

文章编号:1006-7329(2000)03-0118-04

# 饱和水蒸汽密度与压力 及密度与温度的经验公式推导

118-121

刘战国 周齐国  
(重庆建筑大学 机电学院, 重庆 400045)

TP311.5-2  
F4831  
TK123

**摘要:**利用 Excel 软件推导出饱和水蒸汽密度和压力及密度和温度的经验公式,并由此提出了一种回归分析的新方法。

**关键词:**饱和水蒸汽; 密度; 饱和蒸汽压; 饱和温度; 回归分析; Excel 软件

**中图分类号:**TP311.52

**文献标识码:**A

关于饱和水蒸汽的热力性质,国际专门组织已制定发表了国际骨架表,表中所列数据被公认为是可靠的,这些数据我们可以在空调类数据手册中找到,对于表中未列出的数据可以通过插值法估算出。由于计算机技术的发展,计算机已在工业中得到广泛应用,通过插值法计算表中未列出的数据的方法,已不再适用于计算机处理大批数据,有必要将数据公式化,这样既适合计算机处理大批数据,又可以将此公式作为经验公式用于工程计算。因此,利用数据手册中提供的有限数据进行回归分析,以得到一定精度的回归方程是简单而又可靠的方法。本文利用 Excel 软件中回归分析的功能,推导出饱和水蒸汽密度与压力(0.001MPa~10.0MPa)及密度与温度(10℃~300℃)的回归方程,并由此提出了一种简单易行的新回归分析方法。

## 1 经验方程的推导

回归分析的方法有多种,最小二乘法是最基本的一种。下面笔者就采用软件工具包 Excel 对饱和水蒸汽密度与压力及密度与温度的经验公式进行回归分析。

已知压力  $p$  与比容  $V$  的对应关系如表 1 所示:

### 1.1 对该表数据进行分段处理

分段的原则是:

1) 各数据段内数据间的间隔相等,如数据 0.002 0~0.001 0 及 0.003 0~0.002 0 则可以将其划分为第一数据段。

2) 各数据段内数据数目适当。显然,各数据段中数据数目越多,在计算机计算时其选择分支越少,节约了计算机判断的时间与编程时间;各数据段中数据数目越少则回归精度越高。因此要适当划分数据段内数据数目,以使其既能满足回归精度的要求,又不至于分段过多。

根据以上两条原则,数据可分为 10 段即 0.001 0~0.010 0, 0.010~0.030, 0.030~0.10, 0.10~0.20, 0.20~0.50, 0.50~1.20, 1.20~2.00, 2.00~3.00, 3.00~5.00, 5.00~10.00(单位均为

\* 收稿日期:1999-10-07

作者简介:刘战国(1975-),男,山东聊城人,硕士生,主要从事建筑智能化研究。

MPa)

### 1.2 利用 Excel 工具求解回归方程

将已知数据分段后,即可利用 Excel 软件求解各段函数方程。下面举例求解数据段 1 的回归方程。步骤如下:

1) 将数据段 1 中各数据对应输入 Excel 表格中,即将数据表 1 中数据段 1 的压力数据依次输入第一行,比容数据依次输入第二行,密度(即比容的倒数)输入第三行(密度输入可以利用 Excel 的计算功能)。

2) 在菜单条“插入(I)”项中选择“图表(H)…” ,此时弹出“图表向导”对话框,根据此对话框完成以下各步骤:

(1) 选择图表类型,本次计算选择“折线”型。单击“下一步”按钮:

表 1 饱和水蒸汽比容与压力对应关系表

饱和水蒸汽表(按压力排列)							
饱和压力 $P_s(\text{MPa})$	饱和比容 $V(\text{m}^3/\text{kg})$	饱和压力 $p_s(\text{MPa})$	饱和比容 $V(\text{m}^3/\text{kg})$	饱和压力 $p_s(\text{MPa})$	饱和比容 $V(\text{m}^3/\text{kg})$	饱和压力 $p_s(\text{MPa})$	饱和比容 $V(\text{m}^3/\text{kg})$
0.0010	129.208	0.070	2.365 8	0.80	0.240 30	3.00	0.066 62
0.002 0	67.006	0.080	2.087 9	0.90	0.214 84	3.50	0.057 02
0.003 0	45.668	0.090	1.870 1	1.00	0.194 30	4.00	0.049 74
0.004 0	34.803	0.100	1.694 6	1.10	0.177 39	4.50	0.044 02
0.005 0	28.196	0.12	1.428 9	1.20	0.163 20	5.00	0.039 41
0.006 0	23.742	0.14	1.237 0	1.30	0.151 12	6.00	0.032 41
0.007 0	20.532	0.16	1.091 7	1.40	0.140 72	7.00	0.027 34
0.008 0	18.106	0.18	0.977 75	1.50	0.131 65	8.00	0.023 49
0.009 0	16.206	0.20	0.885 92	1.60	0.123 68	9.00	0.020 46
0.010 0	14.676	0.25	0.718 81	1.70	0.116 61	10.0	0.018 00
0.015	10.025	0.30	0.605 86	1.80	0.110 31		
0.020	7.651 5	0.35	0.524 25	1.90	0.104 64		
0.025	6.206 0	0.40	0.462 42	2.00	0.099 53		
0.030	5.230 8	0.45	0.413 92	2.20	0.090 64		
0.040	3.994 9	0.50	0.374 81	2.40	0.083 19		
0.050	3.241 5	0.60	0.315 56	2.60	0.076 85		
0.060	2.732 9	0.70	0.272 74	2.80	0.071 38		

