

doi:10.3788/gzxb20174606.0616002

基于 1stOpt 求解光学玻璃折射率温度系数经验公式常量的方法

马志远¹, 王鹏飞², 吴志强¹, 吴德林¹, 粟勇¹

(1 成都光明光电股份有限公司 测试技术研究所 成都 610000)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室 西安 710119)

摘 要:为了解决 ZEMAX 软件拟合计算折射率温度系数经验公式常量时,参量回归计算的折射率和折射率温度系数与实验值存在较大偏差的问题,用 1stOpt 差分进化法求解折射率温度系数经验公式常量.以氟冕 D-FK61 和特种火石 H-TF3A 光学玻璃为例,用该方法求解的 λ_{ik} 常量与其通用数值范围 0.08~0.33 相吻合,参量回归计算的折射率和折射率温度系数与实测值的偏差分别小于 1×10^{-5} 、 $2 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$.该方法作为 ZEMAX 软件计算光学玻璃折射率温度系数的有效补充,计算的准确性高,可为热补偿光学系统设计提供准确的光学参量保障.

关键词:玻璃与非晶无机非金属材料;折射率温度系数;差分进化法;光学玻璃;回归计算;热补偿

中图分类号:J527.3; TQ531.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2017)06-0616002-7

A Method for Solving the Refractive Index Temperature Coefficient Empirical Formula Constants of Optical Glasses Based on 1stOpt

MA Zhi-yuan¹, WANG Peng-fei², WU Zhi-qiang¹, WU De-lin¹, SU Yong¹

(1 Test Technology Research Institute, CDGM GLASS Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to solve the problem that large deviation of the refraction index and temperature coefficient of refraction index obtained by regression calculation from the experimentally measured ones comes out when ZEMAX method is used for solving these empirical formula constants and regression calculation, 1stOpt differential evolution was used to calculate the temperature coefficient of refraction index empirical formula constants. With fluoro-crown D-FK61 and flint H-TF3A optical glass as examples, the λ_{ik} coefficients calculated by the proposed method are consistent with the general numerical range of 0.08~0.33, and the difference of refractive index and its temperature coefficient between the value obtained by regression calculation method and the measured value is less than 1×10^{-5} and $2 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, respectively. As an effective supplement of ZEMAX software to calculate the temperature coefficient of refractive index of the optical glasses, the proposed method greatly improves the accuracy and can provide accurate optical parameter guarantee for thermal compensation optical system design.

Key words: Glass and non-crystalline inorganic materials; Temperature coefficient of refractive index; Differential evolution; Optical glasses; Regression calculation; Thermal compensation

OCIS Codes: 160.2750; 160.4670; 280.6780; 220.1000

0 引言

通常设计成像光学系统只考虑在一般条件(常温、常压)下光学材料的光学特性,而军用或航天器上的现

基金项目:国家自然科学基金(No. 61307046)和国家重点研究发展计划(No. 2016YFB0303805)资助

第一作者:马志远(1985-),男,工程师,硕士,主要研究方向为光学玻璃测试技术. Email:mazhiyuan0@sina.com

通讯作者:王鹏飞(1981-),男,副研究员,博士,主要研究方向为特种激光玻璃与光纤、激光损伤机理. Email:pfwang@opt.ac.cn

收稿日期:2017-01-18; **录用日期:**2017-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

代光学仪器都期望在一个更大的温度环境范围内(早期典型温度变化范围^[1]为 $-20\sim 60^{\circ}\text{C}$,目前温度拓宽为 $-40^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{C}$)有稳定性能,以保证光学系统具有高成像质量和高分辨率.在较大的温度范围内,某些光学材料的性能将随温度变化发生改变,这种温度效应限制了高分辨率光学镜头的发展^[2].另外,如无热光学系统设计也必须考虑环境温度变化对光学材料折射率的影响^[1,3],以免光束通过光学元件后发生热光畸变^[4],给光学系统的工作稳定性带来波动,降低成像质量^[5].

光学玻璃光学性能参量准确与否直接影响到光学系统性能设计的有效性.其中,光学玻璃的折射率温度系数是对光学成像设计中热补偿有直接影响的重要参量,是光学玻璃热光系数的决定性因素之一.通过实验测试光学玻璃在不同温度下的折射率,计算其折射率温度系数,带入折射率温度系数经验拟合公式^[6],求解获得折射率温度系数经验公式常量.利用获得的折射率温度系数经验公式常量,回归计算可获得任一光学玻璃在 $-100\sim 140^{\circ}\text{C}$ 温度范围内对某一波长的折射率温度系数、折射率及折射率随温度的变化量等光学参量.所以,如何准确求解折射率温度系数经验公式常量,是获得光学玻璃折射率等参量精确值的前提.传统计算折射率温度系数经验公式常量的方法是利用 ZEMAX 软件,直接输入光学玻璃材料不同温度的折射率,拟合计算获得 D_0 、 D_1 、 D_2 、 E_0 、 E_1 、 λ_{tk} 6 个常量.折射率温度系数经验公式常量的拟合数值差异,特别是的 λ_{tk} 拟合计算结果差异较大时,会造成使用该参量回归计算得到的材料折射率、折射率温度系数与实测值出现较大偏差.

