

中文引用格式:白杨阳,刘长春,李存英,等.基于欧拉法的消防水炮射流轨迹模型[J].中国安全科学学报,2024,34(3):200-205.
英文引用格式:BAI Yangyang, LIU Changchun, LI Cunying, et al. Jet trajectory model of fire water cannon based on Euler method[J].
China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 200-205.

基于欧拉法的消防水炮射流轨迹模型*

白杨阳¹, 刘长春¹副教授, 李存英¹, 艾国栋², 刘思齐¹, 宋方智¹

(1 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2 三一汽车制造有限公司, 湖南 长沙 410100)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.1161

资助项目: 2021年度应急管理部消防救援局科技计划重点研发(2021XFZD01); 陕西省2022年自然科学基金基础研究计划(2022JM-281); 榆林市2020年科技计划(CXY-2020-032)。

【摘要】 为提高消防水炮射流轨迹预测精度, 克服基于传统抛体理论描述“初速度不变, 射流流量增加致使射程增加现象”所存在的困难, 首先采用欧拉法, 沿空气中水射流轨迹建立一维的质量守恒方程、轴向动量守恒方程和径向动量守恒方程; 然后假设水柱和空气柱的轴向速度分布形状为“礼帽”形, 并据此推导分析建立的守恒方程, 进而建立消防水炮水射流轨迹计算模型; 最后基于3个守恒方程, 给出射流轨迹模型的数值计算流程, 并与收集的试验数据进行比较验证, 结果表明: 所建模型的误差不超过10%。

【关键词】 欧拉法; 射流轨迹; 消防水炮; 射程; 卷吸空气

Jet trajectory model of fire water cannon based on Euler method

BAI Yangyang¹, LIU Changchun¹, LI Cunying¹, AI Guodong²,

LIU Siqi¹, SONG Fangzhi¹

(1 College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and

Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 Sany Automobile Manufacturing

Co., Ltd., Changsha Hunan 410100, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of fire water cannon jet trajectory prediction and overcome the difficulty of traditional parabolic theory to describe the phenomenon that "when the initial velocity is constant, the range increases with the increase of jet flow", first of all, the Euler method was used to establish a one-dimensional mass conservation equation along the trajectory of the water jet in the air, axial momentum conservation equations and the radial momentum conservation equations. Then, assuming that the axial velocity distribution of the water column and air column was in the shape of "bowler hat", the established conservation equations were derived and analyzed, and the fire water cannon water jet trajectory calculation model was established. Finally, based on three conservation equations, the numerical computation process of the jet trajectory model was given and verified with the collected experimental data. The results show that the error of this model is less than 10%.

Keywords: Euler method; jet trajectory; fire water cannon; range; entrained air

0 引言

由于大型商场、展览馆和体育馆等大空间人员密集场所^[1]发生火灾时情况复杂、火源位置难以确定,因此,精准预测消防水炮(简称消防炮)射流轨迹显得尤为重要。

目前,对于消防炮射流轨迹的研究主要有基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件、计算机图像技术和数学计算模型等3种方式。MIYASHITA等^[2]采用移动粒子半隐式法,模拟大流量消防炮的射流运动过程,发现射流运动轨迹与射流流量和工作压力有密切关系。PONZIANI等^[3]用火灾动力模拟软件构建了水炮射流轨迹模型,发现其射流形状与试验结果基本吻合,并表明合适的网格尺寸更有利于准确描述射流运动轨迹。HATTON等^[4]考虑风力对海上消防炮射流运动轨迹的影响,进行多次三维模拟,并建立了运动轨迹模型。虽然仿真模型对水射流的形态轨迹有较为准确的描述,但这种方法对计算机资源要求高,耗费周期长。基于计算机图像技术的水射流轨迹研究是指以摄像头作为传感器,将摄像头采集的水射流图像、视频信息进行计算机处理,进而预测水射流轨迹^[5]。这种方法仅适用于已经存在的水射流装置,不适用于装置设计初始阶段使用。XU Qiang等^[6]基于局部最大平均速度建立了指数形式的射流中心线轨迹方程,预测结果的误差在30%以内。胡国良等^[7]对炮口初速度较低的水射流,将空气阻力与空气阻力系数和速度乘积看成正比关系,并通过积分运算得出射流轨迹曲线方程。史兴堂等^[8]探讨了消防炮的射程及其与仰角、压力、流量等影响因素之间的关系,建立了射程计算公式。

