spatial reasoning: elucidating the attentional and neural mechanisms associated with mental rotation skill development [J]. *Cogn Res Princ Implic*, 2020, 5 ( 1 ) : 20.
- 12 Cohen W, Polich J. No hemispheric differences for mental rotation of letters or polygons [J]. *Bull Psychon Soc*, 1989, 27 ( 1 ) : 25-28.
- 13 Baarbé JK, Holmes MWR, Murphy HE, et al. Influence of subclinical neck pain on the ability to perform a mental rotation task: a 4-week longitudinal study with a healthy control group comparison [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2016, 39 ( 1 ) : 23-30.
- 14 陈琼, 何琳, 陈晓健, 等. 飞行员低氧敏感指标在心理旋转认知中的表达 [J]. *空军军医大学学报*, 2023, 44 ( 1 ) : 53-57.
- 15 Lopez A, Caffò AO, Bosco A. The impact of age and familiarity with the environment on categorical and coordinate spatial relation representations [J]. *Scand J Psychol*, 2021, 62 ( 2 ) : 125-133.
- 16 Rivera DS, Lindsay CB, Oliva CA, et al. A multivariate assessment of age-related cognitive impairment in Octodon degus [J]. *Front Integr Neurosci*, 2021, 15: 719076.
- 17 Causse M, Chua ZK, Rémy F. Influences of age, mental workload, and flight experience on cognitive performance and prefrontal activity in private pilots: a fNIRS study [J]. *Sci Rep*, 2019, 9 ( 1 ) : 7688.
- 18 Chen H, Liu S, Wanyan XR, et al. Influencing factors of novice pilot SA based on DEMATEL-AISM method: from pilots' view [J]. *Heliyon*, 2023, 9 ( 2 ) : e13425.
- 19 Zhang MD, Wang M, Feng HM, et al. Pilots' spatial visualization ability assessment based on virtual reality [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2023, 94 ( 6 ) : 422-428.
- 20 Peters E, Hess TM, Västfjäll D, et al. Adult age differences in dual information processes: implications for the role of affective and deliberative processes in older adults' decision making [J]. *Perspect Psychol Sci*, 2007, 2 ( 1 ) : 1-23.
- 21 Nakagawara VB, Montgomery RW, Wood KJ. Changing demographics and vision restrictions in civilian pilots and their clinical implications [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2004, 75 ( 9 ) : 785-790.
- 22 Moffat SD. Aging and spatial navigation: what do we know and where do we go? [J]. *Neuropsychol Rev*, 2009, 19 ( 4 ) : 478-489.
- 23 Verde P, Piccardi L, Bianchini F, et al. Gender effects on mental rotation in pilots vs. nonpilots [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2013, 84 ( 7 ) : 726-729.
- 24 丹笑颖, 万憬, 戴成祥, 等. 不同机种飞行员基本认知能力的特征及其意义 [J]. *中国行为医学科学*, 2004, 13 ( 4 ) : 448-449.

(责任编辑:施晓亚)