

# 过热水蒸气比容 $V$ 计算公式的研究\*

邹锦术

(淮海工学院)

**摘 要:** 本文根据统计热力学理论, 推导出过热水蒸气参数从1—120at、160—560℃全部工作范围内, 比容  $V$  实用计算公式。该式计算的百分误差在 $\pm 0.5\%$ 以内, 统一了目前工程上常用的分段经验公式, 可作为蒸汽热力工程计算的基础。

**关键词:** 蒸汽比容, 实用计算公式

**中图分类号:** TK123

以水蒸气为工质的势能动力装置, 日趋进入亚临界及超临界区域工作。由于热物理参数的相关性, 在测量过热水蒸气流量时, 所采用的标准节流装置(如孔板、喷嘴等), 只有维持在设计额定工况下使用, 才能保证测量的精度。在热力生产过程中, 有时偏离设计工况, 如机组在滑参数起停, 或在变参数下运行时, 测得的蒸汽流量将产生显著的误差。这对正确评价机组的经济性能及实现全程自动调节都是不利的。所以, 近年来对高参数大容量机组测量蒸汽流量都引入了蒸汽比容  $V = F(P, T)$  的校正计算。尤其是在节能技术热管理工作中, 计算机应用于热力循环最佳方案的复杂计算时, 都需要将蒸汽比容  $V$  公式化。国际公式化委员会(IFC)提出的工业用公式<sup>[1]</sup>, 为了保证热力性质的一致性, 是以亥姆霍兹(Helmholtz)函数和吉布斯(Gibbs)函数形式表示出来的。但计算公式复杂, 不便于工程实用及简化在线计算的要求。工程上对蒸汽比容  $V$  的公式化, 许多热物理工作者<sup>[2, 3]</sup>作过推荐, 并应用到生产过程中, 取得了有价值的结果。当蒸汽参数变化范围较宽时, 常采用分段公式来完成比容的在线计算。因此, 在工程上给出从低参数滑向高参数, 在全程范围内统一于一个简便的在线计算公式, 是很有价值的研究工作。

本文根据统计热力学理论及回归分析的方法, 推出了过热水蒸气压力1—240at、温度160—560℃范围内比容  $V$  的实用计算公式和  $V$  的指数式计算公式。 $V$  的实用计算公式统一目前常用的分段公式, 是目前较好的计算公式。

## 1 $V$ 的实用计算公式

过热水蒸气不能用理想气体状态方程来描述, 必须注意到同理想气体的区别。从统计

---

\* 收稿日期: 1995-07-28

热力学的观点来看, 这种区别主要是由于过热水蒸气分子间的相互作用及其分子占有一定体积而产生的。许多热物理学者对过热水蒸气状态方程  $F(P, V, T) = 0$  研究得出, 比容  $V$  可用两个独立变数—压力  $P$  和温度  $T$  来描述。

非理想气体的状态方程完整的形式为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{PV}{NKT} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\beta_n}{n+1} \cdot \frac{1}{v^n} \quad (1)$$

最初提出这种级数形式的是卡·昂尼斯 (K·Onnes), 他把各项的系数叫做维里系数, 均为温度的函数。式中:

$N$ —阿弗加德罗常数,  $6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;

$K$ —波尔兹曼常数,  $1.380658 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ;

$v$ —一个分子平均所占的容积,  $\text{m}^3$ ;

$\beta_n$ —不可约集团的积分, 是温度  $T$  的函数。

对理想气体, 相当于分子间不存在相互作用, 则 (1) 式简化为理想气体状态方程:

$$V = \frac{RT}{P} \quad (2)$$

其中,  $R = NK = 8.314510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 称为通用气体常数

