



北京航空航天大学学报

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics

ISSN 1001-5965, CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目: 对比阈值效应对跑道视程测量的影响
作者: 庄子波, 王文惠, 台宏达, 王晶
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0040
收稿日期: 2022-01-21
网络首发日期: 2022-04-22
引用格式: 庄子波, 王文惠, 台宏达, 王晶. 对比阈值效应对跑道视程测量的影响[J/OL]. 北京航空航天大学学报. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0040>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

对比阈值效应对跑道视程测量的影响

庄子波¹, 王文惠², 台宏达^{3,✉}, 王 晶³

(1. 中国民航大学 飞行分校, 天津 300300; 2. 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300;

3. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

*通信作者 E-mail: bhxb@buaa.edu.cn

摘要 针对传统的日间跑道视程(RVR)计算过程中忽略人眼对比阈值的影响问题, 本文首先理论分析人眼对比阈值的大小及偏差对RVR测量范围和精度的影响, 然后分别测量与飞行一线密切相关的飞行、管制、应用气象三类专业学员的对比阈值, 探究不同光环境下对比阈值的差异性对RVR测量的精度及对飞行运行中可接受的误差范围的影响。实验结果表明: 相较于其他两类实验对象, 飞行学员的对比阈值更小, 具有更好的能见度水平。同时, 背景亮度会影响对比阈值, 亮度越大, 对比阈值越小, 对RVR观测有利, 但是背景亮度增大或者添加眩光都会使实验对象之间的对比阈值差异增大, 引起更大的RVR误差。这种误差在大气状况良好时是可以接受的, 但是在RVR小于800m的低能见度状况下超出了规定范围, 尤其是在RVR大小为400m或800m这种航空运行的关键节点, 会对飞行活动产生影响, 应考虑将对对比阈值引起的偏差进行修正, 以保证低能见度条件下的飞行安全和运行效率。

关键词 能见度; 对比阈值; 对比敏感度; 跑道视程(RVR);

中图分类号 V321.223; 文献标志码 A DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0040

Influence of contrast threshold effect on runway visual range measurement

ZHUANG Zibo¹, WANG Wenhui², TAI Hongda³, WANG Jing³

(1. The Flight Technology College of CAUC, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

*E-mail: bhxb@buaa.edu.cn

Abstract The influence of eye contrast threshold is neglected in the traditional calculation of daytime runway visual range (RVR). Therefore, this paper first theoretically analyzes the influence of human eye contrast threshold on RVR measurement range and accuracy. Then, experiments are designed to measure the contrast thresholds of students majoring in flight, control and applied meteorology, which are closely related to the front line of flight, respectively, to explore the differences of contrast thresholds in different light environments and their influence on RVR. The experimental results show that compared with the other two types of experimental objects, the contrast threshold of flight cadets is smaller and the visibility level is better. At the same time, the background brightness will also affect the contrast threshold. The greater the brightness, the smaller the contrast threshold, which is beneficial to RVR observation. However, increasing the background brightness or adding glare will increase the contrast threshold difference between the experimental subjects, causing greater RVR error. This error is acceptable when the atmosphere is good, but it is beyond the specified range when the RVR is less than 800m in low visibility, especially when the RVR is 400m or 800m, which is the key node of aviation operation, which will affect the

收稿日期: 2022-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(基金号 41905129)

作者简介: 庄子波,男,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向: 航空气象。台宏达,男,博士,讲师,主要研究方向: 大气光学、民用航空气象探测。

Fund: National Natural Science Foundation of China (41905129)

网络首发时间: 2022-04-22 10:39:33 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220421.1736.001.html>

flight activities. The deviation caused by the contrast threshold should be corrected to ensure the flight safety.

