

利用光速测定仪分析空气折射率的影响因素*

代绪存 郭中华

(兰州城市学院电子与信息工程学院 甘肃 兰州 730070)

(收稿日期:2020-02-03)

摘要:光在空气中传播时,由于大气折射率分布不均匀,光的传播路径不可能总是沿直线,会发生相应的折射现象,从而对光信号在大气信道中的传输造成严重的影响.在空气折射率的理论分析基础上,设计给出利用光速测定仪测量空气折射率的光学系统方案,并对不同气压、温度、波长等因素条件下空气折射率的结果进行探究和分析,从而得出这些因素对空气折射率的影响.

关键词:光速测定仪 空气折射率 影响因素

折射率是表征某种透光介质折光性能的一个重要参数^[1],不同条件下对空气折射率的研究在飞行器的高精度探测、高精度控制,卫星的对地探测和数据的传输,天文观测等领域都有着非常重要的作用^[2].目前测量气体折射率的方法有偏向角法、自准直法、临界角法,所用到的仪器有迈克尔孙干涉仪等,这些仪器和方法存在测量局限、外界环境、人为操作等诸多因素的影响.在空气折射率理论基础上,利用 LM2000A 光速测定仪对空气折射率进行较为准确的计算,并对不同(条件下的)大气压、温度、光波进行空气折射率的探究和分析,在不接触待测物质的条件下开展此项研究^[3],会减少一定的误差,较其他实验方案提高了准确性,这不仅提高了测量准确度,而且会对今后的实验教学及理论研究有较大的帮助和一定的参考价值.

1 对空气折射率影响因素的研究

就目前空气折射率的理论研究水平而言,空气折射率 n 是大气压强 P 、温度 T 和光波波长 λ 三者的相关函数,1927年 E. R. Peck 使用了 50 多种波长做了测定实验,从而测定了空气折射率式(1),并且得到了在标准气象条件下的空气折射率公式^[4]

$$(n_{0.760} - 1) \times 10^6 = 287.634 \frac{P}{\lambda^2} + \frac{1.60724}{\lambda^2} + \frac{1.01669}{\lambda^4} \quad (1)$$

式中 $n_{0.760}$ 表示温度为 0°C , 大气压为 760 mmHg 时的空气折射率,光波长为 λ .

1939年 Barrell & Sears 提出了世界上比较著名的内插公式(2).

$$(n_{T_1, P_1} - 1) = (n_{T_2, P_2} - 1) \frac{P_1 [1 + (1.049 - 0.0175T_1) \times 10^6 P_1] (1 + \alpha T_2)}{P_2 [1 + (1.049 - 0.0175T_2) \times 10^6 P_2] (1 + \alpha T_1)} \quad (2)$$

式中 P_1, P_2 分别为状态 1, 2 的气压, T_1, T_2 分别为状态 1, 2 的空气温度, $\alpha = \frac{1}{273.16} = 0.003661$ 为空气膨胀系数.

现将式(1)代入式(2),就可得到在任意气象条件下,测量大气折射率的公式,经分析整理可得

$$(n_{T, P} - 1) \times 10^6 = (n_{0.760} - 1) \frac{P}{760(1 + 0.003661T)} \times 10^6 \quad (3)$$

综合式(1)、(2)、(3),可以看出大气折射率 n 与气压 P 成一定的线性相关关系,当气温和波长增大时,对应的空气折射率会减小,由式(1)、(2)、(3)可得出在不同气压、温度、波长情况下的空气折射率理论值.

2 光速测定仪分析空气折射率的影响因素

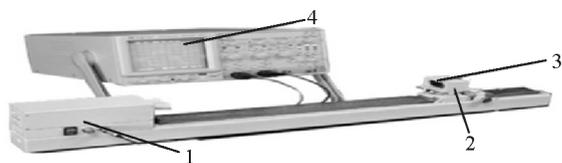
2.1 LM2000A 光速仪实验测量原理

LM2000A 光速仪仪器全长 0.8 m , 由带标尺导

* 国家自然科学基金项目,项目编号:11464025,11064007;教育部“新世纪优秀人才支持计划”,项目编号:NCET-11-0906

通讯作者:郭中华(1979-),女,硕士,副教授,主要从事大学物理、大学物理实验的教学研究.

