

# 飞机液冷系统导管流量标定方法

赵颖杰, 吴惠祥, 张贺磊

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

**[摘要]** 机载液冷系统随着大功率电子设备的发展成为飞机制冷系统的一个发展方向,而目前液冷剂流量作为制冷系统的一个重要指标其标定方法尚不成熟。在分析差压式流量测量原理的基础上,提出通过液冷系统中原有的变径管和直角弯头产生的压力变化来获得差压式流量计算中流量系数的方法,同时搭建了机载液冷系统流量标定试验台。研究了制冷液温度和测量段入口压力对流量测量的影响,并据此获得了流量修正的结果。研究表明:温度对流量测量的影响相对较大,该影响跟流量的变化关系不大,并随着压力的增加而减少。压力对制冷液流量的测量影响相对较小,随着温度的增大而增大。该研究结果对机载液冷系统的计算提供技术参考。

**关键词:** 液冷系统; 流量标定; 修正系数法; 差压式流量测量

## Method of Flow Calibrating of Aircraft Liquid Cooling System

ZHAO Yingjie, WU Huixiang, ZHANG Helei

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** With the development of the high power electronic equipment ,aircraft liquid cooling system will lead a new direction with its unique advantage. And the flow calibrating method of the refrigerant flow rate which is as an important parameter of the cooling systems is not yet mature. Based on the analysis of measuring principle of the differential pressure type flowmeter, the method of obtaining the flow coefficient by the differential pressure of the reducer and square bend of the aircraft liquid cooling system is introduced. The test bed of flow calibrating is built, and the influence of the temperature and the inlet pressure of the duct on the flow rate are investigated. The modified index of the flow rate has been posed based on the experimental data. The results show that temperature compared to the pressure has more influence on the flow rate measurement and the influence decreases with the increasing of inlet pressure. The effect of pressure on the measurement of flow rate is not statistically significant, and the effect increases with temperature. This work could be helpful for the simulation of the aircraft liquid cooling system.

**Keywords:** Liquid cooling system; Flow calibrating; Correction factor method; Differential pressure type flowmeter

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.132

大量航电设备的使用及雷达功率的不断提高,空气冷却已不能完全满足设备的冷却要求,在此情况下液体冷却系统应运而生,其主要特点是制冷能力大,系统设计简单,采用燃油或者冲压空气二次冷却,对飞机性能没有太大的影响。液冷系统的主要特性参数除温度和压力以外,制冷液的流量也是一个重要的参数,它的获得主要通过试验测量进行标定。传统的液体流量测量方法有很多,但在飞机上实施有一定的难度,存在泄漏、受飞行工况制约、制冷液的有毒性等诸多不利因素,因此必须寻找一种安全可行的测量方法<sup>[1-4]</sup>。

国内飞机液冷系统的研究刚刚起步,技术尚不完善,涉及的液体流量测量方法并不多<sup>[5-7]</sup>,地面试验采用

的测试设备体积较大难以在飞机上实施,另外国外的相关报道也甚少并涉及设备的成本问题。本文提出了一种飞机液冷系统流量的测量方法,并通过修正系数法对液冷剂的流量进行修正标定,为飞机液冷系统流量的测量和计算提供技术参考。

## 1 流量标定方案的提出

流量测量的方法有很多,如差压式流量计、容积式流量计、浮子流量计、叶轮式流量计、电磁流量计、涡旋式流量计及超声波流量计等<sup>[8-10]</sup>,但大部分需要购置专门的测量仪,在飞机的安装、安全性校核等方面存在较多的问题,较为可行的是差压式流量测量的方法<sup>[11-12]</sup>。

差压式流量测量的原理是在充满液体的管道中固定放置一个流通面积小于管道截面积的节流件,则管内流速在通过该节流件时造成局部收缩,在收缩处流速增加,静压力下降,因此在节流件前后将产生一定的压力差。实践表明,对一定形状和尺寸的节流件,一定的测压位置和前后直管段,在一定的流体参数情况下,节流件前后的压差与流量之间有一定的函数关系,因此可以通过测量节流件前后的压差来测量流量。

$$G = \frac{\mu \xi \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 \beta^4}} A_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)},$$

