

· 光电测量与检测 ·

基于 ART-Kriging 的 TDLAS 燃烧二维场检测技术

戴童欣¹, 尹红贺², 王彪³

¹中国兵器工业第二一四研究所, 安徽 蚌埠 233042;

²吉光半导体科技有限公司, 长春 130031;

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033

摘要: 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术由于其灵活和高效的特性成为当前燃烧场研究的主要方法之一。传统的成像算法采用修正型代数迭代法(ART)对二维场进行求解,然而有限数量的探测光束使得ART算法的求解精度受限,难以满足实际应用需求。对此,本文在ART算法的基础上,提出一种ART-Kriging燃烧场二维建模算法,有效地解决了TDLAS-ART技术在燃烧场监控时精度较差的问题。通过实验对该算法进行了验证后,结果表明,本算法在温度场的求解上较ART算法分辨精度有显著提升,与热电偶实测温度结果误差小于8%,结果表明了算法的有效性。

关键词: 二维场重建; TDLAS; ART-Kriging; 温度

中图分类号: TN271.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2023.11.032

Two-dimensional combustion field detection technology with TDLAS based on ART-Kriging

DAI Tongxin¹, YIN Honghe², WANG Biao³

¹East China Institute of Optoelectronic Integrated Devices, Bengbu anhui 233042, China;

²Jlight Semiconductor Technology Co., Ltd. Changchun 130031, China;

³Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract: Tunable laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology has become one of the main methods for current combustion field research due to its flexible and efficient characteristics. Traditional imaging algorithms such as the Modified Algebraic Iteration Method (ART) solve two-dimensional field problems limited number of detection beams and the accuracy of the ART algorithm, which makes it difficult to meet practical application requirements. In this regard, this article proposed an ART-Kriging two-dimensional modeling algorithm for combustion field, which effectively solves the problem of poor accuracy of the TDLAS-ART technology in combustion field monitoring. After verifying the algorithm through experiments, the results show that the resolution accuracy of this algorithm in solving temperature fields is significantly improved compared to the ART algorithm, and the error with the measured temperature results of thermocouples is less than 8%. The results indicate the effectiveness of the algorithm.

Key words: 2D field reconstruction technology; TDLAS; ART-Kriging; temperature;

1 引言

近年来,随着工业化快速发展,各类重大事故率

也逐渐提高,直接影响了人生安全和财产安全,其中工业火灾和化学爆炸等燃爆性事故因为范围广、环境复杂和危险性高等特点为目前安全事故防范的重点^[1]。

多数矿井等火灾爆炸作业现场都将安装燃烧气体探测器作为安全管理的强制性设施。传统接触式燃烧气体检测探测器如热电偶等响应较慢,探测精度低,检测范围小,无法长期在高温、高压的恶劣环境工作,致使其在现阶段的安全事故防范措施中应用有

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 吉林省科技发展计划重点科技研发项目(No.20220203016SF)

作者简介: 戴童欣(1996-),女,设计师,主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: mona_dai@163.com

通讯作者: 王彪(1981-),男,博士,副研究员,主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: wb5996@163.com

<http://www.laserjournal.cn>

限。因此,作为一种安全性高的非接触气体二维场检测技术,TDLAS 的提出得到了广泛的关注^[2-3]。

TDLAS 气体检测技术基于 Lambert-Beer 定律,通过可调谐二极管输出的波长可调激光探测气体对不同波长激光的吸收,进一步对气体的浓度和温度等信息进行检测^[4]。TDLAS 气体二维场检测技术是 TDLAS 气体检测技术和计算机断层扫描技术(CT)的结合。其提前将检测区域划分为若干子区域,然后利用多条不同角度入射的光线对每个子区域进行测量,最后使用重构算法反演将每个子区域的测量值扩展到整个检测区域^[5-7],重构算法对整个测量过程至关重要,直接影响探测的精度。常见的重构算法如 ART,求解精度有限,只能对子区域中激光通过处的单点进行反演,而某些爆炸事故的防范中所需要监控的精度则远远超过 ART 算法的极限^[8-10]。

