

1-15-2021

## Construction of Real-time Simulation Model of Fire Fighting Pump System of Airport Fire Engine

Lishan Jia

*1. Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; ;2. Ground Support Equipments Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Liwen Wang

*1. Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; ;2. Ground Support Equipments Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Construction of Real-time Simulation Model of Fire Fighting Pump System of Airport Fire Engine

### Abstract

**Abstract:** To the simulation of fire fighting pump system of airport fire truck in driving training simulator of airport fire engine, the method of construction of simulation model of fire fighting system was promoted. Simulation model of centrifugal pump of airport fire truck was constructed, which was designed for simplification to satisfy the real-time performance of running of system. *Considering fire fighting operation of fire truck, simulation model of operation of fire fighting pump system was constructed, which could not only simulate common fire fighting operation of fire truck, but also simulate running status of low pressure of fire fighting pump. Experiments show, simulation mode of fire fighting pump system can not only satisfy the requirement of real-time running of driving training simulator of airport fire truck, but also has comparably high fidelity.*

### Keywords

driving training simulator of airport fire engine, fire fighting pump system, model of centrifugal pump, real-time performance, fidelity

### Recommended Citation

Jia Lishan, Wang Liwen. Construction of Real-time Simulation Model of Fire Fighting Pump System of Airport Fire Engine[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1209-1213.

# 机场消防车消防泵系统实时仿真模型的构建

贾立山<sup>1,2</sup>, 王立文<sup>1,2</sup>

(1.中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300; 2.中国民航大学航空地面特种设备民航研究基地, 天津 300300)

**摘要:** 针对机场消防车驾驶训练模拟器中对机场消防车消防泵系统的仿真, 提出了消防泵系统仿真模型的构建方法。建立了机场消防车消防用离心泵的仿真模型, 经过简化设计, 保证了系统运行的实时性能。结合消防车的消防操作, 建立消防泵系统操作运行的仿真模型, 该模型能够模拟消防车正常消防灭火, 还能模拟低转速时消防泵的运行状态。实验表明, 消防泵系统仿真模型不但能够满足机场消防车驾驶训练模拟器实时运行的要求, 还具有较高的逼真度。

**关键词:** 机场消防车驾驶训练模拟器; 消防泵系统; 离心泵模型; 实时性; 逼真度

中图分类号: TP.391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1209-06

DOI: 10. 16182/j. cnki. joss. 2015. 06. 008

## Construction of Real-time Simulation Model of Fire Fighting Pump System of Airport Fire Engine

Jia Lishan<sup>1,2</sup>, Wang Liwen<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Ground Support Equipments Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** To the simulation of fire fighting pump system of airport fire truck in driving training simulator of airport fire engine, the method of construction of simulation model of fire fighting system was promoted. Simulation model of centrifugal pump of airport fire truck was constructed, which was designed for simplification to satisfy the real-time performance of running of system. Considering fire fighting operation of fire truck, simulation model of operation of fire fighting pump system was constructed, which could not only simulate common fire fighting operation of fire truck, but also simulate running status of low pressure of fire fighting pump. Experiments show, simulation mode of fire fighting pump system can not only satisfy the requirement of real-time running of driving training simulator of airport fire truck, but also has comparably high fidelity.

**Keywords:** driving training simulator of airport fire engine; fire fighting pump system; model of centrifugal pump; real-time performance; fidelity

## 引言

安全生产是中国民航的重要工作。飞机事故和灾难的 95% 发生在地面, 其中燃油泄漏火灾以及

由于其它火灾引起的燃油泄漏等大面积火灾是消防应急救援人员所需面对的和最艰巨的救援任务, 因此, 针对飞机地面消防救援训练可以提高机场消防人员的应急消防救援保障的能力和快速反应水平, 可避免或减小在实际发生飞机消防事故时的人员伤亡和财产损失<sup>[1]</sup>。