国内外学者基于零畸变光学系统对负热光系数、负折射率温度系数光学材料的应用需要,研究了光学材料的热光系数与温度和波长的关系^[8-10]及热光系数的实验测定方法^[11-13].折射率与折射率温度系数测试准确度要求很高($\pm 1 \times 10^{-5}$)^[14],国内外对光学玻璃折射率温度系数的直接研究很少,对折射率温度系数经验公式常量的精确计算更是鲜有报道.

本文针对 ZEMAX 软件求解光学玻璃的折射率温度系数经验公式常量中 λ_{tk} 与其通用数值范围 $0.08\sim 0.33$ 偏差较大的问题,应用 1stOpt (First Optimization) 差分进化法^[15],通过合理设定边界条件,准确求解光学玻璃折射率温度系数经验公式常量,参量回归计算所得的折射率与实测值的偏差小于 1×10^{-5} .该方法作为 ZEMAX 软件计算光学玻璃折射率及其温度系数的有效补充,可提高计算的准确性.

1 实验测试

1.1 折射率测试与折射率温度系数计算

以氟冕 D-FK61 和特种火石 H-TF3A 光学玻璃为例,依据国标^[16]《GB/T 7962.4-2010 无色光学玻璃测试方法 第 4 部分:折射率温度系数》^[16]中折射率和折射率温度系数的测试规程,利用精密测角仪(日本岛津 GMR-1D)和最小偏向角直接测量法,分别对两种样品在真空状态下 t (1013.98 nm)、 c' (643.85 nm)、 d (587.56 nm)、 e (546.07 nm)、 F' (479.99 nm)和 g (435.83 nm)共 6 条谱线对应的绝对折射率进行测量.折射率测量不确定度为 $\pm 1 \times 10^{-5}$.真空样品室温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim +80^{\circ}\text{C}$,温度控制不确定度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,真空度为 6.7×10^{-2} Pa.每隔 20°C 为一个测量点,每个温度点保温 $3\sim 5$ min 后进行测量^[16].

1.2 折射率温度系数经验拟合公式及参量意义

由 D_0 、 D_1 、 D_2 、 E_0 、 E_1 、 λ_{tk} (L_{tk}) 等 6 个常量组成的绝对折射率温度系数经验公式常量组是由肖特公司通过大量实验数据拟合开发的,以方便在 ZEMAX 软件中导入光学玻璃数据包进行折射率及其温度系数的计算.肖特公司提出光学材料的绝对折射率温度系数 ($dn_{\text{abs}}(\lambda, T)/dT$)、绝对折射率变化量 ($\Delta n_{\text{abs}}(\lambda, T)$) 的经验拟合公式,以及绝对折射率 ($n_{\text{abs}}(\lambda, T)$) 的表达式分别为^[6]

$$\frac{dn_{\text{abs}}(\lambda, T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2n(\lambda, T_0)} \left[D_0 + 2D_1 \Delta T + 3D_2 \Delta T^2 + \frac{E_0 + 2E_1 \Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{\text{tk}}^2} \right] \quad (1)$$

$$\Delta n_{\text{abs}}(\lambda, T) = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2n(\lambda, T_0)} \left[D_0 \Delta T + D_1 \Delta T^2 + D_2 \Delta T^3 + \frac{E_0 \Delta T + E_1 \Delta T^2}{\lambda^2 - \lambda_{\text{tk}}^2} \right] \quad (2)$$

$$n_{\text{abs}}(\lambda, T) = n_{\text{abs}}(\lambda, T_0) + \Delta n_{\text{abs}}(\lambda, T) \quad (3)$$

式中, ΔT 为温度差值,即样品测试环境温度与初始参考温度 T_0 (20°C) 的差值; $n(\lambda, T_0)$ 为玻璃样品对应某波长在真空 T_0 (20°C) 温度下的绝对折射率值; $\Delta n_{\text{abs}}(\lambda, T)$ 是玻璃样品对应某波长、真空某温度下的绝对折射率与初始参考温度 T_0 (20°C) 下绝对折射率的差值; $n_{\text{abs}}(\lambda, T)$ 是玻璃样品对应某波长、真空某温度下的绝