对此,通过对子区域中心点气体吸收率进行插值,提出一种 ART-Kriging 燃烧场二维建模算法。通过实验室模拟燃烧场的方式,对该算法进行了验证。结果显示该算法有效提高了传统 ART 重构算法的精度,其中在温度场的求解上算法结果和热电偶测量结果误差小于 8%,表明了算法的有效性。本算法的提出对 TDLAS 在二维气体检测技术中的应用具有一定的推广价值。

2 TDLAS 燃烧气体温度和浓度测量原理

依据 Lambert-Beer 定律,当一束光径直射入气体内,将会被气体分子选频吸收,吸收后的光会在该频率处衰减,光衰减的程度与气体浓度成正比。其中,光吸收程度如(1)所示:

$$A = \int A_v(v) dv = \int A =$$

$$\int -\ln(I_T/I_0) dv = P \cdot X \cdot S(T) L = \alpha_v L \quad (1)$$

其中 A 为整个光程上的吸光度, A_v 为局部吸光度,其与频率 v 有关, I_0 和 I_T 分别为入射光强和透射光强, P 、 X 和 L 分别气体总压、介质气体组分浓度和激光束在气体中的传输距离, S 为 T 温度下的吸收线强度。根据热平衡条件,吸收线强度 S 和温度 T 的关系可以具体表示为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0) T_0}{Q(T) T} \exp\left[-\frac{hcE}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{hc\nu_0}{kT_0}\right)\right]^{-1} \quad (2)$$

其中 $S(T_0)$ 为初始温度 T_0 下的谱线强度, E 为低态能级, h 为 Planck 常数, k 为 Boltzmann 常数, c 为光速, ν_0 为吸收谱线的中心频率, $Q(T)$ 为温度 T 时的配分函数值,可用多项式表达:

$$Q(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d \quad (3)$$

一般 TDLAS 气体检测法需要同时选择同一气体的两条吸收线,通过二者的比值来对探测结果进行分析,进一步测量区域温度 T 表示为

$$T = \frac{1}{\ln R + \frac{hc(E_2 - E_1)}{kT_0} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}} \times \frac{hc}{k} (E_2 - E_1) \quad (4)$$

得到温度参数后,介质气体组分浓度可求得为

$$X = \frac{A}{P \cdot S(T) \cdot L} \quad (5)$$

3 ART-Kriging 气体温度场重建算法

3.1 代数迭代算法 ART

ART 是一种针对气体浓度和温度空间分布的常见重构算法,其基本思路是通过求解方程的方法,每次对一束光学穿过的空间区域进行迭代修正,逐步将重构结果向真实值逼近。如图所示,将目标的探测区域划分为 $n \times n$ 个子区域,其中有 $2n$ 条激光光线相互垂直分布其中。

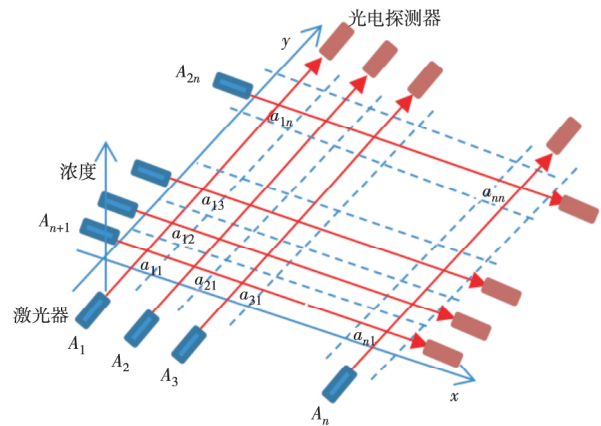


图1 目标探测区域离散网格图

针对浓度非均匀分布的气体,公式(1)可以演变

$$A = \int_a^b P \cdot S(T) \cdot X(l) dl = \int_a^b a_v(l) dl \quad (6)$$

其 $a_v(l)$ 和 $X(l)$ 分别为随传输距离变化的气体吸收系数和气体组分浓度。当探测的子区域被划分的足够小时,气体在该子区域内的浓度可近似为均匀分布,因此即可将整个探测区域离散为若干个具有相同浓度值的子区域,则公式(6)可表示为