机场消防车驾驶训练模拟器是为机场消防人员培训而研制的一种能够逼真模拟消防车驾驶和



收稿日期: 2014-04-30 修回日期: 2014-06-11;  
作者简介: 贾立山(1976-), 男, 天津, 博士, 副研究员, 研究方向为计算机控制与仿真技术; 王立文(1962-), 男, 河北, 满族, 博士, 研究员, 研究方向为民航机场设备。

<http://www.china-simulation.com>

• 1209 •

飞机火灾消防的模拟仿真设备。消防泵系统是机场消防车的系统之一,用于给管路中的灭火剂增加压力,使灭火剂从消防炮口喷射出去进行灭火工作。机场消防车驾驶训练模拟器要对驾驶员操纵消防设备进行灭火操作进行仿真,必须构建消防泵系统的仿真模型。

消防泵系统的核心部件是一台离心式水泵。该水泵由消防车发动机提供动力,以一定的流量和扬程实现灭火剂的喷射。离心式水泵的数学模型比较复杂,很多学者用了很多种方法进行构建。离心式水泵的流量和扬程间存在曲线关系,在正常工作状态下,可以根据流量和扬程间的曲线关系由流量确定扬程。考虑到额定工况与实际工况的区别,也可以根据曲线拟合关系根据实际转速与额定转速的关系由流量得到扬程。陈万青采用基于水泵外特性和基于水泵内特性两种方法构建了水泵动态模型,但其得到的只是流量与扬程间的模型关系,对于如何计算流量没有提及。胥建群构建了一种给水泵通用数学模型,建立了考虑中间抽头和汽蚀问题的水泵模型。其中既包括由水泵流量推导水泵扬程的计算关系,也包括由水泵转速和进出口压力等因素推导水泵流量的数学模型<sup>[2-6]</sup>。

机场消防车消防泵系统的消防泵由发动机驱动,发动机转速的变化对泵的工作具有直接影响。同时非额定转速时,灭火剂会因消防泵达不到标准压力而影响喷射距离。消防泵输出流量和扬程随发动机转速的变化以及非额定状态时流量和扬程的变化都需要模拟。因此,需要建立较为准确的数学模型。既要考虑非额定工况下消防泵流量对扬程的影响,又要考虑发动机转速变化对消防泵流量的影响,同时还要求模型满足系统实时仿真的要求。

## 1 机场消防车驾驶训练模拟器

机场消防车驾驶训练模拟器是用于机场消防人员训练的人在回路仿真设备。机场消防车驾驶训练模拟器由模拟驾驶室、仿真系统、操纵系统、仪表系统、音响系统、视景系统和教员台系统组成。

模拟驾驶室按照机场消防车驾驶室进行构建,为受训消防员提供逼真的操作环境。操纵系统包括方向盘、油门、刹车、消防炮操纵手柄和操纵计算机等设备,通过 AD/DA、数字 I/O 等技术采集消防员的操纵输入。仿真系统用于实时解算车辆运动模型、消防系统模型和火灾发展模型,生成相应的车辆运动信息、消防系统输出信息、火灾发展信息。仪表系统采用微电机控制技术,根据仪表指示值实时控制仪表指针进行相应指示。音响系统采用计算机音频动态调配技术,根据车辆运动状态、火灾发展状态等信息实时生成车辆运动音响、灭火剂喷射音响、火灾音响等声音提示信息。视景系统采用计算机三维图像生成技术,根据仿真系统输出生成车辆运动场景、飞机火灾场景等视觉提示信息。视景中根据飞机火灾发展特点按照时间控制火灾烟气的变化。比如发动机起火原因主要由于压缩机叶片漏油起火(一段火区),如果救援不力,会导致发动机涡轮尾喷起火(二段火区),火势继续发展会逐渐扩展到发动机内部零部件和外部导流罩火灾(三段火区),继而会发展到整个发动机火灾。那么在视景中就在发动机不同部位放置火灾烟气特效发射源,由程序根据时间控制不同烟火发射源显示烟火。机场消防车驾驶训练模拟器工作时,首先通过教员台系统设置训练课目,然后由受训人员操作操纵系统生成操纵信号并传送给仿真系统。仿真系统经过数学模型解算,实时生成车辆运动信息、消防系统输出信息和飞机火灾发展信息。这些信息被传送给仪表系统、音响系统和视景系统生成相应的声音提示和视觉提示信息,从而为受训消防车驾驶员提供逼真的训练环境。