轨、棱镜小车、收发透镜组、电器盒等几部分构成, LM2000A 光速仪实物如图 1 所示.



1. 光学电路箱; 2. 带刻度尺燕尾导轨
3. 带游标反射棱镜小车; 4. 示波器 / 相位计(自备件)

图 1 LM2000A 光速仪

当仪器处在稳定状态时, 此时示波器上所显示波形图如图 2 所示, 读取记录此时的光程 x_0 .

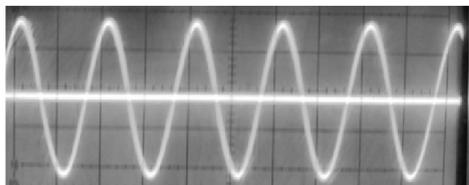


图 2 光波波形图

当改变此时的空气条件, 此时示波器上的波形位置就会在原来的基础上发生相应的变化, 光波波形变为图 3 所示.

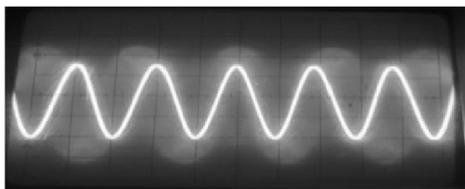


图 3 不同条件下稳定时的波形图

移动棱镜小车, 使示波器波形图恢复到图 2 的波形样式, 读取记录此时的光程 x_1 , 此时介质中的光程为 nd (n 为空气折射率), 小车从 x_0 点移到 x_1 点得到相应光程差, 由之前所述 LM2000A 光速仪原理, 这时两者所存在的相位差是相等的. 同样该光通过介质产生的光程变化为

$$x_0 - x_1 = 2D_2$$

则待测介质加入前后的光程差如图 3 所示为

$$nd - d = d(n - 1)$$

利用等相位测量法测量实际的光程差为 $2D_2$, 然后代入公式 $d(n - 1) = 2D_2$, 从而就可以准确测出待测介质中不同波长对空气折射率 n 的具体影响, 空气折射率 n 由以上两式求得, 如式(4)所示^[5~7].

$$n = \frac{2D_2}{d} + 1 = \frac{x_0 - x_1}{d} + 1 \quad (4)$$

式(4)中 x_0 和 x_1 为实际光程, nd 为光在介质中的光程, d 为光在介质中的几何路程, 1 是真空的折射

率, n 为空气折射率.

2.2 不同空气条件的形成

在研究不同气压条件下的空气折射率时, 要想得到不同的气压条件, 就可以在光路中加入气压桶, 改变气压桶中的气压大小, 即可测得在不同气压条件下所对应的空气折射率, 实物如图 4 所示.



图 4 不同气压的控制

在研究不同温度条件下的空气折射率时, 气压的大小可以由气压桶来控制在一个恒定值, 温度可以用水浴热传递的方法由温度计实时来控制, 如图 5 所示.



图 5 不同温度的控制

在研究不同光波波长条件下的空气折射率时, 利用不同的激光器作为光源, 就可以得到不同的光波波长, 如图 6 所示.

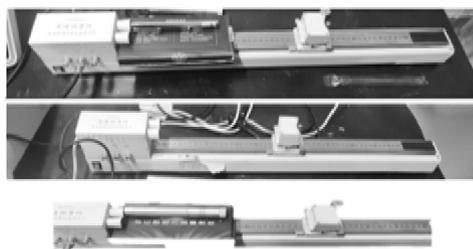


图 6 不同光波波长的控制

2.3 对空气折射率影响因素的研究

2.3.1 不同气压对空气折射率的影响

为了研究波长对空气折射率的影响, 利用位相法产生光程差的原理测量空气折射率. 保持温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ (常温), 改变气压桶中的气压大小, 运用 LM2000A 光速仪在有位相差时产生光程差, 利用式(4)可计算出空气折射率实验值, 把相对温度和波长代入式(3), 计算出空气折射率理论值, 将两者具体值记录于表 1.