式中:  $G$  为管道制冷液的流量;  $\mu$  为流速收缩系数;  $\xi$  为流速修正系数;  $\psi$  为取压系数;  $\beta$  为节流装置的直径比。

$$a = \frac{\mu \xi \sqrt{\psi}}{\sqrt{1 - \mu^2 \beta^4}}$$
 称为流量系数,它是一个与节流形

式、直径比、取压方式、流量雷诺数及管壁粗糙度等有关的系数。由于  $\mu$ 、 $\xi$ 、 $\psi$  无法测量,所以流量系数一般是由试验直接确定。

机载液冷系统的流量按此方法进行测量较为困难,主要是由于飞机上液冷系统的管道无法做到节流件前后直管段的长度要求。其次,在液冷系统的管道上加装节流装置会影响整个系统的流阻特性。从液冷系统的技术指标可以看出,雷达组件的入口压力为 930kPa,配置一节流元件可能产生 50kPa,甚至更大的压力损失,对系统的性能造成较大的影响,严重时可能导致系统无法循环;此外加装节流装置增加了制冷液泄漏的可能性,因此飞机制冷液的流量只能借鉴差压式流量计测量液体的流量的原理,通过地面标定试验,得出相应的流量曲线。

如图 1 所示,雷达出口的冷却导管是一段变径的导管,导管直径分别为 18、16、20mm,并有一直角弯头。和

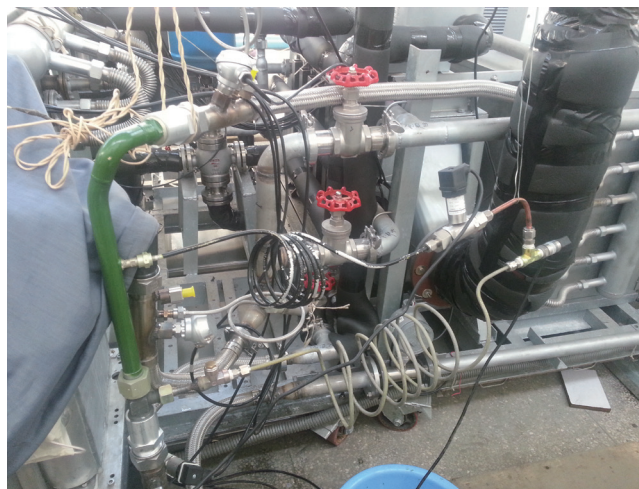


图1 液冷系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the aircraft liquid cooling system

节流件一样,在变直径导管的进出口和直角弯头同样会产生压力损失。因此可通过该变径管或直角弯头通过在地面标定实验的方法得到流量系数  $a$ ,从而不破坏原有液冷系统的布局及增加额外的压力损失。

## 2 试验台的搭建及试验过程

根据上述提出的流量标定方案,搭建飞机液冷系统导管流量标定试验平台。实验系统由 6 个部分组成:水泵、过滤器、加热器、进口阀门、出门阀门、试验件。试验连接示意图如图 2 所示。

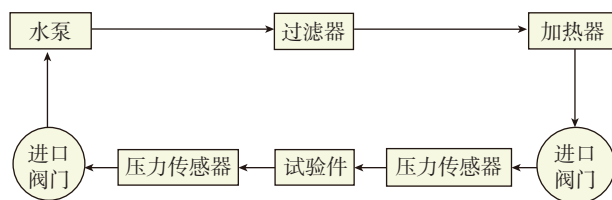


图2 试验平台连接示意图

Fig.2 Diagram of connection of experiment platform

如图 2 所示,水泵用来提供连续的流体,加热器主要用来调节冷却液的温度,通过调节进口阀门的开口度来调节进入时间件入口的液体压力。

将需要检测的导管(试验件)接入到试验平台中,通过试验台在不同的压力和温度的情况下,调整流经管道的乙二醇的流量,通过在试验件前后端设置的压力传感器来得到试验件进出口的压力差。