为了增强逼真度,视景中消防炮喷射灭火剂的方向、扬程、流量需要根据消防员的操纵输入由仿真模型实时解算得出。由扬程和流量可以换算出灭火剂喷出喷口的初始速度,再加上因车辆运动和消防炮炮口移动使灭火剂产生的初始运动速度即可得出灭火剂实际喷射的初始速度。在视景中用粒子系统构建灭火剂喷射情景。灭火剂实际喷射的初始

速度和方向即为粒子的初始速度向量。灭火剂的喷射量则可根据灭火剂喷射流量和喷射时间计算得出。灭火剂是否喷射到着火点可以用视景中的碰撞检测技术进行检测。火灾的燃烧过程可以通过经验数据和仿真分析事先确定。在仿真时通过设定火焰燃烧时间加以模拟。当检测到灭火剂喷射到火点之后通过计算灭火剂喷洒量和经验数据确定火灾是否熄灭。这样, 从计算消防泵喷射灭火剂的方向、扬程和流量开始, 到确定灭火剂是否喷射到火点并确定火灾是否熄灭结束, 就完成整个消防灭火的仿真过程。

灭火剂喷射的方向、扬程和流量与灭火效果直接相关。所以需要建立精确的机场消防车消防泵系统模型, 以使受训消防员获得精确专业的训练。

## 2 机场消防车消防泵工作特点

所模拟的机场消防车为豪士科 striker3000 型机场消防车。该消防车配备有车顶塔架消防炮和保险杠塔架消防炮两个消防炮, 其中车顶塔架消防炮为主消防炮。车辆配有一台单级离心式消防泵。消防泵的驱动轴由一个离合器与发动机的转动输出轴相连。当需要喷射灭火剂时, 离合器与发动机转动输出轴接合, 消防泵运转工作。当不需要喷射灭火剂时, 将离合器与发动机转动输出轴分离, 消防泵停止工作。其结构示意图如图 1 所示。

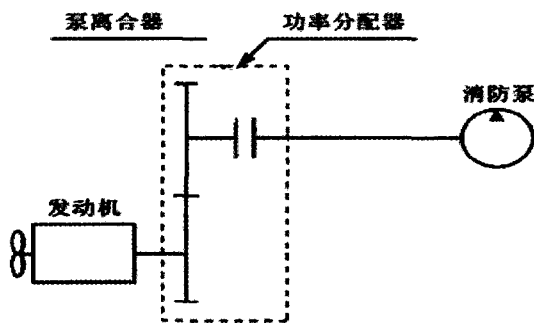


图 1 消防泵驱动结构示意图

机场消防车消防泵系统的工作过程是这样的。啮合灭火剂选择开关将啮合消防泵离合器, 消防泵就会以与发动机转速相关的转速运转。当打开消防

炮的排泄开关, 发动机的转速会升到调节的泵送转速(2075 rpm)。这时消防泵的压力为 1620-1689 kPa。如果用主消防炮喷射灭火剂, 其喷射流量将达 5212 L/min, 扬程可达 70 m。如果在发动机泵送转速时消防泵压力不能达到指定值, 就需要调节消防泵系统的调压阀使压力达到 1620-1689 kPa。

