

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.005

# 面向激光追踪测量系统的 空气折射率补偿方法研究\*

戴成睿, 石照耀\*, 陈洪芳, 汤 亮

(北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:**针对激光追踪测量系统中由空气折射率变化引起的波长变化问题,对适用于激光追踪测量系统的空气折射率方法进行了研究,提出了一种基于经验公式的空气折射率补偿系统。利用该补偿系统的硬件电路,对环境参数进行了采集,并通过 UART 协议对数据进行了传输;编写了面向激光追踪测量系统的空气折射率补偿软件,实现了对空气折射率的测量和补偿;使用迈克尔逊干涉仪测量了空气折射率,并与本系统测量结果进行了对比,同时对该系统进行了不确定度分析。研究结果表明:空气折射率补偿系统可以实现对空气折射率的实时测量、显示和补偿,克服了使用空气折射率计直接测量存在的装置复杂、不易操作的缺点,以及双色干涉法需要重新搭建光路的缺点,更适用于解决激光追踪测量系统的空气折射率补偿问题。

**关键词:**空气折射率补偿;激光追踪测量系统;硬件设计

中图分类号:TH822;TP212

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1033-06

## Air refractive index compensation for laser tracer measurement system

DAI Cheng-rui, SHI Zhao-yao, CHEN Hong-fang, TANG liang

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of wavelength change caused by the change of refractive index of air in laser tracer measurement system, the air refractive index method suitable for laser tracer measurement system was studied. An air refractive index compensation system based on empirical formula was proposed. The hardware circuit of the compensation system was used to collect environmental parameters, and the data was transmitted through the UART protocol. Air refractive index compensation software for laser tracking measurement system was developed to measure and compensate the refractive index of air. The Michelson interferometer was used to measure the refractive index of the air and the measurement results of the system were compared. The uncertainty analysis of the system was carried out. The results show that the air refractive index compensation system can realize the real-time measurement, display and compensation of the air refractive index. It overcomes the shortcomings of complex structure and complicated to operate by using the air refractometer directly, and the two-color interference method need to rebuild the optical path, and is more suitable to solve the problem of air refractive index compensation for the laser tracer measurement system.

**Key words:** compensation of air refractive index; laser tracer measurement system(LTMS); hardware design

收稿日期:2019-03-15

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2013YQ17053904)

作者简介:戴成睿(1992-),男,辽宁盘锦人,硕士研究生,主要从事空气折射率补偿方面的研究。E-mail:daichengrui0427@126.com

通信联系人:石照耀,男,教授,博士生导师。E-mail:shizhaoyao@bjut.edu.cn

## 0 引 言

制造业的快速发展和机器人技术的广泛应用对测量技术提出了新的要求。在空间中对运动目标进行高精度的测量是精密工程领域中的一个重要挑战,例如航空航天工业中大型部件的组装和大型坐标测量机器的校准等<sup>[1-4]</sup>。激光追踪测量系统(LTMS)是一种可以追踪并测量空间运动目标的新型工业测量产品,该测量系统采用激光干涉测量的方法测量目标的移动距离。激光干涉测量以激光波长为基准,波长值的正确与否直接影响激光干涉测量系统的测量不确定度,所以必须根据空气折射率对激光波长进行修正。为了进一步提高激光追踪测量系统的测量精度,研究该系统的空气折射率补偿方法非常关键。

空气折射率的补偿方法包括经验公式间接补偿法、双色干涉法、空气折射率计直接测量法,以及光学频率梳补偿法等。EDLEN 提出了利用温度、大气压力和相对湿度计算空气折射率的经验公式;DOWNS、BIRCH 和 CIDDOR 等人在 Edlen 公式的基础上提出了优化的计算空气折射率公式,目前得到了广泛应用;KIM S W 等人<sup>[5]</sup>提出了基于双波长法的空气折射率的自补偿系统,该方法通过在指定距离上同时使用两种不同的波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  来进行测量,以获得位移测量值  $D_1$  和  $D_2$ ,并通过引入色散系数  $A$  来对空气折射率进行补偿;张国雄等人<sup>[6]</sup>提出了使用预抽气真空腔测量和补偿空气折射率的方法;周维虎等人<sup>[7]</sup>提出了一种多波长干涉测量绝对距离的方法,通过大气色散系数中各波长空气折射率的关系,利用  $A$  系数,并结合各波长折射率之间的关系来计算距离,同时补偿了空气折射率。

