

文章编号:1674-8190(2014)02-171-04

桨尖喷气驱动系统的实验与数值模拟研究

陈白冰, 詹浩, 米百刚

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 桨尖喷气驱动是一种很有应用前景的动力驱动类型, 针对桨尖喷气驱动系统进行设计研究。通过建立压气机式桨尖喷气驱动系统的实验平台, 改变入口条件, 测量得到喷气管道内部的流动参数以及桨尖喷口的静推力, 进而计算此驱动系统的输出功率, 对整个驱动系统的性能进行试验分析, 然后采用 CFD 数值模拟方法对试验的各个流动状态进行仿真计算。结果表明: CFD 数值计算结果与试验值吻合的很好, 随着入口总压的提高, 推力及功率变大, 同时说明了 CFD 数值方法的可靠性, 也为 CFD 数值模拟技术在喷气驱动系统的效率以及动力来源的选择与适配研究提供了参考。

关键词: 桨尖喷气; 驱动系统; 数值模拟; 离心式压气机; 试验系统

中图分类号: V235

文献标识码: A

Research on Experiment and Numerical Simulation for the Tip-jet Driven System

Chen Baibing, Zhan Hao, Mi Baigang

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The tip-jet driven system is a promising power driven device. The designing and studying focuses on tip-jet driven system. A driven system experimental platform based on centrifugal compressor is established, the interior-flow parameters of the pipe and static thrust of the spout by changing the inlet conditions are obtained, and then the output power of this driven system is calculated to analyze the characteristics of the system. Further the CFD numerical simulation method is used to simulating various experimental conditions. The results show that the simulation data are well agree with the experiment data, the force and power are bigger when the total pressure are higher. It provide references for CFD numerical simulation technology used in calculating the efficiency of tip-jet driven system and selecting source of the power.

Key words: tip-jet; driven system; numerical simulation; centrifugal compressor; experimental system

0 引言

桨尖喷气驱动系统是通过旋翼桨叶输送气体, 在叶尖适当地改变气体的方向产生力, 对旋翼产生一个驱动扭矩, 驱动旋翼旋转。这种反驱动装置只需要一个气体发生器, 而不需要常规直升机的尾桨提供反扭矩装置。产生翼尖喷流的方式有两种: 一种是桨尖发动机式, 另一种是桨尖供气式^[1-2]。由

于在桨尖安装喷气发动机, 将会使发动机处在离心力及陀螺力矩作用下工作, 而且发动机的陀螺力矩作用在桨叶上, 也给桨叶的设计带来困难。目前在国内外已有实际应用的是桨尖供气式压气机式驱动系统^[3], Kyung-Hoon Park 等^[4]利用涡喷发动机尾部引气的方式, 对基于热喷流的桨尖喷气动力系统进行了设计和测试, 测量了不同管道直径时的喷流反作用推力。而在国内, 桨尖喷气驱动系统的研究较为少见, 吕佩剑等^[5]对基于暖喷流的桨尖喷气驱动系统动力来源装置进行了初步研究, 完成了混排发动机的设计和制造, 并对发动机进行了初步测试。目前还没有针对桨尖喷气驱动装置进行系统

收稿日期: 2013-10-14; 修回日期: 2013-11-13

通信作者: 陈白冰, gerrard760@126.com

性设计与 CFD 数值模拟分析。

本文首先设计一套压气机式驱动系统,然后进行实验和数据采集,进而通过计算对桨尖喷口的输出功率进行量化,最后基于 CFD 数值模拟技术,对各个工况进行仿真计算,并将计算得出的推力及功率数据与实验对比,验证数值计算方法的合理性,也为 CFD 仿真在喷流驱动系统设计中的应用提供参考。

1 压气机式驱动实验系统的建立

实验系统主要由增压模块、测量模块和数据处理模块组成,各模块可以自由替换。

增压模块主要由汽油发动机和机械增压器组成,汽油发动机采用现有的汽车发动机,用汽车发动机通过皮带传动带动机械增压器工作^[6]。由压气机产生的高压气体经过管道,最终由桨尖喷口喷出,产生反作用力。

测量模块集中在测量段以及桨尖喷口处,主要利用压力变送器、热电偶和压力传感器来实时测量和监控压气机的出口的总压 p^* 、静压 p 、总温 T^* 以及桨尖喷口静推力 F 。测总压时,要求引流管密封良好,且引流探头沿管道轴向放置,其方向应与气流方向相反,并尽可能位于管道中心位置。

数据处理模块主要是把测量装置所测得的值(电压信号)输送到数据采集卡,进行实时数据采集和 A/D 转换,各数据通道的数字量通过 USB 接口连接到工控微机上,然后使用 Labview 编写的实验测控程序进行实验数据的实时采集、显示、记录、保存^[7],如图 1 所示。