因此, 消防泵系统仿真模型的构建不但要考虑灭火剂喷射的扬程与流量的关系, 还要考察发动机转速变化对流量的影响。

## 3 消防泵系统实时仿真模型的构建

消防车模拟器是一个人在回路仿真系统, 实时性要求较高。这里构建的仿真模型主要用于消防泵喷射流量、扬程和输出压力的实时解算。

设机场消防车发动机的输出功率为  $P_f$ , 发动机输出功率可以根据发动机转速由发动机转速与输出功率关系曲线得到, 令发动机转速为  $n$ , 则有

$$P_f = k_1 + k_2 n + k_3 n^2 \quad (1)$$

其中  $k_1, k_2, k_3$  为由发动机转速与输出功率关系曲线得到的多项式拟合系数。

设车辆行驶消耗的功率为  $P_x$ , 消防泵输入轴功率为  $P$ 。因为发动机的输出轴经功率分配器与消防泵的输入轴相连, 设发动机输出轴到消防泵输入轴的传动比为  $i$ , 则有

$$P = (P_f - P_x) i \quad (2)$$

设  $N$  为消防泵的转速。则有

$$N = n i \quad (3)$$

令消防泵的流量为  $Q$ , 消防泵的流量和轴功率间也可以由实验得到关系曲线, 一般称为  $Q-P$  特性曲线。令在额定工作状态下的消防泵的功率为  $P_0$ , 在额定工作状态下的流量为  $Q_0$ , 则根据  $Q-P$  特性曲线可得多项式拟合公式为:

$$Q_0 = k_4 + k_5 P_0 + k_6 P_0^2 + k_7 P_0^3 + k_8 P_0^4 + k_9 P_0^5 \quad (4)$$

其中  $k_j (j=4, \dots, 9)$  是根据  $Q-P$  特性曲线得出的多项式拟合系数。

又由消防泵的工作特性可知:

$$P_0 = \left(\frac{N_0}{N}\right)^3 P \frac{\rho_0}{\rho} \quad (5)$$

其中  $\rho_0$  为额定工作状态下消防泵的给水密度,  $\rho$  为消防泵的实际给水密度。

$$\text{令 } \hat{P} = P \frac{\rho_0}{\rho} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{N_0}{N} \quad (7)$$

所以在消防泵任意轴功率下的流量为:

$$Q = k_4 \xi^{-1} + k_5 \xi^2 \hat{P} + k_6 \xi^5 \hat{P}^2 + k_7 \xi^8 \hat{P}^3 + k_8 \xi^{11} \hat{P}^4 + k_9 \xi^{14} \hat{P}^5 \quad (8)$$

令消防泵的扬程为  $H$ , 消防泵的额定转速为  $N_0$ , 消防泵在额定工作状态下的扬程为  $H_0$ , 则根据消防泵外特性  $Q-H$  曲线可得多项式拟合公式:

$$H_0 = k_{10} + k_{11} Q_0 + k_{12} Q_0^2 \quad (9)$$

其中  $k_{10}$ ,  $k_{11}$  和  $k_{12}$  是根据  $Q-H$  特性曲线得出的多项式拟合系数。

由消防泵的工作特性可知

$$H_0 = \xi^2 H \quad (10)$$

$$Q_0 = \xi Q \quad (11)$$

则得在消防泵任意转速  $N$  下的实际扬程为

$$H = k_{10} \xi^{-2} + k_{11} Q \xi^{-1} + k_{12} Q^2 \quad (12)$$

令  $p_1$  为消防泵的进口压力,  $p_2$  为消防泵的出口压力。 $\rho$  为灭火剂的给水密度。 $g$  为重力加速度。

$$\text{则有 } H = (p_2 - p_1) (\rho g)^{-1} \quad (13)$$

$$\text{可得 } p_2 = p_1 + \rho g H \quad (14)$$

将式(1)、(2)、(3)、(8)、(13)和(14)联立可得

$$\begin{cases} P_f = k_1 + k_2 n + k_3 n^2 \\ P = (P_f - P_x) i \\ N = n i \\ Q = k_4 \xi^{-1} + k_5 \xi^2 \hat{P} + k_6 \xi^5 \hat{P}^2 + k_7 \xi^8 \hat{P}^3 + k_8 \xi^{11} \hat{P}^4 + k_9 \xi^{14} \hat{P}^5 \\ H = k_{10} \xi^{-2} + k_{11} Q \xi^{-1} + k_{12} Q^2 \\ p_2 = p_1 + \rho g H \end{cases} \quad (15)$$