以上基于数学计算的传统水射流轨迹研究,克服了基于CFD和基于计算机图像技术的水射流轨迹研究所存在的不足,但是,这种基于抛体理论的数学计算方法,在描述射流初速度不变的前提下,解释流量增加致使射程增加现象时存在困难,且预测精度难以满足要求。鉴于此,笔者将采用欧拉法,沿空气中水射流轨迹建立一维的质量守恒方程、轴向动量守恒方程和径向动量守恒方程,考虑水射流卷吸空气的作用,同时引入“礼帽”型速度分布假设,继而获得水射流的运动轨迹模型。

1 射流轨迹数学模型

1.1 空气中水射流运动轨迹控制方程

假设在无风条件下,水流从直径为 D 的喷嘴喷射到空气中,初始仰角为 θ_0 ,在整个流场中,采用欧拉法,沿射流运动轨迹建立质量守恒、动量守恒方程^[9]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho ur)}{\partial s} + \frac{\partial(\rho vr)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

射流轴向动量守恒方程:

$$\rho ur \frac{\partial u}{\partial s} + \rho vr \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho \vartheta r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + r(\rho_{\infty} - \rho)g \sin \theta \quad (2)$$

射流径向动量守恒方程:

$$\frac{d\theta}{ds} \int_0^{\infty} \rho u^2 r dr = \int_0^{\infty} (\rho_{\infty} - \rho) r dr g \cos \theta \quad (3)$$

式中: s 为射流轨迹中心线坐标, m ; r 为射流轨迹中心线垂直方向坐标(射流径向方向坐标), m ; u 为射流轴向速度, m/s ; v 为射流径向速度, m/s ; ρ 为水密度, kg/m^3 ; ϑ 为运动黏度, m^2/s ; ρ_{∞} 为空气密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ 为射流轨迹方向与水平方向的夹角, $(^\circ)$ 。

式(1)乘以 u ,与式(2)相加后,积分得:

$$\frac{\partial}{\partial s} \int_0^{\infty} \rho u^2 r dr + \lim_{r \rightarrow \infty} (\rho vr u) = \int_0^{\infty} r(\rho_{\infty} - \rho)g \sin \theta dr \quad (4)$$

水流射入空气中,在 r 趋近于无穷远处 u 为0,则:

$$\frac{\partial}{\partial s} \int_0^{\infty} \rho u^2 r dr = \int_0^{\infty} r(\rho_{\infty} - \rho)g \sin \theta dr \quad (5)$$

假设在流场横截面上射流轴向速度分布呈“礼帽”型^[10],即水柱和空气柱的速度分布均为均匀分布,如图1所示。 b_1 为水柱半径, m ; b_2 为水柱加卷吸空气柱的半径, m ; v_e 为卷吸入空气的速度, m/s 。当 $r \leq b_1$ 时, $u = u_1$; 当 $b_1 \leq r \leq b_2$ 时, $u = u_2$ 。

对式(5)进行分段积分可得:

$$\frac{\partial}{\partial s} \int_0^{b_1} \rho u_1^2 r dr + \frac{\partial}{\partial s} \int_{b_1}^{b_2} \rho u_2^2 r dr = \int_0^{b_1} r(\rho_{\infty} - \rho)g \sin \theta dr \quad (6)$$

将式(6)沿 s 方向进行积分,并将右侧积分项采用分段离散求解,则:

$$b_1^2 \rho u_1^2 + (b_2^2 - b_1^2) \rho_\infty u_2^2 = R^2 \rho U^2 + \sum_{i=1}^n b_{1i}^2 (\rho_\infty - \rho) g \sin \theta_i ds \quad (7)$$

式中: R 为喷嘴出口半径, m ; U 为喷嘴出口流速, m/s ; i 为射流轨迹线离散化为 n 段射流段的第 i 段射流段, b_{1i} 表示第 i 段射流段的水柱半径 b_1, m ; θ_i 为第 i 段射流段与水平方向的夹角, $(^\circ)$ 。