对折射率值; D_0 、 D_1 、 D_2 仅与温度有关,单位分别为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 、 $^{\circ}\text{C}^{-2}$ 、 $^{\circ}\text{C}^{-3}$; E_0 、 E_1 与波长及温度有关,单位分别为 $\mu\text{m}^2/^{\circ}\text{C}$ 、 $\mu\text{m}^2/^{\circ}\text{C}^2$; $\lambda_{\text{tk}}(L_{\text{tk}})$ 仅与波长有关,单位为 μm ,一般位于 $0.08\sim 0.33$ 之间。

2 结果与分析

2.1 实验结果

D-FK61、H-TF3A 玻璃在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内的绝对折射率实测结果分别见表 1、2。对 D-FK61 玻璃 d 谱线折射率,温度增加 20°C ,折射率 n_d 减小约为 1.7×10^{-4} 。而 H-TF3A 光学玻璃 d 谱线折射率随温度变化更小,温度增加 20°C ,折射率 n_d 增加约为 1.1×10^{-5} ,其折射率变化较 D-FK61 玻璃小一个数量级。

表 1 实验测试的得 D-FK61 玻璃在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的绝对折射率

Table 1 Experimentally measured absolute refractive index of D-FK61 glass in the temperature range of $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	n_t	$n_{c'}$	n_d	n_e	$n_{F'}$	n_g
-40	1.490 716	1.495 950	1.497 510	1.498 960	1.502 084	1.504 996
-20	1.490 534	1.495 780	1.497 340	1.498 790	1.501 916	1.504 834
0	1.490 352	1.495 610	1.497 170	1.498 620	1.501 748	1.504 672
20	1.490 170	1.495 440	1.497 000	1.498 450	1.501 580	1.504 510
40	1.489 988	1.495 270	1.496 830	1.498 280	1.501 412	1.504 348
60	1.489 806	1.495 100	1.496 660	1.498 110	1.501 244	1.504 186
80	1.489 624	1.494 930	1.496 490	1.497 940	1.501 076	1.504 024

表 2 实验测试的得 H-TF3A 玻璃在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的绝对折射率

Table 2 Experimentally measured absolute refractive index of H-TF3A glass in the temperature range of $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	n_t	$n_{c'}$	n_d	n_e	$n_{F'}$	n_g
-40	1.597 475	1.609 222	1.612 738	1.616 038	1.623 261	1.630 205
-20	1.597 461	1.609 218	1.612 741	1.616 042	1.623 273	1.630 227
0	1.597 460	1.609 224	1.612 748	1.616 054	1.623 291	1.630 254
20	1.597 460	1.609 235	1.612 759	1.616 070	1.623 315	1.630 286
40	1.597 470	1.609 256	1.612 783	1.616 098	1.623 352	1.630 336
60	1.597 485	1.609 284	1.612 815	1.616 132	1.623 396	1.630 390
80	1.597 506	1.609 313	1.612 851	1.616 171	1.623 447	1.630 452

由 D-FK61、H-TF3A 玻璃样品的真空折射率,计算得出样品在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内对应 6 条谱线波长的折射率温度系数见表 3、4。D-FK61 玻璃的 d 线折射率温度系数为 $8.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。测试波长增大,折射率温度系数呈现减小的趋势,由式(1)中可以明显看出:对于同种材料,折射率温度系数一定,折射率温度系数随波长的增大而减小,这与材料在长波区域的折射率变化较短波区域的变化相对平缓,即色散平坦的特性是一致的。在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,D-FK61 玻璃的各条谱线波长均具有负折射率温度系数,且折射率温度系数随温度的变化很小,相邻温度变化区间内折射率温度系数变化量最小为 0,最大为 $0.2\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内最大差值约为 $0.2\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。类似折射率温度系数为负值,且对温度变化不敏感的光学材料,更多地被考虑用于无热光学系统的热补偿设计中。

表 3 由实测数据计算得 D-FK61 玻璃在 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的绝对折射率温度系数

Table 3 Calculated temperature coefficient of absolute refractive index of D-FK61 glass in the temperature range of $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ using experimental data

Spectrum line	$dn_{\text{abs}}/dT/(\times 10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$					
	$-40\sim -20$	$-20\sim 0$	$0\sim 20$	$+20\sim 40$	$+40\sim 60$	$+60\sim 80$
t	-9.1	-9.1	-9.1	-9.1	-9.1	-9.1
c'	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5
d	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5
e	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.4
F'	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.3
g	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2	-8.0	-8.0

