

文章编号:1007-2861(2008)06-0629-04

# 基于相似理论的消防炮射流轨迹 模拟实验的设计

万峰, 陈晓阳, 闵永林, 王伟民

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 目前国内外关于消防炮射流轨迹的实验大多利用实物进行,其实验场地大,器材笨重复杂,设备运行和环境影响参数调整不易,实验成本较高.基于相似理论的思想,设计消防炮射流轨迹的模拟实验,并重点介绍模拟实验中相似关系比例的推导.该模拟实验具有以下特点:占用空间小,节约成本;采集数据方便,有较高的实用价值,可为消防炮的性能研究和工程设计提供实验数据,其分析计算模型能为消防炮参数数据库的建立提供一些理论支持.

**关键词:** 消防炮;相似理论;模拟实验

**中图分类号:** TU 892      **文献标志码:** A

## Design of Simulation Experiment for Jet Track of Fire Monitor Based on Similarity Theory

WAN Feng, CHEN Xiao-yang, MIN Yong-lin, WANG Wei-min

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Currently, real fire monitors are used in almost all experiments for jet track of fire monitors. These experiments require large areas, bulky equipment, and complicated operations leading to high cost. We propose simulation experiments for the jet track, and derive the similar proportion based on the similarity theory. The method has the advantages of small space requirement, low cost, and data collection capability. The method has practical value as it can provide experimental data for studying properties of the fire engine and used for engineering design. Furthermore, the analysis model is a theoretical basis of the fire monitor database.

**Key words:** fire monitor; similarity theory; simulation experiment

消防炮喷射出的水射流受多种环境因素影响,不是单纯的抛物型轨迹,而目前大多数自动消防炮都只按喷射射流近似为直线来考虑,或采用庞大的后备数据库来支持<sup>[1-2]</sup>.而数据库的管理和维护又需

要人的参与,很难实现智能化<sup>[3]</sup>.因此需要建立具有自学习性的消防炮参数数据库来支持,以提高消防炮水射流的落点定位精度.

目前,国内外关于消防炮射流轨迹的实验基本

收稿日期:2007-06-28      基金项目:公安部上海消防研究所资助项目

通信作者:陈晓阳(1960~),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为摩擦学等. E-mail:xychen@shu.edu.cn

都是用实际的消防炮进行,这样喷出的水柱(雾)流量达到每秒几十升,射程、射高达几十米.如果在室外进行实验,则环境参数(如风速、湿度等)很难有效控制,如果在室内进行,又不易找到这么大的室内空间,需专门建造,因此对实验场地要求较高.同时,由于消防炮的水流量大、压力高,整套设备结构复杂,这就大大提高了实验成本.基于以上分析,设想运用相似理论原理,在动力学相似的前提下将实验模型缩小,并为数据库的建立进行模拟实验的理论推导.相似是指表述此种现象的所有物理量,在空间中相对应的各点及在时间上相对应的各瞬间,各自互成一定的比例关系,并且被约束在一定的数学关系中<sup>[4]</sup>.根据相似准则,以某一物理方程为中间桥梁,得到模型各参数大小,进行相似的第一步是导出相似准则.

## 1 相似准则的导出

### 1.1 相似准则数目的得出

将系统的全部变量组成量纲矩阵

$$\begin{pmatrix} P & Q & \rho & \nu & S & D & \theta \\ F & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ L & -2 & 3 & -4 & 1 & 1 & 0 \\ T & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

得出其秩为  $R=3$ ,则相似准则总数为  $7-3=4$ .

由于  $\theta$  项的列向量为 0,可去掉,那么最终的相似准则的数目应为 3.

### 1.2 相似准则的导出<sup>[5-6]</sup>

与消防炮相关的参数主要有:压力  $P$ ,流量  $Q$ ,流速  $\nu$ ,射程  $S$ ,介质的密度  $\rho$ ,喷嘴出口直径  $d_0$ ,俯仰角  $\theta$ ,射高  $H$ .选择的消防炮的参数为  $P, Q, \nu, S, \rho, d_0$ .从所有的物理量中选出数目与独立方程式(即量纲矩阵的秩)数目相同的独立变量作为基本物理量,然后把其他的物理量看成是它们的函数关系,并以矩阵形式加以表示.因此此消防炮系统的独立方程式(量纲矩阵的秩)数目为 3,所以基本物理量的数目也为 3.选择的基本物理量除具有“独立性”外,还必须满足:要有量纲,且量纲不得重复;基本物理量所包含的全部量纲种类必须概括所有物理量的量纲.基于以上,本系统选出的基本物理量为  $d_0, \rho, \nu$ .

