

采用质心波长表征 GaN 基白光 LED 阵列的平均结温

郭 杰^{1,2}, 马军山¹, 饶 丰², 褚 静²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 常州工学院 光电工程学院, 常州 213002)

摘要: 结温是影响 LED 性能的重要参数, 快速、准确地测量 LED 结温对 LED 产品设计、性能检测具有重要的意义。在不同驱动电流下, 测量了 GaN 基白光 LED 阵列不同衬底温度时的归一化光谱分布, 计算其质心波长, 分析了质心波长随 LED 阵列平均结温变化关系, 测量了 LED 阵列结温, 并与中心波长法的测量结果进行对比。研究表明: 经光谱仪测量, 质心波长与平均结温变化存在良好的线性关系, 且随着驱动电流的改变, 直线斜率呈指数关系变化。与中心波长法相比, 本方法的测量准确度更高。因此, 采用质心波长测量 GaN 基白光 LED 阵列结温是一种直观的非接触的有效方法。

关键词: 光谱学; 结温测量; 光谱分析; 发光二极管阵列; 质心波长

中图分类号: TN 312+.8; O 433.4 **文献标志码:** A

Characterization of the Average Junction Temperature of GaN-Based White LED Arrays by Centriod Wavelength

GUO Jie^{1,2}, MA Junshan¹, RAO Feng², CHU Jing²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Opto-Electrical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: The junction temperature is an important parameter that affects LED performance. It is of great significance to measure the junction temperature of LED quickly and accurately for the design and performance testing of LED products. Under different driving currents, the normalized spectral distribution of the GaN-based white-light LED arrays at different substrate temperatures was measured, and the centriod wavelength was calculated. The relationship between the centriod wavelength and the average temperature of the LED array was analyzed. The junction temperature of the array was measured and compared with that measured by the central wavelength method. The results show that there is a good linear relationship between the centriod wavelength and the average junction temperature, and the slope of the straight line changes exponentially with the change of the driving

收稿日期: 2018-06-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFF02-10002); 江苏省产学研前瞻性项目 (BY2016031-05)

第一作者: 郭 杰 (1982-), 女, 博士研究生. 研究方向: LED 光色热电及光生物安全特性. E-mail: guojie4950@163.com

通信作者: 马军山 (1967-), 男, 教授. 研究方向: 光学精密测试技术、生物医学及图像处理. E-mail: junshanma@163.com

current. Compared with the central wavelength method, the accuracy of this method is higher. Therefore, using centroid wavelength to measure the junction temperature of the GaN-based white LED array is an intuitive, non-contact effective method.

Keywords: *spectroscopy; junction temperature measurement; spectral analysis; light emitting diode arrays; centroid wavelength*

随着半导体技术的飞速发展, 发光二极管(LED) 因其高效、绿色及寿命长等优点迅速普及于各照明和显示领域。P-N 结温度升高是阻碍大功率 LED 发展的主要因素^[1-4]。因此, 快速、准确地测量 LED 结温对 LED 芯片设计、封装、失效检测等环节十分重要。

正向电压法是测量 LED 结温的国际标准方法^[5]。但在测量时往往受到灯具外壳及产品封装等限制, 一般难以接触 LED 管脚, 不能实现 LED 引脚两端电压的测量^[6]。同时, 其测量条件是在小电流状态下进行, 无法及时掌握现场运行的 LED 灯具结温, 这些问题令正向电压法的应用十分受限。因此, 非接触式 LED 结温测量方法受到研究者的关注。在 LED 阵列结温研究方面, Hong 等^[7]于 2004 年提出峰值波长法表征 AlGaInP 基 LED 阵列结温, 随后张晶晶^[8]于 2014 年研究了 GaN 基 LED 峰值波长随结温变化的关系, 结果表明, 结温每变化 1 °C, 峰值波长变化 0.04 nm。然而, 采用峰值波长法测量阵列结温时, 光谱常会多峰重叠或峰值区域平坦, 准确判定峰值位置存在较大难度, 同时受仪器精度限制, 测量误差较大。Chen 等^[9]于 2013 年提出中心波长法, 采用归一化光谱 1/2 高处的极限波长的平均值作为阵列平均结温。近年来, 本课题组提出采用质心波长和相对光谱差异表征 AlGaInP 基 LED 阵列平均结温, 结果比中心波长法更为准确, 但在研究时尚未考虑电流的影响^[10-11]。