Key words visibility; comparison threshold; contrast sensitivity; runway visual range (RVR)

能见度是用以衡量大气浑浊程度的物理量,是影响民航运行安全和效率的重要气象要素^[1]。跑道视程作为能见度在航空领域的特殊应用,是决策机场能见度条件是否达到飞机起降要求的关键因素,是低能见度条件下衡量机场起降风险的最直接指标之一。国际民航组织(ICA0)将跑道视程(RVR)定义为:在机场跑道中心线上,飞机上的飞行员能看清跑道地面标志,或能看清跑道边灯或其中心线灯的距离^[2]。

日光条件下仪器测量 RVR 的主要理论依据是 Koschmieder 定律,它将人眼对比阈值与目标物亮度对比度相联系,作为是否“可见”的判别标准。相较于人工目视观测,仪器测量结果具有更好的一致性,也能实现快速更新 RVR 变化信息的要求。但是,仪表估计出的 RVR 大小与航空器运行过程中从业人员实际观测到的结果之间可能存在很大偏差。世界气象组织^[3](World Meteorological Organization, WMO)在 1990 年对测量能见度的方法进行比较,其中包括 2 种人工目视观测和 25 种仪器测量,通过对测量结果的比较发现,白天目视估计比仪器测量得到的能见度值高出约 15%。

目前,众多学者的研究从仪器测量散射系数精度的角度出发,尝试以提高仪器的可靠性,来提高其观测的准确度。如李浩等^[4]分析气溶胶性质不确定性和仪器光电机技术性能变化两方面的误差源以及不确定度。熊兴隆等^[5]针对激光大气透射仪的测量精度受到多次散射影响的问题,提出综合基线长度、接收机视场角以及多次散射影响的误差分析模型。Kim^[6]同时进行三种能见度测量:基于图像、基于人眼和基于光学的能见度测量,对三组测量数据之间的相关性进行分析,确定每种方法的不确定性和误差。Wang 等^[7]详细分析了仪器的增益和零漂移误差以及固有亮度对比度对大气能见度测量误差和精度的影响。但是,能见度是一种复杂的心理-物理现象^[8],仅从能见度测量仪器一端进行优化不足以满足对航空日益增加的航班运行效率和运行安全对低能见度下的运行需求。人眼对比阈值是影响 RVR 观测的另一个重要指标,目前,还未见对比阈值对 RVR 测量精度和误差的相关报道。

现有的研究证实对比阈值会受到年龄^[9-10]、工作负荷^[11]、背景亮度和眩光^[12]等诸多因素的影响,且具有个体差异^[13]。但是在现行的测量能见度和 RVR 方法中却没有考虑对比阈值的这些特性,而是直接使用定值 0.05 作为对比阈值进行计算^[2],这势必增加了 RVR 测量的不确定性和民航运行的安全风险。

本文从日间 RVR 测量原理出发,理论分析对比阈值的大小及其偏差对 RVR 的影响。并测量年龄分布在 19~21 岁之间民航相关专业的学生的对比敏感度,其中管制学员、应用气象学生、飞行学员各 40 名,计算得到其对比阈值,分析视觉阈值的差异性在不同能见度条件下和不同光照条件下对航空运行的影响,尤其是在低能见度条件下对航空运行安全的影响,为进一步精细化测量 RVR 提供依据。

1 日间 RVR 测量的基本原理

日间测量 RVR 的主要理论依据是 Koschmieder 定律。它建立了位于远处的观测者在地平天空下看到的目標物的视亮度对比(C)与其固有亮度对比(C_0)之间的关系:

$$C = C_0 e^{-\sigma d} \quad (1)$$

式中 σ 为消光系数, d 为目标物与观测者之间的距离。

亮度对比度(C)是目标物的亮度与其背景亮度之差与背景亮度的比值,表达式为:

$$C = \frac{L_b - L_h}{L_h} \quad (2)$$

其中, L_h 是天空背景亮度, L_b 是目标物亮度。

根据(1)式随着观察者和目标之间的距离 d 的增加, C 会不断减小,这使得区分目标物变得越

来越困难。日间 RVR 被表示为：当 C 降低到对比阈值 ε 时，人眼恰好可以准确区分目标，此时的距离 d 就是 RVR 的大小 R ：

$$R = -\frac{\ln \varepsilon}{\sigma} \quad (3)$$

对比阈值(ε)是人眼能察觉的最小亮度对比值，即可使区分目标物与其背景的值。 ε 是一个无量纲量，通常情况下不会直接测量，一般是通过测量人眼对比敏感度间接计算 ε 。