据文献[5]中关于量纲分析法的介绍,设  $a_1, a_2, a_3$  分别为  $\nu, d_0, \rho$  的指数,则矩阵的形式可表示为

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ \nu & d_0 & \rho & Q & P & S \\ F & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ L & 1 & 1 & -4 & 3 & -2 & 1 \\ T & -1 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\text{式中, } Q: \begin{cases} a_3 = 0 \\ a_1 + a_2 - 4a_3 = 3 \\ -a_1 + 2a_3 = -1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = 1 \\ a_2 = 2 \\ a_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow Q = \nu d_0^2,$$

$$P: \begin{cases} a_3 = 1 \\ a_1 + a_2 - 4a_3 = -2 \\ -a_1 + 2a_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = 2 \\ a_2 = 0 \\ a_3 = 1 \end{cases} \Rightarrow P = \nu^2 \rho,$$

$$S: \begin{cases} a_3 = 0 \\ a_1 + a_2 - 4a_3 = 1 \\ -a_1 + 2a_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = 0 \\ a_2 = 1 \\ a_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow S = d_0,$$

由此得出 3 个相似准则为

$$\pi_1 = \frac{Q}{\nu d_0^2}, \quad \pi_2 = \frac{P}{\nu^2 \rho}, \quad \pi_3 = \frac{S}{d_0}.$$

在消防炮各物理量中,  $Q$  是因变量,故  $\pi$  关系式可表示为

$$\frac{Q}{\nu D^2} = f\left(\frac{P}{\nu^2 \rho}, \frac{S}{d_0}\right).$$

### 1.3 模拟炮头各参数的确定

设长度缩小倍数为  $c_l, c_l = \frac{l'}{l''}$  ( $l'$  为实际尺寸,

$l''$  为模拟尺寸,下同),速度缩小倍数为  $\sqrt{c_l}$ ,

$$c_\nu = \frac{l'/l'}{l''/l''} = \frac{l'/l''}{l'/l''} = \frac{c_l}{\sqrt{c_l}} = \sqrt{c_l},$$

式中,  $c_\nu$  为速度缩小倍数.根据上述  $\pi$  关系式:  $\frac{P}{\rho \nu^2} =$

idem 或  $\frac{c_p}{c_\rho c_\nu^2} = 1$ , 则  $c_p = c_\rho c_\nu^2 = 1 \times c_l = c_l, c_p$  为压力缩

小倍数;  $\frac{Q}{\nu d_0^2} = \text{idem}$  或  $\frac{c_Q}{c_\nu c_{d_0}^2} = 1$ , 则  $c_Q = c_\nu c_{d_0}^2 = \sqrt{c_l} \cdot$

$c_l^2 = c_l^{5/2}, c_Q$  为流量缩小倍数.

据厂家提供的消防炮头图纸,实际炮头参数如下:喷嘴出口直径  $d'_0 = 42.4 \text{ mm}$ ,流量  $Q' = 60 \text{ L/s}$ ,压力  $P' = 1 \text{ MPa}$ ,仰角为  $30^\circ$  时的射程  $S' = 75 \text{ m}$ .

根据文献[7]中的质点运动学和文献[8]的部分知识,可以推导出消防炮在各个角度射流轨迹方程束为

$$y = 0.9 \tan \theta_0 \cdot x^{1.01} - 0.3 \frac{gx^{1.83}}{2\nu_0^2 \cos^2 \theta_0} -$$

$$0.2 \cdot \frac{gx^3}{3(\nu_0 \cos \theta_0)^3},$$

式中,  $\nu_0$  为喷嘴出口速度,  $\theta_0$  为炮头俯仰角,  $x$  为射出距离,  $y$  为射出高度. 代入相关数据, 可得  $\nu_0' = 23.8 \text{ m/s}$ .

据上述相似理论相关知识及公式, 在模拟的炮头中, 消防炮的各参数如表1和表2所示.

