

飞机空调系统中饱和水蒸气压的计算

南京航空航天大学 方贤德

【摘要】 提出了方便实用的饱和水蒸气压方程,与空调系统计算中原来使用的方程相比,新方程在计算工作量相当的情况下,显著提高了计算准确度,能在飞机空调系统可能的饱和温度范围内,获得满意的计算结果。

主题词: 飞机 空气调节 饱和 蒸汽压 计算

分类号: V245.34

1 饱和水蒸气压方程的研究及其进展

对于饱和水蒸气压的计算,我国飞机空调系统中普遍采用马格纳斯方程汽-液相平衡的形式: $p_s = p_{s0} \times 10^{\frac{7.45t}{235+t}}$ 。式中 p_s 为饱和水蒸气压; p_{s0} 为 0°C 时的饱和水蒸气压; t 为计算状态空气温度 ($^\circ\text{C}$)。此式在 $t \geq 0^\circ\text{C}$ 时的误差尚可接受,但当 t 低于 0°C 较多时,其误差成为应考虑的问题。

在众多的饱和水蒸气压方程中,文献[1-7]列出较有影响的几种。通过比较可得如下结论:(1) 当 $t < 0^\circ\text{C}$ 时,马格纳斯方程汽-液相平衡形式及 Antoine 方程误差最大,不宜采用;(2) 当 t 为 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 时,文献[5-7]方程精确度相当;(3) 对于上机计算, $-100^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ 时推荐使用文献[5]方程, $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 时,推荐使用文献[7]方程。

2 飞机空调系统中 H_2O 的相平衡特点

马格纳斯方程中的 $p_s = p_{s0} \times 10^{\frac{7.45t}{235+t}}$ 在气象上广泛应用于 0°C 以下的云层中饱和水蒸气压的分析计算。在云中, H_2O 常常在 -20°C , 甚至 -40°C 的低温条件下,仍能以液态形式存在^[8]。

在飞机空调系统中, H_2O 在 0°C 以下的相平衡是气-固相平衡。例如,在低压除水或无除水措施的空气循环系统中,冷却涡轮出口的空气温度不允许低于 0°C ,以防止结冰堵塞^[10,11]。我国在高压除水系统的实验和装机飞行中,都证实了上述事实。可见,在高压除水冷却涡轮出口的饱和水蒸气分压力计算中,选用马格纳斯方程汽-液相平衡的形式是不适当的。

3 飞机空调系统计算用饱和水蒸气压方程

对于编程上机计算, $t < 0^\circ\text{C}$ 时,推荐 ASHRAE 选用文献[5]中的方程

$$p_s = \exp(C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7\ln T) \quad (1)$$

式中, T 单位为 K, p_s 以下各式单位均为 Pa, 各常数列于表 1。

当 $t \geq 0^\circ\text{C}$ 时,推荐文献[7]中的方程

$$p_s = 221.20 \times 10^5 \exp\{[7.21275 + 3.981(0.745 - T_r^2) + 1.05(0.745 - T_r)^3](1 - 1/T_r)\} \quad (2)$$

式中 $T_r = T/T_c = T/647.3$ 。这二方程均较复杂,马格纳斯方程比较简单,但精确度不高,因此,有必要提出新的简便实用的方程。

表 1 方程各常数

温度(°C)	C_1	C_2	C_3	C_4
- 100~0	- 5674. 5359	6. 3925247	- 0. 009677843	$6. 2215701 \times 10^{-7}$
0~200	- 5800. 2206	1. 3914993	- 0. 04860239	$4. 1764768 \times 10^{-5}$
温度(°C)	C_5	C_6	C_7	
- 100~0	$2. 0747825 \times 10^{-9}$	$- 9. 484024 \times 10^{-13}$	4. 1635019	
0~200	$- 1. 4452093 \times 10^{-8}$	0	6. 5459673	

本文选用安东尼方程的结构形式,根据饱和水蒸气骨架表和ASHRAE、Houghton提出的水蒸气表^[9,5,10],利用回归分析方法,拟合出0℃以上和0℃以下的饱和水蒸气压方程如下:

$$p_s = \exp\left[29. 05745 - \frac{6211. 876}{t + 274. 3542}\right] \quad (- 100^{\circ}\text{C} \leq t \leq 0. 01^{\circ}\text{C}) \quad (3a)$$

$$p_s = \exp\left[23. 29902 - \frac{3890. 939}{t + 230. 3980}\right] \quad (0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}) \quad (3b)$$