本文将研制一种利用激光追踪来测量空气折射率补偿的系统,并基于环境参数传感器来间接测量补偿空气折射率利用改进的 Edlen 公式来计算补偿空气折射率,实现对激光波长的修正。

## 1 气 折 射 率 间 接 测 量 方 法

间接测量方法是通过测量影响空气折射率的各项环境参数,以实现空气折射率的实际真值测量。影响空气折射率的环境参数包括温度  $t$  (°C)、气压  $p$  (Pa)、水蒸气分压  $p_w$  (Pa)、二氧化碳分量  $x$ 。空气折射率计算公式是由 EDLEN 于 1966 年提出,近几十年来大气成分的变化导致空气折射率计算公式需要被重新标定。

本文采用了 BONSCH G 等<sup>[8]</sup>修改的空气折射率计算公式,如下式所示:

$$(n-1)_{tp} = \frac{P(n-1)_N}{93\,214.6} \times$$

$$\frac{[1 + (0.595\,3 - 0.009\,876t)P \times 10^{-8}]}{1 + 0.003\,661t} \quad (1)$$

$$(n-1)_N \times 10^8 = 8\,091.37 + \frac{2\,333\,983}{130 - \sigma^2} + \frac{15\,518}{38.9 - \sigma^2} \quad (2)$$

$$(n-1)_x = (n-1)_N \times [1 + 0.532\,7 \cdot (x - 0.000\,4)] \quad (3)$$

$$n_{tpf} - n_{tp} = -p_w \times [3.802 - 0.038\,4\sigma^2] \times 10^{-10} \quad (4)$$

式中:  $(n-1)_{tp}$ —标准干燥空气在温度  $t$  和气压  $P$  条件下的空气折射率;  $(n-1)_N$ —标准状态下的空气折射率;  $n_{tpf} - n_{tp}$ —含有水蒸气分压的潮湿空气和压力相同的干燥空气的折射率之差;  $\sigma$ —激光在真空状态下的波数,  $\mu\text{m}^{-1}$ ;  $x$ —空气中二氧化碳的含量;  $p_w$ —水蒸气分压, Pa。

在计算时,本研究设定激光波长为 632.8 nm。在标准大气条件下,当二氧化碳变化 300 ppm 时对应的空气折射率的不确定度为 0.005 ppm,这个值完全可以忽略不计<sup>[9]</sup>。考虑到本系统的目标不确定度为  $10^{-6}$  数量级,因此,忽略二氧化碳含量变化对空气折射率造成的影响。

在式(3)中水蒸气分压  $p_w$  与温度  $t$  (单位 Kelvin) 和相对湿度  $f_{\text{rel}}$  有关,可以表示为:

$$p_w = f_{\text{rel}} \cdot p_s = f_{\text{rel}} \times \exp\left(at^2 + bt + c + \frac{d}{t}\right) \quad (5)$$

式中:  $p_s$ —饱和水蒸汽压力;  $a = 1.278\,847 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2}$ ,  $b = -0.019\,121\,316 \text{ K}^{-1}$ ,  $c = 33.937\,110\,47$ ,  $d = -6\,343.164\,5 \text{ K}$ 。