GaN 基白光 LED 阵列平均结温的变化将导致每一波长对应的相对辐射强度发生变化, 而质心波长、半高全宽、光谱差异等特征参数与整个光谱分布相关。同时, 在不同的驱动电流下, 结温对光谱的影响程度不同。因此, 可以建立光谱参数与阵列平均结温的关系。基于此, 本文研究了采用质心波长表征 GaN 基 LED 阵列结温的可行性。

1 测量原理

白光 LED 光谱受注入电流、结温、灯体散热能力等因素的影响。当结温、电流发生变化, 其辐射强度必将发生变化。

质心波长 λ_c 是 LED 光谱的几何对称波长, 计算公式如下^[12]:

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中: λ_1 , λ_2 为 LED 光谱分布的上、下限波长, 对于可见光 LED, 一般取 380 nm 和 780 nm; $F(\lambda)$ 为 LED 归一化光功率谱分布。质心波长 λ_c 与整个光谱分布密切相关, 它能表达光谱能量分布的集中状况。

假设质心波长 λ_c 随白光 LED 阵列平均结温 T_j 的变化呈现如下关系, 即

$$\frac{\partial \lambda_c}{\partial T_j} = k \quad (2)$$

当给定驱动电流 I_0 时, 上述公式通过积分可表达为

$$\lambda_c' \Big|_{I=I_0} = k \partial T_j + \lambda_c \quad (3)$$

式中: k 为与结温相关的光谱敏感系数, 定义为质心波长-平均结温系数, 它随着驱动电流 I 的不同发生变化; λ_c' 为被测条件下的质心波长。

平均结温 T_j 可以表征为

$$T_j = \frac{\lambda_c' - \lambda_c}{k(I)} + T_0 \quad (4)$$

式中, T_0 为初始温度。

具体测量流程设计如下:

a. 测量给定小电流驱动、不同温度下的归一化光谱功率分布, 计算质心波长 λ_c , 求出质心波长-平均结温系数 k ;

b. 改变驱动电流, 测量不同电流不同温度下

的归一化光谱功率分布，得到一组随驱动电流变化的 k ，通过拟合得出不同电流下的电流修正公式为

$$k(I) = \sigma_1 \exp\left(-\frac{I}{I_1}\right) + \sigma_2 \exp\left(-\frac{I}{I_2}\right) + \sigma_0 \quad (5)$$

式中， σ_0 ， σ_1 ， σ_2 ， I_1 ， I_2 为系数 k 随电流 I 变化的拟合系数；

- c. 计算待测条件下对应驱动电流 I 的 k 值；

d. 测量待测条件 T_j 下的归一化光谱功率分布，并计算质心波长 λ_c' ，结合初始温度 T_0 下的质心波长 λ_c 和系数 k ，代入式(4)计算出待测结温 T_j ；

e. 将不同方法的测量结果进行对比，得出该方法的适用性和准确性。

2 实 验

实验采用改变衬底温度的方式来改变结温，进而研究光谱参数与结温间的关系。实验选择 3 只 1 W GaN 基白光串联焊接在铝基板作为研究对象。由于铝基板引入的热阻并不影响本研究，将其放置在温度控制器上，热沉与铝基板、铝基板和温度控制器之间填涂导热硅胶，见图 1。这样热沉温度的变化就等于温度控制器的变化。先测量 20 mA 驱动电流下，衬底温度从 25 ℃ 至 65 ℃ 时白光 LED 阵列的光谱分布，间隔 10 ℃，计算其质心波长。然后改变驱动电流，测量 100 mA 至 500 mA，间隔 50 mA 条件下不同衬底温度的白光 LED 阵列的光谱分布，计算质心波长，最后分析质心波长与结温变化的关系。