对于实际气体, 考虑到分子成对的相互作用以及三个、四个等多个分子相互作用, 必须计入  $v^{-n}$  各项。而第二维里系数约为  $RT10^{-3}$ , 第三维里系数维为  $RT10^{-6}$ , 以后每项维里系数均较前项递次小  $10^{-3}$  数量。因此, 可忽略  $v^{-n}$  的高次项, 则 (1) 式又可简化为:

$$V = \frac{RT}{P} - \frac{\beta_1 RT}{2Pv} \quad (3)$$

可见, 实际气体比容要比理想气体比容偏小, 其差值为  $\frac{\beta_1 RT}{2Pv}$ , 它是温度  $T$  的函数, 令

$$\frac{\beta_1 RT}{2Pv} = f(t) \quad (4)$$

则 (3) 式化为:

$$V = \frac{RT}{P} - f(t) \quad (5)$$

式中,  $T = (273.16 + t)K$ 。

给定工作压力  $P$  及温度  $t$  后, 由水蒸气热力性质表[1]可查得比容  $V$ 。代入 (5) 式, 可逐次求得  $f(t)$  的值, 列于表 1。并进行回归分析。

表 1 函数  $f(t)$  的有关计算值

n	P(at)	t(℃)	$f(t) \times 10^3$	$t^2 \times 10^{-5}$	$f^2(t) \times 10^{-5}$	$tf(t)$
1	10	350	5.2	1.225	2.7	1.82
2	40	450	3.5	2.025	1.2	1.56
3	100	500	2.9	2.500	0.8	1.45
4	100	530	2.6	2.809	0.7	1.38
5	140	550	2.4	3.025	0.6	1.32
6	240	600	2.0	3.600	0.4	1.20
$\Sigma$		2980	18.6	15.184	6.4	8.73

对表 1 中的有关数据作如下处理:

$$\bar{t} = \frac{\sum t}{n} = 496.7, \quad \bar{f}(t) = \frac{\sum f(t)}{n} = 3.1 \times 10^{-3}$$

$$\frac{(\sum t)^2}{n} = 14.8 \times 10^5, \quad \frac{[\sum f(t)]^2}{n} = 5.76 \times 10^{-6}$$

$$(\sum t) \frac{[\sum f(t)]}{n} = 9.238$$

$$L_{t,t} = \sum t^2 - \frac{(\sum t)^2}{n} = 38.334 \times 10^3$$

$$L_{f(t),f(t)} = \sum f^2(t) - \frac{[\sum f(t)]^2}{n} = 6.4 \times 10^{-6}$$

$$L_{t,f(t)} = \sum t \cdot f(t) - \frac{(\sum t) [\sum f(t)]}{n} = -0.508$$

则回归方程的一次项系数  $a$  及常数项  $b$  各为:

$$a = L_{t,f(t)} / L_{t,t} = -1.32 \times 10^{-5}$$

$$b = \frac{\sum f(t)}{n} - a \frac{\sum t}{n} = 9.7 \times 10^{-3}$$

所以得,

$$f(t) = 9.7 \times 10^{-3} - 1.32 \times 10^{-5} t \quad (6)$$

把(6)式及  $RT$  值代入(5)式, 则得:

$$V = \frac{4.71 \times 10^{-3} t + 1.286}{P} + 1.32 \times 10^{-5} t - 9.7 \times 10^{-3} \quad (7)$$

这就是我们所要求的统一形式的过热水蒸气比容  $V$  的实用计算公式。

为检验该式的计算精度, 在给定工作压力  $P$  和温度  $T$  的情况下, 将其计算结果与用水蒸气表[1]查得的数值作对比, 其百分误差  $\delta$  分别列于表 2。表 2 中折线以上表示过热度在 20—100℃ 以下, 为临近饱和状态区。这个区域除了在锅炉过热器入口处以外, 是很少用到的。