表 4 由实测数据计算得 H-TF3A 玻璃在 $-40\sim 80^\circ\text{C}$ 温度范围内的绝对折射率温度系数Table 4 Temperature coefficient of absolute refractive index of H-TF3A glass in the temperature range of $-40\sim 80^\circ\text{C}$ using experimental data

Spectrum line	$dn_{\text{abs}}/dT/(\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$					
	$-40\sim -20$	$-20\sim 0$	$0\sim 20$	$20\sim 40$	$40\sim 60$	$60\sim 80$
t	-0.7	-0.1	0.1	0.5	0.8	1.1
c'	-0.2	0.3	0.5	1.1	1.4	1.5
d	0.1	0.4	0.5	1.2	1.6	1.8
e	0.2	0.6	0.8	1.4	1.7	2.0
F'	0.6	0.9	1.2	1.8	2.2	2.6
g	1.1	1.3	1.6	2.5	2.7	3.1

如表 4 所示, H-TF3A 玻璃在 $-40\sim 80^\circ\text{C}$ 范围内, 大多数谱线波长对应的折射率温度系数为正, 折射率温度系数相对 D-FK61 玻璃较小, 但随温度变化却较大. H-TF3A 玻璃相邻温度变化区间内折射率温度系数变化量最小为 $0.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 最大为 $0.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $-40\sim 80^\circ\text{C}$ 范围内最大差值约为 $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. 这类折射率温度系数为正值且随温度变化较大的光学材料, 一般不适用于无热光学系统热补偿设计.

2.2 ZEMAX 方法计算折射率温度系数经验公式常量

根据测试样品在 -40°C 、 -20°C 、 0°C 、 $+20^\circ\text{C}$ 、 $+40^\circ\text{C}$ 、 $+60^\circ\text{C}$ 、 $+80^\circ\text{C}$ 下 6 条谱线分别对应的绝对折射率数据 n_t 、 $n_{c'}$ 、 n_d 、 n_e 、 $n_{F'}$ 、 n_g , 在 ZEMAX 软件的 Glasscat 中用记事簿建立后缀为 .IND 的折射率数据文件. 将折射率数据文件导入 ZEMAX Glass Fitting Tool 菜单模块, 拟合公式选择 Sellmeier 1^[6]. 对 D-FK61 的绝对折射率温度系数经验公式常量组进行拟合计算, 结果为: $D_0 = -2.24413249 \times 10^{-5}$, $D_1 = -4.5002207 \times 10^{-11}$, $D_2 = -4.184227760 \times 10^{-13}$, $E_0 = 6.00893081 \times 10^{-7}$, $E_1 = 3.66367234 \times 10^{-11}$, $L_{\text{tk}} = -7.57997231 \times 10^{-5}$.

同样, 对 H-TF3A 光学玻璃样品, 根据其绝对折射率数据测试数据, 应用 ZEMAX 软件对绝对折射率温度系数经验公式常量组进行拟合计算, 结果为: $D_0 = -2.97054595 \times 10^{-4}$, $D_1 = 1.389754910 \times 10^{-5}$, $D_2 = -7.12872132 \times 10^{-8}$, $E_0 = -4.22538665 \times 10^{-5}$, $E_1 = -4.29915910 \times 10^{-7}$, $L_{\text{tk}} = -.07276851 \times 10^{-3}$.

ZEMAX 软件计算出 D-FK61、H-TF3A 两种玻璃的折射率温度系数经验公式常量 λ_{tk} (L_{tk}) 值分别为 $-7.57997231 \times 10^{-5}$ 、 $-3.07276851 \times 10^{-3}$, 这与肖特光学玻璃手册提出的 λ_{tk} (L_{tk}) 数值范围 0.08~0.33 差距很大. 大量光学玻璃样本数据计算实践证明, 该方法对另外一部分光学玻璃拟合计算得出的关键参量 λ_{tk} 在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 数量级, 这会造成使用该参量回归计算得到的材料折射率及其温度系数与实测值出现较大偏差. 将 ZEMAX 软件计算得出的 D-FK61、H-TF3A 光学玻璃的绝对折射率温度系数经验公式常量组带入式 (1), 对 D-FK61、H-TF3A 样品的 $g \sim t$ 谱线绝对折射率温度系数在 $-100 \sim 140^\circ\text{C}$ 随温度的变化进行回归计算, 其变化曲线分别如图 1、2. 可见, D-FK61 玻璃的绝对折射率温度系数在 $-8.1 \times 10^{-6} \sim -8.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 之间, 与实测数值较为接近; 折射率温度系数随温度升高呈增大的趋势, 但变化很小. 回归计算 H-TF3A 玻璃的绝对折射率温度系数在 $-3.75 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 之间变化, 与实测数值 ($-0.1 \times 10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 相差约 2~3 个数量级, 误差明显较大. 这主要是因为 ZEMAX 软件计算 H-TF3A 玻璃的 λ_{tk} 值与折射率温度系数经验拟合公式中 λ_{tk} 值 (0.08~0.33) 差异太大, 所以回归拟合的折射率温度系数偏离正常曲线, 数据呈现极大误差.