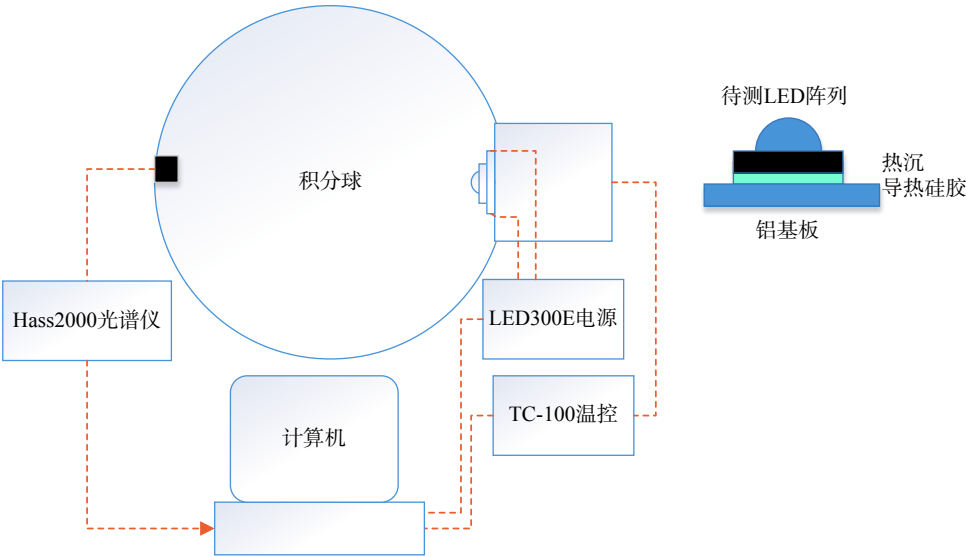


图 1 测试系统结构图
Fig.1 Schematic diagram of the test system

如图 1 所示，本实验测量系统由 LED300E 恒流电源、TC-100 温控台、积分球、Hass2000 型光谱仪、待测 LED 阵列等组成。LED300E 恒流电源负责给样品 LED 供电，其误差范围为±1 mA。TC-100 温控装置为测试提供稳定的测试衬底温度，其误差范围为±1 ℃。

3 结果与讨论

3.1 白光 LED 阵列的归一化光谱功率分布

图 2 为相同测试条件下的单颗灯珠和串联阵列的归一化光谱功率分布。两者整体光谱的质心

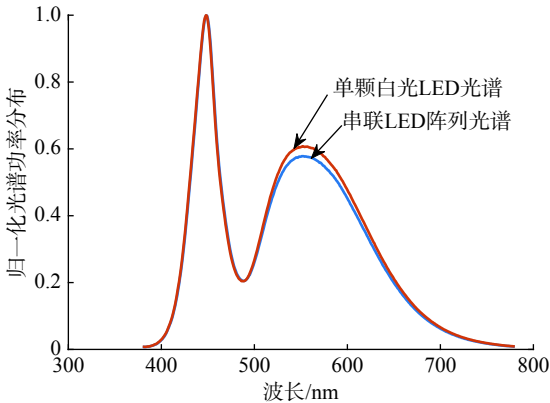


图 2 单颗灯珠与串联阵列的归一化光谱功率分布
Fig. 2 Normalized spectral power distribution of a single bulb and a tandem array

波长分别为 536.8 nm 和 535.3 nm, 差别为 1.5 nm; 半高宽分别为 165.1 nm 和 158.9 nm, 差别为 6.2 nm。由图 2 可以观察到, 芯片发光光谱(左侧峰)差别小, 其质心波长为 447.9 nm 和 448.4 nm, 差别为 0.5 nm, 半高宽为 33 nm 和 33.1 nm, 差别为 0.1 nm; 而对于荧光粉激发合成光谱(右侧峰), 其光谱数据差别比较大。因此, 在光谱数据处理上, 选择芯片发光光谱作为研究对象。

3.2 恒定驱动电流时阵列质心波长与结温的关系

图 3 为 350 mA 驱动电流时样品的质心波长随温度控制器温度(T_c)的变化曲线。由于电流恒定时, 温度控制器的变化等于平均结温的变化, 因此, 可以看出, 质心波长随结温呈线性变化, 其斜率就是质心波长-平均结温系数 k , 样品 1 的 k 为 0.028 nm/℃。曲线的线性误差平均值为 0.011 nm, 相当于结温误差 0.4 ℃。