实用计算公式(7)在保证误差± 1%范围内统一目前常用的分段公式，见表 3。

表 2 用公式(7)计算 V 值

t (℃)	$V(\frac{m^3}{kg})$ δ (%)	$Pkg/cm^2$										
		1	7	13	20	40	80	100	140	170	200	240
100	V	1.7486										
	δ	+1.00										
240	V	2.4099	0.33867									
	δ	+0.16	+0.8									
320	V	2.7877	0.39355	0.20939	0.13418							
	δ	+0.06	+0.17	+0.28	-0.50							
400	V	3.1656	0.44844	0.23942	0.15408	0.07483	0.03521	0.02728				
	δ	+0.05	0.00	-0.03	-0.12	-0.01	-0.32	-0.09				
440	V	3.3545	0.47590	0.25445	0.16403	0.08007	0.03809	0.02969	0.02009			
	δ	+0.04	0.00	-0.03	-0.01	-0.26	-0.34	-0.23	+0.33			
500	V	3.6379	0.51700	0.27698	0.17895	0.08792	0.04241	0.03331	0.02291	0.01832	0.01511	0.01207
	δ	+0.05	+0.12	-0.01	-0.08	-0.22	+0.36	-0.47	-0.47	-0.39	-0.39	-0.27
530	V	3.7796	0.53762	0.28824	0.18641	0.09185	0.04457	0.035119	0.02431	0.01955	0.01621	0.01306
	δ	+0.06	+0.04	+0.01	+0.00	-0.08	-0.2	-0.03	-0.29	-0.2	-0.13	-0.01
550	V	3.8741	0.55134	0.29575	0.19138	0.09447	0.04502	0.03632	0.02525	0.02036	0.01694	0.01371
	δ	+0.08	+0.06	+0.05	+0.02	0.00	-0.04	-0.08	+0.04	0.00	+0.10	-0.27
580	V	4.0158	0.57193	0.30701	0.19885	0.09840	0.04818	0.03813	0.0266	0.02159	0.01805	0.01470
	δ	+0.07	+0.10	0.00	+0.12	+0.15	+0.24	0.23	-0.43	+0.5	+0.6	+0.90

表 3 公式(7)与常用计算公式适用范围比较

计算 公式	Pat	1	7	30	80	100	140	170	200	240
	t /℃	120	320	400	440	500	530	540	560	580
*	$V \frac{m^3}{kg}$	1.828	0.3929	0.10135	0.03822	0.03347	0.02438	0.01998	0.017262	0.014564
①	V	1.835	0.3530	—	—	—	—	—	—	—
	δ %	+0.38	-2.51	—	—	—	—	—	—	—
②	V	—	—	—	0.03881	0.03376	—	—	—	—
	δ %	—	—	—	+1.50	+0.86	—	—	—	—
③	V	—	—	0.10064	0.03859	0.03357	0.02429	0.01979	—	—
	δ %	—	—	-0.70	+0.97	+0.30	-0.35	-0.91	—	—
④	V	—	—	—	—	0.03344	0.02439	0.01992	0.01711	—
	δ %	—	—	—	—	-0.08	+0.04	-0.30	-0.88	—
⑤	V	—	—	—	0.03854	0.03348	0.02434	0.01994	0.01725	0.01461
	δ %	—	—	—	+0.86	+0.03	-0.15	-0.17	-0.07	+0.32
⑥	V	—	0.3925	0.10143	0.03839	0.03339	0.02423	0.01981	—	—
	δ %	—	-0.09	+0.09	+0.44	-0.24	-0.60	-0.85	—	—
⑦	V	1.843	0.39355	0.10125	0.03809	0.0331	0.02431	0.019954	0.01731	0.014696
	δ %	+0.82	+0.17	-0.1	-0.34	-0.47	-0.29	-0.13	+0.28	+0.90

注:

① $V = \frac{1}{212.3p}(t + 273 - 3.40p)$ 文献[3]

② $V = \frac{1}{2.01p}(\frac{1}{100} - 0.274\frac{p}{100} + 2.06)$ 文献[5]

③ $V = \frac{1}{182p}(t - 0.55p + 166)$ 文献[3]

④ $V = \frac{1}{154.5p}(t - 0.477p - 64.4)$ 文献[3]

⑤ $V = \frac{1}{227.3p}[t + 333.7 - (\frac{740 - 1}{330})p]$ 文献[3]

⑥ $V = \frac{0.00471t + 1.283}{p} - \frac{1}{0.9t - 110}$ 文献[4]