## 3 试验结果分析

### 3.1 温度特性分析

(1) 当导管内制冷液压力为 200kPa,温度分别为 20℃、40℃、60℃时,制冷液的流量和压差的关系曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,当导管内制冷液压力为 200kPa 时,温

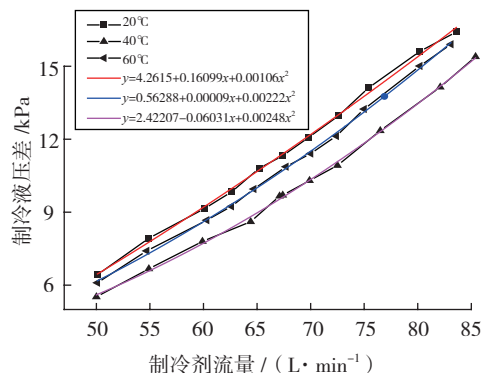


图3 制冷液压力为200kPa时流量和压差的关系图

Fig.3 Variation of pressure difference with flow rate of the refrigerant fluid at the pressure of 200kPa

度对流量测量的影响随着流量的增加相对恒定,即在不同的制冷液流量情况下,制冷液的压差随着温度的增加增幅较为一致。且在相同的制冷液流量条件下,温度对压差测量值的影响为 9% 左右。

(2) 当导管内制冷液压力为 350kPa, 温度分别为 20℃、40℃、60℃时,制冷液的流量和压差的关系曲线如图 4 所示。

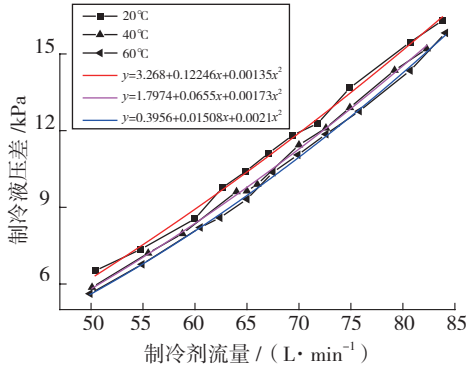


图4 制冷液压力为350kPa时流量和压差的关系图  
Fig.4 Variation of pressure difference with flow rate of the refrigerant fluid at the pressure of 350kPa

由图 4 可知,当导管内制冷液压力为 350kPa 时,温度对流量测量的影响跟压力为 200kPa 时较为接近,但此时温度对压差测量值的影响相较 200kPa 时较小,为 7% 左右。

### 3.2 压力特性分析

(1) 管内液体温度分别为 20℃时,管道内液体压力分别为 200kPa、350kPa 时制冷液的流量和压差的关系曲线如图 5 所示。

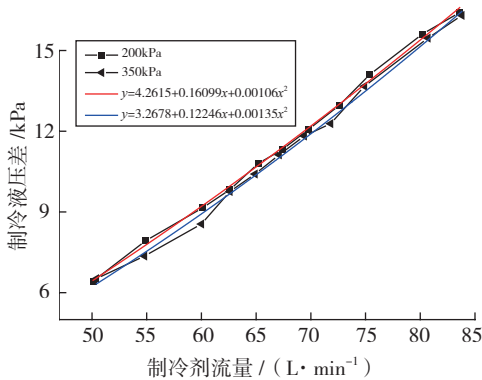


图5 制冷液温度为20℃时流量和压差的关系图  
Fig.5 Variation of pressure difference with flow rate of the refrigerant fluid at the temperature of 20℃