对比敏感度(contrast sensitivity, CS)，是指人眼分辨边界模糊的物体的能力，与 ε 大小呈倒数关系。利用仪器测量受试者的对比敏感度，可以得到相应的 ε ，计算公式为：

$$\varepsilon = \frac{1}{CS} \quad (4)$$

对比敏感度越大，则表示人眼能分辨的背景与目标物亮度差值越小，人眼的视觉功能越好。

2 对比阈值对 RVR 的影响分析

2.1 对比阈值对 RVR 大小的影响

现行的日间 RVR 计算公式中的对比阈值 ε 使用 ICAO 的推荐值 0.05，但 ε 的大小因人而异，Middleton^[13]对飞行员进行 1000 次测量，实验结果得到的个体的 ε 值从 0.01 到 0.2 不等。选取三个消光系数 σ 的值代表不同的大气浑浊程度（ σ 越大则空气越浑浊），拟合 RVR 随 ε 变化情况。

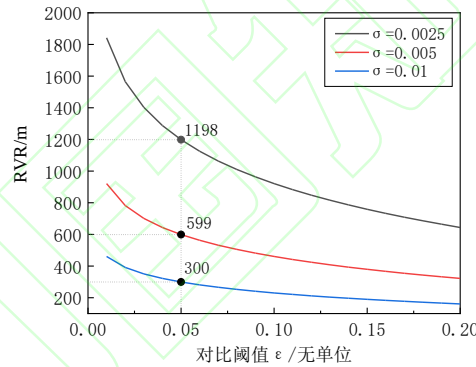


图 1 RVR 随 ε 变化情况
Fig. 1 RVR changes with contrast threshold

由图 1，在消光系数一定的条件下， ε 取值不同，对应获得的 RVR 具有较大差异，且大气状况越好这种差异越显著。在 $\sigma=0.0025$ 时，按照 $\varepsilon=0.05$ 计算得到的 RVR 理论值为 1198m。但是，如果将个体的 ε 分布代入计算，从 0.01 逐渐增至 0.2，相应得到的 RVR 值从 1842m 下降到 644m，减小 1198m（约为 1842m 的 65%）。

2.2 对比阈值对 RVR 误差的影响

对跑道视程计算公式（3）进行求导，可以得到对比阈值的测量偏差 $d\varepsilon$ 对 RVR 的影响，表示为：

$$dR = -\frac{1}{\sigma\varepsilon} d\varepsilon \quad (5)$$

根据（3）式有：

$$\frac{1}{\sigma} = -\frac{R}{\ln \varepsilon} \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式, 可以得到:

$$dR = \frac{R}{\varepsilon \ln \varepsilon} d\varepsilon \quad (7)$$

取 $d\varepsilon = -0.01$, RVR 为 800m 代入式(7), 拟合 ε 取值从 0.01 逐渐增加到 0.2 时, 得到的 RVR 绝对误差随对比阈值的, 如图 2。可以看出 ε 本身的误差会引起 RVR 的测量误差, 在 $\varepsilon = 0.2$ 时, 0.01 的 ε 负偏差会带来 25m 的 RVR 绝对误差, 但是相同的 ε 偏差下, $\varepsilon = 0.05$ 时, RVR 误差增加至 53m, $\varepsilon = 0.01$ 时, RVR 误差为 174m。 ε 越小, 相同大小的 ε 误差对 RVR 测量精度的影响越大。