$$A = \sum_{i=1}^N a_v(i) L(i) \quad (7)$$

其中 $a_v(i)$ 和 $X(l) L(i)$ 分布为第 i 个子区域对应的气体吸收系数和传播长度,进一步的将图1中的整个区域离散后可得:

$$\begin{cases} A_1 = a_{11}L_{11} + a_{12}L_{12} + \dots + a_{1n}L_{1n} \\ A_2 = a_{21}L_{21} + a_{22}L_{22} + \dots + a_{2n}L_{2n} \\ \vdots \\ A_n = a_{n1}L_{n1} + a_{n2}L_{n2} + \dots + a_{nn}L_{nn} \\ A_{n+1} = a_{11}L_{11} + a_{21}L_{21} + \dots + a_{n1}L_{n1} \\ \vdots \\ A_{2n} = a_{n1}L_{n1} + a_{n1}L_{n1} + \dots + a_{nn}L_{11} \end{cases} \quad (8)$$

根据以下的迭代公式,对吸收系数矩阵进行求解,即可得到子区域吸收系数。

$$\rho_1 = \lambda_1 \frac{a_{ij}^k L_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^k L_{ij}} \quad \rho_2 = \lambda_2 \frac{a_{ij}^k L_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}^k L_{ij}} \quad (9)$$

$$a_{ij}^{k+1} = a_{ij}^k + \rho_1(A_i - \sum_{i=1}^n a_{ij}^k L_{ij}) + \rho_2(A_{n+i} - \sum_{j=1}^n a_{ij}^k L_{ij}) \quad (10)$$

其中: k 为迭代次数, λ 为系数 0.2。

ART 算法虽然可以通过多次迭代得到每一个激光测试子区域的平均浓度,但在实际应用场景中,目标监控区域常常面积较大,且 ART 算法受制于有限数量的探测光源,无法实现分辨率更高的探测需求。因此,从有限的探测数据中获得更多的有用信息是 TDLAS-ART 二维场重建技术得以广泛应用的先决条件。

3.2 ART-Kriging 插值算法

3.2.1 Kriging 插值法

Kriging 插值法又称空间自协方差最佳插值法,以南非矿业工程师 D.G.Krige 命名,被广泛地应用于地质统计格等网化数据的处理^[11-12]。

Kriging 插值法建立的基础假设为所有数据之间都服从 n 维正态分布,其具体流程如图 2 所示。

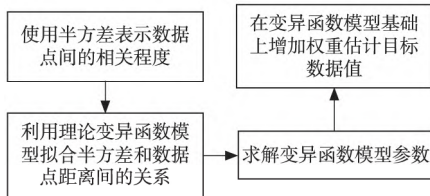


图 2 Kriging 插值构建过程

首先通过对已知样本的空间位置分布利用半方差衡量彼此间的相关程度,其表达式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x_i + h)) \quad (11)$$

$$h = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (12)$$

其中 h 为样本点间距离, n 为由 h 分开的样本点数量, z 为当前样本的属性值,在本文中为吸收系数。

之后,寻找合适的理论变异模型拟合半方差值和距离间的关系,常见的理论变异模型主要有高斯模型、线性模型、球状模型和指数模型等^[13-14],本文中

使用高斯模型,如下所示:

$$r(h) = c_0 + c(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) \quad (13)$$

其中 a 、 c_0 和 c 为模型参数,通过已知样本对其求解。

最后,引入权值从而提高插值精度。

$$\hat{a}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i h(s_i) \quad (14)$$

其中: $\hat{a}(s_0)$ 为预测位置 s_0 的气体吸收系数, λ_i 和 $h(s_i)$ 为参与插值数据中第 i 个的权重系数和数值,权重系数 λ_i 与预测位置和参与插值数据点间距离相关, N 为参与插值的数据总数。

3.2.2 ART-Kriging 气体温度场重建算法

本文将 Kriging 插值法和 ART 算法结合提出一种针对 TDLAS 气体浓度检测的 ART-Kriging 气体温度场重建算法,其详细流程如图 3 所示。

