

郭会芳, 王俊秀. 基于物理渲染(PBR)的法线贴图技术剖析与青铜器应用[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(6): 122-126.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24121501

基于物理渲染(PBR)的法线贴图技术剖析与青铜器应用

郭会芳, 王俊秀

(太原工业学院 计算机工程系, 太原 030008)

摘要: 青铜器作为中国古代的艺术瑰宝, 又是珍贵的世界文化遗产。青铜器表面纹理复杂, 导致通过雕刻方式建立模型时, 模型为超高模, 不利于在游戏及数字文物展馆中渲染生成。本文聚焦于物理渲染(PBR)理念的法线贴图技术, 结合适用于金属材质的 Cook-Torrance 模型, 将基于物理材质的光照计算与法线信息精准结合, 着重将该技术应用于青铜器的低模物体。本文通过与经典渲染算法进行对比, 验证了本文算法的可行性, 最终有效呈现青铜器的纹理、凹凸、光泽变化, 显著提升青铜模型的细节与真实感, 为青铜器文物数字化保护提供了一种可行的方法。

关键词: 物理渲染; Cook-Torrance 光照模型; 法线贴图; 青铜器

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)06-0122-05

Analysis and application of Physically-Based Rendering (PBR) normal mapping technology in bronze wares

GUO Huifang, WANG Junxiu

(Department of Computer Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract: Bronze wares are not only treasures of ancient Chinese art, but also precious world cultural heritage. The intricate surface textures of bronze wares result in ultra-high models when established through carving methods, which is unfavorable for rendering in games and digital museums. This paper focuses on the normal mapping technology based on the Physically-Based Rendering (PBR) concept, combined with the Cook-Torrance model suitable for metal materials. It precisely combines the physical material-based lighting calculations with the normal, and particularly applies this technology to low-poly bronze objects. The paper tests the algorithm's feasibility through some empirical values, and ultimately effectively presents the texture, convexity and concavity, as well as gloss, and gloss changes of bronze wares. This significantly enhances the detail and realism of bronze models, contributing a viable method for the digital protection of bronze cultural relics.

Key words: physical rendering; Cook-Torrance lighting model; normal mapping; bronze wares

0 引言

青铜器是中国古代的艺术瑰宝, 也是中国古代文明的重要标志。青铜器表面纹理复杂, 且凹凸明显、肌理感强。若采用现代 3D 建模技术构建其模型, 因其表面纹理复杂, 生成的模型点面数繁多, 致使在场景中渲染时面临极大挑战, 难以流畅地呈现出其精致细节与独特质感, 且对硬件资源与渲染算法要求较高。

基于青铜器的特殊纹理结构, 其纹理映射也变得较为复杂。张修恩等学者^[1]采用图片映射法实

现青铜器的表面纹理, 并针对纹理模糊的情况, 选择修订纹理后多次进行图片映射的方式改善。傅静静等学者^[2]采用 UV Mapping 模式进行纹理映射, 将三维模型中的每个顶点与二维纹理坐标对应, 在建模和渲染中将物体的 UV 坐标保存在顶点信息中, 纹理顶点与对象顶点对齐后, 直接粘贴在物体表面, 呈现出青铜器的凹凸纹理。Mikkelsen^[3]提出了依赖凹凸比例的凹凸贴图技术, 通过扰动法线实现物体表面纹理的凹凸效果。孟令增等学者^[4]在基于 PBR 的渲染算法中提出了物理渲染算法的三要素: 微平面、能量守恒和基于物理的 BRDF。这些方法

基金项目: 2023 年山西省高等学校科技创新项目(2023L354); 太原工业学院青年学科带头人支持计划(24020105)。

作者简介: 王俊秀(1987—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 人工智能算法, 计算机图形学。

通信作者: 郭会芳(1986—), 女, 助教, 主要研究方向: 计算机图形学。Email: 358709079@qq.com。

收稿日期: 2024-12-15

分别从纹理映射和光照模型上做出了改进,在青铜器修复上有一定效果,但在真实感上仍有所缺失。本文将纹理映射技术与光照模型进行融合,提出了基于物理渲染的法线贴图纹理映射方法,再搭配上适用于金属材质的 Cook-Torrance 光照模型,渲染于青铜器表面,从而得到了更具有凹凸真实感的青铜器纹理。