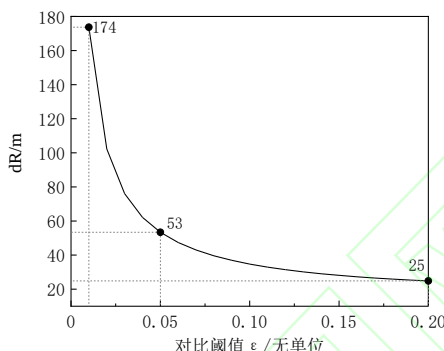


图 2 RVR 绝对误差随 ε 变化情况

Fig. 2 The absolute error of RVR changes with contrast threshold

3 人眼对比敏感度测量实验

3.1 实验对象

在执行飞行任务过程中, 气象观测员和管制人员是航空气象情报与服务的提供者, 而飞行员是航空气象情报的实际使用者, 他们之间视觉功能的差异, 会导致在相同的大气条件和环境下, 对目标物可见与否的判别不同, 某些低能见度或能见度满足飞行条件临界点的状况下, 甚至会影响飞行安全和航空运行效率。因此, 实验选取这三类人群作为研究目标。同时, 为排除年龄、用眼强度和工作负荷等因素的干扰, 实验对象的选取应尽可能满足年龄相近, 生活作息相似的要求。

故本实验选取年龄分布在 19~21 岁的管制学员、应用气象专业学生和飞行学员各 40 名, 共 120 人, 要求视力正常 (裸眼视力 ≥ 1.0), 或矫正视力大于 1.0 且佩戴眼镜进行实验, 均排除一切影响视觉功能的器质性疾病或活动性炎症。

3.2 实验方法

应用中国雷蒙光电科技有限公司研制的 RM800 型对比敏感度仪, 如图 3。采用空间光栅产生衍射条纹作为视标, 通过改变条纹的空间频率、亮度对比度以及方向来测试受试者的对比敏感度, 如图 4 所示。

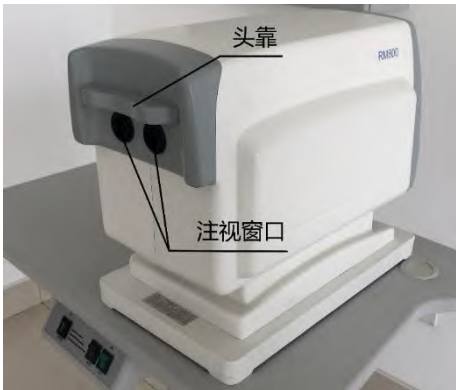


图 3 RM800 型对比敏感度仪
Fig. 3 RM800 contrast sensitivity instrument

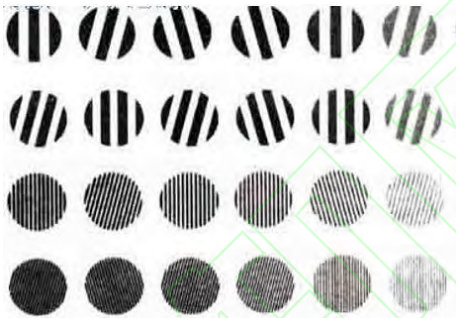


图 4 对比敏感度检测视标示意图
Fig. 4 Contrast sensitivity test depends on label intention

背景亮度为 $L=85\text{cd/m}^2$ 和 $L=3\text{cd/m}^2$ ，分别对应于白天和黄昏的亮度水平，每一个亮度水平上可以添加亮度为 20000cd/m^2 眩光,组合得到四个等级的测试环境，如表 1。

表 1测试等级
Tab.1 Test grade

测试等级	眩光	背景亮度
1	OFF	3cd/m^2
2	ON	3cd/m^2
3	OFF	85cd/m^2
4	ON	85cd/m^2

受试者依次在 4 个不同环境下进行对比敏感度测试，在每次测试开始前，需要进行 5min 的暗适应，且每个测试环境下的连续测试时长不超过 30min，以避免产生疲劳。