所以式(15)就是构建的机场消防车消防泵系统的实时仿真数学模型。

## 4 实验与分析

柴油发动机的工作特性如图 2 所示。

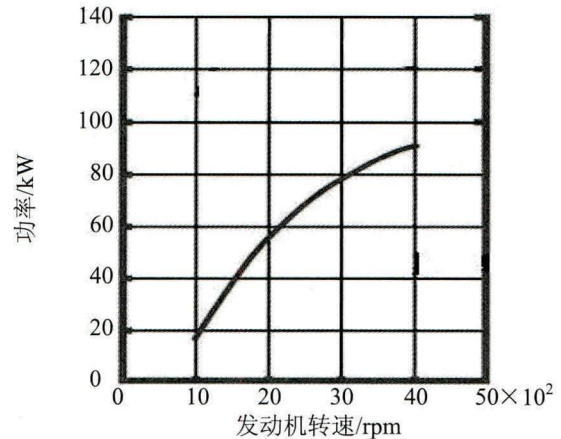


图 2 柴油发动机工作特性

经过多项式拟合, 可得

$$P_f = -28.79 + 5.47n - 0.06n^2 \quad (16)$$

发动机转速功率拟合曲线如图 3 所示。

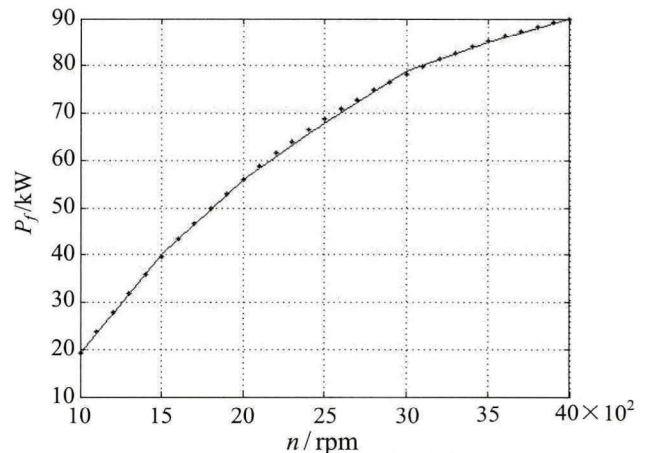


图 3 发动机转速功率拟合曲线

图 3 中实线为原数据曲线, 点线为拟合曲线。

机场消防车消防泵系统所用离心泵的外特性曲线如图 4 所示。

经过多项式拟合, 可得  $Q-H$  曲线和  $Q-P$  曲线的拟合关系式为

$$\begin{cases} H_0 = 80.71 + 0.04 Q_0 - 0.21 Q_0^2 / 100 \\ Q_0 = -536.28 + 160.81 P_0 - 19.15 P_0^2 + 1.15 P_0^3 - 0.03 P_0^4 + 0.04 P_0^5 / 100 \end{cases} \quad (17)$$