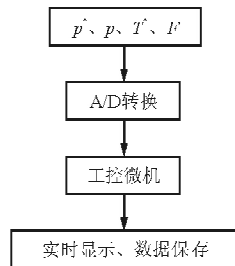


图 1 数据处理模块工作图

Fig. 1 Diagram of data processing module

实验系统通过测量不同汽车发动机油门下的压气机出口截面的总压 p^* 、静压 p 、总温 T^* 以及喷口处的推力 F ,进而由上述流动参数推出增压器出口截面的流量 q_m 以及喷口处瞬时流速 v ,最后

得到驱动系统瞬时输出功率 $P_{\text{输出}}$ 。系统的实体建模及实验过程示意图如图 2~图 3 所示,实验系统总体安装图如图 4 所示。

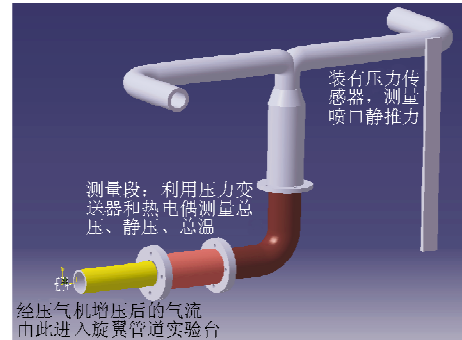


图 2 实验系统的实体建模

Fig. 2 Solid modeling of the experiment system

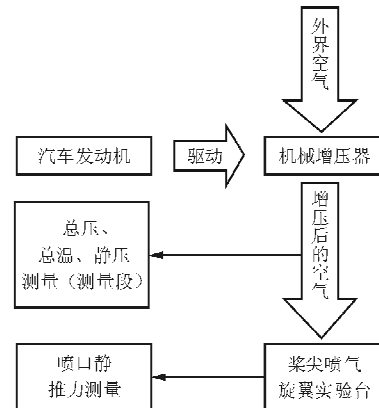


图 3 实验过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experiment process



图 4 实验系统的总体安装图

Fig. 4 Overall installation diagram of experiment system

2 实验结果的处理计算

假设气流在压气机内做等熵压缩,流经管道的气流为完全气体,且是定常和一维的。气流具有恒定的比定压热容 c_p 、定熵指数 k 以及气体常数 R_0 。

由完全气体状态方程以及绝能流动的能量方程(式 1)、完全气体等熵关系式^[8-9](式(2)), 推出增压器出口处在某一状态下的流量 q_m (式(3))。再由喷口处压力传感器测量出喷口推力 F , 由式(4)计算出喷口流速 v , 再通过式(5)计算驱动系统的输出功率 $P_{\text{输出}}$ 。

$$c_p T^* = c_p T + \frac{V_e^2}{2} \quad (1)$$

$$\frac{p^*}{p} = \left(\frac{T^*}{T}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

$$q_m = A \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p^{*2}}{R_0 T^*} \left[\left(\frac{p}{p^*}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p^*}\right)^{\frac{k+1}{2}} \right]} \quad (3)$$

$$v = \frac{2F}{q_m} \quad (4)$$

$$P_{\text{输出}} = 2Fv \quad (5)$$

部分状态的实验测量值以及由此推出的计算结果如表 1~表 2 所示。

表 1 实验测量值

Table 1 Measurements of experiment

| 状 态 | p^*/kPa | p/kPa | T^*/K | F/N |
|-----|------------------|----------------|----------------|--------------|
| 1 | 112.15 | 109.52 | 322.66 | 14.17 |
| 2 | 112.44 | 109.75 | 325.12 | 17.76 |
| 3 | 114.54 | 111.34 | 330.33 | 23.25 |
| 4 | 115.06 | 111.28 | 330.68 | 23.33 |
| 5 | 116.20 | 112.38 | 332.54 | 28.87 |
| 6 | 117.00 | 113.12 | 334.12 | 33.42 |
| 7 | 117.68 | 113.54 | 336.63 | 39.05 |
| 8 | 119.40 | 115.07 | 347.18 | 42.91 |
| 9 | 122.21 | 117.11 | 356.30 | 51.63 |
| 10 | 123.22 | 117.76 | 361.46 | 55.58 |

表 2 实验测量值的计算结果

Table 2 Calculated value of experiment

| 状 态 | $q_m/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ | $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $P_{\text{输出}}/\text{kW}$ |
|-----|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.28 | 100.51 | 2.85 |
| 2 | 0.28 | 124.94 | 4.44 |
| 3 | 0.31 | 149.94 | 6.97 |
| 4 | 0.34 | 138.64 | 6.47 |
| 5 | 0.34 | 170.32 | 9.83 |
| 6 | 0.34 | 195.41 | 13.06 |
| 7 | 0.35 | 221.42 | 17.29 |
| 8 | 0.36 | 240.18 | 20.61 |
| 9 | 0.39 | 267.45 | 27.61 |
| 10 | 0.40 | 279.37 | 31.05 |