式(3a)在- 100℃~0. 01℃范围内,最大相对误差为0. 14%,平均相对误差为0. 08%;式(3b)在0~300℃范围内,最大相对误差为0. 4%,平均相对误差为0. 24%。本方程与ASHRAE^[5]推荐方程的精确度相比,在 $t \leq 0$ 时相当,在 $t > 0$ 时很接近,而其结构形式要简单得多。对于飞机空调系统的分析计算,具有足够的精确度。

结论 (1) 我国目前飞机空气调节系统内饱和水蒸气压计算使用的方程有较大误差,用于高压除水系统某些情况(例如冷却涡轮出口)的计算是不适当的,造成这一现状的主要原因是系统中H₂O的相平衡特点存在误解。(2) 本文提出形式简单、精确度高、使用温度范围广的饱和水蒸气压方程,完全满足空调系统计算的特点和要求。(3) 方程不仅适用于飞机空调系统计算,同时也适用于飞机防冰计算以及民用空调、制冷中湿空气的饱和水蒸气分压力计算。

参 考 文 献

- 童景山,李敬. 流体热物理性质的计算. 北京:清华大学出版社,1982: 109~115
- Reid R C, Prausnitz J M, Sherwood T K. The properties of gases and liquids. McGraw-Hill Book Company, Third Edition, 1977
- 苏长荪等, 高等工程热力学. 北京: 高等教育出版社, 1987: 482
- 朱炳海等. 气象学词典. 上海辞书出版社, 1985: 77
- ASHRAE Handbook, 1985 fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1985
- Allyn Heinrich et al. Engine inlet anti-icing system evaluation procedure. AD A085179, 1980
- 严家骥,尚德敏. 湿空气和烃燃气热力性质图表. 北京: 高等教育出版社, 1989: 4~5
- R. G. 巴里, R. J. 乔利著, 施尚文等译. 大气、天气和气候. 北京: 高等教育出版社, 1982: 88
- E. 斯米特, U. 格里古尔著, 赵兆颐译. 国际单位制的水和水蒸气性质. 北京: 水利电力出版社, 1983
- [英] J. T. 霍顿著, 中国科学院大气物理研究所译. 大气物理学. 科学出版社, 1981: 201
- [美] 自动车工程师协会编, 吴临武译. 飞机空气调节系统设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1977: 45

(责任编辑 杨再荣)

STUDY ON SATURATED WATER VAPOR PRESSURE EQUATIONS FOR CALCULATION OF AIRCRAFT AIR- CONDITIONING SYSTEMS

Fang Xiande

(*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016*)

ABSTRACT

There are notable errors in saturated water vapor pressure equations used in the calculation of aircraft air- conditioning systems. With the aid of regression technique, a new water vapor pressure equation is derived from recent saturation pressure data of pure water and ice. Compared with the equations used at present, the new equation remains simple in form, but its accuracy is enhanced so magnificently as to give satisfactory results for aircraft air- conditioning engineering in possible saturation temperature range.

Key words Aircraft Air conditioning Saturation Vapour pressure Calculations

LQG/ LTR DESIGN METHODOLOGY FOR A MULTIVARIABLE AEROENGINE CONTROLLER

Huang Wanwei and Zhang Jiazhen

(*7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*)

ABSTRACT

This paper researches the design methodology for multivariable robust controller of aero- engine. A small- divergence state space model for a given jet aero- engine has been established with the difference method. The Linear Quadratic Gaussian with Loop Transfer Recovery (LQG/LTR) method has been used to design a BIBO robust controller for the engine. The functions of the controller such as command following, decoupling and disturbance rejection have been considered. It is demonstrated that the LQG/LTR controller has excellent robustness for the uncertainty of the plant model.

Key words Robust control Multiparameter control Singular solutions

APPLICATION OF KALMAN FILTERING FOR AN AEROENGINE PARAMETER ESTIMATION

Liu Xiaoyong and Fan Siqi

(*7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710071*)

ABSTRACT

The Kalman filtering method for an aeroengine parameter estimation has been investigated by using flight data. The research purpose is to solve the Kalman filtering divergence problem in the aeroengine parameter estimation. The main content is the integrated Kalman filtering method of the adaptive processing, the compensation in flight condition and the aeroengine modification. Finally, the results of the parameter estimation are presented.

Key words Kalman filtering Parameter estimations Aircraft engines