$Q-H$  曲线的拟合曲线图如图 5 所示。



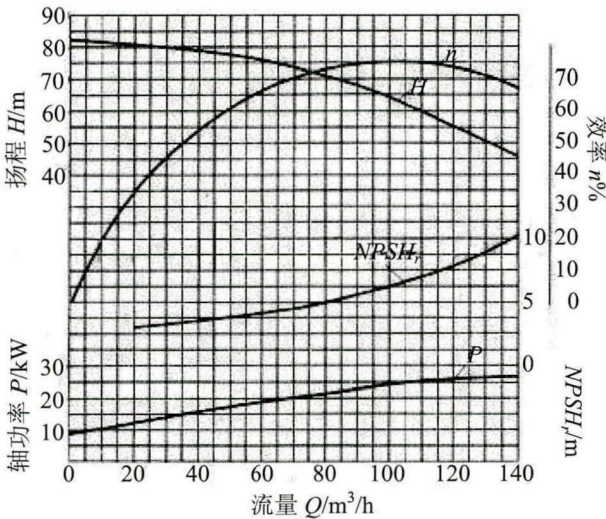


图 4 离心泵的外特性曲线

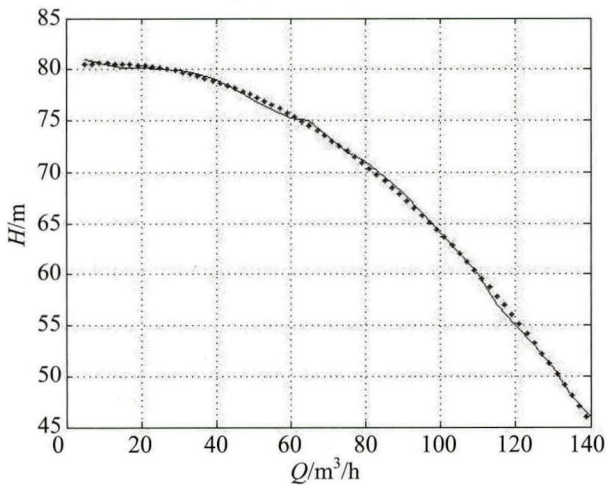


图 5 Q-H 曲线拟合曲线图

图 5 中实线为原数据曲线, 点线为拟合曲线。  
Q-P 曲线的拟合曲线图如图 6 所示。

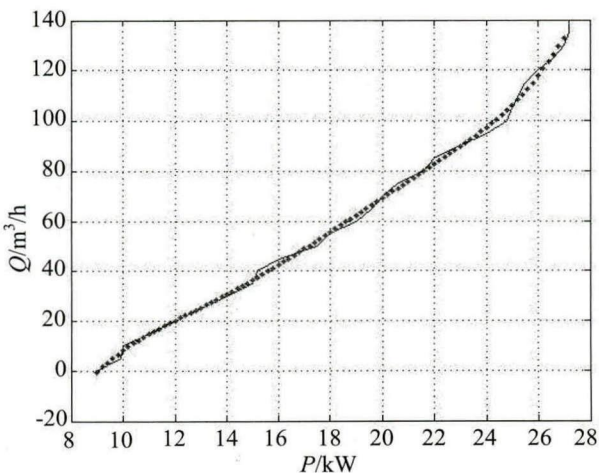


图 6 Q-P 曲线拟合曲线图

图 6 中实线为原数据曲线, 点线为拟合曲线。

由图 3、图 5 和图 6 可以看出拟合曲线与原始曲线足够接近, 满足拟合精度的要求。

现已知所模拟的机场消防车发动机输出轴到消防泵输入轴的传动比  $i=1$ , 则式(2)可以写为:

$$P = P_f - P_x \tag{18}$$

由机场消防车的泵送转速可知消防泵在额定工作状态下的转速为  $N_0 = 2075 \text{rpm}$ 。所以

$$\xi = \frac{2075}{N} \tag{19}$$

式(8)可以写为:

$$Q = -536.28\xi^{-1} + 160.81\xi^2\hat{P} - 19.15\xi^5\hat{P}^2 + 1.15\xi^8\hat{P}^3 - 0.03\xi^{11}\hat{P}^4 + 0.04\xi^{14}\hat{P}^5 / 100 \tag{20}$$

考虑到机场消防车消防泵轴转速可能为 0, 将式(20)写为:

$$Q = \begin{cases} -536.28\xi^{-1} + 160.81\xi^2\hat{P} - 19.15\xi^5\hat{P}^2 + 1.15\xi^8\hat{P}^3 - 0.03\xi^{11}\hat{P}^4 + 0.04\xi^{14}\hat{P}^5 / 100 & N > 0 \\ 0 & N = 0 \end{cases} \tag{21}$$