1 Cook-Torrance 光照模型

1.1 简单光照模型

简单光照模型只考虑物体对直接光照的反射作用,物体之间的反射作用统一用环境光(Ambient light)表示,对直接光照的反射光分为漫反射光(Diffuse light)和镜面反射光(Specular light)。

简单光照模型表示为:

$$I = I_e + I_d + I_s \quad (1)$$

$$I_e = k_a \cdot I_a, 0 \leq k_a \leq 1 \quad (2)$$

$$I_d = k_d \cdot I_p \cdot \max(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}, 0), 0 \leq k_d \leq 1 \quad (3)$$

其中, I 表示物体表面上任一点入射到视点的光强; I_e 表示环境光光强; I_d 表示漫反射光光强; I_s 表示镜面光光强; k_a 表示材质的环境反射率; I_a 表示来自周围环境的入射光强; k_d 表示材质的漫反射率; I_p 表示点光源所发出的入射光强; $\mathbf{N}$ 表示物体表面上任一点的单位法向量; $\mathbf{L}$ 表示任一点指向点光源的单位入射光向量。

1.2 镜面光模型

1967年, Torrance-Sparrow 根据辐射度和微镜面理论,构建了一种用来模拟真实光照效果的基于双向反射分布函数 BRDF 的镜面反射模型。1975年, Phong^[5]对具有复杂性质的镜面光提出了 Phong 模型。研究认为镜面反射光强与点光源发出的入射光强 I_p 、镜面反射率 k_s 、反射光方向 $\mathbf{R}$ 与视线方向 $\mathbf{V}$ 的点积成正比,如图 1 所示。1977年, Blinn^[6]对 Phong 模型做了实质性改进,认为可以用入射光向量 $\mathbf{L}$ 和视向量 $\mathbf{V}$ 的中分向量 $\mathbf{H}$ 与表面法向量 $\mathbf{N}$ 的点积代替 $\mathbf{R}$ 与 $\mathbf{V}$ 的点积,如图 2 所示。Blinn-Phong 模型是一种经验模型,研究认为物体反射光是光滑的,并未考虑物体材质的物理属性。1982年, Cook 等学者^[7]在几何光学的基础上,将表面粗糙度引入光照模型,表明镜面反射光的颜色与物体表面的材质属性有关,将 BRDF 模型应用于计算机图形学中,提出了可用于模拟金属表面材质的 Cook-Torrance 模型,如图 3 所示。

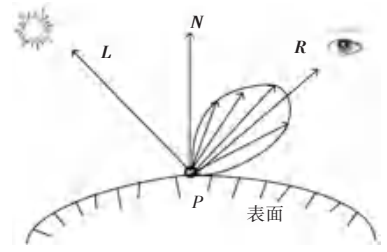


图1 Phong 模型

Fig. 1 Phong model

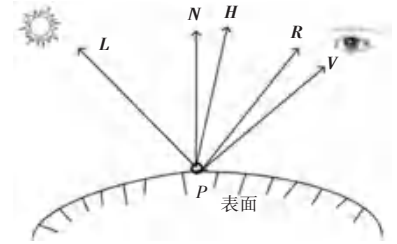


图2 Blinn-Phong 模型

Fig. 2 Blinn-Phong model

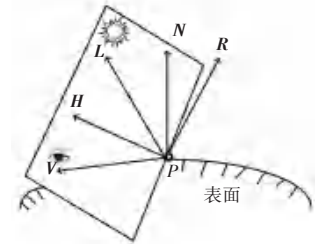


图3 Cook-Torrance 模型

Fig. 3 Cook-Torrance model

1.3 Cook-Torrance 镜面光模型

本文采用的光照模型中, I_s 镜面光光强表示为:

$$I_s = k_s I_p R_s \quad (4)$$

$$R_s = \frac{F}{\pi} \times \frac{D}{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})} \times \frac{G}{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})} \quad (5)$$

$$F = f_0 + (1 - f_0)(1 - \mathbf{V} \cdot \mathbf{H})^2 \quad (6)$$

$$D = \frac{1}{k^2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^4} e^{\frac{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^2 - 1}{k^2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^2}} \quad (7)$$

$$G = \min(1, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}) \quad (8)$$

其中, k_s 表示材质的镜面反射率; I_p 表示点光源所发出的光强; R_s 表示镜面反射项; f_0 表示入射角度接近 0° 时的 Fresnel 反射率。在 Cook-Torrance 模型中, R_s 由式(5) 计算得到。

