

消防管道弯管接头过流反作用力特性研究

刘子平¹, 胡靖^{2*}, 许江涛², 郭雷²

¹怀化市消防救援支队, 湖南 怀化

²怀化学院物电与智能制造学院, 湖南 怀化

收稿日期: 2023年1月21日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月24日

摘要

消防车上的弯管接头结构复杂导致射流特性难以被准确掌握。本文首先采用理论计算对仿真模型进行验证, 随后采用仿真手段研究了不同弯管转角、不同进口流量、不同进出口面积比与弯管接头过流时在两个方向上的喷射反力的关系, 并得到了最后的相关拟合公式。结果表明: 在两个方向上的喷射反力的理论计算值与仿真值一致性较好, 验证了仿真模型的正确性, 此外还得到了弯管转角与两个方向的喷射反力呈现相反的线性关系, 而进口流量与两个方向上的喷射反力均呈现正线性相关的关系, 进出口面积比与两个方向上的喷射反力的关系较复杂, 呈现出多项式的负相关的关系。这为后续类似弯管接头的设计提供了理论支撑。

关键词

消防车, 管道, 喷射反力, 数值模拟

Study on Reaction Force Characteristics of Bent Joints of Fire Pipelines

Ziping Liu¹, Jing Hu^{2*}, Jiangtao Xu², Lei Guo²

¹Detachment of Huaihua Fire and Rescue, Huaihua Hunan

²School of Physics, Electronics and Intelligent Manufacturing, Huaihua University, Huaihua Hunan

Received: Jan. 21st, 2023; accepted: Feb. 17th, 2023; published: Feb. 24th, 2023

Abstract

The complex structure of elbow joints on fire trucks makes it difficult to accurately grasp the characteristics of jet flow. In this paper, theoretical calculation is used to verify the simulation model.

*通讯作者。

Simulation methods are conducted to study the relationship between elbow angles, inlet flow, inlet area ratio and the spray reaction in two directions, and the final correlation fitting formula is obtained. The results of this paper show that the theoretical calculated values of the jet reaction in both directions are in good agreement with the simulated values, which verifies the correctness of the simulation model. In addition, it is also obtained that the bend angle of the pipe has an opposite linear relationship with the jet reaction in both directions, while the inlet flow rate has a positive linear relationship with the jet reaction in both directions. The relationship between the area ratio of outlet and inlet and the jet reaction in both directions is complex, showing a polynomial negative correlation. This provides theoretical support for the subsequent design of similar elbow joints.

Keywords

Fire Cannon, Pipe Line, Jet Reaction, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国社会经济的高速发展，城市的高层建筑物、石油以及化工企业的数量得到大幅度的增加，可燃物品的种类非常多，这不可避免地存在着非常大的安全隐患问题。针对目前我国城市在新形势下的灭火救援任务所呈现出的特点，近些年提出了城市主战消防车的这一新型概念，所谓的城市主战消防车是指“执行救援灭火任务必须第一时间出动的具有多功能、高比功率、多乘员、高性能、短轴距、智能化等几大特征的消防车”，以满足日益复杂且多元化的社会需求[1] [2] [3]。城市主战消防车由于在大流量以及高压力的作业环境下工作必然会导致其弯管接头处产生非常大的喷射反力，这会影响消防车在作业时的安全与稳定性，特别是当高压水流经过炮体的内腔时，因流动环境的变化，使得流体在受到弯曲的内壁面作用时其流动状态发生被迫性改变，对应的固体壁面处则会受到流体对其的持续反作用[4]，这种情况的存在极易使得管道内部因强震荡的原因导致焊缝处发生破裂。通过找出不同影响因素与过流时的喷射反力的关系，这对工程师在后续弯管设计时避免了“拍脑袋”现象，因此，这项研究具有一定的工程意义。

近些年，针对喷射反力的研究也非常多。贾传娣等[5]在车载消防炮喷射反力的研究过程中提出，同一工况下，喷射反力仿真及实验数据相对误差在6%以内。车载消防炮的喷射反力与流量正相关，得出的拟合公式可以作为消防炮喷射反力与流量关系的简单计算公式。

胡国良等[6]采用 Fluent 流场仿真软件对一种新型固定式消防水炮炮身内部流体流态进行了仿真分析，得到较好的炮身形状及结构；并对消防水炮炮头喷嘴射流性能进行了仿真分析。结果表明：所设计的新型固定式消防水炮能满足实际消防作战使用要求。