式(12)可以写为:

$$H = 80.71\xi^{-2} + 0.04\xi^{-1}Q - 0.21Q^2 / 100 \tag{22}$$

已知消防泵在额定转速下输出压力为 1620-1689 kPa。现设灭火剂为水, 令输出压力  $p_2 = 1620 \text{ kPa}$ , 给水密度  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , 扬程  $H = 70 \text{ m}$ , 由式(14)可得  $p_1 = 934 \text{ kPa}$ , 所以式(14)可写为:

$$p_2 = 934 + \rho gH \tag{23}$$

所以式(16), (18), (21), (22), (23)即为所模拟机场消防车消防泵系统模型, 根据消防车发动机的输出转速可直接推算出消防泵的流量、扬程和输出压力。

### 5 结论

机场消防车驾驶训练模拟器是用于对机场消防人员进行训练的模拟仿真设备。机场消防车消防泵系统是进行飞机消防工作的主要系统, 对消防泵系统的仿真真是机场消防车驾驶训练系统的主要内

- Systems: Impact of Automatic Target Recognition [C]// 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2008: 1619-1623.
- [2] Frankot R T. Performance of Target Acquisition Systems with Ordered Commitment [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 2012, 48(3): 2154-2166.
- [3] Ramirez J P. Moving Target Acquisition Through State Uncertainty Minimization [C]// American Control Conference (ACC). Portland, OR, USA: IEEE, 2014: 3425-3430.
- [4] Yang Cui. Target Acquisition Performance Model Based Quality Metric for Multisensor Image Fusion [C]// International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Nanning, China. USA: IEEE, 2010: 11-14.
- [5] 温求道, 崔莹莹, 夏群利. 基于导引头地面捕获域的激光制导炸弹设表修正技术 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2053-2057.
- [6] 林德福, 牟宇, 常超. 激光半主动末制导炮弹捕获概率研究 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 698-701.
- [7] T Jono, M Toyoda, K Nakagawa, *et al.* Acquisition Tracking and Pointing System of OICETS for Free Space Laser Communications [C]// SPIE Acquisition, Tracking and Pointing XIII. Orlando, FL, USA: SPIE, 1999, 3692: 41-50.
- [8] 邓蕾, 刘藻珍, 刘永善. 激光半主动寻的导引头目标捕获概率仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 34-36.
- [9] 谷志军. 拦截机动目标末制导技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [10] 刘长虹, 关永亮, 寿卓佳. 蒙特卡洛法在数值积分上的应用 [J]. 上海工程技术大学学报, 2010, 24(1): 43-46.
- [11] 刘小会. 正态分布积分高精度数值计算的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

(上接第 1213 页)

容之一。根据机场消防车消防泵系统的组成结构和工作特点, 构建了消防泵系统的仿真模型。根据消防车工作参数推导了模型的各项参数。通过拟合曲线的数据对比, 证明该仿真模型具有较高的仿真精度。同时该模型还具有形式简单、计算速度快的特点, 能够满足实时仿真的要求。

#### 参考文献:

- [1] 贾立山, 王立文. 粒子系统在飞机火灾消防视景仿真中的应用 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 314-318.
- [2] 陈万青, 王尽孝. 基于泵内特性的离心式给水泵建模仿真及可视化研究 [J]. 黑河学院学报, 2011, 2(1): 124-128.
- [3] 胥建群, 高润田, 周克毅. 一种新型的给水泵通用数学模型 [J]. 汽轮机技术, 1999, 41(6): 334-338.
- [4] 李晓黎. 火电厂水泵系统运行优化的模型与方法 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [5] Su Hua, Shi Xungen. Application of hourly simulation in designing vertical U-pipe underground heat exchanger of ground source heat pump system [C]// Proceeding of 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, Henan, China. USA: IEEE Computer Society, 2010: 1-5.
- [6] 江文贱, 黄建荣, 韩丹丹. 水泵性能测试仿真实验台研究 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2012, 25(1): 73-75.