⑦ $V = \frac{0.00471t + 1.286}{p} + 1.32 \times 10^{-5}t - 0.0097$ 本文

\*：为便于比较，将原著各公式都转写为比容 V 表达式。

2 V 的指数式公式

对于如何将蒸汽比容 V 用指数式公式来表达，由于这个问题难度较大，至今尚未见到适合使用的较好的公式。但对于某些热力动力装置又要求使用这种形式的公式。我们采用最小二乘法，推导比容 V 的指数式公式。令

$$V=KP^bt^c \tag{8}$$

其中，K、b 和 c 是待定的常数。对 (8) 式两边取对数，得：

$$lgV=lgK+blgP+clgt \tag{9}$$

设  $lgV=y, \quad lgK=a, \quad lgP=x_1, \quad lgt=x_2$

则 (9) 式化为：

$$y=a+bx_1+cx_2 \tag{10}$$

$$Q=\sum_{i=1}^n[y_i-(a+bx_{1i}+cx_{2i})]^2 \tag{11}$$

由  $\frac{\partial Q}{\partial a}=0, \quad \frac{\partial Q}{\partial b}=0, \quad \frac{\partial Q}{\partial c}=0$ ， 则得：

$$na+b\sum_{i=1}^nx_{1i}+c\sum_{i=1}^nx_{2i}=\sum_{i=1}^ny_i \tag{12}$$

$$a\sum_{i=1}^nx_{1i}+b\sum_{i=1}^nx_{1i}^2+c\sum_{i=1}^nx_{1i}x_{2i}=\sum_{i=1}^nx_{1i}y_i \tag{13}$$

$$a\sum_{i=1}^nx_{2i}+b\sum_{i=1}^nx_{1i}x_{2i}+c\sum_{i=1}^nx_{2i}^2=\sum_{i=1}^nx_{2i}y_i \tag{14}$$

给定工作压力 P 及温度 t 后，由水蒸气热力性质表可查得比容 V，列入表 4。

表 4 在特定条件下水蒸气的 V 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P(at)	1	7	30	80	100	140	170	200	240
t(℃)	120	320	400	440	500	530	540	560	580
V(m <sup>3</sup> /kg)	1.8280	0.3929	0.10135	0.03822	0.03347	0.02438	0.01998	0.017262	0.014564

因此，可以算出：

$$a=-0.6598, \quad b=-1.0085, \quad c=0.4421$$

又由 lgK=a，可得 K=0.2189。将 K、b、c 各值代入(8)式，则得：

$$V=0.2189t^{0.4421}\cdot P^{-1.0085} \tag{15}$$

这就是我们要求的比容 V 指数式计算公式。这个公式的计算精度远不如公式(7)，在使用时应检查是否满足精度要求。

### 3 结论

3.1 实用计算公式(7)在保证误差 $\pm 1.0\%$ 范围内统一目前常用的分段公式,它是目前较好的实用计算公式。

3.2 实用计算公式(7)适用于工作压力 $1\sim 120\text{kg}/\text{cm}^2$ ,温度 $160\sim 560^\circ\text{C}$ 变化范围内,其百分误差在 $\pm 0.5\%$ 以内。如果精度降低到 $\pm 1.0\%$ 以内使用,则工作温度可以扩展到 $100\sim 580^\circ\text{C}$ 之间使用。

3.3 指数式计算公式(15),其计算精度较低,使用时应检查是否满足误差要求。

### 参 考 文 献

- 1 西安热工研究所译.水和水蒸气性质图表.水利电力出版社.1977.
- 2 钱忠韩.电力技术通讯.1980.3
- 3 Е. А. Щорныйков. Теплоэнергетика. 1966, No 1.
- 4 黄娥.工业仪表与自动化装置.1981.No3
- 5 王竹溪.统计物理学导论.人民教育出版社.1979.2
- 6 中国科学院数学研究所.常用数理统计方法.科学出版社.1979.3

## A Study of the Practical Formula of Specific Volume $V$ for Hot-shot Steam

Zou Jinshu

(Huaihai Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper the practical formula of the specific volume  $V$  for hot-shot steam in the range of parameters from 1 to 240 at and from 160 to 560 $^\circ\text{C}$  is derived from the theory of statistical thermodynamics, and its error in calculating is within  $\pm 0.5\%$ . This formula unifies those empirical formulas being usually used in different section in engineering. It can be also used as a basis for the calculation of steam thermodynamic engineering.

**Keywords:** steam specific volume, calculation formula