(2) 管内液体温度分别为 40℃时,管道内液体压力分别为 200kPa、350kPa 时制冷液的流量和压差的关系曲线如图 6 所示。

(3) 管内液体温度分别为 60℃时,管道内液体压力

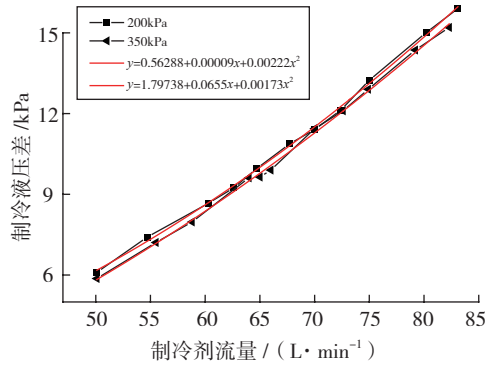


图6 制冷液温度为40℃时流量和压差的关系图  
Fig.6 Variation of pressure difference with flow rate of the refrigerant fluid at the temperature of 40℃

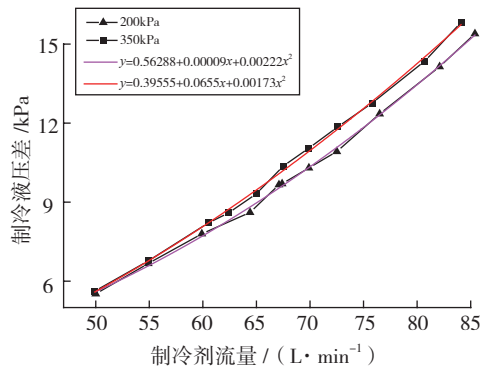


图7 制冷液温度为60℃时流量和压差的关系图  
Fig.7 Variation of pressure difference with flow rate of the refrigerant fluid at the temperature of 60℃

分别为 200kPa、350kPa 时制冷液的流量和压差的关系曲线如图 7 所示。

由图 5~7 可知,压力对制冷液流量测量的影响相对较小,且随着温度的增大而增大。

由上述分析可知,温度对流量测量的影响相对较大,该影响跟流量的变化关系不大,并随着压力的增加而减少。压力对制冷液流量的测量影响相对较小,随着温度的增大而增大。

为了减少上述影响对实际导管应用的影响,本文提出相应的流量修正系数来减少该影响。

根据上述试验结果,采用修正系数法对制冷剂流量进行修正。

## 4 结论

本文在分析差压式流量测量原理的基础上,基于流体在变径管和直角弯头中流动特性给出了差压式流量计算中流量系数的获得方法。同时,搭建了机载液冷系统流量标定试验台,研究了制冷液温度和测量段入口压力对流量测量的影响,并根据试验结果提出了流量修正的方法。研究结果表明:温度对流量测量的影响相对较

大,该影响跟流量的变化关系不大,并随着压力的增加而减少。压力对制冷剂流量的测量影响相对较小,该影响随着温度的增大而增大。上述研究结果对机载液冷系统的设计计算提供一定的技术参考。

### 参考文献

- [1] 张静. 差压式流量测量的新途径[J]. 石油化工自动化, 2004(5): 87-89.
- ZHANG Jing. A new way of the flow meter of pressure difference[J]. Automation In Petro-Chemical Industry, 2004(5):87-89.
- [2] 李郁侠, 武周虎. 利用弯管测量管道流量的理论分析与实验研究[J]. 灌溉排水, 1995, 14(1):6-11.
- LI Yuxia, WU Zhouhu. Theoretical analysis of and experimental investigation on DIS charge measurement by angle PIPE[J]. Irrigation and Drainage, 1995, 14(1):6-11.
- [3] 孙志强, 周子民, 张宏建. 弯管流量计测量特性的数值模拟与试验研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6):1413-1415.
- SUN Zhiqiang, ZHOU Jiemin, ZHANG Hongjian. Numerical simulation and experimental research on measurement characteristics of elbow meter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(6):1413-1415.
- [4] 李郁侠, 廖伟丽, 田嘉宁. 弯管流量与压差的回归分析及流量系数计算[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4):373-376.
- LI Yuxia, LIAO Weili, TIAN Jianing. Regression analysis concerning discharge and pressure difference of elbow and calculation of discharge coefficient [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1998, 14(4):373-376.
- [5] SILVA F S, VELAZQUEZ M T, HERNANDEZ J R. Experimental study for the use of elbows as flowmeters[C]. Proceedings of American Society of Mechanical Engineers of Fluids Engineering Division on Fluid Flow Metering, 1997:1-10.
- [6] 郑建光, 梁国伟. 弯管流量计的特性试验研究[J]. 中国计量学院学报, 1999, 19(1):39-44.
- ZHENG Jianguang, LIANG Guowei. The experiment study for characteristics of the elbow flowmeters[J]. Journal of China Institute of Metrology, 1999, 19(1):39-44.
- [7] 田野, 王岳, 郭士欢, 等. 常见流量计的应用[J]. 当代化工, 2011, 40(12):1294-1296.
- TIAN Ye, WANG Yue, GUO Shihuan, et al. Application of common flowmeters [J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(12):1294-1296.
- [8] 王茜. 流量计的应用现状及发展趋势[J]. 科教前沿, 2008(3):32.
- WANG Qian. The application and the development of flowmeters[J]. Science & Technology Information, 2008(3):32.
- [9] 郭新勇, 尤希凤, 李永远, 等. 新型变径孔板流量计[J]. 河南职业技术学院学报, 1994, 22(4):13-15.
- GUO Xinyong, YOU Xifeng, LI Yongyuan, et al. A new orifice flowmeter with different diameter[J]. Journal of Henan Vocation Technical Teachers College, 1994, 22(4):13-15.
- [10] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- WU Chigong. Hydraulics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1982.
- [11] 川田裕郎, 小宫勤一, 山崎弘郎. 流量测量手册[M]. 北京:

中国计量出版社, 1982.

CHUANTIAN Yulang, XIAOGONG Qinyi, SHANQI Honglang. The flow measurement manual [M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1982.

[12] 梁国伟, 蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

LIANG Guowei, CAI Wuchang. The flow measurement technology and instruments [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

(责编 宁宁)

(上接第 131 页)

WU D Y. Comparison between two kinds of conventional labyrinth[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(4):397-400.

[7] 鄢景, 杨自春. 动力涡轮有冠及无冠叶栅顶部二次流的数值分析[J]. 燃气轮机技术, 2011, 24(2):30-34.

YAN J, YANG Z C. Numerical analysis of tip secondary flow in rotor cascades with or without shroud in power turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2011, 24(2):30-34.

[8] 李钰洁, 刘永葆, 高杰. 间隙流动对涡轮叶片温度场分布影响的数值研究[J]. 海军工程大学学报, 2013, 6(25):24-29.

LI Y J, LIU Y B, GAO J. Numerical analysis of effect of clearance flow on distribution of temperature field in turbine blade[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 6(25):24-29.

[9] 黄晓光, 吴丁毅. 封严齿腔内流动及旋涡分布和顶板换热特性的实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(4):20-25.

HUANG X G, WU D Y. The investigation of flow field and heat transfer in cavity of labyrinth seal[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(4):20-25.

[10] 刘高文, 蒋兆午, 务为涛, 等. 基于数值模拟的矩形凹槽对直通型齿封严特性影响研究[J]. 推进技术, 2013, 34(2):181-186.

LIU G W, JIANG Z W, WU W T, et al. Investigation on effects of rectangular groove on leakage of straight-trough labyrinth seal based on numerical simulation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(2):181-186.

[11] 高杰, 郑群, 李义进. 动叶顶部蜂窝面迷宫密封对涡轮级气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1):160-168.

GAO J, ZHENG Q, LI Y J. Effect of labyrinth-honeycomb seal of shrouded rotor blades on the aerodynamic performance of the turbine stage[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1):160-168.

[12] 贾惟, 刘火星. 涡轮叶栅叶冠泄漏流动数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(3):316-325.

JIA W, LIU H X. Numerical investigation on shroud leakage flow in turbine cascade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(3):316-325.

[13] 马石, 刘永葆, 缪四春, 等. 叶冠齿顶间隙对涡轮气动性能的影响研究[J]. 机械工程与自动化, 2015 (2):29-31.

MA S, LIU Y B, MIU S C, et al. Effect of tip clearance on aerodynamic performance of turbine[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(2):29-31.

(责编 李丹)