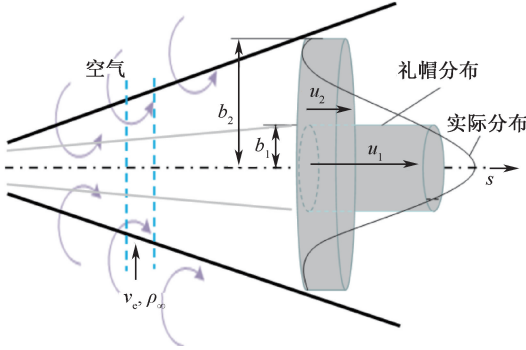


图1 “礼帽”形分布

Fig.1 Schematic diagram of bowler hat distribution

卷吸空气量与 u_2 密切相关, 分析可知: u_2 越大卷吸空气量也越大, 引入卷吸系数 a_0 , 得到简化计算空气卷吸量。

$$v_e = a_0 u_2 \quad (8)$$

式中 a_0 为水射流卷吸系数。

依礼帽速度分布假设, 加之在整个流场中液相质量守恒, 对式(1)进行分段积分, 则有:

$$\frac{d}{ds} [(b_2^2 - b_1^2) \rho_\infty u_{2i}] = 2 \rho_\infty v_e b_2 \quad (9)$$

式中 u_{2i} 为第 i 段射流的空气柱速度, m/s 。

将式(8)代入式(9), 积分后可得:

$$(b_2^2 - b_1^2) u_2 = \sum_{i=1}^n 2 a_0 b_{2i} u_{2i} ds \quad (10)$$

根据液相质量守恒:

$$b_{1i}^2 u_{1i} = r_0^2 u_0 \quad (11)$$

式中 u_{1i} 为第 i 段射流的水柱速度, m/s 。

为简化模型, 假设 u_1 和 u_2 存在线性关系:

$$u_{2i} = \beta u_{1i} \quad (12)$$

式中 β 为空气柱与水柱的气液速度比。

对式(3)进行分段积分, 则有:

$$\frac{d\theta}{ds} \left[\frac{1}{2} b_1^2 \rho u_1^2 + \frac{1}{2} (b_2^2 - b_1^2) \rho_\infty u_2^2 \right] = \frac{1}{2} b_1^2 (\rho_\infty - \rho) g \cos \theta \quad (13)$$

由于径向动量变化的主要原因是受重力的影响, 因此可得:

$$d\theta = \frac{b_1^2 (\rho_\infty - \rho) g \cos \theta ds}{b_1^2 \rho u_1^2} \quad (14)$$

由牛顿运动定律, 射流运动的轨迹可表示为:

$$\begin{cases} \theta_i = \theta_{i-1} + d\theta_i \\ x_i = x_{i-1} + ds \cos \theta_i \\ y_i = y_{i-1} + ds \sin \theta_i \end{cases} \quad (15)$$

式中: θ_{i-1} 为第 $i-1$ 段射流段与水平方向的夹角, $(^\circ)$; x_i 为第 i 段射流段的水平距离, m ; x_{i-1} 为第 $i-1$ 段射流段的水平距离, m ; y_i 为第 i 段射流段的垂直距离, m ; y_{i-1} 为第 $i-1$ 段射流段的垂直距离, m 。需求解的 8 个变量分别为 $u_1, u_2, b_1, b_2, d\theta, \theta, x$ 和 y ; 联立式(7)、式(10)一式(15), 输入边界条件, 求解上述方程即可获得空气中水射流的运动轨迹。

1.2 数值计算流程

射流轨迹计算流程如图 2 所示。首先输入流体和环境的物性参数, 确定流动参数空气柱与水柱的速度比 β 以及卷吸系数 a_0 , 经过不断的与多组试验数据进行试算对比, 最终确定这 2 个待定系数分别取 0.1 和 0.15 较为合适。然后再输入离地高度 y_0 、喷嘴与地面的夹角 θ_0 和迭代步长 ds ; 输入喷嘴的出口直径 D , 根据 D 和水射流质量流量 m_0 求得出口流速 U 。