表1 各拟定射程时模拟消防炮的参数

Table 1 Simulative fire monitor's parameters when presumptive range

拟定射程 $S''/\text{m}$	模拟出口直径 $d_0''/\text{mm}$	模拟压力 $P''/\text{kPa}$	模拟流量 $Q''/$ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$
2	0.7	16	0.12
5	3.0	42	1.32
10	3.9	92	9.20
15	6.1	144	27.77

表2 实际炮头和模拟炮头各参数

Table 2 Parameters of real artillery and simulative artillery

	出口直径 $d_0/\text{mm}$	压力 $P/$ $\text{kPa}$	流量 $Q/$ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	射程 $S/\text{m}$
实际炮头	42.4	1 000	3 600	75
模拟炮头	6.06	144	27.77	15

将表1和表2所示实际炮头和模拟炮头相关参数带入公式  $Q = 0.012 \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{H}$ , 得

实际炮头: 等式右边 =  $0.012 \times 42.4^2 \times \sqrt{100} = 216 \text{ m}^3/\text{h} = 60 \text{ L/s}$ , 等式左边 =  $60 \text{ L/s}$ ; 左边 = 右边; 正确.

模拟炮头: 等式右边 =  $0.012 \times 6.06^2 \times \sqrt{14.4} = 1.67 \text{ m}^3/\text{h} = 27.8 \text{ L/min}$ , 等式左边 =  $27.8 \text{ L/min}$ ; 左边 = 右边; 正确.

通过此验证, 得出此相似后各参量正确, 由此可验证推导出相似准则正确.

从上面得出的模拟炮头各参数可以看出, 喷嘴入口直径过小, 这样加工起来有相当的难度, 而且成本也高. 因此考虑只将喷嘴入口直径缩小一倍, 即  $d_0'' = 21.2 \text{ mm}$ , 其余各参量再作适量的增减. 由于此模拟实验是在室内进行的, 因此射程不能过大, 控制在  $5 \text{ m}$  之内较为合适. 基于以上考虑, 得出最终的一组模拟炮头的参量值为

$$s'' = 1 \text{ m 时}, \nu_0'' = 2.16 \text{ m/s},$$

$$p'' = 108 \text{ kPa}, Q'' = 1.36 \text{ L/s};$$

$$s'' = 2 \text{ m 时}, \nu_0'' = 3.03 \text{ m/s},$$

$$p'' = 116 \text{ kPa}, Q'' = 1.91 \text{ L/s};$$

$$s'' = 3 \text{ m 时}, \nu_0'' = 3.73 \text{ m/s},$$

$$p'' = 125 \text{ kPa}, Q'' = 2.35 \text{ L/s};$$

$$s'' = 4 \text{ m 时}, \nu_0'' = 4.34 \text{ m/s},$$

$$p'' = 133 \text{ kPa}, Q'' = 2.74 \text{ L/s};$$

$$s'' = 5 \text{ m 时}, \nu_0'' = 4.9 \text{ m/s},$$

$$p'' = 142 \text{ kPa}, Q'' = 3.08 \text{ L/s}.$$

基于以上参数, 笔者对模拟后的消防炮射流轨迹曲线图进行了拟合, 如图1所示.

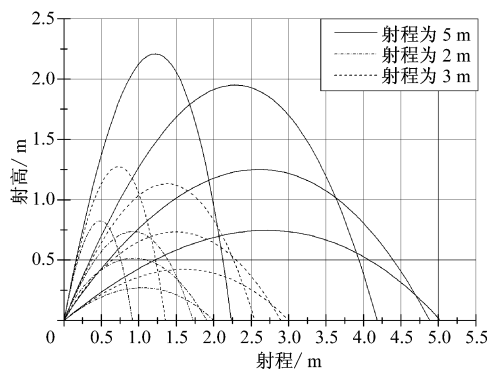


图1 模拟炮头几种射程的射流轨迹曲线拟合

Fig.1 Several curves of the simulation artillery's jet tracks

## 2 实验模型的建立

本实验的主要目的是测绘出消防炮的射流轨迹, 根据测绘出的射流轨迹计算, 推导出射流轨迹经验公式.

### 2.1 实验台结构及原理

实验台结构如图2所示, 其原理如下: 在水泵的作用下, 消防水炮出水, 其流量和压力可用流量计和试压泵测出, 调节水泵的压力获得不同流量的射流轨迹; 在消防炮出水过程中, 用摄像技术将水槽部分照出, 作为采集的数据; 其中水槽同时为蓄水池, 以实现水的循环利用, 达到节约成本的效果.