表1 不同压强下的空气折射率

压强 P/mmHg	760	805	855	896	938	980	1 016
折射率实验值	1.000 270	1.000 285	1.000 301	1.000 317	1.000 333	1.000 349	1.000 364
折射率理论值	1.000 271	1.000 287	1.000 303	1.000 319	1.000 333	1.000 351	1.000 367
平均误差 / %	1.714×10^{-4}						

为了比较清楚地看出不同气压下的空气折射率,将压强 P 作为横坐标,折射率 n 为纵坐标,就可得出不同气压与空气折射率的关系如图 7 所示.

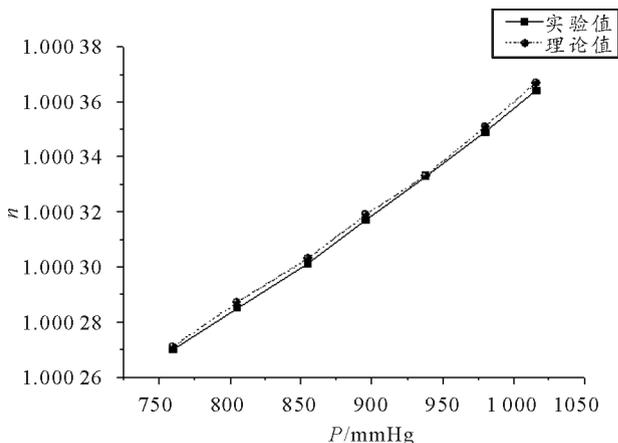


图7 空气折射率与气压的关系

由图 7 所示,可以看出压强和空气折射率呈现一定的正相关关系,气压在 750~950 mmHg 这个范

围内实验值与理论值符合的相对比较好. 由于对气压的控制不是绝对的,操作时气密性不是绝对严密,所以造成总体上实验值小于理论值. 由图 7 与表 1 分析可得,实验误差为 $1.714 \times 10^{-4} \%$,整体上压强对空气折射率的影响相对还是比较大的,在一定气压范围内,气压的变化对空气折射率有着较为显著的影响,所以以后要考虑气压在信息的传递过程中对它有着不可忽略的影响.

2.3.2 不同温度对空气折射率的影响

为了研究温度对空气折射率的影响,利用位相法产生光程差的原理测量空气折射率. 保持压强为 760 mmHg, 改变气压桶中的温度大小, 运用 LM2000A 光速仪有位相差时产生光程差, 利用式 (4) 计算出空气折射率实验值, 把相对温度和压强代入式 (2), 计算出空气折射率理论值, 将两者具体值记录于表 2.

表2 不同温度下的空气折射率

温度 $T/^\circ\text{C}$	20	35	50	65	80	95
折射率实验值	1.000 282	1.000 262	1.000 248	1.000 237	1.000 227	1.000 217
折射率理论值	1.000 278	1.000 260	1.000 247	1.000 235	1.000 225	1.000 216
平均误差 / %	1.997×10^{-4}					

为了比较清楚地看出不同温度下的空气折射率,以温度 T 为横坐标,折射率 n 为纵坐标,就可得出不同温度与空气折射率的关系如图 8 所示.