何猛等[7]对消防炮作业时的受力进行理论分析，通过 Fluent 仿真研究入口压力分别为 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 MPa 时后坐力的大小，并将该值导入动力学模型，分析消防炮在不同工况下作业时对整车静态侧翻角的影响。

胡国良等[8]针对目前水力自摆式消防水炮后坐力大、容易倾翻的不足，利用 Fluent 流场软件对水力自摆式消防水炮内部流场进行了仿真，仿真结果表明现有水力自摆式消防水炮内流道截面形状的变化及过渡不平顺，容易使消防水炮出现流速不均匀，造成消防水炮能量损失和后坐力增大。

张俊等[9]对几种不同出口直径和锥角的锥形喷嘴水射流反推力进行了理论分析和仿真计算,研究了压力、流量和锥形喷嘴的结构参数对反推力及反推力系数的影响,从而确定锥形喷嘴的最佳结构参数。

胡国良[10]在对消防水炮流道优化的研究设计过程中主要研究了进水压力与水炮射程的数量关系,验证优化设计后的性能。

上述文献多为流量或进口压力与喷射反力的关系,而弯管接头进出口面积比、弯角两类结构参数与喷射反力的关系却鲜有文献进行相关研究,因此有必要对不同进出口面积比、弯角、进口水流量与喷射反力的关系进行深入研究。

本文首先采用理论和仿真值进行对比,验证了仿真模型的正确性,随后采用仿真的手段对不同进出口面积比、弯角、进口水流量与喷射反力的关系进行深入研究,得到不同参变量与喷射反力的关系式,这为后续管管的设计提供了一定的理论指导。

2. 理论与仿真对比

2.1. 理论计算

如图1所示为弯管受力分析简图。

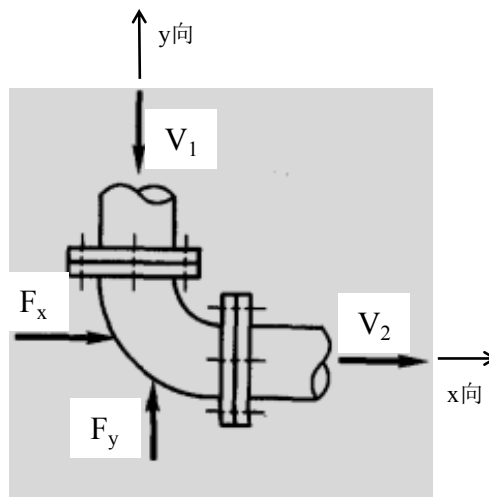


Figure 1. Model of bending pipe

图1. 弯管实物图模型

本计算中:如图1管道受力分析简图,规定y方向进口面积为 A_1 ,流速 V_1 ;x方向出口面积为 A_2 ,流速 V_2 。设弯管进出口面积比为1(即 $A_1 = A_2$),进出口管道直径 $D_1 = D_2 = 100$ mm,转弯半径 $R = 60$ mm,弯角 $\theta = 90^\circ$,流量 $Q = 30$ L/s。由喷射反力理论计算公式可得[11]:

$$F_x = q_v \rho (V_2 - 0) = 114.59 \text{ N};$$

$$F_y = q_v \rho (0 + V_1) = 114.59 \text{ N}.$$

2.2. 仿真计算

2.2.1. 模型

如图2所示为对应的弯管三维模型。

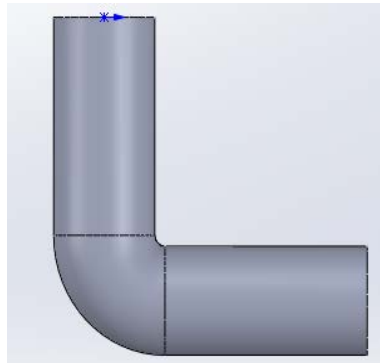


Figure 2. 3D model of bending pipe
图 2. 弯管三维模型

将模型导入流体仿真软件中，采用多面体网格对其进行网格划分，确定网格单元尺寸之前对网格无关性进行了验证，如图 3 所示。

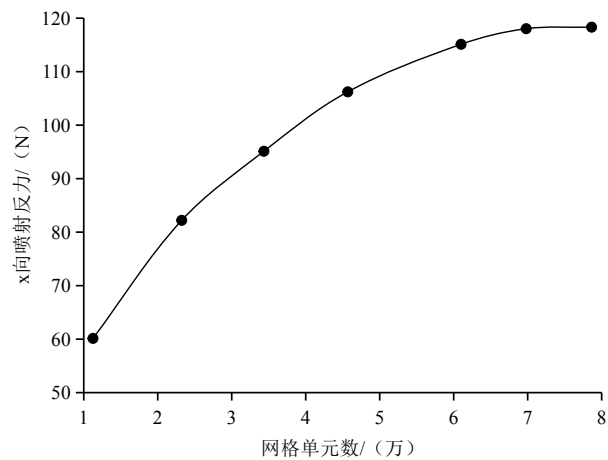


Figure 3. Grid independence verification
图 3. 网格无关性验证

由图 3 发现网格单元数在超过 6.5 万个后管道出口动压变化很小，因此最后固定好单元尺寸，考虑到计算成本以及计算精度，最后共划分了 69,802 个网格单元，如图 4 所示为弯管的网格模型。

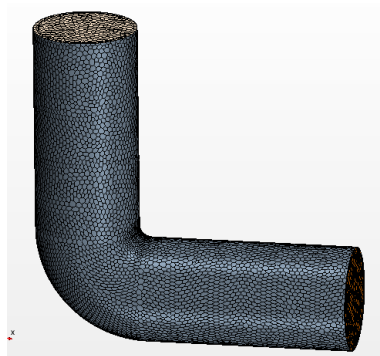


Figure 4. Grid division model
图 4. 网格划分模型

模型边界条件设置如下：1) 入口为质量流量 $Q = 30 \text{ kg/s}$ ；2) 出口为压力出口边界，压力为 0；3) 其他壁面设为无滑移壁面。假设水为不可压缩流体。主要边界条件具体见图 5 所示。

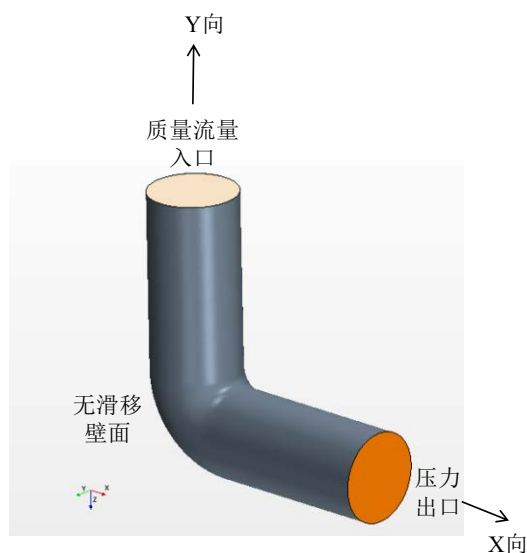


Figure 5. Main boundary conditions
图 5. 主要边界条件

本计算在商业计算软件 Star CCM+中进行且采用的湍流模型为标准的 $K-\varepsilon$ 模型。

2.2.2. 计算结果

如图 6 和图 7 分别表示管道中间截面速度矢量分布与压力分布。

由图 6, 图 7 可知：弯角处流体速度流动非常复杂，并且高速区在弯角内侧，该区域还存在较大的负压，影响流体的流动。另外从软件中可以提取出 x 向和 y 向的喷射反力：