测试开始后，仪器会随机改变条纹的方向，测试者以问询的方式，从光栅条纹对比度最大的视标开始，依次检查。受检者能够正确回答的对比度最小的视标所对应的对比敏感度数据即为测量值，反复试验可确定出最具代表性的阈值数据^[14]。

3.3 光栅空间频率的选取

该仪器测量视标有 6 个空间频率，如表 2。空间频率是指每度视角内图像或刺激图形的亮暗作正弦调制的栅条周数，单位是周/(°)，表示条纹的粗细。条纹越粗，频率越低，反之则频率越高^[15]。每个空间频率都有一个对比阈值，即人所能分辨的最低对比度。为使实验数据最接近 RVR 观测时的真实值，应结合实际需要选取视标的空间频率。

WMO 规定，水平能见度观测时所选取的目标物的大小要适度，在观测者眼中目标物的对角不应小于 0.5° 。对角小于 0.5° 的目标物相比同样环境下的更大一点的物体即使在较短距离下将会变得不可见。然而，这类目标物的对角又不应超过 5° ^[3]。

当观测目标物的视角在 0.5-5.0 之间时，所对应的空间频率在 0.1-1 周/(°)范围内。故本实验选取

0.8 周/(°)视标的实验数据作为主要分析依据。

表 2 视标的空间频率
Tab.2 Spatial frequency of visual target

频率 周/(°)	0.8	3	6	11.9	18.9	23.8
-------------	-----	---	---	------	------	------

4 实验结果与讨论

将实验测得的人眼对比敏感度数据代入（4）式计算对比阈值 ϵ 。根据专业分组，参考张海良等^[16]在 2015 年对民航飞行员进行的对比敏感度调查与分析，选取显著性水平 0.01 为统计学检验依据，组间两两比较选用 SNK 法，利用 SPSS 软件对实验数据进行统计分析。各组数据均服从正态分布，且实验组之间具有方差齐性。数据显示，飞行学员与管制学员、管制与气象专业学生之间的对比敏感度数据没有显著差异（ $P>0.01$ ）。而在白天、白天有眩光和黄昏且有眩光三种测试环境下，飞行学员与气象学员的对比阈值数据差异具有统计学意义（ $P<0.01$ ）。应用 PASS 软件，对实验数据进行样本量和检验效能计算。在样本量为 40 的情况下，各组实验数据检验效能均大于 90%（ $\text{power}>0.9$ ），据此认为该样本量满足了统计的准确性和可靠性，统计分析得出的结论是可信的^[17]。

每组被试的对比阈值平均值，如表 2，计量方式以 $\bar{x}+s$ 表示。整体来看，三组实验对象的 ϵ 值都小于 ICAO 规定值 0.05，其中飞行学员的对比阈值 ϵ 最小。通过改变实验环境的亮度，实验对象的 ϵ 大小也随之发生变化：环境亮度越大， ϵ 越小，添加眩光也会使 ϵ 减小。

将实验测得的 ϵ 代入公式（3），计算得到的 RVR 看作是目视观测的真实值，与 ICAO 推荐的理论值之间的偏差 ΔR 的情况如图 5 所示，发现目视观测 RVR 的数据较理论值都呈现正偏差，且消光系数越小，这种正偏差越大。明暗环境对 RVR 目视观测的影响在飞行学员、管制学员和应用气象学生中具有相似的变化趋势：环境亮度增加，RVR 的目视观测值增加；添加眩光也能够增加 RVR 的观测。如果仅从 ϵ 对日间 RVR 大小的影响来看，明亮的环境、增加眩光都是有增益效果的。

表 3 气象学员、管制学员和飞行学员的对比阈值平均值
Tab. 3 Comparison threshold average of meteorological trainees, air traffic control trainees and flight trainees