## 2 空气折射率补偿系统研制

### 2.1 系统整体结构

本文设计的空气折射率补偿系统原理框图如图 1 所示。

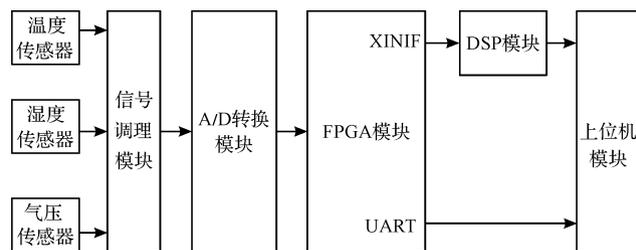


图 1 空气折射率补偿系统原理框图

图 1 中,本研究首先使用温度、湿度和气压传感器分别对环境的温度、湿度和压力参数进行测量,传感器得到的测量环境参数的模拟量信号经过信号调理后进

入 AD 转换芯片。

FPGA 对 AD 采集的数据进行二进制对 BCD 的转换,通过串口协议直接上传至上位机,也可以通过 XINTF 将数据传递至外扩 DSP 芯片,让其发挥高浮点的特点协助运算后传输。在上位机进行空气折射率的计算和显示,并生成 txt 文件实现激光追踪测量系统的空气折射率补偿。

本文研制的补偿系统中,处理器采用 ALTERA 公司 Cyclone IV 系列 FPGA 芯片。FPGA 能并行运行程序完成大量数据运算,而且扩展性较好<sup>[10]</sup>。温度传感器采用 TI 公司的 LM35 传感器,在不需要任何外部校准或修整的情况下精度典型值为 0.25 °C,最大值为 0.5 °C。湿度传感器采用 Honeywell 公司的 HIH-5030 传感器,测量范围内精度为 ±3%。气压传感器采用 MPX6115 系列传感器,该型号气压传感器可以很好地解决其他传感器在放大过程引入的误差,当测量范围为 100 kPa 时,测量精度为满量程的 1.5%。AD 转换芯片采用 ADI 公司的 AD7606,该芯片具有分辨率高、转换速率快,可以自行配置输入电压范围、串行和并行形式输出的特点。

另外,该系统针对 AD7606 八通道同步采样的特点将剩余通道的引脚全部引出。若需要更换环境参数传感器,可以直接从外部连接其他通道引脚排针,并将输出数据调整为其他通道采集结果。

### 2.2 FPGA 控制 AD7606 工作的实现

该系统中 FPGA 主要实现控制 AD 芯片进行模数转换、二进制数据转换成 BCD 码、UART 串口通讯和外扩 DSP 接口等功能。在 FPGA 控制 AD 转换模块中,FPGA 根据 AD7606 并行模式下的工作时序对其相关引脚进行控制,实现数据的转换和读取。

该系统采用 Verilog HDL 硬件语言,基于状态机的思想设计逻辑模块进行设计。该模块根据 AD7606 的工作时序,首先将数据的转换和读取分成若干个状态,通过 FPGA 对 AD7606 的转换开始 CONVSTAB、读取控制输入 RD、片选信号 CS、输出繁忙信号 BUSY 等各引脚进行控制,实现对 AD7606 各通道数据的读取。

本部分状态机程序在设置状态参数时采用独热码编写,使电路的速度和可靠性有显著提高。

该系统使用 Modelsim 软件对 FPGA 控制 AD7606 工作的程序进行时序仿真,结果如图 2 所示。

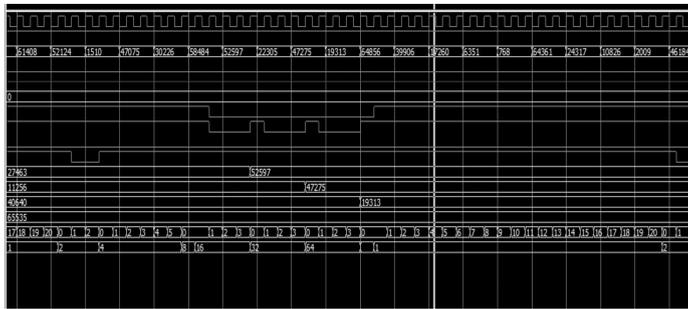


图 2 时序仿真结果

### 2.3 数据传输

16 位数据进入 FPGA 后,在片内经过去符号计算被转换成 20 位有符号十进制数据,随后被转换成 BCD 码,最后将数据根据 UART 通信协议经过 RS-232 串行