### 2.2 炮头的改进

图3为目前国外普遍采用的一种消防炮炮头图纸. 由于此次实验是模拟实验, 所采用的炮头为缩小比例后的模拟炮头, 因此炮头的生产为单件生产. 肋板部分与炮头外壳的连接处若采用浇铸方法, 则生产成本太高, 因此将其改为以下结构(见图4), 将外壳内侧改为阶梯结构, 肋板单独生产, 然后将肋板一

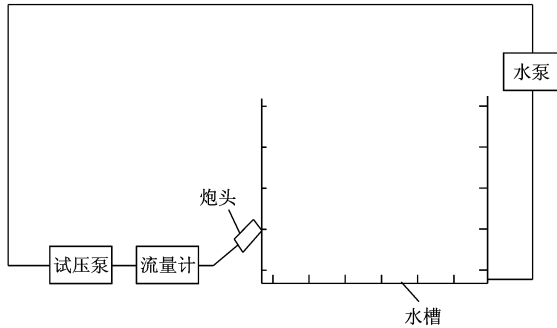


图2 实验台结构图

Fig. 2 Test chart structure

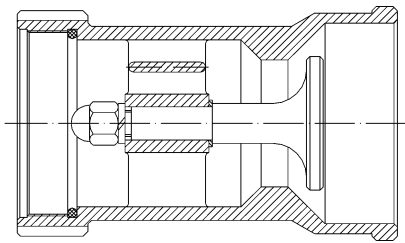


图3 炮头结构图

Fig. 3 Artillery structure

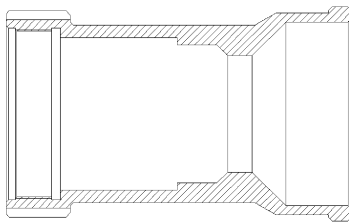


图4 改进后的炮头外壳结构

Fig. 4 Improved artillery crust structure

端卡在阶梯处,另一侧焊接在外壳上,使其固定.同时,可将喷嘴出口处的结构改为流线型或者将流量调节器的形状改变,以减少水的阻力,使得在相同的流量下,射程更远(见图5和图6).

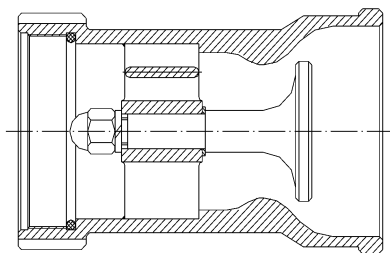


图5 改变喷嘴出口处的炮头结构

Fig. 5 Structure of the improved nozzle exit

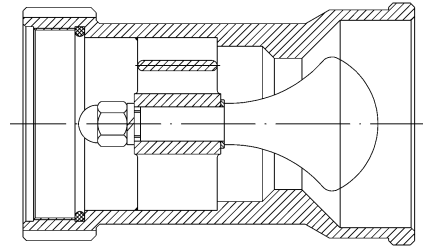


图6 改变流量调节器的炮头结构

Fig. 6 Structure of the improved flow regulator

### 3 结论与展望

随着社会经济的发展,大空间建筑越来越多,消防炮的应用将会越来越多,对消防炮射流轨迹的研究会更加深入.鉴于目前有关消防炮射流轨迹实验对实验场地和实验成本的高要求,利用相似理论建立起的消防炮射流轨迹实验模型由于占用空间小、成本低,因此具有较好的应用前景,为消防炮射流轨迹的研究以及消防炮各参数数据库的建立理论基础和实验平台.

本研究对消防炮射流轨迹模拟实验的模型尺寸进行了计算、分析,并进行了实验台的设计,可以作为消防炮射流轨迹实验设计的参考.

#### 参考文献:

- [1] CHEN T, YUAN H Y. An automatic fire searching and suppression system for large spaces [J]. Fire Safety Journal, 2004, 39:297-307.
- [2] FAN W C, YUAN H Y, LIU S Y. The integrated system for fire detection and extinction [J]. Fire Safety Sci, 1995, 43:49-53.
- [3] 疏学明,赵建华,袁宏永,等.小型智能消防水炮的研究[J].消防技术与产品信息,2002(5):478-481.
- [4] 徐挺.相似理论与模型试验[M].北京:中国农业机械出版社,1982:71-78.
- [5] 李之光.相似与模化[M].北京:国防工业出版社,1982:61-82.
- [6] 周美立.相似工程学[M].2版.北京:机械工业出版社,1998:86-92.
- [7] 周衍柏.理论力学教程[M].2版.北京:高等教育出版社,2003:32-35.
- [8] 浦发.外弹道学[M].北京:国防工业出版社,1980:7-10.

(编辑:陈海清)