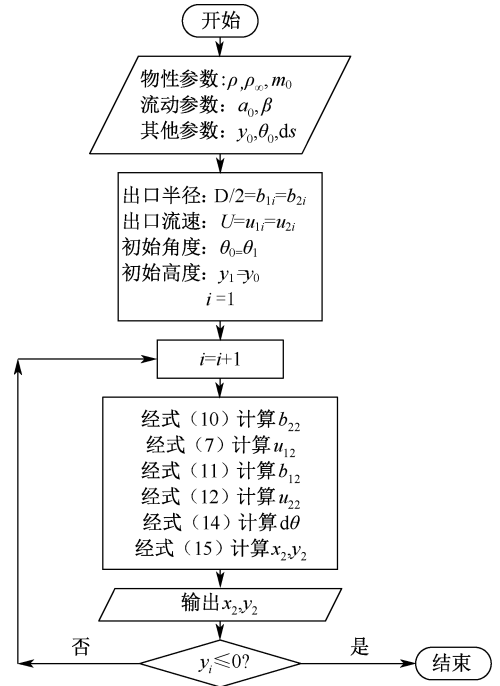


图2 射流轨迹计算流程

Fig.2 Flow of jet trajectory calculation program

确定边界条件即: $i = 1$ 时, $u_1 = U, b_1 = D/2, b_2 = D/2, u_2 = 0, \theta = \theta_0, x = 0, y = y_0$ 。然后将 b_{1i-1}, u_{2i-1} 等

上一步长数据代入式 (10) 计算得 b_{2i} ; 将得到的 b_{2i} 代入式 (7) 计算得到 u_{1i} ; 再将得到的 u_{1i} 分别代入式 (11)、式 (12) 得到 b_{1i} 、 u_{2i} ; 接着将 b_{1i} 、 u_{1i} 代入式 (14) 求得 $d\theta_i$; 最后将 $d\theta_i$ 代入式 (15), 得到 x_i 和 y_i 。最后, 判断射高 y_i 是否小于等于 0, 是则停止运算, 否则继续求解下一段 x_i, y_i , 重复上述步骤, 直至射高 y_i 小于等于 0。

2 模型验证及应用分析

2.1 模型对比分析

表 1 为多个文献^[8,11-13] 计算模型所需输入的各水枪、水炮的具体参数; 各类型水炮、水枪的计算射程、射高与实际的对比见表 2。

通过分析表 2 的结果可知: 与美国某消防公司公司加装 YST-4NN 型炮头和加装 MST-4NJ 型炮头的 2 种水炮相比, 计算射程得到的结果与实际之间误差较小, 均在 10% 以下; 计算射高得到的结果除 30° 时误差大于 10% 以外, 其余均不超过 10%。与美国 Elkhart Brass 型水炮、Akron Brass 型水炮相比, 其射程误差均不超过 10%。与美国空军实验室所用消防枪相比, 误差小于 1%。与国内“新海龙”轮长江口艏喷试验数据相对比, 计算射程、射高误差均

不超过 10%。与文献[8]中 PS 系列水炮射程试验相比, 计算射程与大部分 PS 系列水炮误差都在 5% 以下, 只与 PS180 水炮射程误差在 5% 以上, 为 5.22%。

表 1 各类型水枪、水炮具体参数

Tab. 1 Specific parameters of various types of water guns and water cannons

水枪(炮)类型	出口流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	离地高度/m	出口等效直径/mm	文献来源
加装 YST-4NN 型炮头	94.63	0.61	57.15	[11]
加装 MST-4NJ 型炮头	75.08	0	50.8	
Elkhart Brass(埃 尔克哈特黄铜)型	18.95	0.75	14.36	[12]
Akron Brass (阿密龙黄铜)型	18.95	0.75	14.71	
MLQD 型水枪	1.895	0.75	5.68	
新海龙艏喷	6 263.12	15.7	450	[13]
PS(水炮)20 型	27.50	0.75	25.33	[8]
PS30 型	41.20	0.75	31.25	
PS100 型	116.20	0.75	52.48	
PS180 型	191.50	0.75	67.36	
PS200 型	212	0.75	70.89	