(2)选择图表数据源,本次计算,数据区域用鼠标左键将第 3 行密度数据选中,“系列产生”选择“行”,单击“系列”,“分类轴(X)标志(T)”用鼠标左键将第 1 行压力数据选中。单击“下一步”按钮;

(3)对图表选项进行设定,本次计算采用默认值。单击“下一步”按钮;

(4)对图表位置进行设定,本次计算采用默认值。单击“完成”按钮。

3) 在图表 1 曲线上单击右键,在弹出的菜单中选择添加趋势线,则弹出“添加趋势线”对话框。

(1)在“趋势预测/回归分析类型”中选择“多项式”;“阶数”选择采用试探法,即先让阶数=2(因为通过观察,此曲线不是直线,阶数不能为 1),看回归精度是否满足要求,如果不满足则提高阶数。本计算中阶数=3 即可满足要求误差小于 3%的精度要求。

(2)单击“选项”,选中“显示公式(E)”与“显示 R 平方值(R)”,单击“确定”按钮。则生成图 1。

4) 图中生成的公式还不是密度与压力的函数,而是密度与自然数的函数,因此还要进行一次转换。

显然,通过转换  $y=x \times 1000$  可以将压力数据转换为自然数。将此转换式代入以上生成的方程式中即得密度与压力的函数。即:

$$y = 0.000003 \times (x \times 1000)^3 - 0.000095 \times (x \times 1000)^2 + 0.007401 \times (x \times 1000) + 0.000448 \\ = 3000 \times x^3 - 95 \times x^2 + 7.401 \times x + 0.000448$$

5) 检验精度是否满足要求。

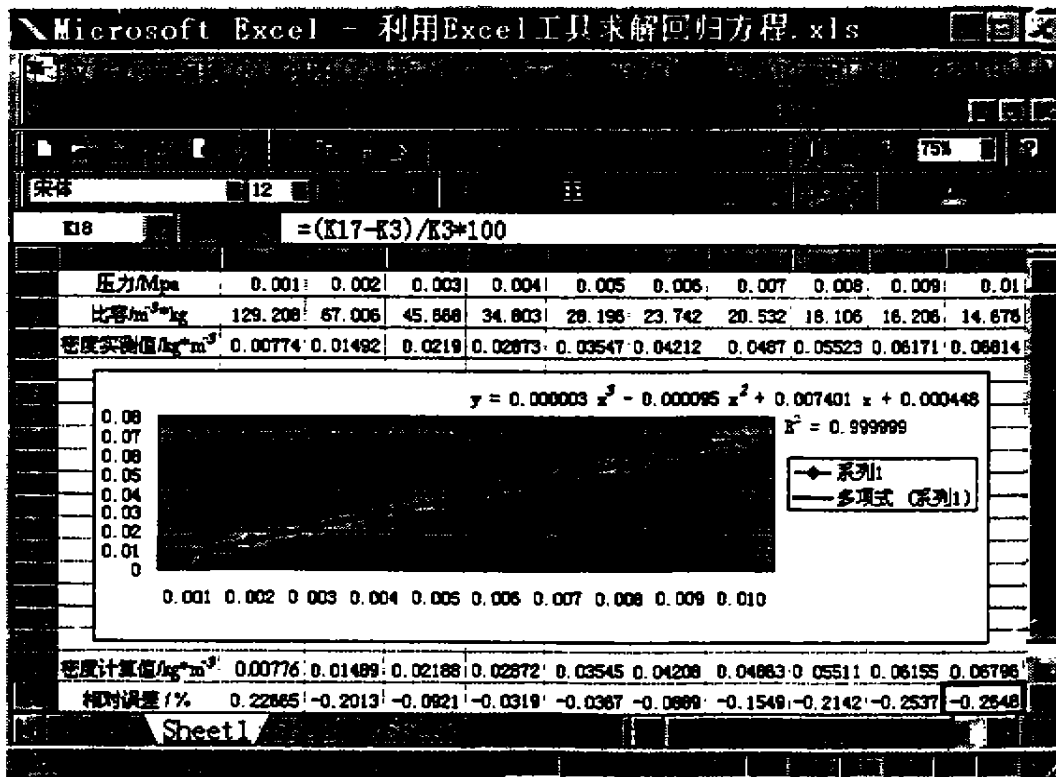


图1 Excel软件计算结果示意图

(1) 检验回归精度指标  $R^2$  是否足够接近于 1。

$R^2$  是反映回归精度的一个指标, 其计算公式为

$$R^2 = 1 - SSE/SST$$

其中:  $SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$      $SST = (\sum Y_i) - (\sum Y_i)^2/n$