式(5)中 F 项为 Fresnel 方程给出的计算项,描述了入射角大小对镜面光的影响; D 项为微镜面的分布函数,描述了物理光照模型下,只有面向视点的面元贡献大,因此选择一个分布函数 D 来描述微镜面表面

的发射光线; G 项为几何衰减因子,表示微镜面之间的相互遮挡效果。式(6)~(8)分别表示 F 、 D 、 G 的计算公式。图3中, N 表示微镜面上的宏观法向量, L 表示光源方向的入射光向量, V 表示观察向量, H 表示 L 与 V 的中分向量^[8-9]。

2 法线贴图关键技术剖析

法线贴图通常应用于游戏中,可运用定义于切线空间的法线图来生成模型的凹凸幻象^[10]。法线图可理解为与原平面平行的另一个不同的表面,可将法线图映射于低模物体,在不增加原表面多边形数量的前提下,提供了更为细致且真实的表面细节。

2.1 切线空间与物体空间

在切线空间中,无论物体如何旋转,法向量的方向都是不会改变的,切线空间可以用法线贴图来保证法向量垂直于物体表面。在物体空间中,如果物体旋转,法向量就会随着模型的旋转而改变方向,一张法线图无法表示所有方向的模型。切线空间中法线图的法向量总是指向正 z 方向。计算光照时,要把法向量从切线空间转化到物体空间,使得物体法向量总是与正 z 方向对齐。在切线空间中,分别用 TBN 向量来表示物体表面顶点的3个正交向量。其中, T 表示切向量, B 表示副切向量, N 表示顶点法向量。本文模型采用三角形重心坐标算法进行插值,模型中的面均由三角形小面组成。对应模型中的三角形面, T 指向参数 u 增加的方向, B 指向参数 v 增加的方向, N 与 T 向量和 B 向量正交,对应于立方体,每个四边形面由2个三角形面组成,图4表示立方体模型在切线空间中的 TBN 向量方向^[11]。

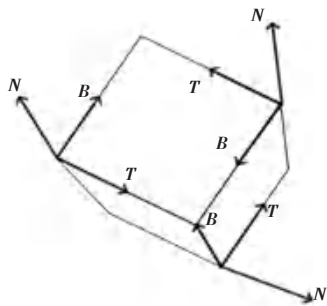


图4 切线空间立方体 TBN 向量

Fig. 4 TBN vector of cube for the tangent space

2.2 TBN 矩阵

研究中需要计算 TBN 矩阵,把法向量从切线空间转换到物体空间,这样一来切线空间的法向量就可以和物体空间的法向量对齐了。

切线空间的三角形纹理图如图5所示。纹理图中

的 u 和 v 对应切线空间的 T 和 B 。三角形的顶点纹理坐标为 $P_0(u_0, v_0)$, $P_1(u_1, v_1)$, $P_2(u_2, v_2)$, 三角形纹理的2个边向量为 E_0 和 E_1 ,可由如下公式计算得到^[8,11]。

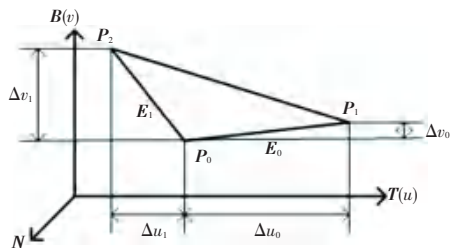


图5 切线空间的三角形纹理

Fig. 5 Triangle texture in tangent space

$$E_0 = P_1 - P_0 = \Delta u_0 T - \Delta v_0 B \quad (9)$$

$$E_1 = P_0 - P_2 = \Delta u_1 T - \Delta v_1 B$$

将式(9)写成矩阵:

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta u_0 & \Delta v_0 \\ \Delta u_1 & \Delta v_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ B \end{bmatrix} \quad (10)$$

进一步计算得到:

$$\begin{bmatrix} T \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta u_0 & \Delta v_0 \\ \Delta u_1 & \Delta v_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

综上所述, N 与 T 向量和 B 向量正交,可由 T 和 B 两向量的叉积计算得到,则可确定 TBN 矩阵。由此可将切空间的法向量 V' 转化为物体空间的法向量 V :

$$\begin{bmatrix} V_x & V_y & V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_x & V'_y & V'_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{E}_T & \hat{E}_B & \hat{E}_N \\ \hat{B}_x & \hat{B}_y & \hat{B}_z \\ \hat{N}_x & \hat{N}_y & \hat{N}_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

借助于切线空间的法线图,能够将切线空间中指向正 z 方向的法向量映射到任意朝向的物体表面上。图6表示采用本文提出的法线贴图技术结合Cook-Torrance光照模型映射于立方体表面的效果。图6中,(a)表示漫反射图,(b)表示相应的法线图,(c)表示渲染立方体效果图。



(a) 漫反射图

(b) 法线图



(c) 立方体效果图

图6 法线贴图映射立方体

Fig. 6 Normal map to cube

3 法线贴图在青铜器中的应用

在中国古代,青铜艺术是继彩陶艺术后的第二高峰,青铜器是殷商至西周时期时代的象征,不仅体现了国内造型艺术发展的新高度、新境界,也是中华审美意识在西周时期的集中反映^[12]。商周青铜器的审美特点主要体现在一种特殊纹饰上一兽面纹饰,兽面纹的显著特点是结构严谨,大量采用水平线与垂直线和水平与垂直的分割来呈现凹凸质感,显示其威严之美^[13]。

古代兽面纹多以雕刻方式呈现,这给现代建模与渲染工作带来了极大挑战。如在建模过程中直接构建兽面纹模型,会形成高模物体,导致渲染进程极为缓慢^[14]。鉴于此,本文采用法线贴图技术应用于青铜器模型制作,如此便能在一定程度上提升渲染的流畅度,有效解决因高模渲染而产生的效率问题,运用现代技术精准还原古代兽面青铜器的独特魅力与精细纹理,为国内数字文物保护事业提供有益的思路与方法^[15]。

本文运用适用于金属材质的 Cook-Torrance 光照模型,基于物理渲染 PBR 理论^[16-17],依靠法线贴图技术营造出凹凸效果,作用于低模青铜爵,来进行兽面纹青铜爵的制作^[18]。本文制作的青铜爵由 251 个顶点构建 25 个面,相对于兽面纹青铜器而言,本文的青铜爵属于低模物体。本文用于渲染青铜爵的漫反射图和法线图如图 7 所示。其中,图 7 (a)为兽面纹漫反射图,图 7(b)为相应的法线图。

文中制作青铜爵采用的材质与光照模型中的参数值为试验后的经验值,仅供参考,经验值见表 1。

根据表 1 给出的参数值,本文采用相同的光照模型,并将本文法线贴图方法与平面纹理^[2]和法线

扰动凹凸纹理映射算法^[3]进行比较。图 8 给出了不同算法的渲染效果图,表 2 和表 3 列出了青铜爵相同位置处的法线变换值及夹角。



(a) 青铜兽面漫反射图 (b) 法线图

图 7 青铜兽面纹理图

Fig. 7 Bronze animal face texture map

表 1 经验值参数列表

Table 1 List of experience parameters

分量	材质						光源	
	k_a	k_d	k_s	f_0	k		数量	位置
R	0.175	0.614	0.8	0.3	0.5		1	x 500
G	0.012	0.341	0.8	0.3	0.5		1	y 500
B	0.012	0.041	0.8	0.3	0.5		1	z 800