表 2 计算射程、射高与实际对比

Tab. 2 Comparison between calculated range and shot height and actual situation

消防枪(炮)类型	仰角/(°)	计算射程/m	实际射程/m	误差/%	计算射高/m	实际射高/m	误差/%
加装 YST-4NN 型炮头	30	72.29	79.85	9.47	14.47	15.73	8.10
	45	74.85	72.54	3.18	26.47	26.60	0.49
	60	64.88	62.50	3.81	38.80	39.44	1.62
	75	42.24	40.40	4.55	49.66	51.52	3.61
加装 MST-4NJ 型炮头	30	68.10	72.80	6.46	13.48	15.51	13.09
	45	70.34	68.20	3.14	24.98	27.01	7.52
	60	60.98	56.20	8.51	36.81	37.42	1.63
	75	40.00	38.30	4.44	47.37	45.88	3.25
Elkhart Brass 型	20	68.19	62.48	9.14	—	—	—
Akron Brass 型	20	67.13	61.26	9.58	—	—	—
MLQD 型水枪	20	27.46	27.28	0.66	—	—	—
新海龙艏喷	45	164.04	155.2	5.70	54.78	50.5	8.48
PS20 型	30	62.93	63.00	0.11	—	—	—
PS30 型	30	71.40	72.00	0.83	—	—	—
PS100 型	30	97.62	97.20	0.43	—	—	—
PS180 型	30	112.59	107.0	5.22	—	—	—
PS200 型	30	115.77	113.0	2.45	—	—	—

2.2 大流量、高压消防炮仰角对射程的影响

提高消防炮射程的方式主要有提高出口压力和提高出口流量 2 种。2 种工况的计算参数见表 3。

根据基于欧拉法的射流轨迹计算模型, 绘制射流轨迹对比图(图 3)。从中可以看出, 在小的射流仰角(10°)的情况下, 通过提高出口压力从而获得较大

表3 普通消防炮和高压消防炮计算参数
Tab.3 Calculation parameters of ordinary fire cannon and high-pressure fire cannon

消防炮名称	出口压力/ MPa	质量流量/ (L · s ⁻¹)	流速 系数
普通	0.7	30	0.95
高压喷雾	4.0	6	0.9

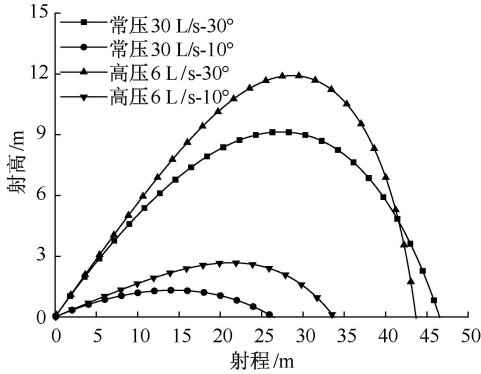


图3 大流量、高压射流轨迹对比

Fig.3 Comparison of large flow and high pressure jet trajectories

初速度提高射程的这种方法优于增大出口流量从而提高射程的方法;在大的射流仰角(30°)的情况下,通过增大出口流量从而提高射程的这种方法比提高出口压力从而增大射程的方法更具优势。从建立的基于欧拉法的射流轨迹预测模型角度分析,在小的射流仰角下,大流量消防炮射程更远的原因主要是单位质量射流水卷吸空气的量减少了。

3 结论

1) 基于欧拉法建立的模型与多组试验测量数据对比结果表明:该模型模拟实际纯水射流轨迹的误差不超过10%;推荐适用的水射流卷吸系数和气液速度比分别为0.15和0.10。

2) 最远射程相近的普通消防炮(大流量)和高压消防炮(小流量)的射流轨迹特点对比结果表明:在射流仰角为30°、初速度不变的前提下,射流流量增大致使射程增加的原因是单位质量射流水卷吸空气量的减少。

参考文献

[1] XIN Yibin, THUMULURU S, JIANG Fenghui, et al. An experimental study of automatic water cannon systems for fire protection of large open spaces[J]. Fire Technology, 2014, 50(2): 233-248.

[2] MIYASHITA T, SUGAWA O, IMAMURA T, et al. Modeling and analysis of water discharge trajectory with large capacity monitor[J]. Fire Safety Journal, 2014, 63: 1-8.

[3] PONZIANI F A, TINABURRI A. Water jet streams modeling for firefighting activities with the aid of CDF[J]. WIT Transactions on the Built Environment, 2015, 151: 323-334.

[4] HATTON A P, LEECH C M, OSBORNE M J. Computer simulation of the trajectories of large water jets[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1985, 6(2): 137-141.