实验组别	白天	黄昏	白天（有眩光）	黄昏（有眩光）
飞行学员	0.0169±0.0003	0.0182±0.0003	0.0144±0.0003	0.0168±0.0004
管制学员	0.0182±0.0004	0.0187±0.0004	0.0152±0.0004	0.0175±0.0003
气象学员	0.0188±0.0003	0.0194±0.0004	0.0172±0.0004	0.0187±0.0003

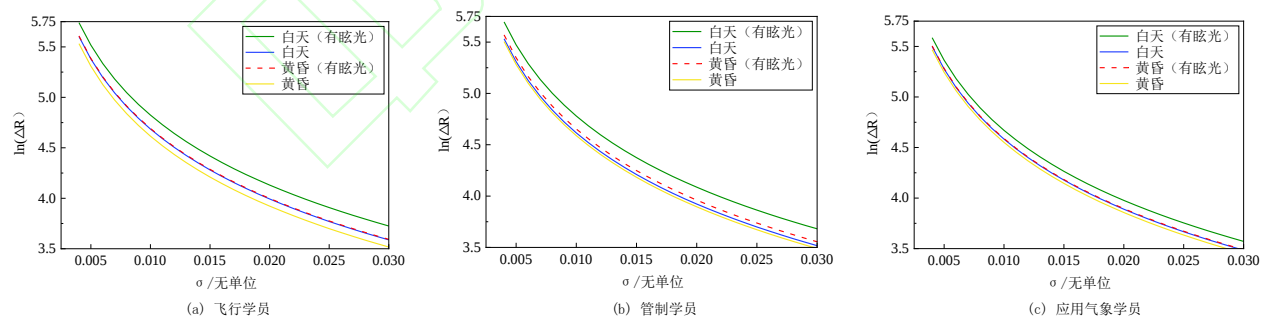


图 5 目视观测 RVR 较理论值偏差
Fig. 5 Deviation of visual RVR from theoretical value

从统计学角度来看，飞行学员和气象学员之间的对比阈值数据是有显著差异的，而在实际应用中，更加关注的是这种差异在 RVR 观测中如何表现，是否会对飞行作业产生影响。将表 2 的对比阈值数据代入（7）式中，计算得到飞行学员相较于应用气象学员观测 RVR 的绝对误差如图 6、图 7、图 8 所示。结合具体的航空运行标准，RVR 的报告范围为 10m~2000m，分辨率为 1m，测量的精度要求通常分为三个部分：

- (1) $RVR \leq 400m$ 时，最大允许误差为 10m。
- (2) $400m < RVR \leq 800m$ 时，最大允许误差为能见度的 25m。
- (3) $RVR > 800m$ 时，最大允许误差为 RVR 的 10%。

总体来看，背景亮度增加或者添加眩光，都会使 ε 差异增大，进而增加 RVR 的绝对误差。图 6 给出了 RVR 大于 800m 时不同人群目视观测 RVR 的绝对误差，可以看出误差全部落在可接受的范围。而图 7 和图 8 分别给出 RVR 在 400~800m 和小于 400m 的误差情况，随着 RVR 的增加， ε 差异引起 RVR 绝对误差增大，在背景亮度大且有眩光的环境下，甚至会出现误差超出规定范围的情况。

明亮的背景虽然能够使 ε 减小，增大 RVR 的目视观测范围，但是也会导致 ε 差异增大，带来更大的 RVR 误差。尤其是低能见度条件下，航空运行对 RVR 测量精度的要求更高，因此需要对由人眼对比阈值偏差引起的 RVR 误差进行修正，以满足飞行需要。