(a) 平面纹理效果图 (b) bump为5的效果图



(c) bump为50的效果图 (d) 本文算法效果图

图 8 纹理映射青铜爵效果图

Fig. 8 Texture mapping bronze Jue effect diagram

表 2 相同位置处法线变换值表

Table 2 Table of normal transformation values at the same position

序号	N_1 (平面纹理)			N_2 (bump = 5)			N_3 (bump = 50)			N_4 (本文算法)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	0.533 4	-0.637 4	0.555 6	0.562 8	-0.360 8	0.555 6	0.827 5	-0.343 3	0.555 6	0.742 5	-0.110 2	0.519 2
2	0.532 4	-0.637 9	0.555 4	0.493 2	-0.677 1	0.555 4	0.140 2	-1.030 1	0.555 4	0.665 4	-0.223 9	0.532 4
3	0.529 7	-0.638 8	0.556 2	0.657 1	-0.511 3	0.556 2	0.635 6	0.556 2	0.556 2	0.750 3	-0.147 4	0.498 0
4	0.527 0	-0.639 6	0.557 0	0.507 9	-0.659 2	0.557 0	0.330 9	-0.835 7	0.557 0	0.613 3	-0.360 5	0.529 8
5	0.524 2	-0.640 5	0.557 8	0.465 4	-0.699 3	0.557 8	-0.063 9	-1.228 8	0.557 8	0.695 7	-0.084 8	0.538 8
6	0.521 5	-0.641 4	0.558 6	0.541 1	-0.621 8	0.558 6	0.717 6	-0.445 3	0.558 6	0.727 2	-0.075 6	0.530 8
7	0.534 1	-0.637 5	0.554 3	0.945 9	-0.225 7	0.554 3	4.651 8	3.480 0	0.554 3	0.879 8	0.184 2	0.434 7
8	0.561 4	-0.638 4	0.555 1	0.786 3	-0.383 5	0.555 1	3.080 4	1.910 5	0.555 1	0.727 9	-0.233 0	0.449 3
9	0.528 7	-0.639 3	0.555 9	0.440 5	-0.727 5	0.555 9	-0.353 6	-1.521 6	0.555 9	0.508 0	-0.568 5	0.498 8
10	0.526 0	-0.640 1	0.556 7	0.575 0	-0.591 1	0.556 7	1.016 2	-0.149 9	0.556 7	0.667 6	-0.094 4	0.542 3

表 3 相应法向量夹角表
Table 3 Table of corresponding normal vector angles

序号	$N_1 \& N_2$ 夹角 $\theta_1 / (^\circ)$	$N_1 \& N_3$ 夹角 $\theta_2 / (^\circ)$	$N_1 \& N_4$ 夹角 $\theta_3 / (^\circ)$
1	2.38	23.17	34.19
2	3.15	27.93	25.80
3	10.33	64.42	32.52
4	1.58	15.15	16.58
5	4.71	37.85	35.35
6	1.58	15.83	36.53
7	31.25	84.35	53.51
8	20.29	78.57	27.58
9	7.03	48.60	1.93
10	3.98	36.25	34.30

由图 8 可知,从人体主观感受上分析得到,(a) 仅将漫反射图与爵模型进行纹理绑定后呈现凹凸效果不佳,(b)、(c)、(d)实现法线扰动后呈现出更为真实的凹凸效果,(b)采用扰动系数为 5 时与(d)相差甚远,(c)采用扰动系数为 50 时基本与(d)凹凸效果一致。表 2 给出了模型中相同位置处的法向量值,表 3 分析了相同位置处的法向量偏移角度。从表 3 中法向量的偏移角度客观验证了本文算法在青铜爵纹理凹凸效果上的优越性与实现青铜文物真实纹理上的有效性。