[5] 陈静. 基于图像处理的消防水炮自动定位研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
CHEN Jing. Research on automatic localization of fire-fighting water cannon based on image processing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[6] XU Qiang, GUO Liejin, CHANG Liang, et al. Velocity field characteristics of the turbulent jet induced by direct contact condensation of steam jet in crossflow of water in a vertical pipe[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 103: 305-318.

[7] 胡国良, 龙铭, 李忠, 等. 室内大空间自动寻的喷水灭火系统水射流轨迹分析[J]. 制造业自动化, 2012, 34(15): 57-60.
HU Guoliang, LONG Ming, LI Zhong, et al. Analysis of water jet trajectory of auto-targeting fire sprinkler system in interior large space[J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(15): 57-60.

[8] 史兴堂. 消防炮射程及影响因素研究[D]. 上海:上海交通大学, 2001.
SHI Xingtang. Research on the range and influencing factors of firefighting guns [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001.

[9] PETERS N, GOTTGENS J. Scaling of buoyant turbulent jet diffusion flames [J]. Combustion & Flame, 1991, 85(1/2): 206-214.

[10] 詹姆士 G. 昆棣瑞[美]. 火灾学基础[M]. 杜建科, 王平, 高亚萍, 译. 北京: 化学工业出版社, 2010:224-225.
 QUINTIERE J G. Fundamentals of fire science [M]. DU Jianke, WANG Ping, GAO Yaping, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 224-225.

[11] 王储, 袁晓明, 杨志刚, 等. 消防水炮射流轨迹理论模型研究[J]. 燕山大学学报, 2020, 44(5):445-448.
 WANG Chu, YUAN Xiaoming, YANG Zhigang, et al. Research on the theoretical model of jet trajectory of fire water cannon[J]. Journal of Yanshan University, 2020, 44(5): 445-448.

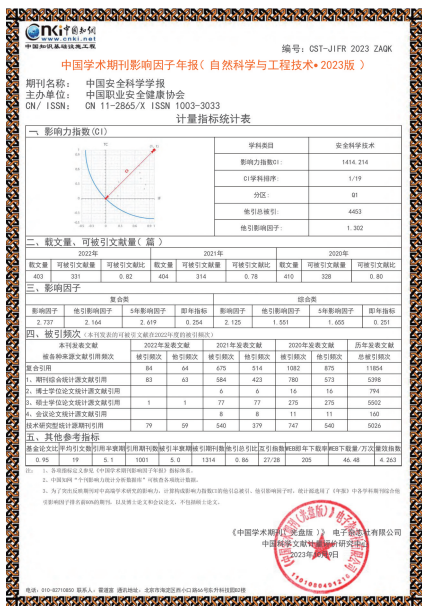
[12] MENCHINI C P, DIERDORF D, KALBERER J L, et al. The development and design of a prototype ultra high pressure P-19 firefighting vehicle[R]. Air Force Research Laboratory, 2007: 32-39.

[13] 王费新, 江帅, 张晴波, 等. 基于射流理论的空气中水射流轨迹及扩展范围计算方法[J]. 水运工程, 2018(7): 31-34.
 WANG Feixin, JIANG Shuai, ZHANG Qingbo, et al. Calculating method for trajectory and extension of liquid jet in air based on jet-flow theory [J]. Water Transport Engineering, 2018(7): 31-34.



作者简介: 白杨阳 (1998—),男,陕西延安人,硕士,主要研究方向为清洁灭火理论与技术。E-mail:1552727324@qq.com。

《中国学术期刊影响因子年报(2023 版)》发布



由《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社出版、中国科学文献计量评价研究中心编制的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2023版)》(简称《年报2023版》)发布。

《年报(2023版)》计量指标统计显示:

《中国安全科学学报》影响力指数 CI 为 1 414. 214, CI 学科排序为 1/19,分区为 Q1。

其他指标如下:

他引总被引为 4 453, 他引影响因子为 1.302。2022 年载文量为 403, 可被引文献量为 331, 可被引文献比为 0.82。复合总被引频次为 11 854, 复合影响因子为 2.737, 复合他引影响因子为 2.164, 5 年影响因子为 2.619, 即年指标为 0.254。