从表 2 可以看出, 整个驱动系统的输出功率随着流量的增加而增加, 驱动系统最大输出功率 31.05 kW, 而系统输入功率(即汽车发动机输出功率)为 110 kW, 可以得到整个驱动系统的效率为 28%。研究表明, 冷喷系统效率一般在 30% 左右^[10], 因此本文所建立的实验系统及计算方法比较合理。

3 喷流驱动系统数值模拟

为了对本套装置的实验结果的合理性进行验证, 本文基于 CFD 数值模拟技术, 针对实验的各个工况进行仿真计算。计算网格使用 ICEM CFD 生成的全结构网格, 管道壁面添加附面层模拟流动的粘性作用, 网格如图 5 所示, 总量 130 万。

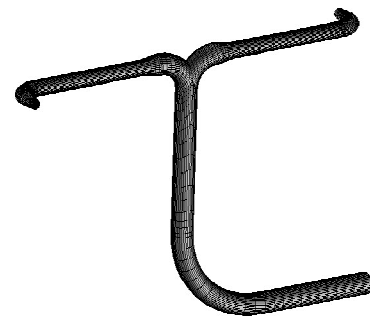


图 5 计算网格

Fig. 5 Calculation grid

数值计算使用的控制方程为积分形式的雷诺平均 N-S 方程, 湍流模型选择 $k-\epsilon$ 模型^[11], 该模型因其计算收敛性和精确性都符合工程计算的要求, 因而在一般工业特别是内流的模拟中被广泛使用。基于试验的入口出口条件, 数值模拟的边界条件设置为一个压力入口(给定总压以及总温)和两个质量流量出口, 其余设置为无滑移壁面条件。以入口总压 114 540 Pa、总温 330 K 工况为例, 计算得出的结果如表 3 所示, 计算得出的压力云图以及管道内空间流线如图 6~图 7 所示。

表 3 喷流数值模拟的计算结果

Table 3 Calculated value of jet-flow numerical simulation

| 名 称 | 总压/kPa | 总温/K | 推力/N | 功率/kW |
|------|--------|--------|-------|-------|
| 实验值 | 114.54 | 330.33 | 23.25 | 6.97 |
| 计算值 | 114.54 | 330.33 | 22.96 | 6.53 |
| 误差/% | — | — | 1.25 | 6.31 |

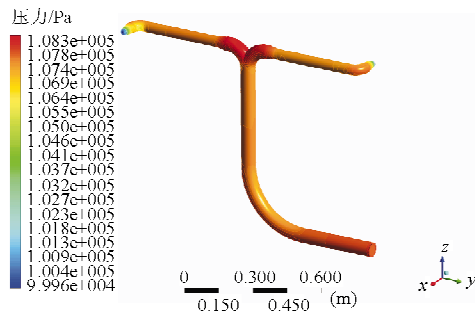


图 6 物面压力云图

Fig. 6 Surface pressure contour

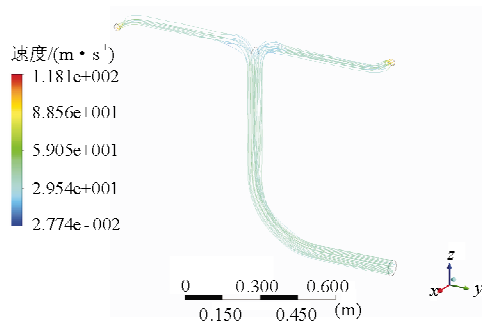


图 7 管道空间流线

Fig. 7 Pipeline space streamlines

针对其他实验工况同样进行数值模拟,得出的推力以及功率的曲线如图 8~图 9 所示。

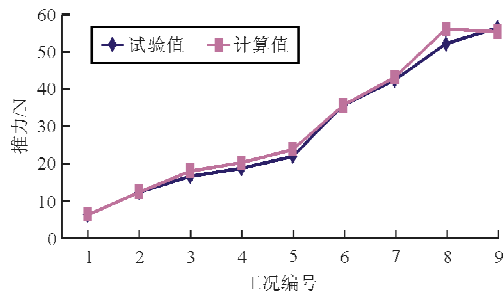


图 8 推力计算

Fig. 8 Thrust calculation

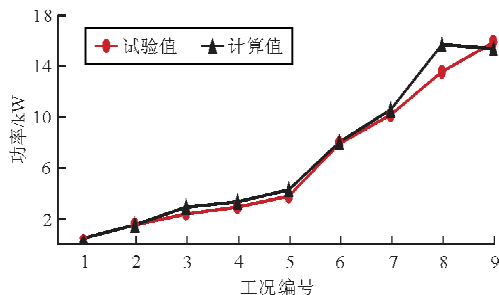


图 9 功率计算

Fig. 9 Power calculation

从图 8~图 9 可以看出,计算值与实验值吻合的很好,表明数值方法合理可靠,也说明 CFD 数值模拟技术在喷气驱动系统的设计研究中的实用价值,它可以为驱动系统的效率评估以及动力来源的选择与适配提供一定的参考。