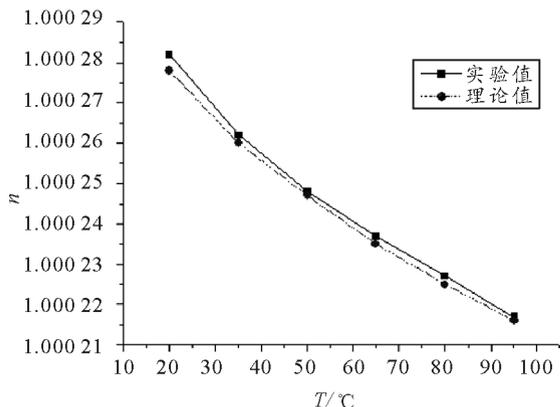


图8 空气折射率与温度的关系

由图 8 所示,可以看出温度和空气折射率呈现的是一定的负相关关系,温度在 20~50 °C 之间时,实验值和理论值符合的相对比较好. 由于对所测空气温度的控制不是绝对的,实验操作上存在一定误差,所以造成整体上实验值大于理论值,实验误差为 $1.997 \times 10^{-4} \%$. 因此可以得出温度对空气折射率存在一定的影响,所以想要保证信息的准确传递,必须将温度对空气折射率的影响考虑在内,同时也就能够进行实验误差的修正和补偿,增加信息传递的准确性和保密性.

2.3.3 不同波长对空气折射率的影响

为了研究光波波长对空气折射率的影响,利用位相法产生光程差的原理测量空气折射率. 保持压

强为 760 mmHg, 温度为 25 °C(常温), 改变不同的光波波长, 运用 LM2000A 光速仪有位相差时产生光程差, 利用式(4) 计算出空气折射率实验值, 把波

长代入式(1), 计算出空气折射率理论值, 将两者具体值记录于表 3.

表 3 不同波长下的空气折射率

波长 $\lambda/\mu\text{m}$	0.405	0.500	0.550	0.632 8	0.720
折射率实验值	1.000 277	1.000 272	1.000 270	1.000 269	1.000 268
折射率理论值	1.000 276	1.000 271	1.000 269	1.000 268	1.000 267
平均误差 / %	0.999×10^{-4}				

为了比较清楚地看出不同光波波长下的空气折射率, 用波长 λ 作为横坐标, 折射率 n 作为纵坐标, 得出不同光波波长与空气折射率的关系如图 9 所示.

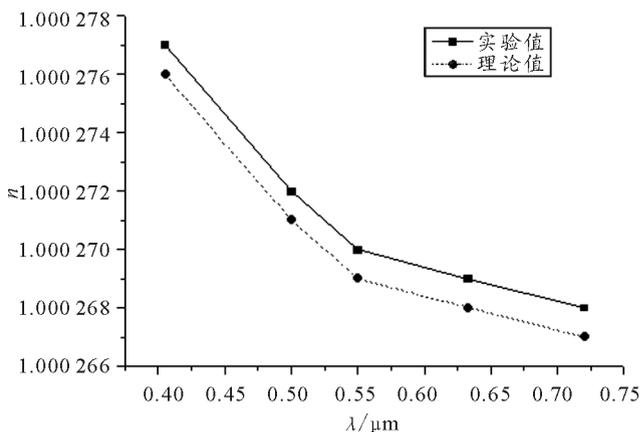


图 9 空气折射率与波长的关系

由图 9 所示, 可以看出波长和空气折射率呈现一定的负相关关系, 当波长在 0.40 ~ 0.55 μm 时, 实验值与理论值符合得还是相对比较好. 由于外界条件不是绝对理想环境, 外界其他光波也会对空气折射率产生一定的影响, 导致实验操作不是绝对精准, 会造成整体上实验值大于理论值. 在不同的波长条件下, 由实验数据和理论值的比较, 实验误差为 $0.999 \times 10^{-4} \%$, 得出不同波长对空气折射率的影响在一定情况下可以忽略, 但只要光波波长变化范围不是太大, 对空气折射率的影响就不会太严重, 但是在实际环境中, 因为信号传递时不是只有单色光的传递, 所以考虑和修正空气折射率与波长的关系是非常有必要的.

3 结论

本文利用光速测定仪原理设计出合理的实验方案, 对不同气压、温度、波长 3 种条件下的空气折射

率进行了测定, 根据实验所测数据获得空气折射率实验值与理论值相比较可得几种因素与空气折射率关系, 所测空气折射率与不同气压关系是气压增大空气折射率同时增大. 空气折射率与不同温度和不同光波波长关系是随着温度与光波波长增大, 空气折射率在减小. 从实验结果中看出, 在这几种影响因素中, 气压与温度对空气折射率的影响是相对比较大的, 而波长对空气折射率的影响较前面的两种因素较小. 但是在复杂的实际环境中, 考虑气压、温度、光波波长对空气折射率的影响与修正和补偿其造成的误差已经是刻不容缓的一件事了. 实验环境处在一个密闭的空间条件下, 就能排除外界因素对实验的一定影响, 同时也不需要多么庞大复杂的实验仪器才能测得数据, 在实验空间和实验资源较少的情况下就可获得较为准确的实验数据, 在一定程度上会提高实验效率.