因 CDGM 数据库中的 D-FK61 玻璃 ($n_d: 1.49700$, $\nu_d: 81.61$) 性能参量等同于 Schott 公司的 N-PK52A ($n_d: 1.49700$, $\nu_d: 81.61$)^[7], 而 H-TF3A 玻璃的性质则类似于 Schott 公司数据库中 F2 玻璃. N-PK52A 作为典型的负热光系数材料, 其绝对折射率温度系数随温度升高呈现减小的变化趋势^[6], 这与利用 ZEMAX 软件拟合折射率温度系数经验公式常量计算得到的 D-FK61 玻璃在不同波长下绝对折射率温度系数变化趋势相反. 而 ZEMAX 方法获得的 H-TF3A 样品的绝对折射率温度系数变化趋势也与类似的 F2 玻璃存在很大差异. 对比说明, 依 ZEMAX 软件计算的折射率温度系数经验公式常量回归计算折射率温度系数, 在 λ_{tk} (L_{tk}) 数值偏差较大的情况下, 回归计算值与实测值将出现较大偏差, 继而会影响利用 ZEMAX 进行光学系统性能设计的有效性.

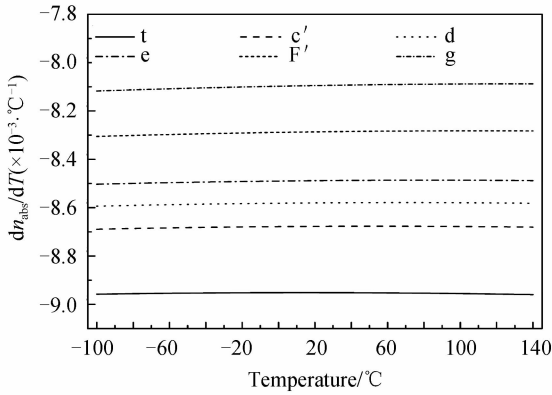


图1 ZEMAX 软件拟合折射率温度系数经验公式常量计算得到的 D-FK61 玻璃在不同波长下绝对折射率温度系数
Fig.1 Temperature coefficient of the absolute refractive index of D-FK61 glass for different wavelengths calculated by use of the refractive index temperature coefficient empirical formula constants obtained by ZEMAX method

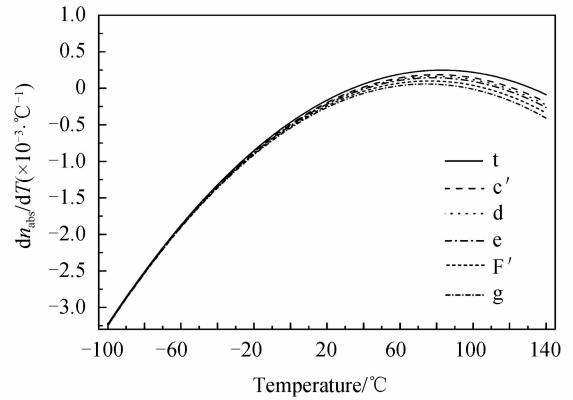


图2 ZEMAX 软件拟合折射率温度系数经验公式常量计算得到的 H-TF3A 玻璃不同波长下绝对折射率温度系数
Fig.2 Temperature coefficient of the absolute refractive index of H-TF3A glass for different wavelengths calculated by use of the refractive index temperature coefficient empirical formula constants obtained by ZEMAX method

2.3 1stOpt 差分进化法计算折射率温度系数经验公式常量

把 D-FK61 玻璃样品测试的温度系数以及各个温度点下的绝对折射率值带入式(2). 随后在 1stOpt 优化分析系统中设置如下语句:

Parameters D0, D1, D2, E0, E1, L_{tk} [0.1, 0.33];