$$F_x = 118.032 \text{ N}, F_y = 130.135 \text{ N}$$

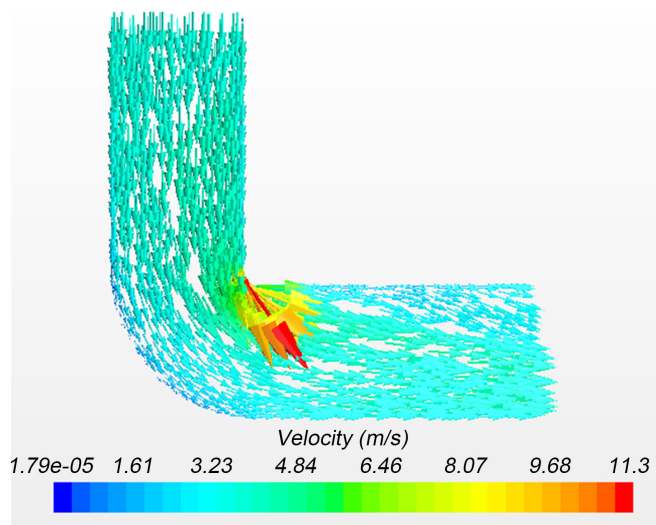


Figure 6. Velocity vector distribution
图 6. 速度矢量分布

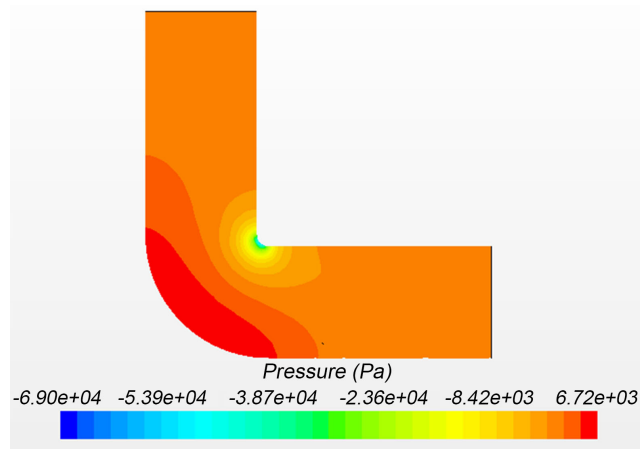


Figure 7. Cloud map of pressure distribution
图 7. 压力分布云图

2.2.3. 理论与仿真计算对比

表 1 给出了水质量流量 $Q = 30 \text{ kg/s}$ 、进出口直径相同($D_1 = D_2$ ，进口面积为 A_1 ，出口面积为 A_2 ，进出口面积比 $a = A_2/A_1 = 1$)、弯角 $\theta = 90^\circ$ 且转弯半径 $R = 60 \text{ mm}$ 时对管道壁面反冲压力的理论值和仿真值对比情况。

Table 1. Comparison of theoretical and simulated recoil pressures
表 1. 反冲压力的理论值和仿真值对比

参数	水质量流量 $Q = 30 \text{ kg/s}$		
	理论值	仿真值	相对误差
F_x	114.591	118.032	3.0%
F_y	114.591	130.135	13.56%

由表 1 可知：理论值和仿真值的一致性较好，误差最大控制在 15% 以内。误差产生的原因是：1) 理论公式里面没有考虑实际转弯半径，而实际上转弯半径对内部的流动带来非常大的影响，这是主要原因；2) 模型的简化，包括不考虑内壁面摩擦等因素，这是次要原因。实际上，仿真值更接近于真实的情况，后续的分析中均采用仿真值来对不同的参数对喷射反力的影响进行分析。

3. 不同参数下的喷射反力

3.1. 改变弯角

固定参数有：设流量 $Q = 30 \text{ L/s}$ ，进出口管道直径 $D_1 = D_2 = 100 \text{ mm}$ (即进出口面积比 $a = A_2/A_1 = 1$)，转弯半径 $R = 60 \text{ mm}$ 。当弯角 $\theta = 30^\circ \sim 100^\circ$ 时，通过仿真计算得到不同弯角角度 θ 与 x 、 y 向喷射反力的关系，具体见表 2。

如图 8 所示为 x 、 y 向喷射反力与弯角 θ 的关系图，而且还对两者的关系进行了拟合。

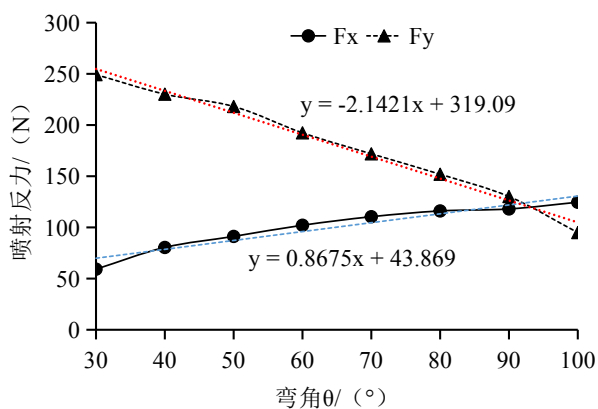
由图 8 可知： x 向喷射反力 F_x 和 y 向喷射反力 F_y 与弯角 θ 均呈线性关系，只是 x 向喷射反力 F_x 与 θ 呈正线性相关，而 y 向喷射反力 F_y 与弯角 θ 呈负线性相关。具体的关系式如下：

$$F_x = 0.8675\theta + 43.869;$$

$$F_y = -2.1421\theta + 319.09.$$

Table 2. The relationship between angle θ and jet reaction**表 2.** 弯角 θ 与喷射反力的关系

弯角 $\theta/(\circ)$	F_x/N	F_y/N
30	59.209	249.253
40	80.418	230.161
50	91.196	218.127
60	102.113	192.384
70	110.433	171.882
80	116.08	151.946
90	118.032	130.135
100	124.593	94.941