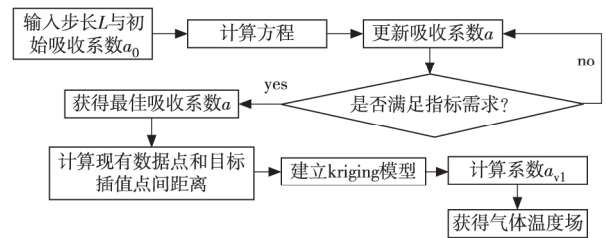


图 3 ART-Kriging 气体温度场重建算法流程

具体步骤如下:

(1) 记录 ART 算法中激光之间的传播长度 L 和初始气体吸收系数 a_0 ,并计算每条光线对应的吸收度 A_i ;

(2) 通过实测的吸收度与计算的吸收度间的误差对吸收系数进行更新,反复迭代直到误差满足要求;

(3) 计算已知吸收率和待插值吸收率间的空间距离并对待插值吸收率 a_{v1} 进行求解;

(4) 重复上述过程,计算另一个吸收谱线下的吸收率 a_{v2} ,进一步获得吸收度 A_{v1} 和 A_{v2} ;

(5) 将吸收度 A_{v1} 和 A_{v2} 带入公式(15)求解比值 R ;

(6) 将比值 R 代入公式(4)求出待测区域的温度场 T ,再由公式(2)得到谱线强度 $S_{v1}(T)$ 和 $S_{v2}(T)$,进一步得到浓度 X_{v1} 和 X_{v2} 。

$$R = \frac{A_{v1}}{A_{v2}} \quad (15)$$

$$X_{v1} = \frac{a_{v1} S_{v1}(T)}{P} \quad X_{v2} = \frac{a_{v2} S_{v2}(T)}{P} \quad (16)$$

4 燃烧温度场实验

4.1 试验方案

为进一步验证算法的有效性,在实验室环境下搭建如图所示的测试装置对燃烧场的温度进行监控。

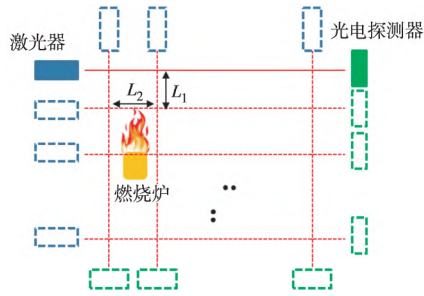


图4 实验装置

在燃烧炉的周边搭建激光器和光电探测器,每次扫描 H_2O 分子的两条吸收谱线 ($7\,153.9\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,154.4\text{ cm}^{-1}$),为减小实验误差,选择测试频率为 200 Hz 将 10 s 内的信号平均值作为测量值。激光器和探测器以 $L_1=L_2=2\text{ cm}$ 的采样间隔在 x 和 y 两个方向上进行移动采样(采样点为 10),其中激光光线距燃烧炉燃烧平面距离 1 cm 。

4.2 试验结果

两次实验后 ART 算法得到的温度场分布归一化如图 5 所示,ART-Kriging 算法得到温度场分布归一化如图 6 所示。

由此可见,ART-Kriging 算法有效提高了温度场分辨精度。采用热电偶沿着 y 轴对温度场进行检测,结果如图 7 所示,值得注意的是平面炉的中心和温度场的最大值间并不重合,二者存在一定差距且两次测试间差距相差不大,其原因可能是平面炉排气孔分布存在误差,导致平面炉的火焰分布不均。