接口模块传输到上位机,进行空气折射率的计算、显示和存储。

各个模块通过顶层文件实例化后,在 Quartusii 软件中生成的 RTL 级视图如图 3 所示。

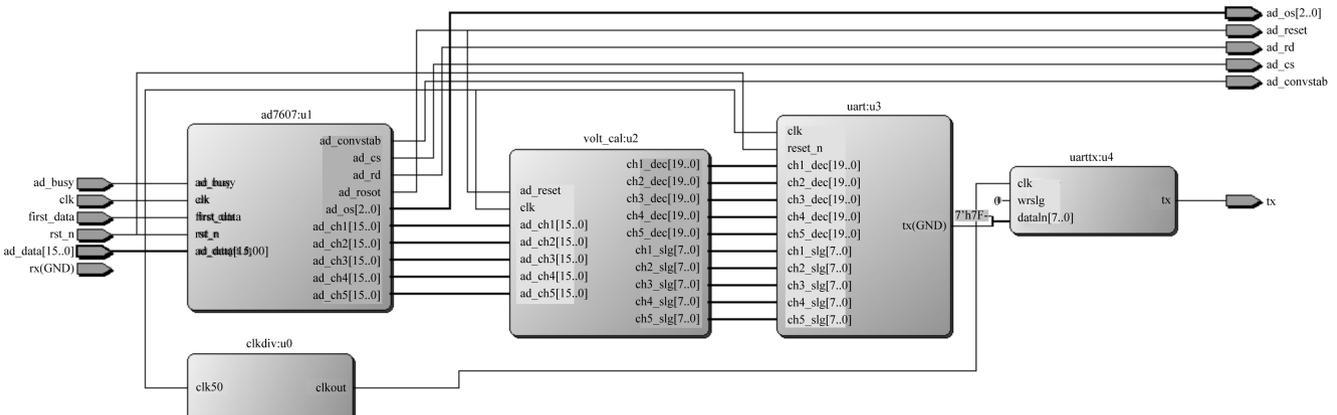


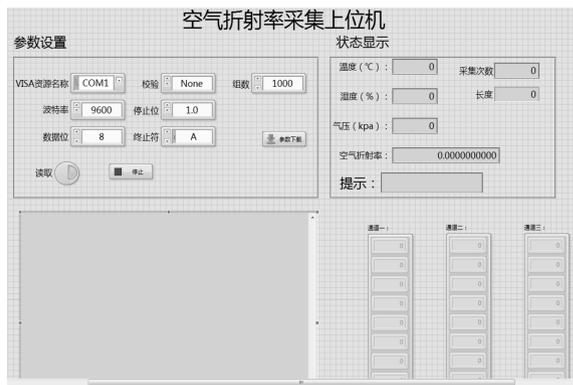
图 3 各模块生成的 RTL 级视图

### 2.4 上位机软件

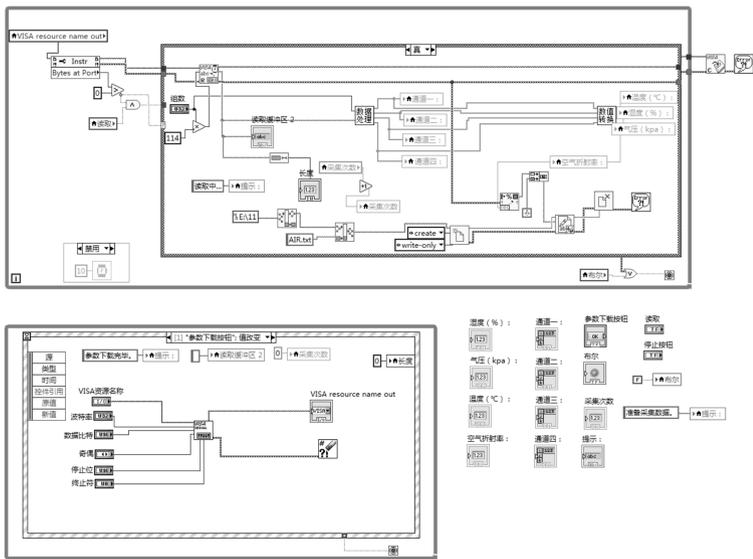
该系统上位机软件采用 LabVIEW 编写,包括前面板设计、VISA 串口配置模块、数据处理子 VI 和数值转