Function

$$((1.504996 \cdot 2^{-1}) / (2 * 1.504996)) * (d0 * (-60) + d1 * (-60)^2 + d2 * (-60)^3 + (e0 * (-60) + e1 * (-60)^2) / (0.4358^2 - L_{tk}^2)) = 0.000486;$$

$$((1.502084 \cdot 2^{-1}) / (2 * 1.502084)) * (d0 * (-60) + d1 * (-60)^2 + d2 * (-60)^3 + (e0 * (-60) + e1 * (-60)^2) / (0.4861^2 - L_{tk}^2)) = 0.000504;$$

$$((1.498960 \cdot 2^{-1}) / (2 * 1.498960)) * (d0 * (-60) + d1 * (-60)^2 + d2 * (-60)^3 + (e0 * (-60) + e1 * (-60)^2) / (0.5461^2 - L_{tk}^2)) = 0.00051;$$

$$((1.497510 \cdot 2^{-1}) / (2 * 1.497510)) * (d0 * (-60) + d1 * (-60)^2 + d2 * (-60)^3 + (e0 * (-60) + e1 * (-60)^2) / (0.5876^2 - L_{tk}^2)) = 0.00051;$$

$$((1.495950 \cdot 2^{-1}) / (2 * 1.495950)) * (d0 * (-60) + d1 * (-60)^2 + d2 * (-60)^3 + (e0 * (-60) + e1 * (-60)^2) / (0.6563^2 - L_{tk}^2)) = 0.00051;$$

$$((1.490716 \cdot 2^{-1}) / (2 * 1.490716)) * (d0 * (-60) + d1 * (-60)^2 + d2 * (-60)^3 + (e0 * (-60) + e1 * (-60)^2) / (1.014^2 - L_{tk}^2)) = 0.000546;$$

这里只列出 -40°C 温度点的语句,其他温度点以此类推,最终解得 D-FK61 玻璃样品的绝对折射率温度系数经验公式常量为: $D_0 = -2.23913969566569 \times 10^{-5}$, $D_1 = -3.59100160769135 \times 10^{-10}$, $D_2 = -4.17635393276861 \times 10^{-15}$, $E_0 = 5.58125768931971 \times 10^{-7}$, $E_1 = 1.63497223395596 \times 10^{-11}$, $L_{tk} = 0.1$.

同样地,把 H-TF3A 玻璃样品测试的绝对折射率数据带入折射率温度系数经验公式,在 1stOpt 中设置语句,计算得出 H-TF3A 样品的绝对折射率温度系数经验公式常量为: $D_0 = 4.1525 \times 10^{-6}$, $D_1 = 2.2704 \times 10^{-8}$, $D_2 = -1.0890 \times 10^{-10}$, $E_0 = 6.2282 \times 10^{-7}$, $E_1 = -3.4415 \times 10^{-10}$, $L_{tk} = 0.2053$.

由此可见,通过 1stOpt 差分进化法计算获得 D-FK61、H-TF3A 两种玻璃的 L_{tk} 位于 0.08~0.33 之间,分别为 0.1、0.2053,这与 ZEMAX 软件计算出的 $\lambda_{tk}(L_{tk})$ 值 $-7.57997231 \times 10^{-5}$ 、 $3.07276851 \times 10^{-3}$ 存在很大差距.

把 1stOpt 差分进化法求解的 D-FK61 光学玻璃折射率温度系数经验公式常量组带入式(2)和(3),计算 n_t 绝对折射率,与表 1 实测的 D-FK61 光学玻璃各个温度点的 n_t 进行对比,结果如表 5. 可见,1stOpt 差分进化法计算获得的 n_t 与实测值差别很小,差异均在小数点后的第 6 位,几乎与光学玻璃材料内部不同位置的折射率差,即与材料的光学均匀性(H2-H4 等级),处于同一量级,都在折射率精密测试误差范围($\pm 1 \times$

10^{-5})内. 据此也可推断, 20°C 间隔区间的折射率温度系数的差值将在 $\pm 1 \times 10^{-7}$ 数量级. 这样小的计算误差即使对于高成像质量、高分辨率光学镜头的设计也是可接受的.

表 5 D-FK61 光学玻璃的 n_t 实测值与参量回归计算的 n_t 数值对比

Table 5 Comparison of the measured n_t value of D-FK61 optical glass with the calculated one by parameters regression calculation

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	n_t (Measured)	n_t (Regressed value)	Difference
-40	1.490 716	1.490 706	-9.7×10^{-6}
-20	1.490 534	1.490 528	-6.4×10^{-6}
0	1.490 352	1.490 349	-3.1×10^{-6}
20	1.490 170	1.490 170	0
40	1.489 988	1.489 991	3.0×10^{-6}
60	1.489 806	1.489 812	5.9×10^{-6}
80	1.489 624	1.489 633	8.7×10^{-6}