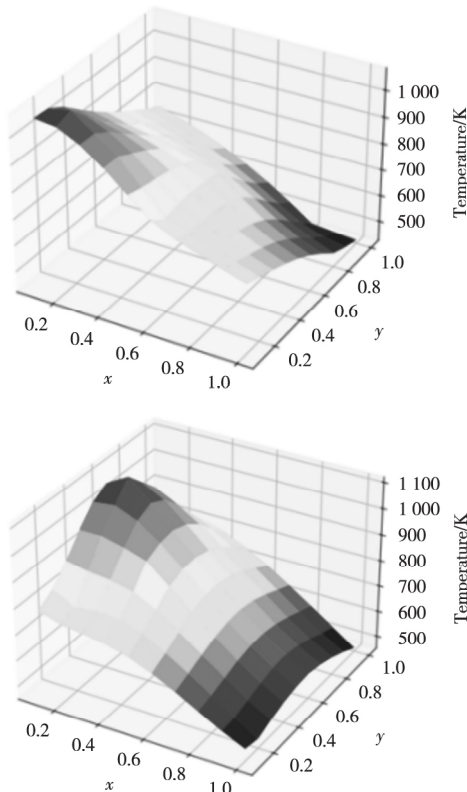


图5 基于 ART 的两次温度场重建结果

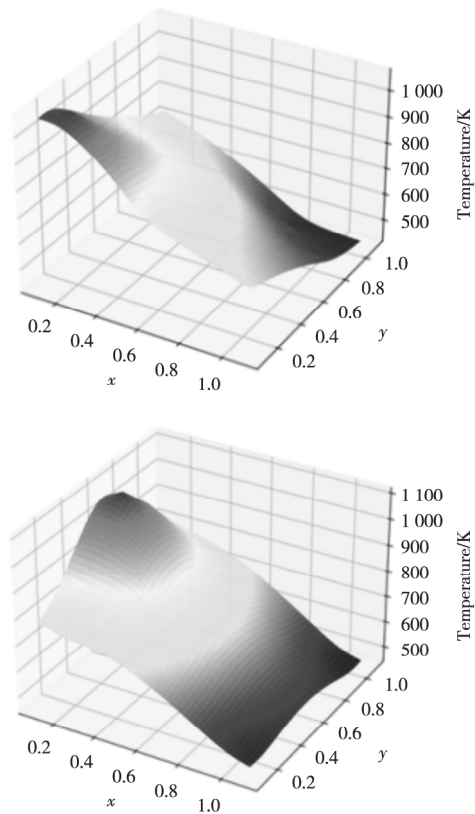


图6 基于 ART-Kriging 的两次温度场重建结果

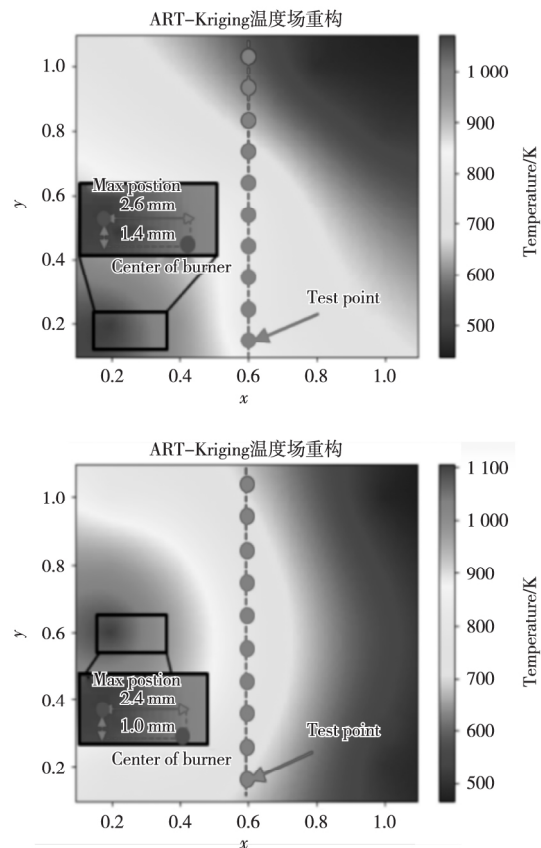


图7 基于 ART-Kriging 的两次温度场重建结果

热电偶实测结果如图 8 所示,由图可见两次热电偶的实测结果与 ART-Kriging 算法的求解结果误差

均小于 8%。

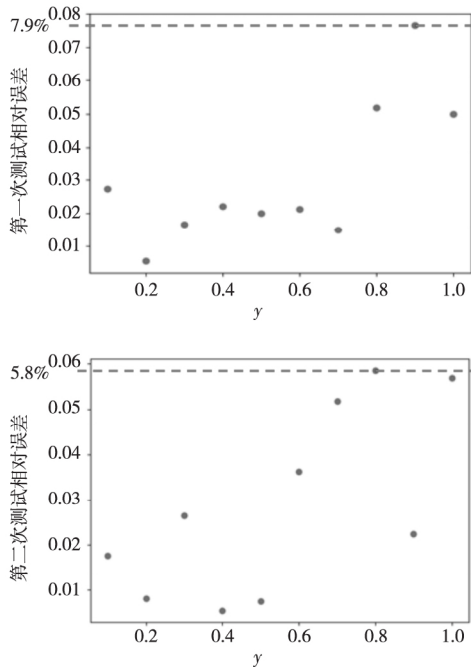


图 8 基于 ART-Kriging 的重建同热电偶测试结果对比

从图 8 中可以发现,ART-Kriging 算法的求解误差越靠近火焰边缘则越大,越接近火焰中心则越小,其主要是因为热电偶测量使用的单点扫描的方式不具有实时检测性,因此,在火焰边缘的测试结果更容易受变化的气流影响。

5 结论

对火焰的温度和燃烧产物进行监控是燃烧诊断的重要目标,现阶段 TDLAS 技术由于选择性好和精度高等特点已成为目前燃烧场监控的研究重心。本文在传统的 ART 算法的基础上,引入 Kriging 插值算法,提出一种 ART-Kriging 燃烧场信息建模算法,有效提高了 TDLAS 燃烧场监控精度和分辨能力。通过实验室的燃烧场模拟,对算法进行验证,结果表明,ART-Kriging 算法有效提高了二维场检测分辨率,算法温度场的计算结果和热电偶的测量误差小于 8%,验证了算法的有效性,本算法在 TDLAS 燃烧场检测技术研究方向具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 屈东胜,樊宏杰,刘连伟,等. 基于近红外光谱的超声速燃烧场气体参数测量研究[J]. 光学学报,2020,40(3): 0330001.
- [2] 黄燕,张国勇,刘训臣,等. 中红外激光测量扩散火焰温度场[J]. 工程热物理学报,2017,38(7): 14471453.
- [3] 张倚成,韩永康,周亚,等. 基于机械学习对火焰温度场和 CO₂ 浓度场的同步重建[J]. 光学学报,2020,40(23): 2312003.
- [4] Liu C, Xu L J, Cao Z. Measurement of nonuniform temperature and concentration distributions by combining line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy with regularization methods[J]. Applied Optics, 2013, 52(20): 4827-4842.
- [5] Wang F, Cen K, Li N, et al. Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode laser absorption spectroscopy. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 045301.