换子 VI。

补偿系统上位机软件如图 4 所示。



(a) 上位机前面板



(b) 程序框图

图 4 激光追踪测量空气折射率补偿系统上位机软件

图 4 中,串口配置模块通过调用“VISA 配置串口”函数进行波特率、奇偶校验位、停止位等参数的设定,随后在“VISA 读取”函数中进行下位机上传数据的读取。数据处理子 VI 的作用是通过字符串匹配将下位机上传的各通道数据依次分开,使代表温度、湿度和气压传感器的数据依次进入数值转换子 VI 中对应的计算模块,在该模块中进行空气折射率和实际环境参数的计算。上位机完成空气折射率和相关环境参数的读取和计算之后,将数据由“打开/创建/替换文件”函数存储到已经预设路径的 txt 文件中。

至此,激光追踪测量系统中的位移测量系统可以通过测距软件读取本系统生成的 txt 文件,进行实时空气折射率补偿。补偿系统软件前面板包括:串口参数设置、实时环境参数和空气折射率显示等功能。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 对比实验

本研究利用迈克尔逊干涉仪测量空气折射率,并将结果与激光追踪测量空气折射率补偿系统的测量结果进行比对验证。

根据迈克尔逊干涉仪测量空气折射率的原理,若气室长度为  $L$ ,则空气折射率变化为:

$$\Delta n = \frac{N\lambda}{2L} \quad (6)$$

式中: $N$ —干涉条纹变化的条纹数; $\lambda$ —激光束的波长。

由于空气折射率与压强的变化  $\Delta P$  成正比,则有:

$$n = 1 + \frac{\Delta n}{P} \quad (7)$$

因此,迈克尔逊干涉仪测量的空气折射率公式为:

$$n = 1 + \frac{\lambda N}{2L} \cdot \frac{P}{\Delta P} \quad (8)$$

本研究根据迈克尔逊干涉仪测量原理对实验系统进行布置。

在测量和记录迈克尔逊干涉仪数据的同时,记录下空气折射率补偿系统的测量数据,并将气压变化值  $\Delta p$  代入式(8) 计算空气折射率,此过程重复进行 30 次。

在波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,实验环境气压为  $100.7166 \text{ kPa}$  的情况下,两种方法测量空气折射率结果对比如图 5 所示。

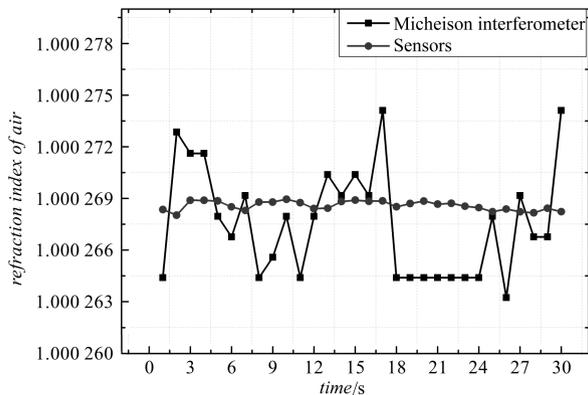


图 5 两种方法测量空气折射率结果对比

根据实验结果,得到迈克尔逊干涉仪测量的空气

折射率数据的标准差为:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} v_{1i}^2}{n-1}} = 3.204 \times 10^{-6} \quad (9)$$

根据实验结果,得到本文研制的空气折射率测量系统的标准差为:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} v_{2i}^2}{n-1}} = 2.68 \times 10^{-7} \quad (10)$$

式中: $v_{1i}$ —迈克尔干涉仪测量结果的残余误差; $v_{2i}$ —空气折射率补偿系统测量结果的残余误差; $n$ —实验测量次数。

两种方法测量的数据结果的算术平均值的标准差分别为:

$$\sigma_{n_1} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}} = 5.85 \times 10^{-7} \quad (11)$$

$$\sigma_{n_2} = \frac{\sigma_2}{\sqrt{n}} = 4.9 \times 10^{-8} \quad (12)$$

### 3.2 系统不确定度分析

评估本系统整体不确定度时,需要确定各测量对应的灵敏度系数。

在  $p = 100\,000\text{ Pa}$ ,  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , 二氧化碳浓度为 0.04% 的干燥空气的条件下,当系统面向的激光波长为 632.8 nm 时,根据公式(2~4)分别计算温度、气压以及水蒸气分压的灵敏度系数  $c_t, c_p, c_{p_w}$  得:

$$c_t = \left| \frac{\partial n_{\text{ref}}}{\partial t} \right| = \left| \frac{\partial n_{\text{tp}}}{\partial t} \right| \approx 0.92 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad (13)$$

$$c_p = \left| \frac{\partial n_{\text{ref}}}{\partial p} \right| = \left| \frac{\partial n_{\text{tp}}}{\partial p} \right| \approx 0.268 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \quad (14)$$

$$c_{p_w} = \left| \frac{\partial (n_{\text{ref}} - n_{\text{tp}})}{\partial f} \right| \approx 0.371 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1} \quad (15)$$

该系统选用湿度传感器的精度为  $\pm 3\%$ , 因此,由式(5)可知湿度传感器测量误差所对应的水蒸气分压误差为:

$$a_f = f \cdot p_s \approx 70.54 \text{ Pa} \quad (16)$$

本研究利用六位半数字万用表对空气折射率测量系统的 ADC 模块进行标定实验,得出 ADC 模块最大误差为 8.3 mV。根据传感器电压与被测量的关系得到 ADC 模块对气压测量的影响范围为 176.6 Pa,对温度测量的影响范围为 0.083  $^\circ\text{C}$ ,对相对湿度测量的影响范围为 0.47%,对水蒸气分压的影响范围为 11.05 Pa。

设  $a_t, a_p, a_f$  分别为上文提到的温度、气压和水蒸气分压的测量误差,  $a_{adt}, a_{adp}, a_{adf}$  分别为 ADC 模块对温度、气压和水蒸气分压引起的测量误差。

各环境参数对应的标准不确定度为:

$$u_t = \sqrt{c_t^2 \left[ \left( \frac{a_t}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{a_{adt}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]} = 0.269 \times 10^{-6} \quad (17)$$

$$u_p = \sqrt{c_p^2 \left[ \left( \frac{a_p}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{a_{adp}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]} = 2.337 \times 10^{-6} \quad (18)$$

$$u_f = \sqrt{c_f^2 \left[ \left( \frac{a_f}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{a_{adf}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]} = 1.529 \times 10^{-8} \quad (19)$$

式中: $u_t$ —温度对应的不确定度分量; $u_p$ —气压对应的不确定度分量; $u_f$ —湿度对应的不确定度分量。

该系统使用的空气折射率计算公式不确定度为  $\pm 1.7 \times 10^{-8}$ , 则其标准不确定度为:

$$u_E = \frac{1.7 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}} = 0.9815 \times 10^{-8} \quad (20)$$

因此,结合数据可得出上述各分量的合成不确定度为:

$$u_n = \sqrt{u_t^2 + u_p^2 + u_f^2 + u_E^2} \approx 2.35 \times 10^{-6} \quad (21)$$

## 4 结束语

本文研究了面向激光追踪测量系统的空气折射率补偿方法,完成了基于经验公式的空气折射率补偿系统的研制,进行了系统整体测试结果与迈克尔逊干涉仪测量空气折射率的对比试验,并对系统整体的不确定度进行了分析。实验结果表明:该系统可以实现对空气折射率的实时测量、显示和补偿功能。

根据对比试验结果可以发现:与迈克尔逊干涉仪测量空气折射率结果相比,基于经验公式的测量结果更加稳定。但是通过不确定度分析可以发现,该系统在空气折射率测量精度方面还有提升的空间,包括提升传感器精度和硬件电路的优化设计。

### 参考文献 (References):

- [1] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. **Nature Photonics**, 2009, 3(6):351-356.
- [2] BERA A V D S, ELDIK V S, BHATTACHARYA N. Mode-resolved frequency comb interferometry for high-accuracy long distance measurement[J]. **Scientific Reports**, 2015 (5):14661.
- [3] DALE J, HUGHES B, LANCASTER A J, et al. Multi-channel absolute distance measurement system with sub