根据 1stOpt 差分进化法计算得出的 D-FK61、H-TF3A 光学玻璃折射率温度系数经验公式常量组拟合出实验测试 $g \sim t$ 谱线的折射率温度系数在 $-100 \sim 140^{\circ}\text{C}$ 随温度变化的曲线, 分别如图 3、4. 由这些曲线可以获得 $-100 \sim 140^{\circ}\text{C}$ 范围内任一温度点的材料绝对折射率温度系数 (dn_{abs}/dT), 还可计算获得任一温度点材料的绝对折射率变化量 (Δn_{abs}) 及绝对折射率数值 (n_{abs}). 利用图 3 数据, D-FK6 玻璃的样品在 $-40 \sim 80^{\circ}\text{C}$

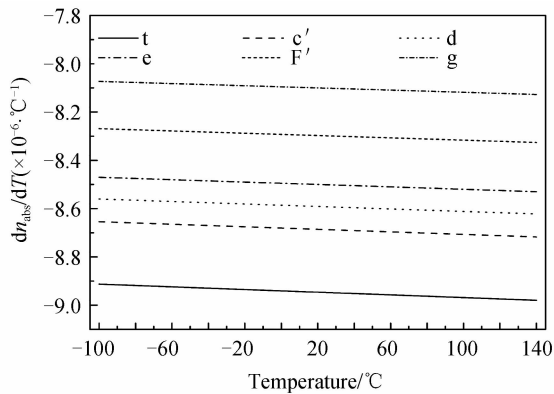


图 3 用 1stOpt 法拟合折射率温度系数经验公式常量回归计算得到的 D-FK61 玻璃在不同波长下绝对折射率温度系数

Fig. 3 Temperature coefficient of the absolute refractive index of D-FK61 glass for different wavelengths calculated using the fitted refractive index temperature coefficient empirical formula constants by 1stOpt method

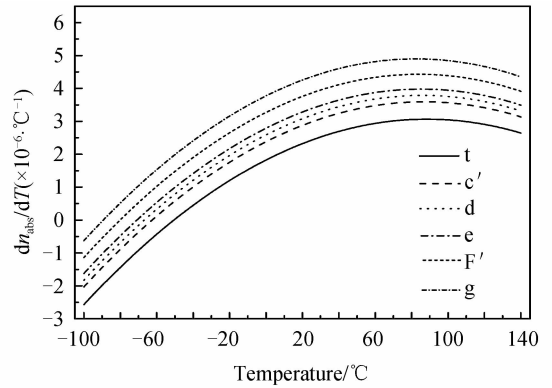


图 4 用 1stOpt 法拟合折射率温度系数经验公式常量回归计算得到的 H-TF3A 玻璃在不同波长下绝对折射率温度系数

Fig. 4 Temperature coefficient of the absolute refractive index of H-TF3A glass for different wavelengths calculated using the fitted refractive index temperature coefficient empirical formula constants by 1stOpt method

表 6 D-FK61 玻璃在 $-40 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内绝对折射率温度系数实测值与参量回归计算值的对比

Table 6 Comparison of the experimental temperature coefficient of absolute refractive index of D-FK61 glass with the calculated one in the temperature range of $-40 \sim 80^{\circ}\text{C}$

Spectrum line	Calculation methods	$dn_{\text{abs}}/dT / (\times 10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$				
		$-40 \sim -20$	$-20 \sim 0$	$0 \sim 20$	$20 \sim 40$	$40 \sim 60$
t	Measured	-9.1	-9.1	-9.1	-9.1	-9.1
	1stOpt regression	-8.935	-8.935	-8.945	-8.95	-8.955
c'	Measured	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5
	1stOpt regression	-8.675	-8.675	-8.685	-8.69	-8.69
d	Measured	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5
	1stOpt regression	-8.58	-8.58	-8.59	-8.595	-8.595
e	Measured	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5
	1stOpt regression	-8.485	-8.495	-8.495	-8.50	-8.51
F'	Measured	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4	-8.4
	1stOpt regression	-8.285	-8.29	-8.295	-8.30	-8.305
g	Measured	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2	-8.0
	1stOpt regression	-8.09	-8.09	-8.10	-8.10	-8.11

温度范围内对应 $g \sim t$ 6 条谱线波长的绝对折射率温度系数,如表 6 所示,与实验测试绝对折射率计算获得的折射率温度系数对比,两者数值间差异最大是 c' 、 t 谱线对应的 $1.75 \sim 2 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$,最小的为 e 、 g 谱线对应的 $\sim 1 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$. 这与由表 5 推断 20°C 间隔区间折射率温度系数的差值将在 $\pm 1 \times 10^{-7}$ 数量级一致.