- [6] Zhang G Y, Wang G Q, Huang Y, et al. Reconstruction and simulation of temperature and CO₂ concentration in an axisymmetric flame based on TDLAS[J]. Optik, 2018, 170: 166-177.
- [7] Liu X C, Zhang G Y, Huang Y, et al. Two-dimensional temperature and carbon dioxide concentration profiles in atmospheric laminar diffusion flames measured by mid-infrared direct absorption spectroscopy at 4.2 μm [J]. Applied Physics B, 2018, 124(4): 1-10.
- [8] 殷可为,胥頔,张龙,等. TDLAS 技术用于燃烧场气体温度和浓度重建研究[J]. 光电工程,2016,43(12): 21-27.
- [9] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Calibration-free wavelength modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environment [J]. Applied Optics, 2009, 48(29): 5546-5560.
- [10] Lindstrom C D, Jackson K R, Williams S, et al. Shock-Train Structure Resolved with Absorption Spectroscopy Part I: System design and validation [J]. AIAA Journal, 2009, 47(10): 2368-2378.
- [11] Cadini F, Santos F, Zio E. An improved adaptive kriging-based importance technique for sampling multiple failure regions of low probability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 131: 109-117.
- [12] Echard B, Gayton N, Lemaire M. AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation [J]. Structural Safety, 2011, 33(2): 145-154.
- [13] Teixeira R, Nogal M, O'Connor A. Adaptive approaches in metamodel-based reliability analysis: A review [J]. Structural Safety, 2021, 89: 102019.
- [14] Fauriat W, Gayton N. AK-SYS: an adaptation of the AK-MCS method for system reliability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 123: 137-144.