公式中  $Y_i$  为实测值,  $\hat{Y}_i$  为公式计算值。

(2) 将数据代入公式计算各函数值。如图中第 17 行所示, 计算密度值与密度实测值间的相对误差值, 计算公式为:

$$\text{相对误差} = (\text{密度计算值} - \text{密度实测值}) / \text{密度实测值} \times 100\%$$

结果如图 1 中第 18 行所示。计算相对误差均小于 0.003 的结论, 则符合假定要求精度。(否则将二项式阶数提高或改变回归类型, 或减少数据段内数据数目, 以达到要求精度)。

同理可以求出其它各段数据的回归方程式。

### 1.3 最后列表各分段数据的回归方程式

表2 饱和水蒸汽密度与压力的回归方程表

压力范围(MPa)	密度对于压力的回归方程(kg/m <sup>3</sup> )	精度 $R^2$	最大相对误差(%)
0.001~0.010	$3.000x^3 - 95x^2 + 7.401x + 0.000448$	0.999999	0.30
0.010~0.03	$-10.4x^2 + 6.566x + 0.00355$	0.999999	0.05
0.03~0.10	$-3.1x^2 + 6.093x + 0.01138$	0.999999	0.02
0.10~0.20	$-1.25x^2 + 5.745x + 0.0281$	0.999999	0.02
0.20~0.50	$-0.4x^2 + 5.41x + 0.0632$	0.999999	0.04
0.50~1.20	$-0.09x^2 + 5.089x + 0.1469$	0.999999	0.04
1.20~2.00	$0.01x^2 + 4.865x + 0.2754$	0.999999	0.01
2.00~3.00	$0.05x^2 + 4.711x + 0.4255$	0.999999	0.01
3.00~5.00	$0.08738x^2 + 4.48235x + 0.77771$	1.000000	0.01
5.00~10.0	$0.14871x^2 + 3.79696x + 2.69231$	0.999995	0.09

同理可以求出密度与温度的回归方程表

表3 饱和水蒸汽密度与温度的回归方程表

温度范围(C)	密度对于温度的回归方程(kg/m <sup>3</sup> )	精度 R <sup>2</sup>	最大相对误差(%)
10.0~20.0	0.001(0.020 75x <sup>2</sup> +0.166x+5.674)	0.999 992	0.09
20.0~30.0	0.01(0.00315x <sup>2</sup> -0.027x+1.009 1)	0.999 994	0.07
30.0~50.0	0.001(0.000 632x <sup>3</sup> -0.020 48x <sup>2</sup> +1.173 6x-3.473)	1.000 000	0.01
50.0~70.0	0.000 01(0.098 4x <sup>3</sup> -7.364x <sup>2</sup> +386.4x-491 1)	1.000 000	0.02
70.0~100	0.000 1(0.015 2x <sup>3</sup> -1.899 6x <sup>2</sup> +123.202x-2 548.87)	1.000 000	0.03
100~150	0.000 1(0.024 87x <sup>3</sup> -4.933 8x <sup>2</sup> +442.021x-13 761.2)	1.000 000	0.05
150~200	0.000 1(0.043 62x <sup>3</sup> -13.474 9x <sup>2</sup> +174 5.043x-80 320.5)	1.000 000	0.03
200~250	0.001(0.008 611x <sup>3</sup> -3.950 83x <sup>2</sup> +707.229 2x-444 35.969)	1.000 000	0.02
250~300	0.001(0.024 638x <sup>3</sup> -16.229 8x <sup>2</sup> +384 6.47x-312 234.219)	0.999 999	0.04

## 2 结 论

通过以上推导过程,可以看出,利用 Excel 软件工具包进行回归分析很容易地求出了已知有限个数据对应符合要求精度的分段函数表达式,整个分析过程计算量小,步骤简单,极适于工程设计中使用。

## 参考资料:

- [1] 建筑工程常用数据系列手册编写组,暖通空调常用数据手册(Z),北京:中国工业出版社,1997
- [2] 曾丹苓,敖越,工程热力学(M),北京:高等教育出版社,1980
- [3] 常兆光,随机数据处理方法(修订版),石油大学出版社,1997
- [4] N. R. Draper H. Smith, Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons, 1966
- [5] 薛殿华,空气调节(M),北京:清华大学出版社,1991
- [6] 陆璇,数理统计基础(M),北京:清华大学出版社,1998

## Deduction of the Regressive Equation between Density and Pressure and between Density and Temperature of Saturated Vapor

LIU Zhan-guo, ZHOU Qi-guo

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045, China)

**Abstract:** Making use of the software Excel, this paper deduced regressive equations between density and pressure and between density and temperature of saturated vapor, at the same time, a new method of regressive interpolation, which is simple and much easy, was suggested.

**Keywords:** saturated vapor; density; saturation vapor pressure; saturation temperature; regression analysis; the software Excel