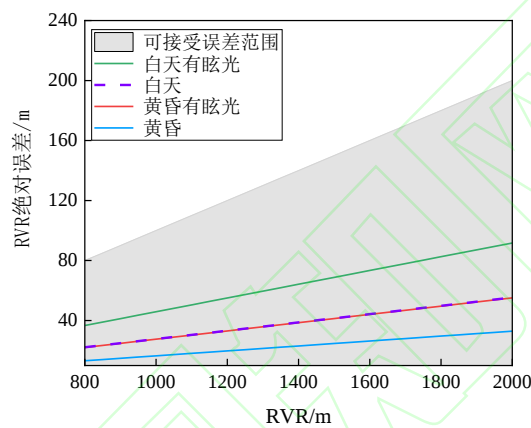


图 6 RVR 大于 800m 时 RVR 绝对误差
Fig. 6 The absolute error of RVR observed when RVR is greater than 800m

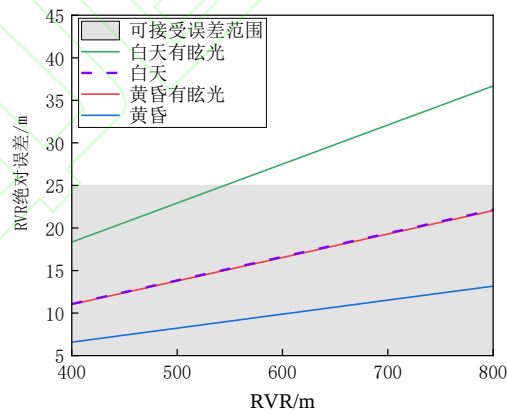


图 7 RVR 在 400~800m 范围内 RVR 绝对误差
Fig. 7 Absolute error of RVR observed in the range of 400~800

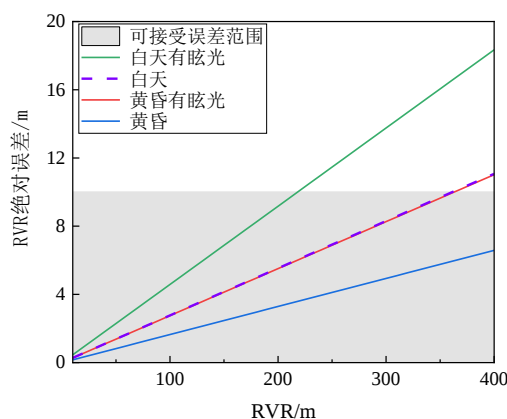


图 8 RVR 在 10~400m 范围内 RVR 绝对误差
Fig. 8 Absolute error of RVR observed in the range of 10~400m

5 结 论

从日间 RVR 探测的理论出发, 结合试验测量得到的对比阈值真实数据, 分析不同光环境下实验对象之间的对比阈值差异, 以及这种差异带来的对 RVR 测量范围和精度的影响:

1) 在飞行学员、管制学员和应用气象专业学生这三组实验对象中, 飞行学员的对比阈值是最小的, 且与应用气象学生的数据有显著性差异。需要强调的是, 实验测量的对比敏感度本身是一个个性化的指标, 根据生理、心理状态的不同具有个体差异。由于职业准入的要求, 使得飞行员群体在统计数据上呈现不同, 其本质还是个体差异的集中体现。但是针对跑道视程误差分析的实际需求来说, 不同人群之间的统计数据显然更具普适性和应用价值。

2) 环境亮度增加或者添加眩光, 都会使人眼对比阈值减小, 相应计算得到的 RVR 值更大, 这对 RVR 的观测是有利的。但是, 背景亮度增大也使实验对象之间的对比阈值的差异更大, 带来更大的 RVR 误差。

3) 由对比阈值差异导致的 RVR 误差在 RVR 大于 800m 时, 都落在了可接受误差范围内, 然而, 在 RVR 小于 800m 的低能见度条件下, RVR 误差超出了规定范围, 变得不可忽略, 应当加以修正。