**Figure 8.** Relation between x and y jet reaction and angle θ **图 8.** x 、 y 向喷射反力与弯角 θ 的关系

3.2. 改变流量

固定参数有：设转角 $\theta = 90^\circ$ ，进出口管道直径 $D_1 = D_2 = 100$ mm (即进出口面积比 $a = A_2/A_1 = 1$)，转弯半径 $R = 60$ mm。当水质量流量 $Q = 30 \sim 90$ L/s，时，通过仿真计算得到不同弯角角度 θ 与 x 、 y 向喷射反力的关系，具体见表 3。

Table 3. Relation between mass flow Q and jet reaction**表 3.** 质量流量 Q 与喷射反力的关系

质量流量 $Q/(\text{kg/s})$	F_x/N	F_y/N
30	118.032	130.135
40	209.255	227.752
50	375.514	495.303
60	585.303	736.086
70	762.838	998.355
80	1000.660	1298.540
90	1236.149	1612.471

如图 9 所示为 x 、 y 向喷射反力与水质量流量 Q 的关系图，而且还对两者的关系进行了拟合。

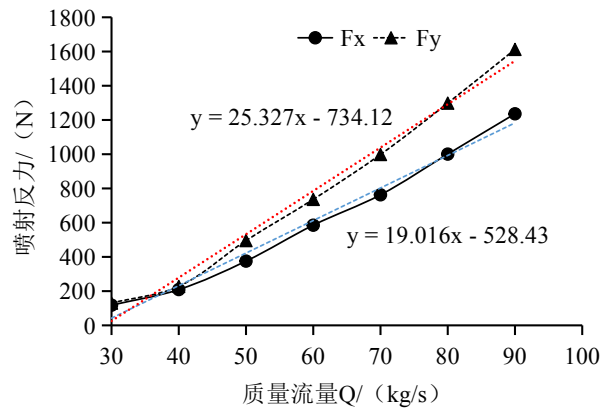


Figure 9. Relation between x and y jet reaction and mass flow rate Q

图 9. x 、 y 向喷射反力与质量流量 Q 的关系

由图 9 可知： x 向喷射反力 F_x 和 y 向喷射反力 F_y 与弯角 θ 之间均具有正线性相关的关系，且 x 向的喷射反力 F_x 随着质量流量的增大而增大幅度比 y 向的喷射反力 F_y 要打。具体的关系式表述如下：

$$F_x = 19.016Q - 528.43;$$

$$F_y = 25.327Q - 734.12。$$

3.3. 改变进出口面积比

固定参数有：设水质量流量 $Q = 30 \text{ kg/s}$ ，转角 $\theta = 90^\circ$ ，转弯半径 $R = 60 \text{ mm}$ 。当进口直径 $D_1 = 100 \text{ mm}$ (进口面积为 A_1) 通过改变出口直径 D_2 (出口面积为 A_2)，使得进出口面积比 a 在 0.25~1.75 之间变化时，通过仿真计算得到不同进出口面积比 δ 与 x 、 y 向喷射反力的关系，具体见表 4。

Table 4. The relationship between the area ratio a and the ejection reaction

表 4. 进出口面积比 a 与喷射反力的关系

进出口面积比 $\delta = A_2/A_1$	F_x/N	F_y/N
0.25	465.0330	1037.4500
0.5	231.2120	306.5770
0.75	154.7270	174.3780
1	118.0320	130.1350
1.25	96.3393	107.6080
1.5	90.5732	102.6840
1.75	87.0545	99.8354