3 结论

使用 ZEMAX 软件计算光学玻璃折射率温度系数经验公式常量得到的 $\lambda_{tk}(L_{tk})$ 处于 $0.08 \sim 0.33$ 之外时,可用 1stOpt 差分进化法作为拟合计算折射率温度系数经验公式常量 D_0 、 D_1 、 D_2 、 E_0 、 E_1 、 $\lambda_{tk}(L_{tk})$ 的有效补充,求解的 λ_{tk} 系数与其通用数值范围 $0.08 \sim 0.33$ 相吻合,参量回归计算所得的光学玻璃在特定温度、波长下的材料绝对折射率及其温度系数与实际测试值的偏差分别小于 1×10^{-5} 、 $2 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$. 基于 1stOpt 差分进化法计算光学玻璃折射率温度系数经验公式常量,可大大提高折射率及其温度系数计算的准确性,从而保障采用 ZEMAX 软件时,基于光学材料折射率及其温度系数等光学参量选型,进行高成像质量、高分辨率光学系统性能设计与模拟的准确性及有效性.

参考文献

- [1] GARCIANUNEZ D S, MICHKA D. The design of athermal infrared optical systems[C]. SPIE, 1989, **1049**: 82-85.
- [2] KRYSZCZYNSKI T, LESNIEWSKI M, MIKUCKI J. New approach to the method of the initial optical design based on the matrix optics[C]. SPIE, 2008, **7141**: 71411X.
- [3] TOMOYASU Y, SHUJI S, TAKAHIRO Z, *et al.* Measurement of refractive indices of 20 optical materials at low temperature[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(8): 083401.
- [4] JIANG Zhong-hong, ZHANG Jun-zhou, SONG Xiu-yu, *et al.* Research on athermalized phosphate laser glass-selection of the glass composition using computer[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1979, **7**(4): 305-314.
姜中宏,张俊洲,宋修玉,等. 低热光畸变磷酸盐激光玻璃的研究—用电子计算机选择玻璃组成[J]. *硅酸盐学报*, 1979, **7**(4): 305-314.
- [5] LI Lin, WANG Xuan. Current status and prospects for thermal effects on optical systems and athermalisation techniques [J]. *Optical Technology*, 1997, **5**: 26-29.
李林,王焯,环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望[J]. *光学技术*, 1997, **5**: 26-29.
- [6] SCHOTT Technical Information TIE-19 Temperature coefficient of refractive index [EB/OL]. (July, 2016) [2017-01-18]. http://www.us.schott.com/d/advanced_optics/f19eb160-da0e-47b2-8125-8fc1273b13ba/1.0/schott_tie-19_temperature_coefficient_of_refractive_index_us.pdf.
- [7] SCHOTT Optical Glass 2016-Catalogue [EB/OL]. (July, 2016) [2017-01-18]. http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/download/index.html.
- [8] KOMATSU^T, ITO N, HONMA T, *et al.* Temperature dependence of refractive index and electronic polarizability of RO-TeO₂ glasses (R=Mg, Ba, Zn)[J]. *Solid State Sciences*, 2012, **14**(10): 1419-1425.
- [9] GORACHAND G. Sellmeier coefficients and dispersion of thermo-optic coefficients for some optical glasses[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(7): 1540-1546.
- [10] SUYOSHI H, NORIKO I, VESSELIN D, *et al.* Temperature dependence of refractive index and electronic polarizability of KNbGeO₅ glass and its nanocrystallized glasses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**: 053105.
- [11] JACINTO C, MESSIAS D N, ANDRADE A A. Thermal lens and Z-scan measurements; thermal and optical properties of laser glasses - a review [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, **352**(32-35): 3582-3597.
- [12] BAESSO M L, PELISSON E, ROHLING J H, *et al.* Temperature dependence of thermo-optical properties of optical glasses determined by Thermal Lens Spectroscopy[J]. *Analytical Sciences*, 2001, **17**: s106-s109.
- [13] MANN K, SCHAFFER B, STUBENVOLL M, *et al.* Measurement and compensation of wave front deformations and focal shifts in high-power laser optics[C]. SPIE. 2015, **9632**: 96321D.
- [14] PETRIS A, POPA C, POPA D, *et al.* Schlieren method for measuring the temperature coefficient of the refractive index of optical glasses[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2004, **6**(1): 57-62.
- [15] HE Zi-long, YU Hai-xun. Data fusion based on first optimization and its comparison with the traditional algorithms[J]. *International Congress on Image & Signal Processing (CISP)*, 2013, **3**: 1432-1436.
- [16] GB/T 7962.4-2010 Test methods of colorless optical glass-Part 4: Temperature coefficient of refractive index[S].
GB/T 7962.4-2010 无色光学玻璃测试方法 第 4 部分:折射率温度系数[S].