本文的工作不仅仅加深了对光速测定仪的全面了解, 而且提供了一种可以利用光速测定仪测定空气折射率的系统实验方案, 整体的平均实验误差为 $1.570 \times 10^{-4} \%$, 较其他实验来说, 数据具有较高的可信度与准确度. 知道了实验室中测量空气折射率时造成实验误差的各种具体因素, 从而对以后空气折射率进一步的探究有了一定的参考依据与研究方向, 以此对提高信息的准确传递和保密有了一定的保障与研究空间.

参考文献

- 1 姚启钧. 光学教程(第 4 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. 6
- 2 郭相明, 康士峰, 赵栋梁, 等. 海上大气折射率的相似性研究[J]. 海洋预报, 2017, 34(03): 71 ~ 76
- 3 赵树祥, 郭中华, 权佩军, 等. 大气折射率影响因素分析及应用[J]. 大学物理实验, 2018, 31(03): 32 ~ 35

(下转第 93 页)

- 究和实践[J]. 科技创新导报, 2019, 16(36): 240 ~ 243
- 5 樊代和, 贾欣燕, 魏云, 等. 大学物理实验项目的探索和创新[J]. 物理与工程, 2019, 29(5): 114 ~ 117, 122
- 6 侯波, 齐天琰, 向前兰, 等. 基于微信公众号大学物理实验学习的研究[J]. 内江科技, 2019, (10): 82 ~ 83
- 7 胡芳馨, 郭春显, 杨鸿斌, 等. 基于微信公众平台的大学物理课程翻转课堂教学模式初探[J]. 课程教育研究, 2019(11): 155

Exploration on University Physics Experiment on WeChat Official Account on Line Learning Mode

Li Wenrong Xu Chenxin Guo Jiahui Mai Changjia Wen Jianping

(School of Physics and Optical Information Technology, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015)

Abstract: Under the background of the Internet era, WeChat public account has the characteristics of universality, diversity and convenience in terms of function, graphic form and transmission. By means of questionnaire survey, we grasped the difficulties of students in the study of experimental physics in university, and focused on uploading the course of college experimental physics to the WeChat public account, creating an online experimental physics learning model, and building a new platform for the study of experimental physics.

Key words: WeChat official account; university physics experiment; questionnaire survey

(上接第 88 页)

- 4 徐立宏, 沈桥, 牛利平, 等. 光拍频法激光光速测定仪[J]. 光电子·激光, 1982(01): 41 ~ 45
- 5 朱佳佳, 胡梁仓. 用光速测量仪测量折射率[J]. 科技创新与应用, 2016(17): 50
- 6 李远琴, 杨永安. 用光速测量仪测量玻璃的折射率[J]. 楚雄师范学院学报, 2008, 23(09): 41 ~ 45
- 7 金群锋. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006

Using Light Velocity Apparatus to Measuring the Influence Factors of Air Refractive Index

Dai Xucun Guo Zhonghua

(Lanzhou City University, School of Electronic and Information Engineering, Gansu, Lanzhou 730070)

Abstract: When light propagates in the air, due to the uneven distribution of refractive index in the atmosphere, the propagation path of light cannot always follow a straight line, and the corresponding refraction will occur, which has a serious impact on the transmission of optical signals in the atmospheric channel. Based on the theory of refractive index of air, the optical system scheme of measuring refractive index of air by means of light velocity measuring instrument is designed, and the results of refractive index of air under the conditions of different air pressure, temperature and wavelength are explored and analyzed. As a result, the influence of these factors on the refractive index of air is obtained.

Key words: light velocimeter; refractive index of air; influencing factors