ICAO 推荐的 0.05 的人眼对比阈值在实际应用过程中具有局限性, 可以进一步探究光环境对人眼对比阈值的具体数值影响, 对优化跑道视程和能见度测量具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Gultepe I, Sharman R, Williams P D, et al. A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(5):1869-1921.
- [2] ICAO. Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices 9328Doc AN/908 [M]. ICAO. 3 E. International Civil Aviation Organization, 2005:9-51.
- [3] D.J.Griggs, D. W.Jones, M.Ouldrige and W.R.Sparks. Instruments and Observing Methods Report[R]. World Meteorological Organization, 1990:84-137.
- [4] 李浩, 孙学金. 前向散射能见度仪测量误差的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1094-1098.
LI H, SUN X J. Theoretical analysis of measurement error of forward scattering visibility meter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6):1094-1098
- [5] 熊兴隆, 刘春媛, 蒋立辉, 李猛, 马愈昭, 台宏达. 多次散射影响下激光大气透射仪测量误差研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(10): 2037-2044.
XIONG X L, LIU C Y, JIANG L H, LI M, MA Y Z, TAI H D. Study on measurement error of laser atmospheric transmission instrument under the influence of multiple scattering [J]. Optoelectronic Laser, 2015, 26(10):2037-2044.
- [6] Kim K W. The comparison of visibility measurement between image-based visual range, human eye-based visual range, and meteorological optical range[J]. Atmospheric environment, 2018, 190(OCT.):74-86.
- [7] Wang M, Zhou S D, Yang Z, et al. Error Analysis of Atmospheric Visibility Measurements Based on an Image Brightness Contrast Method[J]. IEEE Access, 2020, PP(99):1-1.
- [8] Wmo G S. No.8 Guide to Instruments and Methods of Observation Volume I – Measurement of Meteorological Variables. 2018.
- [9] Nomura H, Ando F, Niino N, et al. Age-related Change in Contrast Sensitivity Among Japanese Adults[J]. JAPANESE JOURNAL OF OPHTHALMOLOGY, 2003.

- [10] Srinivasan R , Turpin A , Mckendrick A M . Contrast Sensitivity on 1/f Noise Is More Greatly Impacted by Older Age for the Fovea Than Parafovea[J]. *Optometry and Vision Science*, 2021, 98.
- [11] Mahjoob M , Anderson A J . Contrast discrimination under task-induced mental load[J]. *Vision Research*, 2019, 165:84-89.
- [12] 季卓莹, 邵红, 林燕丹. 暗适应时间、背景亮度和眩光对人眼对比度阈值影响的探讨[J]. *照明工程学报*, 2006 (4) : 1-4+15.
JI Z Y, SHAO H, LIN Y D. Discussion on the influence of dark adaptation time, background brightness and glare on the contrast threshold of human eyes [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2006(4):1-4+15.
- [13] Middleton W . *Vision Through the Atmosphere*[J]. Springer Berlin Heidelberg, 1957.
- [14] 曾祥能, 白洁, 郝明磊. 精确测算夜间机场跑道视程的方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2017, 12 (2) : 114-119.
ZENG X N, BAI J, HAO M L. Study on the method of accurately measuring the sight distance of airport runway at night [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017,12(2):114-119.
- [15] Tang F, Ma S, Yang L, et al. A new visibility measurement system based on a black target and a comparative trial with visibility instruments[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 143:229-236.
- [16] 张海良, 游耀伟, 梁艳闯, 王雷. 民航飞行员对比敏感度调查与分析[J]. *国际眼科杂志*, 2015, 15 (9) : 1668-1670.
ZHANG H L, YOU Y W, LIANG Y C, WANG L. Investigation and analysis of contrast sensitivity of civil aviation pilots [J]. *International Journal of Ophthalmology*, 2015,15(9):1668-1670.
- [17] 刘一松. 基于 PASS 及 SAS 软件的常用样本含量估计方法实现及部分方法比较研究[D]. 中国人民解放军军事医学科学院, 2016.
LIU Y S. Implementation of common sample size estimation methods based on PASS and SAS software and comparative study of some methods [D]. PLA Academy of Military Medical Sciences, 2016.