4 结束语

在当今数字化技术不断完善的背景下,计算机图形学领域在图像纹理方面的研究技术向多尺度方向发展^[19],本文着重探讨了法线贴图技术在青铜器低模物体上的创新应用。通过将这一前沿技术融入其中,充分彰显基于 PBR 理念的法线贴图技术所蕴含的巨大潜力与独特价值^[20]。在整个过程中,尤为突出的是其在不额外增加几何复杂度的情况下,能够极为逼真地呈现出青铜爵丰富多样的纹理细节,无论是细腻的纹路,还是微妙的凹凸变化,乃至独特的光泽质感,都能精准还原与展现。这一成果不仅为青铜器这类珍贵文物的数字化展示开辟了一条切实可行且高质量的渲染新路径,使得观众能够在虚拟环境中领略到青铜器的独特魅力与精妙细节,仿佛置身于真实的文物展览之中;同时,也为 PBR 理念下法线贴图技术在其他特定物体模型渲染领域的广泛应用提供了极具价值的实践参考范例以及坚实可靠的技术支撑基础,有助于进一步推动置换法线

纹理贴图^[21]相关技术在更多领域的拓展与深入研究,促进数字化技术与文化遗产保护等多领域的深度融合与协同发展。

参考文献

[1] 张修恩,张典华,孙昕萍. 三维数字重建在青铜器修复中的应用研究[J]. 图形学报, 2014,35(6):912-917.

[2] 傅静静,吕杰. 数字修复技术在青铜器上的应用[J]. 长治学院学报,2024,41(2):118-122.

[3] MIKKELSEN M S. Surface gradient-based bump mapping[J]. Journal of Computer Graphics Techniques,2020,9(3):66-90.

[4] 孟令增,王中训. 基于 PBR 的渲染算法研究[J]. 电声技术, 2021,45(11):58-60.

[5] PHONG B T. Illumination for Computer-generated Pictures[J]. Communications of the ACM, 1975,18: 311-317.

[6] BLINN J F. Models of light reflection for computer synthesized pictures[J]. Computer Graphics,1977,11:192-198.

[7] COOK R L,TORRANCE K E. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM Transactions on Graphics, 1982, 1(1): 7-24.

[8] 孔令德. 计算机图形学基础教程(Visual C++) [M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2024.

[9] 姜滢稳,江自昊. PBR 方法在虚拟现实技术中的研究与应用[J]. 黑河学院学报, 2022, 13(6):178-180.

[10] NAM G, LEE J H, WU H, et al. Simultaneous acquisition of microscale reflectance and normals [J]. ACM Transactions on Graphics,2016,35(6):185.

[11] SZIRMAY-KALOS L, UMENHOFFER T. Displacement mapping on the GPU-state of the art [J]. Computer Graphics Forum, 2006,17:1567-1592.

[12] 赵晶晶. 辽代文物古迹的数字化展示技术研究[J]. 今传媒, 2022,30(8):113-116.

[13] 黄墨樵,刘欢,侯琛琛. 器物类文物超高清三维数字化流程的规范化研究[J]. 中国标准化,2023(22):42-47.

[14] 山西省文物保护标准化技术委员会. 可移动文物三维激光扫描数字化采集规程: DB14/T2720-2023[S]. 太原:山西市场监督管理局, 2023.

[15] 甘肃省文物局. 馆藏器物类文物三维数据采集技术规范: DB62/T 4726-2023[S]. 兰州:甘肃省市场监督管理局,2023.

[16] 毛慧琴,苏清清,张志杰. PBR 方法在非遗贝雕工艺数字模型中的应用[J]. 技术应用, 2024(5):105-107.

[17] 陈小飞,盛传新. 基于真实感渲染的 PBR 材质流程实践研究[J]. 艺术教育,2021(4):131-134.

[18] 马振义. 基于粒子弹簧模型的面料纹理动态展示[D]. 上海: 东华大学,2023.

[19] 王赵宇,周国帆,舒挺. 面向多尺度折线图数据解析的两阶段方法[J]. 智能计算机与应用,2023,13(6):97-102.

[20] BARSUKOW W. All-speed numerical methods for the Euler equations via a sequential explicit time integration[J]. Journal of Scientific Computing, 2023,95(2):53.

[21] LU Biao, FANG Jinzhong, LI Yunjie, et al. Accuracy of semi-empirical models for wind-driven rain using different data processing methods for wind velocity and direction[J]. Building and Environment, 2023,237: 110300.