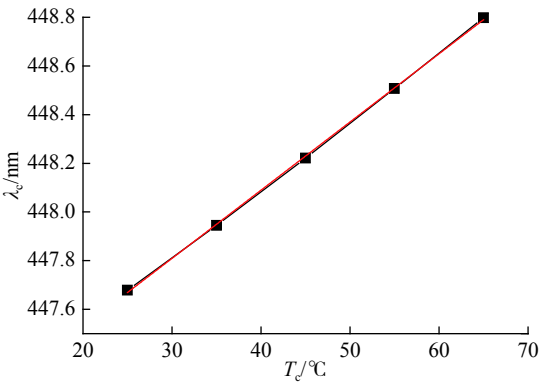


图 3 质心波长随温度控制器温度的变化

Fig.3 Variation of centroid wavelengths with the temperature of thermostat

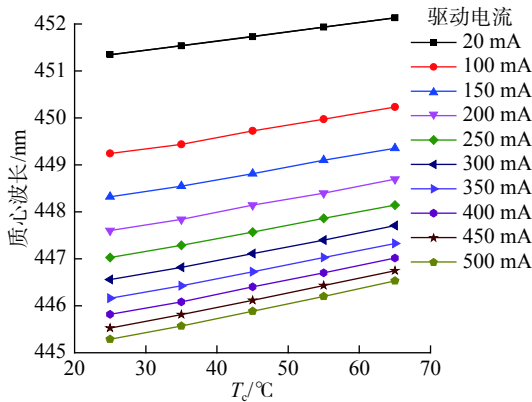


图 4 各驱动电流下的质心波长随温度控制器温度的变化

Fig.4 Variation of centroid wavelengths with the temperature of thermostat under different driving currents

3.3 不同驱动电流时阵列质心波长与结温的关系

图 4 为样品在不同驱动电流时质心波长和 T_c 温度的对应关系。当驱动电流恒定时, 无论 20 mA 小电流还是 350 mA 大电流, 质心波长始终与结温呈良好的线性关系。

由表 1 可见, 随着驱动电流的变化, 虽然质心波长与结温呈线性关系, 但直线斜率 k 发生变化。质心波长-平均结温系数 k 随着电流的增加而增大。将各电流下的质心波长结温系数进行拟合, 从图 5 可见, 质心波长-平均结温系数与驱动电流呈指数形式增长, 式 (5) 拟合系数分别为 -0.007 7, 31.35, -0.012 7, 527.35, 0.036。

表 1 不同驱动电流下质心波长-平均结温系数
Tab.1 Average junction temperature coefficients of the centroid wavelength under different driving currents

电流/mA	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500
结温系数	1.97	2.52	2.62	2.75	2.81	2.88	2.94	3.01	3.06	3.11

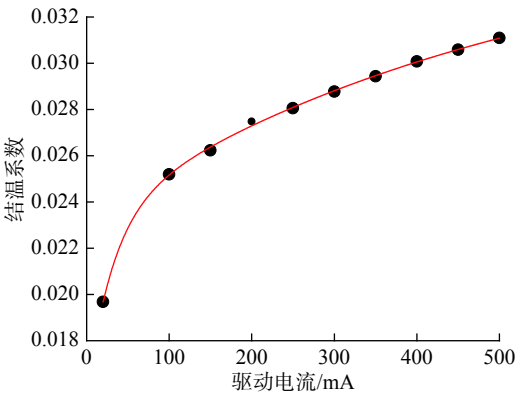


图 5 质心波长-平均结温系数随驱动电流的变化

Fig.5 Variation of average junction temperature coefficients of the centroid wavelength with different driving currents

这样只需要知道待测条件下的驱动电流和归一化光谱分布, 代入式 (4) 就可以计算出实时点灯时的 GaN 基白光 LED 阵列的平均结温。

3.4 测量精度分析

3.4.1 测量分辨率对比

当采用瞬时脉冲电流测量 LED 光谱时, 由于温控台和风扇的强制散热, LED 阵列所产生的热量可忽略, LED 阵列平均结温近似为热沉温度。图 6 是 350 mA 驱动电流下, 白光 LED 阵列的峰值波长、中心波长和质心波长随热沉温度的变化。从图上可以看出, 三者均随热沉温度升高呈线性增加, 其中质心波长随温度变化的线性度最