如图 10 所示为 x 、 y 向喷射反力与进出口面积比 a 的关系图，而且还对两者的关系进行了拟合。

由图 10 可知： x 向喷射反力 F_x 和 y 向喷射反力 F_y 与弯角 θ 之间关系较复杂，总体而言以进出口面积比 $a = 1$ 为界，当 $a > 1$ ，时，喷射反力随着 a 的增大基本不变，而当 $a < 1$ ，时，喷射反力随着 a 的增大急剧变小；喷射反力与进出口面积比 a 的关系可以用多项式进行描述，具体表达式如下：

$$F_x = 352.02a^4 - 1726.2a^3 + 3148.4a^2 - 2597.5a + 941.92;$$

$$F_y = -1945.1a^5 + 11287a^4 - 25463a^3 + 28009a^2 - 15190a + 3439.9。$$

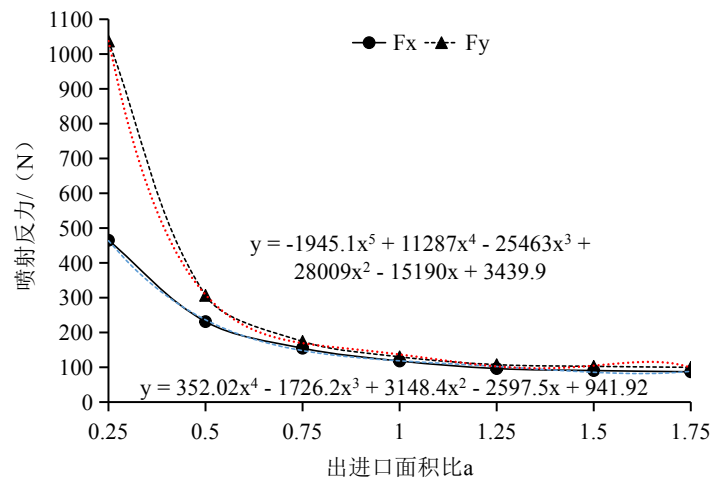


Figure 10. Relation between x and y injection reaction and inlet area ratio a
图 10. x 、 y 向喷射反力与进出口面积比 a 的关系

4. 结论

1) 针对消防车弯管接头影响因素较多且鲜有理论支撑导致其难以设计等难题, 通过理论计算对仿真模型进行验证, 在两个方向上的喷射反力的理论计算值与仿真值一致性较好, 验证了仿真模型的正确性;

2) 采用仿真手段研究了不同弯管转角、不同进口流量、不同进出口面积比与弯管接头过流时在两个方向上的喷射反力的关系。弯管转角与两个方向上的喷射反力均呈线性关系, 只是 x 向喷射反力 F_x 与 θ 呈正线性相关, 而 y 向喷射反力 F_y 与弯角 θ 呈负线性相关; 进口流量与两个方向上的喷射反力均呈正线性关系; 进出口面积比与两个方向上的喷射反力的关系较复杂, 均呈现出多项式的负相关的关系。

3) 后续的研究中将在理论计算和数值模拟的基础上引入实验研究, 进一步验证弯管转角、进口流量、进出口面积比与弯管接头过流时在两个方向上的喷射反力的关系, 为类似弯管接头的设计提供理论支撑。

参考文献

- [1] 杜霞, 张欣, 刘庭全, 等. 国外区域火灾风险评估技术及应用现状[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(2): 137-139.
- [2] 金磊. 城市综合防灾减灾规划设计的相关问题研究[J]. 中国公共安全(学术版), 2006(3): 9-11.
- [3] 侯宝钧, 刘梅梅. 论重庆市城市消防规划[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(6): 88-91.
- [4] Kawasaki, T., Naitoh, M. and Yamanouchi, A. (1984) Numerical Analysis of Two-Phase Jet Impingement. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **21**, 155-157. <https://doi.org/10.1080/18811248.1984.9731029>
- [5] 贾传娣, 何猛, 孙建平. 城市主战消防车车载消防炮喷射反力研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(1): 35-37.
- [6] Hu, G.L., Long, M. and Chen, W.G. (2013) Structure Design and Analysis of Water Jet Performances of a New Type of Fixed Fire Water Monitor. *Hydromechatronics Engineering*, **41**, 15-22.
- [7] 何猛, 贾传娣. 城市主战消防车作业工况下侧倾稳定性分析[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(3): 360-362.
- [8] 胡国良, 董灵军, 梁炬星. 一种降低水力自摆式消防水炮后坐力的设计方法[J]. 机械设计与制造, 2010(12): 42-44.
- [9] 张俊, 李晓晖, 朱玉泉. 锥形喷嘴水射流反推力的研究[J]. 机床与液压, 2007(4): 139-141.
- [10] 胡国良, 刘世鸿, 徐明, 等. 消防水炮流道优化设计及仿真实验分析[J]. 机械设计及制造, 2016(4): 13-16.
- [11] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 第 8 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.