- ppm-accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells[J]. **Optics Express**, 2014, 22(20): 24869-24893.
- [4] YANG R, POLLINGER F, MEINERS-HAGEN K, et al. Heterodyne multi-wavelength absolute interferometry based on a cavity-enhanced electro-optic frequency comb pair[J]. **Optics Letters**, 2014, 39(20): 5834-5837.
- [5] JANG Y S, KIM S W. Compensation of the refractive index of air in laser interferometer for distance measurement: a review[J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 2017, 18(12): 1881-1890.
- [6] 李东光, 张国雄. 用预抽气真空腔法测量及补偿空气折射率的研究[J]. **光学精密工程**, 2001, 9(1): 80-84.
- [7] 华 卿, 周维虎, 纪荣祯. 补偿大气折射率的多波长干涉绝对距离测量[J]. **光电工程**, 2013, 40(4): 38-44.
- [8] BONSCH G, POTULSKI E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae [J]. **Metrologia**, 1998, 35(2): 133-139.
- [9] 杨莉莉, 郭 亮. 基于 FPGA 的磁悬浮微驱动器控制系统研究[J]. **机电工程**, 2015, 32(11): 1483-1488.
- [10] 金群锋. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学光电科学与工程学院, 2006.

[编辑:程 浩]

## 本文引用格式:

戴成睿, 石照耀, 陈洪芳, 等. 面向激光追踪测量系统的空气折射率补偿方法研究[J]. **机电工程**, 2019, 36(10): 1033 - 1038.

DAI Cheng-rui, SHI Zhao-yao, CHEN Hong-fang, et al. Air refractive index compensation for laser tracer measurement system[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019, 36(10): 1033 - 1038.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

## (上接第 1032 页)

- [3] 山显雷, 程 刚. 考虑关节摩擦的 3SPS + 1PS 并联机构显式动力学建模研究[J]. **机械工程学报**, 2017, 53(1): 28-35.
- [4] 林玉屏, 山显雷, 程 刚. 基于 Kane 方程的 3SPS + 1PS 并联仿生髋关节试验机动力学研究[J]. **科学技术与工程**, 2015, 15(11): 155-159.
- [5] 张 铁, 梁晓翊. 平面关节型机器人关节力矩的卡尔曼估计[J]. **浙江大学学报:工学版**, 2018, 52(5): 138-146.
- [6] SICILIANO B, SCIavicco L, VILLANI L, et al. **Robotics: modelling, planning and control** [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [7] SPONG M W, HUTCHINSON S, VIDYASAGAR M. **Robot modeling and control** [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [8] CHOSET H M, LYNCH K M, HUTCHINSON S, et al. **Principles of robot motion** [M]. Massachusetts: MIT Press, 2005.
- [9] LYNCH K M, PARK F C. **Modern robotics: mechanics, planning, and control** [M]. New York: Cambridge University Press, 2017.
- [10] 韩 军, 尹常志. 2P3R 型机床上下料机器人动力学分析及仿真[J]. **机床与液压**, 2018, 46(11): 46-49.
- [11] 李瑞峰, 郭万金, 曹维清. 新型五自由度混联机器人及其动力学分析[J]. **华中科技大学学报:自然科学版**, 2015, 43(S1): 32-36.
- [12] 高文杰, 李小霞. 卫生陶瓷施釉机器人动力学分析[J]. **机床与液压**, 2018, 46(9): 86-88.
- [13] 李永泉, 单张兵, 王立捷, 等. 4-DOF 混联机器人多能域动力学全解模型及试验[J]. **机械工程学报**, 2017, 53(23): 92-100.
- [14] 贾雪峰. 基于虚拟样机的 4DOF 码垛机器人分析与仿真验证[D]. 泰安: 山东农业大学机械与电子工程学院, 2014.
- [15] DENAVIT J, HARTENBERG RS. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices [J]. **J Appl Mech-T ASME**, 1955, 22(1): 215-221.
- [16] SICILIANO B, KHATIB O. **Springer handbook of robotics** [M]. New York: Springer-Verlag, 2016.

[编辑:方越婷]