好，中心波长和峰值波长随温度变化呈现台阶状上升，中心波长台阶小于峰值波长，这与实验中所采用的光谱仪的扫描步长有关。对于 GaN 基白光 LED 阵列，当结温变化 20 ℃，峰值波长移动 1 nm；当结温变化 10 ℃，中心波长移动 1 nm。采用最常用的 1 nm 测量间隔的光谱仪，使用中心波长法或峰值波长法将无法精确测量出 LED 阵列平均结温的变动。与中心波长和峰值波长相比，温度每变化 2 ℃，质心波长移动 0.05 nm，质心波长可分辨出更小的温度变化，具有更好的技术优势。

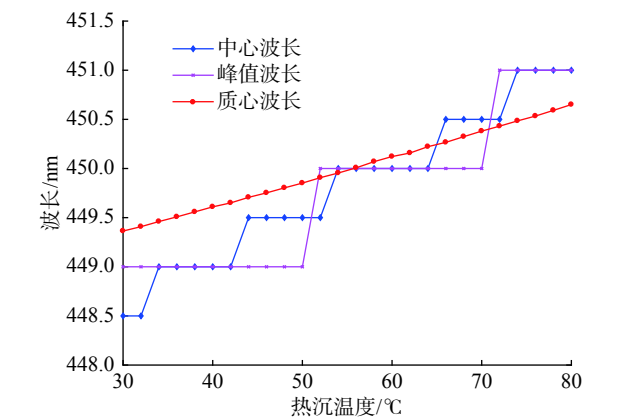


图 6 3 种波长随热沉温度的变化

Fig.6 Variation of three wavelengths with the heat-sink temperature

3.4.2 测量准确度对比

利用本文方法测量实时工作时的 LED 光谱，根据式(4)计算阵列结温，并与文献[9-10]的中心波长法、质心波长法进行比较，如图 7 所示，具体数值如表 2 所示。同样测量条件下，中心波长法与质心波长法最大偏差为 3 ℃。同时，相较于 AlGaInP 基 LED，GaN 基 LED 由于器件结构和封装形式的影响，会导致质心波长—平均结温系数随电流发生变化。电流差异越大，其质心波长—平均结温系数差异越大，对结温计算的影响越大，本文提出的方法与不带电流修正的质心波长法最大偏差为 2.3 ℃。

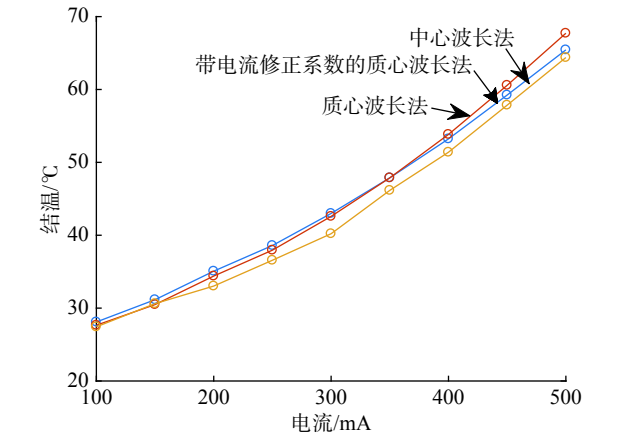


图 7 3 种方法测量结果对比

Fig.7 Comparison of measurement results by three methods

表 2 3 种方法所测量的结温结果

Tab.2 Results of junction temperatures measured by three methods

测量方法	测量参数	电流/mA								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
中心波长法	$T_j/^\circ\text{C}$	27.4	30.6	33.0	36.6	40.2	46.2	51.4	57.9	64.4
	$k\times 10^{-2}/(\text{nm}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	—	—	—	—	2.94	—	—	—	—
质心波长法	$T_j/^\circ\text{C}$	27.7	30.5	34.4	38.0	42.6	47.9	53.8	60.6	67.7
	$k\times 10^{-2}/(\text{nm}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	2.52	2.62	2.75	2.81	2.88	2.94	3.01	3.06	3.11
带电流修正系数的质心波长法	$T_j/^\circ\text{C}$	28.1	31.2	35.1	38.6	43.0	47.9	53.2	59.2	65.4