4 结论

针对桨尖喷气驱动装置的设计与试验研究,初步完成了一套驱动系统的系统化研究方法,得到的结论有:

(1) 设计的压气机式喷气驱动系统试验值与已有研究结果符合,证明了装置设计是合理的。

(2) 桨尖喷气驱动装置的功率以及推力随着入口总压的提高,流入管道的流量增大,喷管出入口压差增大,喷气速度增加,从而使得总推力以及功率增大。CFD 数值仿真结果与试验趋势吻合的很好,除了个别的工况,推力以及功率的误差最大不超过 10%,也说明利用 CFD 仿真技术可以很好的对喷流驱动系统进行模拟计算。

(3) 文中的设计与试验、数值模拟研究工作对以后的喷气驱动系统效率以及选型适配方面的研究具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] Robert E H. Reaction drive rotors-lessons learned[R]. AIAA-92-4279, 1992.
- [2] Rutherford J W, Bass S M, Larsen S D. Canard rotor/wing: a revolutionary high-speed rotorcraft concept[J]. AIAA-93-1175, 1993.
- [3] 张呈林. 直升机总体设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Zhang Chenglin. Design of the helicopter[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [4] Kyung-Iloon Park, Nam Seo Goo. Design and test power system for a reduced-scale tip-jet rotor using a small turbo-jet engine[J]. AIAA-2003-6570, 2003.
- [5] 吕佩剑, 詹浩, 贾广生. 一种桨尖喷微型动力系统的设计与实现[J]. 航空工程进展, 2012, 3(2): 201-205.
Lü Peijian, Zhan Hao, Jia Guangsheng. Design and fabrication of a micro mix exhaust engine for the warm cycle tip-jet configuration[J]. Advance in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(2): 201-205. (in Chinese)
- [6] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

(下转第 181 页)

- weight and disk life estimation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 126(2): 265-270.
- [7] 《航空发动机设计手册》编委会. 航空发动机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
Editorial Board of *Design Manual of Aero Turboengine*. Design manual of aero turboengine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [8] Vivek Sanghi, Kishore Kumar, V Sundararajan. Preliminary estimation of engine gas-flow-path size and weight[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(2): 208-214.
- [9] Walsh P P, Paul F P. Gas turbine performance[M]. 2nd ed. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [10] James W Gauntner. Algorithm for calculating turbine cooling flow and the resulting decrease in turbine efficiency[J]. NASA TM-81453, 1980.
- [11] 方昌德. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
Fang Changde. World aviation engine manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [12] 胡晓煜. 世界中小型航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
Hu Xiaoyu. The world's small and medium-sized aviation engine manual [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:

樊巍(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:发动机总体设计。

陈玉春(1967—),男,教授,博导。主要研究方向:发动机总体设计。

杨龙(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:发动机总体设计。

李维(1973—),男,博士,研究员。主要研究方向:叶轮机械设计。

张鑫(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:发动机总体设计。

(编辑:赵毓梅)

(上接第174页)

- Pu lianggui, Ji minggang. Design of machinery[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [7] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW8.2 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
Chen Xihui, Zhang Yinhong. LabVIEW8.2 Programming from base to the master[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [8] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
Wang Xinyue. The basis of aerodynamics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. (in Chinese)
- [9] Thompson T L, Smith R L, Shockey G A. Wind tunnel test results for a canard rotor/wing aircraft configuration[C]. USA: American Helicopter Society 57th Annual Forum, 2001.
- [10] 邓阳平. 新概念旋转机翼飞行器旋翼技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
Deng Yangping. Research on rotor technology for rotor wing plane[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [11] 李阳, 张国伟, 张国栋. 基于 FLUENT 的火箭发动机喷管流场数值模拟[J]. 机电技术, 2013, 13(3): 13-15.
Li Yang, Zhang Guowei, Zhang Guodong. Nozzle flow numerical simulation of rocket engine based on FLUENT[J]. Electrical Technology, 2013, 13(3): 13-15. (in Chinese)

作者简介:

陈白冰(1987—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器总体设计。

詹浩(1972—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器设计、飞行力学、流体力学。

米百刚(1989—),男,博士研究生。主要研究方向:计算流体力学。

(编辑:赵毓梅)