4 结 论

通过对不同驱动电流、不同衬底温度下的 GaN 基白光 LED 串联阵列的光谱进行测量，研究了质心波长与平均结温的变化关系，发现两者始终保持良好的线性相关，同时其斜率随驱动电流改变呈现指数增长趋势。依据此关系，本文提出了一种用质心波长表征 GaN 基白光 LED 阵列平均结温的新方法。研究结果表明，当采用同等扫描

步长光谱仪，相较于中心波长法和峰值波长法，用带电流修正系数的质心波长法测量白光 LED 阵列平均结温具有更高的分辨率和准确度。

参考文献:

[1] ZUKAUSKAS A, SHUR M, GASKA R. Introduction to solid-state lighting[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[2] 余彬海, 王垚浩. 结温与热阻制约大功率 LED 发展[J].

发光学报, 2005, 26(6): 761–766.

- [3] 刘立明, 郑晓东. LED 结温与光谱特性关系的测量[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1069–1073.
- [4] 田民波, 朱焰焰. 白光 LED 照明技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [5] GB/T 24824—2009 普通照明用 LED 模块测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [6] 邱西振, 张方辉. 基于相对光谱强度的非接触式 LED 结温测量法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 36–39.
- [7] HONG E, NARENDRAN N. A method for projecting useful life of LED lighting systems[C]//Proceedings of SPIE 5187, Third International Conference on Solid State Lighting. San Diego, California, United States: SPIE, 2004: 93–99.
- [8] 张晶晶. 大功率白光 LED 阵列结温光谱检测技术的研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院 (上海技术物理研究

所), 2014.

- [9] CHEN K, NARENDRAN N. Estimating the average junction temperature of AlGaInP LED arrays by spectral analysis[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(7): 701–705.
- [10] 饶丰, 朱锡芳, 徐安成. 用归一化光谱分布差异表征 AlGaInP 基 LED 阵列的平均结温[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 093004.
- [11] 饶丰, 郭杰, 朱锡芳, 等. AlGaInP 基 LED 阵列平均结温的质心波长表征[J]. 发光学报, 2014, 35(9): 1093–1097.
- [12] LIN Y, GAO Y L, LU Y J, et al. Study of temperature sensitive optical parameters and junction temperature determination of light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(20): 202108.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 326 页)

- [2] MALICK J. A dual approach to semidefinite least-squares problems[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 2004, 26(1): 272–284.
- [3] BOYD S, XIAO L. Least-squares covariance matrix adjustment[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 2005, 27(2): 532–546.
- [4] GAO Y, SUN D F. Calibrating least squares semidefinite programming with equality and inequality constraints[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 2009, 31(3): 1432–1457.
- [5] HE B S, XU M H, YUAN X M. Solving large-scale least squares semidefinite programming by alternating direction methods[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 2011, 32(1): 136–152.
- [6] LI Q N, LI D H. A projected semismooth newton method for problems of calibrating least squares covariance matrix[J]. Operations Research Letters, 2011, 39(2): 103–108.
- [7] SAVAS B, DHILLON I S. Clustered matrix approximation[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and

Applications, 2016, 37(4): 1531–1555.

- [8] BYRD R H, LU P H, NOCEDAL J, et al. A limited memory algorithm for bound constrained optimization[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1995, 16(5): 1190–1208.
- [9] BYRD R H, NOCEDAL J, SCHNABEL R B. Representations of quasi-Newton matrices and their use in limited memory methods[J]. Mathematical Programming, 1994, 63(1/3): 129–156.
- [10] NOCEDAL J, WRIGHT S J. Numerical Optimization[M]. New York: Springer, 2006.
- [11] NI Q, YUAN Y. A subspace limited memory quasi-Newton algorithm for large-scale nonlinear bound constrained optimization[J]. Mathematics of Computation, 1997, 66(220): 1509–1520.
- [12] ZHANG H C, HAGER W W. A nonmonotone line search technique and its application to unconstrained optimization[J]. SIAM Journal on Optimization, 2004, 14(4): 1043–1056.

(编辑: 丁红艺)